

2008년 2월

석사학위논문

중첩 모델링자료를 활용한  
발파 동해석 기법에 관한 연구

조선대학교 대학원

자원공학과

박 지 우

중첩 모델링자료를 활용한  
발파 동해석 기법에 관한 연구

- A Study on the Blasting Dynamic Analysis Using  
Superposition Modeling Data -

2008년 2월 25일

조선대학교 대학원

자 원 공 학 과

박 지 우

중첩 모델링자료를 활용한  
발파 동해석 기법에 관한 연구

지도교수 강 추 원

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2007년 10월

조선대학교 대학원

자원공학과

박 지 우

# 박지우의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 고진석 ㉠

위원 조선대학교 교수 박천영 ㉠

위원 조선대학교 교수 강추원 ㉠

2007년 11월

조선대학교 대학원

# - 목 차 -

List of Table .....	ii
List of Figures .....	iii
Abstract .....	v
1. 서론 .....	1
2. 연구지역 지질개요 .....	3
3. 발파진동이론 .....	5
3.1 진동의 기본용어 .....	5
3.2 진동량의 표현 .....	9
3.3 파동의 중첩과 간섭 .....	10
4. 발파진동 회귀분석 이론 .....	12
5. 시추공 시험발파 분석 .....	15
5.1 시추공 시험발파 위치 및 계측결과 .....	15
5.2 시추공 시험발파 회귀분석 .....	17
6. 단일공시험발파 .....	21
6.1 단일공 시험발파 조건 .....	21
6.2 단일공시험발파 파형 선정 및 분석 .....	23
6.3 단일공 파형 보정 및 중첩모델링 .....	34
7. 동적수치해석 .....	42
7.1 지반 Damping 계수 결정 .....	42
7.2 동적수치해석조건 .....	45
7.3 동적수치해석 적용파형 .....	47
7.4 동적수치해석 결과 .....	49
8. 결  론 .....	54

## -List of Tables-

Table 3.1	Vibration unit .....	9
Table 5.1	Test Blasting conditions and Measuring result .....	16
Table 6.1	Applied design parameter for some of the shots .....	21
Table 6.2	Detonators delay time and analysing delay interval of SN. 2 .....	29
Table 6.3	Detonators delay time and analysing delay interval of SN. 3 .....	31
Table 6.4	Prospect vibration velocity of each measuring point .....	37
Table 6.5	Delay interval for superposition modeling .....	39
Table 6.6	Measuring and Superposition result .....	40
Table 7.1	Measuring and dynamic analysis result of single hole waveform .....	43
Table 7.2	Measuring and dynamic analysis result of superposition waveform .....	43
Table 7.3	Measuring and dynamic analysis result of SN. 1 waveform .....	44
Table 7.4	Properties of in-suit rock mass .....	45
Table 7.5	Compare dynamic analysis result with superposition result .....	50
Table 7.6	Compare dynamic analysis result with measuring result .....	52

## -List of figures-

Figure 2.1 Geological map of study area .....	4
Figure 3.1 Harmonic oscillation .....	7
Figure 3.2 The size of sine wave vibration .....	8
Figure 3.3 Constructive interference .....	11
Figure 3.4 Destructive interference .....	11
Figure 5.1 Position of bore hole and measuring direction .....	15
Figure 5.2 Result of regression analysis on Vertical component .....	17
Figure 5.3 Result of regression analysis on Transverse component .....	18
Figure 5.4 Result of regression analysis on Longitudinal component .....	18
Figure 5.5 Relationship of PPV and Distance .....	19
Figure 6.1 Blasting Pattern .....	22
Figure 6.2 Firing times for a Pattern .....	22
Figure 6.3 Full waveform of longitudinal component .....	24
Figure 6.4 Single hole waveform of longitudinal component .....	24
Figure 6.5 Full waveform of vertical component .....	24
Figure 6.6 Single hole waveform of vertical component .....	25
Figure 6.7 Full waveform of transverse component .....	25
Figure 6.8 Single hole waveform of transverse component .....	25
Figure 6.9 Full waveform of longitudinal component .....	26
Figure 6.10 Single hole waveform of longitudinal component .....	26
Figure 6.11 Full waveform of vertical component .....	26
Figure 6.12 Single hole waveform of vertical component .....	27
Figure 6.13 Full waveform of transverse component .....	27
Figure 6.14 Single hole waveform of transverse component .....	27
Figure 6.15 Full waveform of longitudinal component .....	28
Figure 6.16 Full waveform of vertical component .....	28
Figure 6.17 Full waveform of transverse component .....	28
Figure 6.18 Superposition modeling result of longitudinal component (SN. 2) .....	30
Figure 6.19 Superposition modeling result of vertical component (SN. 2) .....	30
Figure 6.20 Superposition modeling result of transverse component (SN. 2) .....	30
Figure 6.21 Superposition modeling result of longitudinal component (SN. 3) .....	32
Figure 6.22 Superposition modeling result of vertical component (SN. 3) .....	32

Figure 6.23 Superposition modeling result of transverse component (SN. 3) ..... 32

Figure 6.24 Correcting method of waveform ..... 34

Figure 6.25 Compare each single hole of 60m and 150m ..... 35

Figure 6.26 Correcting result of longitudinal component ..... 36

Figure 6.27 Correcting result of vertical component ..... 36

Figure 6.28 Change of delay interval by geometrical arrangement of blast hole 38

Figure 6.29 Superposition and Measuring waveform of longitudinal component .... 40

Figure 6.30 Superposition waveform of longitudinal component after correcting ... 40

Figure 6.31 Superposition and Measuring waveform of vertical component .... 41

Figure 6.32 Superposition waveform of vertical component after correcting .... 41

Figure 7.1 Dynamic analysis model of in-suite rock mass ..... 45

Figure 7.2 Numerical model for dynamic analysis ..... 46

Figure 7.3 Superposition waveform of longitudinal component ..... 47

Figure 7.4 Superposition waveform of vertical component ..... 47

Figure 7.5 SN. 1 waveform of longitudinal component ..... 48

Figure 7.6 SN. 1 waveform of vertical component ..... 48

Figure 7.7 Longitudinal component waveform of 60m and 150m on the dynamic analysis used superposition modeling waveform ..... 50

Figure 7.8 Vertical component waveform of 60m and 150m on the dynamic analysis used superposition modeling waveform ..... 50

Figure 7.9 X-velocity distribution on the dynamic analysis used superposition modeling waveform ..... 51

Figure 7.10 Y-velocity distribution on the dynamic analysis used superposition modeling waveform ..... 51

Figure 7.11 Longitudinal component waveform of 60m and 150m on the dynamic analysis used SN. 1 waveform ..... 52

Figure 7.12 Vertical component waveform of 60m and 150m on the dynamic analysis used SN. 1 waveform ..... 52

Figure 7.13 X-component velocity distribution on the dynamic analysis used SN. 1 waveform ..... 53

Figure 7.14 Y-component velocity distribution on the dynamic analysis used SN. 1 waveform ..... 53



# Abstract

## A Study on the Blasting Dynamic Analysis Using Superposition Modeling Data

Park, ji-woo

Advisor : Prof Kang, Choo won

Department of resource engineering,

Graduate School of Chosun University

Since blast-induced vibration may cause serious problem to the rock mass as well as the nearby structures, the prediction of blast-induced vibration and the stability evaluation must be performed before blasting activities.

Dynamic analysis has been increased recently in order to analyze the effect of the blast-induced vibration. Most of previous studies, dynamic analysis has been performed by using measurement vibration waveform which is measured by bore hole blasting or test blasting.

The waveform made by bore hole blasting has the similar vibration level and duration to those the waveform of sing hole has. However, there can be a little difference in attenuation characteristics with the blast induced vibration waveform in the field.

Measurement vibration waveform measured by bore hole blasting has a weak point that it should be preceded by real scale blasting in construction process.

Through the superposition modeling of single hole waveform, I obtained the vibration waveform on the blasting condition changes and conducted dynamic analysis using this waveform in this study. The outcome from this study can be exercised in design process for data for evaluating the computed damage ranges in nearby rock mass or construction caused by blasting methods.

# 1. 서론

최근 인구가 밀집한 지역에 지하철 건설공사, 도시재개발 사업, 각종 터널공사 등이 수행되면서 발파를 이용한 암반굴착 작업이 증가하고 있고 이에 따라 필수적으로 수반되는 진동, 소음 등의 발파공해에 대한 민원문제 역시 급증하고 있다. 따라서 안전성은 발파설계의 가장 우선적인 기준으로 대두되고 있다. 따라서 도심지 발파와 같이 인체나 기존 구조물에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 발파 작업시에는 발파진동의 영향성 평가 작업이 필수적으로 선행되어야 한다.<sup>2)3)</sup>

발파진동의 영향성 평가 작업은 발파진동추정식을 통한 방법과 현장조건을 모사한 연속체 또는 불연속체 동적수치해석법으로 구분할 수 있다.

최근 발파진동의 예측기법 중 단일공 파형의 중첩모델링을 통해 획득한 발파진동 추정식을 이용한 발파진동의 영향성 평가 작업에 관한 연구가 실시되고 있고<sup>4)5)</sup> 다양한 동적수치해석기법이 연구되면서 설계단계에서 발파에 대한 영향을 사전에 검토하여 현장여건에 적합한 발파공법을 산정하는데 많은 도움을 주고 있다.

연속체 또는 불연속체 동적수치해석법을 통한 발파진동의 영향성 평가 작업을 수행하는데 있어서 가장 중요한 항목은 발파하중 산정법이다. 일반적으로 발파현상을 모사하기 위한 수치해석은 프로그램 내에서 발파현상을 모사할 수 없으므로 모델 경계면에 발파하중을 가하는 형태로 수행되어 왔다. 이러한 발파하중은 이론적인 계산식 및 경험식에 의하여 추정된 압력치를 사용하고 있으며, 주로 단일공 발파를 기준으로 제안되었고 시간에 따른 발파압력곡선은 간단한 정현파의 형태를 갖는 것으로 간주되었다.<sup>11)12)</sup>

터널이나 비탈면 발파 해석의 경우 굴착예정선인 터널 주변장에 등가의 압력을 가하는 것으로 해석을 수행하고 있으나 다수의 공을 발파하는 터널이나 비탈면 발파를 해석하는데 있어서 단일공 수준의 발파하중만을 작용시킨다는 것은 많은 문제점이 있다. 실제 발파작업에서 발파공수의 변화와 지발 시차는 발파진동에 큰 영향을 미치는 요소이기 때문이다.<sup>6)</sup>

이러한 이유로 최근 시추공 발파나 시험발파 등의 실측진동파형을 활용한 동해석 기법이 연구되면서 발파현상을 보다 현장 지질조건이나 발파조건에 맞게 사실적으로 모사하고 있다.<sup>7)8)9)</sup>

시추공발파를 활용한 발파동해석기법은 현장의 지질조건을 잘 반영하고 실제 발파에서 화약력이 암반에 작용하는 크기만큼의 하중을 작용시킨다는 장점이 있으나 이 또한 단일공 수준의 해석을 수행한다는 면에서 발파하중을 이용한 방법과 같은 단점을 가지고 있다.

또한 시험발파 실측파형을 이용한 발파동해석기법의 경우 실규모의 시험 발파가 먼저 이루어져야 하기 때문에 설계단계에서 발파에 의한 영향을 검토하는데 어려움이 있다.

발파진동은 지반조건뿐만 아니라 발파조건에 따라 진동 수준이 변화된다. 특히 발파조건 중 발파공수의 증가는 최대진동속도는 물론 거리에 따른 진동의 감쇠특성에도 영향을 미친다. 이는 발파공수가 증가할수록 각 공에서 발생한 파형들간의 상호간섭 효과에 의해 진동을 발생시키는 유효장약량이 변화되고 진동지속시간이 길어지기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 설계단계에서 실시한 시추공 시험발파 자료의 회귀분석을 통해 현지 암반에 적합한 진동추정식을 산출함으로써 발파진동의 거리별 감쇠특성을 파악하였고 이를 근거로 특정거리에서 측정된 발파진동파형을 발파가 이루어진 지점의 파형으로 적절히 변환시켰다.

이와 같이 획득한 발파지점에서의 단일공 파형을 중첩모델링을 통해 발파공수 증가와 지연시차에 따른 진동파형으로 변환시켜 최대진동속도를 예측함과 동시에 실규모 발파를 실시했을 때와 동일한 진동 지속시간을 가지는 진동파형을 생성하고 이를 발파하중으로 작용시키는 동적수치해석법에 대해 연구하였다.

## 2. 연구지역 지질개요

본 연구지역은 무안군 일로읍 청호리에 위치한 곳으로서 무안군과 영암군을 가르는 영산강이 북에서 남서로 흘러 서해로 유입되며 은적산능에서 발원하는 계류들이 서쪽으로 흘러 영산호로 유입되는 지형이다.

영산강의 북서 방향으로는 해발 155m 고지를 최고봉으로 남서로 망모산(해발 142m)으로 이어지는 완만한 산능과 남동측 강변을 따라 해발 50m 이하의 낮은 구릉이 분포하고 있으며, 남동 방향으로는 해발 395m의 상은적산으로부터 북으로 하은적산으로 이어지는 높은 산능이 발달되었으며 이들 산능에서 분리하는 동서방향의 소능선들이 낮은 구릉지를 형성하고 있다.

지질특성은 기반암의 경우 중생대 백악기 유천층군으로서 관입 분출된 화산암류인 유문암과 유문암질 응회암, 응회암으로 구성되어 있으며 이들은 상호 접이적인 관계로 유문암내 쌓인 응회암이 불규칙하게 함유되기도 하며 유문암은 절리의 발달 상태가 적은 상태로 전반적으로 괴상을 보인다. 유문암질 응회암은 산성용암이 분출할 때 화산재나 화산각력들이 용암과 함께 고결된 것으로 응회질의 함량이 다양하다. 유문암의 경우 담황색, 암회색, flow banded Rhyolite로 구성되어있으며, 유문암질 응회암의 경우 회녹색, 담회색을 띠고 있다. 응회암의 경우 녹회색, 화산쇄설각력암, 라필리응회암으로 구성되어있다. 충적층은 신생대 제4기 봉적층 및 충적층으로 구성되어 있다.

연구지역에 분포하는 불연속면의 분포특성은 절리의 경우 N35E 및 N55W방향의 절리가 우세한 것으로 조사되었으며, 단층은 대략 6개 정도가 분포하고 있고 그 방향성은 N10E, N42E, N88E, N67W, N85E, N87E로 조사되었다.

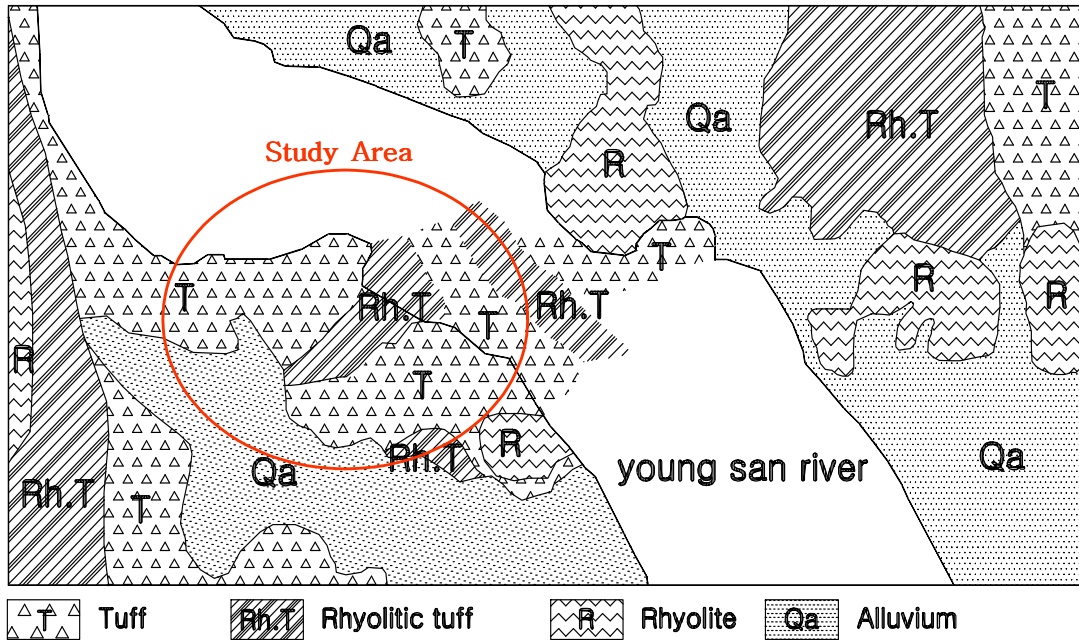


Figure 2.1 Geological map of study area

### 3. 발파진동이론

진동이란 구조물이나 지반 등이 동적인 외력의 영향을 받아 운동적 평형위치로부터 시간의 경과와 함께 반복위치가 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.

#### 3.1 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  $\pm X$ 의 사이에서 반복운동을 되풀이하는 경우를 고려해 보자. 어떤 시간  $t$ 에 있어서 점 A의 위치  $X$ 가 시간적으로 정현 변화한다고 가정하면  $x$ 의 관계를 다음 식(3.1)으로 표현된다.

$$x = X \sin(\omega t + \phi) \quad (3.1)$$

여기서  $x$ 는 변위,  $X$ 는 평형위치로부터의 최대변위를 나타내며 변위진폭이라 부른다. 또한  $\omega$ (rad/sec)는 각속도이고,  $\phi$ (rad)는 위상각이라 부른다.

식(3.1)로 나타낸 진동은 정현진동 또는 조화진동이라 부르며 일정한 시간적변동을 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(3.2)의 관계가 있다.

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.2)$$

전술의 정현진동의 경우 어느 시간  $t_1$ 으로부터  $2\pi/w$ 만 경과하면 변위  $x$ 는 식(2.3)으로 되며 시간  $t_1$ 의 변위는 완전히 동일한 위치에 되돌아오기 때문에 주기(T)는 식(3.4)로 되고 또 진동수(f)는 식(3.5)로 된다.

$$x = X\sin[w(t_1 + \frac{2\pi}{w}) + \phi] \quad (3.3)$$

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

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

$$T = \frac{2\pi}{w} \quad (3.4)$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{w}{2\pi} \quad (3.5)$$

따라서  $w$ 는  $2\pi$ 시간 사이에  $x$ 가 몇 회 동일한 상태로 되돌아가는가를 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  $v$ 는 변위  $x$ 를  $t$ 로 미분해서 얻어진다. 정현진동의 경우는 식(3.1)에 의해 식(3.6)과 같이 된다.

$$v = \frac{dx}{dt} = wX\cos(\omega t + \phi) = wX\sin(\omega t + \phi + \frac{\pi}{2}) \quad (3.6)$$

$wX$ 는 이때의 최대치로 속도 진폭이라 부른다. 또 가속도  $a$ 는 속도  $v$ 를 시간  $t$ 로 미분하여 얻어지는데 식(3.6)에 의해 식(3.7)과 같이 되며  $w^2X$ 는 가속도 진폭이라 부른다.

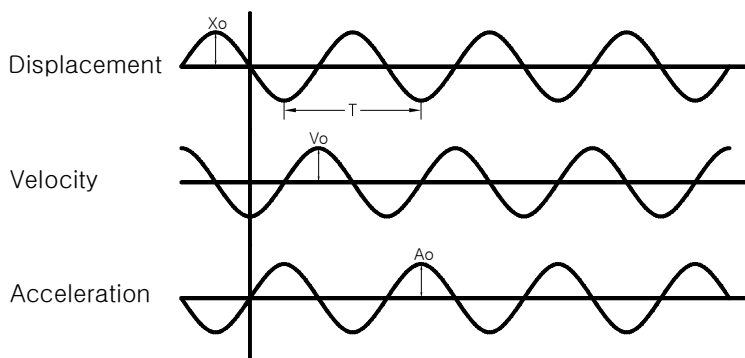
$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{dv}{dt} = -w^2X\sin(\omega t + \phi) \\ &= w^2X\sin(\omega t + \phi + \pi) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Figure 3.1은 정현진동의 경우 변위, 속도 및 가속도의 파형을 나타낸다. 위상각  $\phi$ 는 0의 경우이다. Figure 3.1에서 알 수 있듯이 속도의 파형은 변위의 파형에 비해  $90^\circ$  진행해 있다. 이것을 위상이  $90^\circ$  나아갔다고 한다. 이것은 식(3.1)과 식(3.6)에 명확히 나타나 있다. 마찬가지로 가속도의 위상은 속도의 위상보다  $90^\circ$  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, 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  $P_e$ 는 식(3.8)과 같다.

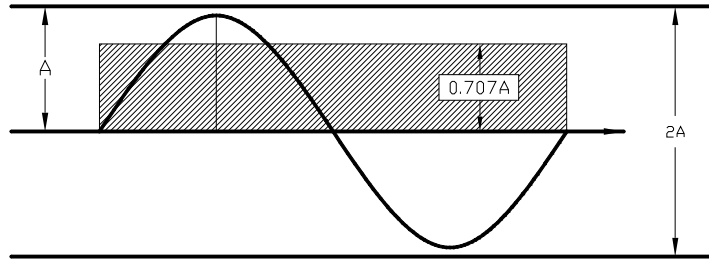
$$\begin{aligned}
 P_e &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [X \sin(\omega t + \phi)]^2 dt} & (3.8) \\
 &= \sqrt{\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi} [X \sin(\omega t + \phi)]^2 dt} \\
 &= \frac{X}{\sqrt{2}} \cong 0.707X
 \end{aligned}$$



$X_0$  : Displacement amplitude(cm)       $T$  : Period  
 $V_0$  : Velocity amplitude(cm/s)       $f$  : Frequency =  $1/T$   
 $A_0$  : Acceleration amplitude( $cm/s^2$ )

Figure 3.1 Harmonic oscillation





peak value(0 to peak) = A  
 virtual value(r.m.s) = 0.707A  
 P-P value(peak to peak) = 2A

Figure 3.2 The size of sine wave vibration

주기적이 아닌 경우는 식(3.8)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 3.2의 사선부분)이다.

진동의 크기를 나타낼 경우 Peak(0 to Peak)나 실효치 외에 P-P치(Peak to Peak)가 있으며 Figure 3.2에 정현진동의 경우 그들 관계를 나타낸 것이다. 이들은 변위, 속도, 가속도의 어느 것에 대해서도 같은 관계가 된다.

### 3.2 진동량의 표현

진동의 강도 또는 크기는 지금까지 서술한 바와 같이 변위, 속도, 가속도로 나타내고 그 단위로 변위는 cm, 속도는 cm/sec, 가속도는 cm/sec<sup>2</sup>(gal)등이 사용되고 있으나 취급하는 진동의 크기에 따라 편의상 Table 3.1에 나타내는 각종 단위들도 사용된다.

Table 3.1 Vibration unit

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

정현진동의 경우 식(3.1), (3.6), (3.7)에서 알 수 있는 바와 같이 변위, 속도, 가속도 각각의 진폭과 진동수와의 사이에는 식(3.9), (3.10)과 같은 관계가 있다.

$$\text{속도진폭 } V = wX = 2\pi fX \quad (3.9)$$

$$\text{가속도진폭 } A = wV = w^2X = (2\pi f)^2X \quad (3.10)$$

따라서 변위, 속도, 가속도의 각 진폭을 상호 환산할 수 있다.

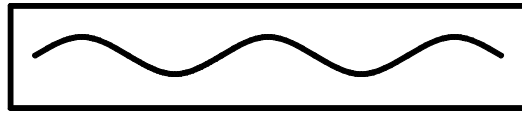
### 3.3 파동의 중첩과 간섭

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 파동이 파괴되거나 변화되지 않고 서로 통과 할 수 있다는 것이다. 예로써 돌 두개를 연못에 던질 때, 퍼져 나가는 원형파동은 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 3.3(a)과 Figure 3.3(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 3.3(c)과 같은 형태를 갖게 될 것이다. 예를 들어 이들 파동은 진폭이 1m인 수면파라고 가정해보자. 마루가 마루를 만나고 골이 골을 만나도록 중첩하는 순간, 그 결과 생기는 파동은 2m의 진폭을 가진다. 이와 같은 경우의 파동은 위상이 같다고 하고 보강 간섭(constructive interference)을 일으킨다고 한다.

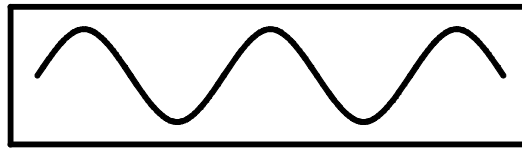
반면, Figure 3.4(a)와 Figure 3.4(b)는 두개의 유사한 파동을 보여주지만 한 파동의 마루가 다른 파동의 골과 일치한다. 즉, 한 파동은 다른 파동과 역으로 관련되어 있으며, 그 결과 생기는 파동은 Figure 3.4(c)와 같이 완전히 상쇄된 상태를 보인다. 이들이 함께 진행하는 수면파라고 하면, 두 파동 중의 한 파동은 물방울을 위로 당기려 하며, 같은 순간 다른 파동은 아래로 당기려 한다. 이러한 상황에서는 두 파동은  $180^\circ$  위상이 어긋났다고 하며 상쇄 간섭(destructive interference)을 일으킨다고 한다.



(a)



(b)



(c)

Figure 3.3 Constructive interference



(a)



(b)



(c)

Figure 3.4 Destructive interference

## 4. 발파진동 회귀분석 이론

발파진동을 예측할 수 있는 식을 구하기 위하여 대상 현장에서의 계측자료가 필요하다. 일반적으로 진동 감쇠식의 각 상수들은 지역적 특성 및 암반의 특성, 발파조건 등에 따라 달리 나타나게 된다.

발파진동의 크기 즉 속도성분을 표시하는 방법은 국가별, 학자별로 조금씩 다르게 제시하므로 아직은 이론적 전개가 완전하다고 보기 어렵지만 현재 국내외적으로 가장 많이 적용하고 있는 경험식으로는 미광무국(USBM)에서 발표한 발파진동 추정식<sup>14)</sup>이며 아래와 같다.

$$V = K \left( \frac{D}{W^b} \right)^n \quad (4.1)$$

여기서 V : 발파 진동속도(cm/sec)

D : 폭원으로부터의 거리(m)

W : 지발당 장약량(kg/delay)

K : 자유면의 상태, 화약의 종류, 암질 등에 대한 상수

b : 장약지수(=1/3 or 1/2)

n : 감쇠지수

지금까지 연구된 바에 의하면 발파진동은 주로 지발당 장약량(kg/delay)과 거리(m)에 의해 결정되고 기타의 요인들은 지반의 성질이나, 발파조건에 의해 결정된다. 따라서 발파설계를 위해서는 대상지역에서의 시험발파를 통하여 자유면의 상태, 화약의 종류, 암질의 상태 등에 따라 결정되는 상수 K값과 감쇠지수 n값을 정하는 것이 매우 중요하다. 또 발파 상수 K값과 감쇠지수 n값이 결정되고 허용진동속도가 주어지면 이 발파 진동추정식을 이용하여 폭원으로부터의 거리와 지발당 장약량과의 관계를 나타내는 노모그램을 작성할 수 있다.

발파진동추정식에서 거리와 지발당장약량의 비 ( $D/W^b$ )를 환산거리(Scaled Distance : SD)라고 하며,  $b$ 를 장약지수라 한다. 이 장약지수를 구하기 위해서는 거리를 고정시키고 장약량을 변화시켜 장약량에 대한 진동수준을 그리고 장약량을 고정시키고 거리를 변화시켜 거리에 대한 진동수준의 합성으로부터 결정할 수 있다.

$$V = K \left( \frac{D}{W^b} \right)^n$$

$$\left( \frac{D}{W^b} \right) = S.D$$

$$V = K(S.D)^n$$

이때  $b=1/2$ 이면, 자승근 환산거리(Square root scaled distance),  $b=1/3$ 이면 삼승근 환산거리(Cubic root scaled distance)라 하며, 이는 각각 거리를 장약량의 자승 및 삼승의 비율로 환산한 형태이다. 일반적으로 근거리에서는 삼승근 환산거리를 토대로 적정 지발당 장약량을 산정하며, 원거리에서는 자승근 환산거리를 통하여 적정 지발당 장약량을 산정한다.

회귀분석(Regression analysis)은 변수 상호간의 관계를 표본으로부터 추정하는 방법이며 단순 회귀분석과 다중 회귀분석으로 나눌 수 있다. 여기서는 단순회귀분석을 통하여 진동 상수를 구하였다.

이는 진동 관계식  $V = K \left( \frac{D}{W^b} \right)^n$ 을 이용하여 표본 회귀식으로 변환하고 이때 양변에 Log를 취하면

$$\text{Log } V = \text{Log } K + n \text{Log} \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right) \quad (4.2)$$

여기서,  $\text{Log } V = Y$ ,  $\text{Log } K = a$ ,  $\text{Log} \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right) = X$ ,  $n = b$ 라 하면

$$Y = a + bX \quad (4.3)$$

상기 식을 모회귀 직선(표본 회귀식)이라 하며, 모회귀 직선을 생성할 때 발생하는 오차들의 자승합을 최소로 하게하는 방법을 최소자승법(Least square method)이라고 하며 이 방법을 사용하여 발파진동 상수를 산출하였다.

최소자승법에 의하여 구해지는  $a$ ,  $b$ 를 최소 추정량이라 한다.

$$a = \frac{\sum y}{n} - b \frac{\sum x}{n} \quad (4.4)$$

$$b = \frac{n \sum xy - (\sum x \sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (4.5)$$

$$n = b, \quad k = 10^a$$

이와 같이 산출한 진동예측식은 평균수준을 예측하는 식이다. 진동의 평균수준이란 계측치들의 약 50% 정도의 진동수준은 이보다 적거나 높은 수치를 보일 수 있음을 의미한다. 따라서 실제 설계에 있어서는 진동의 평균수준을 예측하는 식을 이용하여 안전 장약량 또는 안전거리를 산정하는 것은 매우 위험하다. 예측식의 신뢰도를 높이기 위해서는 통계적 처리방법에 의하여 신뢰구간을 조절할 필요가 있는데 통계적으로 많이 사용되고 있는 신뢰구간은 95% 신뢰구간이다. 95% 신뢰구간이란 자료의 95%가 통계적으로 그 한계를 초과하지 않게 되는 구간을 의미한다.

95%신뢰도의 발파진동식을 산출하기 위해서는 위에서 구해진 회귀 직선식의 기울기 b를 동일하게 한 상태에서 y절편을 이동시켜 새로운 절편을 계산하여 구한다.

절편 a의 표준편차(SE)는

$$SE(a) = \left( \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{x^{-2}}{\sum x^2 - (\sum x)^2}} \right) \times \delta \quad (4.6)$$

$$\text{여기서 } \delta^2 = \left( \frac{\sum Y^2}{(\sum X^2) - \frac{\sum Y^2}{n}} - \frac{\left( \frac{(\sum xy) - (\sum x \sum y)}{n} \right)^2}{(\sum x^2) - \frac{(\sum x)^2}{n}} \right) \times \frac{1}{n-2} \quad (4.7)$$

절편 a는 t 분포에 따르며 95% 신뢰값은  $a(95\%) = a \times t_a \times SE(a)$ 이다.

## 5. 시추공 시험발파 분석

### 5.1 시추공 시험발파 위치 및 계측결과

본 연구지역에 위치한 3개의 시추공에 대하여 시추공 시험발파를 실시함과 동시에 진동계측기를 보안물건이 위치한 방향으로 일렬로 배열함으로써 발파공법 적용 시 현지 암반의 진동 전파 특성을 파악하고 발파진동 추정식을 산출하였다. 총 3개의 시추공 중 2개가 해당 연구지역에 위치하고 있기 때문에 모든 시추공 시험발파 자료를 사용하지 않고 연구지역에 포함된 CH-2, BH-1의 시추공 시험발파 자료만을 이용하였다. 시추공 시험발파 조건 및 진동계측결과는 다음 Table 5.1과 같다.

Figure 5.1은 시추공의 위치 및 계측방향을 도시한 것이다.

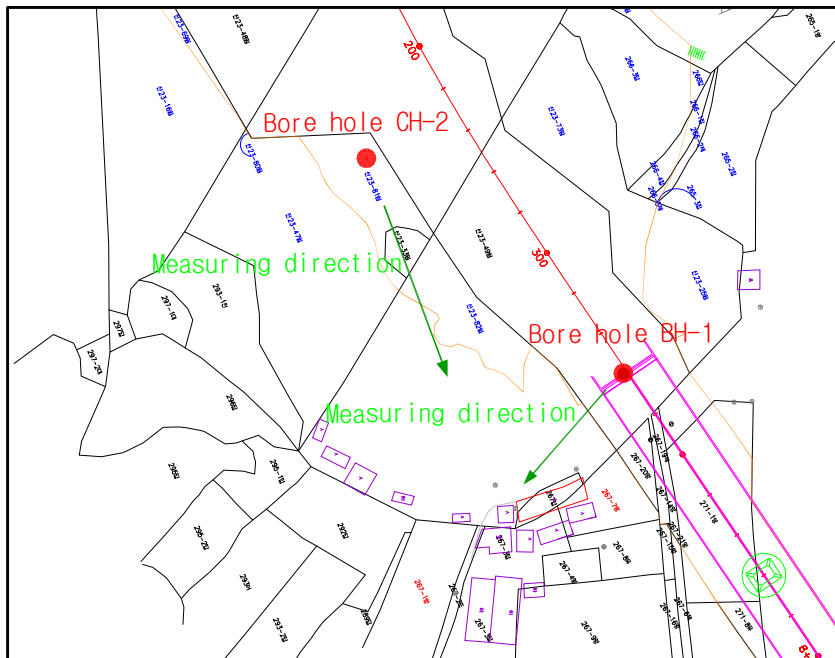


Figure 5.1 Position of bore hole and measuring direction



Table 5.1 Test Blasting conditions and Measuring result

Bore hole	Charge per weight(kg)	Measuring result		PVS (mm/sec)	Distance(m)	
		PPV (mm/sec)	Frequency (Hz)			
CH-2	0.75	V	54.9	34	56.4	5
		T	18.3	>100		
		L	30.5	39		
	0.75	V	15.7	85	18.8	20
		T	10.2	51		
		L	18.0	73		
	0.75	V	4.83	51	6.37	40
		T	3.46	39		
		L	5.52	64		
	0.75	V	2.83	93	5.83	50
		T	3.73	85		
		L	4.67	79		
0.75	V	1.46	146	2.16	65	
	T	1.27	73			
	L	1.97	68			
BH-1	0.5	V	27.4	51	33.6	5
		T	13.7	51		
		L	29.5	57		
	0.5	V	7.11	>100	9.62	20
		T	5.33	>100		
		L	6.41	57		
	0.5	V	2.51	>100	6.29	30
		T	5.89	>100		
		L	4.86	>100		
	0.5	V	3.62	>100	6.91	40
		T	3.78	>100		
		L	4.78	>100		
0.5	V	0.46	85	0.0.54	90	
	T	0.25	114			
	L	0.41	102			

## 5.2 시추공 시험발파 회귀분석

본 연구에서는 설계단계에서 이루어진 시추공 시험발파를 통해 획득한 진동 계측 데이터에 회귀분석이론을 적용함으로써 현지 암반의 발파진동 추정식을 도출하였다. 이를 근거로 진동파형의 거리별 감쇠율을 산출하여 원거리에서 측정된 데이터를 근거리 측정데이터로 적절히 보정시키는데 이용할 것이다.

측정된 데이터들의 각 성분별 입자속도를 각각 회귀분석을 실시함으로써 각 성분의 거리별 감쇠특성을 파악하였으며 다음 Figure 5.2~5.5와 같다.

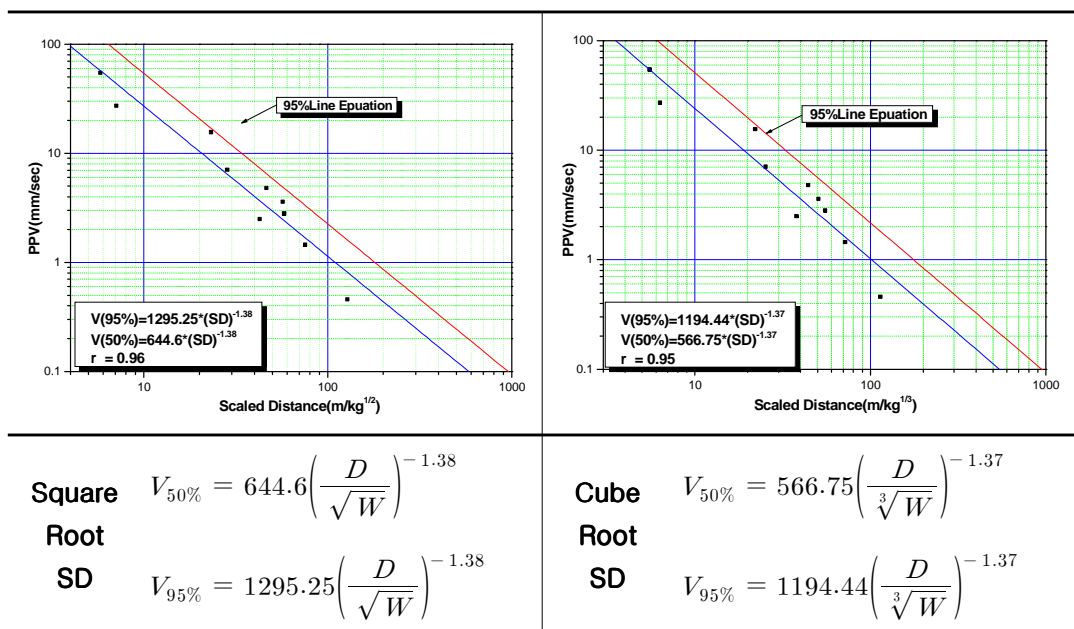


Figure 5.2 Result of regression analysis on Vertical component

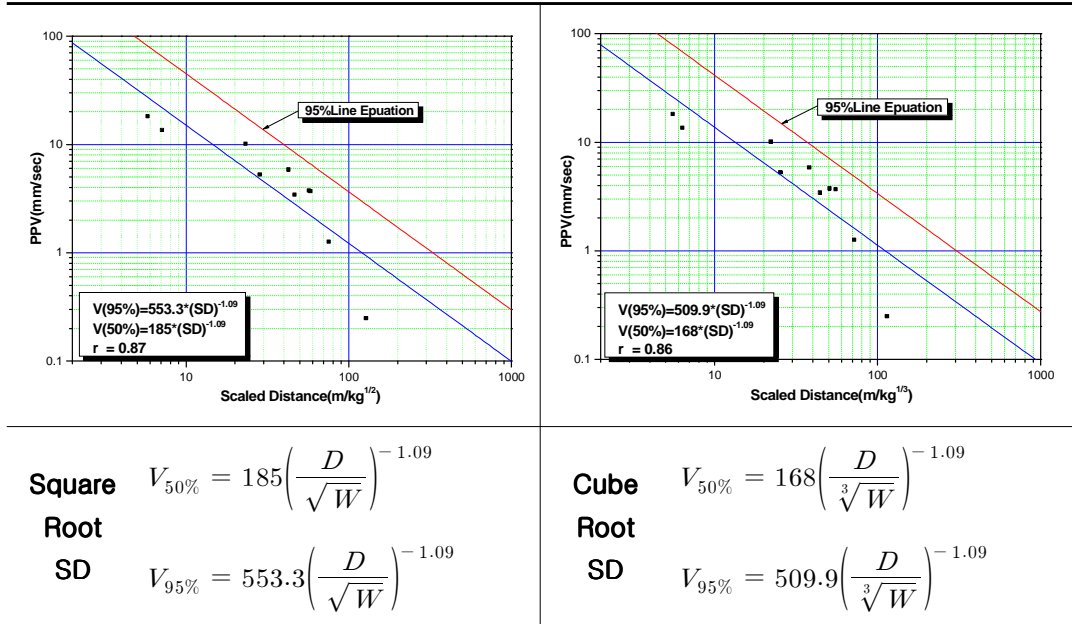


Figure 5.3 Result of regression analysis on Transverse component

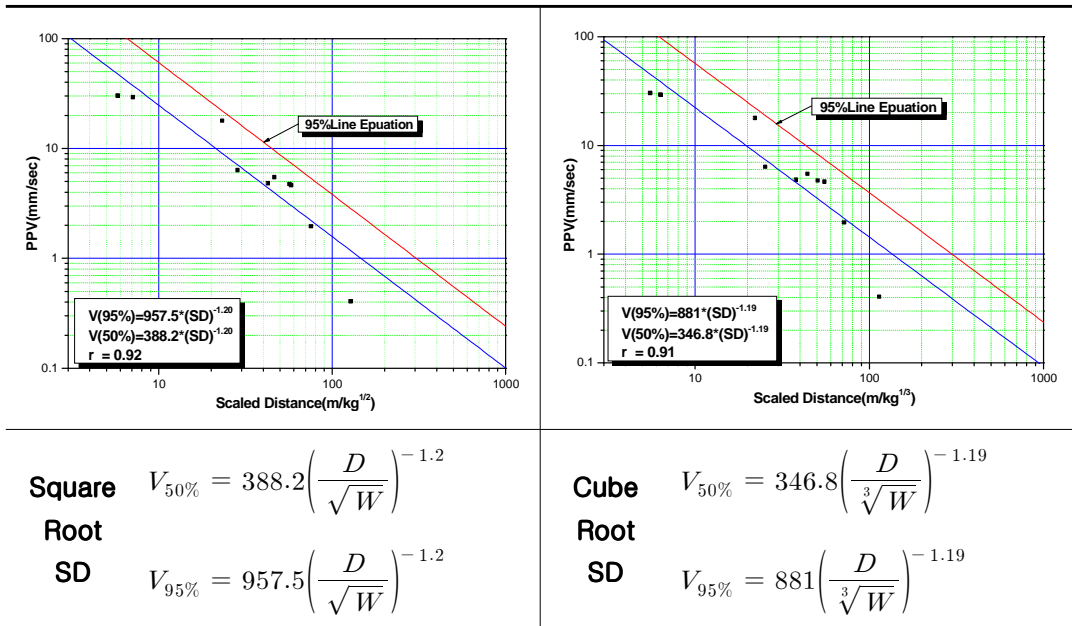


Figure 5.4 Result of regression analysis on Longitudinal component

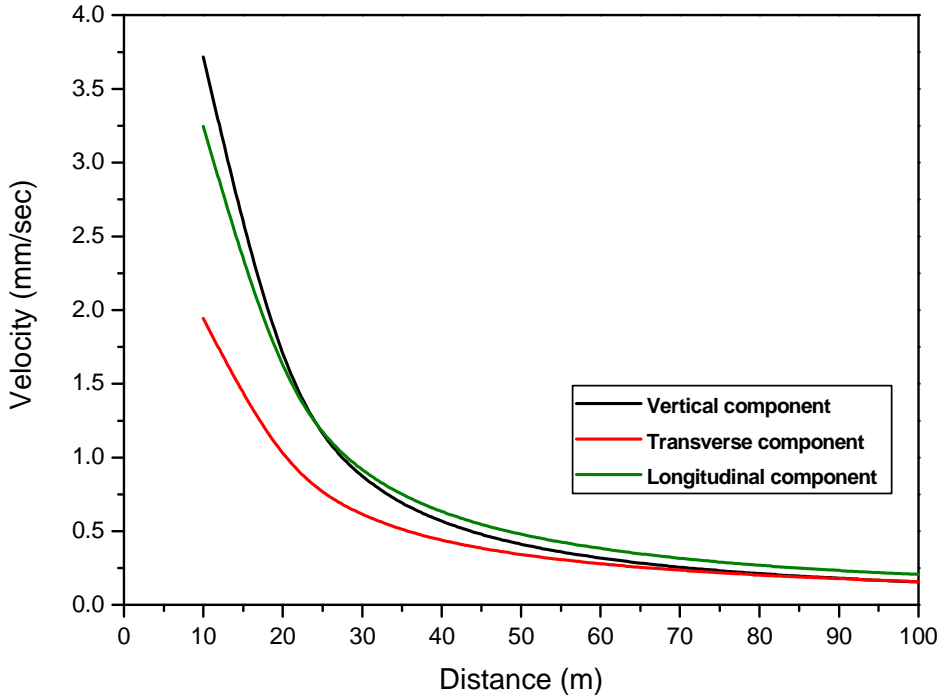


Figure 5.5 Relationship of PPV and Distance

각 성분별 진동계측치의 회귀분석결과 Figure 5.5에서 보는 바와 같이 각 성분마다 진동감쇠특성이 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 근거리에서는 물체파인 L성분과 V성분이 우세하게 나타나지만 물체파는 원거리로 갈수록 감쇠가 심하기 때문에 원거리에서는 감쇠가 상대적으로 덜한 표면파에 해당하는 T성분이 다른 성분에 비해 상대적으로 우세해진다. 따라서 거리에 따라 우세한 성분이 다르게 나타나게 된다.

진동파형의 보정에 있어 일반적으로 이용되고 있는 예측식은 각 성분의 PPV 중 최대치를 회귀분석하여 산출된 발파진동예측식이다. 하지만 각 성분마다 진동의 전파특성이 다르기 때문에 각 성분별 진동파형을 보정하는데 있어 모두 동일한 예측식을 적용시키는 것은 다소 무리가 있다.

따라서 본 연구에서는 세 성분을 각각 회귀분석을 실시하여 각각의 발파진동예측식을 산출하였다. 또한 환산거리의 경우 발파진동예측식에서 일반적으로 사용하고 있는 자승근 환산거리를 적용하였다.

회귀분석 결과로부터 각 성분별 50%신뢰도의 예측식을 본 연구지역의 각 성분별 발파진동예측식으로 사용하였으며 다음 식(5.1), (5.2), (5.3)과 같다.

$$\text{Vertical component} \quad V = 644.6 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.38} \quad (5.1)$$

$$\text{Transverse component} \quad V = 185 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.09} \quad (5.2)$$

$$\text{Longitudinal component} \quad V = 388.2 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.2} \quad (5.3)$$

## 6. 단일공시험발파

### 6.1 단일공 시험발파 조건

본 연구 지역은 무안군 일로읍 청호리 일대에 건설 중인 ○○대교 시점구간의 사면 절토구간으로서 단일공파형 획득을 위하여 총 3회에 걸쳐 시험발파를 실시하였다.

모든 회차에서 동일조건인 공경  $\phi 75\text{mm}$ , 공간격 1.4m, 저항선 1.2m, 천공장 3.2m, 지발당 장약량 1.6~3.2kg으로 하였으며 1회의 경우 21공, 2~3회 7공으로 발파를 실시하였다. 뇌관은 MS 지발 전기뇌관과 LP 전기뇌관을 혼용하였고 천공패턴과 점화 패턴은 Figure 6.1과 6.2와 같다. 여기서 LP 전기뇌관의 용도는 단일공 파형 획득을 위한 것으로써 본 발파 파형과 충분히 분리되어 전 발파에 의한 간섭이 발생하지 않도록 LP10(1000ms)을 사용하였다. 본 발파의 경우 20ms의 지연시차를 갖는 MS 전기뇌관을 사용하였다. 다음 Table 6.1에 간략히 정리하였다.

Table 6.1 Applied design parameter for some of the shots

No.	1	2	3
Explosive	Emulsion explosive		
Explosive diameter	$\phi 50\text{mm}$		
Detonator	MS or LP Detonator	MS Detonator	
Diameter(mm)	$\phi 75\text{mm}$		
Drilling Length(m)	3.2		
Burden(m)	1.2		
Spacing(m)	1.4		
Charge per hole(kg)	1.6		
Charge per delay(kg)	1.6~3.2	3.2	
Number of holes	21	7	7

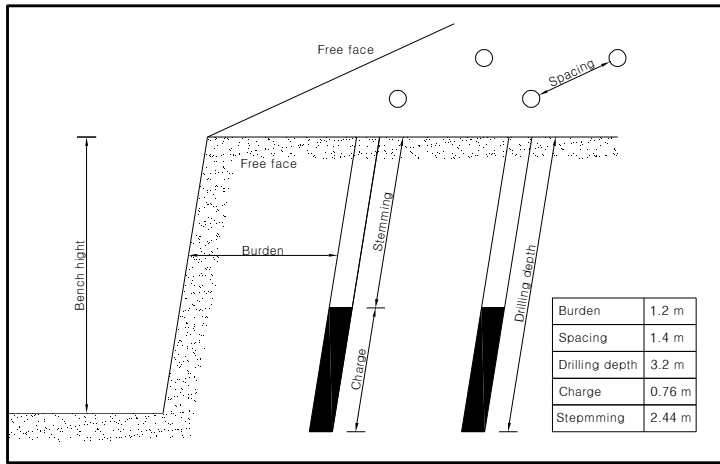


Figure 6.1 Blasting Pattern

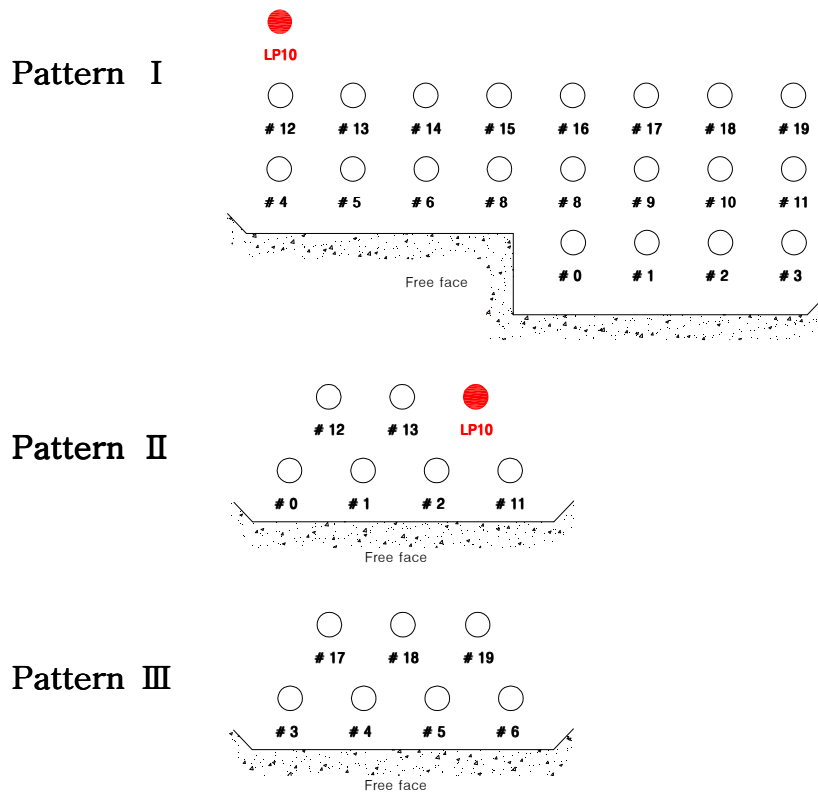


Figure 6.2 Firing times for a Pattern

## 6.2 단일공시험발파 파형 선정 및 분석

본 연구에서는 수치해석의 발파하중 입력 자료로 사용될 단일공 파형의 중첩모델링에 대한 적정성 검토를 위하여 총 2회에 걸쳐 획득한 단일공 파형과 현장 내에서 동일 조건으로 발파한 본 발파 파형을 1회 측정하여 분석함으로써 중첩모델링에 대한 적정성을 판단하는 자료로 이용하였다.

획득한 단일공 파형 중 수치해석을 수행할 선상에 위치한 측정지점에서 획득한 파형만을 이용하였으며 편의를 위하여 SN. 1~SN. 3까지의 시료번호를 부여하였다.

SN. 1과 SN. 2의 경우 본 발파 후 LP10번 너관을 이용하여 단일공 파형을 획득한 진동파형이며 SN. 3의 경우 SN. 2와 동일 발파조건으로 비슷한 거리에서 측정한 본 발파 파형이다. 다음 Figure 6.3~6.17는 SN. 1~SN. 3의 각각의 성분별 진동파형 및 단일공 파형을 도시한 것이다.



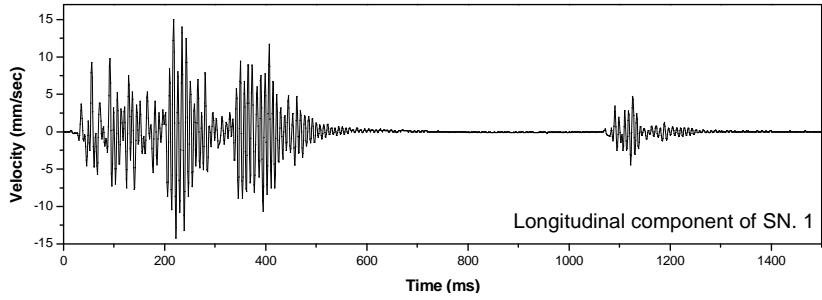


Figure 6.3 Full waveform of longitudinal component

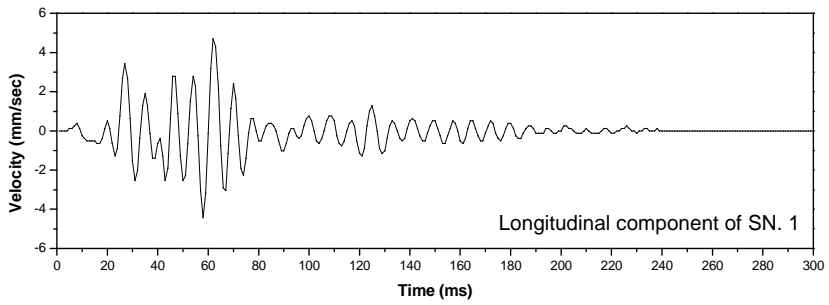


Figure 6.4 Single hole waveform of longitudinal component

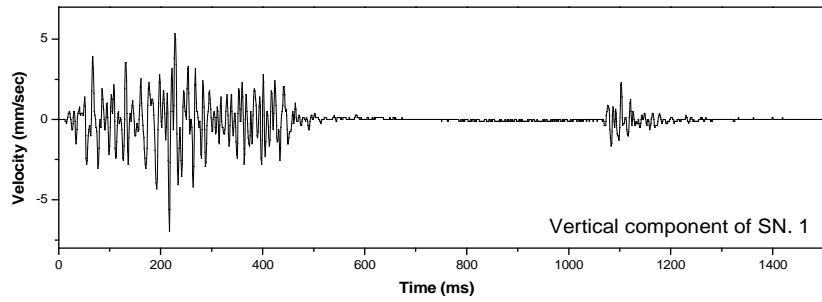


Figure 6.5 Full waveform of vertical component

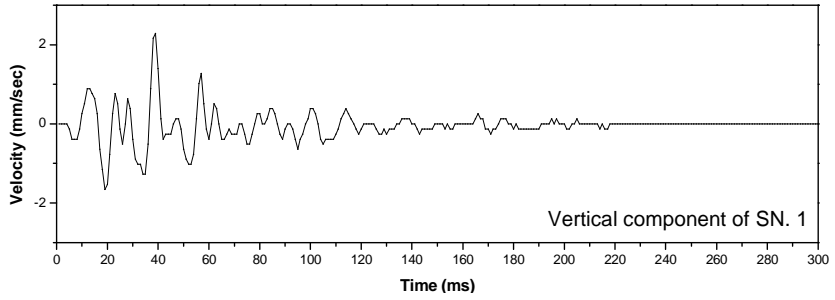


Figure 6.6 Single hole waveform of vertical component

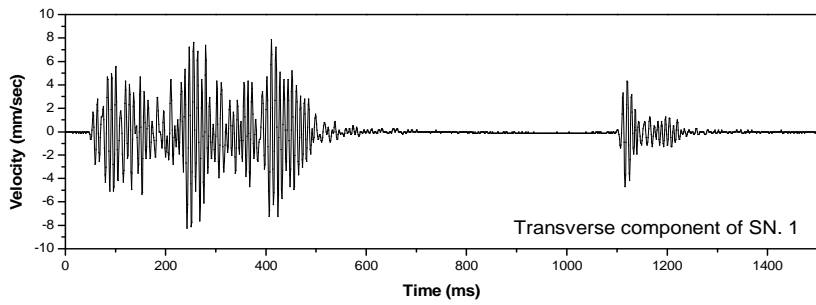


Figure 6.7 Full waveform of transverse component

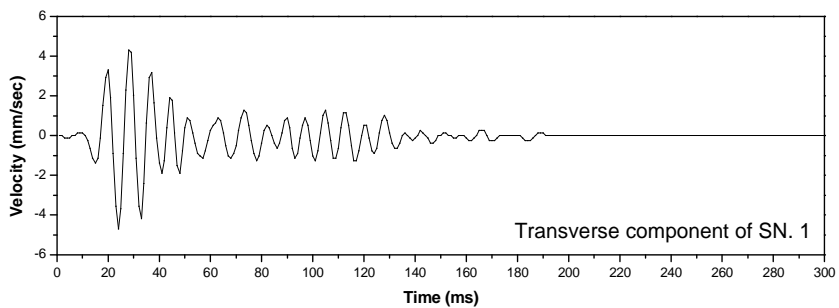


Figure 6.8 Single hole waveform of transverse component

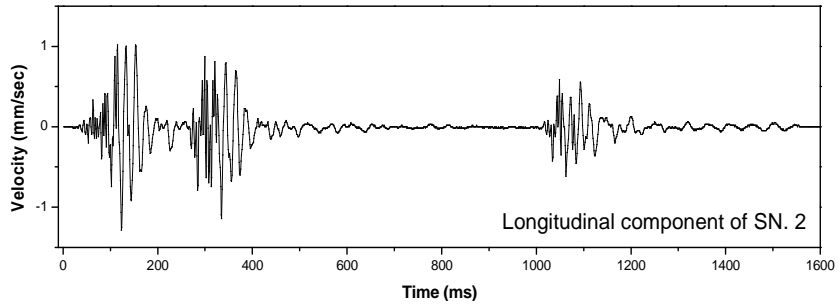


Figure 6.9 Full waveform of longitudinal component

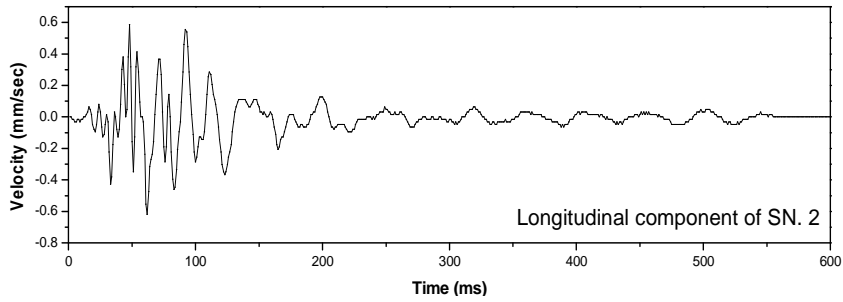


Figure 6.10 Single hole waveform of longitudinal component

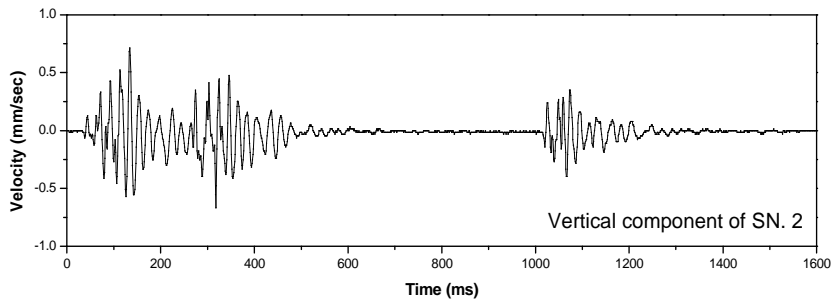


Figure 6.11 Full waveform of vertical component

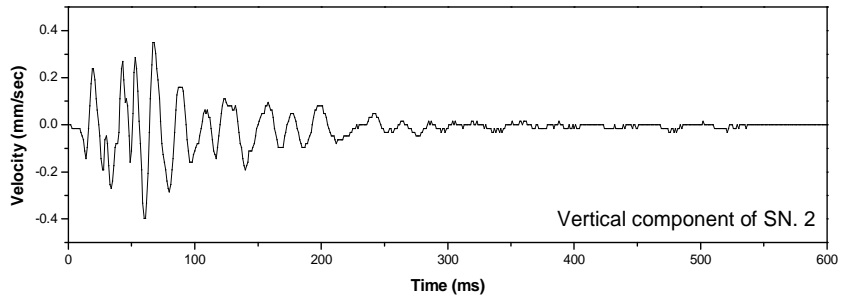


Figure 6.12 Single hole waveform of vertical component

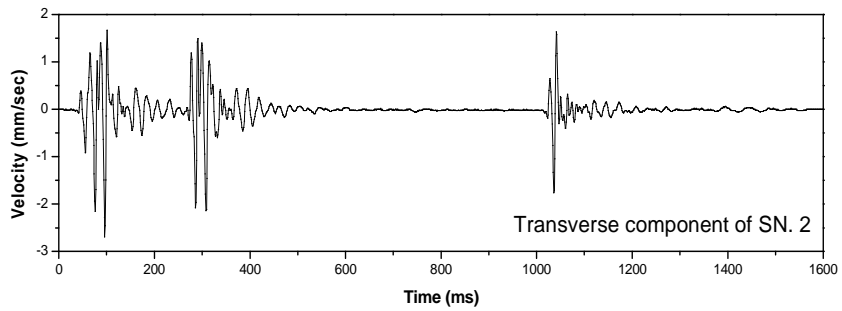


Figure 6.13 Full waveform of transverse component

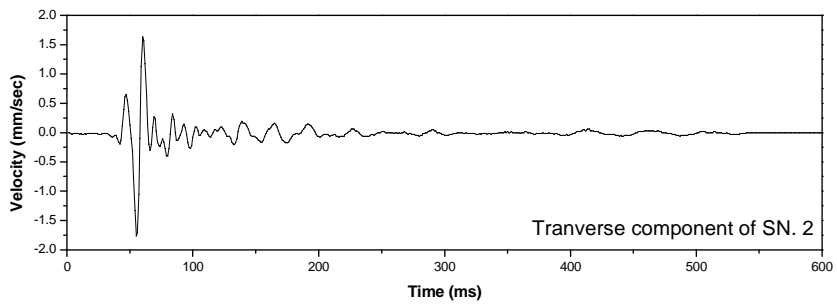


Figure 6.14 Single hole waveform of transverse component

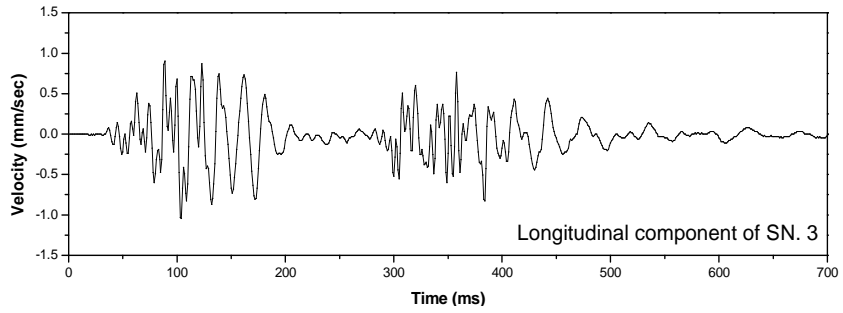


Figure 6.15 Full waveform of longitudinal component

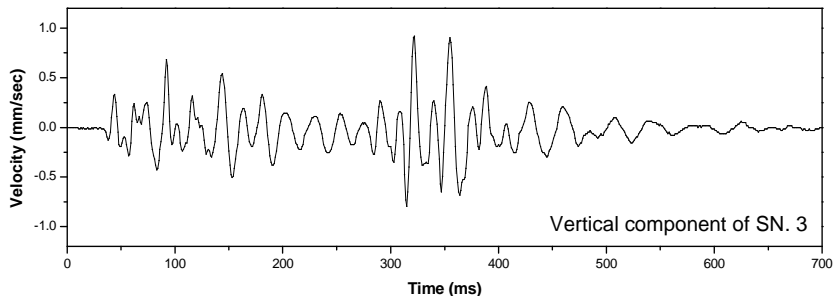


Figure 6.16 Full waveform of vertical component

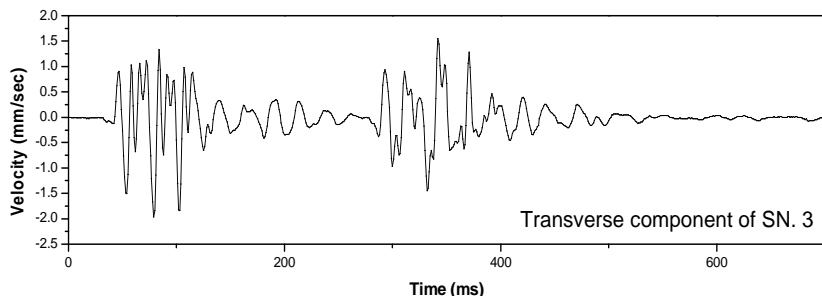


Figure 6.17 Full waveform of transverse component

단일공 파형을 이용한 시차분석은 단일공 파형을 1ms간격으로 중첩하면서 시행착오적 방법에 의해 본 발파 파형과 유사한 경향을 보이는 지점을 한 파형의 지연시차로 결정하고 실제 기록된 발파공수 만큼의 파형을 순차적으로 중첩해 나가면서 실제 기록시차를 분석하였다.

본 연구에서는 분석을 보다 용이하게 수행하기 위하여 본 발파 시 공수가 가장 적었던 SN. 2를 분석 파형으로 결정하였으며 중첩모델링을 통해 접선성분(Transverse component), 진행성분(Longitudinal component)과 수직성분(Vertical component)의 실제 기록시차와 파형을 예측하였다. 그 결과를 Table 6.2에 나타내었다.

다음 Figure 6.18~6.20은 SN. 2파형을 성분별로 분석한 결과를 도시한 것이다.

Table 6.2 Detonators delay time and analysing delay interval of SN. 2

Detonator	Delay time(ms)	Delay interval(ms)	Analysing delay interval(ms)
MS 0	0	0	0
MS 1	20	20	21
MS 2	40	40	41
MS 11	220	220	226
MS 12	240	240	246
MS 13	260	260	252

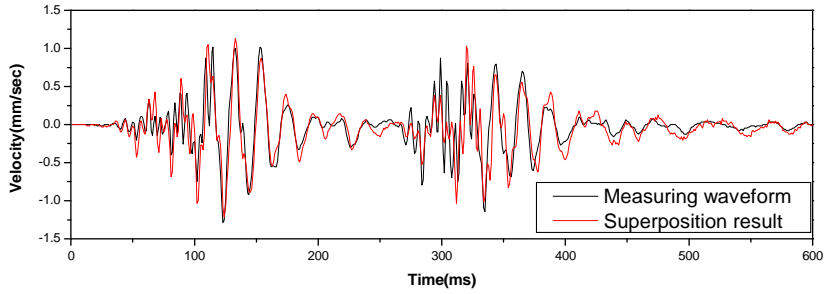


Figure 6.18 Superposition modeling result of longitudinal component (SN. 2)

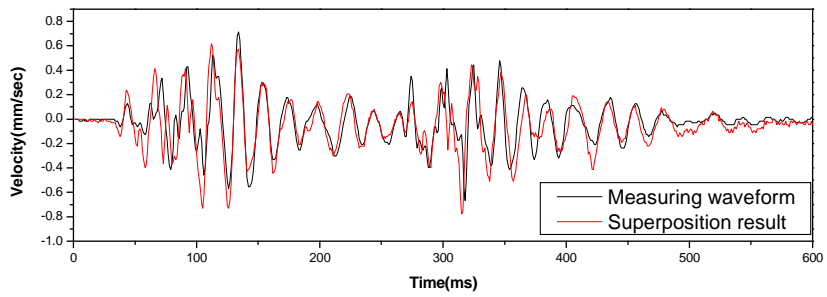


Figure 6.19 Superposition modeling result of vertical component (SN. 2)

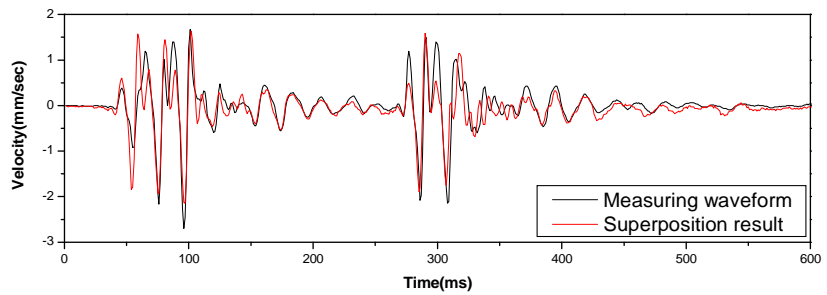


Figure 6.20 Superposition modeling result of transverse component (SN. 2)

SN. 2 파형의 중첩모델링을 통한 기폭초시 결정의 정확성에 대한 검증 및 적정 단일공 파형을 이용한 진동예측의 적합성 판단을 위하여 동일 현장에서 동일조건으로 발파를 실시하여 획득한 SN. 3의 파형을 SN. 2의 단일공 파형을 이용한 시차분석을 통해 현장 적용성에 대해 알아보았다.

다음 Table 6.3은 SN. 3의 파형분석을 통해 분석된 실제 기폭시차를 정리한 것이며 Figure 6.21~6.23은 그 결과를 도시한 것이다 이상의 결과를 바탕으로 단일공 파형의 중첩모델링에 의한 진동예측이 적합한 것으로 판단하였다.

Table 6.3 Detonators delay time and analysing delay interval of SN. 3

Detonator	Delay time(ms)	Delay interval(ms)	Analysing delay interval(ms)
MS 3	60	0	0
MS 4	80	20	7
MS 5	100	40	26
MS 6	120	60	49
MS 16	320	260	253
MS 17	340	280	287
MS 18	360	300	318



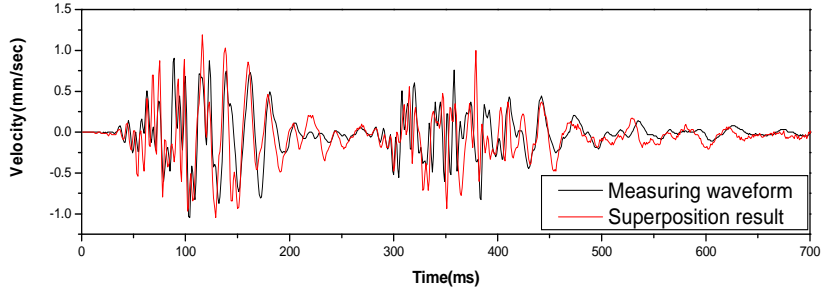


Figure 6.21 Superposition modeling result of longitudinal component (SN. 3)

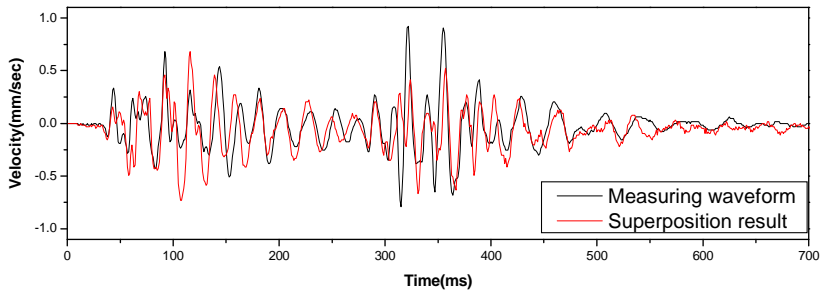


Figure 6.22 Superposition modeling result of vertical component (SN. 3)

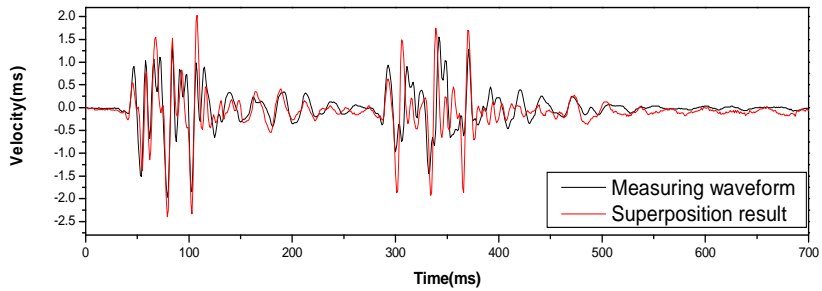


Figure 6.23 Superposition modeling result of transverse component (SN. 3)

단일공 파형을 이용하여 SN. 2와 SN. 3의 파형분석결과 사용되는 뇌관의 지연단차와 실제기폭시차가 다소 차이가 발생함을 알 수 있었다. 이는 뇌관의 발화오차 및 발파공의 기하학적 배열, 지반의 탄성과속도 등에 의해 발생된 결과라 할 수 있다.

따라서 뇌관의 발화오차가 거의 발생하지 않고 지반의 탄성과 속도와 발파공의 기하학적배열에 의해 발생할 수 있는 오차를 반영할 수만 있다면 해당 현장에서 측정된 단일공 파형만으로 실제 발파 시 발생하는 진동파형을 비교적 정확히 획득할 수 있음을 보여주는 결과라 할 수 있다.

본 연구 과정에서 분석한 SN. 2와 SN. 3 진동파형의 실제 기폭시차는 다양한 변수에 의해 발생할 수 있는 여러 가지 경우의 수 중 일부에 불과한 것이며 만일 파형 분석 결과 정확히 뇌관의 지연단차에 의해 기폭이 되었다 하더라도 이 또한 발파 결과 발생할 수 있는 많은 경우의 수 중 일부에 불과한 결과라 할 수 있다.

## 6.3 단일공 파형 보정 및 중첩모델링

전 절에서 중첩모델링의 적정성에 대한 검토를 실시하였으며 그 결과 동일 현장 내의 모든 발파공은 동일한 진동파형을 발생시키며, 각 발파공에서 계측지점까지의 거리가 동일하고 뇌관의 발화오차가 발생하지 않는다면 단일공 파형을 이용한 진동 예측이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 단일공 파형의 중첩모델링을 통해 획득한 진동파형을 발파 동적수치해석 시 발파하중으로써 작용시킬 것이다.

### 6.3.1 파형선정 및 보정

진동파형 획득을 위한 첫 번째 단계로써 60m에서 측정된 SN. 1의 단일공 파형을 시추공 시험발파의 회귀분석결과를 토대로 실제 진동을 측정하였던 지점의 예상 진동수준과 발파지점으로부터 3m이격된 지점의 예상 진동수준과의 비를 고려하여 실제 측정된 진동파형을 발파지점의 파형으로 적절히 보정하였다.

다음 Figure 6.24는 진동파형을 보정하는 방법에 대해 도시한 것이다.

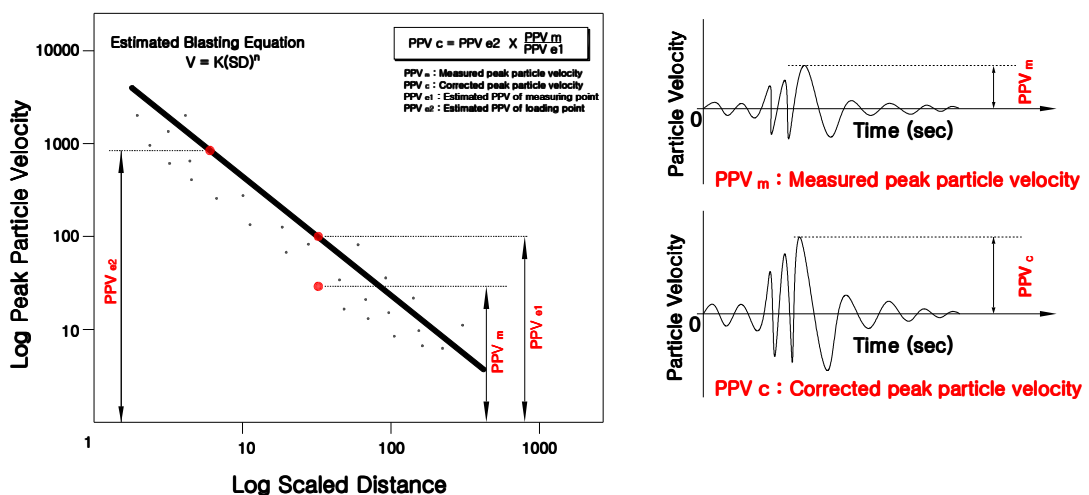


Figure 6.24 Correcting method of waveform

위의 방법에 의해 획득한 발파지점에서의 진동파형은 거리의 변화에 따라 주파수 또한 달라진다. 다음 Figure 6.25는 60m에서 측정된 단일공 파형과 150m에서 측정된 단일공 파형을 도시한 것으로 주파수가 60m의 경우 128Hz, 150m의 경우 64Hz로 2배 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 하지만 파형보정에 있어 이러한 주파수의 변화를 적용하지 않기 때문에 최대진동속도는 동일한 값을 가진다 하더라도 그 감쇠특성에는 차이가 발생하게 된다. 따라서 이러한 문제점을 최소화하기 위해 측정데이터 중 발파위치와 최단거리에 위치한 진동파형을 이용하였다.

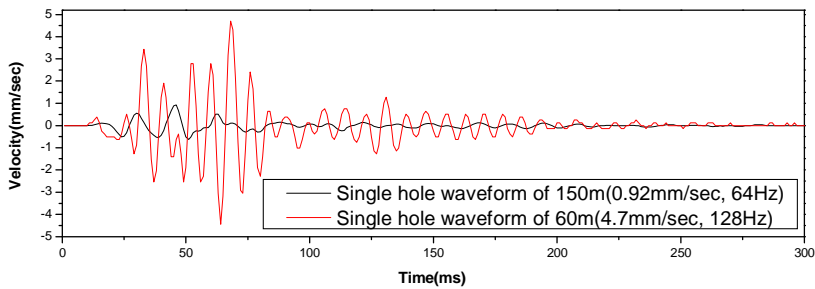


Figure 6.25 Compare each single hole of 60m and 150m

다음 Figure 6.26~6.27은 SN. 1의 진행성분(Longitudinal component)과 수직성분(Vertical component)에 대해서 보정을 실시하였으며 60m에서 측정된 SN. 1의 단일공 파형을 발파지점의 진동파형으로 적절히 보정시킨 결과 최대진동속도는 진행성분의 경우 171.1mm/sec, 수직성분의 경우 142.72mm/sec로 나타났다.

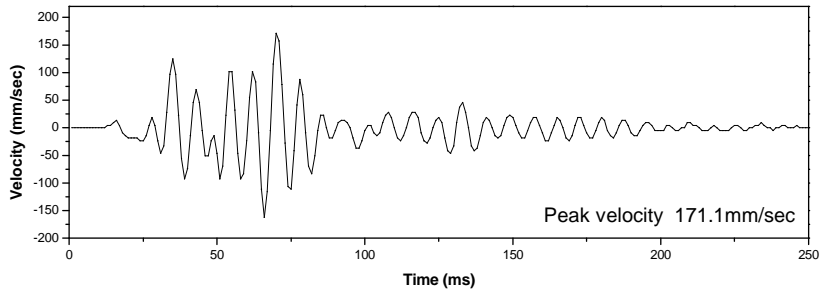


Figure 6.26 Correcting result of longitudinal component

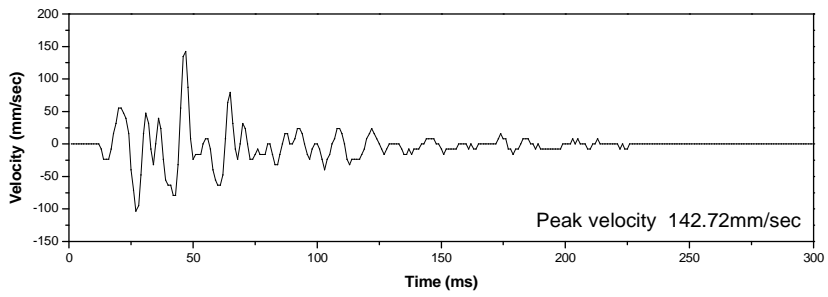


Figure 6.27 Correcting result of vertical component

### 6.3.2 발파공의 기하학적배열에 대한 시차 보정

중첩모델링을 적용하기 전 기폭시차에 영향을 미칠 수 있는 변수 중 발파공의 기하학적배열에 의해 발생 가능한 지연시차의 변화에 대한 보정을 실시하였다.

본 연구지역의 탄성파 속도는 리핑암의 경우 0.7~1.2km/sec이며 발파암으로 구분되는 기반암의 경우 1.2km/sec이상으로 조사되었다. 리핑암의 경우 발파시공 전 사전제거 작업이 이루어지기 때문에 발파공이 위치한 기반암의 탄성파속도만을 이용할 것이다.

다음 Figure 6.28에서 보는 바와 같이 발파공의 공간격은 1.4m, 저항선 1.2m이며 계측위치는 기폭방향과 평행하게 위치해 있다. 이 경우 발파공의 거리가 1.4m이기 때문에 약 1ms의 시간차가 발생한다. 또한 4번 발파공과 3번 발파공의 경우 뇌관시차는 20ms 지연시간을 가지지만 공간격이 9.8m차이가 발생하기 때문에 탄성파속도를 감안했을 때 약 8ms정도의 오차가 발생하게 되어 2측점에서 실제로는 12ms의 지연시차를 가지게 된다. 따라서 본 연구에서는 실제측정점인 2측점에서 측정된 진동데이터를 탄성파속도를 감안하여 발파공의 기하학적배열에 따른 시차 보정을 실시하였다. 다음 Table 6.4은 중첩모델링을 통해 획득한 각 계측방향별 예상진동속도를 정리한 것이다.

Table 6.4 Prospect vibration velocity of each measuring point

Velocity (mm/sec)	Measuring point #1		Measuring point #2		Measuring point #3	
	60m	150m	60m	150m	60m	150m
Longitudinal component	10.29	1.56	9.91	1.64	9.29	2.11
Vertical component	3.43	1.44	4.83	1.27	3.56	1.11

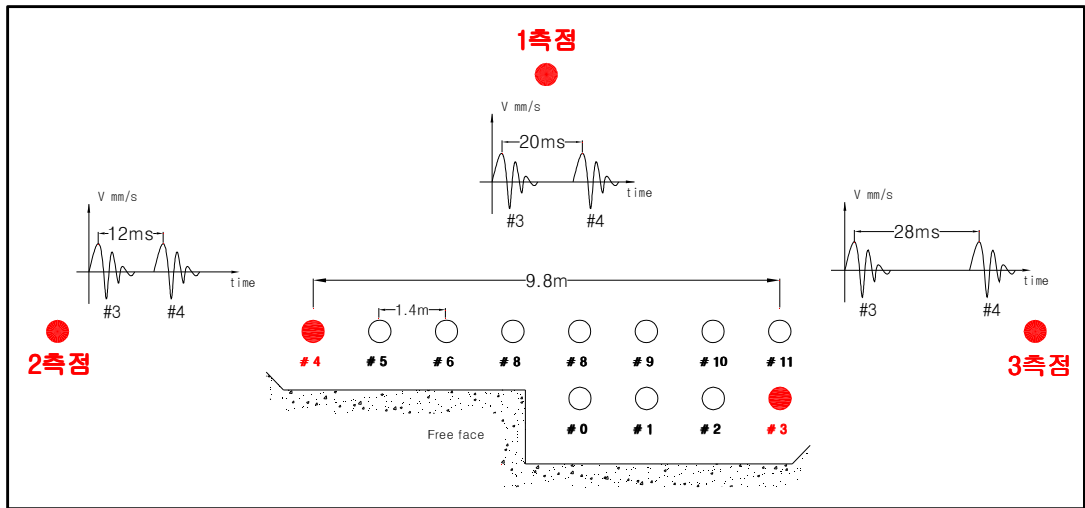


Figure 6.28 Change of delay interval by geometrical arrangement of blast hole

### 6.3.2 중첩모델링

파형 보정과정을 거친 3m에서의 단일공 파형을 중첩의 원리를 적용하여 뇌관의 지연시차와 발파공의 배열과 탄성과 속도에 따른 기폭시차 변화만을 고려한 중첩모델링을 실시함으로써 실제 시공 중 발생할 것으로 예상되는 진동파형으로 변환시켜 예상 진동파형을 획득하였다. 여기서 위의 2가지 변수만을 고려한 이유는 다양한 변수를 모두 적용시키기엔 무리가 있을 것으로 사료되어 발생 가능한 경우의 수 중 예측 가능한 변수라 할 수 있는 뇌관시차와 발파공 배열에 따른 기폭시차 변화만을 적용한 것이다.

중첩모델링 결과 실제 측정된 진동속도와 다소 차이가 발생함을 볼 수 있는데 이는 뇌관의 발화오차 등의 다른 변수를 적용하지 않았기 때문에 발생한 결과이다.

다음 Table 6.6는 중첩모델링에 적용시킬 지연시차이며 Figure 6.29~6.32는 Table 6.4의 시차를 적용한 중첩모델링 결과 생성된 성분별 진동파형이다.

Table 6.5 Delay interval for superposition modeling

Detonator	Delay time(ms)	Delay interval(ms)	Detonator	Delay time(ms)	Delay interval(ms)
MS 0	0	0	MS 10	200	201
MS 1	20	21	MS 11	220	222
MS 2	40	42	MS 12	240	235
MS 3	60	63	MS 13	260	256
MS 4	80	75	MS 14	280	277
MS 5	100	96	MS 15	300	298
MS 6	120	117	MS 16	320	319
MS 8	160	158	MS 17	340	340
MS 8	160	159	MS 18	360	361
MS 9	180	180	MS 19	380	382



Table 6.6 Measuring and Superposition result

Velocity(mm/sec)	Measuring result	Superposition result	
	60m	3m	60m
Longitudinal component	15	360.7	9.91
Vertical component	7	301.3	4.83

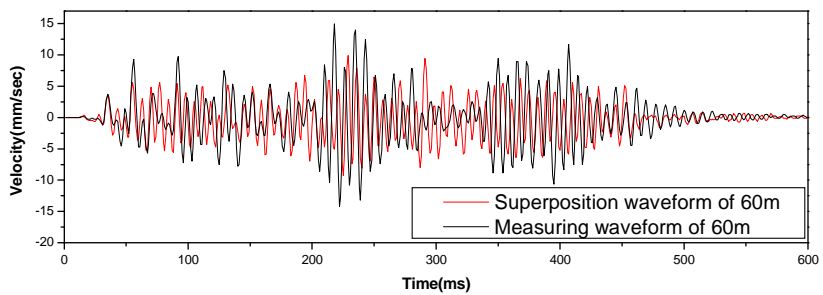


Figure 6.29 Superposition and Measuring waveform of longitudinal component

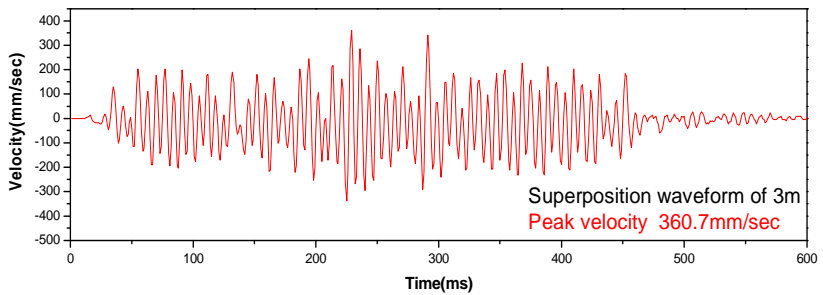


Figure 6.30 Superposition waveform of longitudinal component after correcting

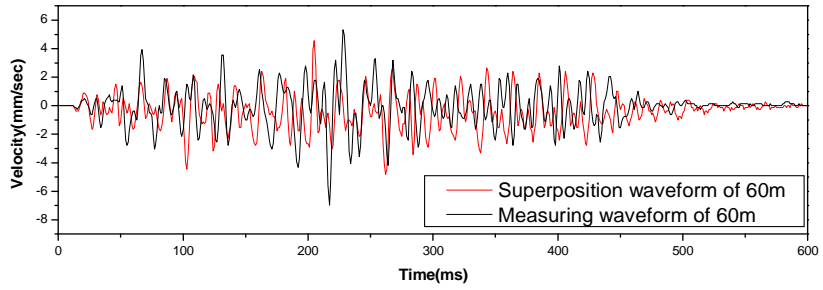


Figure 6.31 Superposition and Measuring waveform of vertical component

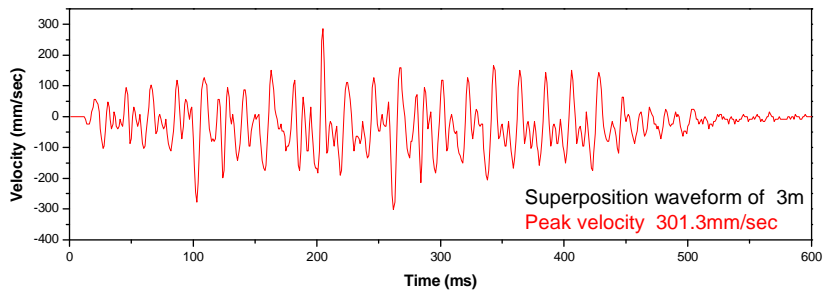


Figure 6.32 Superposition waveform of vertical component after correcting

## 7. 동적수치해석

본 연구에서는 상용 유한차분 해석프로그램인 FLAC을 이용하였으며 동적수치해석을 수행하기 위해서 발파하중의 경우 SN. 1 단일공 파형 및 SN. 1의 본발파 파형, 중첩모델링 파형 모두를 이용한 동적수치해석을 수행함으로써 3가지 파형을 이용한 해석의 특징을 파악하였다.

### 7.1 지반 Damping 계수 결정

본 연구지역 지반의 damping 계수는 60m에서 측정된 진동파형을 적절히 보정한 파형을 발파하중으로 작용시켜 60m와 150m에서의 동적수치해석 결과와 실제 측정된 진동계측결과를 비교하면서 시행착오적 방법을 통하여 결정하였다.

동적수치해석에 의한 예상 진동수준과 실제 진동수준과 비교한 결과 진행방향 성분과 수직방향 성분의 진동감쇠특성이 정확히 일치하는 결과를 보이지는 않기 때문에 두 성분 중 최대진동속도를 비교함으로써 모델링 지반의 감쇠율을 결정하였다.

단일공 파형의 경우 5.5%의 감쇠율을 적용하였을 때 60m에서는 측정치와 예측치가 근사하게 나타나지만 150m에서는 다소 차이가 발생하며 3.5%의 감쇠율을 적용하였을 때 150m의 측정치와 예측치가 근사하게 발생하였다.

SN. 1의 본발파 파형에 대한 측정치와 예측치의 비교결과 6%의 감쇠율을 적용하였을 때 60m와 150m에서 측정치와 예측치의 최대진동속도가 근사하게 나타났다.

중첩모델링 파형에 의한 분석결과 역시 본발파 파형과는 감쇠율에서 다소 차이는 발생하지만 6.5% 감쇠율을 적용하였을 때 60m와 150m에서의 측정치와 예측치가 근사한 진동수준을 나타냄을 볼 수 있다.

다음 Table 7.1~7.3은 60m와 150m에서 실제 측정된 단일공파형 및 중첩파형, 실측파형의 최대입자속도와 감쇠율의 변화에 따른 동적수치해석결과를 비교한 것이다.

Table 7.1 Measuring and dynamic analysis result of single hole waveform

Velocity(mm/sec)	Measuring result (60m)	damping rate					
		3%	3.5%	4%	5%	5.5%	6%
Longitudinal component	4.7	9.26	8.05	6.97	5.25	4.59	4.02
Vertical component	2.3	5.93	5.12	4.51	3.4	3.03	2.67
Vector Sum	5.23	11	9.54	8.30	6.25	5.50	4.83

Velocity(mm/sec)	Measuring result (150m)	damping rate					
		3%	3.5%	4%	5%	5.5%	6%
Longitudinal component	0.92	1.23	1.02	0.85	0.61	0.52	0.45
Vertical component	0.87	1.04	0.79	0.60	0.37	0.29	0.24
Vector Sum	1.27	1.61	1.29	1.04	0.71	0.60	0.51

Table 7.2 Measuring and dynamic analysis result of superposition waveform

Velocity(mm/sec)	Superposition result (60m)	damping rate		
		6%	6.5%	7%
Longitudinal component	9.91	11.4	9.86	8.63
Vertical component	4.83	6.38	5.65	5.1
Vector Sum	11.02	13.06	11.36	10.02

Velocity(mm/sec)	Superposition result (150m)	damping rate		
		6%	6.5%	7%
Longitudinal component	1.64	1.89	1.75	1.63
Vertical component	1.27	0.89	0.85	0.80
Vector Sum	2.07	2.09	1.95	1.82

Table 7.3 Measuring and dynamic analysis result of SN. 1 waveform

Velocity(mm/sec)	Measuring result (60m)	damping rate			
		5%	5.5%	6%	7%
Longitudinal component	15	19.1	16.4	13.9	10.1
Vertical component	7	8.85	7.7	6.55	4.76
Vector Sum	16.55	21.05	18.12	15.37	11.17

Velocity(mm/sec)	Measuring result (150m)	damping rate			
		5%	5.5%	6%	7%
Longitudinal component	1.17	1.45	1.22	1.05	0.82
Vertical component	1.13	1.41	1.16	0.95	0.68
Vector Sum	1.63	2.02	1.68	1.42	1.06

이상의 결과를 바탕으로 본 연구의 동적수치해석에 적용할 감쇠율은 중첩모델링 파형의 경우 6.5%, SN. 1 본발파 파형의 경우 5.5%의 감쇠율을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

## 7.2 동적수치해석조건

중첩모델링 자료를 활용한 발파 동적수치해석의 수행을 위한 해석단면은 본 연구 과정에서 단일공 파형 획득을 위해 시험발파를 실시한 현장을 모델링 하였다.

지반 모델은 대표적인 지반모델인 탄소성 모델로 가정하였으며 모델링 지반에 적합한 지반 물성치를 시추조사 등을 통해 산정하였다. 다음 Table 7.4는 대상지역의 지반 물성치를 나타낸 것이며 Figure 7.1은 대상지역의 동적수치해석 모델이다.

Table 7.4 Properties of in-suit rock mass

	Weight per Unit( $t/m^3$ )	Young's modulus( $t/m^2$ )	Poisson's ratio	Cohesion ( $t/m^2$ )	Friction angle( $^\circ$ )
Weathered rock	2	20,440	0.3	3	33
Soft rock	2.34	175,700	0.22	14	32
Hard rock	2.42	583,360	0.22	26	38

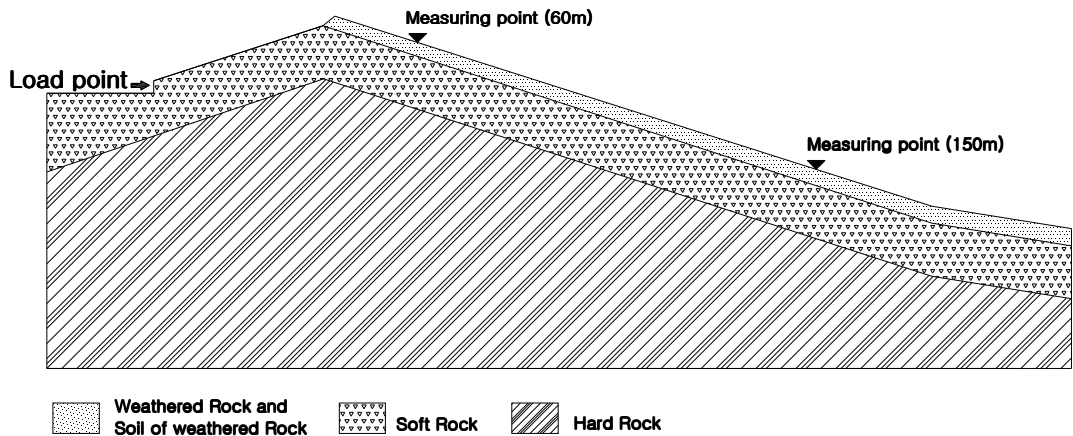


Figure 7.1 Dynamic analysis model of in-suit rock mass

동적수치해석을 실시하기 위한 수치해석 모델단면은 다음 Figure 7.2에 나타낸 바와 같으며 경계조건은 자유면이 없는 부분의 경우 Quiet boundary를 자유면이 있는 경우는 Free field boundary를 적용하였다. 또한 현지암반에 대한 초기응력은 측정하지 않았으므로 수직방향 응력은 암반자중에 의한 것으로 가정하였고 수평방향 응력은 수직방향 응력과 동일하다고 가정하였다.

수치모델 내에서의 탄성과 전파에 따른 진동 감쇠율은 전 절에서 살펴보았듯이 중첩파형의 경우 6.5%, SN. 1 본발파 파형의 경우 5.5%의 감쇠율을 적용하였다.

동적수치해석 시 발파하중으로 작용시킬 진동속도 파형은 발파위치에서 60m거리에 위치한 진동계측기에서 측정된 진동파형을 보정한 것이며 이를 이용한 동적수치해석을 수행하여 150m 거리에 위치한 장소의 진동속도를 예측할 것이다.

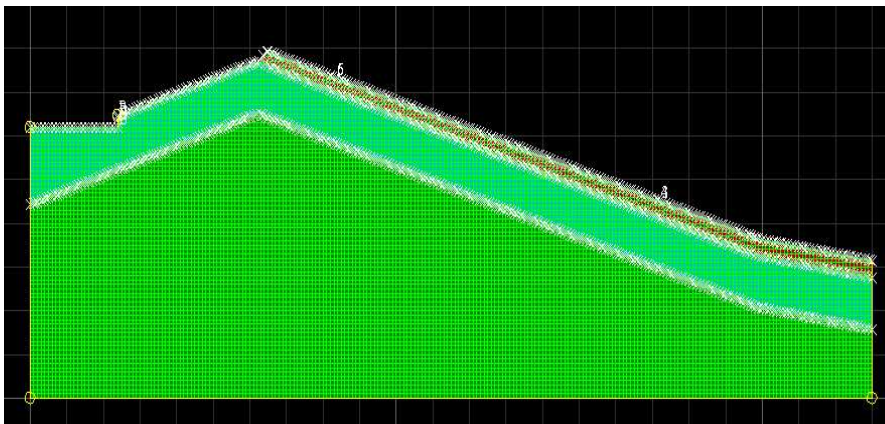


Figure 7.2 Numerical model for dynamic analysis

### 7.3 동적수치해석 적용과형

본 연구에서 중첩모델링과형과 SN. 1 본발과 과형을 이용한 동적수치해석을 실시할 것이다. 발과하중으로 작용시킬 진동과형은 전결에서 보정 및 중첩모델링을 실시한 60m에서 측정된 SN. 1의 중첩모델링과형과 SN. 1의 본발과 과형이다.

다음 Figure 7.3~7.4는 중첩모델링과형으로써 최대진동속도는 진행성분의 경우 360.7mm/sec, 수직성분의 경우 301.3mm/sec이다. Figure 7.5~7.6은 60m에서 실제 측정된 SN. 1 본발과 과형을 보정한 것으로써 진행성분의 경우 545.7mm/sec, 수직성분의 경우 398.6mm/sec이다.

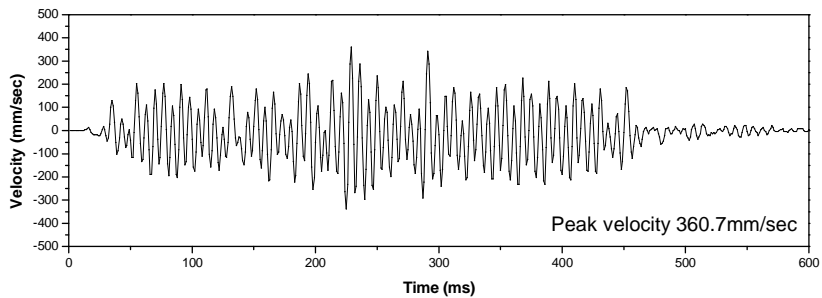


Figure 7.3 Superposition waveform of longitudinal component

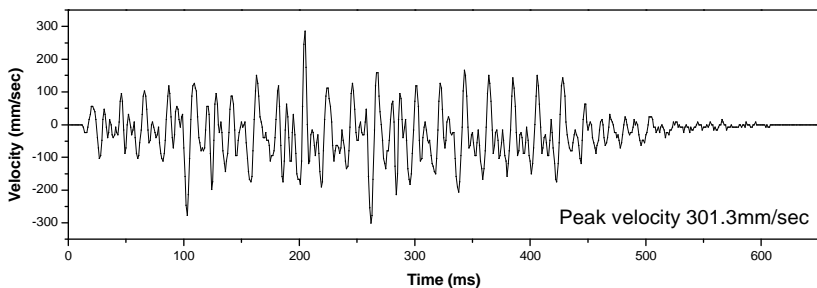


Figure 7.4 Superposition waveform of vertical component



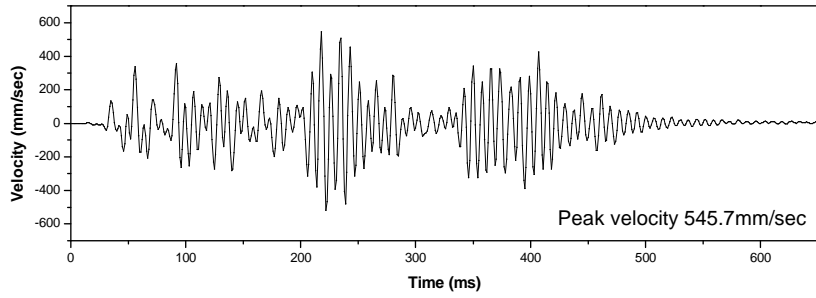


Figure 7.5 SN. 1 waveform of longitudinal component

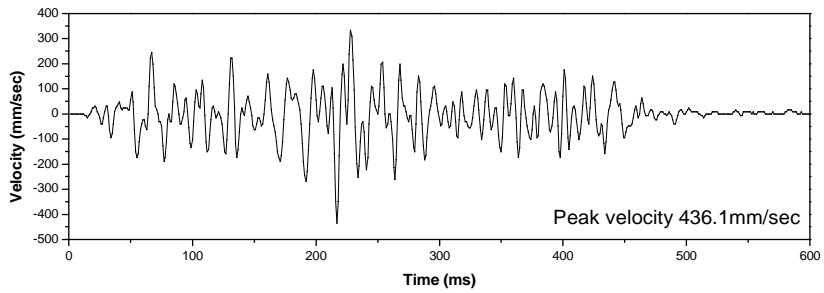


Figure 7.6 SN. 1 waveform of vertical component

## 7.4 동적수치해석 결과

중첩모델링 파형과 실측파형인 SN. 1 본발파 파형에 대한 동적수치해석을 통하여 발파공법 적용에 따른 150m 지점에 위치한 구조물의 안정성 평가를 실시하였다. 발파공법에 대한 구조물의 안정성 평가는 일반적으로 구조물이 위치한 지점의 지반진동속도를 기준으로 하기 때문에 본 해석모델의 150m지점에서의 진동속도를 동적수치해석을 통해 예측하였다.

해석결과 중첩모델링 파형을 발파하중으로 작용시켰을 경우 150m지점에서 최대진동속도는 1.75mm/sec가 발생할 것으로 예측되었으며, 150m지점 단일공파형의 중첩모델링 결과의 예상 진동속도는 1.64mm/sec로써 동적수치해석을 통해 0.11mm/sec의 근소한 차이의 진동수준을 예측하였다.

다음 Table 7.6은 동적수치해석결과와 중첩모델링에 의해 예측된 예상 진동속도를 비교한 것이다. Figure 7.7~7.8은 중첩모델링 파형을 이용한 동적수치해석의 결과 발생한 60m와 150m에서의 각 성분별 진동속도파형을 도시한 것이다. 또한 Figure 7.9~7.10은 동적수치해석 결과 수치모델 내에 나타난 X방향 진동속도와 Y방향 진동속도의 분포를 도시한 것이다.

Table 7.5 Compare dynamic analysis result with superposition result

Velocity (mm/sec)	Superposition result		Dynamic analysis result	
	60m	150m	60m	150m
Longitudinal component	9.91	1.64	9.86	1.75
Vertical component	4.83	1.27	5.65	0.85

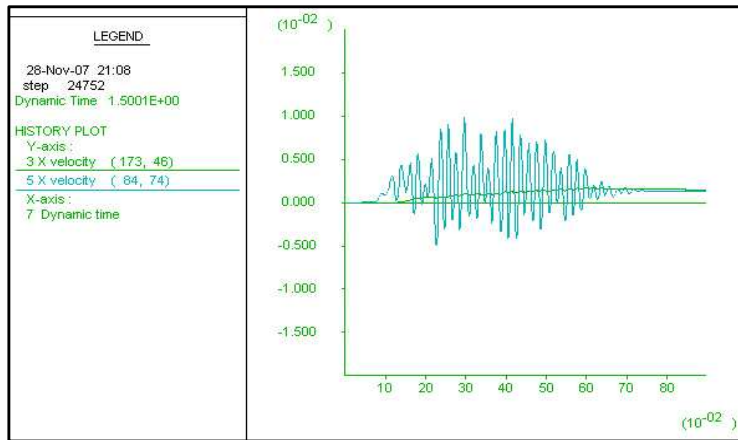


Figure 7.7 Longitudinal component waveform of 60m and 150m on the dynamic analysis used superposition modeling waveform

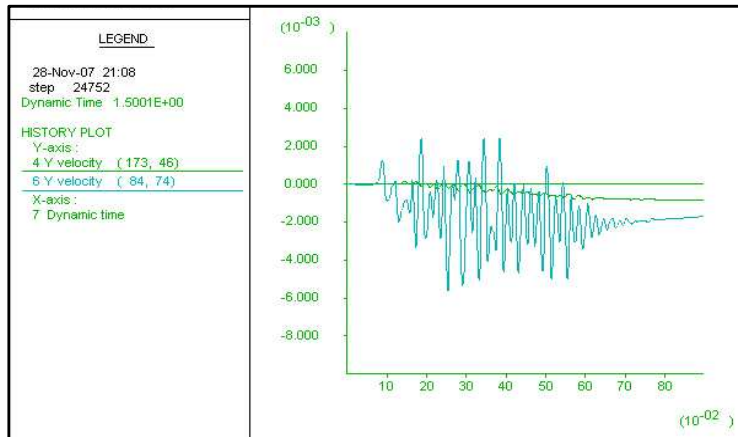


Figure 7.8 Vertical component waveform of 60m and 150m on the dynamic analysis used superposition modeling waveform

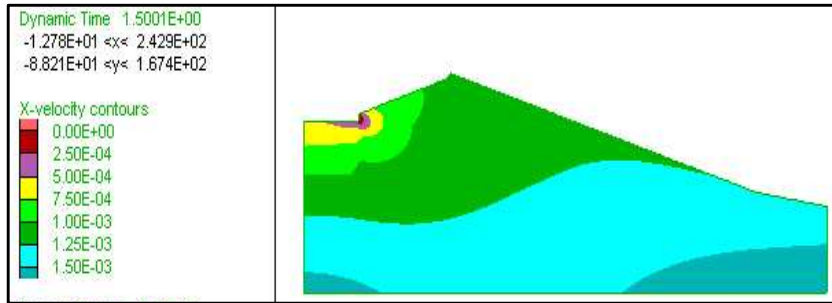


Figure 7.9 X-velocity distribution on the dynamic analysis used superposition modeling waveform

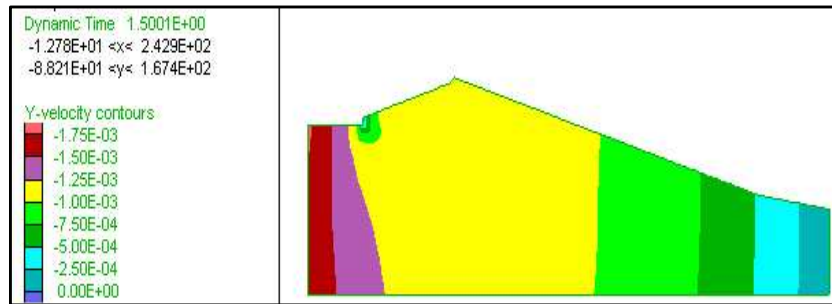


Figure 7.10 Y-velocity distribution on the dynamic analysis used superposition modeling waveform

SN. 1 본발과 파형을 이용한 동적수치해석의 경우 150m지점에서 최대진동속도는 1.22mm/sec가 발생할 것으로 예측되었으며, 실제 150m지점 측정한 최대진동속도는 1.17mm/sec로써 동적수치해석을 통해 0.05mm/sec의 아주 근소한 차이의 진동수준을 예측하였다. SN. 1 본발과 파형을 이용한 동적수치해석 결과를 바탕으로 본 연구에서 수행한 동적수치해석의 적정성을 판단하였다.

다음 Table 7.6은 동적수치해석결과와 60m와 150m에서 실측된 진동속도를 비교한 것이다. Figure 7.11~7.12은 SN. 1 본발과 파형을 이용한 동적수치해석의 결과 발생한 60m와 150m에서의 각 성분별 진동속도파형을 도시한 것이다. 또한 Figure 7.13~7.14은 동적수치해석 결과 수치모델 내에 나타난 X방향 진동속도와 Y방향 진동속도의 분포를 도시한 것이다.

Table 7.6 Compare dynamic analysis result with measuring result

Velocity (mm/sec)	Measuring result		Dynamic analysis result	
	60m	150m	60m	150m
Longitudinal component	15	1.17	16.4	1.22
Vertical component	7	1.13	7.7	1.16

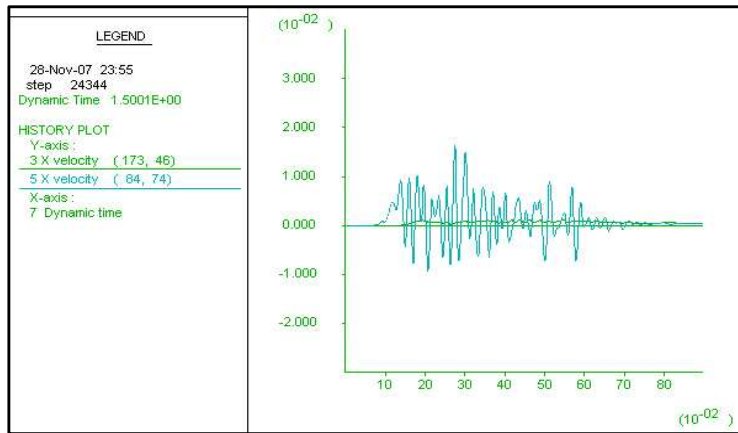


Figure 7.11 Longitudinal component waveform of 60m and 150m on the dynamic analysis used SN. 1 waveform

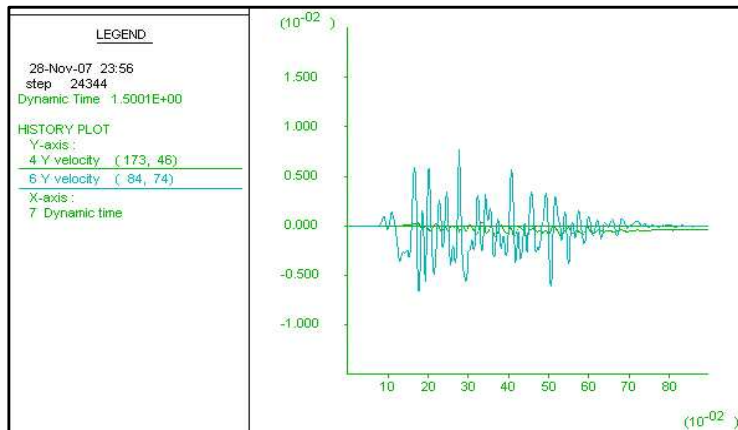


Figure 7.12 Vertical component waveform of 60m and 150m on the dynamic analysis used SN. 1 waveform

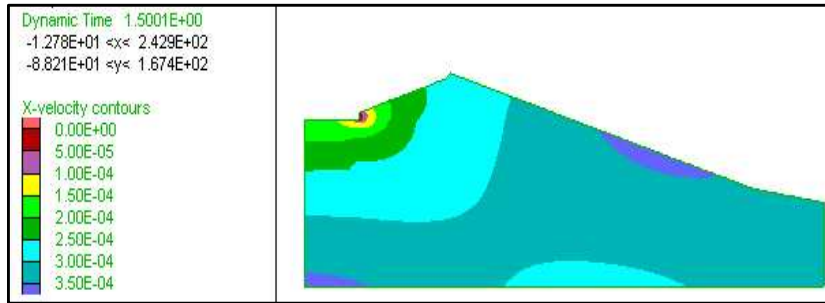


Figure 7.13 X-component velocity distribution on the dynamic analysis used SN. 1 waveform

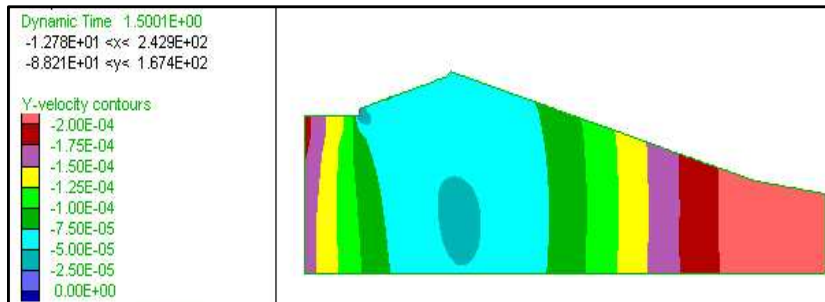


Figure 7.14 Y-component velocity distribution on the dynamic analysis used SN. 1 waveform

이러한 결과로 미루어볼 때 설계단계에서 적절한 단일공 파형이나 시추공발파파형을 획득하여 조건을 변화시킨 중첩모델링을 통해 파형을 획득한다면 보다 정확한 발파동적수치해석을 수행할 수 있을 것으로 생각된다.

## 8. 결 론

본 연구는 단일공 및 시추공 시험발파 파형을 중첩모델링 하여 획득한 진동속도파형을 발파 동적수치해석의 발파하중으로 작용시키는 기법에 관한 연구로서 사전설계 단계에서 실시하는 시추공 발파의 자료를 활용하여 발파시공단계에서 발생할 수 있는 현장 인근 구조물 등에 대한 사전영향평가방법에 관하여 연구하였다.

1. 연구지역에서 계측된 단일공 파형을 이용한 중첩모델링을 통해 본발파 파형은 물론 동일조건으로 발파를 실시하여 측정된 발파 파형에 대한 시차분석 및 파형예측이 가능하였고 이를 통해 중첩모델링에 대한 타당성을 확보하였다.

2. 발파진동은 거리의 변화에 따라 그 주파수 특성이 변하게 된다. 따라서 원거리에서 측정된 데이터를 단순히 증폭만을 실시하여 발파지점의 파형으로 이용하는 것은 발파진동의 주파수특성을 반영하지 못한다는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 최소화하기 위해, 본 연구에서는 측정데이터 중 발파지점과 최단거리인 60m에서 측정된 진동속도파형을 이용하였다.

3. 지금까지는 원거리에서 측정한 진동속도파형을 발파지점의 파형으로 변환하는데 있어 해당지역에서 측정한 최대진동속도의 회귀분석을 통해 획득한 발파진동예측식을 활용하여 보정을 실시했지만 발파진동의 3성분은 각각 진동감쇠특성이 다르게 나타나기 때문에 일률적으로 3성분 모두에 동일한 발파진동예측식을 적용하는 것은 다소 문제가 있을 것으로 사료되어 본 연구에서는 각 성분별 감쇠특성을 파악하여 발파지점의 진동속도파형으로 보정을 실시하였다.

4. 60m에서 측정한 진동속도파형을 보정한 발파지점의 단일공 진동파형을 뇌관의 지연시차와 발파공 배열에 의해 발생하는 기폭초시 오차를 적용한 중첩모델링을 실시하여 동적수치해석에 이용될 진동파형으로 변환하였고 이 파형을 발파하중으로 작용시킨 동적수치해석을 통해 60m와 150m에서의 진동속도를 예측하여 실측값과 비교하였다.

5. 동적수치해석결과 중첩모델링과형의 경우 6.5%의 감쇠율을 적용하였을 때 60m에서 9.8mm/sec, 150m에서 1.75mm/sec의 최대진동속도가 예측되었으며 각 위치의 단일공과형을 중첩모델링한 결과 역시 60m에서 9.91mm/sec, 150m에서 1.64mm/sec로써 수치해석결과와 0.1mm/sec의 근소한 차이를 보였다.

6. 실측과형인 SN. 1 본발과 과형의 경우 5.5%의 감쇠율을 적용 하였을 때 60m에서 16mm/sec, 150m에서 1.22mm/sec의 최대진동속도가 예측되었으며 각 위치에 실측한 진동속도는 60m에서 15mm/sec, 150m에서 1.17mm/sec의 최대진동속도가 계측되어 수치해석결과와 0.05mm/sec의 아주 근소한 차이를 보였다.

7. 기존의 진동속도과형을 이용한 발과 동적수치해석기법은 시추공발과를 그대로 모사하거나, 시험발과를 통해 획득한 실측진동과형을 이용한 동적수치해석을 수행하였다. 하지만 시추공발과는 단일공 수준의 진동수준과 지속시간을 가진 과형으로서 실제 시공단계에서 발생할 수 있는 발과진동과형과는 감쇠특성에 있어 다소 차이가 있을 수 있다. 시험발과를 통해 획득한 실측진동과형 역시 시공단계에서 실규모 발과를 선행해야한다는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서 수행한 단일공 과형의 중첩모델링을 통해 발과조건의 변화에 따른 진동과형을 획득하고, 이 과형을 활용한 동적수치해석을 실시함으로써 사전설계 단계에서 발과공법의 적용에 따른 주변 암반이나 구조물에 발생 가능한 피해의 범위를 산정하는 평가 자료로 활용할 수 있을 것이다.

향후 지속적인 연구를 통해 과형 변환에 있어 주파수 특성까지도 변환시키는 방법에 대한 연구가 필요할 것이며 발과공의 디커플링효과나 장약량 변화에 따른 과형 변화특성에 대한 보다 심도 있는 연구가 수행되어 보다 정밀한 발과 동적수치해석을 수행하여야 할 것이다.



## 참 고 문 헌

1. 강추원, 2005, “발파공학 A to Z”, 『구미서관』, pp. 379~390, 444~446.
2. 이연수, 장서일, 2004, “도심지 발파공사장의 발파진동 특성”, 한국소음진동공학회 논문문집, 제14권, 제7호, pp. 632~638.
3. 김남수, 양형식, 2001, “발파진동의 예측기법과 환경규제 기준으로의 변환 연구”, 한국암반공학회지, 터널과 지하공간, 제11권, 제1호, pp. 14~19.
4. 강추원, 김승현, 박현식, 2006, “중첩모델링을 통한 발파진동의 특성에 관한 연구”, 한국암반공학회지, 터널과 지하공간, 제16권, 제4호, pp. 326~332.
5. 김종인, 2006, “단일공과형 중첩모델링 자료에 의한 발파진동의 예측”, 『조선대학교 박사학위논문』
6. 이창훈, 강추원, 김종인, 2001, “발파공수에 따른 진동속도 특성에 관한 연구”, 대한화약발파공학회, 화약·발파 Vol. 19, pp. 62~70.
7. 최성웅, 박의섭, 선우춘, 정소걸, 2004, “실측과형을 이용한 발파 동해석 기법에 관한 연구”, 한국암반공학회지, 터널과 지하공간, 제14권, 제2호, pp. 108~120.
8. 최준성, 이진무, 조만섭, 2006, “역해석기법을 통한 발파하중 산정 및 수치해석을 이용한 구조물의 진동영향평가”, 한국암반공학회, 터널과 지하공간, 제16권, 제3호, pp. 232-240.
9. 박도현, 조영곤, 전석원, 2006, “실측과형을 이용한 비탈면 발파진동 해석 사례”, 대한화약발파공학회, 화약·발파 제24권, 제2호 99. 41~50.
10. 임한욱, 김진수, 1999, “진동이력분석을 응용한 발파 진동과형의 특성에 관한 연구”, 한국암반공학회, 터널과 지하공간, Vol. 9 pp. 36~47.
11. Starfield, A. M. and Pugliese, J. M., 1968, "Compressional Waves Generated in Rock by Cylindrical Explosive Charges, A Comparison between a Computer Model and Field Measurement", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts. Vol. 5, pp. 65~77.
12. National Highway Institute, 1991, U.S.government printing office, Rock blasting and overbreak control, 5p.
13. Itasca Consulting Group, INC, 2000, FLAC2D-Theory and Background, Version 4.0, Minneapolis:ICG.

14. 미광무국(USBM) 고시 제 656호(Nichols, Johnson & Duvall, Office of Surface Mining(1977), "Surface Mining Reclamation and Enforcement Provisions", Public Law 95-87, Federal Register, Vol. 42, No.289).

## 감사의 글

어느덧 2년간의 대학원 생활을 마치려는 이 시점에서 저에게 항상 힘과 용기를 북돋아 주신 모든 분들께 이 좁은 지면상으로나마 감사의 말씀을 전합니다.

먼저 학부시절부터 대학원을 졸업하는 이 시점까지 항상 사랑으로 보살펴 주시고, 많은 가르침을 주신 강추원 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 저의 부족한 논문을 심사해주시느라 고생 많으신 박천영 교수님과 고진석 교수님, 언제나 열정적인 강의와 끊임없는 관심을 주신 박영석 교수님, 한오형 교수님 이제는 은퇴하셔서 아쉬움 마음이 끝이 없는 이창신 교수님, 양해승 교수님, 서동우 교수님께도 깊은 감사의 말씀 전해드리고 싶습니다.

2년이란 시간동안 암석역학실험실이란 곳에서 좋은 선후배님과의 만남도 많았습니다. 원우회 선배님들이신 원연호 선배님, 김영희 선배님, 추영래 선배님, 한남철 선배님, 조영동 선배님, 노영배 선배님, 강성승 선배님, 박정봉 선배님, 문창일 선배님, 최태홍 선배님, 김재웅 선배님, 김종인 선배님, 위장복 선배님, 이섭 선배님, 강석곤 선배님, 강성진 선배님, 박기동 선배님, 윤석 선배님, 황남순 선배님, 안기호 선배님, 김연수 선배님, 이창원 선배님, 이창훈 선배님, 이수연 선배님, 오현 선배님, 유기정 선배님, 박윤석 선배님, 김수로 선배님, 김영석 선배님, 정순오 선배님, 김운택 선배님, 최강일 선배님, 승민이 형께 감사드립니다. 짧은 기간이었지만 함께 시간을 보낸 규용이 형, 훈재형, 대웅이에게도 감사의 말을 전하고 싶습니다.

또한 항상 많은 시간을 보낸 실험실 식구인 박현식 선배님, 호민이 형, 복현이 형, 동조, 태철이, 상곤이, 두성이, 도형이, 하림이에게 고마움을 전합니다. 또 대학원 생활동안 많은 도움을 준 대학원 동기인 청신이에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

같은 실험실은 아니지만 항상 밝고 따뜻하게 대해주신 김종균 선배님, 영인이 형, 대우 형, 성태 형, 인희, 태진이에게도 고마움을 전합니다.

또 내가 힘들때 항상 힘이 되어 준 친구 호연이, 현오, 승욱이 그 밖에 많은 친구들에게도 감사의 말을 전합니다.

항상 든든하게 내 곁을 지켜주는 큰누나, 큰 매형, 작은 누나, 작은 매형 그리고 예쁜 우리 조카들, 내 착한 동생 미연이에게도 감사의 말을 전합니다. 또 예쁜 딸을 지금껏 키워서 저에게 주신 장인어른과 장모님 또 처갓집 식구들에게도 감사드립니다.

다.

못난 아들에게 모든 것을 주시며 지금의 제가 있게 해준 우리 아버지, 어머니께 진심으로 감사의 말씀을 전합니다. 항상 건강하시고 오랫동안 제 옆에서 많은 가르침을 주십시오. 그 큰 은혜에 보답하는 아들 박지우가 되겠습니다.

마지막으로 사랑으로 9년이란 시간을 속도 좁고 아이 같은 나와 함께 해주고 이제는 영원을 약속해준 이 세상에서 내가 가장 사랑하고 또 지켜줘야할 나의 아내 미경이에게도 감사하다는 말을 전하고 싶습니다.

저를 아끼고 사랑해주시는 모든 분들께 행복이 깃들길 바랍니다.

## 저작물 이용 허용서

학과	자원공학과	학번	20067077	과정	석사
성명	한글 : 박 지 우    한문 : 朴 志 雨    영문 : Park, ji woo				
주소	광주광역시 서구 화정3동 847-1				
연락처	E-MAIL : iamjiwoo@hanmail.net				
논문제목	한글 : 중첩모델링자료를 활용한 발파 동해석기법에 관한 연구 영어 : A Study on the Blasting Dynamic Analysis Using Superposition Modeling Data				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다            음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의( ○ )    반대(    )

2007 년 12 월    일

저작자: 박 지 우            (인)

조선대학교 총장 귀하