[UCI]I804:24011-200000232706

2006년 8월

박사학위 논문

단일공 파형 중첩 모델링 자료에 의한 발파진동의 예측

조선대학교 대학원

자원공학과

김 종 인

단일공 파형 중첩 모델링 자료에 의한 발파진동의 예측

Prediction of Blasting Vibration by Superposition Modeling Data of Single Hole Waveform

2006년 8월 25일

조선대학교 대학원

자원공학과

김 종 인

단일공 파형 중첩 모델링 자료에 의한 발파진동의 예측

지도교수 강 추 원

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함

2006년 4월 일

조선대학교 대학원

자원공학과

김 종 인

김종인의 박사학위 논문을 인준함

위원장 한국지질자원연구원 박 사 류 창 하 印

위 원 조 선 대 학 교 교 수 고 진 석 印

위 원 원앤비기술사사무소 박 사 원 연 호 印

위 원 순 천 대 학 교 연구교수 강 성 승 印

위 원 조 선 대 학 교 교 수 강 추 원 印

2006년 6월 일

조선대학교 대학원

<목 차>

List of Tables ····· iv
List of Figures ····· vi
Abstract ····· x

1. 서론 ····· 1
2. 이론적 배경 ····· 7
2.1 발파 진동 이론 ····· 7
2.1.1 진동의 기본용어 ····· 7
2.1.2 파동의 중첩과 간섭 ····· 12
2.1.3 진동량의 표현 ····· 15
2.2 발파에 의한 암석파쇄이론 ····· 16
2.2.1 Crater 이론 ····· 16
2.2.2 기체 팽창 이론 ····· 17
2.2.3 반사파 이론 ····· 17
2.2.4 충격파와 가스압 이론 ····· 18
2.3 파동의 전파 이론 ····· 19
2.3.1 종파와 횡파의 전파 ····· 21
2.3.2 Rayleigh파의 전파 ····· 26
2.4 발파 진동의 발생과 전파 ····· 31
2.4.1 발파 진동의 발생 ····· 31
2.4.2 발파 진동 전파 ····· 35
2.5 발파 진동의 예측 방법 ····· 38

2.5.1 환산거리의 유도 ····· 39
2.5.2 95% 신뢰식의 설정 ····· 42
3. 지발당 장약량에 대한 이론적 고찰 ····· 43
3.1 개요 ····· 43
3.2 지발당 장약량에 미치는 뇌관의 발화 오차의 영향 ····· 46
3.3 전파 속도의 영향 ····· 48
3.4 8ms 기준과 Langefors 시차이론에 대한 고찰 ····· 51
3.4.1 8ms 기준에 대한 고찰 ····· 51
3.4.2 Langefors의 시차이론에 대한 고찰 ····· 54
3.5 Langefors 시차 이론에 의한 8ms 기준의 해석 ····· 57
4. 현장 실험 ····· 61
4.1 개요 ····· 61
4.2 실험 지역의 지형 및 지질 ····· 61
4.3 현장 실험 방법 및 결과 ····· 64
4.3.1 실험 방법 ····· 64
4.3.2 현장 실험의 계측 ····· 67
4.3.4 현장 실험 계측 결과 ····· 72
5. 발파진동의 중첩모델링 ····· 74
5.1 대상 파형의 선정 ····· 74
5.2 파형 중첩 모델링을 통한 지연 단차 결정 ····· 79
5.2.1 29m 파형의 지연 단차의 결정 ····· 80
5.2.2 69m 파형의 적용 ····· 83
5.3 발파진동 중첩 모델링 ····· 85
5.3.1 공수 증가에 따른 진동 속도의 변화 ····· 86
5.3.1.1 SN. 1의 중첩 모델링 결과 ····· 87

5.3.1.2 SN. 2의 중첩 모델링 결과 ····· 93
5.3.1.3 SN. 3의 중첩 모델링 결과 ····· 99
5.3.1.4 SN. 4의 중첩 모델링 결과 ····· 105
5.3.2 단일공 파형 중첩모델링에 대한 고찰 ····· 111
6. 발파 진동의 예측 ····· 113
6.1 환산거리식에 의한 예측 ····· 113
6.2 환산거리 방식을 이용한 중첩 모델링 자료의 분석 ····· 116
6.3 중첩 모델링 자료와 실제 계측 자료의 비교 ····· 124
6.4 단일공 파형 중첩 모델링에 의한 발파진동의 예측 ····· 128
6.4.1 개요 ····· 128
6.4.2 중첩 모델링에 의한 예측 방법 ····· 129
7. 고찰 ····· 131
7.1 발파진동 예측방법 ····· 131
7.2 사전 발파진동 예측방법과 문제점 ····· 132
7.3 환산거리 방식의 문제점 ····· 132
7.4 간섭 영향이 발파진동 예측에 미치는 영향 ····· 133
7.5 단일공 파형의 중첩 모델링에 의한 발파진동 예측 ····· 134
8. 결론 ····· 136
참 고 문 헌 ····· 140
APPENDIX ····· 149

<List of Tables>

Table 2.1 Vibration unit ····· 15
Table 2.2 The shock wave value of total energy ····· 19
Table 2.3 Variable considered in a dimensional analysis of explosion phenomena(Ambraseys and Hendron, 1968) ····· 40
Table 4.1 Result of rock property test ····· 62
Table 4.2 Applied design parameter for some of the shots ····· 65
Table 4.3 Instrument specifications ····· 68
Table 4.4 Measurement result ····· 73
Table 5.1 Delay time of using detonator and analysis delay interval of SN. 3 ····· 81
Table 5.2 Modelling results on SN. 1 ····· 88
Table 5.2 Continued ····· 89
Table 5.3 Modelling results on SN. 2 ····· 94
Table 5.3 Continued ····· 95
Table 5.4 Modelling results on SN. 3 ····· 100
Table 5.4 Continued ····· 101
Table 5.5 Modelling results on SN. 4 ····· 106
Table 5.5 Continued ····· 107
Table 6.1 Results of regression analysis using real data ····· 113
Table 6.2 Input value of regression analysis on 1ms peak value ····· 116
Table 6.3 Input value of regression analysis on 0.5T peak value ····· 117
Table 6.4 Input value of regression analysis on 1T peak value ····· 117

Table 6.5 Input value of regression analysis on 1.5T peak value ····· 117
Table 6.6 Input value of regression analysis on 2T peak value ····· 118
Table 6.7 Summary of regression output ····· 118
Table 6.8 Summary of regression output between the real data and the modeling data ····· 126

<List of Figures>

Figure 2.1 Harmonic oscillation ····· 11
Figure 2.2 The size of sine wave vibration ····· 11
Figure 2.3 Constructive interference ····· 14
Figure 2.4 Destructive interference ····· 14
Figure 2.5 Body wave and Rayleigh wave. ····· 20
Figure 2.6 Vertical displacement component of P wave, S wave and Rayleigh wave in a short duration period ····· 20
Figure 2.7 Stress on a small element of an infinite elastic medium ····· 21
Figure 2.8 Coordinate convention for elastic half-space ····· 27
Figure 2.9 Advancing detonation in blast hole produces shot period detonation pressure and long period explosion pressure (Dick, 1968) ····· 33
Figure 2.10 Near-hole blast cracking(Dupont, 1977) ····· 34
Figure 2.11 Elastic wave motion ····· 37
Figure 2.12 Measuring direction of ground vibration ····· 38
Figure 3.1 The structure of electric detonator ····· 47
Figure 3.2 Distribution of firing times for two-delay caps(Tavg=326 and 360ms; standard deviation=19ms) ····· 48
Figure 3.3 The effect of velocity of sound ····· 50
Figure 3.4 Typical recording instrument positions and firing angles for a 3 hole blast, with a firing sequence of 1, 2, 3 from left to right(Linehan and Wiss, 1980) ····· 53

Figure 3.5 Ground vibrations from five different charges and with delays 0~100ms(Langefors and Kihlström, 1978) ····· 56
Figure 3.6 Relationship of delay time and frequency ····· 60
Figure 4.1 Geological map of study area ····· 63
Figure 4.2 Blasting pattern ····· 66
Figure 4.3 Firing times for a pattern ····· 66
Figure 4.4 Measurement location ····· 69
Figure 4.5 Charging view ····· 70
Figure 4.6 Case 1 of measurement instrument(DS 477) ····· 70
Figure 4.7 Case 2 of measurement instrument(DS 477) ····· 71
Figure 4.8 Case 3 of measurement instrument(Minimate Plus) ····· 71
Figure 5.1 Full waveform of SN. 1 ····· 75
Figure 5.2 Waveform of sampled single hole ····· 75
Figure 5.3 Result of FFT analysis sampled single hole ····· 75
Figure 5.4 Full waveform of SN. 2 ····· 76
Figure 5.5 Waveform of sampled single hole ····· 76
Figure 5.6 Result of FFT analysis sampled single hole ····· 76
Figure 5.7 Full waveform of SN. 3 ····· 77
Figure 5.8 Waveform of sampled single hole ····· 77
Figure 5.9 Result of FFT analysis sampled single hole ····· 77
Figure 5.10 Full waveform of SN. 4 ····· 78
Figure 5.11 Waveform of sampled single hole ····· 78
Figure 5.12 Result of FFT analysis sampled single hole ····· 78
Figure 5.13 Measured waveform of 29m ····· 81
Figure 5.14 Superposition time and position of single hole ····· 82

Figure 5.15 Result of superposition modeling ····· 82
Figure 5.16 Measured waveform of 69m ····· 84
Figure 5.17 Result of superposition modeling ····· 84
Figure 5.18 Superposition results of SN. 1(2hole~15hole) ····· 90
Figure 5.19 Superposition result of SN. 1 ····· 91
Figure 5.20 First peak velocity vs. hole number(1ms) ····· 92
Figure 5.21 Second peak velocity vs. hole number(6ms) ····· 92
Figure 5.22 Superposition results of SN. 2(2hole~15hole) ····· 96
Figure 5.23 Superposition result of SN. 2 ····· 97
Figure 5.24 First peak velocity vs. hole number(1ms) ····· 98
Figure 5.25 Second peak velocity vs. hole number(9ms) ····· 98
Figure 5.26 Superposition results of SN. 3(2hole~15hole) ····· 102
Figure 5.27 Superposition result of SN. 3 ····· 103
Figure 5.28 First peak velocity vs. hole number(1ms) ····· 104
Figure 5.29 Second peak velocity vs. hole number(8ms) ····· 104
Figure 5.30 Superposition results of SN. 4(2hole~15hole) ····· 108
Figure 5.31 Superposition result of SN. 4 ····· 109
Figure 5.32 First peak velocity vs. hole number(1ms) ····· 110
Figure 5.33 Second peak velocity vs. hole number(13ms) ····· 110
Figure 6.1 Relationship of PPV and Square root scaled distance ····· 115
Figure 6.2 Relationship of PPV and Cube root scaled distance ····· 115
Figure 6.3 Result of regression analysis on 1ms peak value(Square root Scaled Distance) ····· 119
Figure 6.4 Result of regression analysis on 1ms peak value(Cube root Scaled Distance) ····· 119

Figure 6.5 Result of regression analysis on 0.5T peak value(Square root Scaled Distance) ····· 120
Figure 6.6 Result of regression analysis on 0.5T peak value(Cube root Scaled Distance) ····· 120
Figure 6.7 Result of regression analysis on 1T peak value(Square root Scaled Distance) ····· 121
Figure 6.8 Result of regression analysis on 1T peak value(Cube root Scaled Distance) ····· 121
Figure 6.9 Result of regression analysis on 1.5T peak value(Square root Scaled Distance). ····· 122
Figure 6.10 Result of regression analysis on 1.5T peak value(Cube root Scaled Distance) ····· 122
Figure 6.11 Result of regression analysis on 2T peak value(Square root Scaled Distance) ····· 123
Figure 6.12 Result of regression analysis on 2T peak value(Cube root Scaled Distance) ····· 123
Figure 6.13 Relationship of real data and modeling data(Square root Scaled Distance) ····· 127
Figure 6.14 Relationship of real data and modeling data(Cube root Scaled Distance) ····· 127
Figure 6.15 Procedure for prediction of blasting vibration ····· 130

ABSTRACT

Prediction of Blasting Vibration by Superposition Modeling Data of Single Hole Waveform

Kim Jong-in
Advisor : Prof. Kang Choo-won
Department of Resource Engineering,
Graduate School of Chosun University

The blasting vibration prediction in the country is mainly carried out by the scaled distance method. But, this method needs a real-scale blasting. Recently, the blasting vibration prediction is performed by charging a borehole for a geological investigation and by measuring a blasting vibration as a trial predicting the influence range of a blasting vibration at a stage of pre-investigation before beginning a construction of a tunnel etc.. However, this prediction method is difficult of reflection with the characteristics of real blasting vibration propagation.

An additional method for prediction of blasting vibration is the 'numerical analysis' as a prior prediction method. It must be verified for a result of numerical analysis.

In order to overcome these defects occurring between the 'scaled distance method' and 'numerical analysis', we have adopted the following methods: initially, we developed a new method for the prediction of

blasting vibration by means of a superposition modeling data using a single hole blasting waveform. Then, the delay interval theory had been verified with a compatible superposition model. Next, the relationship between the size of blasting vibration and frequency was defined using the superposition modeling data obtained from a single borehole waveform. Finally, the change in magnitude of blasting vibrations was clarified by increasing the number of holes and delay intervals.

Langefors' 2.5T criterion is discussed instead of 8ms, 17ms, 25ms suggested by scholars as intervals which a vibration does not affect an adjacent hole. In case of less than 8ms, the frequency range of 1~200Hz was contained under the section between 0.5 and 1T. Furthermore, the lowest vibration velocity was observed by a destructive interference each other at 60Hz and the higher vibration velocity than 60Hz was also observed in other frequency range. In case of 17ms, both the constructive and destructive interferences were appeared in the frequency range of 1~ 150Hz and the interference of an adjacent blasting was disappeared at approximately over 150Hz.

On the other hand, both the constructive and destructive interferences in case of 25ms were appeared the frequency range of 1~100Hz, and the interference was disappeared over 100Hz.

In order to verify the reliability of the superposition modeling, the delay interval induced from 29m on the same blasting is applied to one of 69m. The result was showed a similar waveform. It means that the compatibility of the superposition modeling through single hole waveform was verified.

Moreover, the variation of a vibration velocity with increasing the number of holes is investigated through the superposition modeling. Then, the dominant frequency of a single hole waveform and the variation of vibration in accordance with delay intervals was compared and analyzed with Langefors' delay interval definition.

Modeling is performed that the delay intervals were increasing from 1ms to 80ms with 1ms interval and the number of holes from 2 to 15. The analyzed result was good agreement with Langefors' delay interval definition. In addition, a vibration velocity increases with increasing the number of holes, and then converges at constant the number of holes.

The analyzed result on data, which shows the scaled distance equation using the measured data from the field and the highest or the lowest vibration velocity of the peak vibration velocities produced by a superposition modeling of a single hole waveform, was compared and analyzed. By the results, the measured data in 95% reliance almost corresponds with the superposition modeling data of 1ms; moreover, the measured data in 50% reliance nearly corresponds with one of 2T. The superposition modeling data of 1T also shows an appearance being across between 50% and 95% reliance. It suggests that the measured data occurs in the delay interval range of 1ms, 1T, 1.5T and 2T, appearing at the superposition modeling. However, the superposition modeling data of 0.5T is different one from the measured data. The fact, which the analyzed result by superposition modeling data of 0.5T is not accordance with the measured data means that the delay interval of a real blasting in the field does not occur in the range of 0.5T.

It is identified that the prediction equation of a blasting vibration by means of the superposition modeling done by a single hole waveform is almost similar with the scaled distance equation by means of data obtained from a real blasting. Therefore, it is estimated that after obtaining a single hole waveform by a single hole blasting in a blasting area planned, and superposition modeling this waveform, the suitability on the method predicting the blasting vibration propagation equation for a site blasting is verified.

1. 서론

화약이 산업계에 도입된 후 화약발파는 유용 광물 자원의 채취, 댐, 고속도로 및 지하철 건설 등 광업, 토목, 건설 분야의 각종 작업에서 암반 굴착을 위한 방법으로 널리 이용되고 있다. 암반굴착을 위한 발파 설계시 각 설계 변수들은 효율성, 안정성 및 안전성 등의 측면에서 검토되어야 한다.

안전성의 문제는 발파에 의해 야기되는 발파 재해와 관련된 것으로서 도심지 밀집지역의 각종 공사 증가와 함께 발파가 주위 환경에 미치는 영향은 매우 심각한 사회문제로 대두 되고 있다. 발파 재해의 주원인은 발파로 인하여 발생하는 발파진동, 소음 또는 폭풍압과 파쇄된 암석의 비산 등을 들 수 있으며 이로 인하여 공사장과 인접한 민가, 건물 등의 구조물에 피해를 주거나 인체에 영향을 미치며 때로는 인명사고를 가져오기도 한다.

특히 근래에는 지하철 건설공사, 도시 재개발 사업, 각종 터널공사 등에 따라 인구가 밀집한 지역에서 발파를 이용한 암반굴착 작업이 증가하고 경제성장, 사회 의식구조의 변화와 함께 발파 재해에 대한 민원문제가 급증하여 안전성은 발파설계의 가장 우선적인 기준으로 대두 되고 있다. 이러한 상황에서 발파에 의한 작업은 더욱 규제를 받게 되고, 발파 기술자들은 종래의 발파 방법보다 효과적으로 진동제어를 하려는 관점에서 많은 노력을 기울이고 있는 상황이다.

발파에 의한 공해 요인 중 발파진동의 전파 특성을 결정짓는 인자는 크게 입지조건과 발파조건으로 나눌 수 있다. 입지조건은 발파부지와 인근 구조물의 기하학적 형태, 대상암반의 지질학적 특징 및 역학적 성질 등을 예로 들 수 있으며, 발파조건은 사용하는 폭약의 종류, 지발당 장약량, 기폭방법, 전색상태, 자유면의 수, 발파유형, 폭원과 측점간의 거리 등을 가리킨다.

이 인자들 모두가 발파진동의 크기와 전파특성에 영향을 미치게 된다. 이 중에서 특히 지발당 장약량과 측점간의 거리가 가장 중요한 요인으로 작용하나, 측점간의 거리는 조절 불가능한 변수인 반면, 조절 가능한 변수인 지발당 장약량이 동일한 발파작업의 조건일 경우 발파 설계에 있어 가장 중요한 인자가 된다. 이 지발당 장약량은 현재 우리나라에서 발파진동의 예측에서 대부분 사용되는 환산거리식의 주요 변수이다. 지발당 장약량은 동시에 기폭되는 장약 혹은 공간의 지연단차가 8ms 이하인 장약들의 총합으로 정의할 수 있다. 이러한 근거는 USBM(United States Bureau of Mines)에서 발간한 RI(Report of Investigations) 6151(Duvall et al., 1963)을 바탕으로 마련된 것이다.

발파진동을 예측하는 또 다른 연구는 Langefors(1978)에 의해 이루어 졌으며 발파진동의 예측에 있어서 USBM의 환산거리개념에 해당되는 장약레벨(Charge levels) 개념을 도입하였으며 환산거리 방식의 지발당 장약량 개념에 해당되는 협동장약(Cooperating charges)의 개념을 사용하였다. 협동장약은 단당 총장약량으로 정의되며 뇌관의 발화 오차와 지반의 주주파수를 고려한 감쇠인자(Reduction factor)를 곱하여 협동장약량을 산출하였다. 또 인접 단차간의 간섭을 피할 수 있는 지연단차에 대해서는 지반의 주주파수에서 산출되는 주기(T)의 3배 이상인 단차를 주장하였다(Langefors, 1949).

그 외에도 많은 발파진동에 대한 예측 방법(Crandell, 1949; Morris and Westwater, 1953; Attewell, 1965; Langefors, 1978)이 연구 되었다. 이들 중 발파진동을 다루는 데 더 효과적인 개념이라 여겨 국내에서는 환산거리 방식을 사용하고 있다.

지발당 장약량(Weight per delay)과 협동장약(Cooperating charge) 개념의 차이는 지반의 주파수 고려 여부로 구분될 수 있다. 이후 발파진동에 있어서 주파수는 구조물의 진동 허용기준 설정에서 대두 되었다. 1983년

OSM(Office of Surface Mining)에서 발표한 발파진동의 규제는 최대 진동속도와 주파수의 두 가지 항목으로 규제의 범위를 확대하였다.

발파진동연구는 전파해오는 진동의 크기와 관련된 분야와 전파해 온 진동이 구조물이나 인체 혹은 가축 등에 미치는 영향의 정도를 연구하는 분야로 나누어 볼 수 있다. 환산거리 개념에서는 전자의 경우 주파수를 고려하지 않는 반면 후자는 주파수를 고려한 사실로 미루어 볼 때, 주파수 대역에 따라 허용진동 기준을 달리하는 방식으로 발전했을 것으로 판단된다.

발파진동의 인접 단간 간섭 단차에 대해 연구한 다른 연구결과에 의하면, Wiss와 Linehan(1978)은 17ms를 주장하였고 NECGB(Nobel's Explosives Co. of Great Britain)에 의해 수행 된 연구 결과에서는 25ms 시차가 가장 낮은 진동 수준을 보인다고 주장하였다. 그럼에도 불구하고 8ms의 기준에 따른 환산거리 방식은 발파진동의 예측에 있어서 높은 예측의 정확도와 간편함으로 인해 오늘날 까지 널리 통용되고 있다.

그러나 8ms 기준에 대한 발파 기술자들의 많은 의구심과 더불어 1989년 Explosives and Blasting Technique의 제 15회 정기 총회에서 Douglas Anderson은 8ms 기준은 너무 긴 시차라고 지적하였으며 Linehan and Wiss는 1980년에 폭풍압과 진동의 크기들은 초기 방향성, 지연시차, 공간격, 그리고 전달 속도에 의해서 영향을 받는다는 것을 증명하는 실험을 시행하였다.

Siskind and David(2000)는 "Vibrations from Blasting"의 저서에서 8ms 기준에 대해 그들의 결과는 전혀 놀라운 것이 아니며, 지반의 주파수가 30Hz이고 두 번째 파가 8ms 시차로 도착한다면 8ms는 첫 번째 파의 1/4주기(T)인 지점에 불과 하다고 서술하고 있다.

또 최근의 연구 결과에 의하면 Reisz(2006)등은 8ms 기준은 새로운 지역의 개략적 약량의 산출 등의 제한된 범위에서 사용될 수 있으며 환산거리 개

념의 재 정의를 논하였다.

한편 발파진동의 모델링(modelling)을 통해 지발 간격을 달리하였을 때에 발파 진동의 감소 효과에 관한연구(Hinzen, 1988)가 발표 되었으나 공수의 증가와 주파수변화에 따른 발파진동의 변화는 고려하지 않았다.

국내에서의 발파진동에 대한 연구 중 주파수와 관련된 발파 진동의 연구 결과를 살펴보면 김대상(1991)은 발파진동의 속도 및 주파수를 고려한 허용 진동치 결정에 관한 연구를 수행했다. 임한욱(1992)등은 발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구를 시행하였으며 류창하(1995)는 발파에 의한 지반 진동의 수준 및 주파수 특성 예측에 관한 연구를 시행했다. 이러한 연구들은 발파진동의 주파수 특성에 대한 연구 분야이지만 발파진동의 발생과 전파에 있어서 지연단차와 전파속도, 방향성 등에 따른 발파진동과 주파수의 관계에 대한 연구를 한 것은 아니었다. 또한, 신일재(2001)등은 발파진동의 크기에 영향을 주는 또 다른 인자인 최소저항선이 발파진동의 크기에 미치는 영향을 연구하였다.

다른 한편으로는 강추원(2005)등에 의한 주주파수를 고려한 협동장약 특성에 관한 연구에 의하면 발파진동은 거리와 주파수 정도에 따라 파의 간섭 정도가 상이하며 이 간섭의 정도는 발파진동의 크기에 영향을 주는 것으로 보고되고 있다.

국내의 대부분의 발파진동에 대한 연구 결과들은 8ms 기준에 준하는 연구 결과들이며 발파진동에 있어서 주파수의 고려 또한 전파해온 진동이 구조물 등에 미치는 영향정도에 대한 연구가 대부분이다.

최근 국내에서는 터널 등의 공사 시행 전 사전 조사단계에서 발파진동의 영향권을 예측하려는 시도로서 지질 조사용 시추공 등에 장약을 하고 발파 진동을 측정하여 본 발파의 발파진동을 예측하는 방법이 사용되고 있으나 실제 터널을 굴착할 때 발생하는 진동의 전달 특성과는 차이가 있는 것으로 나

타났다(임성식과 양형식, 2003).

발파진동을 사전에 예측하는 방법으로 다양한 수치 해석적 모델링이 설계에 적용되고 있으나 검증이 미비하며, 결과에 대한 검증 과정이 수반되어야 할 필요가 있다(류창하, 2003). 이러한 수치 해석적 모델링방법은 발파현상이 폭발적인 동적 압력에 의해 짧은 시간동안 일어나는 특징이 있어, 실제 발파에서 나타나는 순간적인 충격에 의한 변형 파괴 거동 및 발파압력이 전파되어 가면서 발생되는 감쇠 현상을 수치 해석적으로 정확히 모사하는 것은 매우 어렵다. 이러한 수치 해석적 방법의 단점을 보완하기 위하여 실측진동파형을 이용한 발파진동을 예측하는 동해석 기법에 관한 연구를 수행하였다(최성웅 등, 2004).

본 연구와 유사한 연구인 발파진동 저감방법에 관한 연구(석철기, 1998)에 의하면 발파에 의해 발생된 진동파형을 적극적으로 간섭 시켜 단일공 기폭에 의한 최대 진동 속도에 비해 약 1/5의 작은 진동속도가 산출될 수 있었다. 그러나 이 연구는 지연단차를 결정하는 방법으로 자기 상관함수를 사용하여 진동이 가장 작아지는 단차를 결정해 나가는 방법을 채택하였으며 진동파형의 주파수를 고려하지는 않았다. 그러므로 이 연구가 행해진 것처럼, 하나의 Mortar block에서 단일공 파형을 측정하여 지연단차를 결정하고 다른 Mortar block에서 지발발파를 행하여 진동을 저감시키는 것은 가능하나 현장 적용에서 거리와 측정지점에 따라 변화되는 파의 형태에 대해서 매번 진동을 측정하고 지연단차를 결정해야 한다. 또한, 이 연구는 발파진동의 저감방법에 관한 연구이며 발파진동의 예측에 관한 연구는 아니다.

국내에서는 주로 환산거리방식에 의해 발파진동을 예측한다. 그러나 이러한 환산거리방식은 실규모의 발파가 시행되어져야 한다. 그러므로 본 연구에서는 지연단차에 의한 영향으로 발파진동이 상쇄 및 보강간섭 상태에 놓여 진동의 크기가 큰 폭으로 분산되는 점을 감안하여 단일공 파형의 중첩모델링

에 의해 실제 발파에서 발생할 수 있는 진동 속도를 산출하였다. 또한, 이들 중첩모델링 자료 중 모델링 지점별 가장 큰 진동 속도를 토대로 환산거리 방식을 사용하여 발파진동을 예측하는 방법을 개발하였다.

이러한 발파진동의 예측 방법은 실제 규모의 시험 발파가 행해지기 어려운 설계단계의 공사 및 공사후의 민원의 시시비비를 가리는 방법으로 대단히 유용할 것으로 기대된다. 또한, 충분한 계측자료를 얻을 수 없는 공사의 사전 및 사후의 영향권 분석을 위해 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

이를 위해 본 연구에서는 중첩모델링의 적합성을 검증하고 기존 시차이론에 대하여 고찰하였다. 또한, 전파해온 발파 진동의 크기와 주파수의 관계를 단일공 파형에 의한 중첩모델링을 통하여 고찰하고 공수의 증가와 지연 단차를 고려한 중첩모델링에 의해 예견되는 발파진동 자료를 환산거리방식을 토대로 최적합 직선을 도출하는 새로운 발파진동 예측 방법을 개발하였으며 현장의 실 계측자료를 사용한 환산거리식과 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1 발파 진동 이론

진동이란 구조물이나 지반 등이 동적인 외력의 영향을 받아 운동적 평형위치로부터 시간의 경과와 함께 반복 위치가 변화하는 운동현상을 말한다. 구조물의 대부분은 탄성체이기 때문에 어떤 작용에 의하여 크고 작은 진동을 받는 것은 말할 필요도 없다. 이러한 진동에 의하여 구조물은 부분적인 파손을 일으킨다든가, 유해한 소음을 발생하든가 하여, 흔들림에 의한 불쾌감을 초래하게 된다.

2.1.1 진동의 기본용어

진동에서 가장 단순한 것은 시간의 경과와 함께 동일한 형상이 반복되는 것이다. 그러나 일반적으로 진동이 반복되는 간격은 항상 일정시간 간격은 아니고 동일형상이라도 모두 같은 상태가 반복되는 것은 아니다. 이 일정한 시간간격에 동일한 형상이 반복되는 진동을 정상진동이라 하고 그렇지 않은 것을 비정상진동이라 한다. 일정한 회전수로 회전하는 기계에 의한 진동은 정상진동이며 지진에 의한 진동은 비정상진동이다.

공해진동이라고 불리는 진동에는 정상진동의 것도 있지만 비정상진동인 것이 많다. 진동현상을 나타내는 물리량을 진동량이라 하며 변위, 속도, 가속도가 사용된다. 진동하고 있는 점 A의 위치가 시간적으로 ±X의 사이에서 반복운동을 되풀이하는 경우를 고려해 보자. 어떤 시간 t에 있어서 점 A의 위

치 X가 시간적으로 정현 변화한다고 가정하면 x의 관계를 다음 식(2.1)으로 표현된다.

$$x = X\sin(\omega t + \phi) \qquad (2.1)$$

여기서 x는 변위, X는 평형위치로부터의 최대변위를 나타내며 변위진폭이라 부른다. 또한 ω(rad/sec)는 각속도이고, ϕ(rad)는 위상각이라 부른다. 식(2.1)로 나타낸 진동은 정현진동 또는 조화진동이라 부르며 일정한 시간적 변동을 반복하는 정상적인 진동 중에서 가장 중요하고 기본적인 진동이다.

진동의 운동은 주기적으로 반복되는데 그 운동의 반복에 의한 시간을 주기라 부른다. 또한 1주기가 완결하는 운동을 Cycle이라 하고 1초간에 반복되는 cycle수를 진동수 또는 주파수라 한다. 주기는 초(sec)등의 시간으로 나타내고 진동수는 cycle(c/sec) 또는 Hz로 나타낸다. 진동수(f)와 주기(T)사이에는 식(2.2)의 관계가 있다.

$$f = \frac{1}{T} \qquad (2.2)$$

전술의 정현진동의 경우 어느 시간 t_1 으로부터 $2\pi/\omega$만 경과하면 변위 x는 식(2.3)으로 되며 시간 t_1의 변위는 완전히 동일한 위치에 되돌아오기 때문에 주기(T)는 식(2.4)로 되고 또 진동수(f)는 식(2.5)로 된다.

$$x = X\sin[\omega(t_1+\frac{2\pi}{\omega})+\phi] \quad (2.3)$$

$$= X\sin(\omega t_1 + 2\pi+\phi)$$

$$= \sin(\omega t_1+\phi)$$

$$T=\frac{2\pi}{\omega} \quad (2.4)$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.5)$$

따라서 ω는 2π시간 사이에 x가 몇 회 동일한 상태로 되돌아오는가를 나타내는 횟수를 나타내며 단진동수 또는 각진동수라 부른다. 시간적으로 변화하는 진동현상을 표현하는 데는 변위 외에 속도와 가속도가 있다. 속도는 변위의 시간에 대한 변화의 비율이고, 가속도는 속도의 시간적 변화의 비율이다. 따라서 속도 v는 변위 x를 시간 t로 미분해서 얻어진다. 정현진동의 경우는 식(2.1)에 의해 식(2.6)과 같이 된다.

$$v=\frac{dx}{dt}=\omega X\cos(\omega t+\phi)=\omega X\sin(\omega t+\phi+\frac{\pi}{2}) \quad (2.6)$$

ωX는 이때의 최대치로 속도 진폭이라 부른다. 또 가속도 α는 속도 v를 시간 t로 미분하여 얻어지는데 식(2.6)에 의해 식(2.7)과 같이 되며 ω^2X는 가속도진폭이라 부른다.

$$\alpha = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 X\sin(\omega t + \phi) \qquad (2.7)$$
$$= \omega^2 X\sin(\omega t + \phi + \pi)$$

Figure 2.1은 정현진동의 경우 변위, 속도 및 가속도의 파형을 나타낸다. 위상각 ϕ는 0의 경우이다. Figure 2.1에서 알 수 있듯이 속도의 파형은 변위의 파형에 비해 90°진행해 있다. 이것을 위상이 90°나아갔다고 한다. 이것은 식(2.1)과 식(2.6)에 명확히 나타나 있다. 마찬가지로 가속도의 위상은 속도의 위상보다 90°더 진행하고 있고 가속도의 위상은 변위의 위상보다 180° 진행하고 있음을 알 수 있다.

이들 변위, 속도, 가속도, 상호간의 진폭 및 위상에 관한 관계는 정현진동에 대해서만 성립하므로 비 조화진동에서는 성립하지 않는다.

그런데 변위 진폭, 속도 진폭 및 가속도 진폭의 값은 어느 순간에서 최대치(peak)가 되는데 진동에서는 이들을 진폭 자신으로 나타내어 실효치로 표현하는 경우가 많다. 실효치란 순간에 있어서 진동치를 자승하여 주기에 대하여 평균한 평방근이다. 상기의 정현진동의 경우 실효치 P_e는 식(2.8)과 같다.

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T [X\sin(\omega t + \phi)]^2 dt} \qquad (2.8)$$
$$= \sqrt{\frac{\omega}{2\pi}\int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} [X\sin(\omega t + \phi)]^2 dt}$$
$$= \frac{X}{\sqrt{2}} \fallingdotseq 0.707X$$

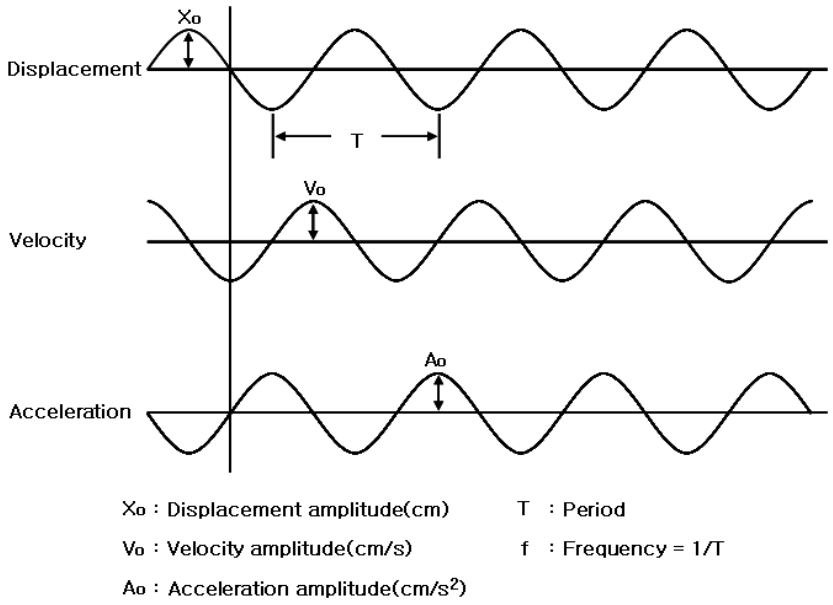


Figure 2.1 Harmonic oscillation.

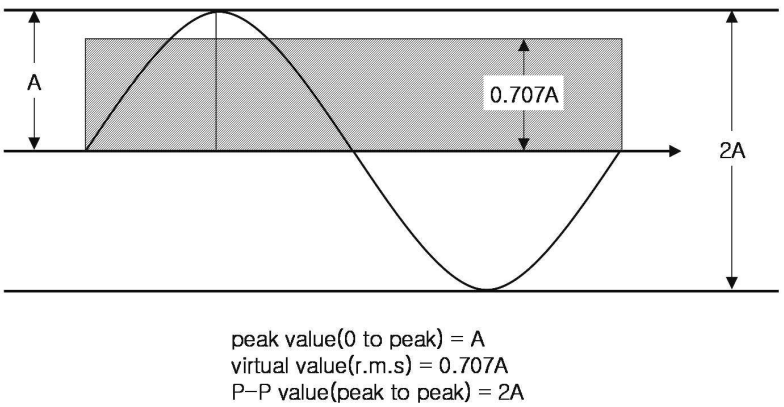


Figure 2.2 The size of sine wave vibration.

주기적이 아닌 경우는 식(2.8)의 T대신 적당한 시간의 길이를 취한다. 실효치의 물리적 의미는 예를 들면, 실효치 100V의 교류전압은 직류전압 100V의 효과와 같게 되는 최대치를 갖는 전압이라는 것과 마찬가지로 변동하는 진동량을 일정하게 연속된 효과로서 나타낸 값(Figure 2.2의 사선부분)이다.

진동의 크기를 나타낼 경우 Peak치(0 to Peak)나 실효치 외에 P-P치(Peak to Peak)가 있으며 Figure 2.2에 정현진동의 경우 그들 관계를 나타낸 것이다. 이들은 변위, 속도, 가속도의 어느 것에 대해서도 같은 관계가 된다.

2.1.2 파동의 중첩과 간섭

자연에 존재하는 많은 재미있는 파동 현상들은 움직이는 파동 하나만을 가지고는 기술하기가 불가능하다. 그 대신 두개 또는 그 이상의 파동이 공간의 동일한 영역을 통과할 때 어떤 일이 발생하는지 분석할 수 있어야만 한다. 그러한 분석을 위하여 중첩의 원리(principle of superposition)를 이용할 수 있다.

둘 또는 그 이상의 진행 파동이 매질을 통과하는 경우, 그 결과 생기는 파동은 각 지점에서 각 파동의 변위를 서로 합함으로써 얻어 지는 데 이것을 중첩의 원리라고 한다.

그러나 중첩의 원리는 각 파동의 변위의 진폭이 작을 경우에만 중첩의 원리가 타당하다. 즉, 아주 큰 변위가 발생하는 발파공 주위에서는 이 중첩의 원리가 성립되지 않는다고 할 수 있다. 중첩의 원리의 중요성은 두 진행 파동

은 파괴되거나 변화 되지 않고 서로 통과 할 수 있다는 것이다. 예로써 돌 두 개를 연못에 던질 때, 퍼져나가는 원형 파동은 서로를 파괴하지 않는다. 사실 잔물결들도 서로 통과한다. 마찬가지로 두 음원에서 나온 음파들이 공기를 통과할 때, 그들은 서로를 통과한다. 주어진 위치에서 듣는 소리는 두 음파에 의한 교란의 결과이다.

Figure 2.3(a)과 Figure 2.3(b)은 같은 진폭과 진동수를 갖는 두 파동을 보여준다. 어느 순간 이들 두 음파가 공간의 같은 영역을 통과하려 한다면, 그 순간의 결과로서 생기는 파동은 Figure 2.3(c)과 같은 형태를 갖게 될 것이다. 예를 들어 이들 파동의 진폭이 1m인 수면파라고 가정해보자. 마루가 마루를 만나고 골이 골을 만나도록 중첩하는 순간, 그 결과 생기는 파동은 2m의 진폭을 갖는다.

이와 같은 경우의 파동은 위상이 같다고 하고 보강 간섭(constructive interference)을 일으킨다라고 한다.

반면, Figure 2.4(a)와 Figure 2.4(b)는 두개의 유사한 파동을 보여주지만 한 파동의 마루가 다른 파동의 골과 일치한다. 즉, 한 파동은 다른 파동과 역으로 관련되어 있으며, 그 결과 생기는 파동은 Figure 2.4(c)와 같이 완전히 상쇄된 상태를 보인다. 이들이 함께 진행하는 수면파라고 하면, 두 파동 중의 한 파동은 물방울을 위로 당기려 하며, 같은 순간 다른 파동은 아래로 당기려고 한다. 이러한 상황에서 두 파동은 180° 위상이 어긋났다고 하며 상쇄 간섭(destructive interference)을 일으킨다라고 한다.

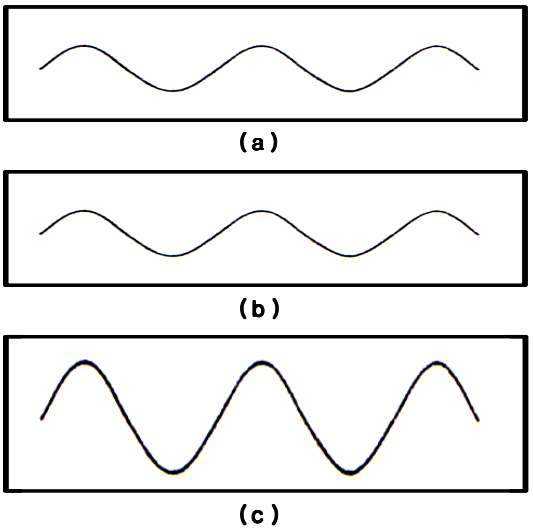


Figure 2.4 Constructive interference.

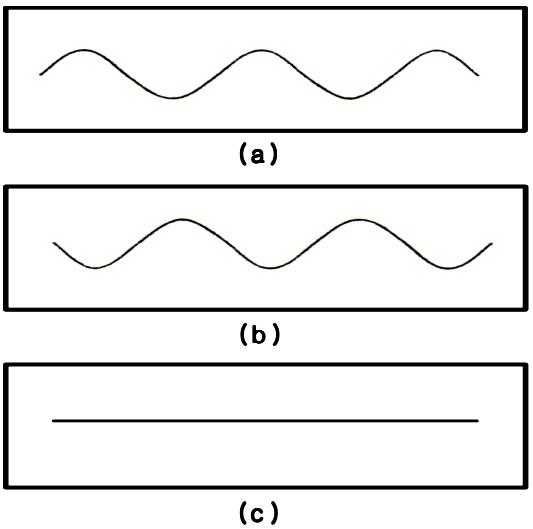


Figure 2.5 Destructive interference.

2.1.3 진동량의 표현

진동의 강도 또는 크기는 지금까지 서술한 바와 같이 변위, 속도, 가속도로 나타내고 그 단위로 변위는 cm, 속도는 cm/sec, 가속도는 cm/sec^2(gal)등이 사용되고 있으나 취급하는 진동의 크기에 따라 편의상 Table 2.1에 나타내는 각종 단위들도 사용된다.

Table 2.1 Vibration unit.

Classification	Basic unit	The others
Displacement	cm	$\mu = 10^{-3}mm = 10^{-4}cm$ $mm = 10^{-1}cm$ $m = 10^{2}cm$
Velocity	cm/sec	$mm/sec = 10^{-1}cm/sec$ $Kine = 1cm/sec$ $m/sec = 10^{2}cm/sec$
Acceleration	cm/sec^2(gal)	$gal = 1cm/sec^{2}$ $g = 980cm/sec^{2} \fallingdotseq 1,000gal$ $m/sec^{2} = 10^{2}cm/sec^{2}$

정현진동의 경우 식(2.1), (2.6), (2.7)에서 알 수 있는 바와 같이 변위, 속도, 가속도 각각의 진폭과 진동수와의 사이에는 식(2.9), (2.10)과 같은 관계가 있다.

속도 진폭 $V=\omega X=2\pi fX$ (2.9)

가속도진폭 $A=\omega V=\omega^2 X=(2\pi f)^2 X$ (2.10)

따라서 변위, 속도, 가속도의 각 진폭을 상호 환산할 수 있다.

2.2 발파에 의한 암석파쇄이론

발파에 의한 암반 파쇄 현상의 이론적 규명은 발파 기구의 복잡성에 기인하여 아직까지 완전히 규명되지 못했다. 그러나 다음과 같은 이론들이 일반적으로 받아들여지고 있으며 이러한 기존의 이론들에 새로운 해석들이 추가, 수정되고 있다.

2.2.1 Crater 이론

가장 전통적인 이론으로 장약량, 최소저항선등의 인자들 간의 관계를 crater 발파에서의 경험에 의해 규명한 경험 이론이다. 최소저항선을 이용하여 장약량을 결정하고 전색 길이(stemming length), 발파공간의 거리(spacing) 등을 계산하여 표준 발파의 장약량을 산출한다. crater 발파는 발파공과 수직한 방향으로 한 개의 자유면을 지니고, 파쇄 결과 원추형의 crater를 형성한다(Chiappetta et al., 1983; Pit Slope Manual, 1977).

2.2.2 기체 팽창 이론

발파에 의해 발파공에 작용하는 압력은 기체 팽창에 의한 가스압의 절반 정도의 크기이며, 충격파의 형태로 주변 암반에 전달된다. 충격파에 의한 분쇄대는 발파공 반경의 약 2배 거리까지 형성되고, 그 이후 방향성이 나타나는 몇 개의 방사상 균열이 형성된다. 충격파가 자유면에 도달하면 균열들에 가스압이 작용하여 균열이 성장하며, 이러한 균열의 성장이 자유면에 이르면 암석은 그때까지 남아 있는 가스압에 의한 변위가 발생한다.

화약의 폭발에 의해 발생한 에너지는 폭굉압과 가스압의 두 가지 형태로 암반에 역학적인 일을 수행한다. 폭굉압은 발파공에 인접한 좁은 지역에 국부적이고 한정적으로 작용하며 짧은 시간 동안 작용하기 때문에 주된 파쇄는 가스압에 의해 이루어진다. 압축응력을 받은 후, 인장응력에 의해서 공의 주위에서 부터 균열이 형성되며, 균열 첨단에 변형에너지(strain energy)가 가해지는 동안 계속해서 균열은 성장하게 된다. 이 때, 자유면에서의 변형에너지 반사에 의한 파쇄는 고려하지 않는다. 그리고 가스압에 의해 압열 파쇄(flexural rupture)가 일어나고 이것에 의해 저항선(burden)의 휨변형(bending)이 나타난다(Persson, et al., 1970; Ash, 1973; Johansson, et al., 1970).

2.2.3 반사파 이론

반사 응력파에 의한 암석 파쇄의 용이성은 인장강도와 압축강도를 사용하여 나타내는데, 그 비를 파쇄용이 계수(blastability coefficient)라 한다. 암석

은 인장력에 약하므로 파쇄용이 계수가 클수록 파쇄가 쉽게 된다. 파쇄용이 계수는 10에서 100사이의 값을 지닌다. 반사파 이론은 암반이 인장 파쇄에 약하기에 주된 에너지원을 자유면에서 반사된 인장파로 보고 암반의 응력 상태와 파괴조건식을 비교하여 설명하는 이론이다. 발파공에 인접한 지역에서는 압축응력파에 의한 파쇄가, 바깥 지역은 인장응력파에 의한 파쇄가 주로 이루어진다. 이 이론에 의하면, 폭굉파가 자유면이나 물리적인 성질이 다른 매질 경계에 도달하면 암반에 강한 충격을 주고 그 결과 새로운 응력파가 발생하여 내부로 전달되어 암석이 판의 형태로 파쇄(spalling, scabbing or slabbing)되고 또다시 새로운 자유면이 형성되는 과정이 반복하여 일어난다고 파쇄 기구를 정의한다(Obert, et al., 1949, 1950; Hino, 1956; Duvall, et al., 1957).

2.2.4 충격파와 가스압 이론

Kutter and Fairhurst(1971)는 충격파와 가스압 중 하나를 파쇄기구의 주된 에너지원으로 설명하는 기존의 이론에 대해 파쇄는 두 가지 에너지원의 복합적인 작용으로 이루어진다고 실험에 의해 밝혔다. 이 이론에 의하면 짧은 시간에 막대한 크기로 생성된 폭굉파는 주변 매질로 전달되나, 그 지속 시간이 비교적 긴 가스압이 준정적거동 상태를 유지하며 이미 형성된 균열을 확장, 전진시킨다는 것이다.

이외에도 Torque theory(Atlas Powder Company, 1987), Nuclei theory(Barker, et al., 1978; Winzer, et al., 1983; Fourney, et al., 1979; Adams, et al., 1983; McHugh, 1983)등의 파쇄기구 설명 이론이 있으나 일

반적으로 충격파가 균열을 형성하고 가스압이 균열을 확장, 전진시킨다는 것이 일반적으로 받아들여지고 있다. Table 2.2는 전체 에너지 중에서 충격파가 차지하는 비를 나타내며, 약 15% 내외이다. 또한 가스압이 20~40%이며 그 이외의 에너지는 비역학적인 일로 손실된 에너지이다.

Table 2.2 The shock wave value of total energy.

Researcher	Percentage of shock wave
Langefors	5-15%
Fogelson	9%
Kutter & Fairhurst	10-18%(granite) 2-4%(sandstone)
Konya & Walter	15%

2.3 파동의 전파 이론

짧은 지속시간을 갖는 충격파가 탄성 공간의 표면 어느 지점에서 발생하면 입체파는 Figure 2.5와 같이 반원형의 파면을 그리면서 전파된다. 충격지점으로부터 일정한 거리에 떨어진 지점에서는 전달된 파동에 의해 수직 변위가 지표에서 발생한다. 이때 종파가 가장 빠른 전달속도를 가지므로 가장 먼저 도달하고, 다음이 횡파, Rayleigh파의 순서로 도달하게 되며, 이것을 그림으로 표현하면 Figure 2.6과 같다.

지반운동에 관한 문제는 지반을 전파하는 파동문제에 귀착되며 자연의 지반은 정적인 큰 힘에 대해서 소성체로써의 성질을 나타내지만 변화하는 속도가 빠른 동적인 미소변위에 대해서는 탄성체의 성질을 나타낸다. 그러므로

지반을 반무한 탄성체로 간주할 경우 종파, 횡파, Rayleigh파 등의 파가 존재하고 각각의 성질은 다음과 같다.

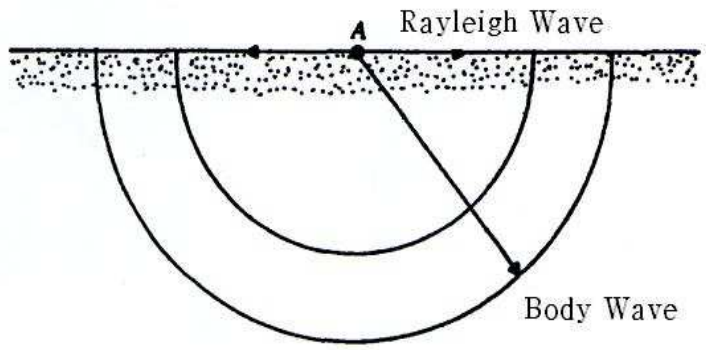


Figure 2.6 Body wave and Rayleigh wave.

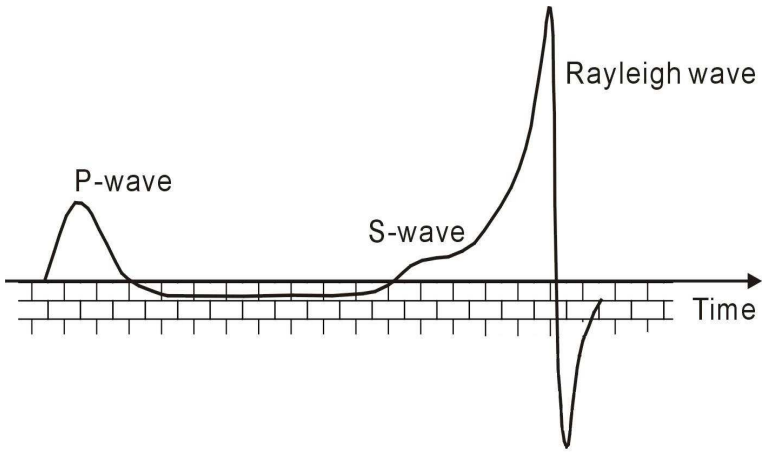


Figure 2.7 Vertical displacement component of P wave, S wave and Rayleigh wave in a short duration period.

2.3.1 종파와 횡파의 전파

Figure 2.7은 지중 미소부분에 관한 응력과 관성력과의 평형상태를 보여주며, 이들 관계로부터 각 방향에 대하여 다음과 같이 식(2.11), (2.12), (2.13)을 각각 얻을 수 있다.

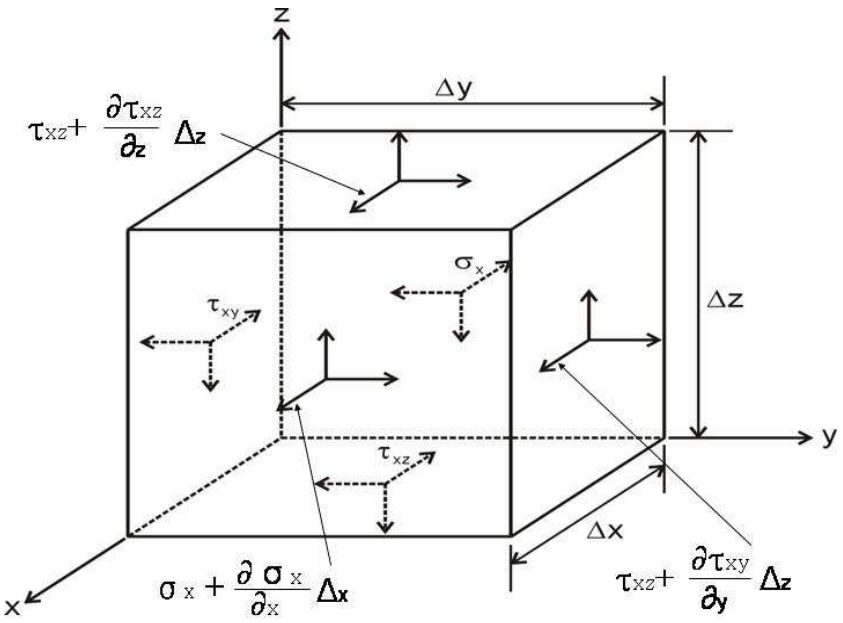


Figure 2.8 Stress on a small element of an infinite elastic medium.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{zy}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial y} = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (2.13)$$

여기서 u v w는 각각 x, y, z 방향의 변위 이고, σ_x, σ_y, σ_z 및 τ_{xy}, τ_{xz}, τ_{yx}, τ_{yz}, τ_{zx}, τ_{zy}는 각각 x, y, z 방향의 축응력 및 전단응력이고 ρ는 매체의 밀도이다.

다음 식(2.14), (2.15), (2.16), (2.17), (2.18), (2.19)은 x, y, z 각 방향에 대한 수직응력 및 전단응력을 탄성론(James and William, 1991)에 근거한 응력-변형률 관계를 나타낸다.

$$\sigma_x = \lambda \Delta + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.14)$$

$$\sigma_y = \lambda \Delta + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.15)$$

$$\sigma_z = \lambda \Delta + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.16)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.17)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.18)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (2.19)$$

μ는 전단 계수, λ는 Lame상수로서 식(2.20)과 (2.21)로 나타낼 수 있다.

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{2.20}$$

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \tag{2.21}$$

여기서,

ν = Poisson's ratio

μ = Shear modulus(G)

E = Young's modulus

$$\Delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \tag{2.22}$$

탄성론의 관계식을 대입하여 정리하면 식(2.23), (2.24), (2.25), (2.26)을 얻을 수 있으며 이들은 등방성 무한탄성체의 운동방정식을 나타낸다.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda+\mu)\frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \tag{2.23}$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda+\mu)\frac{\partial \Delta}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \tag{2.24}$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda+\mu)\frac{\partial \Delta}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \tag{2.25}$$

여기서,

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \tag{2.26}$$

식(2.23), (2.24), (2.25)을 각각 x, y, z에 대해 미분하고 이들 세 개의 식을 합하면 식(2.27)과 식(2.28)과 같다.

$$\rho\frac{\partial^2\nabla}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu)\nabla^2\Delta \tag{2.27}$$

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \tag{2.28}$$

식(2.28)을 다른 방법으로 표현하면 식(2.29)과 같다.

$$V_p = \sqrt{\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}\frac{E}{\rho}} \tag{2.29}$$

식(2.29)에 의해 식(2.27)은 식(2.30)으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial^2\Delta}{\partial t^2} = V_p^2(\frac{\partial^2\Delta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Delta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\Delta}{\partial z^2}) \tag{2.30}$$

식(2.30)은 파동 방정식의 형태가 된다. 즉 체적 변화가 속도 V_p로 전파하는 것을 의미 한다. 이것이 종파의 전파이다.

식 (2.23), (2.24), (2.25)에서 Δ을 소거하면

$$\rho\frac{\partial^2}{\partial t^2}(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}) = \mu\nabla^2(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}) \tag{2.31}$$

로 되고, 탄성론에 의해 x, y, z축 주위의 회전각을 각각 θ_x, θ_y, θ_z에 대하여 정리하면

$$\theta_x = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}\right) \tag{2.32}$$

$$\theta_y = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}\right) \tag{2.33}$$

$$\theta_z = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right) \tag{2.34}$$

의 관계가 있고 식(2.31)에 의해 식(2.35), (2.36), (2.37)을 각각 얻을수 있다.

$$\rho\frac{\partial^2\theta_x}{\partial t^2} = \mu\nabla^2\theta_x \tag{2.35}$$

$$\rho\frac{\partial^2\theta_y}{\partial t^2} = \mu\nabla^2\theta_y \tag{2.36}$$

$$\rho\frac{\partial^2\theta_x}{\partial t^2} = \mu\nabla^2\theta_x \tag{2.37}$$

여기서,

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \tag{2.38}$$

식(2.38)에 의해서 식(2.39), (2.40), (2.41)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2\theta_x}{\partial t^2} = V_s^2\left(\frac{\partial^2\theta_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\theta_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\theta_x}{\partial z^2}\right) \tag{2.39}$$

$$\frac{\partial^2\theta_y}{\partial t^2} = V_s^2\left(\frac{\partial^2\theta_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\theta_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\theta_y}{\partial z^2}\right) \tag{2.40}$$

$$\frac{\partial^2\theta_z}{\partial t^2} = V_s^2\left(\frac{\partial^2\theta_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\theta_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\theta_z}{\partial z^2}\right) \tag{2.41}$$

식(2.39), (2.40), (2.41)은 파동방정식의 형태이며 즉, x, y, z축 주위의 회전 θ_x, θ_y, θ_z가 속도 V_s로 전파하는 것을 의미하며 횡파의 전파이다.

2.3.2 Rayleigh파의 전파

자유지표면을 가지고 있는 무한체에서 지표면 부근에만 존재하는 파동이 Rayleigh파이다. Figure 2.8에서 x, y축을 포함한 면을 자유지표면으로서 그 원점을 z=0이라 한다. 이 경우의 운동방정식은 식(2.23), (2.24), (2.25)를 각각 적용한다.

평면파가 x방향으로 전파할 경우 각 점의 변위는 y축 방향에 무관하게 된다. x 및 z방향의 변위 u 및 w는 2개의 포텐셜(potential)함수 Φ 및 ϕ에 의해 식(2.42)와 식(2.43)으로 나타낼 수 있다.

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \tag{2.42}$$

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \phi}{\partial x} \tag{2.43}$$

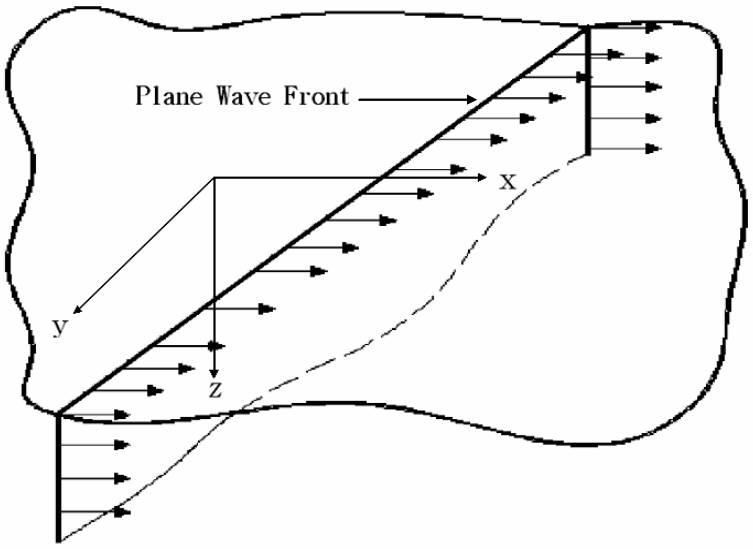


Figure 2.9 Coordinate convention for elastic half-space.

체적변화 Δ는 식(2.44)과 같고 y축에 관한 회전각 θ_y는 식(2.45)로 표현할 수 있다.

$$\Delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$= \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \phi}{\partial x}\right) = \nabla^2 \Phi \qquad (2.44)$$

$$\theta_y = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}\right)$$

$$= \frac{1}{2}\left\{\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial z}\right) - \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \phi}{\partial x}\right)\right\} \qquad (2.45)$$

$$= \frac{1}{2}\nabla^2 \phi$$

식(2.42)와 식(2.43)의 u, w는 식(2.23), (2.24), (2.25)에 의해 식(2.46)과 식(2.47)이 된다.

$$\rho\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2}\right)+\rho\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}\right)$$
$$=(\lambda+2\mu)\frac{\partial}{\partial x}\left(\nabla^2\Phi\right)+\mu\frac{\partial}{\partial z}\left(\nabla^2\phi\right) \tag{2.46}$$

$$\rho\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2}\right)-\rho\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}\right)$$
$$=(\lambda+2\mu)\frac{\partial}{\partial z}\left(\nabla^2\Phi\right)-\mu\frac{\partial}{\partial x}\left(\nabla^2\phi\right) \tag{2.47}$$

또한 식(2.46)과 식(2.47)은 포텐셜(potential) 함수 Φ 및 ϕ가 다음 관계에 만족한다.

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2}=\frac{\lambda+2\mu}{\rho}\nabla^2\Phi=V_p^2\nabla^2\Phi \tag{2.48}$$

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2}=\frac{\mu}{\rho}\nabla^2\Phi=V_s^2\nabla^2\phi \tag{2.49}$$

식(2.50)과 식(2.51)은 식(2.48)과 식(2.49)의 해로서 x방향에 전파되는 조화파형 연속파동을 가정하여 나타낸 것이다.

$$\Phi=F(z)exp\left[i\left(wt-Nx\right)\right] \tag{2.50}$$

$$\phi=G(z)exp\left[i\left(wt-Nx\right)\right] \tag{2.51}$$

여기서, F(z) 및 G(z)는 깊이 방향의 진폭분포를 나타내고 N은 파장을 L로써 정리하면 식(2.52)와 식(2.53)같이 다시 쓸 수 있다.

$$N = \frac{2\pi}{L} \tag{2.52}$$

$$16\,(1-\frac{\omega^2}{V_p^2N^2})(1-\frac{w^2}{V_s^2N^2}) = \{2-(\frac{\lambda+2\mu}{\mu})(\frac{w^2}{V_p^2N^2})\}^2(2-\frac{w^2}{V_s^2N^2})^2 \tag{2.53}$$

식(2.53)에 의해 만들어진 파의 파장을 L_R, 파동속도를 V_R이라 하면 식(2.52)의 정의에 의해서 식(2.54)로 표현할 수 있다.

$$N = \frac{2\pi}{L_R} = \frac{2\pi f}{V_R} = \frac{w}{V_R} \tag{2.54}$$

여기서,

$$\frac{V_R}{V_S} = K \tag{2.55}$$

$$\frac{\lambda+2\mu}{\mu} = \frac{1}{\alpha^2} = \frac{2-2\nu}{1-2\nu} \tag{2.56}$$

로 놓으면,

$$\frac{w^2}{V_s^2 N^2} = K^2 \tag{2.57}$$

$$\frac{w^2}{V_P^2 N^2} = \alpha^2 K^2 \tag{2.58}$$

$$K^6 - 8K^4 + (24 - 16\alpha^2)K^2 + 16(\alpha^2 - 1) = 0 \tag{2.59}$$

가 되며 식(2.53)에 의해 정리하면 식(2.59)가 얻어지고, 이 식은 K^2에 관한 3차 방정식으로서 실근을 가진다. K는 식(2.55)에 의해 정의되며 Rayleigh파의 전파속도 V_R과 횡파의 전파속도 V_S와의 비로 나타낸다.

R파에 의한 입자운동은 회귀성타원의 경로를 따르고, 전단방향의 변위가 없으므로 종파와 유사한 성질을 갖는다. P파, S파, R파의 운동모양은 폭발위치가 깊지 않거나 암반이 대단히 균질한 경우가 아니면 입체파는 보통 방출에너지의 절반 이하로 작게 나타나고 나머지는 암석의 표면이나 내부의 자유면을 따라 이동하는 표면파가 된다. 그러므로 지표 부근에서 실시한 발파작업에 의한 진동에는 입체파보다 표면파에 더 많은 에너지가 작용한다. 반면 진동을 측정하는 지점이 발파 지점에서 가까우면 이러한 모든 파는 구분되지 않고 합성되어 함께 복합파 형태로 나타난다. 특히 지하철 건설을 위한 터널 굴착과 같은 도심지에서의 발파는 발파진동 문제를 야기하는 지점이 수십 미터 이내이며 여러 가지 파들이 도달하는 시간이 동시에 이루어지기 때문에 기록상으로 분별하기 어려운 단점이 있다.

2.4 발파 진동의 발생과 전파

2.4.1 발파 진동의 발생

폭약을 사용한 발파는 물리, 화학, 열역학, 충격파 상호작용 및 암석역학 등의 이론이 복합적으로 작용하여 이루어진다. 폭발에 의해서 발생된 압력파는 암반 중의 모든 방향으로 전파되면서 감소되는데 표면에서는 굴절 및 반사가 일어난다. 이때 폭발에 의한 초기 충격 폭굉압과 지연 폭발 가스압을 정확하게 구별하기는 힘들다. 화약이 폭발 할 때 열과 에너지를 발생하는데 Figure 2.9에서 보듯이 발파공을 따라서 연소면이 앞으로 진행하면 폭굉압 P_d의 뒤에는 이보다 낮지만 일정하게 지속되는 폭발압 P_e가 따르게 된다. 폭발압은 폭굉압 보다 좀 서서히 사라지지만 암석을 이동시키는데 필요한 많은 양의 에너지로 작용한다.

폭굉압은 초기에 발파공벽에 바로 인접한 암석을 파쇄시키고 지속되는 폭발로 인해 발파 파쇄대가 밖으로 확장되며(Figure 2.10) 퇴적암의 경우 발파공 직경의 40배에 이르게 된다. 발파에 의해 발생되는 최고압 즉 폭굉압은 10~140kbar(145,000~2,000,000 psi)에 달하며 속도는 2700~8400m/sec의 폭굉파로서 전파한다.

실제 발파공에서 폭굉압은 파괴효과에 직접적으로 관련되는 요소이며 기폭작용을 한다. 폭굉압의 측정은 특수 제작된 장치를 사용하여 계측할 수 있다. 압력의 계산식은 다양한 식이 제안되고 있으며 모두 결과에 차이가 있다. 폭발압력은 일반적으로 폭발속도(VOD, velocity of detonation)와 폭약의 밀도 함수로서 식(2.60)과 같이 표현된다.

$$P_d = \rho \times VOD^2 \times pv \qquad (2.60)$$

여기서 P_d는 폭굉압(kbar)이며 ρ는 폭약밀도(g/cm^3), VOD는 폭발속도(m/sec), pv는 폭약의 입자속도(cm/sec)를 나타낸다. 폭약밀도와 폭굉압은 알 수 있으나 진동속도는 공기 중에서 발파로 인하여 팽창하는 가스 때문에 입자운동을 사진으로 찍기 불가능하므로 측정될 수 없고, 투명한 플라스틱 용기에 물을 넣고 그 안에서 폭발시키면 사진 촬영이 가능하여 충격파 속도와 입자속도와의 관계로부터 계산할 수 있다. 폭굉속도, VOD와 폭약밀도, ρ의 관계식을 표현하면 식(2.61)과 같다(Du Pont Co., 1977).

$$P_d = 2.50 \times 10^{-6} \times \rho \times VOD^2 \qquad (2.61)$$

또 다른 식으로서 다음 식(2.62)과 같이 나타낼 수 있다(Dick, 1996).

$$P = 4.18 \times 10^{-7} SGe\, Ve^2 / (1 + 0.8 SGe) \qquad (2.62)$$

여기서 P(kbar)는 폭굉압을 나타내며 SGe는 폭약비중, Ve는 폭굉속도(ft/sec)를 의미한다. 발파압력을 산정하기 위해 일반적으로 쓰이는 식으로서 Brown's 식이 있는데 다음 식(2.63)과 같다.

$$P_D = \frac{0.45 \rho D_E^2}{1.0 + 0.0008 \rho_E} \qquad (2.63)$$

여기서 ρ(g/cm^3)는 암반의 밀도이며 ρ_E는 폭약의 비중을 나타내며 D_E는 폭약의 폭굉 속도를 의미한다.

앞에서 설명한 폭발압력을 수치해석에 적용하는 경우 일반적으로 5~10% 만을 적용하는데, 이는 폭약의 이론적인 전체 에너지 중 진동을 일으키는 충격압이 차지하는 비율은 5~10%정도이기 때문이다.

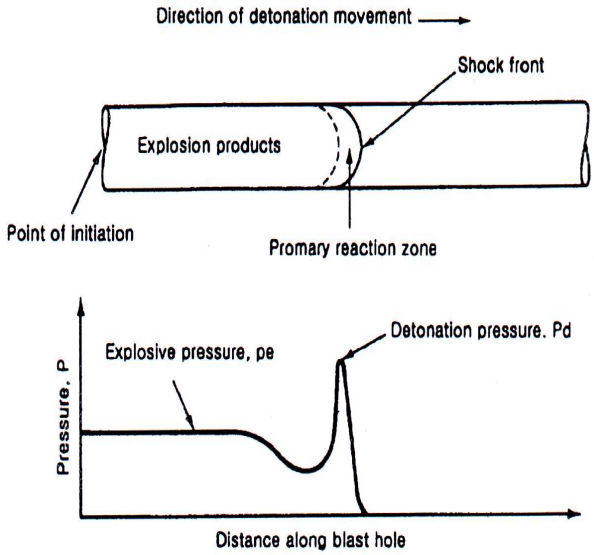


Figure 2.10 Advancing detonation in blast hole produces shot period detonation pressure and long period explosion pressure(Dick, 1968).

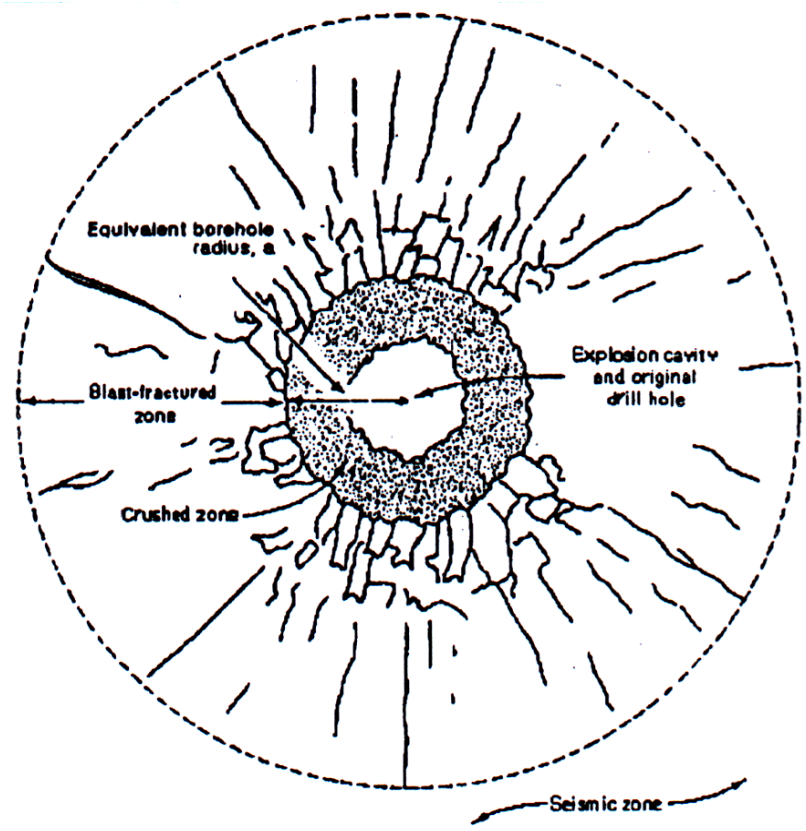


Figure 2.11 Near-hole blast cracking(Dupont, 1977).

2.4.2 발파 진동 전파

단위 시간당 반응시간이 매우 빠른 폭약의 특성으로 인해 폭약이 장약공 내에서 폭발하면 암반주위는 강력한 폭굉 충격을 받게 된다. 이때 폭약은 장약된 화약의 성질과 폭발속도에 따라 수만 내지 수백만 kg/cm^2에 달하는 충격압과 가스압이 발생한다. 폭약에서 암반으로 전이된 에너지의 일부가 접촉되는 암반에서 고온, 고압상태에 도달되어 녹아내리게 되며 이 부분을 용융권이라 한다. 용융권 다음에는 폭굉압에 의한 전단파괴가 발생하는 구역으로 암반의 일부가 가루로 변하는 분쇄권이 있다. 충격에너지 잔여분은 암석의 균열이 발생하는 인장 균열권을 형성하면서 불안정한 압축충격의 형태로 암반에 전달되어 음속보다 더 큰 속도로 전달되며 간다.

이러한 형태로 발생한 충격파는 실제로 암반의 압축강도보다 더 큰 초기 폭발압에 의하여 발생하며 암반내의 소성영역을 통과하여 유체역학적으로 거동한다. 충격파는 비탄성 영역을 지나면서 속도가 줄어들어 유사탄성영역에서 진동파운동을 하게 된다. 발생한 진동파는 진로상의 매질을 교환할 만큼 충분한 에너지를 갖지 못하는데, 이 영역을 탄성영역이라 한다. 탄성영역에서 암반이 충격을 받게 되면 암반이 갖고 있는 질량은 변형을 계속 시키려 하나 암반의 내부에 갖고 있는 강성은 이 변형을 원상태로 회복하여야 하므로 암반이 평형상태로부터 변형과 회복을 계속하게 된다. 이것이 발파에 의한 탄성파이며 충격압과 가스압의 일부는 암반 속에 탄성파 형태로 전파되어 지반의 진동을 유발하게 되는데 이것을 발파진동이라고 한다. 이때 지반에서의 반응은 진폭과 주기를 갖는 진동으로 나타난다.

파동의 전파속도(wave propagation velocity)는 파동의 전파속도에 수반한 입자속도(particle velocity)와 구분된다. 입자속도는 진동으로서 인체에 느

껴지는 부분이며 응력의 크기에 의존하며 파동의 전파속도, 매질의 재료특성에 의존한다. 파동전파의 기본적인 두 가지 형태는 암반내부로 전달되는 입체파(body waves)와 물체의 표면을 따라 이동하는 표면파(surface waves)이다.

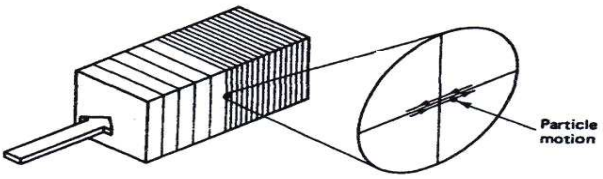
입체파는 종파(P파)와 횡파(S파)의 두 가지 파형으로 분류할 수 있다. 입체파 중의 종파는 여러 가지 면에서 단순진동을 유발하며 P파가 정면 이외의 어떤 방향으로 자유면을 만나게 되며 진행방향과 수직으로 진동하는 횡파를 발생시킨다. 종파는 압축을 저지하는 물체내의 방향으로 진행하고 횡파는 형태변화에 저항하는 방향으로 진행하므로 이 두 입체파는 고체 내에서만 존재할 수 있다.

표면파의 기본 형태는 Rayleigh파와 Love파로서 Rayleigh파는 수직-방사평면에 존재하며 완전 매질에서 종방향 성분이 없으며 그 파가 존재하기 위해서는 층이 필요하지 않으므로 Rayleigh파에서의 입자운동은 타원형이며 깊이에 따라서 점점 감소한다. Love파는 전판형태의 입자운동에 의해서 수평방향에서만 나타나며 운동의 수직성분이 없으며 파가 존재하기 위해서는 공간에 적어도 하나의 층이 있어야 한다. 이들 탄성파 중 P파와 S파, 그리고 Rayleigh파의 형태는 Figure 2.11과 같다.

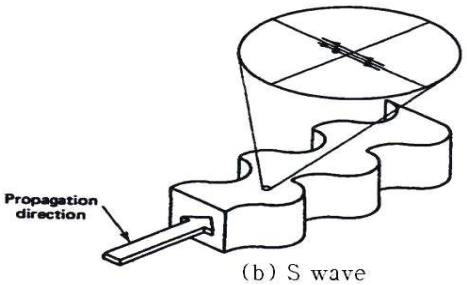
지표상에 도달하는 복합파의 성분은 측정하는 방향에 따라 크게 3가지로 수직방향(vertical)의 성분, 진행방향(longitudinal)의 성분, 진행방향에 대한 접선방향(transverse)의 성분인데 이것은 Figure 2.12와 같다. 발파진동은 진행성분에는 P파(종파)가, 접선성분에는 S파(횡파)가 수직 성분에는 R파(Rayleigh wave)가 우세하며 이 3성분은 크기 및 진동주파수가 각각 다르고 복합파이기 때문에 운동하는 모양이 대단히 불규칙하고 복잡하다.

발파진동은 진폭과 주기를 갖는 진동이며, 발파진동의 크기는 진동을 전달하는 매질의 변위(particle displacement), 입자의 진동속도(particle

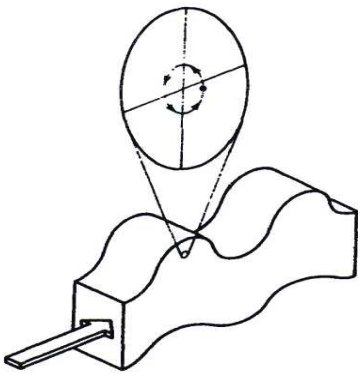
velocity), 입자의 진동가속도(particle acceleration)로 표시할 수 있다.



(a) P wave



(b) S wave



(c) Rayleigh wave

Figure 2.12 Elastic wave motion.

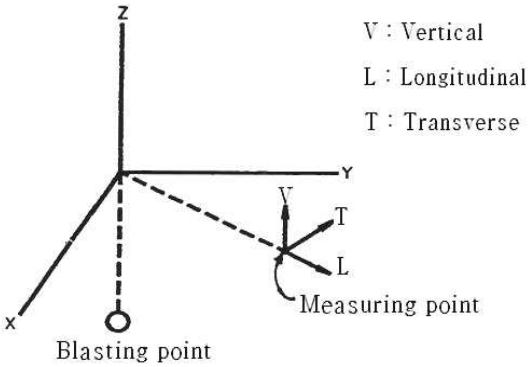


Figure 2.13 Measuring direction of ground vibration.

2.5 발파 진동의 예측 방법

발파 진동을 예측하는 대표적인 두 가지 방법은 환산거리 방식(Duvall, et al., 1963; Devine, 1966; Ash, 1973; Bicholls, et al., 1971; Bollinger, 1971; Archibald, 1976; Calvin, et al., 1975; Dupont, 1980)과 장약레벨 방식(Langefors, 1978)을 들 수 있다. 환산거리 방식은 거리와 장약량의 자승근 혹은 삼승근 관계인 환산거리(scaled distance) 개념에 의한 발파 진동의 예측 방법이며 Langefors의 장약레벨 방식은 각각의 장약레벨과 거리와의 관계인 장약 레벨(charge levels) 개념에 의해 진동속도를 예측한다. 국내에서는 이들 방법 중 환산거리 개념에 의한 발파 진동의 예측이 일반화 되어 있으며 본 연구에서는 발파 진동의 예측방법으로 실 계측 자료에 의한 환산

거리 식에 의한 예측 방법과 단일 공 파형의 중첩모델링을 통하여 산출된 자료를 환산거리 식에 적용한 새로운 발파 진동의 예측방법을 개발 하였으며 이들 두 가지 방법에 대한 결과를 비교 분석하였다.

2.5.1 환산거리의 유도

환산거리는 지발당 장약량(W)과 거리(D)가 변화할 때 최대 입자속도를 예측하는데 필요한 것이다. 가장 보편적인 두 가지 환산거리는 자승근 환산거리($D/W^{1/2}$)와 삼승근 환산거리($D/W^{1/3}$)이다. Hendron(1969)은 발파 진동을 조절하는데 Table 2.3의 변수들이 중요한 의미를 갖는 것으로 생각하였다.

발파에 의한 진동과 이것이 구조물에 미치는 영향으로는 Buckingham Pi 무차원 해석이론(Langhaar, 1951)에 의하면, u/D, $\dot{u}/c$ $\ddot{u}D/c^2$, ft tc/D 및 $W/\rho c^2 D^3$등 여섯 개의 변수가 있음이 알려져 있다.

암석의 밀도(ρ)나 탄성파속도(c)는 암종에 따라 큰 변화가 있는 것이 아니기 때문에 지발당 장약량(W)이나 폭원으로부터의 거리(D)의 변화는 중요한 의미를 가진다.

구조물의 피해에 크게 영향을 미치는 요인은 입자의 변위, 속도 및 가속도와 주파수 등의 네 개의 종속변수로 좁혀지고, 여러 계측결과에 의하면 진동속도와 가장 밀접한 관계가 있다.

Table 2.3 Variable considered in a dimensional analysis of explosion phenomena(Ambraseys and Hendron, 1968).

Variable	Symbol	Dimension*
Independent		
Energy (per delay)	W	FL
Distance	D	L
Seismic velocity	c	LT^{-1}
Density of rock mass	ρ	Ft^2L^{-4}
Time	t	t
Dependent		
Ground displacement	u	L
Ground particle velocity	$\dot{u}$	Lt^{-1}
Ground acceleration	$\ddot{u}$	Lt^{-2}
Frequency	f	t^{-1}

* F: force, L: length, t: time

발파에 의해 발생한 지반진동의 크기는 폭원으로부터 계측지점까지의 거리에 반비례하고, 1회 발파 당 동시에 폭발하는 장약량에 비례하므로 (Devine, 1966) 거리와 장약량의 함수관계를 환산거리(Scaled Distance)로 표기하며, 이것은 지발당장약량과 거리가 변화할 때 최대진동속도를 예측하는 데 필요한 것이다.

환산거리에 의한 발파 진동 예측식은 식(2.64)와 같다.

$$V = K(SD)^n \qquad (2.64)$$

여기서 V는 진동속도, K는 입지상수, n은 감쇠상수이며 SD는 환산거리로서 발파원과 수진점과의 거리(D)와 지발당 장약량(W)은 식(2.65), (2.66)

의 각각 자승근 및 삼승근으로 표시된다.

$$SD = \frac{D}{\sqrt{W}} \tag{2.65}$$

$$SD = \frac{D}{\sqrt{3 of W}} \tag{2.66}$$

K와 n은 장약량과 거리를 제외한 모든 인자를 반영하며, 통칭으로 입지상수(site constants)라고 한다. 식에서 진동속도는 환산거리에 반비례하며 거리에 대해서는 반비례, 장약량에 대해서는 비례하는 것을 알 수 있다.

환산거리식의 두 변수를 분리하고 지수계수를 달리하면 적합도가 더 높은 일반식(2.67)이 얻어진다.

$$V = KW^{a}D^{b} \tag{2.67}$$

a와 b는 각각 지수계수와 감쇠계수이다. 일반식(2.67)은 높은 적합도에도 불구하고 설계의 어려움 때문에 많이 적용되지 않고 있다.

식(2.64)나 (2.67)으로 구해지는 진동수준은 평균 진동 수준이므로 발파설계에 직접 이용할 수 없다. 따라서 로그 정규분포의 특성을 이용하여 신뢰수준 95% 발파 진동 예측식을 구하고 현장여건에 맞는 허용 진동수준으로부터 허용 환산거리를 산출하게 된다.

2.5.2 95% 신뢰식의 설정

발파설계를 위해서는 대상 지역에서의 시험발파를 통한 K, n 상수 값을 정의하는 것이 중요하며, K, n 값이 결정되고, 허용 진동 속도가 주어지면 발파진동식에서 폭원으로 부터의 거리와 지발당 장약량과의 관계를 나타내는 노모그램을 작성할 수 있다.

입지상수의 결정방법은 측정 자료처리는 log-log scale상에서 최소자승법에 의해 최적 적합식(best fit line)을 구하며 이를 50% 신뢰식이라고 한다.

입지상수 K의 50%값을 K_0라 하고 95%, 99%의 K값을 각각 K_1, K_2라 하면 K_0, K_1, K_2 값은 로그 정규분포의 특성을 이용하여 식(2.68), (2.69), (2.70)과 같이 구할 수 있다.

$$K_0 = \exp A_0 \tag{2.68}$$

$$K_1 = \exp(A_0 + 1.645\sigma) \tag{2.69}$$

$$K_2 = \exp(A_0 + 2.326\sigma) \tag{2.70}$$

여기서, σ는 표준 편차이다. 또한 신뢰식의 기울기 n은 동일하다.

3. 지발당 장약량에 대한 이론적 고찰

3.1 개요

발파에 의한 공해 요인 중 발파진동의 전파 특성을 결정짓는 인자는 크게 입지조건과 발파조건으로 나눌 수 있으며, 입지조건은 발파부지와 인근 구조물의 기하학적 형태, 대상암반의 지질학적 특징 및 역학적 성질 등을 말하고, 발파조건은 사용하는 폭약의 종류, 지발당 장약량, 기폭방법, 전색상태, 자유면의 수, 발파유형, 폭원과 측점간의 거리 등을 말한다.

이 인자들 모두가 발파진동의 크기와 전파특성에 영향을 미치게 되고, 이 중에서 특히 지발당 장약량과 측점간의 거리가 가장 중요한 요인으로 작용하나, 측점간의 거리는 조절 불가능한 변수인 반면, 조절 가능한 변수인 지발당 장약량이 동일한 발파작업의 조건일 경우 발파 설계에 있어 가장 중요한 인자가 된다(김재극, 1992).

지발당 장약량은 현재 우리나라에서 발파진동의 예측에서 대부분 사용되는 환산거리식의 주요 변수이다. 지발당 장약량은 동시에 기폭되는 장약 혹은 공간의 지연단차가 8ms 이하인 장약들의 총합으로 정의할 수 있다(Agnerustan, 1998). 이러한 근거는 USBM(United States Bureau of Mines)에서 발간한 RI(Report of Investigations) 6151(Duvall et al., 1963)을 바탕으로 마련된 것이다.

그 밖에도 발파진동을 예측하는 많은 연구(Crandell, 1949; Morris and Westwater, 1953; Attewell, 1965; Langefors, 1978)가 이루어졌다.

특히, Langefors(1978)는 발파진동의 예측방법으로 USBM의 환산거리 개념에 해당되는 장약레벨(Charge levels) 개념을 도입하였으며 환산거리 방식

의 지발당 장약량 개념에 해당되는 협동장약(Cooperating charges)의 개념을 사용하였다. 이 협동장약은 단당 총 장약량으로 정의되며 뇌관의 발화 오차와 지반의 주주파수를 고려한 감쇠인자(Reduction factor)를 곱하여 협동장약량을 산출하였다. 또 인접 단차간의 간섭을 피할 수 있는 지연단차에 대해서는 지반의 주주파수에서 산출되는 주기(T)의 3배 이상인 단차를 주장하였으며 상쇄간섭을 포함하여 2.5T의 지연단차를 다른 단차에 의한 간섭이 없는 것으로 가정하였다.

지발당 장약량(Weight per delay)과 협동장약(Cooperating charge)의 개념의 차이점은 지반의 주파수 고려 여부로 구분될 수 있다. 발파진동 대한 예측 방법(Crandell, 1949; Morris and Westwater, 1953; Attewell, 1965; Langefors, 1978) 중 발파진동을 다루는데 더 효과적인 개념이라 여겨 국내에서는 환산거리 방식을 사용하고 있다.

한편, 진동 파형이 지연단차에 따라 상쇄와 보강 간섭되어 큰 폭으로 분산하는데 이러한 진동의 특성을 이용하는 발파진동 저감방법에 관한 연구(석철기, 1998)가 발표되었다. 이 연구에 의하면 발파에 의해 발생된 진동파형을 적극적으로 간섭 시켜 단일공 기폭에 의한 최대 진동 속도에 비해 약 1/5의 작은 진동속도가 산출될 수 있었다. 연구 방법으로는 700×700×900mm의 mortar block에 220mm 깊이로 천공하여 장약하고 기폭시켜 단일공에 대한 진동파형을 측정하였다. 측정된 파형의 자기 상관함수를 계산하고 연속하여 기폭할 때의 최소의 진동속도를 나타내는 지연단차를 결정하였다. 또한, 이렇게 결정된 지연단차에 의한 기폭결과 예측된 파형과 실제 측정된 파형이 유사함을 확인하였다.

이후 발파진동에 있어서 주파수는 구조물의 진동 허용기준치 설정에서 대두 되었다. 1983년 OSM(Office of Surface Mining)의 발표에서 발파진동의 규제에 있어서 최대 진동속도와 진동의 주파수 두 가지 항목으로 규제의 범

위를 확대하였다.

발파진동을 연구할 때 전파해오는 진동의 크기를 연구하는 분야와 전파해 온 진동이 구조물이나 인체 혹은 가축 등에 미치는 영향의 정도를 연구하는 분야로 나누어 볼 때 환산거리 개념은 전자에서는 주파수를 고려하지 않고 후자에서만 주파수를 고려함으로서 주파수 대역에 따라 허용진동 기준을 달리하는 방식으로 발전한 것으로 생각된다.

본 절에서는 지연시차와 장약공과 측점과의 거리, 그리고 전달속도의 관점에서 문헌 조사에 의한 자료를 토대로 환산거리 방식의 발파진동예측 방법의 주요 변수인 지발당 장약량의 설정에 대해 고찰한다.

3.2 지발당 장약량에 미치는 뇌관의 발화 오차의 영향

MS 지발발파는 각 장약 공간의 짧은(millisecond unit) 지연단차를 이용하는 발파 방법으로서 현대의 발파기술은 이러한 개별 장약간의 지연단차를 조절하는 방법에 크게 의존하고 있다. 개별 장약공간의 지연단차를 생성하는 방법으로는 발파기에 의한 방법과 뇌관의 지연시차를 이용하는 방법으로 구분할 수 있다. 뇌관에 의한 방법은 Figure 3.1과 같이 뇌관 내에 연시장치가 삽입되어 있으며 이 연시 장치에 의해 각 단의 뇌관은 지연시차를 갖게 된다. 그러나 뇌관 내의 연시 장치는 불가피하게 발화 오차를 갖으며 이로 인해 뇌관의 기폭시간의 오차가 발생하게 된다.

발파에서의 지연단차는 대부분 뇌관 고유의 지연시차에 좌우되고 있으며 불행히도 뇌관의 오차 때문에 계획된 지연단차가 현장의 발파에서 이루어지지 않는 경우가 있다. 이러한 오차들은 배열에서 일어날 수 있는 무작위 인적 오차, 제조상의 통계적 오차 및 규칙적 오차 등이 있다. 인적 오차가 가장 빈번하게 일어나는 오차인데 발화 시간 오차의 가능성에 주의한다면 제조상의 오차와 마찬가지로 조절할 수 있다.

Winzer(1979)는 제조상 야기되는 폭굉 시간의 통계적 오차를 결정하기 위해 전형적인 ms 지발뇌관의 폭굉을 고속카메라로 기록하였다. 폭굉 시간의 일관성을 $x \pm 1\sigma$로 표시한 평균(x)과 표준 편차(σ)로 측정하였으며 연구 결과 평균 폭굉 시간만을 고려하면 폭굉 시간의 역전이 가능한 것으로 결론지었다. 실제 발파에서 역전이 열간에 발생했을 때, 파쇄가 불량하고 큰 입자속도가 초래된다. 이러한 역전의 가능성은 Figure 3.2의 뇌관의 발화시간 분포에서도 확인 할 수 있다.

Winzer(1979)의 연구 이래로 화약류 제조업자들은 뇌관의 실제 점화시간

에서 발생하는 변화를 줄이는 조치를 취하였으며 최근에는 이러한 뇌관의 발화 오차를 극복하기 위하여 기폭 오차의 범위가 2ms 이내인 전자뇌관이 개발되어 일부 국가에서 사용되고 있으며 현재 국내에서도 몇몇 현장에서 적용되고 있다.

즉, 국내에서 대부분 사용되는 뇌관에 지연장치가 있는 비전기식 뇌관과 전기 뇌관만을 고려한다면 뇌관의 발화 오차에 의해 인접 단차가 동시 혹은 구조적으로 파가 강화될 수 있는 범위 내에서 기폭되어 유효장약량(지발당 장약량, W)를 변화시킬 가능성이 있다.

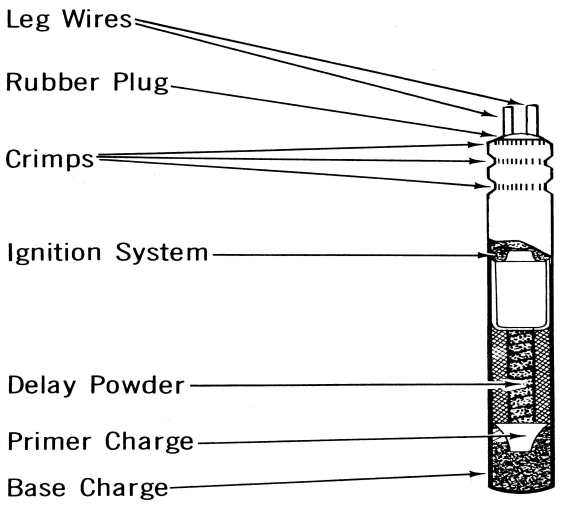


Figure 3.1 The structure of electric detonator.

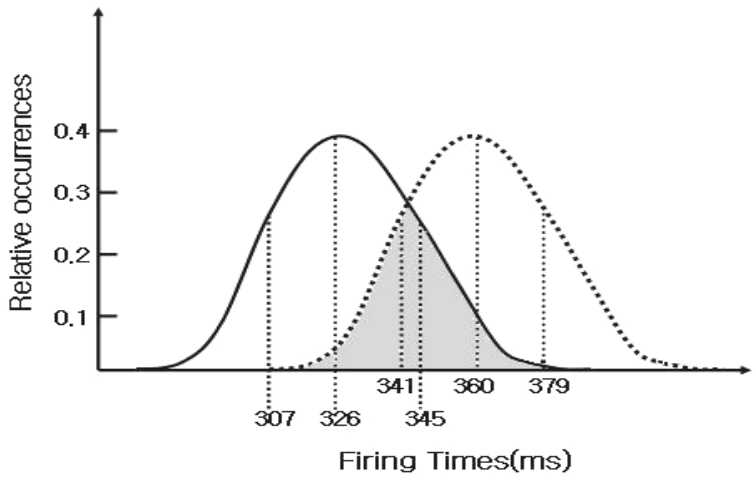


Figure 3.2 Distribution of firing times for two-delay caps(T_{avg}=326 and 360ms; standard deviation=19ms).

3.3 전파 속도의 영향

발파 장소로부터 일정 거리만큼 떨어진 지점의 발파 진동의 도달 시간을 고려할 때 발파 장소의 공간거리와 발파공 내에 삽입된 뇌관의 각각 지연시차에 따른 기폭의 방향성으로 인해 계측 지점에서 발파에 의해 발생한 탄성파는 종종 계획하는 지연단차로 도착하지 않는 결과를 초래한다.

Reisz(2006)의 연구를 바탕으로 예를 들면, Figure 3.3과 같이 동시 기폭되는 두공이 계측지점과 각각 300, 350m 이격 되어 위치할 때 P파의 전파속

도를 2750m/sec라고 가정하고 단순히 P파의 이동시간만을 계산한다면 두공의 계측지점까지의 도달시간은 다음과 같다.

1ms당 이동거리 : $2750\,m/\sec = \frac{2750\,m}{1000\,ms} = 2.75\,m/ms$

300m까지의 도달 시간 : $\frac{300\,m}{2.75\,m/ms} = 109\,ms$

350m까지의 도달 시간 : $\frac{350\,m}{2.75\,m/ms} = 127\,ms$

두 발파공이 정확히 동시에 폭발한다고 해도 도착시간은 계측지점에서 18ms의 차이가 발생한다. 즉, Figure 3.3과 같이 A지점에서는 파형이 분리되지 않으나 B지점에서는 도착시간의 영향으로 파가 서로 분리되어 관찰될 수 있다.

발파 장소에서 발파공의 공간거리에 따른 계측지점까지의 거리의 영향으로 인해 계획된 지연단차는 계측지점에서 이루어지지 않을 수도 있으며 계측지점에 각각 다른 지연 시차의 발파공에서 발생된 탄성파가 동시에 도착하여 유효장약량을 상승시키는 결과를 초래 할 수도 있다.

이러한 경향은 발파방향에 따른 진동속도를 연구하게 하였으며 기폭방향의 반대 방향에 비해 높은 진동 속도가 관측되며 이러한 현상을 Snowballing Effect라 한다. 즉, 이러한 영향을 탄성파의 도착 시간측면에서 검토한다면 먼저 기폭되고 먼 거리에 있는 발파공에서 발생된 탄성파는 가까운 거리에서 늦게 기폭된 발파공에서 발생된 탄성파와 동시 혹은 인접해서 도착되므로 유효장약량을 상승시켜 높은 진동속도가 관측되는 것으로 해석할 수 있다.

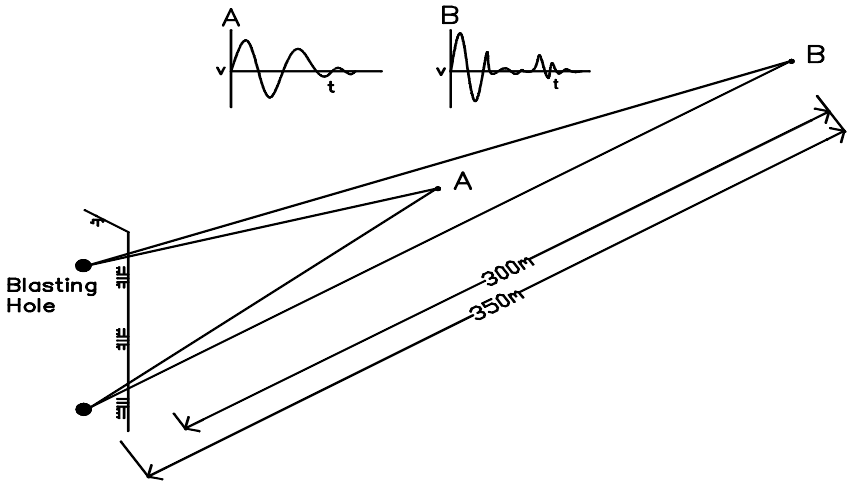


Figure 3.3 The effect of velocity of sound.

3.4 8ms 기준과 Langefors 시차이론에 대한 고찰

3.4.1 8ms 기준에 대한 고찰

진동 문제를 다룰 때 지발당 장약량의 산출은 매우 중요하다. 왜냐하면 이 지발당 장약량은 환산거리식의 주요 변수중 하나이기 때문이다. 지발당 장약량의 개념은 1회의 발파에서 동시에 기폭되는 장약들의 합 또는 8ms 이하로 기폭되는 장약들의 합의 의미를 가지며 인접 단차에 영향을 미치지 않는 지연단차로 정의할 수 있다(Agnerustan, 1998).

지발당 장약량의 기초가 되는 8ms 기준에 대한 연구는 1960년에 Duvall, Johnson, Meyer, 그리고 Devine에 의해서 실시되었고, 1963년에 RI 6151로 간행되었다. 이 연구는 Alden, Lowa 근처의 석회석 채석장에서 1열 19단의 순발 및 지발로 기폭시키고 그 결과를 계측하는 방법으로 수행되었다.

한편 다른 연구자들에 의해 인접단차와의 영향 정도가 연구 되어졌으며 Langefors(1949)는 상쇄간섭을 포함하면 진동 주기의 2.5배 이상의 시차를 인접한 공사이의 간섭이 없는 것으로 가정했으며, Linehan and Wiss (1978)은 17ms를 주장한바 있다.

또 다른 연구가 NECGB(Nobel's Explosives Co. of Great Britain)에 의해 수행된 연구에 의하면 가장 낮은 진동 수준은 25ms 시차에서 이루어짐을 보였다(Carlos, et al., 1995).

그럼에도 불구하고 8ms의 기준에 따른 환산거리 방식은 발파진동의 예측에 있어서 높은 예측의 정확도와 간편함으로 인해 오늘날까지 널리 통용되고 있다. 그러나 8ms 기준에 대한 발파 기술자들의 많은 의구심과 더불어 Douglas Anderson(1989)은 8ms 기준은 너무 긴 시차라고 지적했다. Oriard

and Emmert(1980)은 매질의 전파속도, 장약간의 거리, 기폭 진행방향과 같이 다른 인자와 함께 구조적으로 파가 강화되어 유효 장약량을 변화 시킬 가능성도 있으며 분석에 신중을 기해야 한다고 했다. Linehan and Wiss(1980)는 폭풍압과 진동의 크기들은 초기 방향성, 지연시차, 공간격, 그리고 전달속도에 의해서 영향을 받는다는 것을 증명하는 실험으로 단일 열의 실험 결과로 부터 식(3.1)을 발표하였다.

$$t_e = t_n - \frac{S\cos\phi}{VC} \qquad (3.1)$$

여기서, t_e = 유효 지연시차

t_n = 공 폭발 사이의 지연시간

S = 공간격

φ = 연속적으로 폭발된 공들과 관심 지점 사이의 각도

VC = 전파 속도

Figure 3.4와 같이 평가되는 각도의 단일 열 발파의 경우 t_e=0이 될 경우 같은 시간에 파가 도착하고 이 파들 사이에는 협동이 발생한다. 또 협동이 발생하는 각도는 식(3.2)으로 결정할 수 있다.

$$\phi_c = \text{arc cos}\frac{VC \times t_n}{S} \qquad (3.2)$$

Siskind and David(2000)는 "Vibrations from blasting"의 저서에서 8ms 규정에 대해 그들의 결과는 전혀 놀라운 것이 아니며, 지반의 주파수가 30Hz이고 두 번째 파가 8ms 시차로 도착한다면 8ms는 첫 번째 파의 1/4주기(T)

인 지점에 불과 하다고 서술하고 있다.

최근의 연구 결과에 의하면 8ms 기준은 새로운 지역의 개략적 약량의 산출 등의 제한된 범위에서 사용될 수 있으며, 환산거리에 대한 개념의 재 정의를 논하였다(Reisz, et al., 2006).

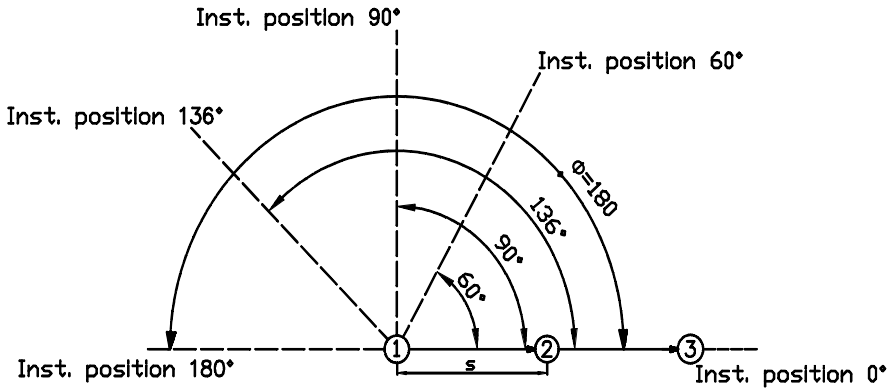


Figure 3.4 Typical recording instrument positions and firing angles for a 3 hole blast, with a firing sequence of 1, 2, 3 from left to right(Linehan and Wiss, 1980).

3.4.2 Langefors의 시차이론에 대한 고찰

Langefors에 의해 지연시차의 서로 다른 인자인 공수, 주파수가 발파 진동에 얼마나 영향을 미치는가에 대한 최종적인 결론이 제시되었다. 간섭의 영향은 지연시간(τ)이 진동시간(T)만큼 크거나 정수의 곱으로 적용될 때 얻어지고, 진동의 협동은 서로 다른 지연시차에서 진동이 합해짐으로서 발생한다. 이것은 H가 정수의 비율일 때 적용된다(Langefors and Kihlström, 1978). 그 관계는 식(3.3)과 같다.

$$\tau = HT \qquad (3.3)$$

다른 한편으로 H는 서로 다른 파를 단절 시키거나 또 다른 것을 약화(상쇄간섭)시키는 반값의 기수이다. 이것은 거의 완벽하게 H가 1/2 일 때 생긴다. 그러나 H값이 5/2보다 더 높은 값이면 보강이나 상쇄 간섭에 의해 규정된 영향은 이 규칙을 따르지 않는다.

연속하여 기폭하는 공의 간섭은 다른 방법으로 얻을 수 있다. 일반적인 상태의 K는 정수이지만, K와 n 사이의 비율은 정수가 아니다. 다시 말해서, $K/n \neq 1, 2, 3, \cdots\cdots$ 이다. 그 관계는 식(3.4)과 같이 표현 할 수 있다.

$$n\tau = KT \qquad (3.4)$$

여기서, n은 지발 수(단수)를 나타내며 nτ는 1회 발파의 전체 시간을 가리킨다. 이것은 실제적인 적용에 있어 중요한 의미를 갖는다. 앞의 간단한 간섭상태에 의하면 정확한 단차는 주파수가 요구되지만, 식(3.4)에 따른 간섭 상

태는 매우 광범위한 범위 내에서 이루어질 수 있다.

지발의 수를 증가하면 지반진동의 진폭이 감소한다는 놀라운 결과가 많은 문헌에 나타나 있다(Dowding, 1984). 또한 지발 수가 증가하면 K 값이 정수에 근접하게 되는 것은 위에서 나타나는 명확한 결과이다. Figure 3.5는 5공의 발파에서 K 값의 변화에 따른 진동의 정도를 보이며 K값이 정수(1과 2)일 때 진폭이 가장 낮음을 알 수 있다.

지연시차가 주기만큼 길거나 또는 값이 두 배가 될 경우(τ=T or 2T), 서로 다른 장약 공으로부터 진동의 협동을 피하는 것이 불가능 하다. 만약, 1회의 발파가 수많은 지연 단수를 가진다면 3T나 그 이상의 상대적인 시간거리에 놓인 지연시차를 갖는 발파공은 일반적으로 비협동(non-cooperative)이라는 것을 예상할 수 있으며 상쇄 간섭을 포함한다면 서로 다른 단차간의 협동은 τ>2.5T때에 일어나지 않는다고 추측할 수 있다.

즉, Langefors의 시차이론(Langefors and Kihlström)에 의하면 지발당 장약량은 2.5T 내로 기폭되는 공의 총장약량으로 평가 될 수 있다. 그러나 지반에 따라 변화되는 주파수를 모두 고려하기란 불가능하며 고려한다 할지라도 상쇄나 보강 간섭을 모두 포함하므로 자료처리가 더 난해해질 수 있다. 그러므로 Langefors 시차이론에 의한 지발당 장약량의 규정이 더 정량적이라 할지라도 환산거리식의 지발당 장약량의 적용에는 불가능 할 것으로 사료된다.

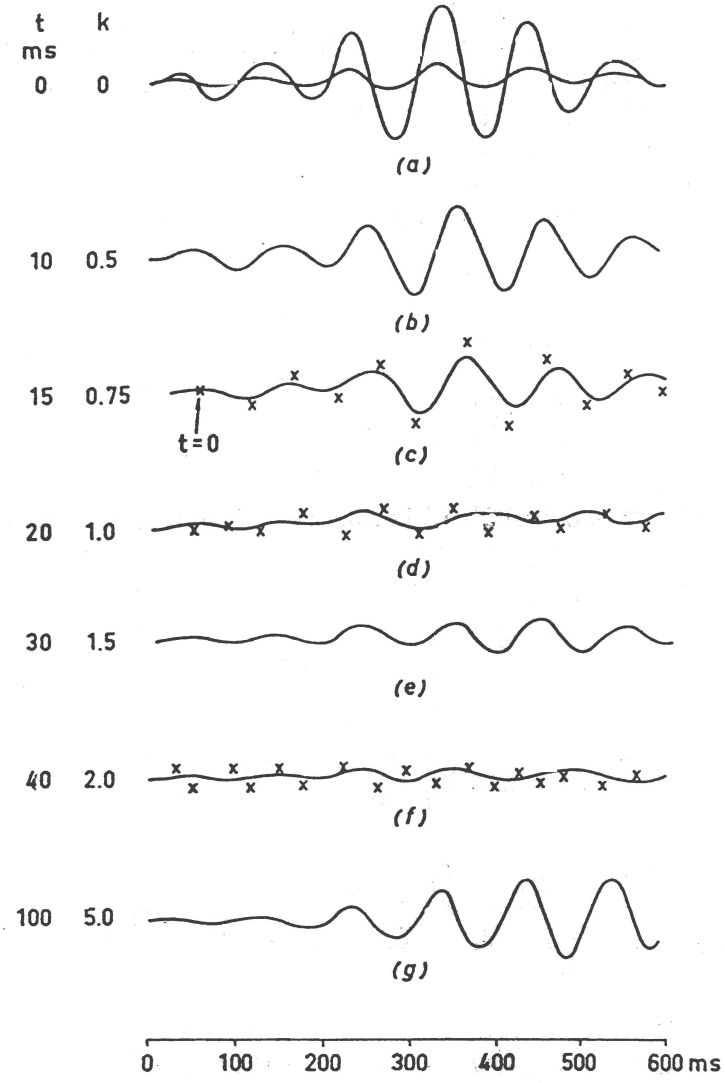


Figure 3.5 Ground vibrations from five different charges and with delays 0~100ms(Langefors and Kihlström, 1978).

3.5 Langefors 시차 이론에 의한 8ms 기준의 해석

Duvall(1963)등은 "Vibrations from instantaneous and millisecond delayed quarry blasts"의 RI 6151에서 0, 9 17, 그리고 34ms등 각각의 시차에 대해 공당 200lb(약 90kg)의 단일 열로 실험을 실시하였다. 실험 결과 0ms 지연을 제외하고 지발당 1공의 경우에 비해 공수와 지연 시차의 길이는 평균 진동수준에 영향을 주지 못한 것으로 결론을 내렸다. 그러므로 인접공의 기폭으로 인한 진동의 영향을 주지 않는 시차로 9ms 이상의 지연시차 사용을 제시하였다. 이후 이러한 8ms 기준은 발파진동을 예측하는 환산거리식에서 지발당 장약량을 결정하는 기준이 되었다. 그러나 8ms의 기준을 얻은 실험에 대한 결과 주파수가 30~40Hz인 시험 장소에서 행해진 것이며 만약 30Hz 지반을 고려할 경우 8ms의 지연 단차는 두 번째 파가 도착하는 지점이 첫 번째 파의 1/4주기인 지점에 불과 하다(Siskind, 2000).

여기서, Langefors 시차 이론(Langefors U. and Kihlström B.)에 의해 8ms 기준을 접근한다면 식(3.3)에 의해 지연시차(τ) 9ms, 주기(T) 33ms이므로 H는 0.27이 된다. 즉, 0.27T(9ms) 부근에서 단일공 수준의 진동수준을 기록하고 0.5T (16.5ms)에서 가장 낮은 진동수준을 기록할 것이며, 상쇄 간섭에 의해 단일공 이하의 진동수준을 기록하는 것으로 해석할 수 있다. 또한, 33ms 부근에서 보강 간섭에 의해 다시 단일공 진동수준 보다 훨씬 큰 진동을 기록할 것이다.

상기에서 살펴본 바와 같이 RI 6151의 8ms 기준과 Langefors 3T의 기준은 인접 발파공의 발파로 인한 진동의 영향을 미치지 않는 단차로 정의할 수 있다. 8ms 기준과는 달리 3T의 기준은 주파수를 고려한다는 점에서 더 정량적이라 할 수 있다. 하지만 동일한 발파 장소라 할지라도 계측지점과 발파 원

과의 거리 변화에 따라 주파수의 변화가 다양하므로 지발당 장약량 설정에 있어서 3T의 기준은 적용하기 곤란할 것으로 판단된다.

지발당 장약량 설정의 가장 중요한 면은 변수를 설정함으로서 진동의 예측과 관리, 그리고 평가의 신뢰성이 요구되는 단순화를 추구 하는데 있다. 현재까지의 8ms 기준을 사용하는 환산거리식에 의한 발파 진동의 예측과 관리, 그리고 평가에 있어서 대두되는 문제점은 지반조건, 발파방법, 발파 규모 등이 변화될 때 발파 진동을 예측하는 환산거리식도 함께 재조정해야 한다.

Figure 3.6은 Langefors 시차 이론(Langefors and Kihlström, 1978)에 근거한 발파진동의 간섭에 있어서 보강(1T, 2T, 그리고 3T)과 상쇄(0.5T, 1.5T, 그리고 2.5T) 간섭이 반복되는 각각의 주파수에 따른 지연단차를 도시한 것이다.

인접단차 간에 진동의 영향이 없는 단차를 Langefors의 3T(상쇄간섭을 포함한 2.5T), Duvall(1963)등의 8ms, Wiss and Linehan (1978)의 17ms, 그리고 NECGB(Nobel's Explosives Co. of Great Britain)의 25ms로 발표되었다. 이들 중 2.5T의 기준으로 8, 17, 그리고 25ms의 단차를 Figure 3.6을 토대로 고찰하면 다음과 같다.

① 인접 단의 영향이 없는 단차로 8ms이하를 설정한다면 주파수 1~200 Hz 범위에서 0.5T와 1T 구간 포함되며 60Hz에서 상쇄 간섭에 의해 가장 낮은 진동 속도가 관찰 될 것이며 다른 주파수 대역에서는 60Hz 보다 높은 진동 속도가 관찰 될 것이다.

② 17ms로 설정한다면 주파수 1~150Hz 범위에서 보강과 상쇄간섭이 모두 나타나며 대략 150Hz 이상에서 인접 발파와의 간섭이 사라질 것이다.

③ 25ms로 설정한다면 1~100Hz의 범위 내에서는 보강과 상쇄간섭을 보이나 100Hz 이상에서는 인접공의 간섭은 사라질 것이다.

발파에 의한 암반에서 측정되는 주파수가 대부분 100Hz 이상인 점을 감안하면 국내에서 사용되는 두 가지 지연 시차의 전기뇌관인 20ms 지연시차는 약 125Hz이상에서 간섭의 영향이 소멸된다. 그리고 25ms의 지연시차는 100Hz이상에서 간섭의 영향이 소멸된다. 그러므로 뇌관 발화 오류의 영향을 배제한다면 20ms와 25ms의 두 가지의 지연시차 중 25ms의 지연시차가 파의 분리 면에서 더 유리 하다고 볼 수 있다. 발파에 의한 주파수가 대부분 25Hz 이상인 점을 감안하면 100ms의 지연단차는 발파진동의 보강과 상쇄 간섭의 영향을 피할 수 있다. 즉, Figure 3.6과 같이 대략 150Hz 이상에서 17ms의 단차가, 100Hz 이상 에서는 25ms의 단차가, 60Hz 이상에서는 42ms의 단차가, 37Hz 이상에서는 67ms의 단차가, 그리고 25Hz 이상에서는 100ms의 단차가 인접 발파와의 간섭이 사라질 수 있는 단차로 결정될 수 있다. 즉, 전파속도의 차이를 배제하고 지연단차만을 고려하면 지발당 장약량의 산정하는 기준은 25, 60, 100, 200Hz의 지반 주파수에 따라 적용하는 것이 타당할 것이다. 이러한 개념은 전기뇌관과 비전기식 뇌관의 지연시차에서 이미 사용되고 있다.

주파수의 변화가 심한 지역에서 간섭의 영향은 환산거리 방식에 의해 발파진동을 예측할 때 측정 자료의 분산으로 나타난다. 그리고 이러한 분산의 영향은 옳은 자료일지라도 전체 자료의 신뢰도를 높이기 위하여 버려질 수 있음을 예상할 수 있다.

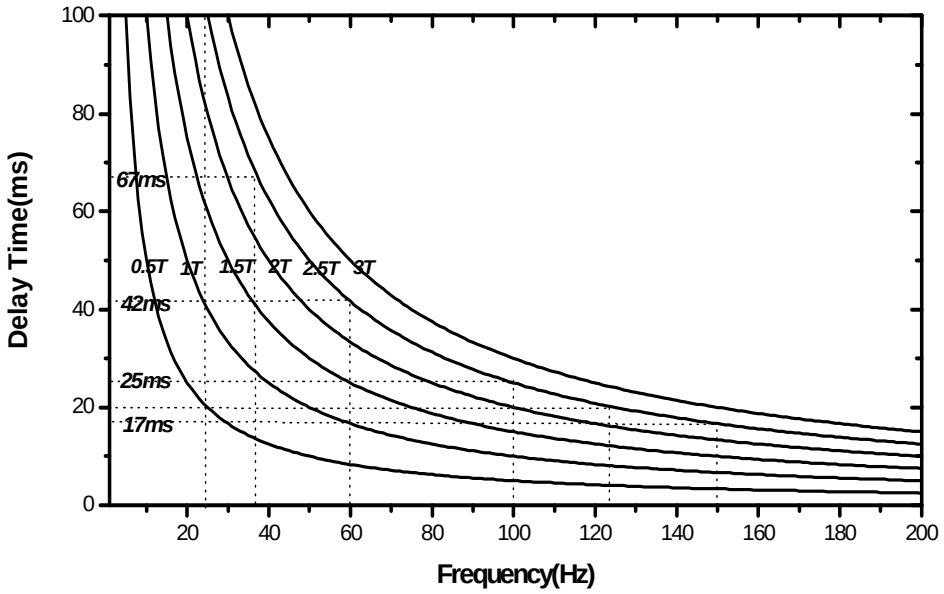


Figure 3.6 Relationship of delay time and frequency.

4. 현장 실험

4.1 개요

발파에 의한 진동 및 폭풍압의 전파 특성을 파악하기 위해서는 정해진 공간격, 저항선, 천공장, 그리고 장약량 등에 따라 시험발파를 하고 이때에 발생하는 발파 진동 및 폭풍압을 발파진동 계측기를 사용하여 측정하여야 한다. 그리고 측정된 자료를 분석하여 차후 발파 공사에서 발생할 수 있는 진동 및 폭풍압의 정도를 예측하여 인체 및 구조물 등의 피해 한계 이하에서 발파작업이 이루어 질수 있도록 발파 공법을 선정한다. 본 연구에서는 단일공 파형의 중첩모델링 자료에 의한 발파진동의 예측을 위하여 본 발파와 병행하여 단일공 파형을 계측하는 방식으로 현장실험을 진행하였다.

4.2 실험 지역의 지형 및 지질

본 연구의 실험지역은 동쪽으로 비교적 산세가 가파르고 급한 산봉들이 북동-남서 방향으로 연결되고 있으며, 영산강 유역의 저지대에 속하고 실험지역의 북서부는 대체로 산세가 높은 고지대이다. 주요 수계는 소백산맥과 노령산맥에 연한 평야에서 이들과 평행하게 북동-남서방향으로 영산강이 흐르며, 실험지역을 통과하는 극락강과 인접한 황룡강 및 평동천은 영산강의 지류이다. 실험지역 일대의 지질은 Figure 4.1과 같이 선캠브리아기의 화강암질 편마암, 고생대 후기의 북동-남서방향의 퇴적분지, 쥬라기에 남서-북동

방향으로 화강암 관입, 백악기에 응회암류 및 안산암류, 암맥류 관입 등, 백악기 후기에 침식작용으로 현재의 지층을 형성하였다. 대보조산운동에 의한 변성작용 및 변형작용으로 북동-남서방향의 편리와 습곡이 형성되었으며, 쥬라기 화강암이 대규모 저반을 형성하고 있다(광주광역시 상수도 사업본부, 2004).

본 실험지역의 시추조사 결과에 따르면 흑운모 화강암이 기반암으로 분포하고 있으며, 이들 상부에는 소량의 자갈 섞인 실트질모래 내지 점토질실트로 구성된 매립·붕적층 및 풍화작용에 의한 풍화대가 기반암을 피복하고 있다. 흑운모 화강암은 심성관입암류중 대표적인 암석으로 가장 넓은 노출면적을 보이고 현미경하에서 관찰된 주성분 광물은 칼리장석 · 사장석과 흑운모이며, 부성분은 각섬석 · 자철광 · 지르콘 · 인회석 등으로 판별되었다.

또 실험지역 암석시료에 대한 실내 시험결과에 따르면 Table 4.1과 같이 일축압축강도(P)는 840~1270kgf/㎠, P파 속도(V_p) 3230~3670m/sec, 점착력(c) 174.092~219.130kgf/cm^2, 내부마찰각(Φ) 44.957~51.600°로 나타났다.

Table 4.1 Result of rock property test.

Specimen ID.	Specific gravity	Poisson's Ratio	P wave Velocity (mm/sec)	Int. Fric. Angle(°)	Cohesion (kgf/㎠)	Uni. Comp. Strength (kgf/㎠)
1	2.740	0.097	3670	44.957	174.092	840
	2.752					
	2.755					
2	2.757	0.019	3230	51.600	219.130	1270
	2.722					
	2.716					
3	2.760	0.085	3530	46.090	203.230	1137
	2.741					
	2.758					

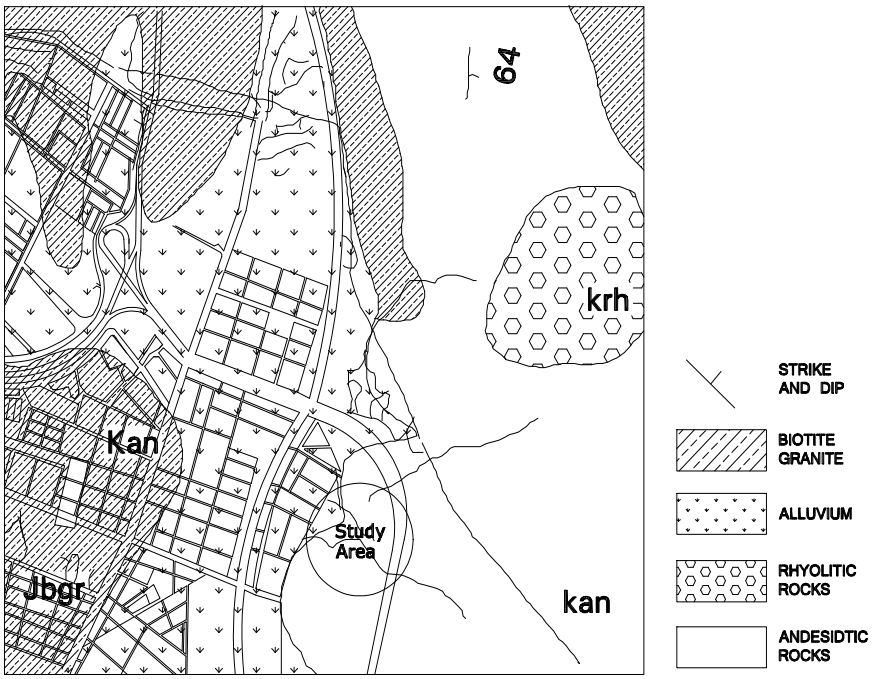


Figure 4.1 Geological map of study area.

4.3 현장 실험 방법 및 결과

4.3.1 실험 방법

본 연구의 현장 실험지역은 광주광역시 북구 각화동 일대의 『000 배수지 시설공사』의 노출된 암반 제거작업을 위한 공사 현장으로서 총 12회 발파에 대한 현장 실험을 실시하였다.

실험 조건은 Table 4.2와 같다. 1~3회는 공경 ϕ45mm, 공간격 1.0m, 저항선 0.9m, 천공장 2.5m, 그리고 지발당 장약량 0.75kg으로 발파를 실시하였다. 4~6회는 공경 ϕ45mm, 공간격 1.1m, 저항선 1.0m, 천공장 2.9m, 그리고 지발당 장약량 1.00kg으로 실시하였다. 7~9회는 공경 ϕ45mm, 공간격 1.2m, 저항선 1.1m, 천공장 3.1m, 그리고 지발당 장약량 1.25kg으로 시험발파를 실시하였다. 또한, 10~12회는 공경 ϕ75mm, 공간격 1.3m, 저항선 1.2m, 천공장 3.3m, 그리고 지발당 장약량 1.60kg으로 시험발파를 실시하였다. 이상과 같이 시험 발파는 총 12회 실시하였다. 1~9회의 경우 ϕ32mm(250g/EA)인 에멀젼(Emulsion)폭약을 사용하였다. 또한, 10~12회의 경우 ϕ50mm(800g/EA)인 에멀젼 폭약을 사용하였다.

뇌관은 MS 지발 전기뇌관과 LP 전기뇌관이 사용되었으며 천공패턴과 점화 패턴은 Figure 4.2와 4.3과 같다. 사용된 뇌관을 자세히 설명하면, 본 발파용 뇌관과 단일공 파형용 뇌관으로 구분하여 설명할 수 있다. 본 발파에 사용된 뇌관은 ms 지발 전기뇌관으로 0ms부터 순차적으로 20ms의 지연시차를 갖는 뇌관을 사용하였으며 Figure 4.3과 같이 120 ms의 지연시차를 갖는 뇌관은 생략하였다. 또 단일공 파형을 얻기 위하여 매회 발파 중 최후의 공에

대해서는 동일하게 600ms의 시차를 갖는 뇌관(LP6)을 사용하였다. 본 연구의 중첩모델링에 사용된 실험 자료는 3회와 6회 그리고 12회의 측정 결과이다.

Table 4.2 Applied design parameter for some of the shots.

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Explosive	Emulsion explosive											
Explosive diameter	Φ32mm									Φ50mm		
Detonator	MS or LP Detonator											
Diameter (mm)	45									75		
Drilling Length(m)	2.5			2.9			3.1			3.3		
Burden(m)	0.9			1.0			1.1			1.2		
Spacing(m)	1.0			1.1			1.2			1.3		
Charge per hole(kg)	0.75			1.00			1.25			1.60		
Charge per delay(kg)	0.75			1.00			1.25			1.60		
Number of hole	9	12	15	9	12	15	9	12	15	9	12	15

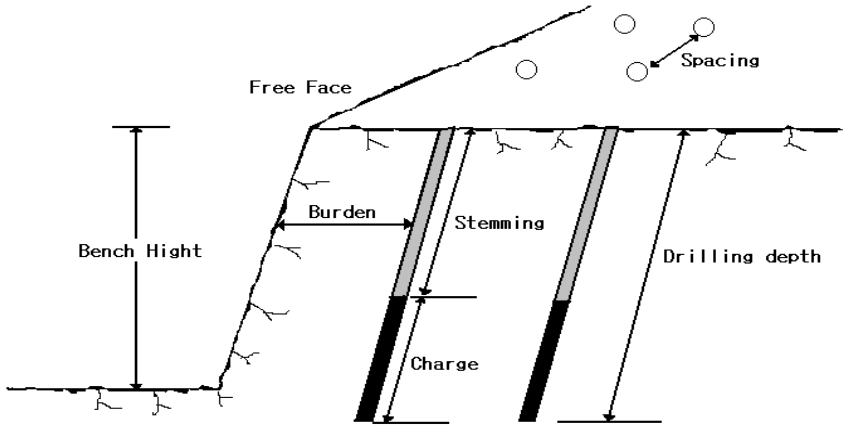


Figure 4.2 Blasting pattern.

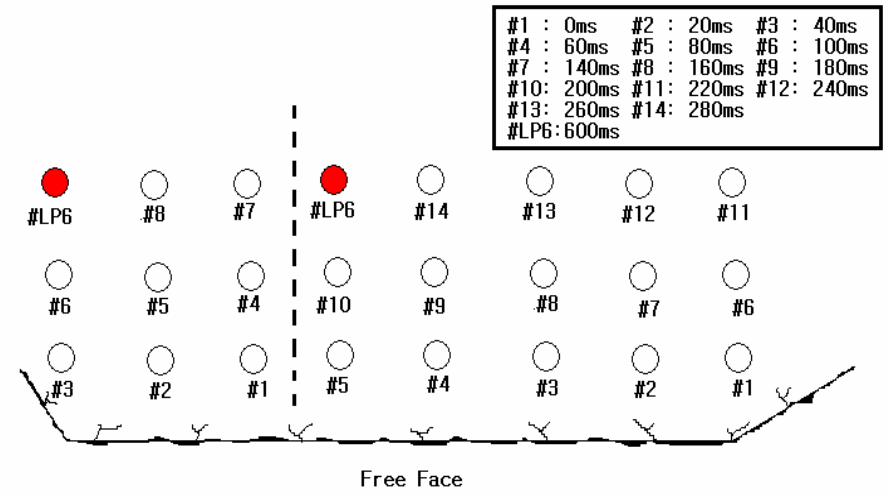


Figure 4.3 Firing times for a pattern.

4.3.2 현장 실험의 계측

현장 실험의 계측은 Instantel사의 DS477 2대와 Minimate plus 1대등 총 3대의 계측기기를 사용하여 계측을 실시하였다. 실험 계측에 사용된 DS477 및 Minimate plus는 현장의 발파 및 건설장비 등을 이용한 작업 시 발생되는 소음, 진동 등을 계측하여 진행, 접선, 수직 및 주파수 등을 현장에서 인쇄하여 진동 계측값을 손쉽게 확인할 수 있으며, 지발당 장약량(charge weight per delay)과 거리(distance)를 수동으로 입력하면 이를 환산거리(Scaled distance)로 자동으로 계산하는 기능뿐만 아니라, 진동측정의 주파수 및 시간이력 등을 상세히 보여주는 국내에서 가장 널리 사용되고 있는 진동 측정기기라 할 수 있다.

DS 477의 측정범위는 0.13~254mm/sec이며 Minimate plus의 측정범위는 0.51~254mm/sec이다. 주파수 분석을 수행하고자 할 때 모두 ZC(Zero Cross Frequency)와 고속 푸리에 변환(FFT, Fast Fourier Transform)이 가능하며 USBM/OSMRE와 DIN4150 주파수 분석이 가능하다. Table 4.3은 사용된 계측기기(DS 477)의 특성을 나타낸다.

Figure 4.4는 현장 실험장소와 계측기의 위치를 보여주며, 실험 현장의 사진 및 계측 장면은 Figure 4.5~4.8에 잘 나타나 있다.

Table 4.3 Instrument specifications.

Section		Specifications
Seismic	Max. Range	Up to 254mm/sec
	Trigger Level	0.13～253.9 mm/sec Step of 0.1 mm/sec
	Peak Acceleration	0.01～30g calculated
	Peak Displacement	0.0025～38.1mm calculated
	Frequency Analysis	USBM/OSMRE & DIN 4150
Linear & C Weight Air	Range	88 to 142 dB(0.5～250 Pa)
	Trigger Levels	100, 102, 104 & 105～142 dB in Steps of 1 dB
A Weight Sound	Range	55 to 110 dB
	Trigger Levels	55.0～110.0 dB in Steps of 0.2 dB
	Frequency Response	0.5～8KHz, Impulse Filtering
Frequency	Sampling Rate	1,024 samples/second
	Frequency Response	Seismic & Linear Air 1.5～250 Hz
Full Waveform Recording	Record Modes	Manual, Single Shot, Continuous, Auto
	Fixed Record Time	1 to 10 sec, Selectable in 1 sec Increments +0.25 Pretrigger
Strip Chart Recording	Record Method	Record to Memory & to Protter Output
	Intervals	5 sec, 15 sec, 1 min., Selectable
	Analysis	Frequency of Peak & Peak Vector Sum for each Interval

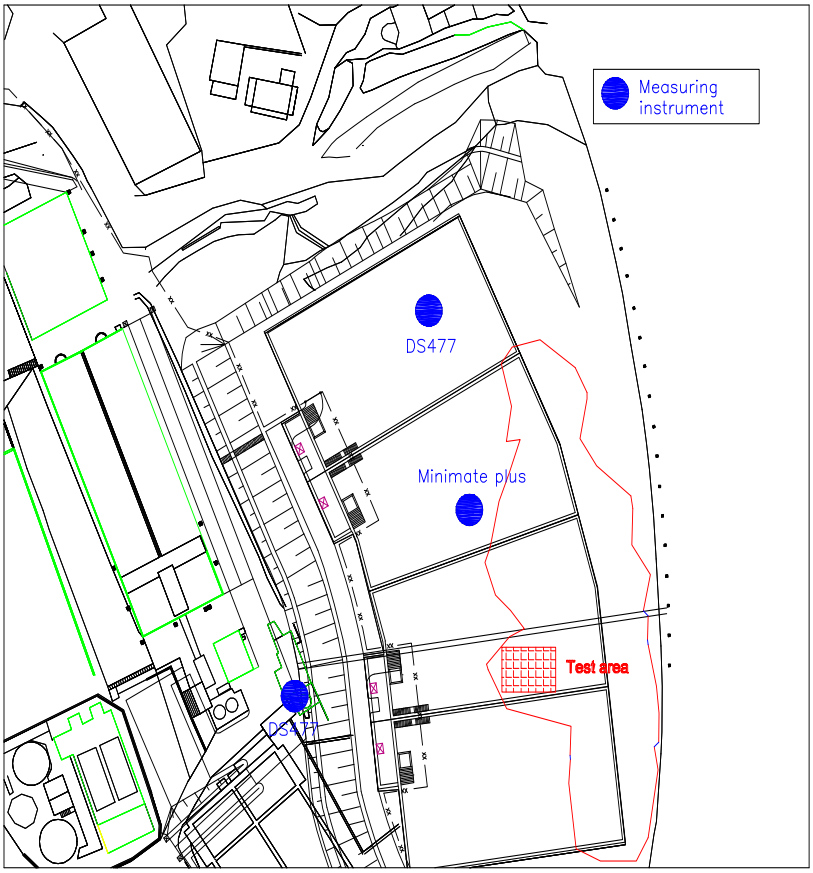


Figure 4.4 Measurement location.

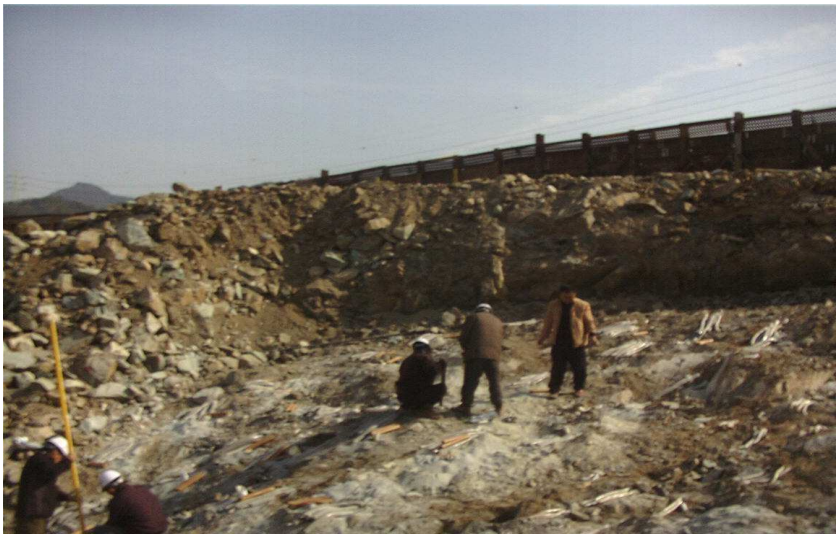


Figure 4.5 Charging view.

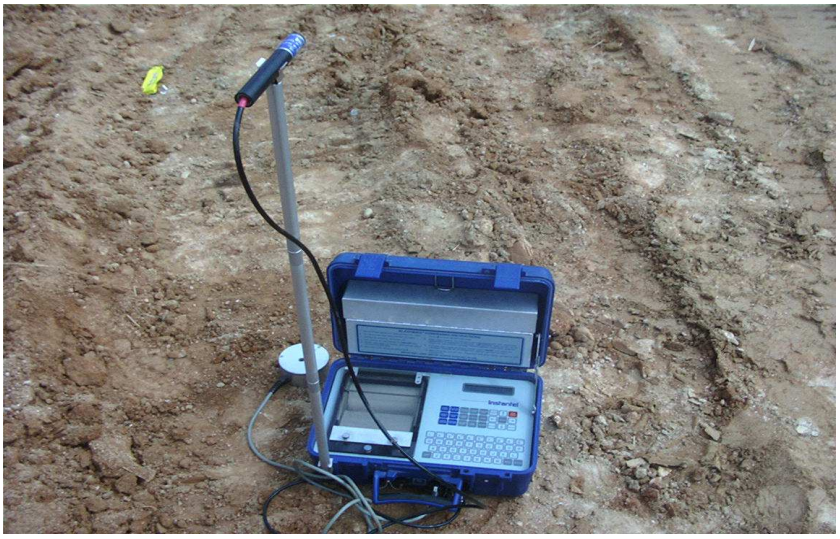


Figure 4.6 Case 1 of measurement instrument(DS 477).

Figure 4.7 Case 2 of measurement instrument(DS 477).

Figure 4.8 Case 3 of measurement instrument(Minimate Plus).

4.3.4 현장 실험 계측 결과

Table 4.2의 발파조건과 Figure 4.2, 4.3의 천공 및 점화패턴으로 총 12회에 걸쳐 실시된 발파 진동 계측 결과 총 35개의 자료를 획득하였으며 계측된 자료는 Table 4.4와 같다. 그리고 발파 진동의 계측은 Figure 4.6, 4.7, 그리고 Figure 4.8과 같이 3대의 계측기를 사용하여 발파 지점과 29~94m의 거리에서 행해 졌다.

Table 4.4의 현장 실험 계측결과에 따르면 최대 입자 속도(PPV, Peak Particle Velocity)의 경우 수직방향성분(V)은 0.413～9.91mm/sec, 접선방향성분(T) 0.413～9.40mm/sec, 그리고 진행방향성분(L) 은 0.603～17.9mm/sec로 계측되었다.

주주파수는 고속 푸리에 변환(FFT, Fast Fourier Transform)을 통하여 결정하였으며 수직방향성분(V) 24~153Hz, 접선방향성분(T) 25.3~191Hz, 그리고 진행방향성분(L) 은 23.3~144Hz로 분석되었다.

Table 4.4 Measurement result.

No.	Tran.		Vert.		Long.		Charge (kg/delay)	Distance (m)
	PPV (mm/s)	Dom. Freq. (Hz)	PPV (mm/s)	Dom. Freq. (Hz)	PPV (mm/s)	Dom. Freq. (Hz)		
1	3.30	191	1.02	102	2.16	123	0.75	34
2	5.21	169	1.65	88.3	5.46	77.5	0.75	29
3	5.08	187	1.65	102	4.06	117	0.75	30
4	6.98	145	3.43	143	5.97	144	1.00	37
5	11.6	133	5.33	153	8.38	94.8	1.00	40
6	6.86	106	2.79	78.0	5.59	121	1.00	33
7	5.33	134	3.17	69.5	7.75	128	1.25	35
8	8.51	122	8.13	169	10.4	109	1.6	29
9	9.27	90.5	6.10	132	12.1	89.0	1.25	35
10	9.40	173	5.97	127	11.8	127	1.25	30
11	15.7	116	9.91	118	17.9	116	1.60	28
12	13.7	158	9.14	117	16.1	78.3	1.60	29
13	0.587	27.3	1.49	26.5	1.05	25.3	0.75	83
14	1.05	46.5	2.08	28.3	0.953	49.3	0.75	80
15	0.841	51.8	0.794	26.8	0.603	26.8	0.75	81
16	0.889	78.0	1.22	24	0.873	50.5	1.00	87
17	1.25	86.3	1.59	24.8	1.02	28.5	1.00	89
18	1.02	27.8	1.43	27.5	1.17	28.0	1.00	88
19	0.619	31.0	1.02	23.3	0.778	24.8	1.25	86
20	0.873	41.3	1.48	23.5	1.02	23.5	1.60	87
21	0.937	39.8	1.30	37.8	0.921	37.8	1.25	86
22	0.984	86.8	1.41	27.3	0.841	23.8	1.60	91
23	0.873	91.3	1.35	29.3	0.778	23.3	1.60	94
24	0.413	25.3	0.413	48.3	0.619	26.5	0.75	74
25	0.968	47.0	0.762	47.8	1.30	29.5	0.75	69
26	0.714	47.0	0.683	42.0	1.06	53.5	0.75	70
27	1.25	47.0	0.905	59.3	0.35	49.0	1.00	77
28	1.57	47.0	1.14	46.8	2.00	84.5	1.00	80
29	1.79	44.8	1.97	44.8	1.29	78.0	1.00	73
30	1.02	39.5	1.32	39.5	1.27	81	1.25	75
31	2.13	43.3	1.87	43.5	1.79	78.8	1.60	69
32	2.03	47.3	2.22	41.8	2.19	89.0	1.25	75
33	1.92	39.0	2.60	39.5	1.52	87.5	1.25	70
34	2.14	64.5	2.87	39.0	2.51	85.3	1.60	68
35	2.64	41.0	2.16	40.0	3.40	78.0	1.60	69

5. 발파진동의 중첩모델링

5.1 대상 파형의 선정

본 연구에서는 중첩모델링의 적용성을 검토하기 위하여 시험 발파에 의해 각각 3회의 30m, 6회의 33m, 그리고 12회의 29, 69m 거리에서 획득한 진동 측정 자료를 사용하였다. 시험 발파는 단일공의 발파가 어려운 현장 여건을 고려하여 총 15공의 1회 발파에서 가장 최후의 공을 단일공 파형으로 하기 위하여 최후의 공과 약 300ms의 시차를 둔 뇌관을 사용하였다.

선정된 4개의 파형은 측정된 V, T, L성분 중 가장 큰 진동속도를 보인 것으로 본 발파의 14공 발파에 의해 교란되지 않은 비교적 양호한 단일 공 파형을 보이며 최대 진동 속도의 크기가 이전 발파(14공)의 파쇄 등의 이유로 상대적으로 작은 진동을 기록하지 않은 파형이라 판단된다.

이전 장약공(14공)의 기폭에 의해 교란된 파형은 중첩모델링에서 다른 결과를 보일 것이며, 또한 상대적으로 낮은 진동 수준의 파형은 이전 발파에 의해 저항선이나 발파공 주위의 균열상태가 과다하여 다른 진동 특성을 보일 것으로 판단되어 선정에서 제외 시켰다.

선정된 파형은 자료 처리의 편의를 위하여 각각 30, 33, 29, 69m의 파형에 대해 각각 SN. 1~4까지의 시료 번호를 부여하였다. Figure 5.1~5.12는 각각 SN. 1~4의 전체파형과 모델링을 위해 진동 계측 자료로부터 Sampling 된 단일공 파형, 그리고 그 단일공 파형의 고속 푸리에 변환(FFT) 결과를 보여 준다.

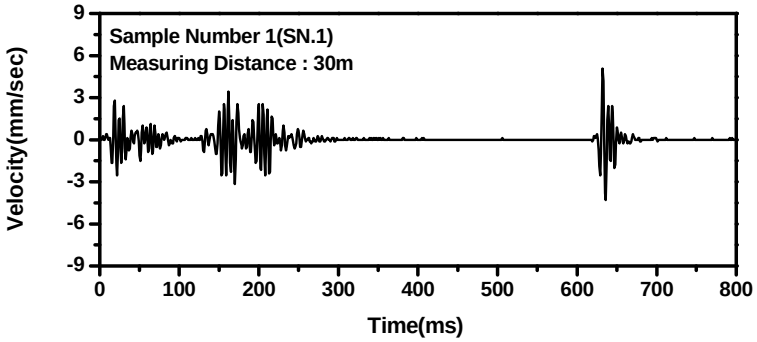


Figure 5.1 Full waveform of SN. 1.

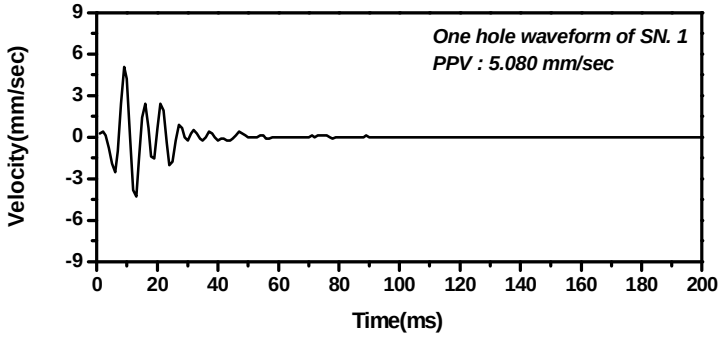


Figure 5.2 Waveform of sampled single hole.

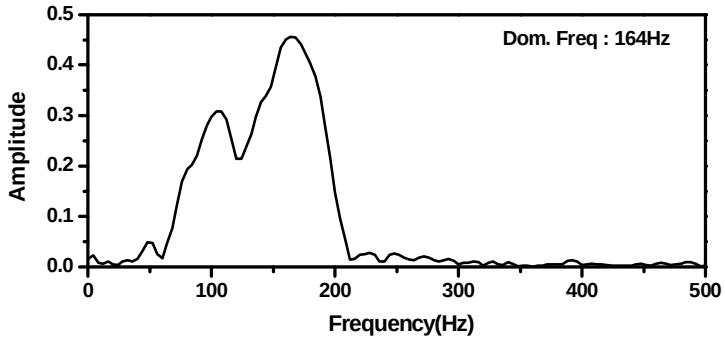


Figure 5.3 Result of FFT analysis sampled single hole.

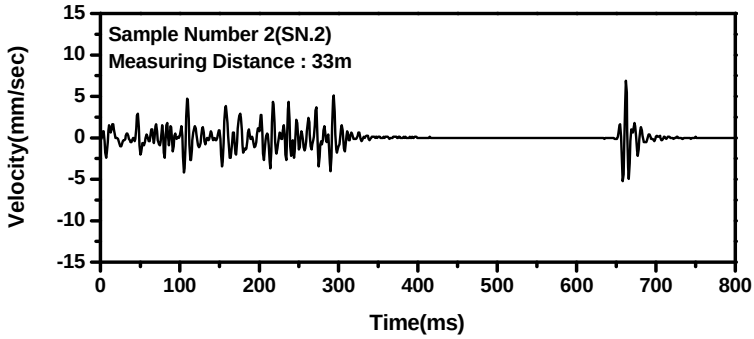


Figure 5.4 Full waveform of SN. 2.

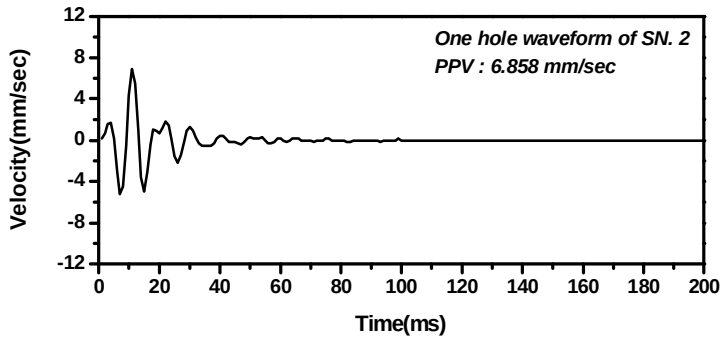


Figure 5.5 Waveform of sampled single hole.

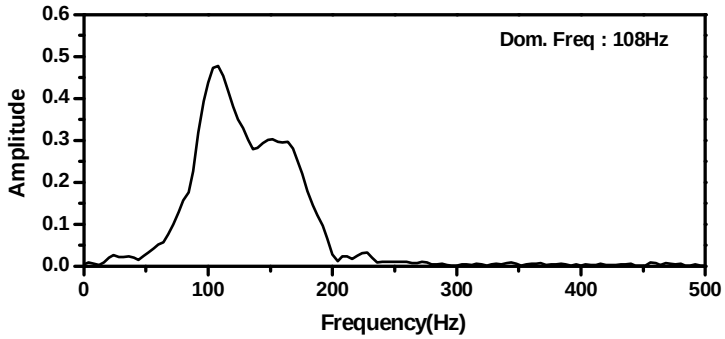


Figure 5.6 Result of FFT analysis sampled single hole.

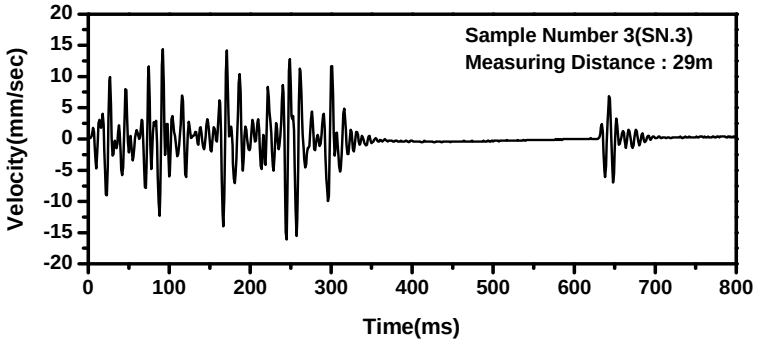


Figure 5.7 Full waveform of SN. 3.

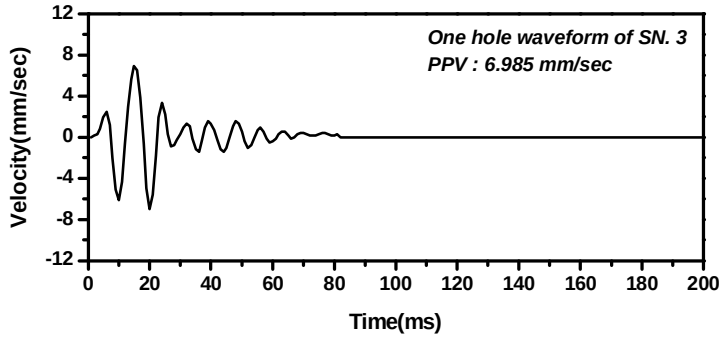


Figure 5.8 Waveform of sampled single hole.

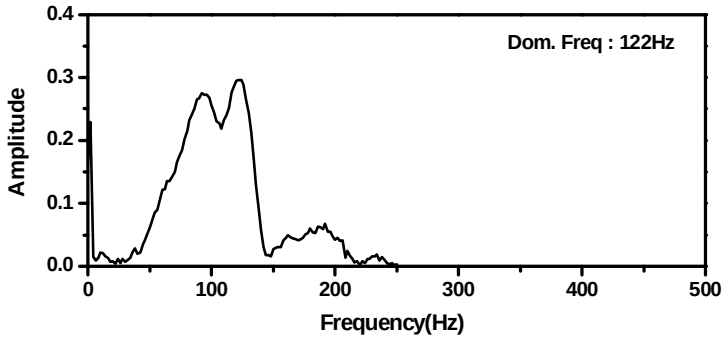


Figure 5.9 Result of FFT analysis sampled single hole.

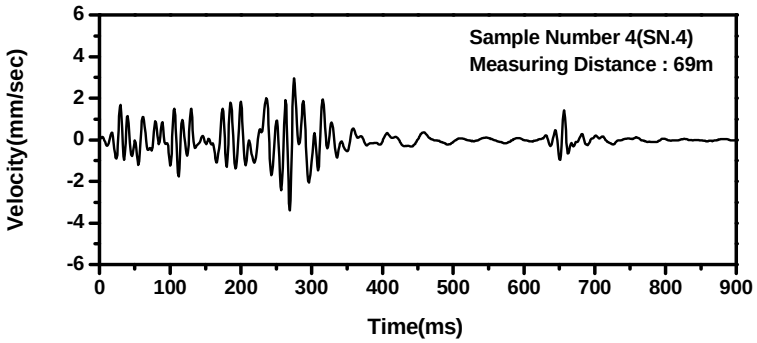


Figure 5.10 Full waveform of SN. 4.

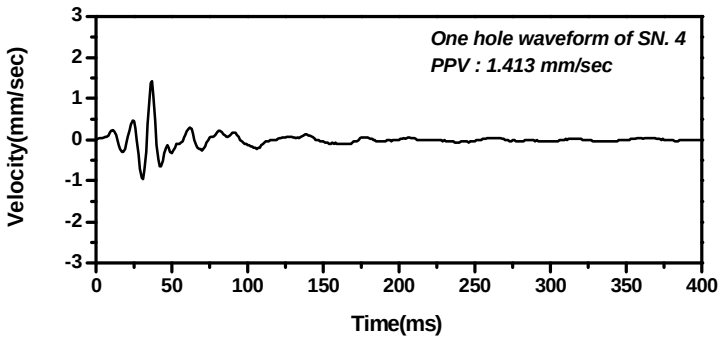


Figure 5.11 Waveform of sampled single hole.

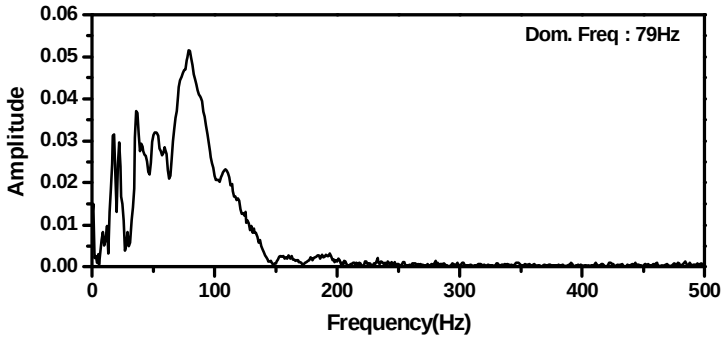


Figure 5.12 Result of FFT analysis sampled single hole.

5.2 파형 중첩 모델링을 통한 지연 단차 결정

파형중첩에 의한 발파 진동 예측은 모델링한 파형이 얼마만큼 실제 발파의 파형과 일치하는가에 관심을 둔다. 현재까지 모델링 프로그램에 의한 파형의 예측은 정해진 정확한 단차에 대한 모델링으로서 실제 계측된 진동파형과는 상이한 형상으로 중첩모델링의 신뢰도에 의문점이 제시되었다. 이러한 관점은 지발전기뇌관의 시차오류와 발파지점에서 계측기까지의 전파특성을 간과함으로써 발생한 문제점이다. 또 다른 문제점은 매회의 발파가 단일공 파형과 일치하거나 혹은 유사한 진동 파형이 발생할 것인가에 대한 의문이다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 발파와 300ms의 지연시차를 두고 기폭된 단일공 파형을 사용하여 이전의 14공에 대한 파형과 1ms 간격으로 비교해가는 시행착오법에 의해 본 발파의 진동이 실제 계측지점에 도착된 시차를 결정하는 방식으로 본 발파와 유사한 파형을 얻을 수 있도록 단일공 파형의 단차를 결정하였다. 검증에 사용된 파형은 동일한 발파에 대해 각각 29, 69m 이격되어 측정된 SN. 3과 SN. 4를 사용하였고 SN. 3의 중첩 모델링에서 얻어진 지연단차의 검증 방법으로는 SN.3에서 결정된 단차를 SN. 4에 그대로 적용하여 SN. 4의 단일공 파형을 중첩시켜 SN. 4의 본 발파 파형의 형태와 비교 하였다. 만약 SN. 3에서 결정된 단차가 잘못된 단차라면 40m 이격된 거리에서 측정된 SN. 4의 파형은 전혀 다른 형태를 보일 것이며 결정된 시차가 올바르다면 중첩 모델링된 파형과 유사한 형태를 보일 것이라는 판단 때문이었다.

5.2.1 29m 파형의 지연 단차의 결정

Figure 5.13은 Sampling된 시료 파형 SN.3 의 본 발파 파형으로서 이 파형과 비교하여 1ms 간격으로 단일공 파형을 중첩하면서 시행착오 방법(trial and erorr method)에 의해 본 발파 파형과 유사한 파형을 보이는 지점을 도착 지연단차로 결정하였으며 실제 본 발파에서 사용된 뇌관의 지연단차와 분석된 지연단차는 Table 5.1과 같으며 분석된 단차에 의한 14공의 파형 중첩 모델링 시점은 Figure 5.14와 같다. Figure 5.15는 분석된 단차에 의해 중첩 모델링된 파형과 본 발파 파형을 도시한 것이다. 중첩 모델링 결과의 파형과 실제 계측된 파형이 아주 유사한 형태의 파형을 보인다. 이것은 단일공 파형과 유사한 파형이 본 발파에서도 반복되고 있음을 나타낸다.

Table 5.1 Delay time of using detonator and analysis delay interval of SN. 3.

Using detonator	Delay time(ms)	Analysis delay interval(ms)	Charge (kg/delay)
MS 0	0	0	1.6
MS 1	20	13	1.6
MS 2	40	34	1.6
Ms 3	60	60	1.6
Ms 4	80	77	1.6
Ms 5	100	101	1.6
Ms 7	140	159	1.6
Ms 8	160	174	1.6
Ms 9	180	209	1.6
Ms 10	200	236	1.6
Ms 11	220	237	1.6
Ms 12	240	248	1.6
Ms 13	260	266	1.6
Ms 14	280	288	1.6
LP 6	600	-	1.6

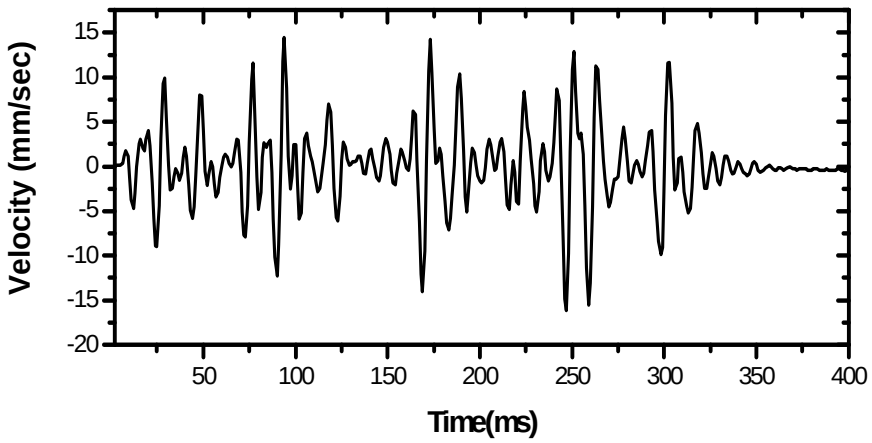


Figure 5.13 Measured waveform of 29m.

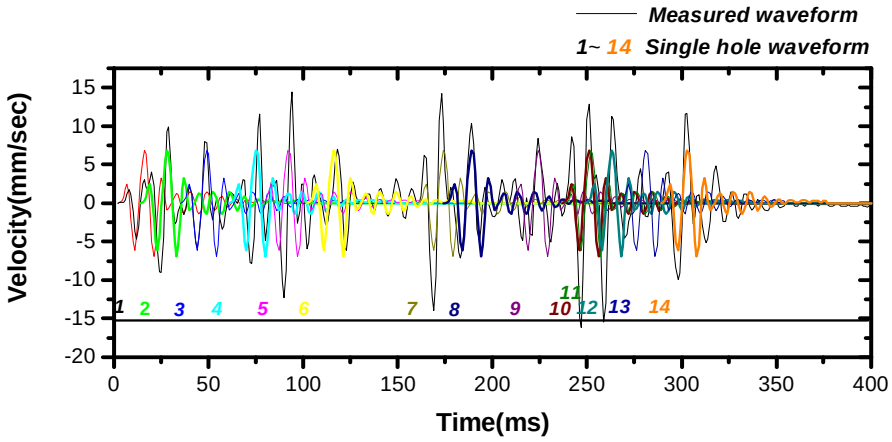


Figure 5.14 Superposition time and position of single hole.

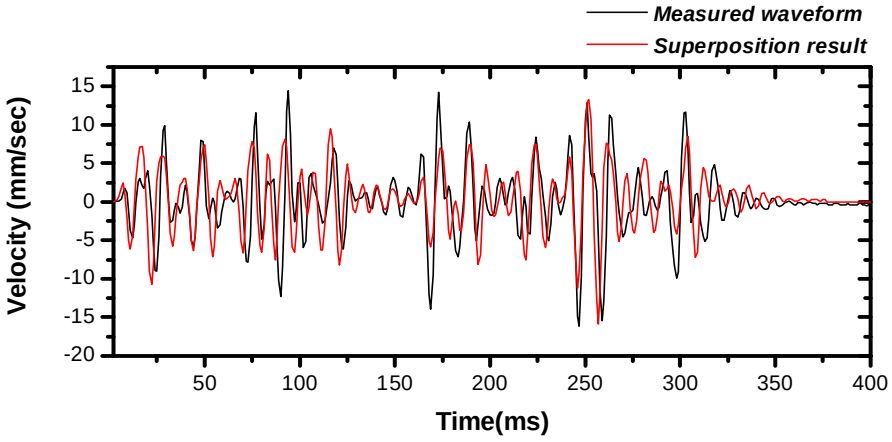


Figure 5.15 Result of superposition modeling.

5.2.2 69m 파형의 적용

Table 5.1과 같이 29m의 측정 파형에서 결정된 시차를 69m의 파형에 적용하였다. 이 69m의 파형은 12번째의 시험발파에 대한 측정 자료로서 29m의 파형과 거리만 다를 뿐 동일한 발파에 대한 측정 결과이다.

중첩 모델링 파형과 비교를 위해 사용된 SN. 4의 본 발파 파형은 Figure 5.16에 도시하였다. 중첩 모델링된 파형과 본 발파의 파형을 비교하기 위해 Figure 5.17에 도시하여 하였다. 29m 파형 중첩으로 결정된 시차를 69m에 적용한 결과 Figure 5.17과 같이 유사한 파형을 얻었다. 이렇게 동일한 발파에 대해 한 지점의 진동 파형으로부터 유추된 지연시차를 다른 지점의 파형에 적용했을 때 본 발파와 유사한 파형을 얻을 수 있는 사실은 유추된 지연시차의 신뢰도를 보증해 줄 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 단일공 발파에서 얻은 파형으로 부터 본 발파의 진동 파형을 유추하는 방법에 대한 가능성을 암시해 주는 것으로 사료된다.

결론적으로, 발파대상 지역에서 단일공 파형을 얻고 뇌관의 지연시차가 정확한 뇌관을 사용한다면 발파 대상지역의 탄성파의 전파속도로부터 대상지점까지의 전파속도를 계산하여 실제 발파와 거의 유사한 파형을 도출해 낼 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 발파 진동은 최고치의 정도가 매우 중요하며 모든 피해정도 및 허용기준이 이 최고치를 기준으로 하고 있으므로 단일공 파형을 얻는 방법에 있어서 신중을 기한다면 본 발파에서 발생되는 발파진동 최고치의 예측도 가능할 것이다. 이러한 결론을 근거로 본 연구에서는 단일공 파형의 중첩모델링 자료에 의한 발파진동을 예측하는 방법을 개발하였다.

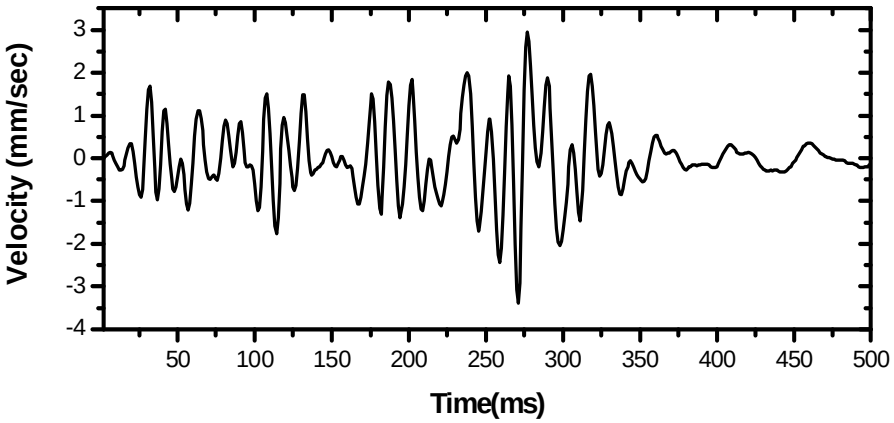


Figure 5.16 Measured waveform of 69m.

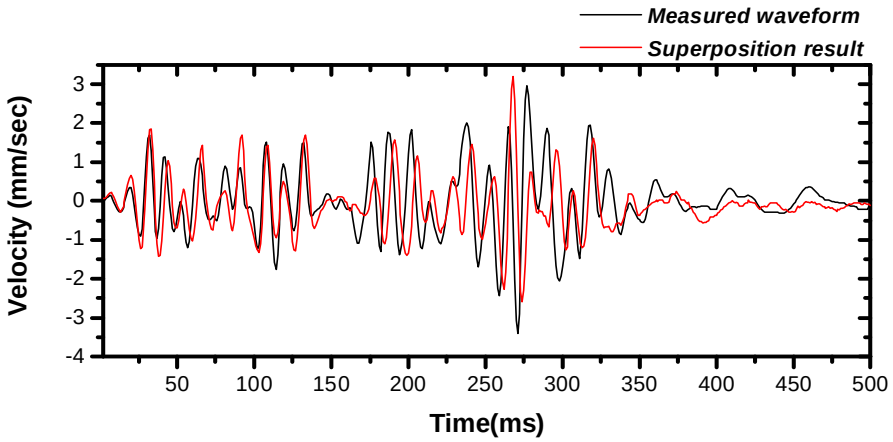


Figure 5.17 Result of superposition modeling.

5.3 발파진동 중첩 모델링

5.2절의 중첩모델링에 의한 적용성 검토로부터 발파진동은 Table 4.2의 발파 조건하에서 29~69m의 거리에서 계측자료는 중첩의 원리에 잘 부합하였다. 이러한 사실은 적정 단일공 파형을 얻을 수 있다면 실제 발파를 중첩 모델링을 통하여 모사할 수 있음을 나타낸다. 실제 지발 전기 뇌관을 사용하는 발파에서 중첩 모델링에 가장 큰 변수는 지연 단차이다. 뇌관의 발화 오차로 인해 정확하지 않은 지연단차는 중첩 모델링은 상당한 장애가 될 수 있다. 발파에서의 지연시간은 대부분 뇌관의 지연 시차에 좌우되고 있다. 불행하게도 뇌관의 발화 오차 때문에 계획된 지연 시간이 현장에서 이루어지지 않는 경우가 있다. 이렇게 발생한 오차들에는 배열에서 일어날 수 있는 무작위 인적 오차, 제조상의 통계적 오차 및 규칙적 오차 등이 있다. 이런 발화 오차는 대부분 무작위적으로 나타나므로 정확한 평가가 불가능하다(Dowding, 1984). 그러므로 발파 진동을 지연시차 면에서 연구할 때에는 발화 오차에 의해 발생할 수 있는 작은 확률이라도 발생할 수 있는 최악의 지연시차를 반드시 고려해야 할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 1회의 발파에 대해 다음과 같은 가정 하에서 중첩모델링 시험을 시행하였다.

① 1회에 발파되는 모든 발파공은 동일한 진동 파형을 발생한다.
② 각 발파공의 위치와 계측지점과의 거리는 동일하다. 즉, 발파공간 거리와 계측지점과 발파공과의 거리 및 각도는 고려하지 않았다.
③ 계측지점에 도착하는 모든 발파공에서 발생되는 탄성파 속도는 동일하다.

실제 진동파의 거동과 거리가 있는 문제점을 보완하기 위하여 중첩 모델링의 지연단차 범위를 1ms 간격으로 1~80ms까지 증가시키고 1회 발파 공수를 2~15공까지 증가 시키면서 모델링 하였으며 모델링에 사용된 진동 파형은 작은 진동속도 파형의 경우 이전의 발파에 의해 발파공 주위가 파쇄 되어 폭약의 힘이 진동으로 충분히 바뀌지 않을 가능성이 있기 때문에 SN. 1~SN. 4(Figure 5.1~Figure 5.12)의 시료 파형은 현장 실험에 의해 기록된 3성분 파형 중 가장 큰 진동속도를 기록한 성분을 선정하였다.

5.3.1 공수 증가에 따른 진동 속도의 변화

Langefors는 발파진동은 0.5, 1.5, 2.5T(주기)일 때 각 발파공간에 상쇄간섭이 발생하여 감소하며 1, 2T일 때 보강 간섭이 발생하여 증폭된다고 하였다. 또한, 3T이상이 되면 인접단차 간의 간섭은 발생하지 않는 것으로 생각하였다. 또 상쇄간섭을 염두에 둔다면 2.5T이상에서 간섭이 발생하지 않을 것으로 결론지었다.

본 연구에서는 중첩모델링을 통하여 공수의 증가에 따른 진동 속도의 변화를 고찰하고 단일공 파형의 주주파수와 중첩 모델링된 지연시차에 따른 진동의 변화를 Langefors의 시차이론과 비교하여 분석하였다.

지연단차는 1ms 간격으로 1~80ms까지 증가 시키며 모델링 하였으며 공수는 2~15공까지 증가 시켜가며 모델링을 실시하였다. 예를 들면, 15공의 중첩모델링은 먼저 1ms 간격으로 15공의 단일공 파형을 출발시켜 중첩하였으며 최종적으로 중첩된 15공의 중첩 모델링 파형 중 가장 큰 진동속도를 기록하는 방식으로 80ms 간격까지 모델링하여 각각 공수와 지연시차의 변화에 따른 진동의 최고치를 기록하였다. 중첩 모델링에 사용된 단일공 파형은

Figure 5.1~5.12의 SN. 1~SN. 4의 단일공 파형을 사용하였으며 총 4480(80×14×4)개의 진동파형을 중첩하여 각각의 파형에서 최대 입자속도(PPV)를 전산처리하였다.

5.3.1.1 SN. 1의 중첩 모델링 결과

발파공과 30m 거리에서 계측된 Figure 5.1의 진동측정자료(SN. 1)의 단일공 파형의 공수와 지연시차 증가에 따른 중첩 모델링에서 기록된 최대입자속도(Peak Particle Velocity)의 변화는 Table 5.2같고 그 결과를 Figure 5.18과 Figure 5.19에 도시하고 분석 하였다.

Figure 5.3과 같이 SN.1의 단일공 파형의 주주파수는 164Hz이므로 주기(T)는 약 6ms가 된다. 2~15공의 중첩모델링 결과 모두 6ms의 지연단차로 중첩했을 때 두 번째 최고치를 기록했으며 3ms의 지연시차로 중첩했을 때 첫 번째 최저치를 기록했으며 Langefors 시차이론과 잘 부합된다.

그러나 3T(18ms)에서 5.97mm/sec의 진동 수준을 보였으며 19ms에서 18ms 보다 높은 6.10mm/sec의 진동 수준을 보였다. Langefors 시차이론에 따르면 18ms에서 단일공 진동수준(Figure 5.2, 5.080mm/sec)이 되어야 하나 단일공 수준 보다 약간 높은 진동 수준을 보였다. 즉, 3T의 지연단차에서도 약간의 보강 간섭은 존재하였다.

Figure 5.20와 Figure 5.21은 첫 번째(1ms)와 두 번째의 최대진동속도(6ms)를 보이는 지연시차의 최대 진동속도와 공수와의 관계를 각각 도시한 것이다. 1ms의 지연시차에서는 4공일 때 최대치로 기록되었으며 6ms(1T)의 지연시차에서는 2공에서 점점 증가하다 6공에서 수렴되는 것으로 기록되었다. 즉, 공수의 증가와 함께 최대 진동속도도 증가하며 일정 공수 이상에서는 수렴되는 것으로 사료된다.

Table 5.2 Modelling results on SN. 1. (unit mm/sec)

delay time	2 Hole	3 Hole	4 Hole	5 Hole	6 Hole	7 Hole	8 Hole	9 Hole	10 Hole	11 Hole	12 Hole	13 Hole	14 Hole	15 Hole
1ms	9.27	11.68	11.81	10.79	8.25	6.73	8.25	8.13	7.49	6.35	6.60	6.86	7.49	8.51
2ms	6.60	4.19	4.45	3.81	3.81	4.06	4.70	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94
3ms	3.18	3.81	2.79	3.68	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92
4ms	3.68	3.43	3.81	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43	3.43
5ms	5.71	6.22	5.46	5.33	5.33	5.59	5.46	5.33	5.33	5.33	5.33	5.21	5.21	5.21
6ms	6.60	8.89	9.78	10.03	10.16	10.16	10.16	10.16	10.16	10.16	10.16	10.16	10.16	10.16
7ms	7.49	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87
8ms	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22
9ms	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21
10ms	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33
11ms	6.60	7.11	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37
12ms	7.49	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75
13ms	6.98	6.86	6.98	6.98	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11
14ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
15ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
16ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
17ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
18ms	5.97	5.97	5.97	5.97	5.97	5.97	5.97	5.97	5.97	5.97	5.97	5.97	5.97	5.97
19ms	5.71	6.10	6.10	6.10	6.10	6.10	6.10	6.10	6.10	6.10	6.10	6.10	6.10	6.10
20ms	5.08	5.21	5.21	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33
21ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
22ms	5.33	5.33	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46
23ms	5.59	5.71	5.71	5.71	5.71	5.71	5.71	5.71	5.71	5.71	5.71	5.71	5.71	5.71
24ms	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33
25ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
26ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
27ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
28ms	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46
29ms	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33
30ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
31ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
32ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
33ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
34ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
35ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
36ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
37ms	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21
38ms	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46
39ms	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33
40ms	5.21	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33	5.33

Table 5.2 Continued. (unit mm/sec)

delay time	2 Hole	3 Hole	4 Hole	5 Hole	6 Hole	7 Hole	8 Hole	9 Hole	10 Hole	11 Hole	12 Hole	13 Hole	14 Hole	15 Hole
41ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
42ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
43ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
44ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
45ms	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21
46ms	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21
47ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
48ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
49ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
50ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
51ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
52ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
53ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
54ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
55ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
56ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
57ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
58ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
59ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
60ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
61ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
62ms	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21
63ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
64ms	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21
65ms	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21
66ms	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21
67ms	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21
68ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
69ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
70ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
71ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
72ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
73ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
74ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
75ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
76ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
77ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
78ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
79ms	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08	5.08
80ms	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21	5.21

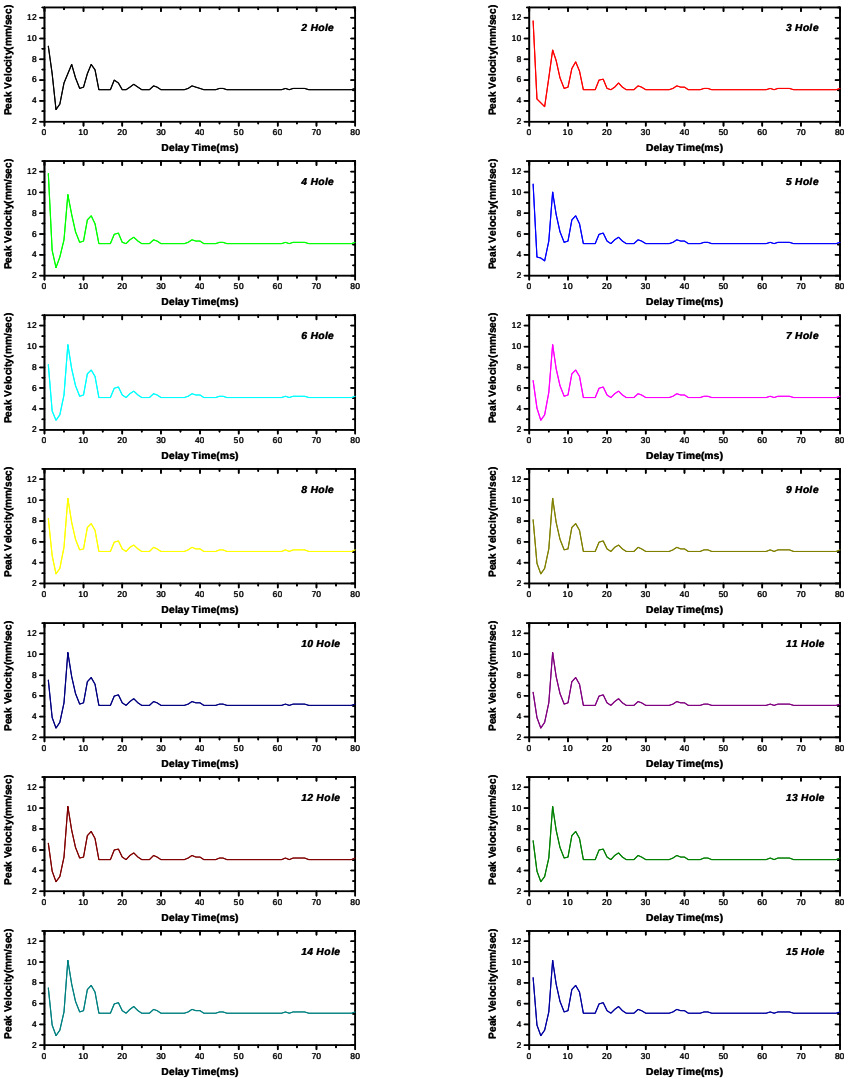


Figure 5.18 Superposition results of SN. 1(2hole~15hole).

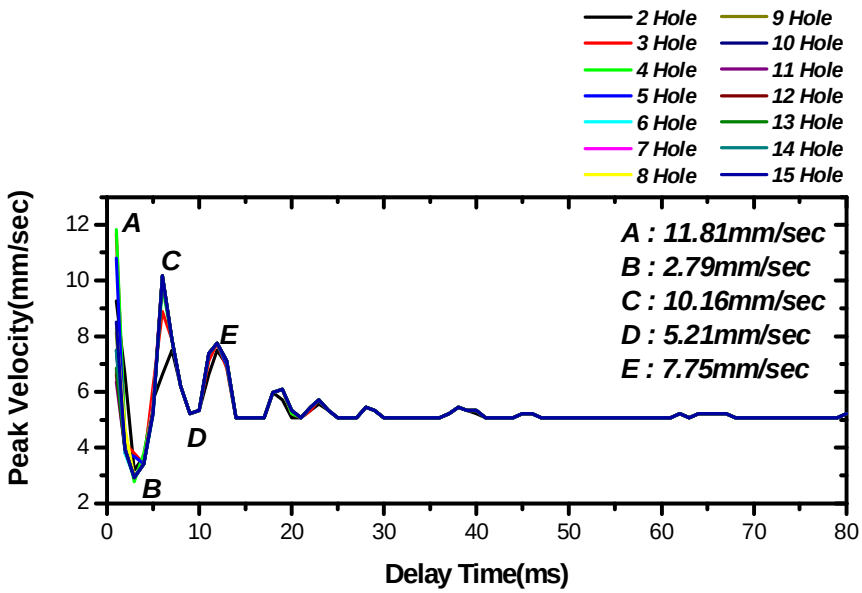


Figure 5.19 Superposition result of SN. 1.

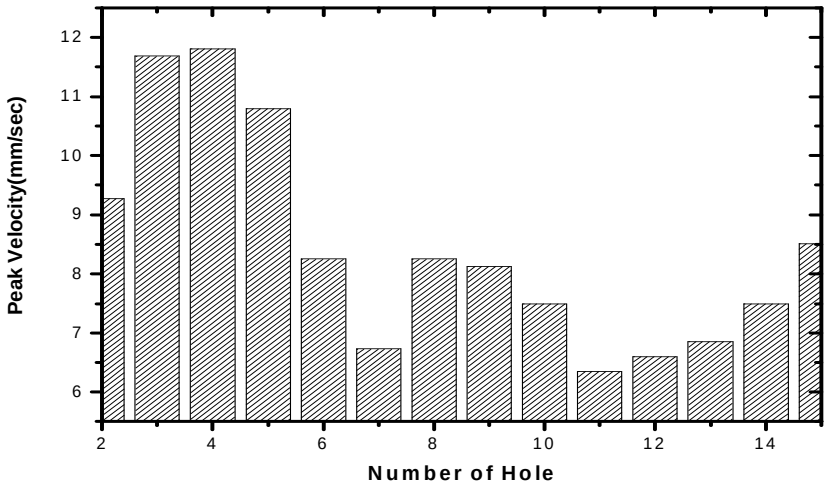


Figure 5.20 First peak velocity vs. hole number(1ms).

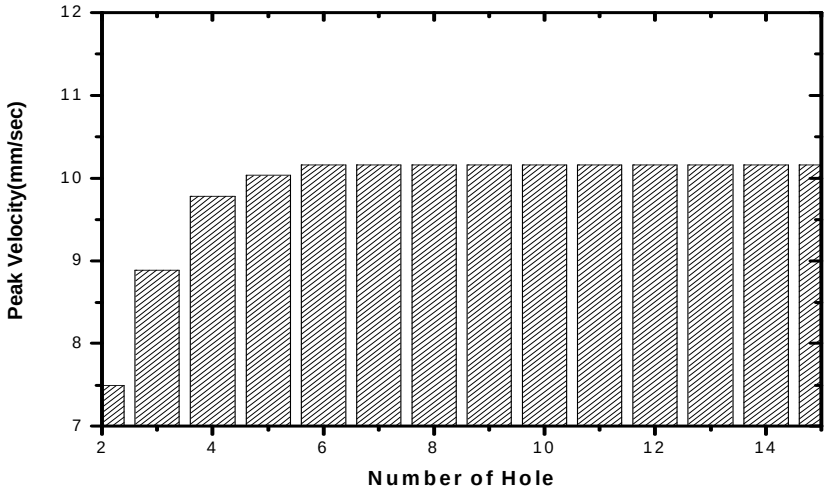


Figure 5.21 Second peak velocity vs. hole number(6ms).

5.3.1.2 SN. 2의 중첩 모델링 결과

Table 5.3은 발파공과 33m의 거리에서 계측된 Figure 5.4의 진동 측정 자료(SN. 2)의 단일공 파형에 대한 공수의 증가와 지연시차의 변화에 따른 중첩 모델링 결과에 의해 산출된 모델링 파형의 최대 입자속도를 정리한 것이다. Figure 5.22와 Figure 5.23은 그 결과를 도시한 것이다.

모델링에 사용된 단일공 파형의 주주파수는 Figure 5.6과 같이 108Hz이며 이때의 주기(T)는 약 9ms이다. Langefors 시차이론에 따라 상쇄간섭을 하는 0.5, 1.5, 그리고 2.5T의 지연시차는 각각 4.5, 13.5, 그리고 22.5ms이며, 보강간섭을 하는 1, 2, 그리고 3T의 지연시차는 각각 9, 18, 그리고 27ms이다. Figure 5.23의 중첩모델링 결과와 거의 일치하며 지연시차의 영향은 3T이상에서 거의 단일공 수준(Figure 5.5, 6.858mm/sec)의 진동에 수렴되는 것으로 나타났다. Figure 5.24와 Figure 5.25는 각각 1ms와 9ms의 지연시차의 최대 진동속도와 공수와의 관계를 도시한 것이다. 1ms의 지연시차에서는 4공일 때 최대치로 기록되었으며 9ms의 지연시차에서는 2공에서 점점 증가하여 6공에서 수렴되는 것으로 SN.1의 분석내용과 일치함을 보였다.

Table 5.3 Modelling results on SN. 2. (unit mm/sec)

Delay time	2 Hole	3 Hole	4 Hole	5 Hole	6 Hole	7 Hole	8 Hole	9 Hole	10 Hole	11 Hole	12 Hole	13 Hole	14 Hole	15 Hole
1ms	12.32	16.64	17.53	17.02	13.46	9.91	9.27	9.14	9.27	9.40	9.52	11.05	12.45	12.57
2ms	9.78	7.24	5.21	5.33	5.46	6.60	6.73	5.46	5.46	5.71	5.97	5.46	5.46	5.46
3ms	5.21	3.68	3.81	4.95	3.81	3.81	4.06	3.81	3.81	3.81	3.81	3.81	3.81	3.81
4ms	4.06	3.81	4.19	3.81	3.81	3.81	3.81	4.06	3.94	3.94	3.81	3.81	3.81	3.94
5ms	5.08	6.86	5.46	5.71	5.21	5.33	4.95	5.08	4.83	4.70	4.70	4.70	4.70	4.70
6ms	8.00	7.87	9.52	9.27	9.52	9.65	9.40	9.65	9.78	9.78	9.78	9.78	9.78	9.78
7ms	9.40	9.52	9.40	9.40	9.40	9.40	9.40	9.40	9.40	9.40	9.40	9.40	9.40	9.40
8ms	10.16	10.29	10.29	10.29	10.29	10.29	10.29	10.29	10.29	10.29	10.29	10.29	10.29	10.29
9ms	8.25	9.78	10.29	10.41	10.54	10.54	10.54	10.54	10.54	10.54	10.54	10.54	10.54	10.54
10ms	8.00	8.89	9.27	9.40	9.52	9.52	9.52	9.52	9.52	9.52	9.52	9.52	9.52	9.52
11ms	8.64	8.51	8.51	8.51	8.51	8.51	8.51	8.51	8.51	8.51	8.51	8.51	8.51	8.51
12ms	8.25	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13
13ms	6.98	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
14ms	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73
15ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
16ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
17ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
18ms	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75
19ms	8.13	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25
20ms	7.75	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87
21ms	6.86	6.98	7.11	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24
22ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
23ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
24ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
25ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
26ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
27ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
28ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
29ms	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24
30ms	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24
31ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
32ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
33ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
34ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
35ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
36ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
37ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
38ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
39ms	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11
40ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98

Table 5.3 Continued. (unit mm/sec)

Delay time	2 Hole	3 Hole	4 Hole	5 Hole	6 Hole	7 Hole	8 Hole	9 Hole	10 Hole	11 Hole	12 Hole	13 Hole	14 Hole	15 Hole
41ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
42ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
43ms	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11
44ms	6.86	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
45ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
46ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
47ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
48ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
49ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
50ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
51ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
52ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
53ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
54ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
55ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
56ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
57ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
58ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
59ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
60ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
61ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
62ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
63ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
64ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
65ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
66ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
67ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
68ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
69ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
70ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
71ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
72ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
73ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
74ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
75ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
76ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
77ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
78ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
79ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
80ms	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86

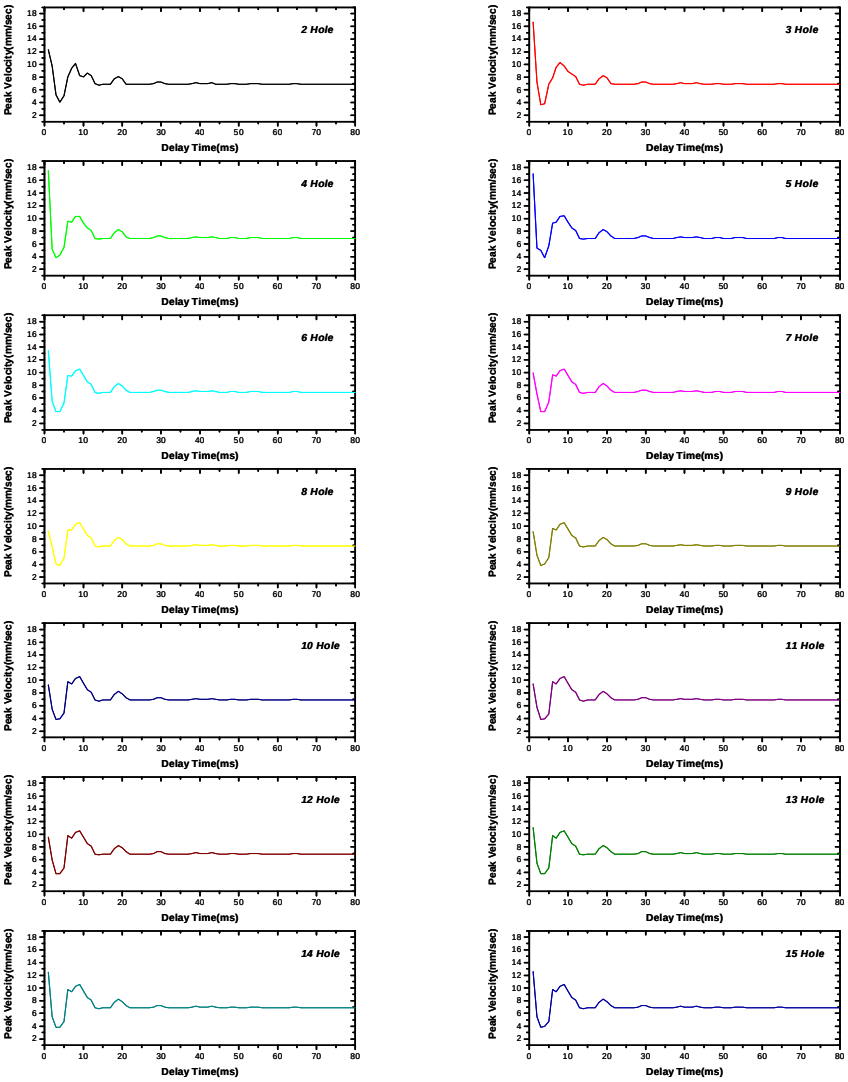


Figure 5.22 Superposition results of SN. 2(2hole~15hole).

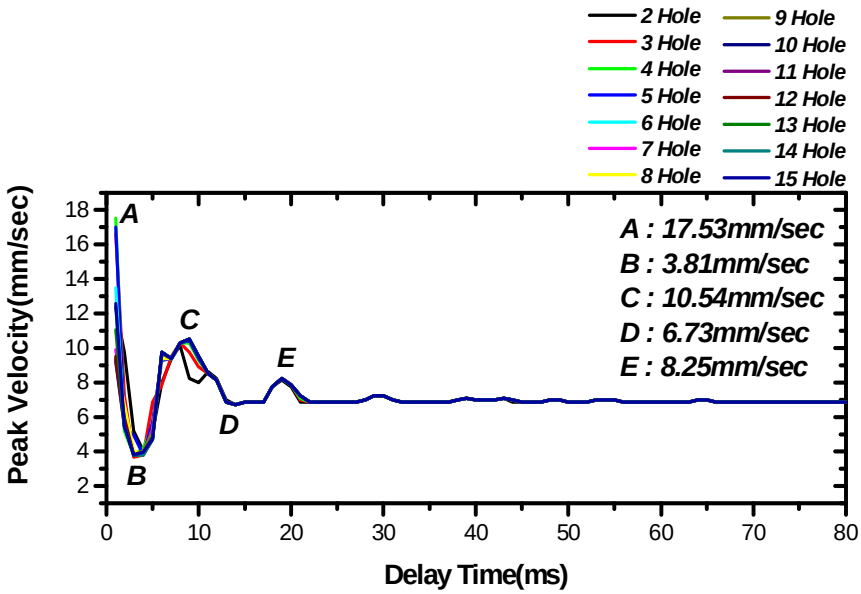


Figure 5.23 Superposition result of SN. 2.

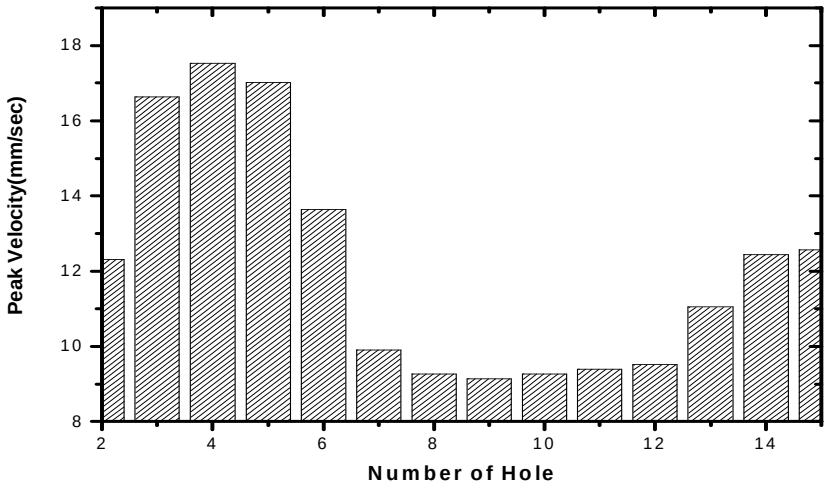


Figure 5.24 First peak velocity vs. hole number(1ms).

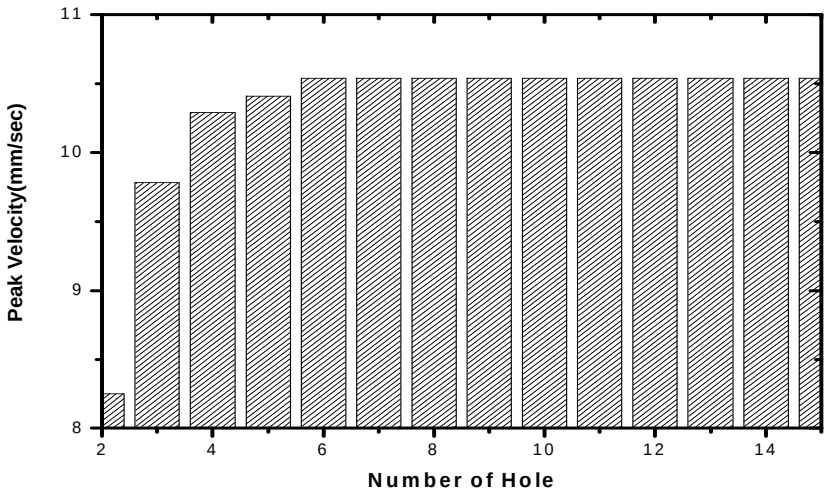


Figure 5.25 Second peak velocity vs. hole number(9ms).

5.3.1.3 SN. 3의 중첩 모델링 결과

Table 5.4는 발파공과 29m의 거리에서 계측된 Figure 5.7의 진동 측정 자료(SN. 3)의 단일공 파형에 대한 공수의 증가와 지연시차의 변화에 따른 중첩 모델링 결과에 의해 산출된 모델링 파형의 최대 입자속도를 나타낸다. Figure 5.26과 Figure 5.27은 그 결과를 도시한 것이다.

모델링에 사용된 단일공 파형의 주주파수는 Figure 5.9와 같이 122Hz이며 이때의 주기(T)는 약 8ms이다. 상쇄간섭 주기의 0.5, 1.5, 그리고 2.5T의 지연시차는 각각 4, 12, 20ms이며 보강간섭 주기의 1, 2, 그리고 3T의 지연시차는 각각 8, 16, 24ms로 산정할 수 있다. 이것은 Figure 5.27의 중첩모델링 결과와 거의 일치하며 지연시차의 영향은 3T(24ms)에서 단일공 진동 수준(Figure 5.8, 6.985mm/sec) 보다 약간 높은 8.89mm/sec의 진동속도를 보였다. SN. 1의 결과와 마찬가지로 3T의 지연단차에서도 약간의 보강간섭이 존재하였다. 또한, 공수 증가에 대한 영향은 Figure 5.28과 Figure 5.29와 같이 1ms의 지연시차에서는 5공일 때 최대치로 기록되었으며 8ms의 지연시차에서는 2공에서 점점 증가하여 9공에서 수렴되는 양상을 보였다.

Table 5.4 Modelling results on SN. 3. (unit mm/sec)

Delay time	2 Hole	3 Hole	4 Hole	5 Hole	6 Hole	7 Hole	8 Hole	9 Hole	10 Hole	11 Hole	12 Hole	13 Hole	14 Hole	15 Hole
1ms	13.33	18.92	22.73	25.65	25.02	24.38	20.07	15.11	13.33	13.97	14.22	13.97	13.72	13.97
2ms	12.06	13.59	10.79	7.37	7.62	7.24	7.49	7.49	7.49	7.87	7.49	7.49	7.87	8.51
3ms	9.40	5.59	5.33	5.21	5.21	5.59	5.21	5.33	5.97	5.21	5.59	6.10	5.33	6.22
4ms	6.73	4.44	4.57	4.57	4.57	4.70	4.57	4.57	4.70	4.70	4.57	4.83	4.70	5.08
5ms	5.33	6.22	5.84	5.21	5.46	5.59	5.72	4.95	4.95	5.33	5.59	5.72	5.97	5.97
6ms	6.73	5.46	5.33	5.97	5.97	5.33	5.33	5.33	5.33	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46
7ms	8.38	8.64	8.89	7.87	6.86	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73	6.73
8ms	9.78	11.05	12.32	13.84	14.73	15.24	15.37	15.49	15.49	15.49	15.49	15.49	15.49	15.49
9ms	11.30	12.57	13.59	13.59	13.59	13.59	13.59	13.59	13.59	13.59	13.59	13.59	13.59	13.59
10ms	13.08	13.08	13.08	13.08	13.08	13.08	13.08	13.08	13.08	13.08	13.08	13.08	13.08	13.08
11ms	12.06	12.06	12.06	12.19	12.19	12.19	12.19	12.19	12.19	12.19	12.19	12.19	12.19	12.19
12ms	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67	10.67
13ms	7.62	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
14ms	7.11	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86	6.86
15ms	8.13	7.62	7.49	7.62	7.62	7.62	7.62	7.62	7.62	7.62	7.62	7.62	7.62	7.62
16ms	8.38	9.40	9.78	9.91	9.91	9.91	9.91	9.91	9.91	9.91	9.91	9.91	9.91	9.91
17ms	8.13	9.40	9.40	9.40	9.40	9.40	9.40	9.40	9.40	9.40	9.40	9.40	9.40	9.40
18ms	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87
19ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
20ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
21ms	6.86	7.62	7.62	7.62	7.62	7.62	7.62	7.62	7.62	7.62	7.62	7.62	7.62	7.62
22ms	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37
23ms	8.13	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25
24ms	8.38	8.89	8.89	8.89	8.89	8.89	8.89	8.89	8.89	8.89	8.89	8.89	8.89	8.89
25ms	8.13	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25
26ms	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49
27ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
28ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
29ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
30ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
31ms	7.49	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75
32ms	8.00	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13
33ms	8.38	8.64	8.64	8.64	8.64	8.64	8.64	8.64	8.64	8.64	8.64	8.64	8.64	8.64
34ms	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13	8.13
35ms	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37
36ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
37ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
38ms	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11
39ms	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49
40ms	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49

Table 5.4 Continued. (unit mm/sec)

Delay time	2 Hole	3 Hole	4 Hole	5 Hole	6 Hole	7 Hole	8 Hole	9 Hole	10 Hole	11 Hole	12 Hole	13 Hole	14 Hole	15 Hole
41ms	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75	7.75
42ms	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37
43ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
44ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
45ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
46ms	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11
47ms	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11
48ms	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37
49ms	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37	7.37
50ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
51ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
52ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
53ms	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11
54ms	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24
55ms	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24
56ms	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11
57ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
58ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
59ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
60ms	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11
61ms	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24
62ms	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24
63ms	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11
64ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
65ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
66ms	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11
67ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
68ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
69ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
70ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
71ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
72ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
73ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
74ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
75ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
76ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
77ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
78ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
79ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
80ms	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98

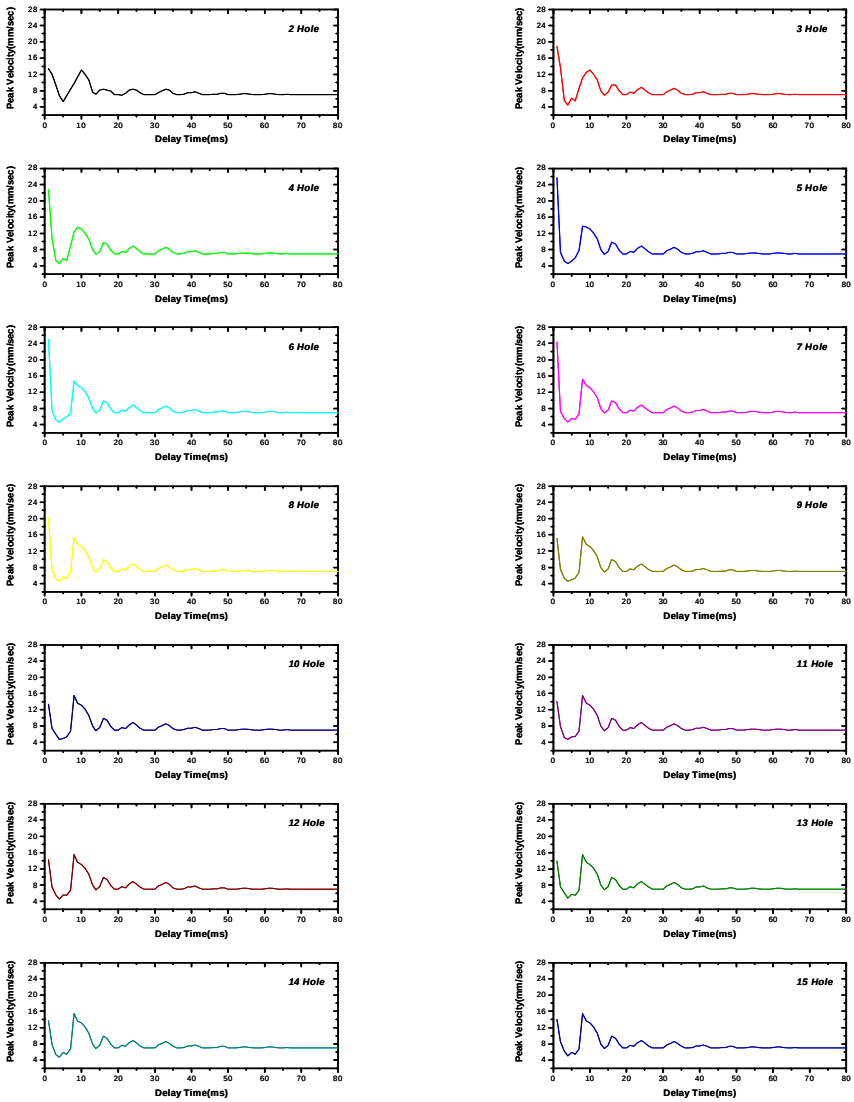


Figure 5.26 Superposition results of SN. 3(2hole~15hole).

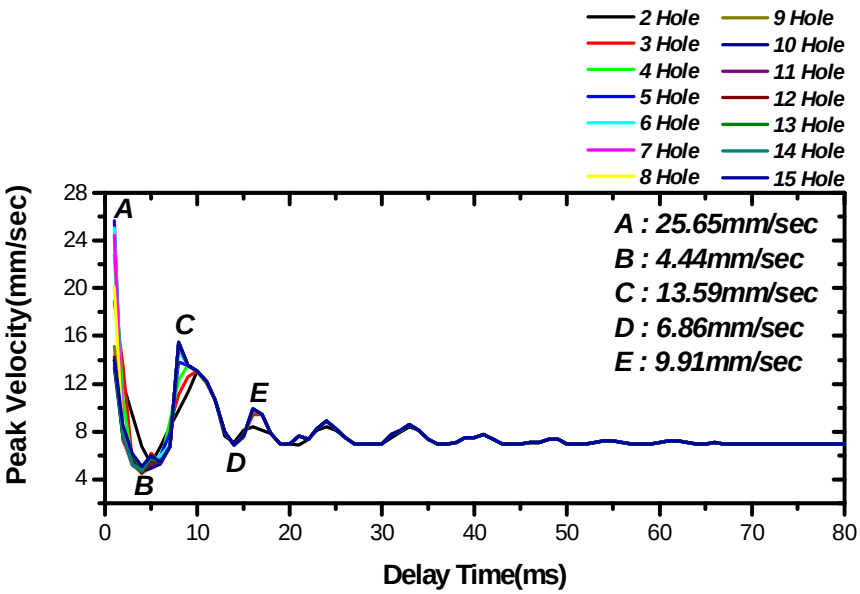


Figure 5.27 Superposition result of SN. 3.

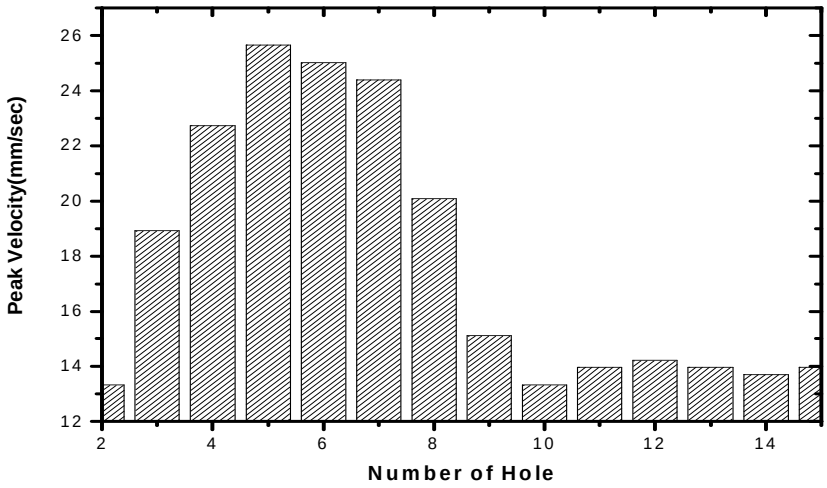


Figure 5.28 First peak velocity vs. hole number(1ms).

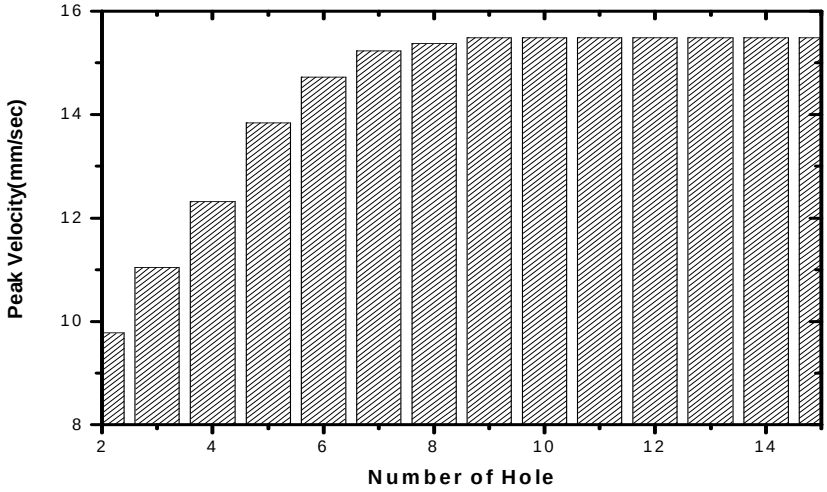


Figure 5.29 Second peak velocity vs. hole number(8ms).

5.3.1.4 SN. 4의 중첩 모델링 결과

Table 5.5는 발파공과 69m의 거리에서 계측된 Figure 5.10의 진동 측정 자료(SN. 4)의 단일공 파형에 대한 공수의 증가와 지연시차의 변화에 따른 중첩 모델링 결과에 의해 산출된 모델링 파형의 최대 입자속도이며 Figure 5.30과 Figure 5.31은 그 결과를 도시한 것이다.

모델링에 사용된 단일공 파형의 주주파수는 Figure 5.12와 같이 79Hz이며 이때의 주기(T)는 약 13ms이다. 상쇄간섭 주기의 0.5, 1.5, 그리고 2.5T의 지연시차는 각각 6.5, 19.5, 32.5ms이며 보강간섭 주기의 1, 2, 그리고 3T의 지연시차는 각각 13, 26, 39ms로 산정할 수 있다. 이것은 Figure 5.31의 중첩모델링 결과와 거의 일치하며 지연시차의 영향은 3T이상에서 거의 단일공 수준의 진동에 수렴되는 것으로 나타났다. 그러나 Figure 5.31의 결과는 SN. 1, SN. 2, 그리고 SN. 3의 결과에 비해 최대 진동속도의 분포가 불확실한 부분이 존재한다. 이것은 분석에 사용된 단일공 파형의 진동수준이 너무 낮은 데서 오는 계측기의 오차이거나 본 발파의 잔류진동에 의해 교란된 결과로 판단된다. 그럼에도 불구하고 전체적인 경향은 SN.1, SN. 2, 그리고 SN. 3의 결과와 유사 하였다. 또 Figure 5.32, 5.33은 각각 1ms와 1T(13ms)의 공수의 증가별 진동속도의 분포를 보인다.

Table 5.5 Modelling results on SN. 4. (unit mm/sec)

Delay time	2 Hole	3 Hole	4 Hole	5 Hole	6 Hole	7 Hole	8 Hole	9 Hole	10 Hole	11 Hole	12 Hole	13 Hole	14 Hole	15 Hole
1ms	2.78	3.84	4.81	5.25	5.62	5.49	5.21	4.71	4.06	4.03	4.22	4.35	4.46	4.56
2ms	2.43	2.83	2.67	2.05	2.16	2.27	2.37	2.40	2.32	2.13	1.84	1.79	2.00	2.24
3ms	2.03	1.65	1.46	1.57	1.65	1.54	1.25	1.29	1.52	1.71	1.71	1.65	1.48	1.30
4ms	1.43	1.16	1.25	1.25	1.00	1.06	1.32	1.33	1.27	1.06	0.97	0.87	0.86	0.84
5ms	0.87	0.98	1.03	0.78	0.94	1.14	1.08	0.92	0.87	0.75	0.79	0.84	1.05	1.11
6ms	0.92	1.02	0.76	0.97	1.08	1.00	0.87	0.76	0.75	0.92	1.10	1.13	1.11	1.05
7ms	0.95	1.02	0.84	1.06	0.98	0.89	0.76	0.84	1.06	1.10	1.08	1.02	0.98	0.89
8ms	1.08	1.08	1.22	1.14	1.19	1.14	1.25	1.11	1.16	1.21	1.19	1.13	1.16	1.11
9ms	1.35	1.56	1.44	1.67	1.60	1.56	1.54	1.75	1.78	1.75	1.70	1.60	1.65	1.73
10ms	1.64	1.73	1.67	1.70	1.64	1.49	1.51	1.54	1.51	1.46	1.43	1.43	1.54	1.59
11ms	1.81	1.81	1.84	1.76	1.76	1.83	1.83	1.84	1.83	1.83	1.83	1.83	1.84	1.83
12ms	1.86	2.02	2.03	2.13	2.06	2.11	2.14	2.06	2.06	2.06	2.08	2.06	2.06	2.06
13ms	1.87	2.10	2.08	2.19	2.16	2.22	2.21	2.21	2.24	2.24	2.24	2.24	2.25	2.25
14ms	1.78	1.94	1.89	1.87	1.87	1.87	1.89	1.89	1.92	1.87	1.87	1.89	1.91	1.92
15ms	1.64	1.70	1.62	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65
16ms	1.48	1.52	1.46	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54
17ms	1.33	1.37	1.32	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.43	1.44	1.46	1.48	1.49
18ms	1.32	1.46	1.40	1.54	1.51	1.48	1.48	1.46	1.46	1.46	1.46	1.51	1.48	1.49
19ms	1.33	1.52	1.44	1.64	1.57	1.57	1.68	1.68	1.67	1.67	1.73	1.70	1.73	1.78
20ms	1.38	1.51	1.38	1.44	1.46	1.44	1.49	1.52	1.49	1.51	1.54	1.54	1.57	1.56
21ms	1.46	1.41	1.49	1.68	1.49	1.49	1.57	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49
22ms	1.52	1.73	1.60	1.60	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62
23ms	1.60	1.78	1.79	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73	1.73
24ms	1.67	1.78	1.87	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81
25ms	1.70	1.89	1.95	1.91	2.00	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94
26ms	1.67	1.89	2.02	2.00	2.10	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05
27ms	1.62	1.78	1.94	1.92	1.95	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92
28ms	1.57	1.67	1.76	1.78	1.78	1.79	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81	1.81
29ms	1.51	1.51	1.51	1.52	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54
30ms	1.48	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51
31ms	1.48	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54
32ms	1.46	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54
33ms	1.44	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52
34ms	1.44	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52
35ms	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44
36ms	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43
37ms	1.43	1.43	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44
38ms	1.46	1.46	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.49	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52
39ms	1.48	1.46	1.46	1.46	1.51	1.51	1.51	1.51	1.54	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57
40ms	1.48	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46

Table 5.5 Continued. (unit mm/sec)

Delay time	2 Hole	3 Hole	4 Hole	5 Hole	6 Hole	7 Hole	8 Hole	9 Hole	10 Hole	11 Hole	12 Hole	13 Hole	14 Hole	15 Hole
41ms	1.49	1.49	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44
42ms	1.52	1.56	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51
43ms	1.59	1.64	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59
44ms	1.62	1.67	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60
45ms	1.62	1.68	1.65	1.65	1.68	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67
46ms	1.59	1.65	1.70	1.70	1.73	1.75	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78
47ms	1.54	1.59	1.64	1.64	1.64	1.65	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68
48ms	1.51	1.56	1.57	1.54	1.52	1.52	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54	1.54
49ms	1.48	1.54	1.52	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48
50ms	1.48	1.57	1.52	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51
51ms	1.51	1.64	1.60	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59
52ms	1.54	1.64	1.62	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59
53ms	1.57	1.64	1.62	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60
54ms	1.57	1.57	1.57	1.57	1.56	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57
55ms	1.57	1.56	1.57	1.59	1.60	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64
56ms	1.52	1.52	1.52	1.54	1.56	1.57	1.57	1.57	1.57	1.59	1.59	1.57	1.57	1.57
57ms	1.48	1.48	1.48	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51
58ms	1.43	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44
59ms	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43
60ms	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44
61ms	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46
62ms	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48
63ms	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49
64ms	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49
65ms	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49
66ms	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49
67ms	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49
68ms	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49
69ms	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41
70ms	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41
71ms	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41
72ms	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41
73ms	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41
74ms	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41
75ms	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41
76ms	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41
77ms	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41
78ms	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41
79ms	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41
80ms	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41	1.41

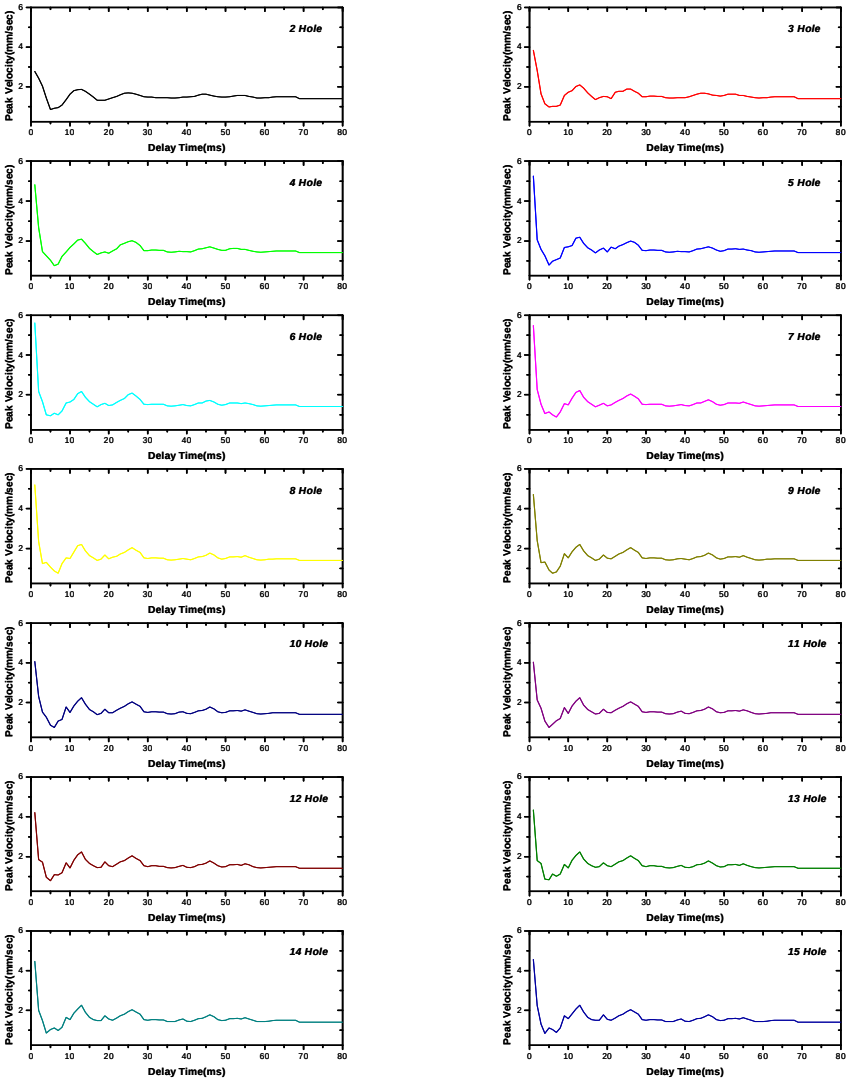


Figure 5.30 Superposition results of SN. 4(2hole~15hole).

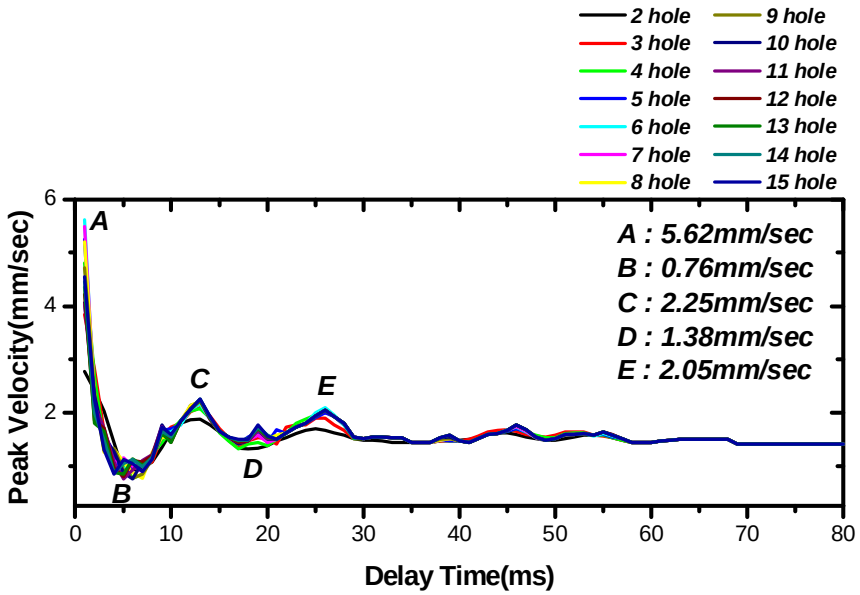


Figure 5.31 Superposition result of SN. 4.

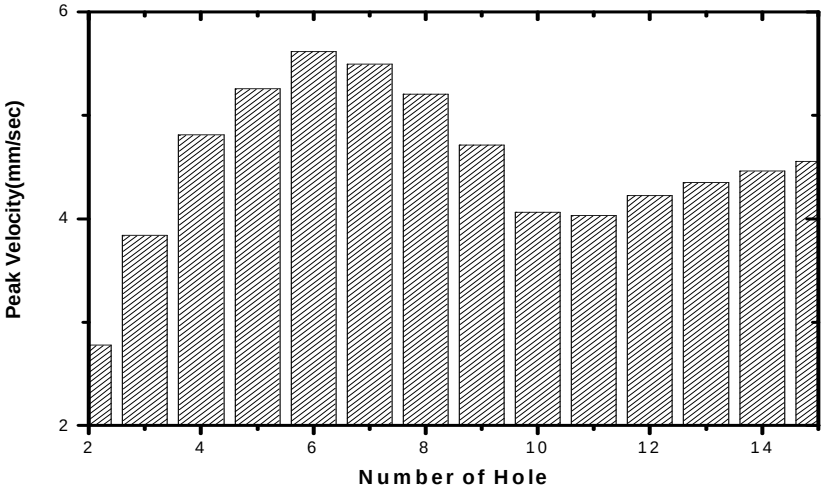


Figure 5.32 First peak velocity vs. hole number(1ms).

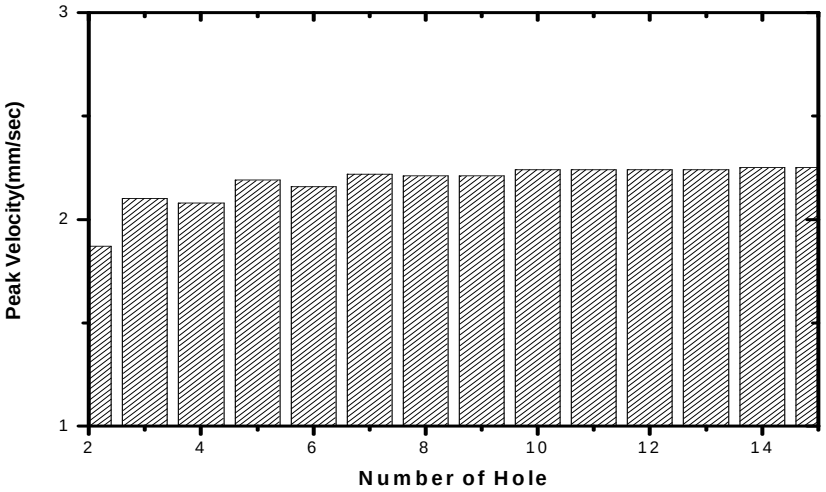


Figure 5.33 Second peak velocity vs. hole number(13ms).

5.3.2 단일공 파형 중첩모델링에 대한 고찰

5.3.1절에서 중첩모델링을 통하여 공수의 증가에 따른 진동속도의 변화를 고찰하고 단일공 파형의 주주파수와 중첩 모델링된 지연단차에 따른 진동의 변화를 Langefors의 시차이론과 비교하여 분석하였다. 지연단차는 1ms 간격으로 1~80ms까지 증가 시키며 모델링 하였으며 공수는 2~15공 까지 증가시켜가며 모델링을 실시하였다. 그 결과 상쇄간섭 주기의 0.5, 1.5, 그리고 2.5T의 지연단차는 상쇄간섭이 발생하여 진동이 저점으로 나타났으며 보강간섭 주기의 1, 2, 그리고 3T의 지연시차는 보강간섭이 발생하여 진동이 고점으로 나타났다. 또 지연단차의 영향은 3T이상에서도 약간의 보강 간섭은 존재 하였다. 공수의 증가의 영향은 공수가 증가할수록 간섭에 의한 진동은 커졌으며 일정 공수이상에서는 수렴되는 경향을 보였다.

이러한 사실은 8ms 기준과는 차이를 보이는 부분이라 하겠다. 8ms의 단차는 60Hz의 지반 주파수 대역에서는 가장 낮은 진동 수준을 보이나 주파수가 커질수록 점점 커져서 125Hz의 지반 주파수 대역에서는 가장 높은 진동 수준을 보일 것이다. 이러한 경향은 Duvall(1963)등에 의해 행해진 실험이 30~40Hz의 지반 주파수 대역에서 행해진 당연한 실험결과임을 입증해준다.

60Hz와 125Hz의 주파수를 갖는 지반에서 8ms의 지연단차를 갖는 동일한 발파에 대해 진동 계측을 한다면 두개의 계측자료들은 큰 폭의 차이를 보일 것이다. 이러한 현상은 빈번한 분쟁을 일으킨다. 예를 들면, 25ms의 지연시차를 갖는 뇌관을 사용하는 발파 공사현장에서 30m 떨어진 지점의 주파수가 20Hz 이고 50m 떨어진 지점의 주파수가 40Hz이라면 더 먼 거리임에도 불구하고 50m 떨어진 지점에서 훨씬 더 큰 진동수준이 관측될 수 있다.

그러나 이러한 현상은 뇌관의 발화 오류와 탄성파의 전달속도 차이에 의해

매회 발파마다 바뀔 수 있으므로 감추어진다. 또한, 발파진동 계측시에 다른 자료와 상이한 진동속도로 계측되며 이러한 자료는 계측오류로 분류되거나 다른 자료들의 신뢰도를 높이기 위해 옳은 계측 자료일지라도 버려진다.

6. 발파 진동의 예측

6.1 환산거리식에 의한 예측

현장 실험 계측 결과로 제시된 Table 4.4의 자료를 회귀분석에 의해 입지상수 K, n을 구하기 위하여 최대진동속도와 환산거리의 log-log 1차 상관관계를 이용하여 전산처리 하였다. 이때, 분석에 사용된 진동속도는 최대 입자속도(PPV, Peak Particle Velocity)를 사용하였으며, 본 연구에 사용된 모든 진동속도의 단위는 mm/sec이다.

분석결과 Table 6.1과 같이 나타났으며 K는 진동상수, n은 감쇠지수, SD는 환산거리, r^2은 결정계수(Coefficient of Determination)이다.

여기서 결정계수란 회귀분석에서 회귀직선의 유의성 검정과 더불어, 회귀분석에 의한 종속변수가 설명되는 정도를 나타낸다. 결정계수 값이 0에 가까울수록 추정된 회귀직선은 신뢰성이 낮고 1에 가까울수록 신뢰성이 높다.

회귀분석결과에 따른 자승근 환산거리 및 삼승근 환산거리와 최대 입자속도와의 관계를 Figure 6.1과 Figure 6.2에 나타냈다. 분석에 사용된 총 자료수는 35개이며 50% 및 95%의 신뢰식의 입지상수 값은 Table 6.1과 같다.

Table 6.1 Results of regression analysis using real data.

Equation	K	n	r^2	N
Square root(50%)	5055	−1.87	0.88	35
Square root(95%)	9521	−1.87	0.88	35
Cube root(50%)	6282	−1.92	0.87	35
Cube root(95%)	12069	−1.92	0.87	35

발파진동의 예측 문제에 있어서 환산거리식을 사용할 경우 안전율을 감안한 95%의 측정 자료를 포함할 수 있는 95%의 신뢰도를 갖는 식을 선택하여 발파작업에 사용된다. 결국 다음 식이 현장의 본 발파 작업에 적용될 수 있다.

식(6.1)과 식(6.2)은 각각 95%의 신뢰도를 갖는 자승근 및 삼승근 환산거리식을 나타낸다.

$$V=9521\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.87} \qquad r^2=0.88 \qquad (6.1)$$

$$V=12069\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-1.92} \qquad r^2=0.87 \qquad (6.2)$$

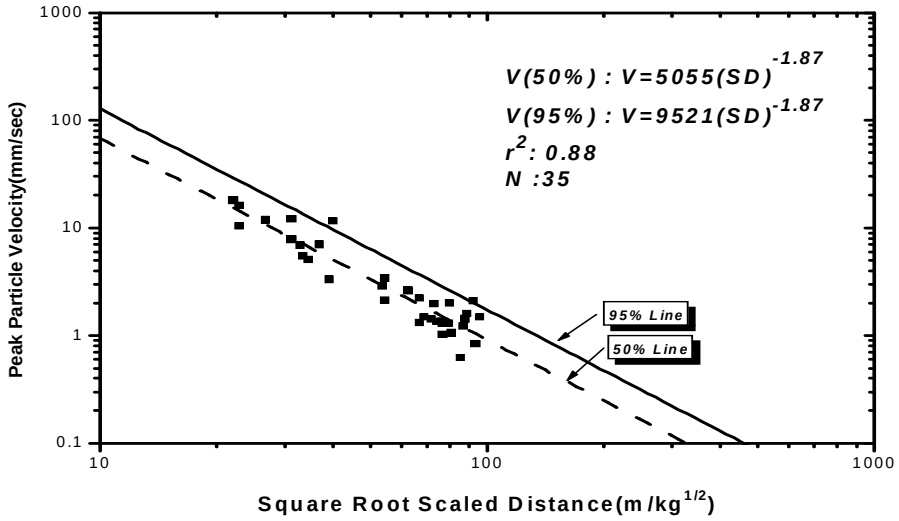


Figure 6.1 Relationship of PPV and Square root scaled distance.

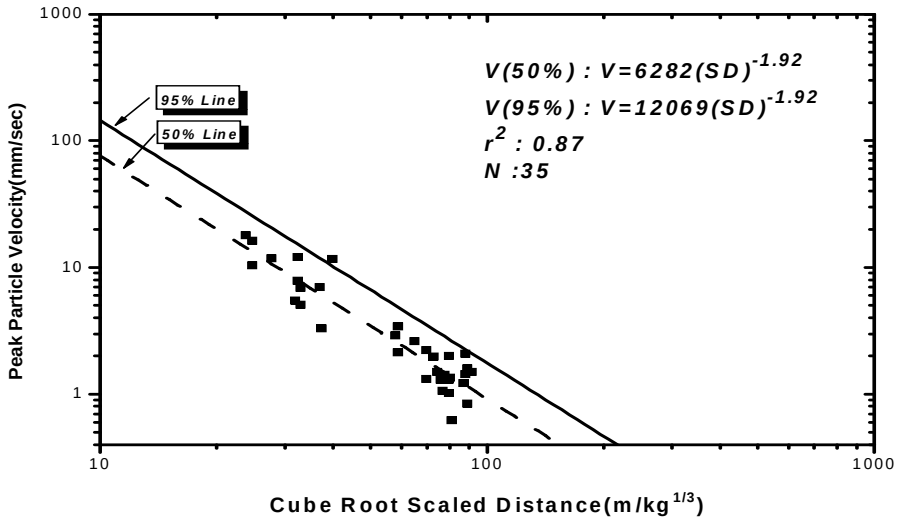


Figure 6.2 Relationship of PPV and Cube root scaled distance.

6.2 환산거리 방식을 이용한 중첩 모델링 자료의 분석

5.3절에서 본 연구의 시험 발파 자료를 토대로 SN. 1~SN. 4의 단일공 파형을 지연시차와 공수의 증가에 따라 중첩 모델링하였다. SN. 1~SN. 4의 단일공 파형 중첩모델에 의한 자료들은 공수와 지연단차만 다를 뿐 각각 같은 시료에 대해 동일한 SD(scaled distance)를 갖는다.

Table 6.2~6.6과 같이 1ms, 0.5T, 1T, 1.5T, 그리고 2T의 지연 단차 별로 SN. 1~SN. 4의 단일공 파형 중첩모델에 의한 자료 4개씩을 얻을 수 있다. 즉, Figure 5.19, Figure 5.23, Figure 5.27, 그리고 Figure 5.31의 최대 입자속도 분포 중 1ms(A), 1T(C), 그리고 2T(E)에서 가장 큰 입자속도를 기록한 자료와 0.5T(B), 와 1.5T(D)에서 가장 낮은 입자속도를 기록한 자료이다. 이들 자료와 환산거리 개념을 사용하여 각각 최적합식(best fit line)을 구하고 실 계측자료의 회귀분석결과와 비교하였다.

입력 자료는 Table 6.2~Table 6.6과 같다. 또한, 분석결과는 Table 6.7과 같으며 자승근 환산거리 및 삼승근 환산거리에 따른 발파진동속도와 환산거리와의 관계를 Figure 6.3~Figure 6.12에 도시하였다.

Table 6.2 Input value of regression analysis on 1ms peak value.

Data	Velocity (mm/sec)	Charge (kg)	Distance (m)	Square root distance	Cube root distance
SN. 1	11.81	0.75	30	34.64	33.02
SN. 2	17.53	1.00	33	33.00	33.00
SN. 3	25.65	1.60	29	22.93	24.79
SN. 4	5.62	1.60	69	54.55	58.99

Table 6.3 Input value of regression analysis on 0.5T peak value.

Data	Velocity (mm/sec)	Charge (kg)	Distance (m)	Square root distance	Cube root distance
SN. 1	2.79	0.75	30	34.64	33.02
SN. 2	3.81	1.00	33	33.00	33.00
SN. 3	4.44	1.60	29	22.93	24.79
SN. 4	0.76	1.60	69	54.55	58.99

Table 6.4 Input value of regression analysis on 1T peak value.

Data	Velocity (mm/sec)	Charge (kg)	Distance (m)	Square root distance	Cube root distance
SN. 1	10.16	0.75	30	34.64	33.02
SN. 2	10.54	1.00	33	33.00	33.00
SN. 3	13.59	1.60	29	22.93	24.79
SN. 4	2.25	1.60	69	54.55	58.99

Table 6.5 Input value of regression analysis on 1.5T peak value.

Data	Velocity (mm/sec)	Charge (kg)	Distance (m)	Square root distance	Cube root distance
SN. 1	5.21	0.75	30	34.64	33.02
SN. 2	6.73	1.00	33	33.00	33.00
SN. 3	6.86	1.60	29	22.93	24.79
SN. 4	1.38	1.60	69	54.55	58.99

Table 6.6 Input value of regression analysis on 2T peak value.

Data	Velocity (mm/sec)	Charge (kg)	Distance (m)	Square root distance	Cube root distance
SN. 1	7.75	0.75	30	34.64	33.02
SN. 2	8.25	1.00	33	33.00	33.00
SN. 3	9.91	1.60	29	22.93	24.79
SN. 4	2.05	1.60	69	54.55	58.99

Table 6.7 Summary of regression output.

Equation		K	n	r^2	N
1ms modeling equation	square root scaled distance	7300	−1.78	0.954	4
	cube root scaled distance	6178	−1.72	0.934	4
0.5T modeling equation	square root scaled distance	4276	−2.14	0.938	4
	cube root scaled distance	5057	−2.11	0.869	4
1T modeling equation	square root scaled distance	14535	−2.13	0.858	4
	cube root scaled distance	19076	−2.19	0.951	4
1.5T modeling equation	square root scaled distance	3960	−1.93	0.806	4
	cube root scaled distance	5234	−1.99	0.902	4
2T modeling equation	square root scaled distance	4600	−1.87	0.846	4
	cube root scaled distance	5926	−1.93	0.940	4

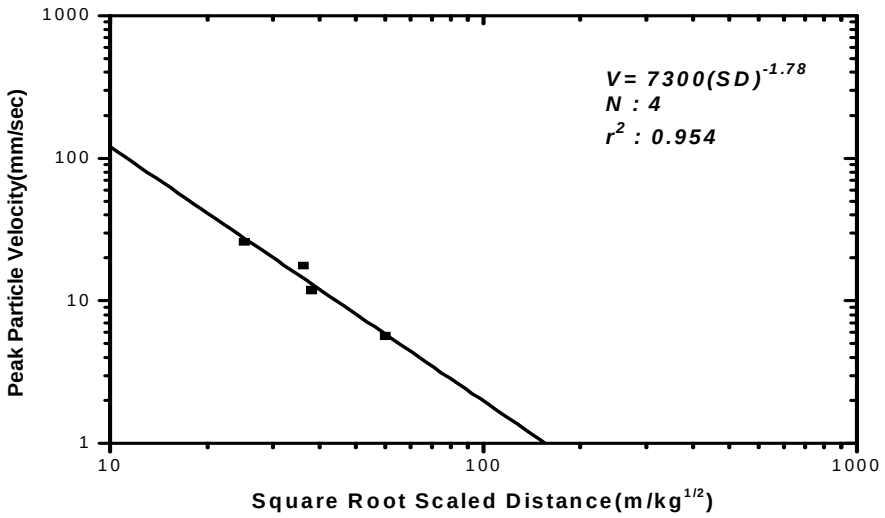


Figure 6.3 Result of regression analysis on 1ms peak value(Square root Scaled Distance).

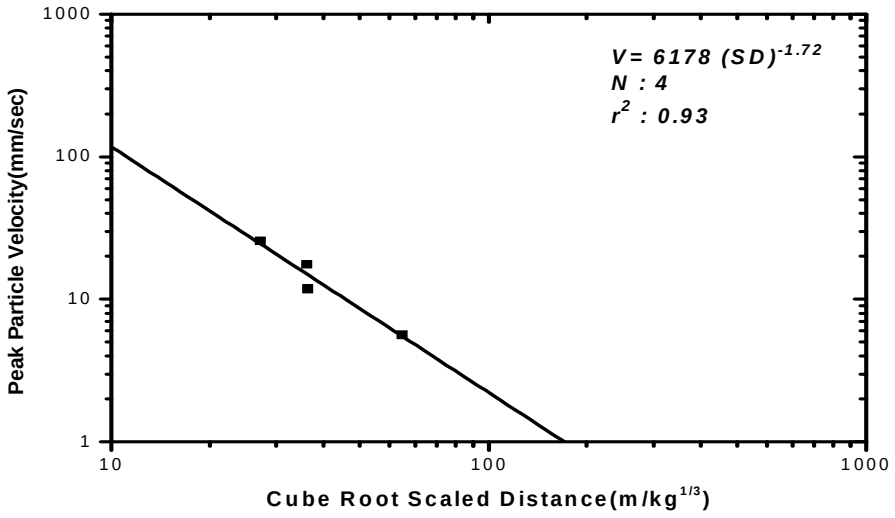


Figure 6.4 Result of regression analysis on 1ms peak value (Cube root Scaled Distance).

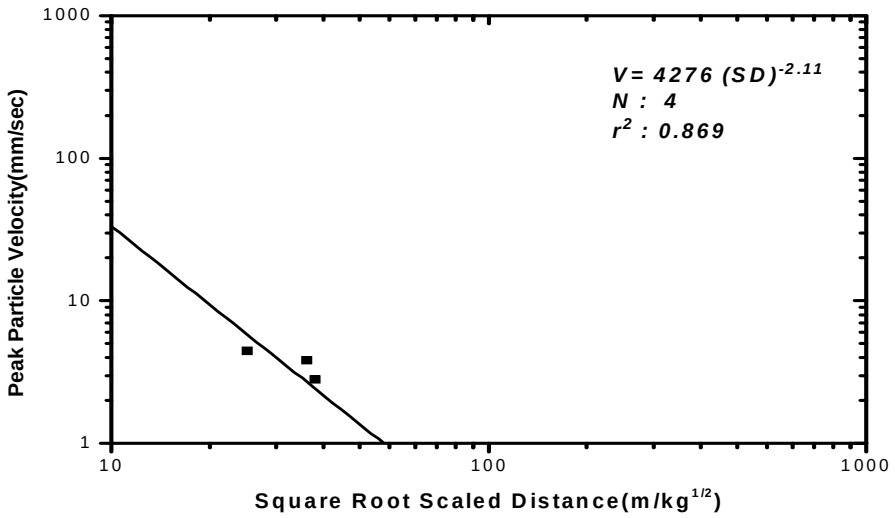


Figure 6.5 Result of regression analysis on 0.5T peak value(Square root Scaled Distance).

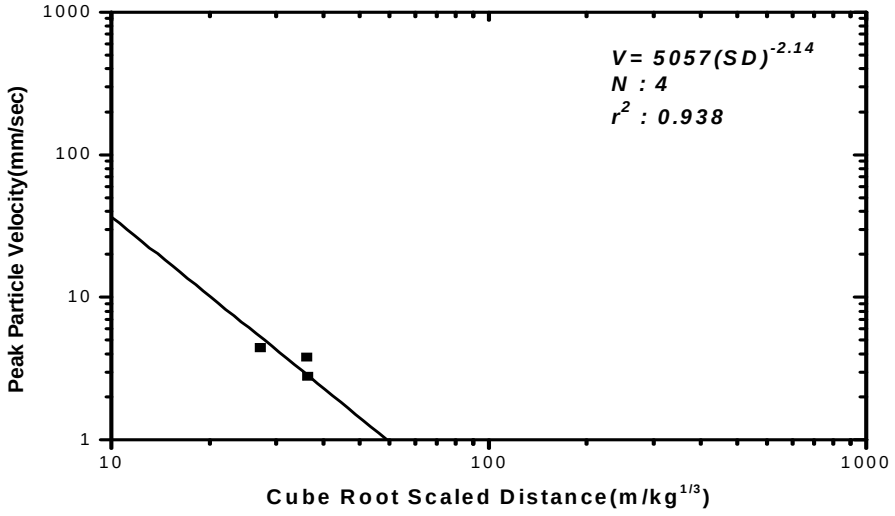


Figure 6.6 Result of regression analysis on 0.5T peak value(Cube root Scaled Distance).

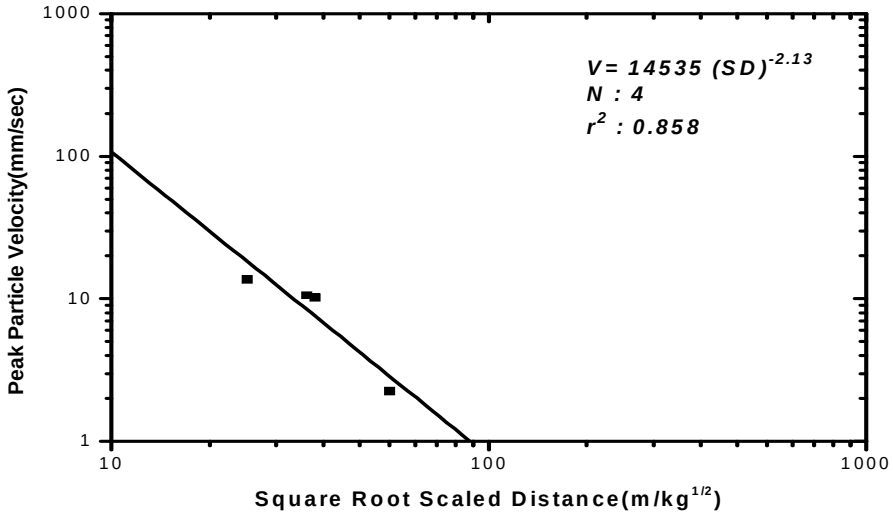


Figure 6.7 Result of regression analysis on 1T peak value(Square root Scaled Distance).

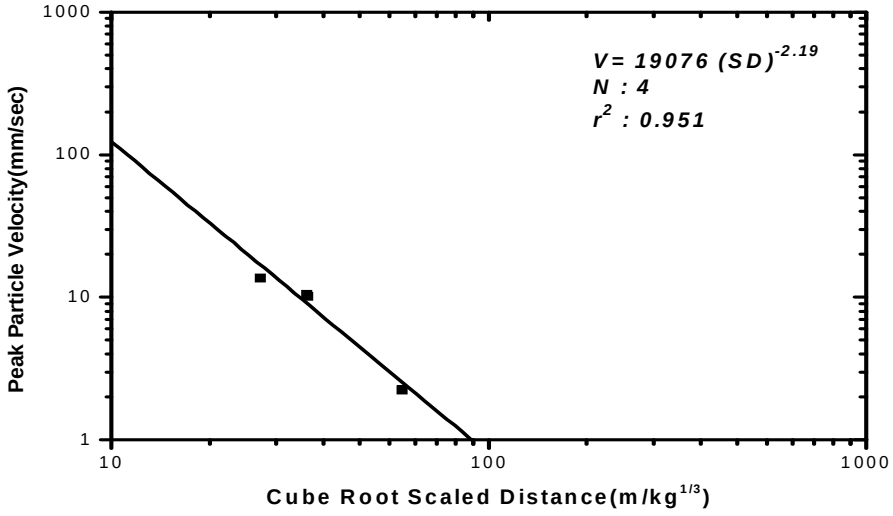


Figure 6.8 Result of regression analysis on 1T peak value(Cube root Scaled Distance).

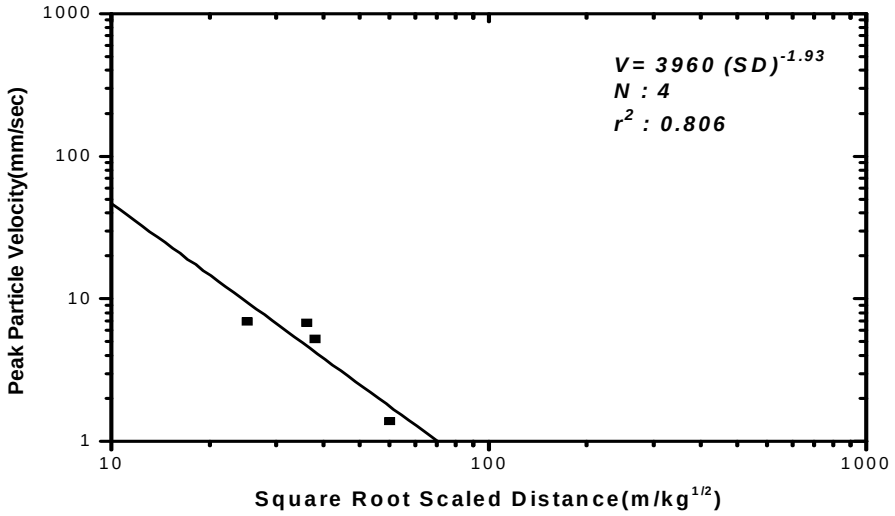


Figure 6.9 Result of regression analysis on 1.5T peak value(Square root Scaled Distance).

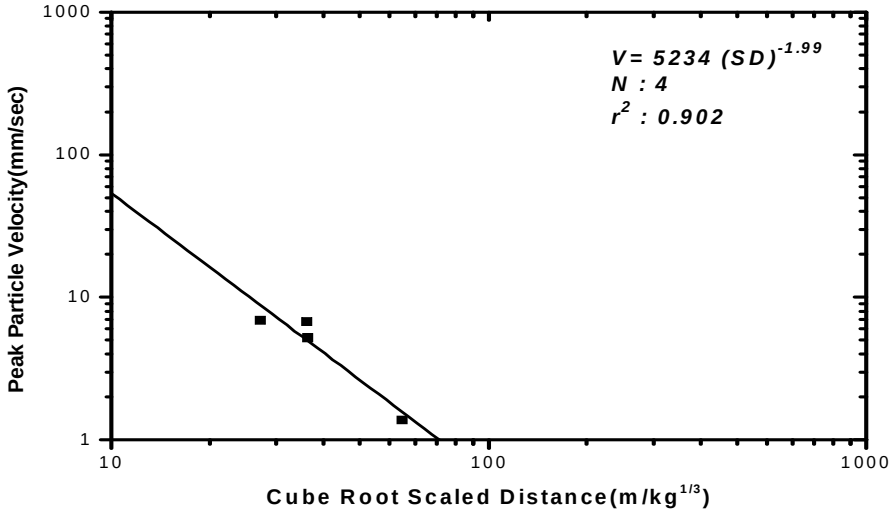


Figure 6.10 Result of regression analysis on 1.5T peak value(Cube root Scaled Distance).

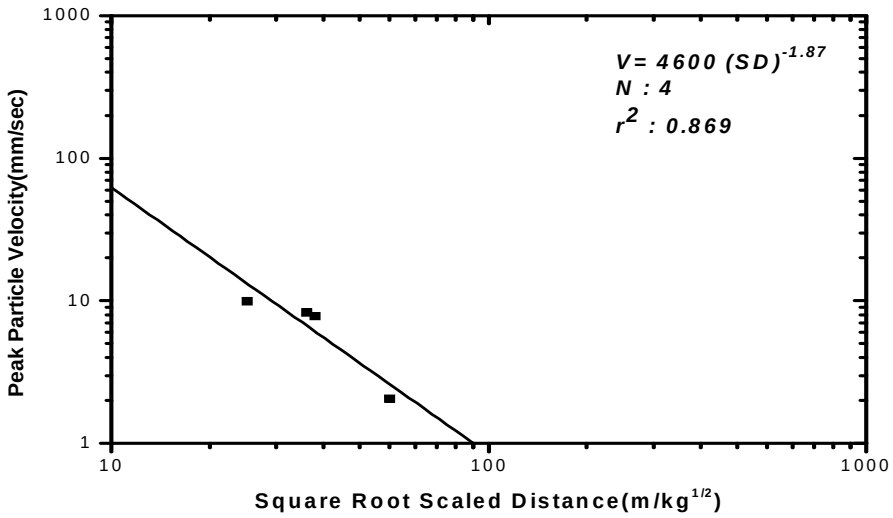


Figure 6.11 Result of regression analysis on 2T peak value(Square root Scaled Distance).

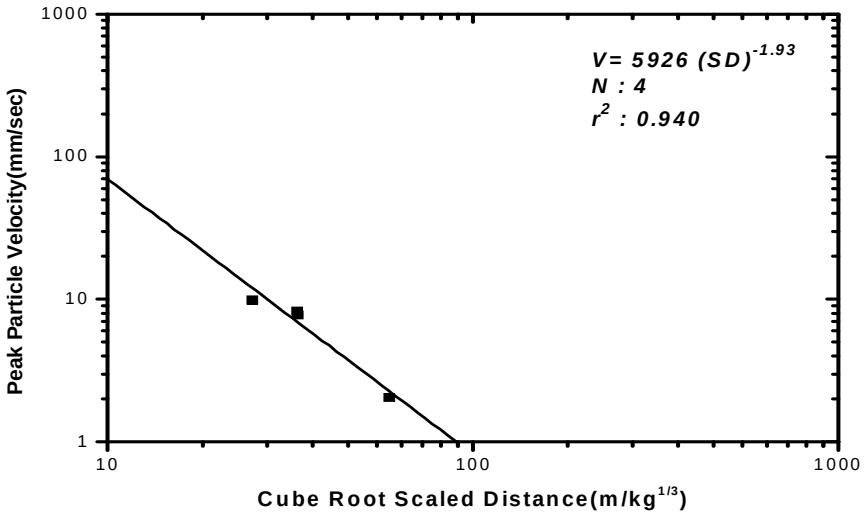


Figure 6.12 Result of regression analysis on 2T peak value(Cube root Scaled Distance).

6.3 중첩 모델링 자료와 실제 계측 자료의 비교

현장에서 실제 계측된 자료를 사용한 환산거리식과 단일공 파형의 선형 중첩모델링에 의해 산출된 최대 입자 진동 중 가장 크거나 작은 진동속도를 보이는 자료에 대한 분석 결과를 비교 검토 하였다.

Figure 6.13과 Figure 6.14는 자승근 및 삼승근의 실제 계측자료와 중첩모델링에 의한 각각 1ms, 0.5T, 1T, 1.5T, 그리고 2T에 해당하는 자료의 비교 그림이며 Table 6.7은 실제 계측자료의 분석결과와 중첩모델링에 의한 분석결과이다.

분석결과 자승근의 경우 모델링 자료에 의한 식의 K값은 3960~14535, n값은 −1.78~−2.14, r^2값은 0.806~0.954로 나타났다. 또한, 삼승근의 경우 모델링 자료에 의한 식의 K값은 5057~19076, n값은 −1.72~−2.19, r^2값은 0.869~0.951로 나타났다. 실제 자료의 95%의 신뢰식의 경우 자승근에서 K값은 9521, n값은 −1.87로 나타났으며 삼승근에서 K값은 12069, n값은 −1.92로 나타났다.

Figure 6.13와 Figure 6.14와 같이 95% 신뢰식의 실 계측자료와 1ms의 중첩 모델링 자료가 거의 일치하였으며 2T의 중첩 모델링 자료와 50% 신뢰구간의 실 계측자료가 거의 일치하였다. 또한, 1T의 중첩 모델링 자료는 95%신뢰구간과 50%의 신뢰구간 사이를 가로지르는 형태로 나타났다. 0.5T의 중첩 모델링 자료는 실제 계측 자료와 동떨어진 결과를 보인다. 이것은 실 계측자료가 중첩 모델링에서 나타나는 1ms, 1T, 1.5T, 그리고 2T의 지연단차 범주 내에서 발생했음을 입증해 주는 결과로 사료된다. 또한, 0.5T의 모델링 자료에 의한 분석결과가 실제 계측 자료와 동떨어져 위치하는 것은 현장 실험의 실제 발파의 지연단차가 0.5T의 범주 내에서는 발생하지 않았던

것으로 생각된다.

이렇게 실제 발파와 단일공 파형 중첩 모델링 자료에 의한 분석결과가 유사한 결과를 보이는 이유는 실제발파에서 서로 다른 단차의 뇌관을 사용하여 발파를 시행 하더라도 실제 계측지점에 도달하는 탄성파는 1ms 혹은 0ms의 시차로 전파되어 서로 중첩되거나 지발 발파로 배열된 발파공에서 뇌관의 발화 오차가 1ms 혹은 0ms의 범주에 포함됨을 보이는 것으로 판단 할 수 있다.

또한 단일공 파형에 의해 중첩 모델링된 최대 입자속도에 의한 발파 진동의 예측은 실제 발파에서 얻은 자료에 의한 환산거리식과 거의 유사함을 보임으로서 발파 계획 지역에서 단일공 발파에 의한 단일공 파형을 획득하고 이 파형을 중첩 모델링하여 본 발파의 발파진동 전파식을 예측하는 방법에 대한 타당성을 확보 하였다.

Table 6.8 Summary of regression output between the real data and the modeling data.

Equation		K	n	r^2	N
50% Line equation	square root scaled distance	5055	−1.87	0.880	35
	cube root scaled distance	6282	−1.92	0.870	35
95% line equation	square root scaled distance	9521	−1.87	0.88	35
	cube root scaled distance	12069	−1.92	0.87	35
1ms modeling equation	square root scaled distance	7300	−1.78	0.954	4
	cube root scaled distance	6178	−1.72	0.934	4
0.5T modeling equation	square root scaled distance	4276	−2.14	0.938	4
	cube root scaled distance	5057	−2.11	0.869	4
1T modeling equation	square root scaled distance	14535	−2.13	0.858	4
	cube root scaled distance	19076	−2.19	0.951	4
1.5T modeling equation	square root scaled distance	3960	−1.93	0.806	4
	cube root scaled distance	5234	−1.99	0.902	4
2T modeling equation	square root scaled distance	4600	−1.87	0.846	4
	cube root scaled distance	5926	−1.93	0.940	4

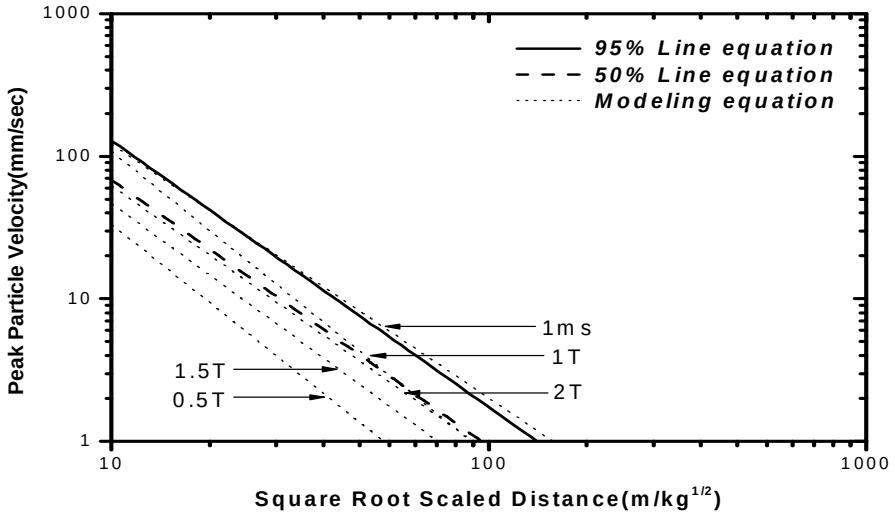


Figure 6.13 Relationship of real data and modeling data(Square root Scaled Distance).

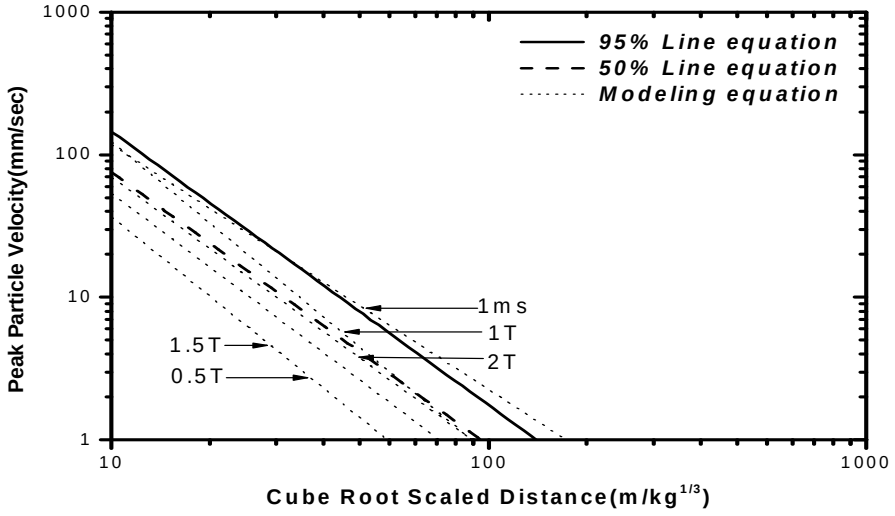


Figure 6.14 Relationship of real data and modeling data(Cube root Scaled Distance).

6.4 단일공 파형 중첩 모델링에 의한 발파진동의 예측

6.4.1 개요

최근 건설 업체에서는 발파 공해에 대한 민원을 방지하면서 효과적인 시공을 하기위해 지반조사 단계에서 시추공을 이용한 발파를 실시하고 이로부터 예측된 진동식을 설계에 직접 이용하는 일이 많아지고 있는 추세이다.

일반적으로 시추공발파는 실제 터널의 시공단계에서의 발파와 여러 가지 조건에서 상이하다. 특히, 시공단계의 발파는 1자유면 또는 자유면이 두개이상인 상태에서 발파가 이루어지지만 시추공 발파는 무자유면에서 수행된다. 또한 시추공 발파는 지발발파를 이용하는 노천발파나 터널발파와 달리 제발발파 혹은 단일공 발파로 이루어진다.

지금까지 본 연구에서 살펴본 바로 뇌관의 발화 오차와 발생한 탄성파의 전파속도차이로 인해 계측 지점에 도착된 진동파는 서로 간섭 상태에 놓이게 되고, 이때 상쇄간섭 혹은 보강간섭이 발생하여 큰 폭의 분산이 발생하는 것으로 밝혀졌다. 그러므로 단일공 발파인 시추공 발파자료에 의한 발파진동은 완전한 진동의 전파 특성을 포함 할 수 없을 것으로 사료된다.

본 장에서는 이러한 미비점을 보완하고 시추공 발파자료 등에서 입수된 단일공 파형을 발화 오차 및 탄성파의 도착 시차를 고려한 중첩 모델링으로부터 발파 진동을 예측하는 방법에 대하여 논하고자 한다.

6.4.2 중첩 모델링에 의한 예측 방법

실제 규모의 시험발파가 어려운 암반에 대해 시추공 등의 단일공 시험 발파를 실시하여 이때 얻어진 진동파형을 예상할 수 있는 지연단차 내에서 중첩 모델링한다. 모델링 결과로 얻어진 최대 입자속도와 단일공 시험시의 환산거리(SD, Scaled Distance)의 자료를 토대로 최적합식(best fit line)을 구하여 발파진동 예측 기법을 개발 하였다. 이 중첩 모델링 자료에 의한 발파진동의 예측 방법을 Figure 6.15의 흐름도와 같다. 중첩 모델링 자료에 의한 예측 방법을 단계 별로 설명하면 단일공 파형을 얻는 단계, 주파수 해석단계, 중첩 모델링 단계, 회귀분석 단계로 나눌 수 있다.

① 단일공 파형을 얻는 단계 : 단일공 파형을 얻기 위해 시추공 혹은 발파공 등을 실제 공사가 시행될 암반에 천공하여 장약 후 기폭 시켜 민원지역 혹은 주요 보안물건 및 대표지역에 계측기를 설치하여 단일공 파형을 얻는다.

② 주파수 해석단계 : 획득된 단일공 파형을 고속 프리에 분석(FFT)에 의해 주주파수를 산출한다.

③ 중첩 모델링 단계 : 1ms(혹은 0ms)간격을 포함하여 1주기(1T), 혹은 2주기(2T)의 시차에 대해 모델링하여 이때의 PPV(Peak Particle Velocity)을 기록한다. 이때 모델링에서 고려 할 사항은 본 발파시의 사용뇌관의 단차, 발화 오류, 동시에 기폭시키는 단의 수, 그리고 탄성파의 도착 시간 등이며 1ms(혹은 0ms)의 시차는 이들을 고려한 시차이다.

④ 회귀분석 단계 : 중첩 모델링 단계에서 획득된 최대 입자속도와 실제 시험에 사용했던 폭약량과 거리를 사용하여 적합식을 도출한다. 이 적합식을

발파진동 예상식으로 사용한다.

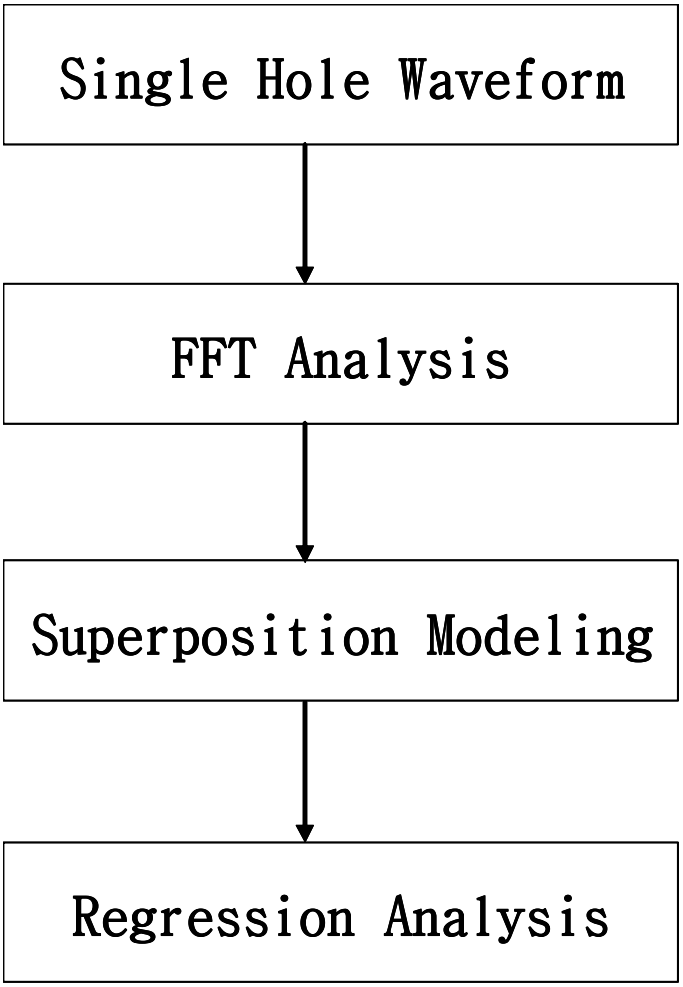


Figure 6.15 Procedure for prediction of blasting vibration.

7. 고찰

7.1 발파진동 예측방법

발파에 의한 공해 요인 중 발파진동의 전파 특성을 결정짓는 인자는 크게 입지조건과 발파조건으로 나눌 수 있다. 입지조건은 발파부지와 인근 구조물의 기하학적 형태, 대상암반의 지질학적 특징 및 역학적 성질 등을 예로 들 수 있다. 반면, 발파조건은 사용하는 폭약의 종류, 지발당 장약량, 기폭방법, 전색상태, 자유면의 수, 발파유형, 폭원과 측점간의 거리 등으로 나타낼 수 있다.

이상의 인자들 모두가 발파진동의 크기와 전파특성에 영향을 미치는데, 그 중에서 특히 지발당 장약량과 측점간의 거리가 가장 중요한 요인으로 작용한다. 지발당 장약량은 현재 우리나라에서 발파진동의 예측에서 대부분 사용되는 환산거리식의 주요 변수이다. 지발당 장약량은 동시에 기폭되는 장약 혹은 공간의 지연단차가 8ms 이하인 장약들의 총합으로 정의할 수 있다.

발파에 의해 발생한 지반진동의 크기는 폭원으로부터 계측지점까지의 거리에 반비례하고 1회 발파당 동시에 폭발하는 장약량에 비례하므로(Divine, 1966) 거리와 장약량의 함수 관계를 환산거리(Scaled Distance)로 표기한다. 그러므로 지발당 장약량과 거리가 변화할 때 최대 진동속도를 예측할 수 있다. 환산거리 방식에 의한 발파진동의 예측에서 측점간의 거리와 지발당 장약량을 제외한 모든 인자들은 입지상수(site constants)로 처리된다.

7.2 사전 발파진동 예측방법과 문제점

터널 등의 공사 시행 전 사전 조사단계에서 발파진동의 영향권을 예측하려는 시도로서 최근 국내에서는 지질 조사용 시추공 등에 장약을 하고 발파 진동을 측정하여 발파의 발파 진동을 예측하는 방법이 사용되고 있다. 하지만, 실제 터널을 굴착할 때 발생하는 진동의 전달 특성과는 차이가 있는 것으로 나타났다(임성식과 양형식, 2003). 또한, 발파진동을 사전에 예측하는 방법으로 다양한 수치 해석적 모델링이 설계에 적용되고 있으나 검증이 미비함과 아울러 결과에 대한 검증 과정이 수반되어야 할 필요성이 요구된다(류창하, 2003).

수치 해석적 모델링 방법은 발파현상이 폭발적인 동적 압력에 의해 짧은 시간동안 일어나는 특징이 있어 실제 발파에서 나타나는 순간적인 충격에 의한 변형 파괴 거동 및 발파압력이 전파되어 가면서 발생되는 감쇠 현상을 수치 해석적으로 정확히 모사하는 것은 매우 어렵다. 이러한 수치 해석적 방법의 단점을 보완하기 위하여 최성웅(2004)등은 실측진동 파형을 이용한 발파진동을 예측하는 동해석 기법에 관한 연구를 수행하여 보고한바 있다.

7.3 환산거리 방식의 문제점

환산거리 방식의 주요 변수 중 측점간의 거리는 조절 불가능한 변수로 사료된다. 그러나 조절 가능한 변수인 지발당 장약량이 동일한 발파작업의 조건일 경우 발파 설계에 있어 가장 중요한 인자가 된다. 지발당 장약량은 USBM에서 발간한 RI 6151(Duvall et al., 1963)을 바탕으로 8ms 기준에 의

한다. 그러나 몇몇 발파 기술자들은 8ms 기준에 대해서 의문을 제시하였다 (Anderson, 1989; Linehan and Wiss, 1980). Linehan and Wiss(1980)에 의하면 폭풍압과 진동의 크기들은 초기 방향성, 지연시차, 공간격, 그리고 전달 속도에 의해서 영향을 받는다는 사실을 증명하는 실험을 시행하였다. 또한 Anderson(1989)은 8ms 기준은 너무 긴 시차라고 지적한 바 있다. Siskind and David(2000)의 연구결과에 의하면, 8ms 기준은 전혀 놀라운 것이 아니라고 하였다. 그 이유는 지반의 주파수가 30Hz이고 두 번째 파가 8ms 시차로 도착한다면 8ms는 첫 번째 파의 1/4주기(T)인 지점에 불과 하다고 서술하고 있다. 최근에 발표된 Reisz(2006)의 연구결과에서는 8ms 기준은 새로운 지역의 개략적 약량의 산출 등의 제한된 범위에서 사용될 수 있으며 환산거리 개념의 재정의를 논하였다.

이상의 연구들은 8ms의 단차가 결코 인접단차와의 영향으로부터 별개의 진동을 산출하지 못한다는 것을 시사해 준다.

7.4 간섭 영향이 발파진동 예측에 미치는 영향

발파진동이 인접 단간 간섭으로부터 별개로 분리될 수 있는 단차에 대한 연구는 Duvall(1963)등의 8ms 기준 이외에 여러 학자에 의해 수행되었다 (Langefors, 1949; Wiss와 Linehan, 1978). Wiss and Linehan(1978)은 17ms를 주장하였고, NECGB(Nobel's Explosives Co. of Great Britain)에 의해 수행 된 연구 결과에서는 25ms 시차가 가장 낮은 진동 수준임을 보고하였다. 또한, Langefors(1949)는 지반의 주주파수에서 산출되는 주기(T)의 3배 이상인 단차를 주장하였다. 본 연구에서는 단일공 파형의 중첩 모델링을

통하여 간섭의 영향을 설명하기 위하여 1~80ms까지 지연단차를 증가시키고 2~15공까지 공의 수를 증가 하면서 모델링한 결과, 변화되는 최대 입자속도는 단일공 파형의 주주파수와 밀접한 관계가 있음을 제시하였다. 즉, 단일공 파형의 주기(T)가 0.5일 때 가장 낮은 진동속도를 기록하였으며 1T일 때 가장 높은 진동속도를 기록하였다.

본 연구와 유사한 연구인 발파진동 저감방법에 관한 연구(석철기, 1998)에 의하면, 발파에 의해 발생된 진동파형을 적극적으로 간섭 시켰을 때 단일공 기폭에 의한 최대 진동속도에 비해 약 1/5의 작은 진동속도가 산출된 것으로 보고되고 있다. 석철기(1998)의 연구에서 가장 작은 진동속도가 산출된 시차는 본 연구에서 얻어진 0.5T의 부분에 해당된다. 즉, 발파진동의 크기는 지연단차에 따라 변화되고, 그 변화정도의 해석은 계측지점의 주파수를 통해 가능할 것으로 판단된다.

환산거리 방식에 의한 발파진동을 예측할 때 발파진동은 계측지점의 주파수에 따라 분산되며, 뇌관의 발화 오류와 각각의 공에서 발생한 탄성파의 도착시간에 따라 발파진동 속도의 분산 정도는 더 복잡해진다. 이렇게 분산된 자료는 계측된 자료가 올바르게 획득되어졌다 할지라도 실제 발파진동을 예측하는 회귀분석에서 다른 자료의 신뢰도를 높이기 위해 사용되어지지 않은 경우도 있다. 그러나 사용되어지지 않은 자료를 고려하지 않은 발파 설계는 지속적인 민원을 유발하는 결과를 가져온다.

7.5 단일공 파형의 중첩 모델링에 의한 발파진동 예측

환산거리 방식에 의한 발파진동의 예측에서 발파진동의 크기에 영향을 주

는 주요 변수 중 조절 가능한 거리와 지발당 장약량은 정량화하고 나머지 변수는 입지상수로서 고려한다. 본 연구의 결과와 같이 환산거리 방식의 발파진동 예측은 지연단차에 따라서 크게 영향을 받으며 지연단차 또한 조절 가능한 변수이므로 정량화 할 수 있다. 그러나 이러한 가정은 균질한 진동의 전파매체에서만이 적용이 가능하며 불균질한 지반에서는 불가능하다. 왜냐하면, 발파진동은 거리가 멀어질수록 고주파 특성이 없어지고 저주파 특성만이 남게 되어 계측지점에 따라 그 주파수가 상이하기 때문이다. 그러므로 지연단차의 영향은 환산거리 방식의 발파진동 예측에서 정량화되지는 못할 것으로 판단된다. 그러나 지연단차를 고려한 단일공 파형의 중첩모델링을 통하여 가장 큰 진동속도를 예측을 할 수 있으며, 자료의 최적합식(best fit line)은 본 연구의 결과와 같이 단일공 파형이 계측된 지점의 95% 신뢰구간을 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 왜냐하면, 환산거리 방식의 발파진동 예측의 목적은 중앙치의 산출이 아닌 중앙치의 산출을 통한 가장 큰 진동속도를 예측하기 때문이다.

또한, 지연단차를 고려한 단일공 파형의 중첩모델링에 의한 발파진동 예측방법은 국내 시판되는 뇌관의 발화 오류의 밀도함수(functions of density)를 사용하여 MCS(Monte Carlo Simulation)의 방법에 의해 뇌관의 지연시차를 결정하여 중첩 모델링함으로서 실제 계측자료에 해당하는 자료를 얻을 수 있다. 그러나 단일공 파형의 중첩모델링 자료에 의한 발파진동의 예측 방법은 계측위치 선정, 단일공 파형과 발파 대상 암반의 대표성 등의 단일공 파형을 얻는 방법과 사용뇌관의 특성, 발파 방법, 그리고 기폭방법 등에 따른 중첩모델링방법에 대해 신중을 기하여야 할 것으로 사료된다. 아울러 향후 이러한 문제점에 대한 충분한 연구와 현장 실험이 절실하게 요구된다.

8. 결론

국내에서는 주로 환산거리방식에 의해 발파진동을 예측한다. 그러나 이러한 환산거리방식은 실규모의 발파가 시행되어져야 한다.

최근 국내에서는 터널 등의 공사 시행 전 사전 조사단계에서 발파진동의 영향권을 예측하려는 시도로서 지질 조사용 시추공 등에 장약을 하고 발파진동을 측정하고 본 발파의 발파 진동을 예측하는 방법이 사용되고 있다. 그러나 실제 진동의 전달 특성과는 차이가 있다. 또 다른 방법으로 수치 해석적 모델링이 사전 예측방법으로 사용되고 있으나 검증과정이 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 사전 조사 단계의 단일공 측정 자료를 사용한 단일공 파형 중첩 모델링을 통하여 발파진동을 예측하는 방법을 개발하였다. 또한 중첩 모델링의 적합성을 검증하기 위하여 기존 시차이론에 대해 검증하였으며 전파해온 발파진동의 크기와 주파수의 관계를 단일공 파형에 의한 중첩모델링을 통하여 고찰하였다. 그리고 공수와 지연단차의 증가에 따른 발파진동의 크기 변화를 연구하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1) 인접단차 간에 진동의 영향이 없는 단차로 각 학자 별로 제시된 8ms, 17ms, 25ms 단차를 Langefors의 2.5T 기준으로 고찰한 결과는 다음과 같다.

① 인접 단의 영향이 없는 단차로 8ms이하를 설정한다면 주파수 1~200 Hz 범위에서 0.5T와 1T 구간에 포함되며 60Hz에서 상쇄 간섭에 의해 가장 낮은 진동속도가 관찰 될 것이며 다른 주파수 대역에서는 60Hz 보다 높은 진동속도가 관찰 될 것이다.

② 17ms로 설정 한다면 주파수 1~150Hz 범위에서 보강과 상쇄간섭이 모

두 나타나며 대략 150Hz에서 인접 발파와의 간섭이 사라질 것이다.

③ 25ms로 설정한다면 1~100Hz의 범위 내에서는 보강과 상쇄간섭을 보이나 100Hz 이상에서는 인접공의 간섭은 사라질 것이다.

2) Langefors 2.5T 기준에서 국내에서 사용되는 전기뇌관의 두 가지의 지연시차와 100Hz와 125Hz의 주파수에 대해 고찰하였다.

발파에 의한 암반에서 측정되는 주파수가 대부분 100Hz 이상인 점을 감안하면 국내에서 사용되는 두 가지 지연 시차의 전기뇌관인 20ms 지연시차는 약 125Hz이상에서 간섭의 영향이 소멸된다. 그리고 25ms의 지연시차는 100Hz이상에서 간섭의 영향이 소멸된다. 그러므로 뇌관의 발화 오차를 배제하면 20ms와 25ms의 두 가지의 지연시차 중 25ms의 지연시차가 파의 분리면에서 더 유리 하다고 볼 수 있다. 또 발파에 의한 주파수가 대부분 25Hz 이상인 점을 감안하면 100ms의 지연단차는 발파진동의 보강과 상쇄 간섭의 영향을 피할 수 있다.

3) 지발당 장약량을 8ms 규정에 따라 산출하는데 대한 국내외에서 많은 문제점 제기가 있었다. 본 연구에서는 주파수와 지연단차 간에는 보강간섭과 상쇄간섭을 일으키는 밀접한 관계가 있음을 확인하였다. 그 결과로서 대략 150Hz 이상에서 17ms의 단차가, 100Hz 이상 에서는 25ms의 단차가, 60Hz 이상에서는 42ms의 단차가, 37Hz 이상에서는 67ms의 단차가, 그리고 25Hz 이상에서는 100ms의 단차가 인접 발파와의 간섭이 사라질 수 있는 단차로 결정될 수 있다. 즉, 전파속도의 차이를 배제하고 지연단차만을 고려하면 지발당 장약량의 산정하는 기준은 25, 60, 100, 200Hz의 지반 주파수에 따라 적용하는 것이 타당할 것이다.

4) 본 발파와 300ms의 지연시차를 두고 기폭된 단일공 파형을 사용하여 이전의 14공에 대한 파형과 1ms 간격으로 비교해가는 시행착오법에 의해 본 발파의 진동이 실제 계측지점에 도착된 시차를 결정하였다. 동일한 발파에 대해 각각 29m에서 유추된 지연단차를 69m에 적용하여 중첩 모델링한 결과 본 발파의 파형과 유사한 형태를 보이는 파형을 얻을 수 있었다. 이것은 단일공 파형과 유사한 파형이 본 발파에서도 반복되고 있음을 확인 할 수 있었다. 또한, 29m의 파형으로부터 결정된 지연단차가 69m의 동일한 발파에 대한 파형에서도 적용되는 것은 중첩 모델링의 신뢰성을 확보한 결과로 판단하였다.

5) 중첩모델링을 통하여 공수의 증가에 따른 진동 속도의 변화를 고찰하고 단일공 파형의 주주파수와 중첩 모델링된 지연단차에 따른 진동의 변화를 Langefors의 시차이론과 비교하여 분석하였다. 지연단차는 1ms 간격으로 1~80ms까지 증가 시키며 모델링 하였으며 공수는 2~15공 까지 증가 시켜가며 모델링을 실시하였다. 그 결과 상쇄간섭 주기의 0.5, 1.5, 그리고 2.5T의 지연단차는 상쇄간섭이 발생하여 진동이 저점으로 나타났으며 보강간섭 주기의 1, 2, 그리고 3T의 지연시차는 보강간섭이 발생하여 진동이 고점으로 나타났다. 또 지연단차의 영향은 3T이상에서도 약간의 보강 간섭은 존재 하였다. 공수의 증가의 영향은 보강간섭의 지연단차 대역인 1ms와 1T 구간에서 공수가 증가할수록 간섭에 의한 진동은 커졌으며 일정 공수이상에서는 수렴되는 경향을 보였다.

6) 현장에서 실제 계측된 자료를 사용한 환산거리식과 단일공 파형의 선형 중첩모델링에 의해 산출된 최대 입자 진동 중 가장 크거나 작은 진동속도를 보이는 자료에 대한 분석 결과를 비교 검토 하였다.

분석결과 95% 신뢰식의 실 계측자료와 1ms의 중첩 모델링 자료가 거의 일치하였으며 2T의 중첩 모델링 자료와 50% 신뢰구간의 실제 계측자료가 거의 일치하였다. 그리고 1T의 중첩 모델링 자료는 95%신뢰구간과 50%의 신뢰구간 사이를 가로지르는 형태로 나타났다. 0.5T의 중첩 모델링 자료는 실 계측 자료와 동떨어진 결과를 보였다. 이것은 실 계측자료가 중첩 모델링에서 나타나는 1ms, 1T, 1.5T, 그리고 2T의 지연단차 범주 내에서 발생했음을 입증해 주는 결과로 사료된다. 또한, 0.5T의 모델링 자료에 의한 분석결과가 실 계측 자료와 동떨어져 위치하는 것은 현장 실험의 실제 발파의 지연단차가 0.5T의 범주 내에서는 발생하지 않았던 것으로 생각된다.

7) 단일공 파형에 의해 중첩 모델링된 최대 입자속도에 의한 발파진동의 예측은 실제 발파에서 얻은 자료에 의한 환산거리식과 거의 유사함을 보임을 확인하였다. 그러므로 발파 계획 지역에서 단일공 발파에 의한 단일공 파형을 획득하고 이 파형을 중첩 모델링하여 본 발파의 발파진동 전파식을 예측하는 방법에 대한 타당성을 확보 하였다.

그러나 계측위치 선정, 단일공 파형과 발파 대상 암반의 대표성 등의 단일공 파형을 얻는 방법과 사용뇌관의 특성, 발파 방법, 그리고 기폭방법 등에 따른 중첩 모델링방법에 대해 신중을 기하여야 할 것으로 사료된다. 또한, 이러한 문제점에 대한 충분한 연구와 현장 실험이 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 강추원, 발파공학 A to Z, 구미서관, 2005, pp.441459.
2. 강추원, 김종인, 주 주파수를 고려한 협동장약 특성에 관한 연구, 터널과 지하 공간, Vol. 15, 2005, pp.316-323.
3. 강추원, 김종인, 박정봉, 협동장약을 고려한 MS 지발 발파 특성 연구, 화약·발파, Vol. 23, 2005, pp.11-18.
4. 김대상외, 발파진동의 속도 및 주파수를 고려한 허용 진동치 결정에 관한 연구, 한국자원공학회지, Vol. 28, 1991, pp. 444-454
5. 김상윤 외, 대학물리학, 정문각, 2002, pp.362-364.
6. 김진수, 임한욱, 진동이력분석을 응용한 발파 진동 파형의 특성에 관한 연구, 터널과 지하 공간, Vol. 9, 1999, pp. 36-47.
7. 김재극, 산업화약과 발파공학, 개정판, 서울 대학교 출판부, 1992, pp. 360-401
8. 광주광역시 상수도 사업본부, 용연계통 각화2배수지 기본 및 실시설계 보고서, 2004.
9. 대우건설기술연구소, 건설 진동의 영향 평가 및 대책에 관한 연구, 1988, pp. 85-151, 265-267.
10. 류창하, 발파에 의한 지반진동의 수준 및 주파수 특성 예측, 한국 자원공학회 최신엔지니어링 발파 특별 심포지엄 논문집, 1995, pp. 132-141.
11. 류창하, 수치해석적 방법의 발파설계 적용및 문제점 고찰, 제2회 한화 발파기술 심포지움, pp.1-13
12. 석철기, 발파진동 저감방법에 관한 연구, 화약·발파, Vol. 16, 1998, pp.34-46.

13. 신일재, 이정인, 백종현, 최소저항선이 발파진동의 크기에 미치는 영향에 관한 실험연구, 화약·발파, Vol. 19, 2001, pp53-61.
14. 임성식, 양형식, 시추공 발파 자료의 터널설계 적용성에 관한 연구, 화약·발파, Vol. 21, 2003, pp.15-19.
15. 임한욱, 김재동, 발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구, 한국자원공학회지, 1992, Vol. 29, pp. 146-157.
16. 임한욱 외, 건설 진동의 영향평가 및 대책에 관한 연구, 대우건설기술연구소, 1989, pp. 85-151.
17. 이창훈, 강추원, 김종인, 발파공수에 따른 진동속도 특성에 관한 연구, 화약·발파, Vol. 19, 2001, pp.63-70.
18. 최성웅, 박의섭, 선우춘, 정소걸, 실측진동파형을 이용한 발파 동해석 기법에 관한연구, 터널과 지하공간, 2004, Vol. 14, pp. 108-120
19. Adams, T. F., Demuth, R. B., Margolin, L. G., and Nichols, B. D., Simulation of Rock Blasting with the Shale Code. Proceedings of the First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, 1983 pp. 361-373.
20. Agnerustan, Rock Blasting Terms and symbols, 1998, pp. 40
21. Altas Power Company, Explosives and Rock Blasting, 1987, pp.157-201, 321-406.
22. Ambraseys, N. R., and Hendron, A. J., Dynamic Behavior of Rock Masses, in Rock Mechanics in Engineering Practice, 1968, pp. 203-227.
23. Anderson, D., The 8 Millisecond "Criterion": Have We Delayed Too Long in Questioning It?, Proceedings of the 15th Annual ISEE Conference on Explosives and Blasting Technique, ISEE, 1989.

24. Archibald, J., Blasting Vibration Laboratory Manual. Kingston, Ontario, Canada: Queen's University, Mining Engineering Department, 1976.
25. Ash, R. L., The Influence of Geological Discontinuities on Rock Blasting, Unpublished doctoral dissertation, University of Minnesota, 1973.
26. Barker, D. B., Fourney, W. L, and Dally, J. W., Photoelastic Investigation of Fragmentation Mechanis, Part Ⅰ-Borehole Crack Network, University of Maryland., 1978, March.
27. Barker, D. B., Fourney, W. L, and Dally, J. W., Photoelastic Investigation of Fragmentation Mechanis, Part Ⅱ-Flaw Initiated Network, University of Maryland., 1978, August.
28. Bicholls, H., Johnson, c., Duvall, W., Blasting Vibrations and Their Effects on Structures, Bulletin 656, 1971.
29. Bollinger G. A., Blasting Vibration Analysis, 1971, pp.58-88.
30. Calvin J. Konya, and Edward J. Walter, Surface Blast Design, 1990, pp.35-58.
31. Carlos lopez Jimeno, EmiloLopez Jimeno, and Rrancisco Javier Ayala Carcedo, Drilling and Blasting of Rocks, 1995, pp.333-339.
32. Charles H. Dowding, Construction Vibrations, 1996, 19-58.
33. Chiappetta, R. F., Bauer, A., and Burchell, S. L., The Use of High Speed Motion Picture Photography in Blast Evaluation and Design, Proceedings of the 9th Annual Conference on Explosives and Blasting Techniques, Society of Explosives Engineers, 1983.

34. Clough, R. W. and Penzien, J., Dynamics of Structures, Mc-Graw Hill, 1975.
35. Clough, G. W., and Chameau, J. L., Measured Effects of Vibratory Sheetpile Driving, ASCE, Vol.106, 1980.
36. Crandell, F. J., Ground Vibration due to Blasting and Its Effect upon Structures, ASCE, 1949.
37. Das, B. M., Fundamentals of soil Dynamics, Elsevier, 1982.
38. Devine, J. R., Avoiding Damage to Residences from Blasting Vibrations, Highway Research Record 135, 1966, pp. 35-44.
39. Department of the Army Corpse of engineer, Systematic Drilling and Blasting for Surface Excavations, 1972.
40. Dick, R. A., Factors in Selecting and Applying Commercial Explosives and Blasting Agents, Information Circular 8405, U.S. Bureau of Mines, 1968.
41. Dowding C. H., Blast Vibration Monitoring and Control, Prentice Hall,1984, pp. 7-40, 264-276.
42. Dupont Co., Blaster's Hand Book, 16th Edition, 1980, pp.423-446.
43. Dupont Co., Blaster' Hand Book, Technical Services Division, E.I. Dupont, 1977, pp. 494.
44. Duvall, W. ., and Fogelson, D. E., Review of Criteria for Estimating Damage to Residences from Blasting Vibrations, USBM, 1962.
45. Duvall, W., Johnson, C., Meyer, A., and Devine, J., Vibrations from Instantaneous and Millisecond Delayed Blasts, RI 6151, 1963.

46. Fourney, W. L., and Barker, D, B., Effect of Time Delay on Fragmentation in Explosives, Proceedings of the First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, 1983 pp. 225-249.
47. Gustafsson, R., Swedish Blasting Technique, S.P.I, 1973.
48. NHI, Rock Blasting and Overbreak Control, U. S. National Highway Institute, 1991, pp.229-293.
49. Hansen, L.A., and Schroeder, W.L., Penetration Resistance for Driven Piling, ASCE, Vol.103, 1977.
50. Heckman, W. S., and Hagerty, J. H., Vibrations Associated with Pile Driving, ASCE, Vol.104, 1978.
51. Hinzen, K. G. et al., A new approach to predict and reduce blast vibration by modelling of seismograms and using a new electronic initiation system, S. E. E. 1987.
52. Hino, U., Fragmentation of Rock through Blasting, Quarterly of the Colorado School of Mines, 1956, pp. 51, 189.
53. Ilagerty, D. J., and peck, R. S., Heave and Lateral Movements due to Pile Driving, ASCE, Vol.97, 1971.
54. Itoh S. and Liu Z., Nadamitsu Y., An investigation on the properties of underwater shock waves generated in underwater explosions of high explosives, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 119, 1997, pp. 488
55. James W. D., William F. K., Experimental stress analysis, McGraw Hill, Inc., 1991, pp. 3-54.

56. Johansson, C. H., and Persson, P. A., Detonics of High Explosives, New York, Academic Press, 1970.
57. Jukka Naapuri, Surface Drilling and Blasting, 1988, pp.156-171.
58. Keil, L. D., Burgess, A. S., Nielsen, and Koropatnick, A., Blast Vibration Monitoring of Rock Excavation, CAN. GEOTECH, Vol.14, 1977.
59. Kopp, J., and Siskind, D., Effects of Millisecond-Delay Intervals on Vibration and Airblast From Surface Coal Mine Blasting, RI9026, USBM, 1986.
60. Kutter, H. K., and Fairhurst, C., On the Fracture Process in Blasting, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., B, 1971, pp. 181-202.
61. Langefors U. and Kihlström B., The modern technique of Rock Blasting, Third edition, 1978, pp. 258~293
62. Langefors, U., Reduction of Ground Vibrations in Blasting. Teknisk Tidskrift 79, 1949, pp. 141-147.
63. Linehan, P., and Wiss, J. F., Vibration and Airblast Noise From Surface Coal Mine Blasting, SME/AIME proceddings of Fall Meeting, 1980.
64. Linehan, P., and J. F. Wiss, Vibration and air blast noise from surface coal mine blasting, SME-AIME Fall Meeting, 1980.
65. McHugh, S., Computational Simulations of Dynamically Induced Fracture and Fragmentation, Proceedings of the First International Symposium on Rock by Blasting, 1983, pp. 407-418.
66. Moore, P. J., Analysis and Design of Foundations for Vibrations, A.A. Blakema, 1985.

67. Murphy, J. R., Near-Field Rayleigh Waves from Surface Explosions, Bulletin of the Seismological Society of America, 1981.
68. Napier Munn, Open Pit Blast Design, 1996, pp.265-315.
69. Obert, L., and Duvall, W.I., A Gague and recording Equipment for Measuring Dynamic Strain in Rock, USBM, RI 4581, 1949.
70. Obert, L., and Duvall, W. I., Generation and Propagation of Straain Waves in Rock, USBM, RI 4663, 1950.
71. Olofsson Stig O., Applied Explosives Technology for Construction and Mining, 1990, pp. 219-221
72. Oriard, L. L., The Effects of Vibrations and Environmental Forces, 1999, pp.23-58.
73. Oriard, L. L., and Emmert, N. W., Short delay blastin at Anaconda's Berkeley open pit mine, montana, Society of Mining Engineers, 1980.
74. Per-Anders Persson, Roger Holmberg, and Jaimin Lee, Rock blasting and explosives engineering, 1992, pp. 361-365
75. Persson, P. A., Lundborg, N., and Johansson, C. H., The Basic Mechanism in Rock Blasting. Proceedings of the 2nd Congress of the International Society for Rock Mechanics, Belgrade., 1970.
76. Pijush Pal Roy, Rock Blasting Effects and Operations, 2005, pp.75-158.
77. Pit Slope Manual, Perimeter Blasting(Canmet, Report 77-44), Canada Center for Mineral and Energy Technology, Canada, 1977.
78. Prange, B., Dynamic Response and Wave Propagation in Soils, A.A. Balkema, 1978.

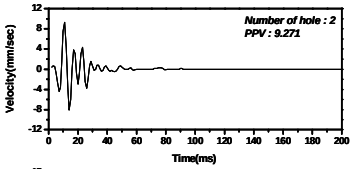
79. Randall R. B., Frequency Analysis, 1987, pp.146-184.
80. Randal M. Wheeler, Analyzing Delay Timing Effects on Vibrations, Minnblast99, 1999, pp.113-122.
81. Redl, W. A., Noise and Vibration Measurement, ASCE, 1985.
82. Reisz W., McClure R., and Bartley D., Why the 8 MS Rule Doesn't Work, ISEE, Proceedings of The Thirty-Second Annual conference on Explosives and Blasting Technique, Vol. 2, 2006.
83. Reynolds, D. D, Engineering Principles of Acoustics, Allyn and Bacon, Inc, 1981.
84. Richart, F. Em., Woodd, R. D., and Hall, J. R., Vibrations of Soils and Foundations, Prentice Hall, 1969.
85. Scott, A., Cocker, A. Djordjevic, N., Higgins, M., LaRosa, D., Sarma, K.S., and Wedmaier, R., Open Pit Blast Design: Analysis and Optimization, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 1996.
86. Simons, N. F., A Comparative Study of Structural Response to Explosive-Induced Ground Motions, ASCE, 1975.
87. Siskind, D.E., Vibrations from Blasting, International Society of Explosives Engineers, 2000.
88. Siskind, D., Stagg, M., Kopp, J., and Dowing, C., Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration From Surface Mine Blasting, RI 8507, USBM, 1980.
89. Taniguchi, E., and Okada, S., Reduction of Ground Vibrations by Improving Soft Ground, JSCE, Vol.21, 1981.
90. Theissen, J. R., and Wood, W. C., Vibrations in Structures Adjacent to pile Driving, Dames&Moore, Engineering Bulletin 60, 1982.

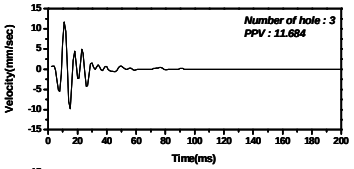
91. Wiss, J. F., Construction Vibrations : State-of-the-art, ASCE, Vol. 107, 1981.
92. Woods, R. D., Screening of Surface Waves in Soils, ASCE, Vol.94, 1968.
93. Tarver, C. M., Detonation waves in pentaerythritol tetranitrate, Journal of Applied Physics Vol. 81, NO. 11, 1997, pp.193-202
94. William Hustrulid, Blasting Principles for Open Pit Mining, Vol. 2, 199, 416-462.
95. Winzer, S. R., Furth, W., and Ritter, A., Initiator Firing Times and Their Relationship to Blasting Performance, Proceedings of the 20th Symposium on Rock Mechanics, 1979, pp. 461-470.
96. Wiss, J. F., and Nicholls, H. R., A Study of Damage to a Residential Structure from Blast Vibrations, ASCE, 1974.
97. 175th Anniversary Edition of the Blasters' Handbook, Blasters' Handbook, Dupont, 1980.

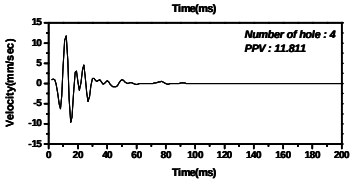
APPENDIX

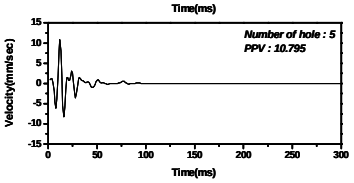
■ Superposition Modeling Waveform of SN. 1
(1~30ms Delay Interval)

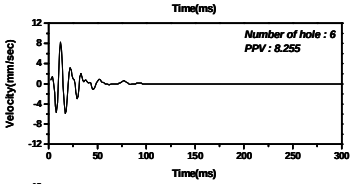
1ms Delay Interval

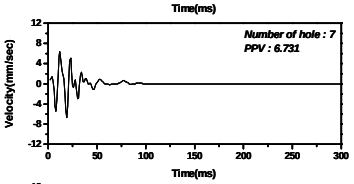


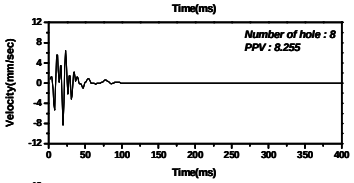


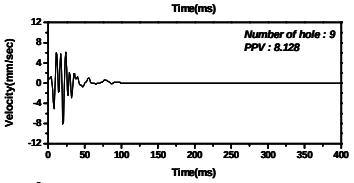


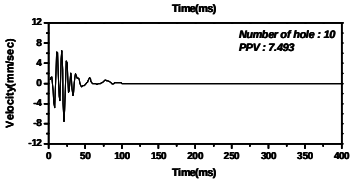


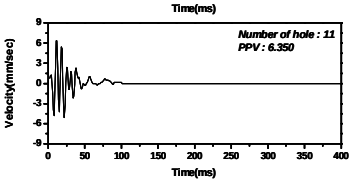


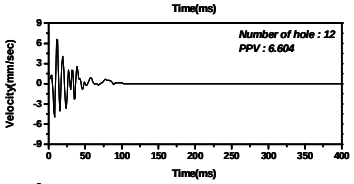


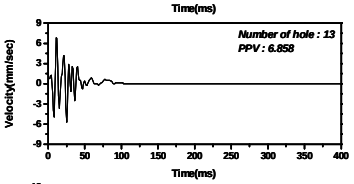


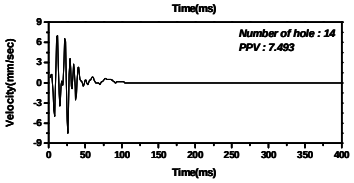


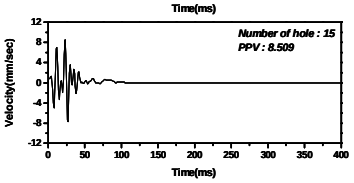




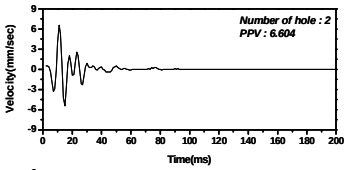


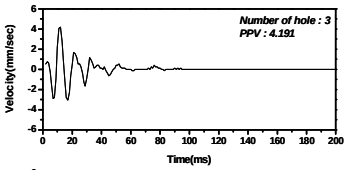


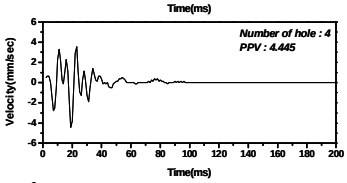


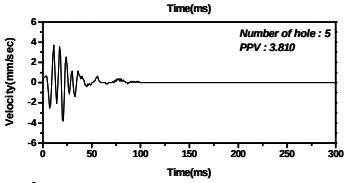


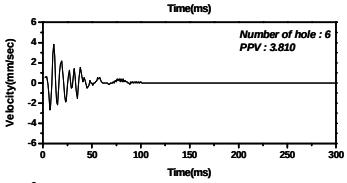
2ms Delay Interval

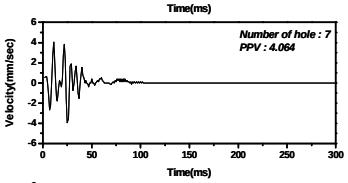


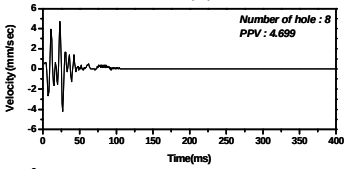


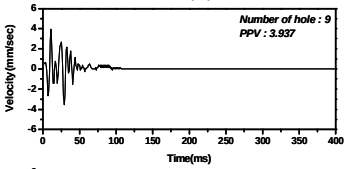


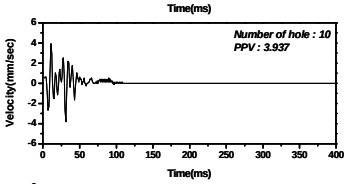


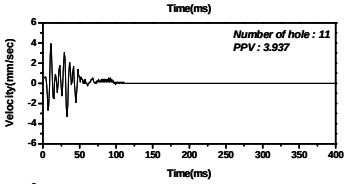


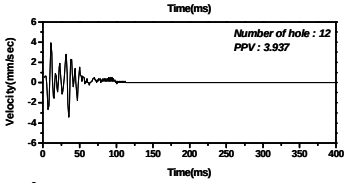


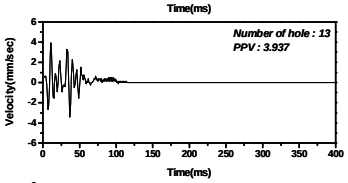


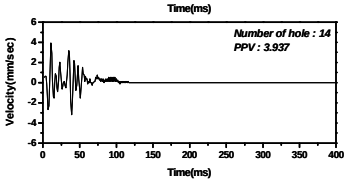


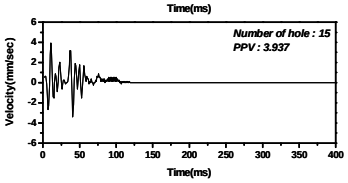




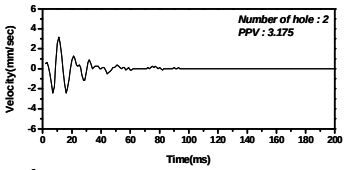


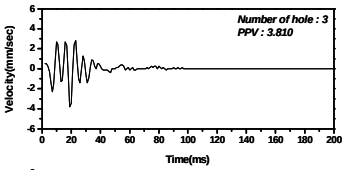


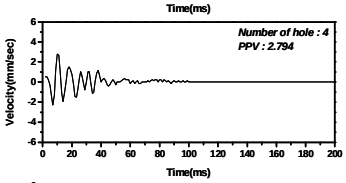


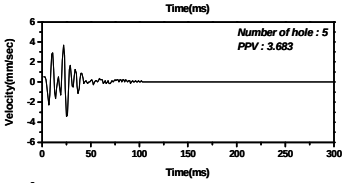


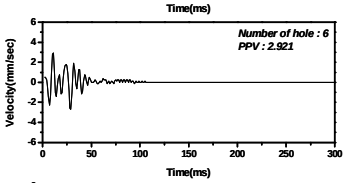
3ms Delay Interval

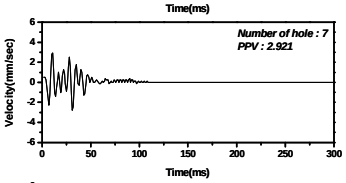


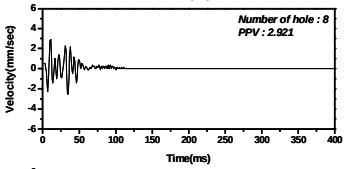


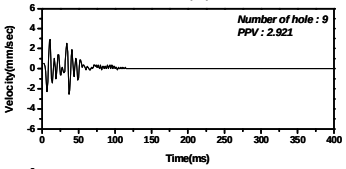


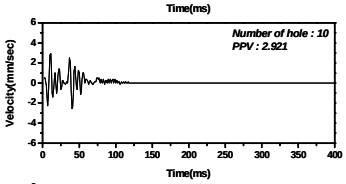


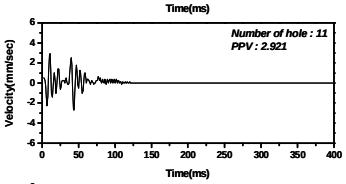


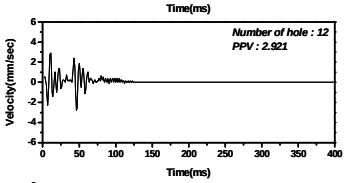


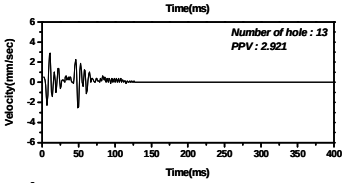


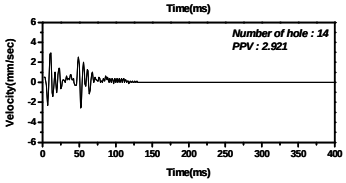


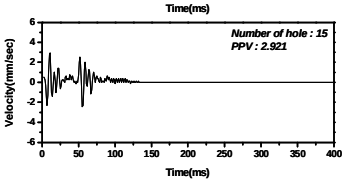




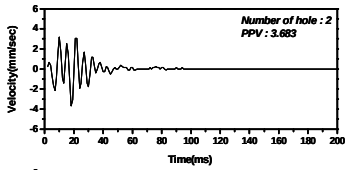


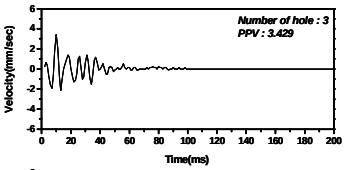


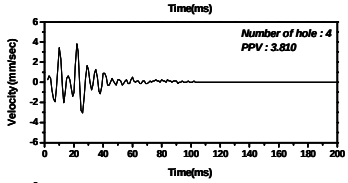


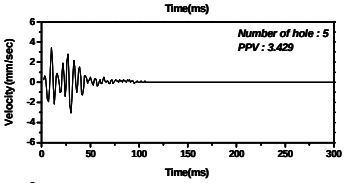


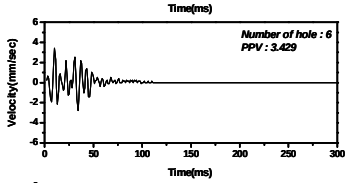
4ms Delay Interval

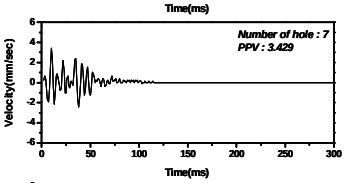


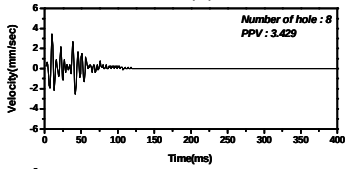


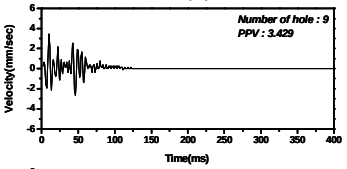


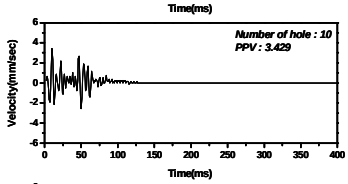


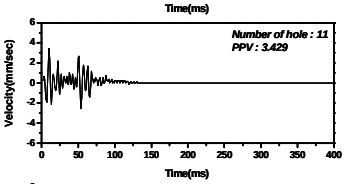


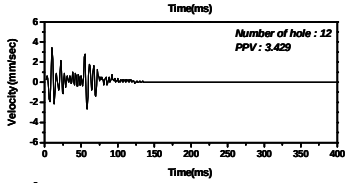


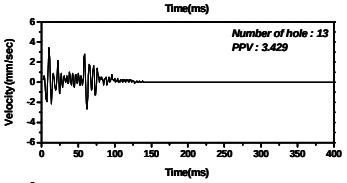


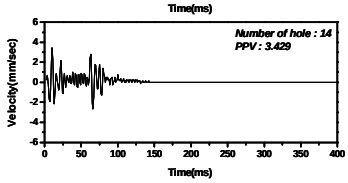


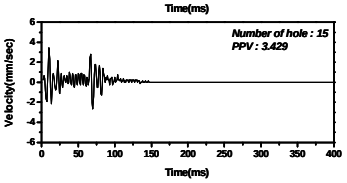




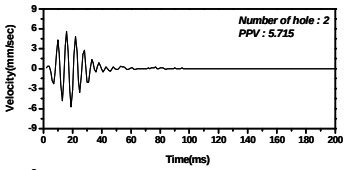


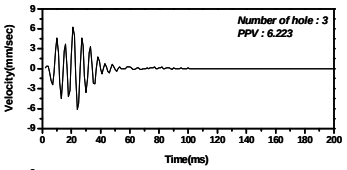


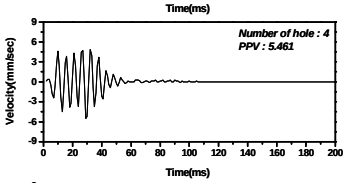


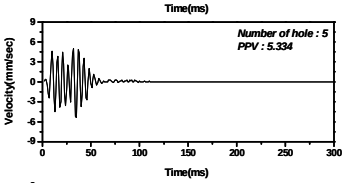


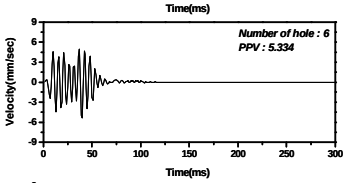
5ms Delay Interval

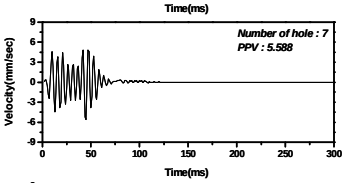


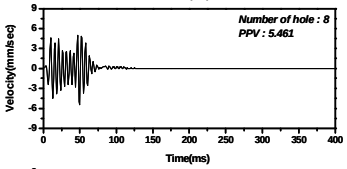


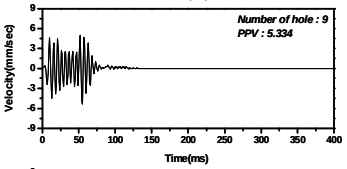


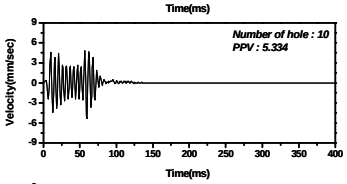


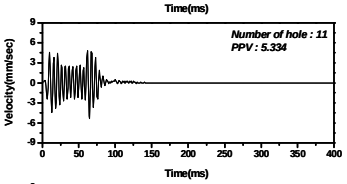


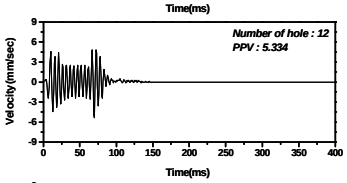


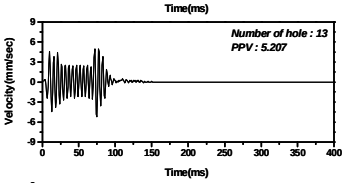


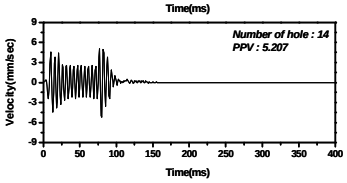


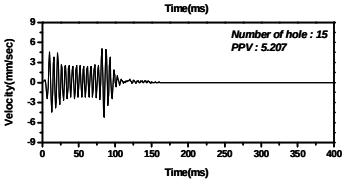




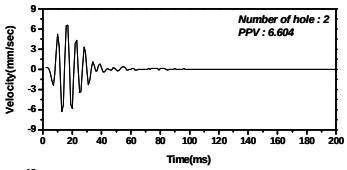


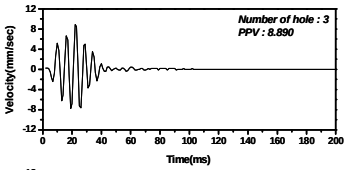


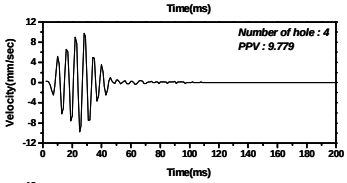


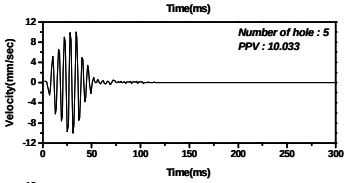


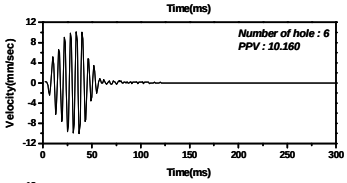
6ms Delay Interval

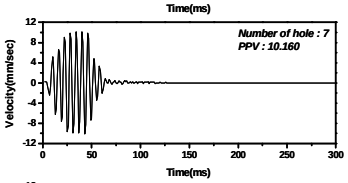


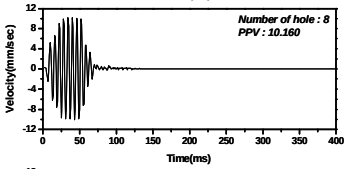


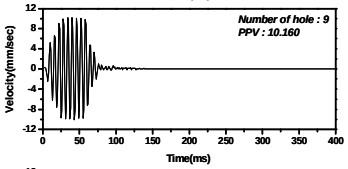


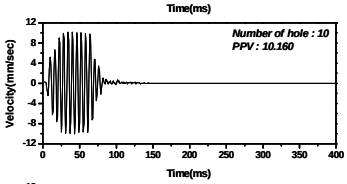


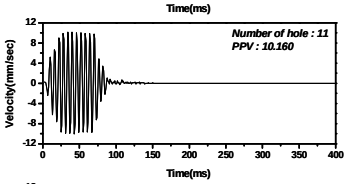


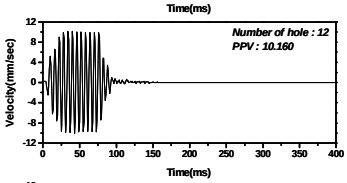


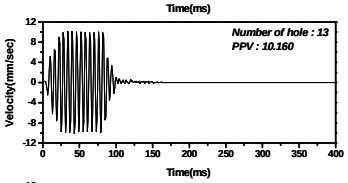


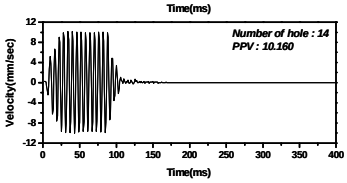


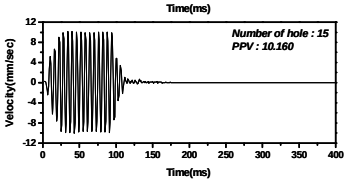




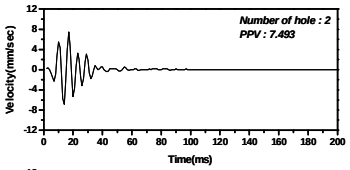


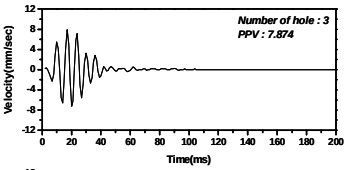


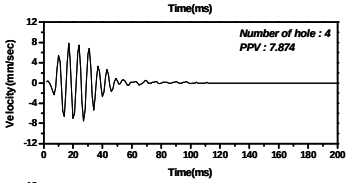


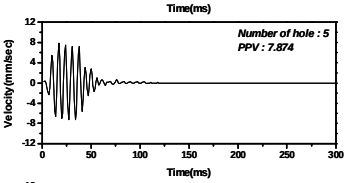


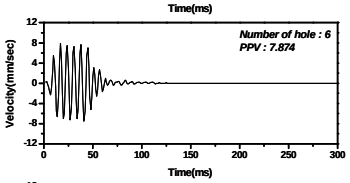
7ms Delay Interval

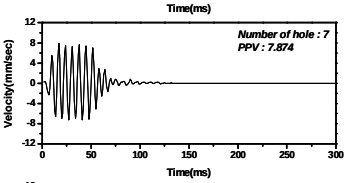


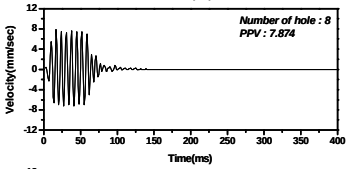


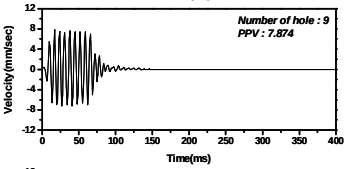


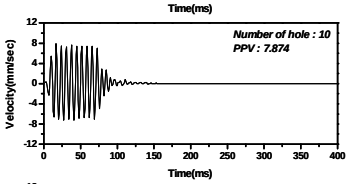


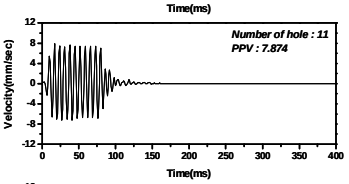


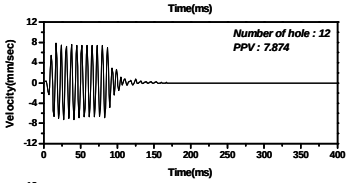


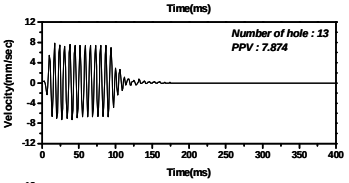


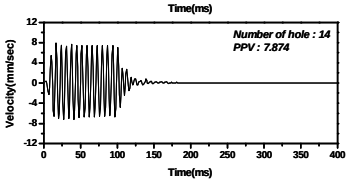


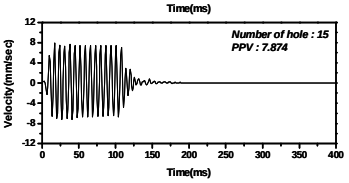




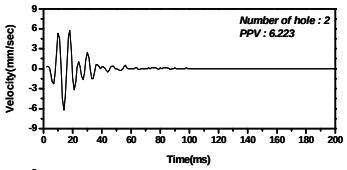


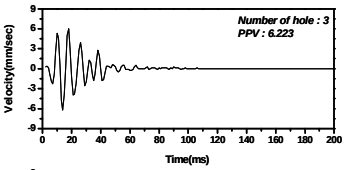


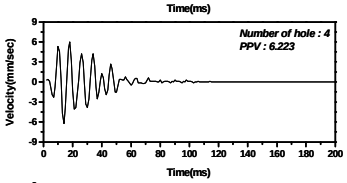


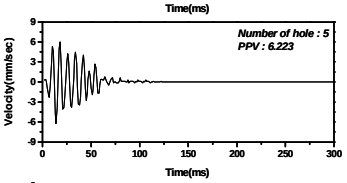


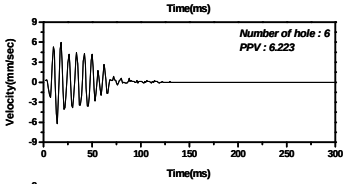
8ms Delay Interval

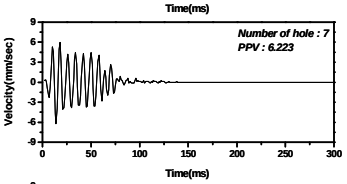


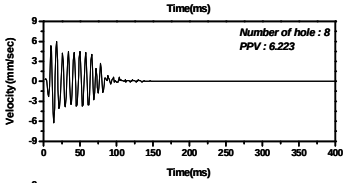


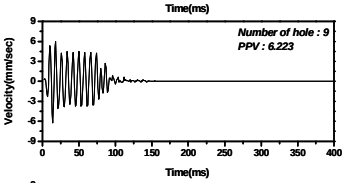


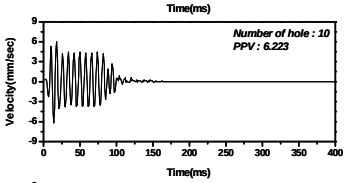


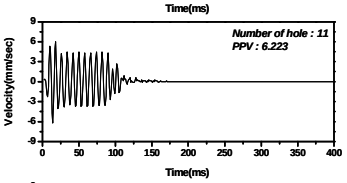


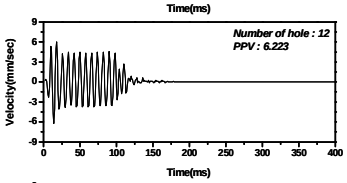


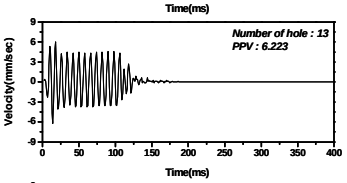


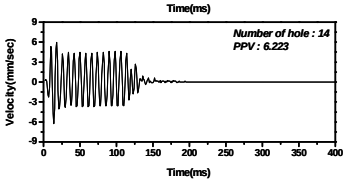


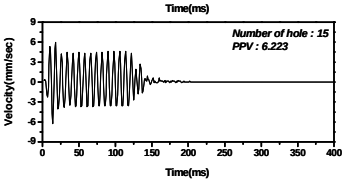




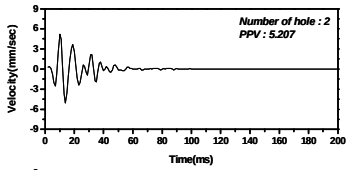


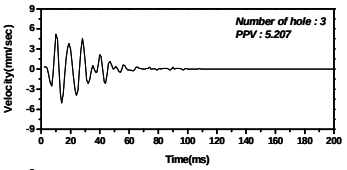


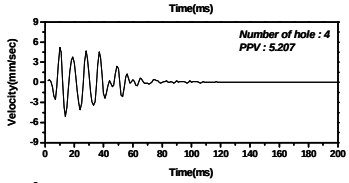


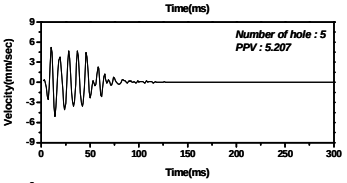


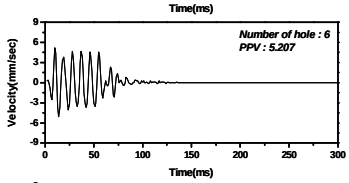
9ms Delay Interval

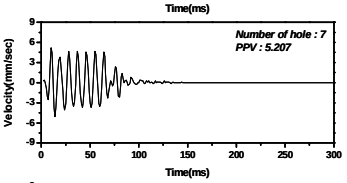


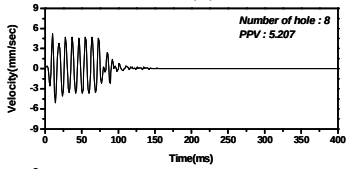


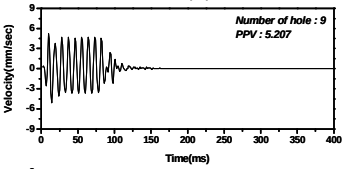


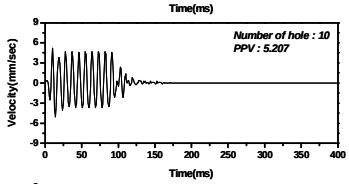


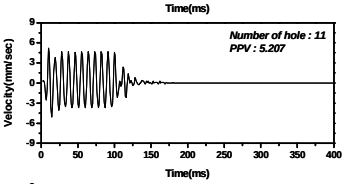


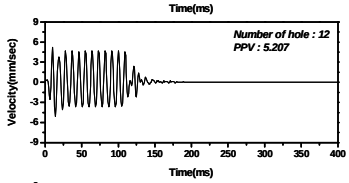


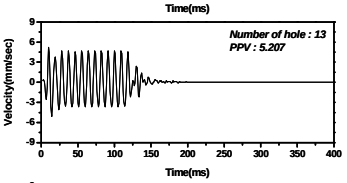


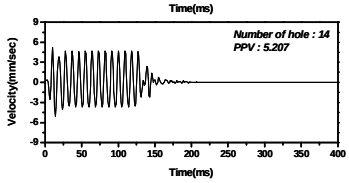


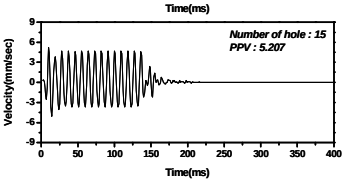




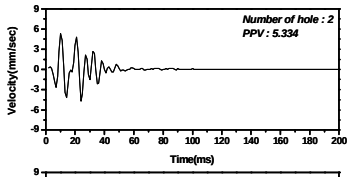


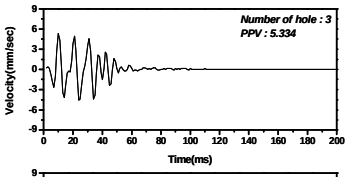


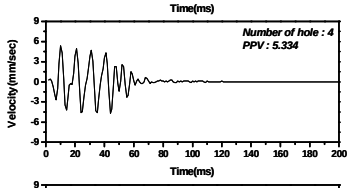


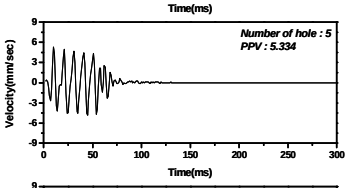


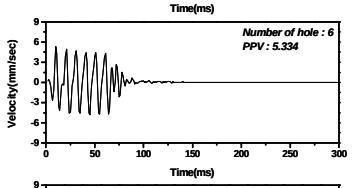
10ms Delay Interval

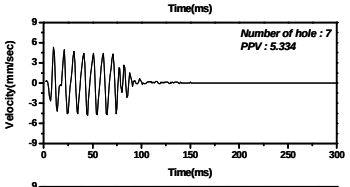


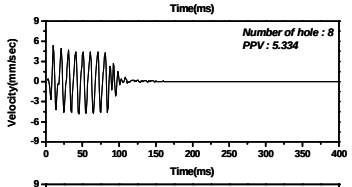


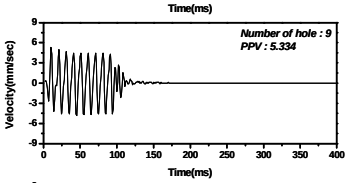


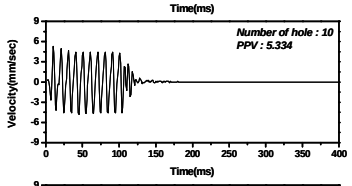


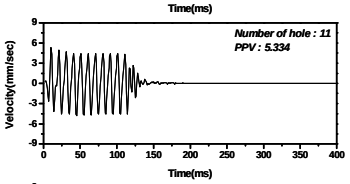


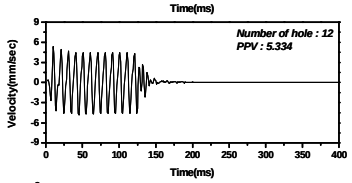


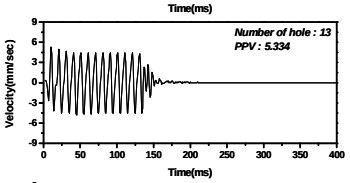


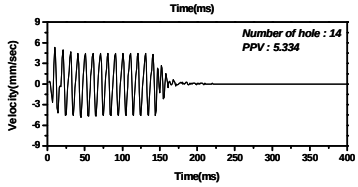


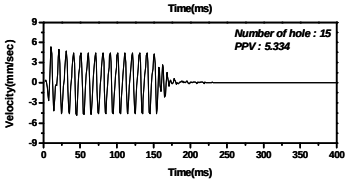




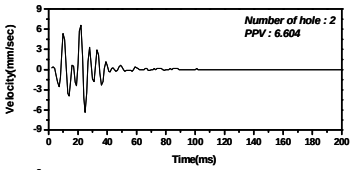


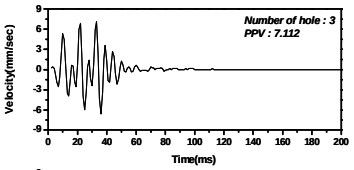


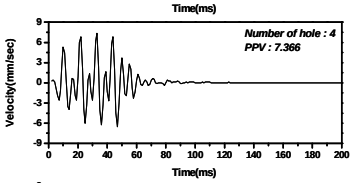


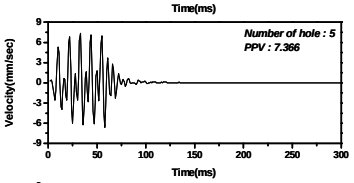


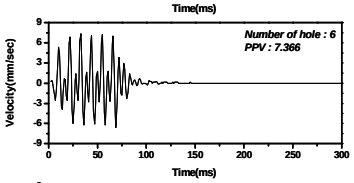
11ms Delay Interval

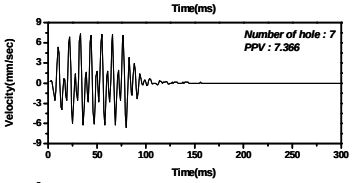


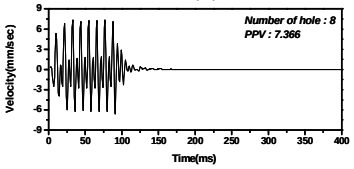


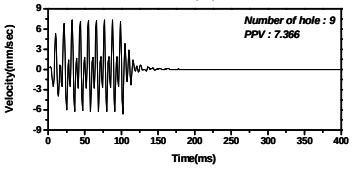


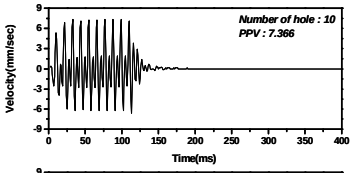


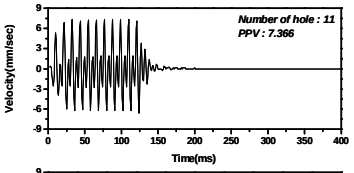


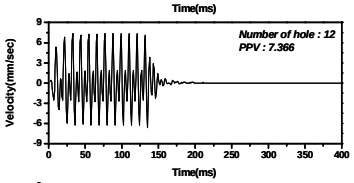


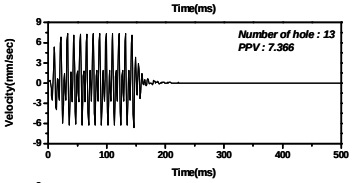


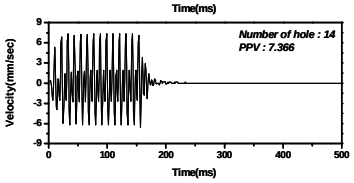


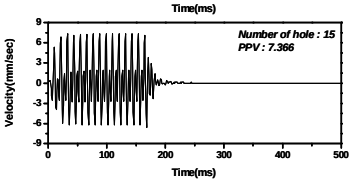




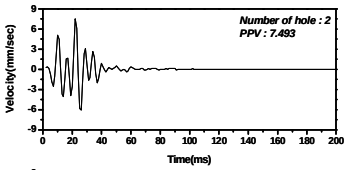


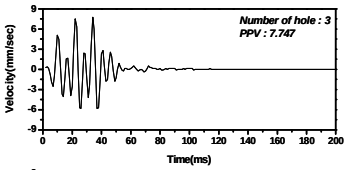


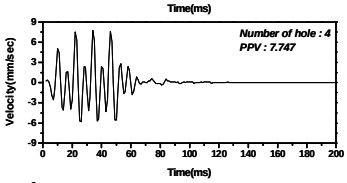


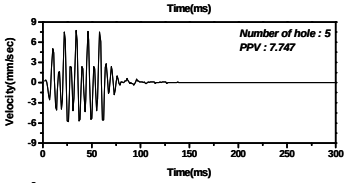


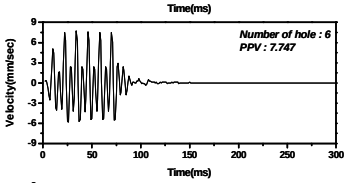
12ms Delay Interval

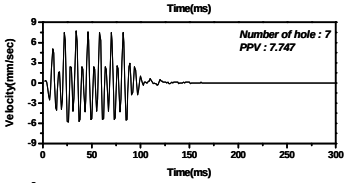


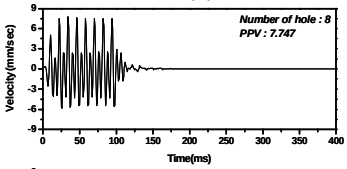


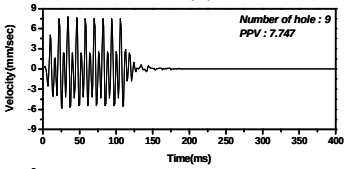


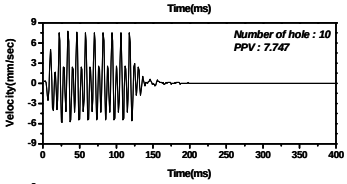


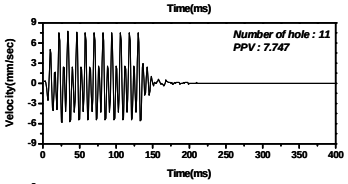


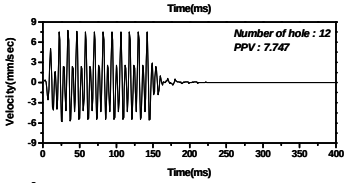


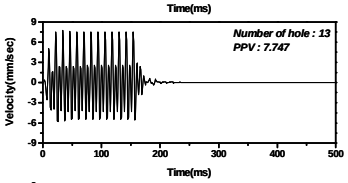


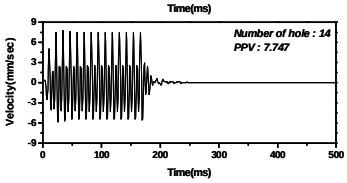


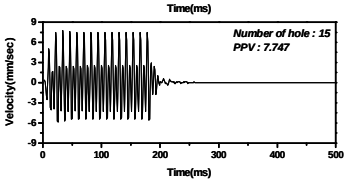




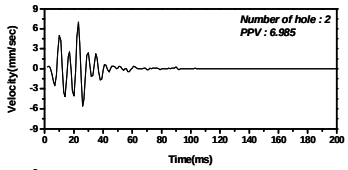


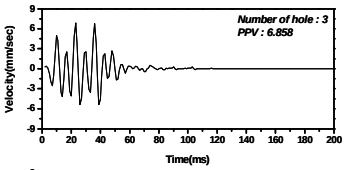


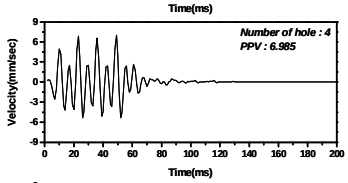


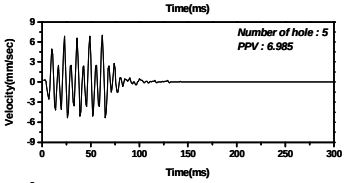


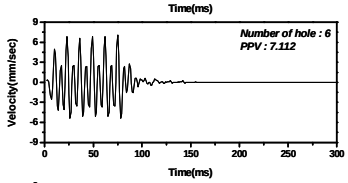
13ms Delay Interval

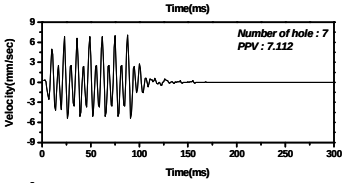


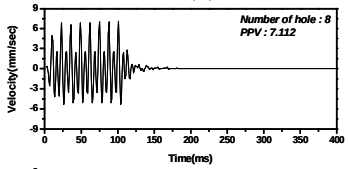


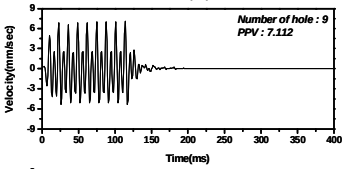


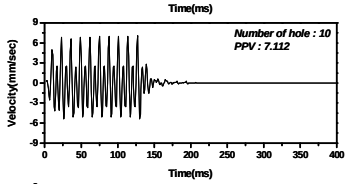


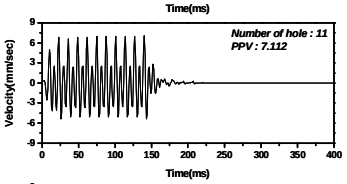


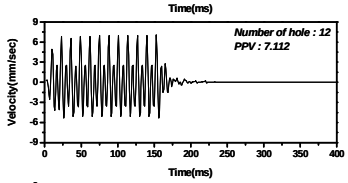


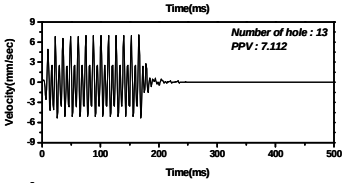


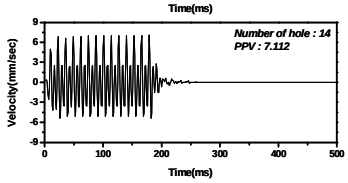


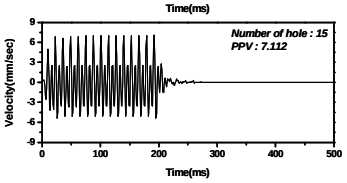




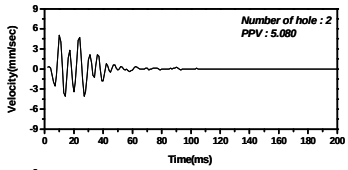


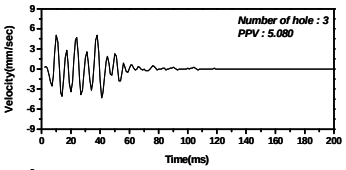


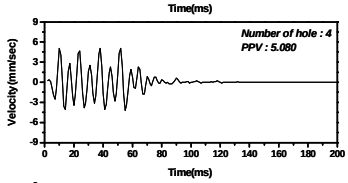


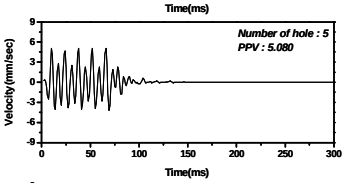


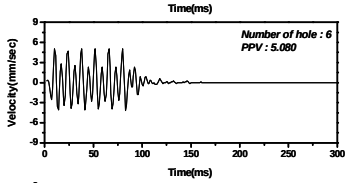
14ms Delay Interval

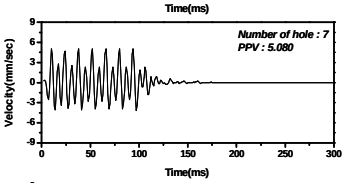


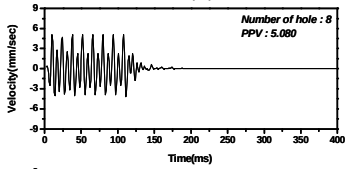


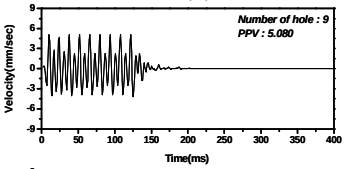


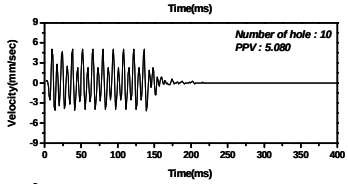


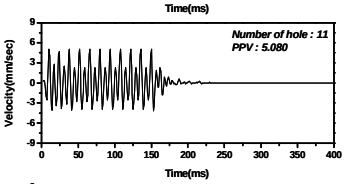


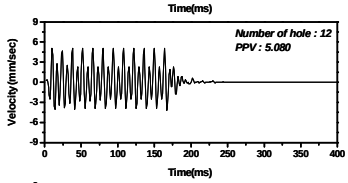


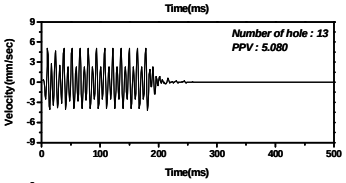


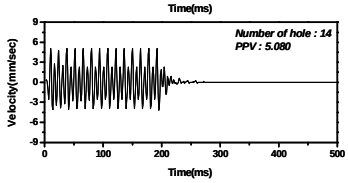


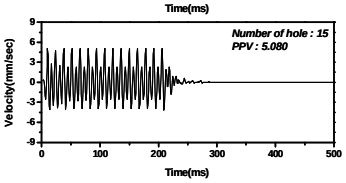




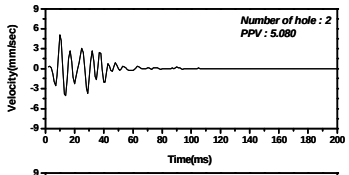


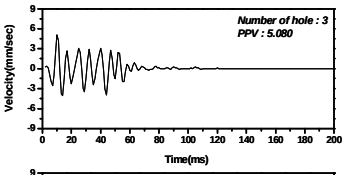


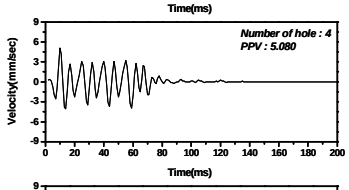


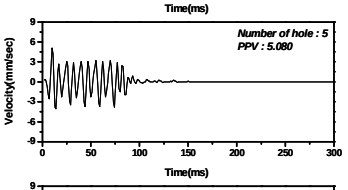


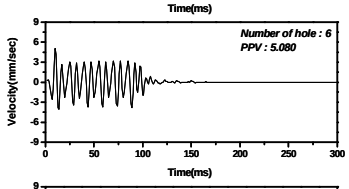
15ms Delay Interval

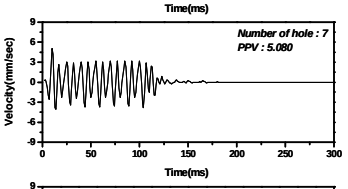


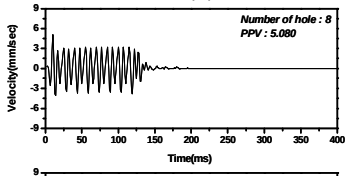


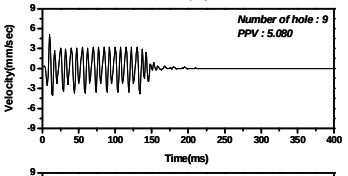


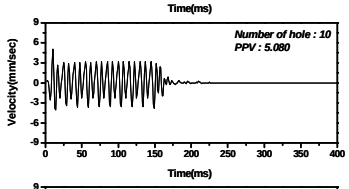


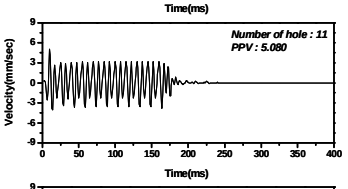


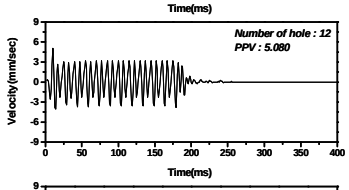


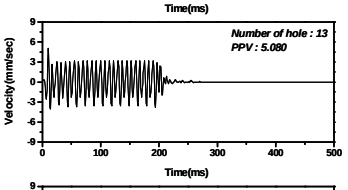


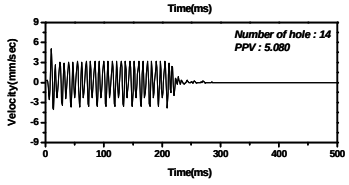


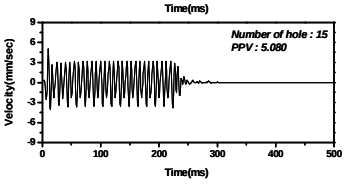




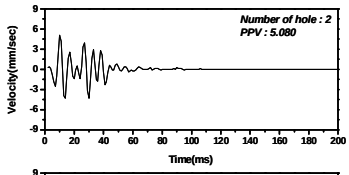


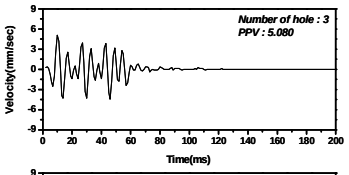


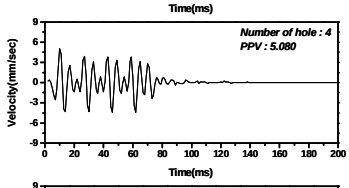


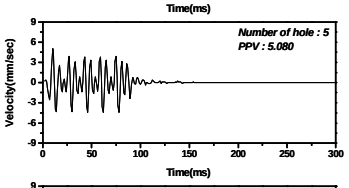


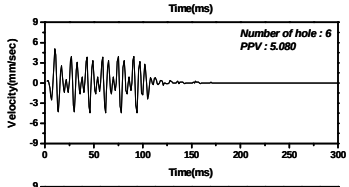
16ms Delay Interval

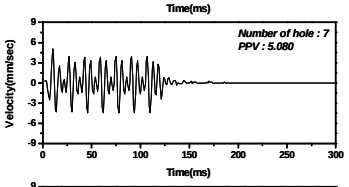


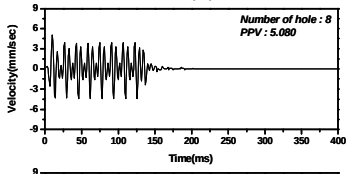


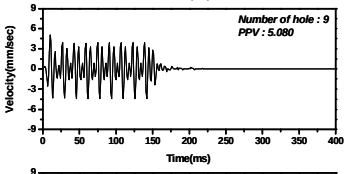


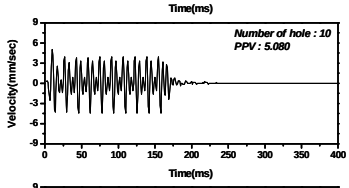


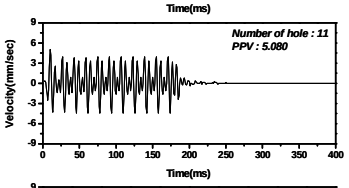


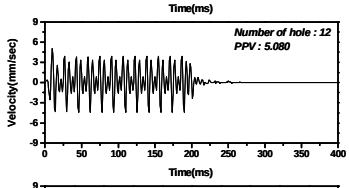


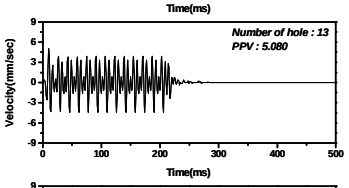


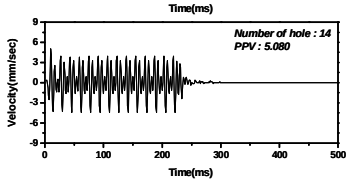


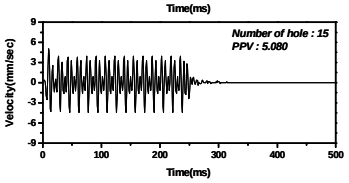




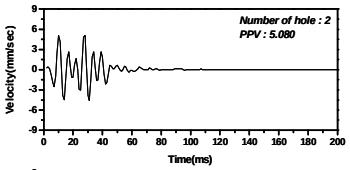


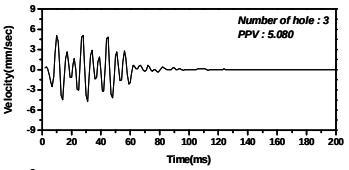


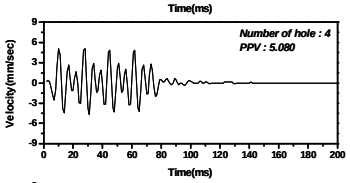


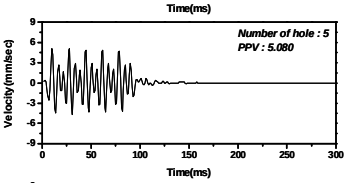


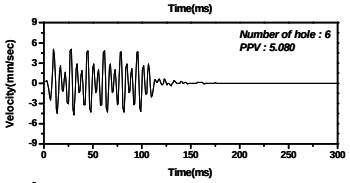
17ms Delay Interval

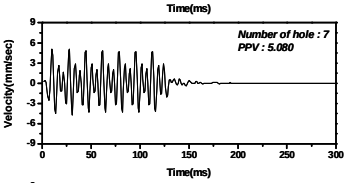


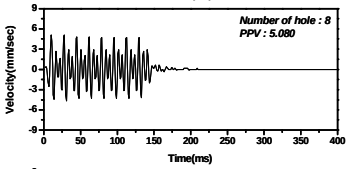


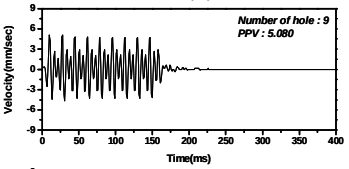


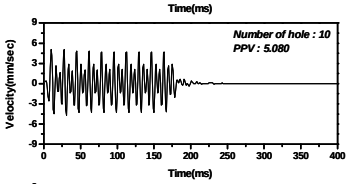


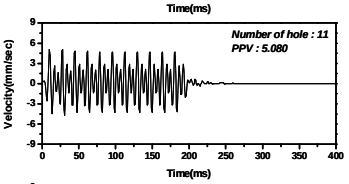


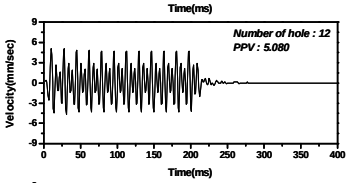


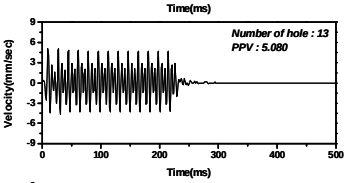


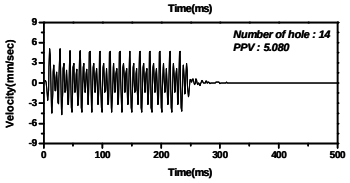


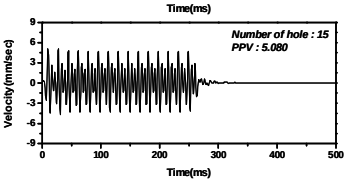




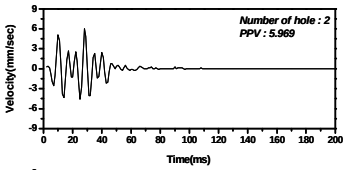


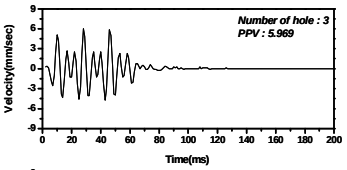


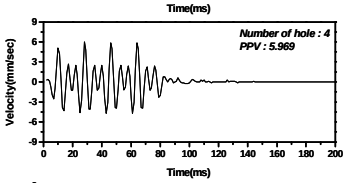


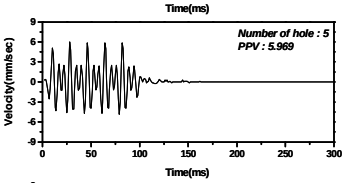


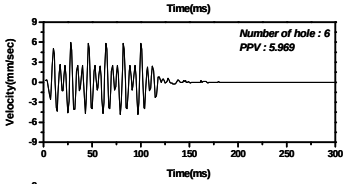
18ms Delay Interval

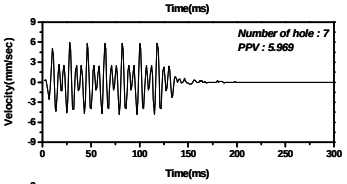


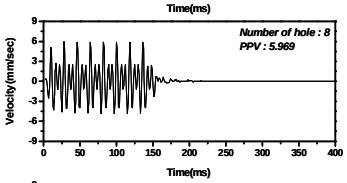


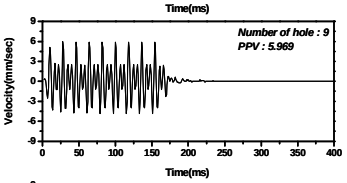


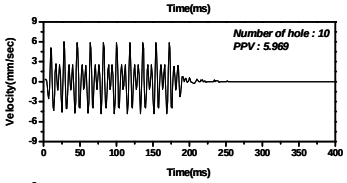


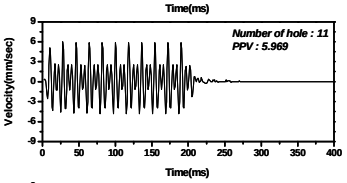


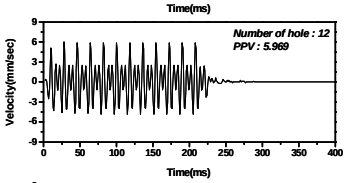


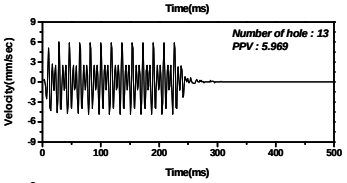


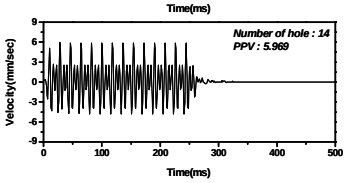


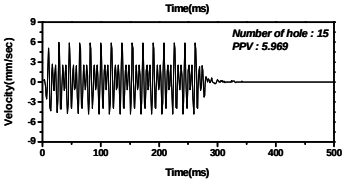




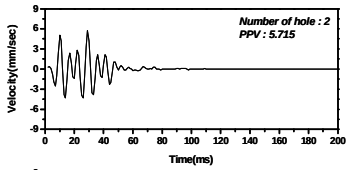


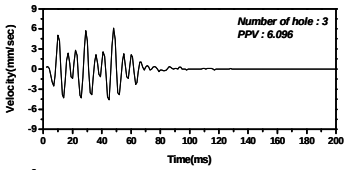


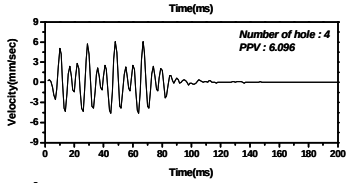


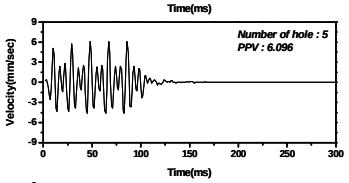


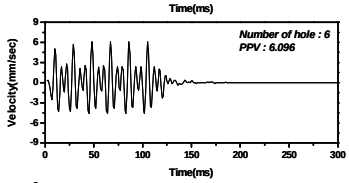
19ms Delay Interval

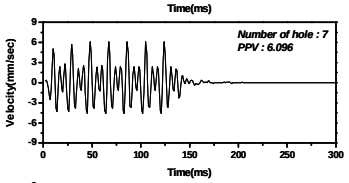


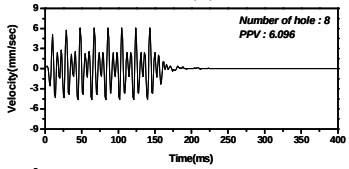


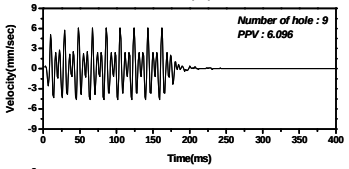


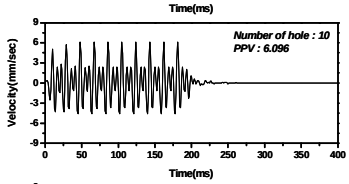


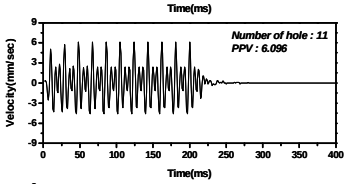


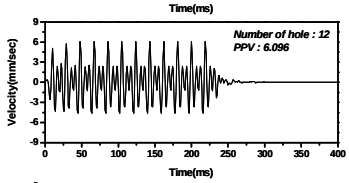


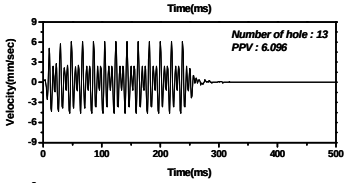


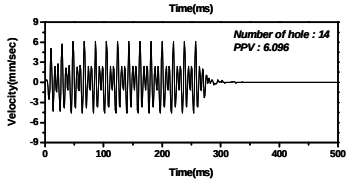


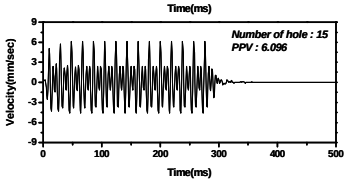




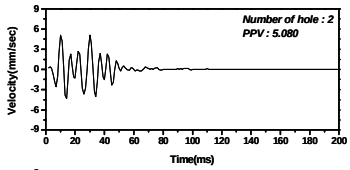


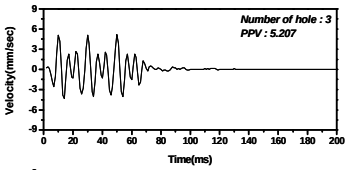


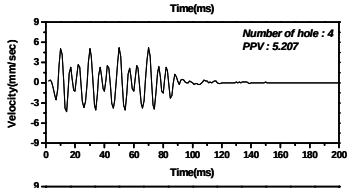


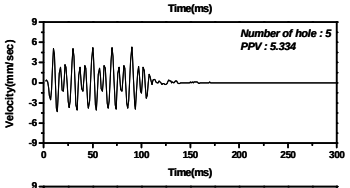


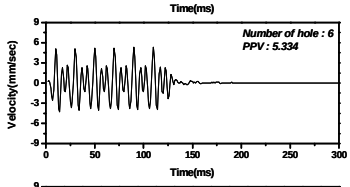
20ms Delay Interval

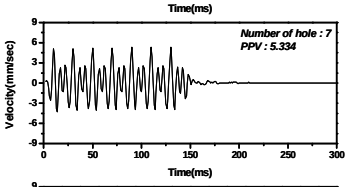


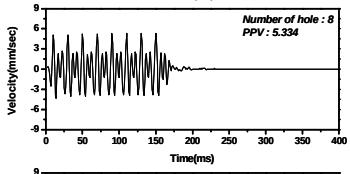


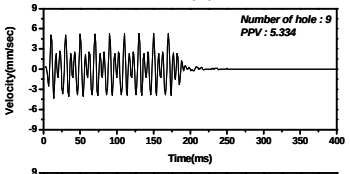


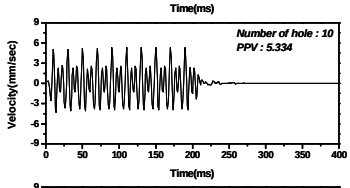


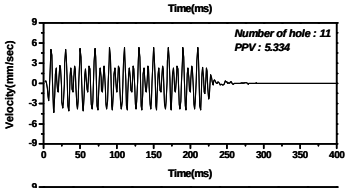


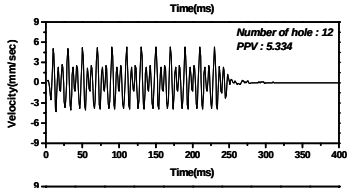


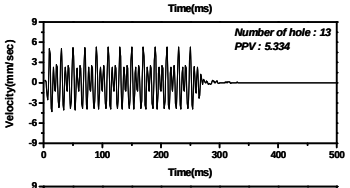


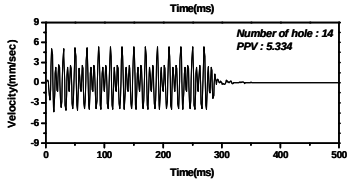


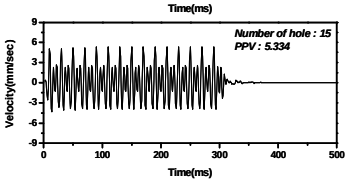




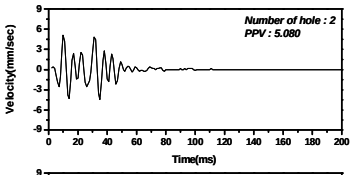


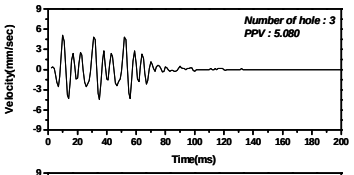


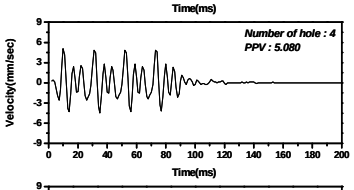


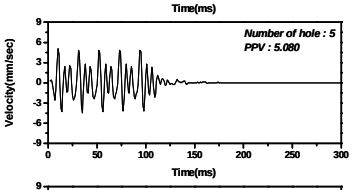


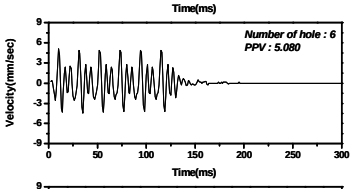
21ms Delay Interval

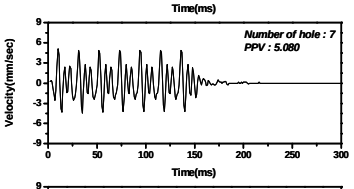


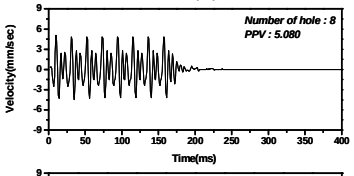


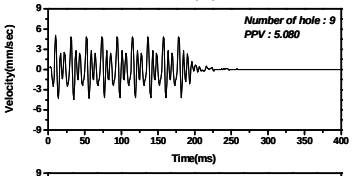


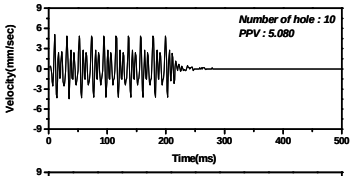


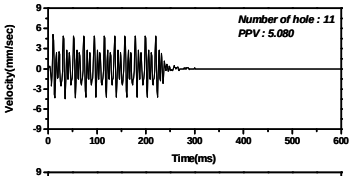


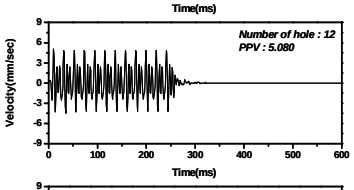


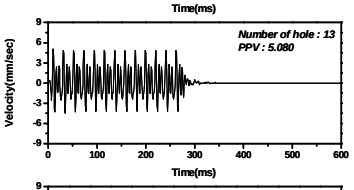


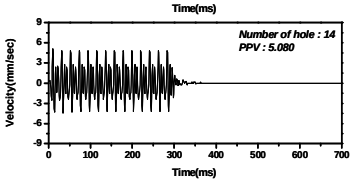


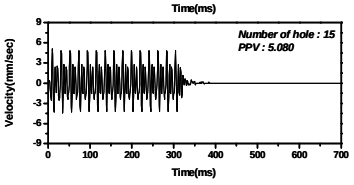




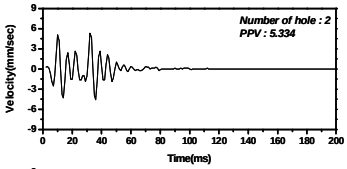


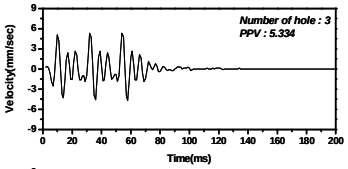


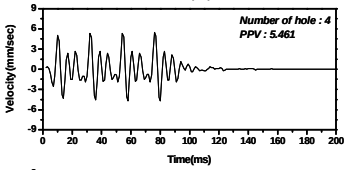


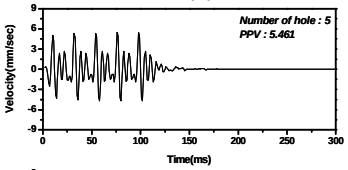


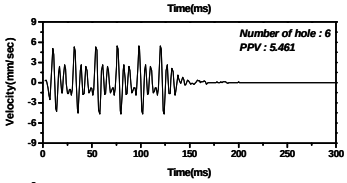
22ms Delay Interval

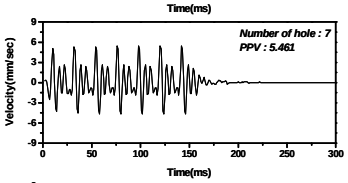


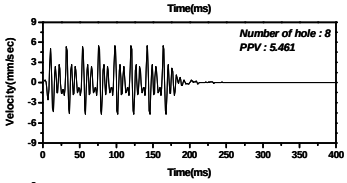


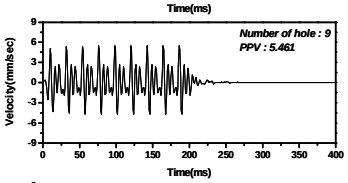


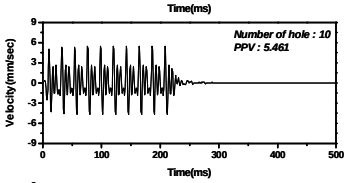


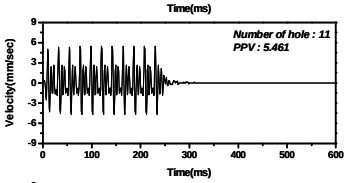


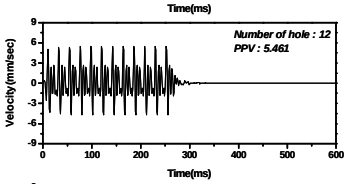


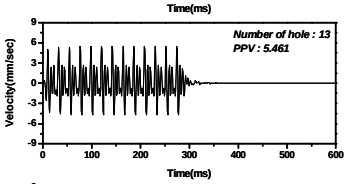


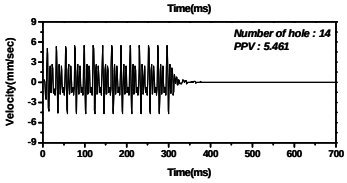


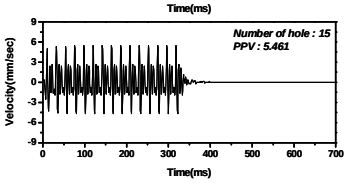




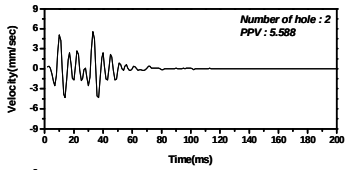


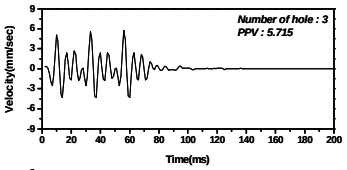


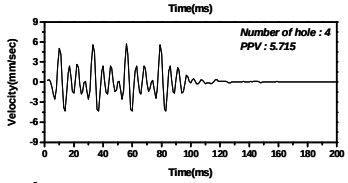


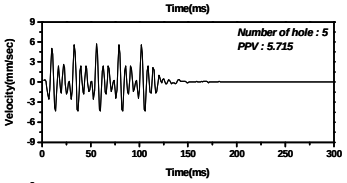


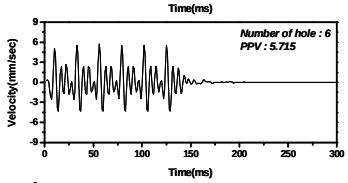
23ms Delay Interval

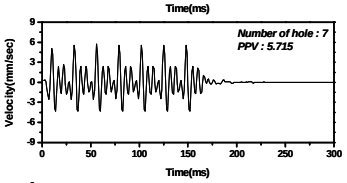


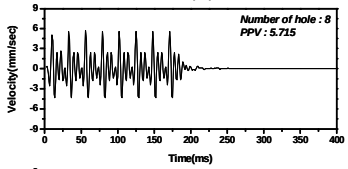


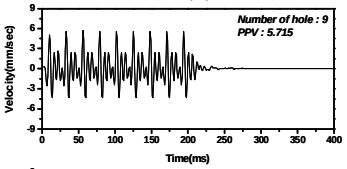


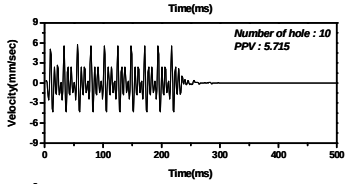


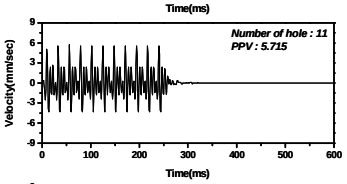


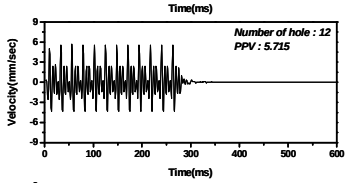


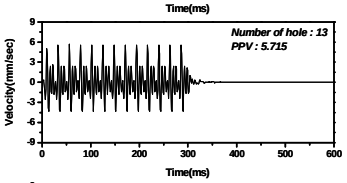


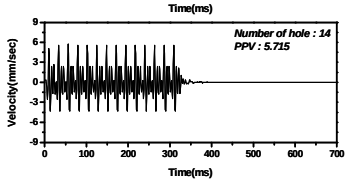


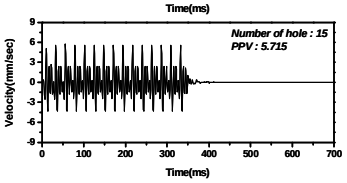




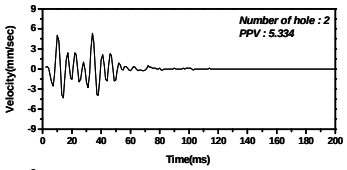


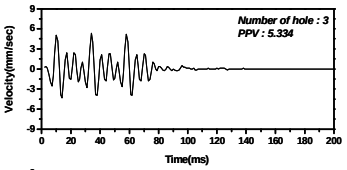


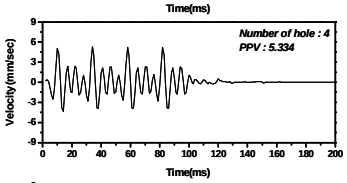


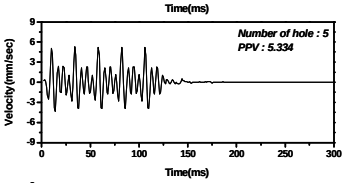


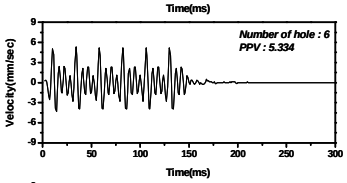
24ms Delay Interval

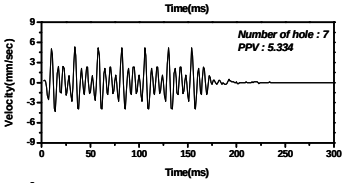


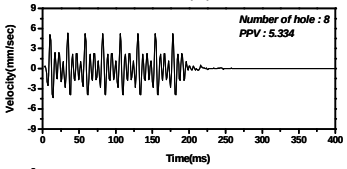


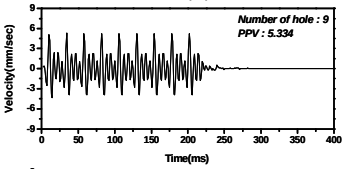


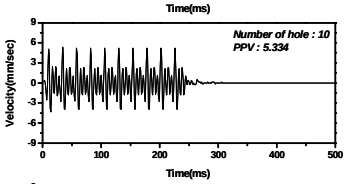


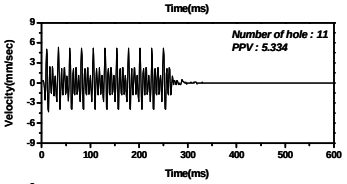


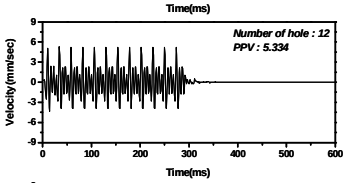


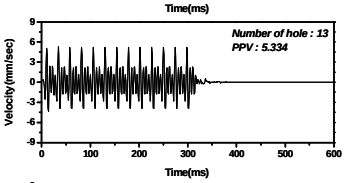


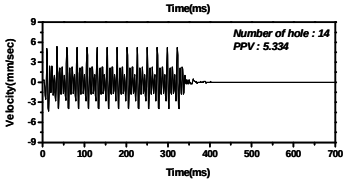


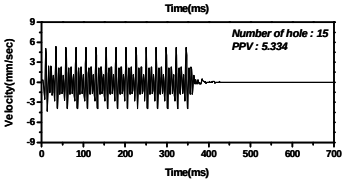




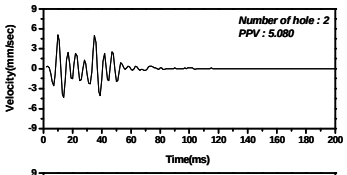


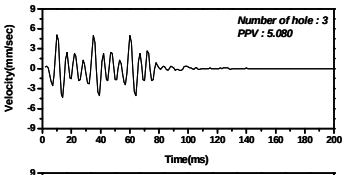


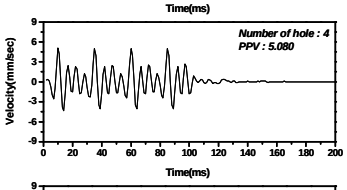


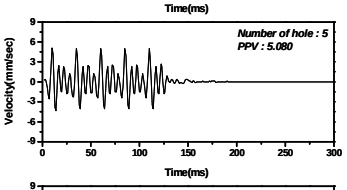


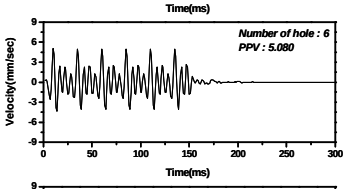
25ms Delay Interval

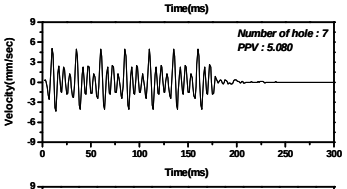


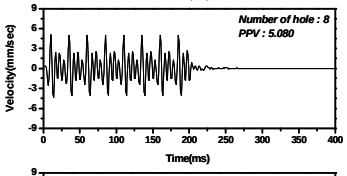


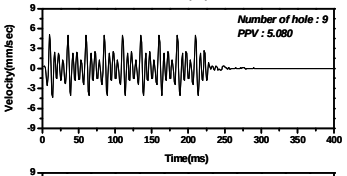


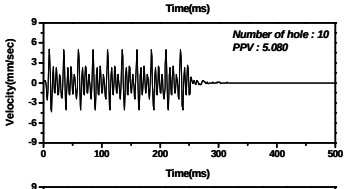


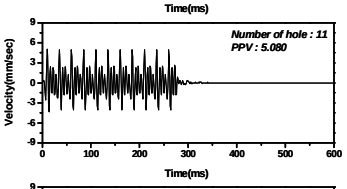


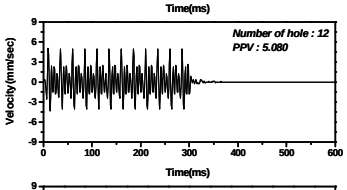


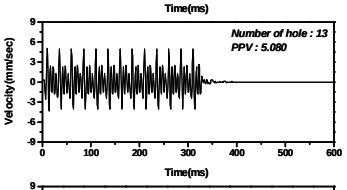


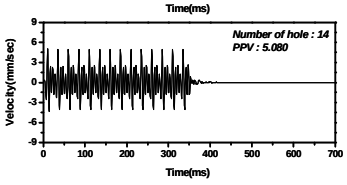


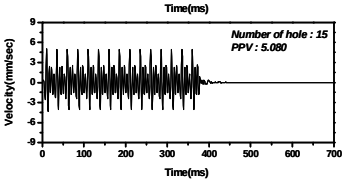




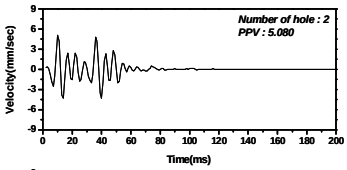


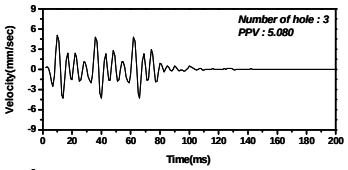


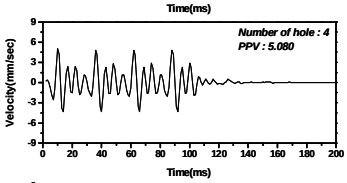


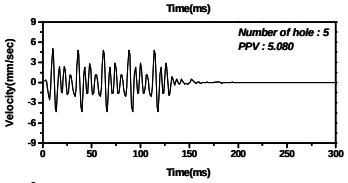


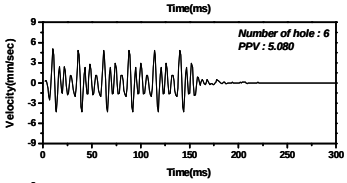
26ms Delay Interval

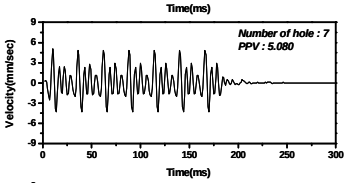


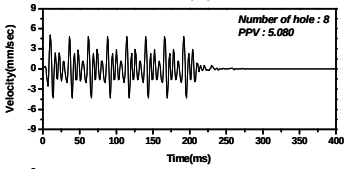


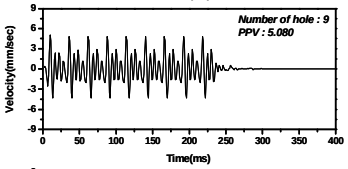


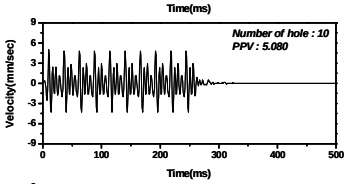


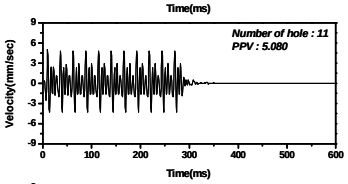


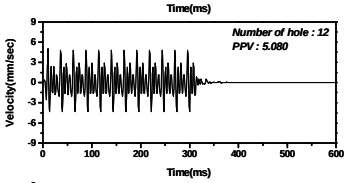


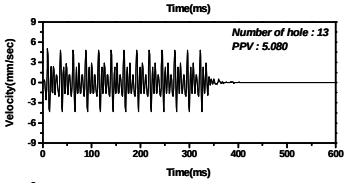


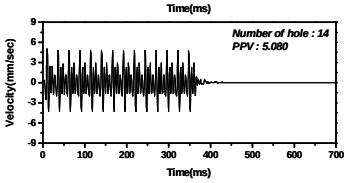


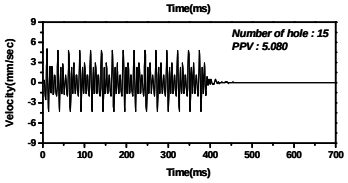




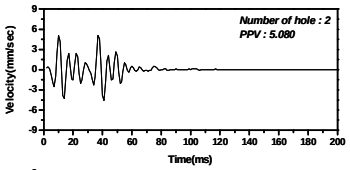


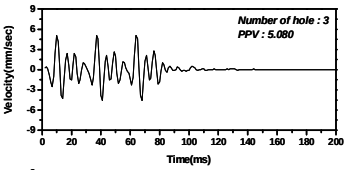


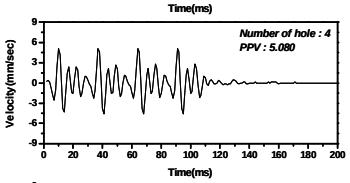


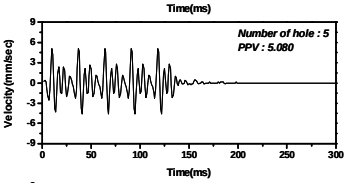


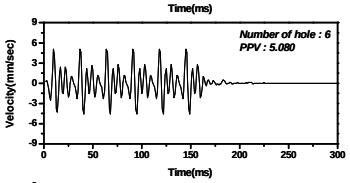
27ms Delay Interval

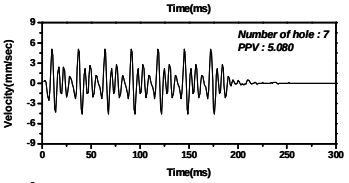


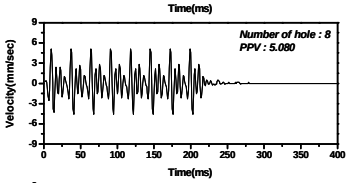


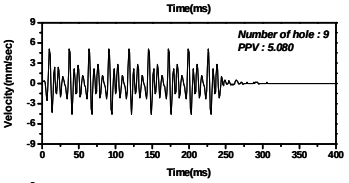


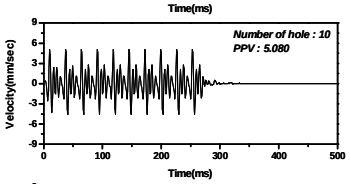


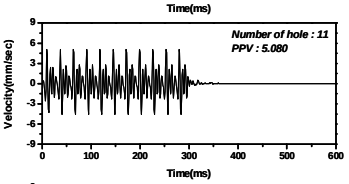


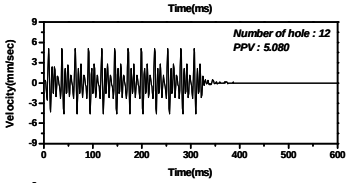


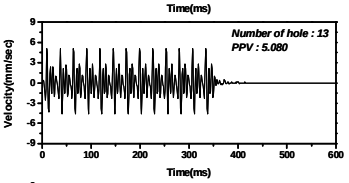


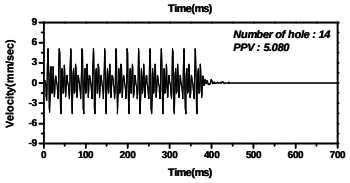


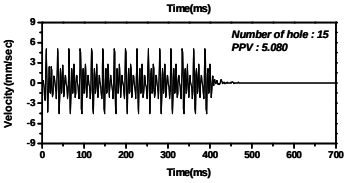




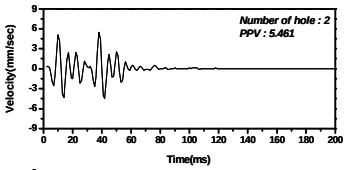


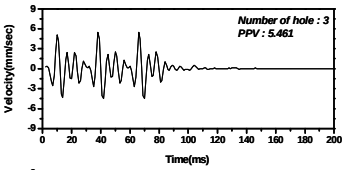


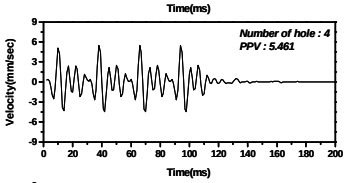


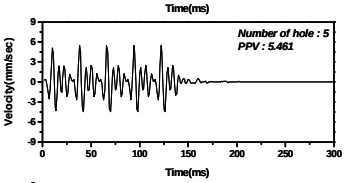


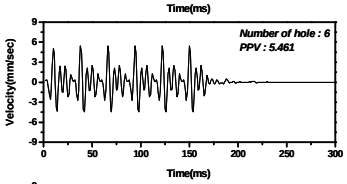
28ms Delay Interval

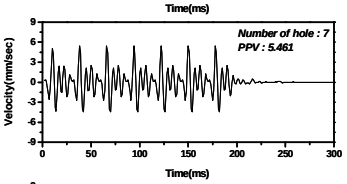


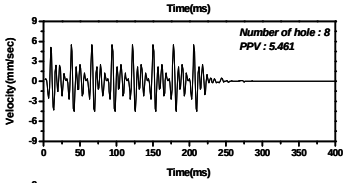


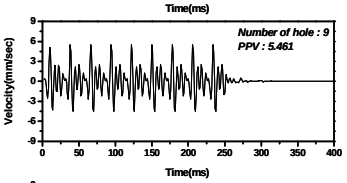


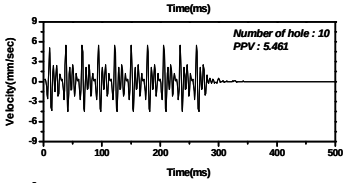


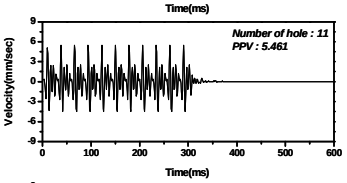


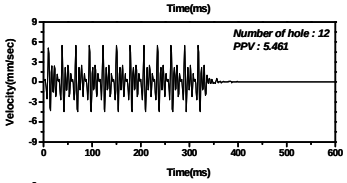


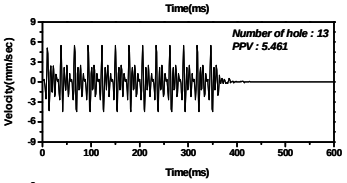


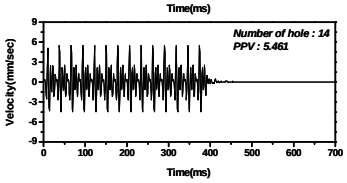


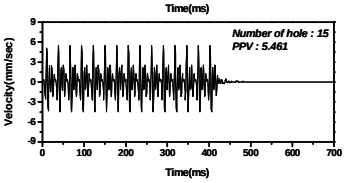




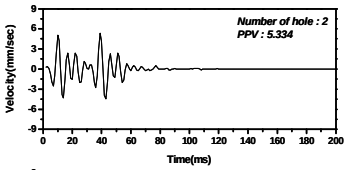


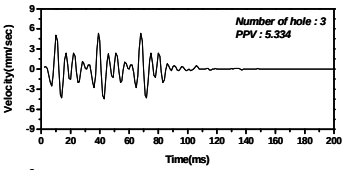


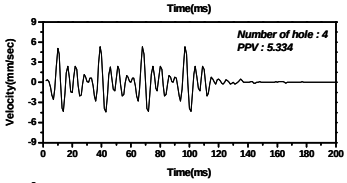


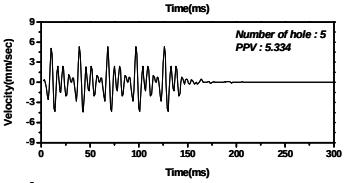


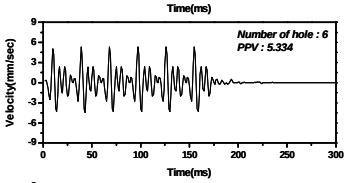
29ms Delay Interval

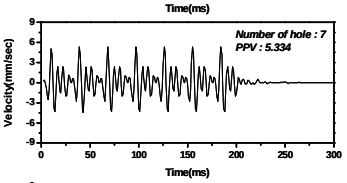


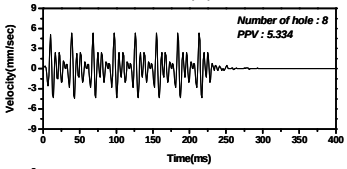


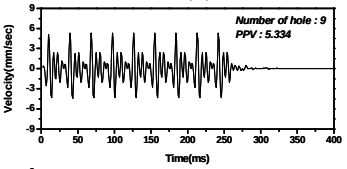


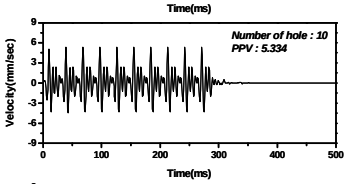


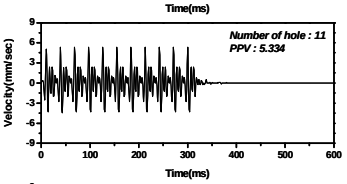


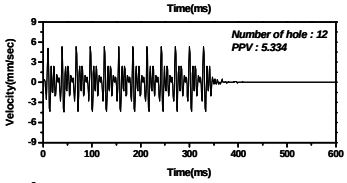


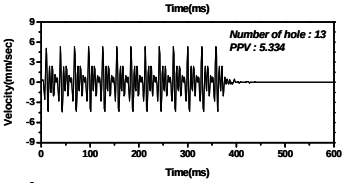


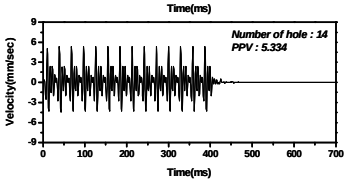


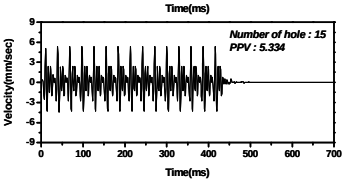
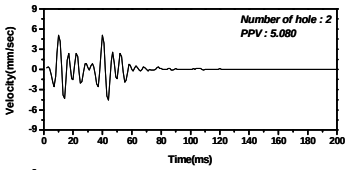
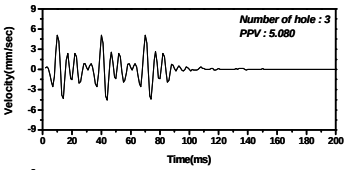
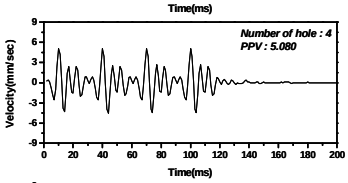
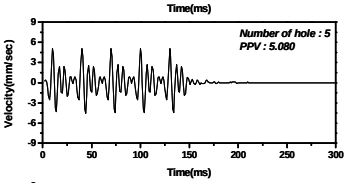
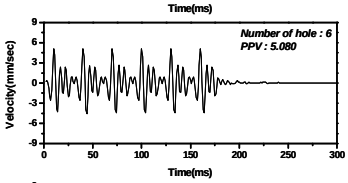
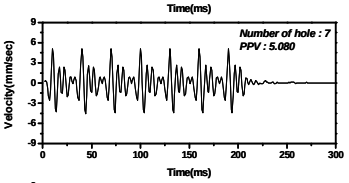
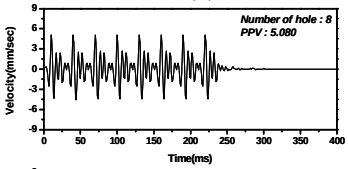
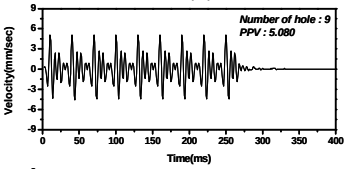
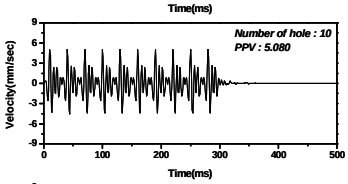
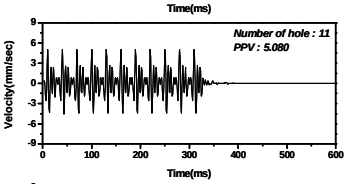
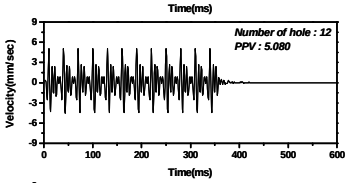
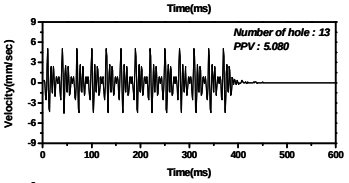
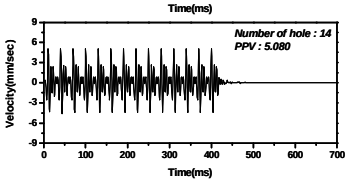
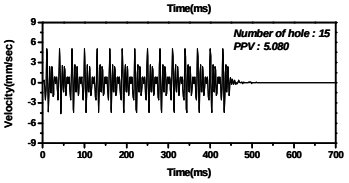












30ms Delay Interval