

2006년 8월  
석사학위논문

중첩 모델링을 통한  
발파진동의 특성에 관한 연구

조선대학교 대학원

자원공학과

김 승 현

중첩 모델링을 통한  
발파진동의 특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Blasting Vibration  
by Superposition Modeling

2006년 8월 25일

조선대학교 대학원

자원공학과

김 승 현

중첩 모델링을 통한  
발파진동의 특성에 관한 연구

지도교수    강    추    원

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2006년 4월    일

조선대학교 대학원

자원공학과

김    승    현

# 김승현의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 고진석 ㉠

위원 조선대학교 교수 한오형 ㉠

위원 조선대학교 교수 강추원 ㉠

2006년 5월 일

조선대학교 대학원

# 목 차

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| List of Tables .....               | i  |
| List of Figures .....              | ii |
| Abstract .....                     | iv |
| <br>                               |    |
| 1. 서 론 .....                       | 1  |
| 2. 연구지역의 지질개요 .....                | 3  |
| 2.1 연구지역의 지형 .....                 | 3  |
| 2.2 지질 및 광상 .....                  | 3  |
| 3. 발파진동의 이론 .....                  | 5  |
| 3.1 진동의 기초이론 .....                 | 5  |
| 3.2 파동의 중첩과 간섭 .....               | 8  |
| 3.3 발파진동의 특성 .....                 | 9  |
| 3.4 MS 지발에 의한 입자속도의 감소 이론 .....    | 12 |
| 3.5 Cooperating Charge와 시차이론 ..... | 15 |
| 3.5.1 Cooperating Charge 이론 .....  | 15 |
| 3.5.2 Langefors의 시차이론 .....        | 17 |
| 3.6 8ms 기준(8ms Criterion) .....    | 17 |
| 4. 발파 개요 및 진동 측정 .....             | 19 |
| 4.1 발파 개요 .....                    | 19 |
| 4.2 발파진동 측정기 .....                 | 21 |
| 4.2.1 발파진동 측정기의 구성 .....           | 21 |
| 4.2.2 발파진동의 측정 .....               | 22 |

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 5. 측정결과 및 분석 .....                  | 23 |
| 5.1 발파진동 측정결과 .....                 | 23 |
| 5.2 발파진동 파형의 분리 .....               | 24 |
| 5.3 FFT 분석에 의한 우세 주파수 결정 .....      | 27 |
| 5.4 중첩 모델링에 의한 발파진동 파형 분석 .....     | 28 |
| 5.4.1 중첩 모델링에 의한 PPV 측정 .....       | 28 |
| 5.4.2 진동의 지속시간과 지연시차의 연관성 검토 .....  | 28 |
| 5.4.3 발파공수의 변화가 PPV에 미치는 영향 .....   | 33 |
| 5.5 Langefors의 시차이론을 통한 결과 검토 ..... | 48 |
| 6. 결 론 .....                        | 51 |
| 참 고 문 헌 .....                       | 53 |

## *List of Tables*

|   |    |
|---|----|
| Table 3.1 Reduction factors for the number of charges .....     | 15 |
| Table 4.1 Summary of test blasting .....                        | 19 |
| Table 5.1 Result of vibration monitoring .....                  | 23 |
| Table 5.2 Result of separation waveform .....                   | 24 |
| Table 5.3 PPV of SN. 1 by superposition modeling analysis ..... | 29 |
| Table 5.4 PPV of SN. 4 by superposition modeling analysis ..... | 31 |
| Table 5.5 PPV of SN. 1 per period .....                         | 49 |
| Table 5.6 PPV of SN. 4 per period .....                         | 49 |

## *List of Figures*

|   |    |
|---|----|
| Figure 2.1 Geological map of study area .....   | 4  |
| Figure 3.1 Displacement, Velocity, Acceleration waveform .....                              | 7  |
| Figure 3.2 Constructive interference .....  | 8  |
| Figure 3.3 Destructive interference .....   | 8  |
| Figure 3.4 Schematic of the fracturing and deformation around an explosion in<br>rock ..... | 10 |
| Figure 3.5 Three components of blasting vibration measured in surface .....                 | 11 |
| Figure 3.6 Decreasing particle velocities with millisecond delays .....                     | 13 |
| Figure 3.7 Effect of delays on time histories .....   | 14 |
| Figure 3.8 Cooperating charge is related to distance .....                                  | 16 |
| Figure 4.1 Conditions of test blasting .....  | 20 |
| Figure 4.2 Firing pattern .....   | 20 |
| Figure 4.3 Typical drawing of blast monitoring .....  | 21 |
| Figure 5.1 Full waveform of SN. 1 .....   | 25 |
| Figure 5.2 Separation waveform of SN. 1 .....   | 25 |
| Figure 5.3 Full waveform of SN. 4 .....   | 26 |
| Figure 5.4 Separation waveform of SN. 4 .....   | 26 |
| Figure 5.5 Result of FFT analysis(SN. 1) .....  | 27 |
| Figure 5.6 Result of FFT analysis(SN. 4) .....  | 27 |
| Figure 5.7 Superposition modeling waveform of SN. 1(2 hole) .....                           | 34 |
| Figure 5.8 Superposition modeling waveform of SN. 1(3 hole) .....                           | 34 |
| Figure 5.9 Superposition modeling waveform of SN. 1(4 hole) .....                           | 35 |
| Figure 5.10 Superposition modeling waveform of SN. 1(5 hole) .....                          | 35 |



|   |    |
|---|----|
| Figure 5.11 Superposition modeling waveform of SN. 1(6 hole) .....  | 36 |
| Figure 5.12 Superposition modeling waveform of SN. 1(7 hole) .....  | 36 |
| Figure 5.13 Superposition modeling waveform of SN. 1(8 hole) .....  | 37 |
| Figure 5.14 Superposition modeling waveform of SN. 1(9 hole) .....  | 37 |
| Figure 5.15 Superposition modeling waveform of SN. 1(10 hole) ..... | 38 |
| Figure 5.16 Superposition modeling waveform of SN. 1(11 hole) ..... | 38 |
| Figure 5.17 Superposition modeling waveform of SN. 1(12 hole) ..... | 39 |
| Figure 5.18 Superposition modeling waveform of SN. 1(13 hole) ..... | 39 |
| Figure 5.19 Superposition modeling waveform of SN. 1(14 hole) ..... | 40 |
| Figure 5.20 Superposition modeling waveform of SN. 1(15 hole) ..... | 40 |
| Figure 5.21 Superposition modeling waveform of SN. 4(2 hole) .....  | 41 |
| Figure 5.22 Superposition modeling waveform of SN. 4(3 hole) .....  | 41 |
| Figure 5.23 Superposition modeling waveform of SN. 4(4 hole) .....  | 42 |
| Figure 5.24 Superposition modeling waveform of SN. 4(5 hole) .....  | 42 |
| Figure 5.25 Superposition modeling waveform of SN. 4(6 hole) .....  | 43 |
| Figure 5.26 Superposition modeling waveform of SN. 4(7 hole) .....  | 43 |
| Figure 5.27 Superposition modeling waveform of SN. 4(8 hole) .....  | 44 |
| Figure 5.28 Superposition modeling waveform of SN. 4(9 hole) .....  | 44 |
| Figure 5.29 Superposition modeling waveform of SN. 4(10 hole) ..... | 45 |
| Figure 5.30 Superposition modeling waveform of SN. 4(11 hole) ..... | 45 |
| Figure 5.31 Superposition modeling waveform of SN. 4(12 hole) ..... | 46 |
| Figure 5.32 Superposition modeling waveform of SN. 4(13 hole) ..... | 46 |
| Figure 5.33 Superposition modeling waveform of SN. 4(14 hole) ..... | 47 |
| Figure 5.34 Superposition modeling waveform of SN. 4(15 hole) ..... | 47 |
| Figure 5.35 Relationship between PPV and delay time by SN. 1 .....  | 50 |
| Figure 5.36 Relationship between PPV and delay time by SN. 4 .....  | 50 |

# *Abstract*

## *A Study on the Characteristics of Blasting Vibration by Superposition Modeling*

Kim, Seung-hyun

Advisor : Prof. Kang, Choo Won

Department of Resource Engineering,

Graduate School of Chosun University

To analyze vibration measurement through vibration level is very important the decision of charge weight per delay. Though the identical charge weight per delay, it is big widely increased and decreased according to a condition of free-face, an initiating method of detonator and a condition of in-situ rock. Therefore to examine a calculation of accurate charge weight per delay and increase and decrease cause of vibration is demanded the waveform analysis and the frequency analysis.

On this study, the two vibration waveform of the single hole which is not interfered from the different blasting holes is separated, the each dominant frequency which is determined through the Fast Fourier Transform(FFT) is measured with 164Hz and 79Hz. Also the separation waveform executed a superposition modeling which changes to delay time from 1ms to 80ms in 1ms interval and controls the number of blasting holes from 2 holes to 15 holes in order to investigate the effect of PPV according to the duration time of the

vibration and the number of blasting holes.

As a result of analysis, the longer the duration time of the vibration, the longer the delay time which is not interfered from the different blasting holes and the effect regarding the number of blasting holes from inside identical delay time did not appear a lot.

As a result of comparison with the delay time theory of Langefors, the amplification of the vibration appeared small from the delay time of  $0.5T$ ,  $1.5T$ ,  $2.5T$ , the amplification of the vibration appeared large from the delay time of  $1T$ ,  $2T$ ,  $3T$ , and the amplification of the vibration hardly ever appeared from the delay time which exceeds  $3T$ .

# 1. 서론

오늘날 우리사회는 산업화 과정을 통하여 고도의 성장을 지속해오는 동안에 등한시되었던 환경문제, 특히 건설 분야에서는 소음·진동 문제가 최근에는 급속히 부상되고 있는 등 이제 양적인 성장에서 질적인 성장으로 변화를 추구하고 있는 상황이다. 또한, 정부차원에서도 이와 같은 현실을 고려하여 환경피해의 규제를 위한 수단으로 환경 분쟁 조정위원회를 상설기구로 발족시켜 운영하고 있는 실정이다.

포괄적 의미의 건설 소음·진동이라 하면 항타기, 브레이크 등의 대형장비에 의한 것과 암반굴착을 위한 발파 소음·진동을 포함하게 되는데, 지금까지는 일반적으로 발파에 의한 소음·진동은 별개로 취급되어 왔다.

그러나 최근에 위에서 언급한 바와 같이 환경문제가 극심한 사회문제로 대두되기 시작하자, 발파작업에 의한 소음·진동의 경우도 일반 소음·진동 규제법에 의하여 준용되고 있는 경우가 많다.

이러한 상황에서 발파에 의한 작업은 더욱 규제를 받게 되고, 발파기술자들은 종래의 발파방법보다 효과적으로 진동제어를 하려는 관점에서 더욱 많은 노력을 기울이고 있는 상황이다.

발파진동의 전파특성을 결정짓는 조건은 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, 폭발원과 측정간의 거리 등을 말한다.<sup>1)2)</sup>

이 요인들 모두가 발파진동의 크기와 전파특성에 영향을 미치게 되며, 이 중에서 특히 지발당 장약량과 측정간의 거리가 가장 중요한 요인으로 작용한다. 하지만 측정간의 거리는 조절 불가능한 변수인 반면 지발당 장약량은 조절 가능한 변수로서

동일한 발파조건일 경우 발파진동의 크기를 결정짓는 가장 중요한 요인이 된다.

하지만 현재 우리나라의 지발당 장약량은 발파진동의 특성을 배제한 채 단순히 8ms 지연시차 이내의 최대 장약량으로 규정하고 있는 실정이다. 이 기준은 1960년 Duvall 등에 의해 실시된 연구<sup>3)</sup>를 바탕으로 마련된 것으로 지금까지는 커다란 문제 제기 없이 받아들여지고 있었으나, 더욱 심해지는 발파 소음·진동의 규제에 의해 8ms의 한계성이 대두되고 있다.

외국의 경우에는 발파진동의 특성을 이용한 진동 저감 방법 등이 연구 되어 현장 실무에 이용되고 있으며, 안전 발파의 한계를 보다 명확하게 설정하기 위해 발파진동의 주파수 분석과 지반 및 구조물의 변형에 대한 연구가 이루어져 왔다.<sup>4)5)</sup>

또한 국내의 경우에도 발파에 의한 지반진동의 수준 및 주파수 특성 예측과 발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구를 수행하는 등 많은 연구가 진행되어 오고 있다.<sup>6)7)8)9)</sup>

이처럼 발파진동의 특성을 배제한 8ms 기준에 의한 뇌관 시차설계는 더욱 심해지는 발파 소음·진동의 규제에서 벗어나기 힘든 실정이고, 이는 발파작업의 수행을 저해하는 결과를 초래 하게 될 것이다.

그러므로 본 연구에서는 발파진동 특성을 알아보기 위해 측정된 진동파형을 토대로 다른 발파공들로부터의 간섭받지 않는 단일공의 진동파형을 분리하였으며, 이를 FFT 분석을 통해 우세 주파수를 분석하였다. 또한 분리된 진동파형을 2 ~ 15공으로 발파공수를 조절하면서, 1 ~ 80ms까지 1ms의 간격으로 지연시차에 변화를 주어 발파진동의 중첩 모델링을 실시하였다. 이로 인해 진동 지속시간의 길이와 지연시차와의 연관성, PPV(Peak Particle Velocity)에 미치는 발파공수의 영향 등을 분석하였으며, 또한 우세 주파수와 지연시차와의 관계를 검토하였다.

## 2. 연구지역의 지질개요

### 2.1 연구지역의 지형

본 연구지역은 동쪽으로 비교적 산세가 가파르고 급한 산봉들이 북동-남서방향으로 연결되고 있으며, 영산강 유역의 저지대에 속하고 연구지역의 북서부는 대체로 산세가 높은 고지대이다. 주요 수계는 소백산맥과 노령산맥 그리고 연한 평야에서 이들과 평행하게 북동-남서방향으로 흐르는 영산강이며, 연구지역을 통과하는 극락강과 인접한 황룡강 및 평동천은 영산강의 지류이다.

### 2.2 지질 및 광상

본 연구지역 일대의 지질은 선캠브리아기의 화강암질 편마암, 고생대 후기의 북동-남서방향의 퇴적분지, 쥐라기에 남서-북동방향으로 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, 쥐라기 화강암이 대규모 저반을 형성하고 있다.

본 연구지역의 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 주성분 광물은 칼리장석·사장석과 흑운모이며 부성분은 각섬석·자철광·Zircon·인회석 등이다.

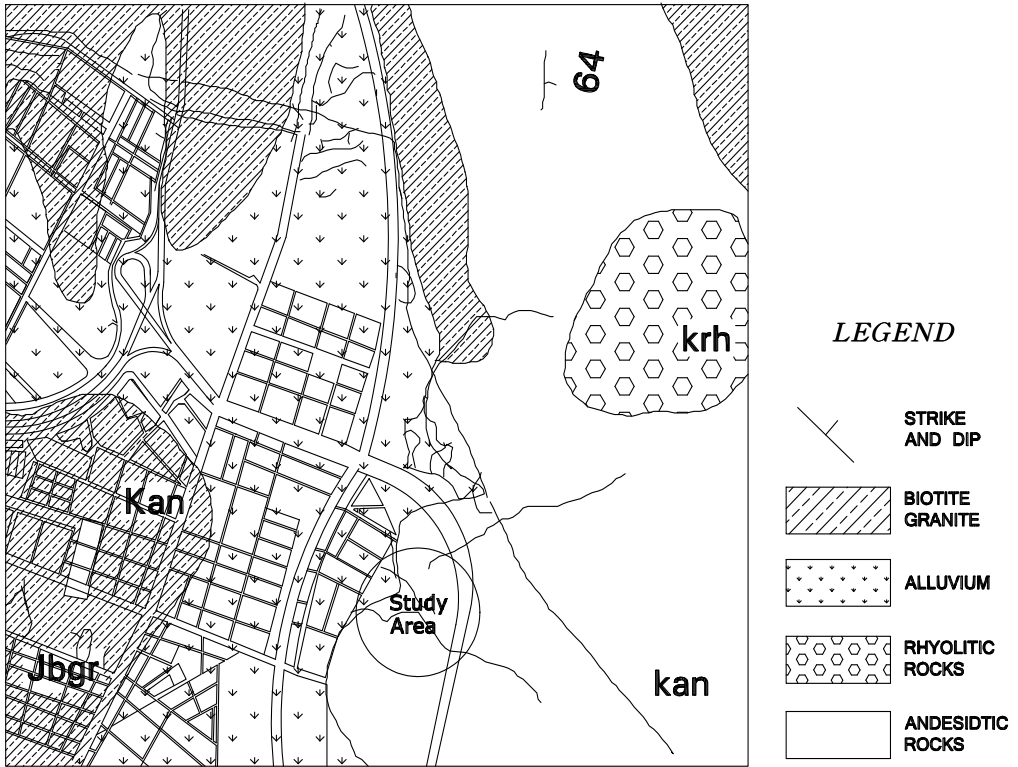


Figure 2.1 Geological map of study area

### 3. 발파진동의 이론

#### 3.1 진동의 기초이론

진동에서 가장 단순한 것은 시간의 경과와 함께 동일한 형상이 반복되는 것이다. 그러나 일반적으로 진동이 반복되는 간격은 항상 일정시간 간격은 아니고 또 동일 형상이라도 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. 지금 진동하고 있는 점 A의 위치가 시간적으로  $\pm X$ 의 사이에서 반복운동을 되풀이하는 경우를 고려해 보자. 어떤 시간 t에 있어서 점 A의 위치  $x$ 가 시간적으로 정현 변화한다고 가정하면  $x$ 의 관계를 다음 식으로 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 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 사이클이라 하고 1초간에 반복되는 cycle수를 진동수 또는 주파수라 한다. 주기는 초(sec) 등의 시간으로 나타내고 진동수 cycle(c/sec) 또는 헤르츠(Hz)로 나타낸다. 진동수  $f$ 와 주기  $T$  사이에는 다음 관계가 있다.



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

전술의 정현진동의 경우 어느 시간  $t_1$ 으로부터  $2\pi/\omega$ 만 경과하면 변위  $x$ 는

$$\begin{aligned} x &= X \sin[\omega(t_1 + \frac{2\pi}{\omega}) + \phi] \\ &= X \sin(\omega t_1 + 2\pi + \phi) \\ &= \sin(\omega t_1 + \phi) \end{aligned} \quad (3.3)$$

로 되며 시간  $t_1$ 의 변위는 완전히 동일한 위치에 되돌아오기 때문에 주기  $T$ 는

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

로 되고 또 진동수  $f$ 는

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

로 된다. 따라서  $\omega$ 는  $2\pi$ 시간 사이에  $x$ 가 몇 회 동일한 상태로 되돌아오는가를 나타내는 횟수를 나타내며 단진동수 또는 각진동수라 부른다. 시간적으로 변화하는 진동현상을 표현하는 진동량에는 변위 외에 속도와 가속도가 있다. 속도는 변위의 시간에 대한 변화의 비율이고, 가속도는 속도의 시간적 변화의 비율이다. 따라서 속도  $v$ 는 변위  $x$ 를 시간  $t$ 로 미분해서 얻어진다. 정현진동의 경우는 식(3.1)에 의하면,

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

로 된다.  $\omega X$ 는 이때의 최대치로 속도 진폭이라 부른다.

또 가속도  $a$ 는 속도  $v$ 를 시간  $t$ 로 미분하여 얻어지는데 식(3.6)에 의해

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

로 된다.  $\omega^2 X$ 는 가속도진폭이라 부른다.

Figure 3.1은 정현진동의 위상각( $\phi$ )이 0인 경우의 변위, 속도 및 가속도의 파형을 나타내며, 이를 통해 알 수 있듯이 속도의 파형은 변위의 파형에 비해  $90^\circ$  진행해 있다. 이것을 위상이  $90^\circ$  나아갔다고 한다. 이것은 식(3.1)과 (3.6)에 명확히 나타나 있다. 마찬가지로 가속도의 위상은 속도의 위상보다  $90^\circ$  더 진행하고 있고 또, 가속도의 위상은 변위의 위상보다  $180^\circ$  진행하고 있음을 알 수 있다. 이들 변위, 속도, 가속도, 상호간의 진폭 및 위상에 관한 관계는 정현진동에 대해서만 성립하며, 비조화진동에서는 성립하지 않는다.

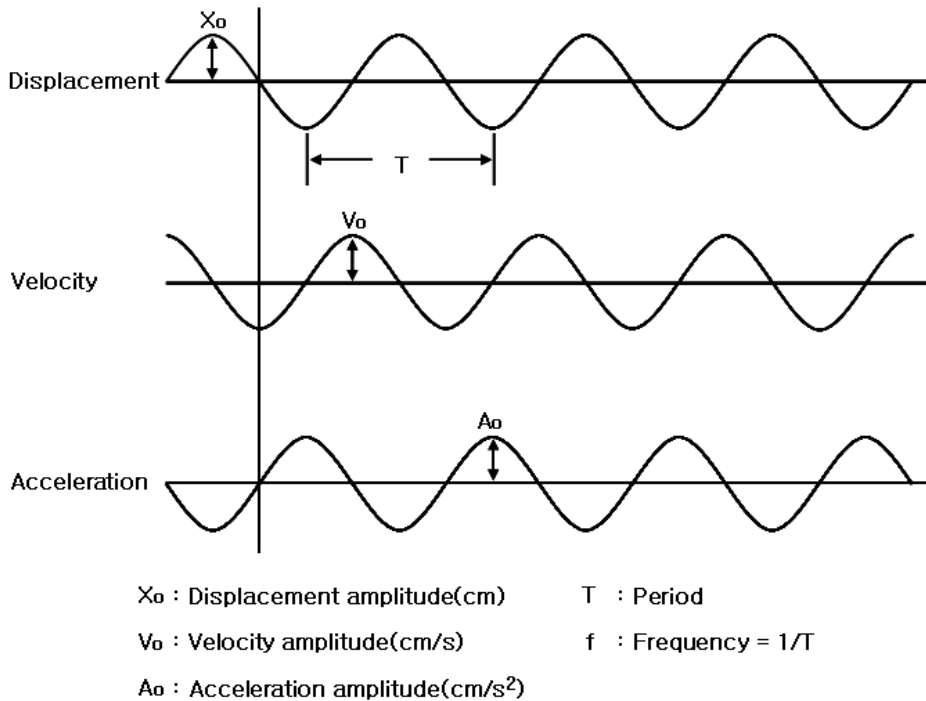


Figure 3.1 Displacement, Velocity, Acceleration waveform

### 3.2 파동의 중첩과 간섭

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

중첩의 원리란 “둘 또는 그 이상의 진행 파동이 매질을 통과하는 경우, 그 결과 생기는 파동은 각 지점에서 각 파동의 변위를 서로 합함으로써 얻어진다.”라는 것으로서, 중첩 원리의 중요성은 두 진행 파동은 파괴되거나 변화되지 않고 서로 통과할 수 있다는 것이다.

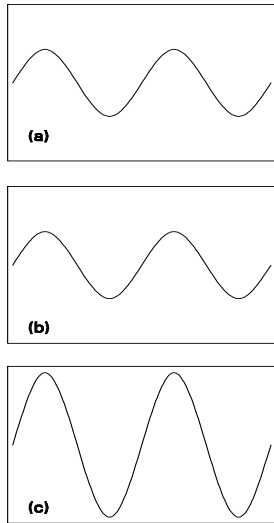


Figure 3.2

Constructive interference

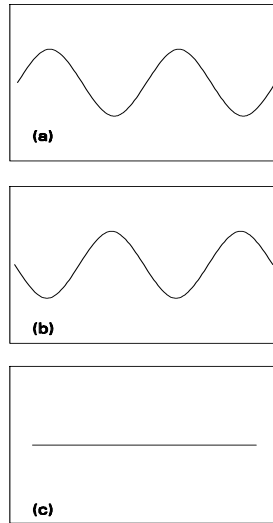


Figure 3.3

Destructive interference

Figure 3.2의 (a)와 (b)는 같은 진폭과 진동수를 갖는 두 파동을 보여준다. 어느 순간 이들 두 음파가 공간의 같은 영역을 통과하려 한다면, 그 순간의 결과로서 생기는 파동은 Figure 3.2의 (c)와 같은 형태를 갖게 될 것이다. 이와 같은 경우의 파동은 위상이 같다고 하고 “보강 간섭(Constructive Interference)을 일으킨다.”라고 한다.

Figure 3.3의 (a)와 (b)는 두 유사한 파동을 보여준다. 그러나 이 경우 한 파동의 마루가 다른 파동의 골과 일치한다. 즉, 한 파동은 다른 파동과 역으로 관련되어 있으며, 그 결과 생기는 파동은 Figure 3.3의 (c)와 같이 완전히 상쇄된 상태를 보인다. 이러한 상황에서 두 파동은  $180^\circ$  위상이 어긋났다고 하며 “상쇄 간섭(Destructive Interference)을 일으킨다.”라고 한다.

### 3.3 발파진동의 특성<sup>1)</sup>

폭약이 장약공내에서 폭발하면 수만에서 수십만 기압에 달하는 강력한 충격압과 가스압, 그리고 대단히 높은 고온이 발생한다. 이 때 Figure 3.4과 같이 충격압과 고온에 의해 발파공에서 수mm ~수십mm 이내에 인접한 암반은 녹아내리거나 잘게 파쇄 되어 파쇄대를 형성하고, 연속되는 가스압과 충격파의 전달로 인해 파쇄대 외부의 암반에는 균열이 발생, 전파되어 균열대를 형성하게 된다.

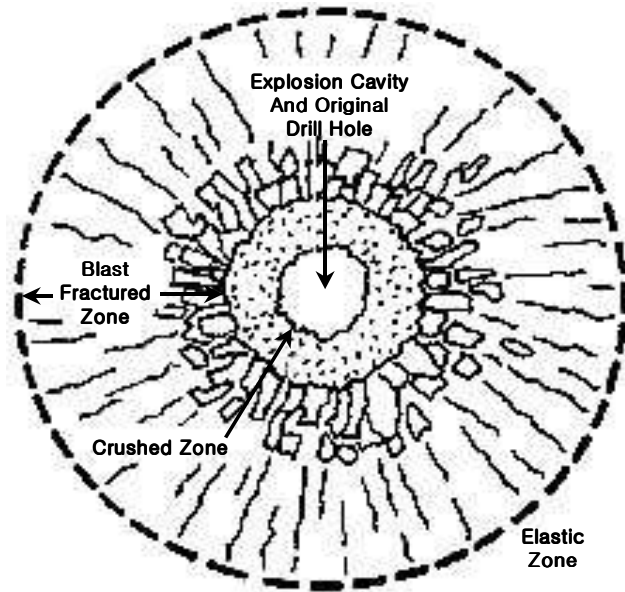


Figure 3.4 Schematic of the fracturing and deformation around an explosion in rock

폭원으로부터 3차원적으로 전파된 충격압에 의한 충격파는 거리에 따라 현저히 감소되어 발파에 의한 에너지의 일부가 탄성파의 형태로 균열대 외부의 암반 중에 전파되어 간다. 이러한 탄성파는 암반 중에 전파되어 가면서 지반의 진동을 발생시키게 되는데, 이를 발파진동(Blasting Vibration)이라 한다.

탄성파는 암반이나 토양의 체적을 통하여 전파되는 체적파(물체파 : Body Wave)와 표면, 특히 상부 지표면을 따라 전파되는 표면파(Surface Wave)로 분류된다. 이러한 탄성파가 암반 중을 전파하면서 지반진동을 일으키게 되는데, 한 점에서의 지면의 운동은 진폭과 주기를 갖는 진동으로 나타난다. 이와 같은 발파에 의한 지반진동은 변위(Displacement), 속도(Velocity), 가속도(Acceleration)의 3종류로 표시되고 있다.

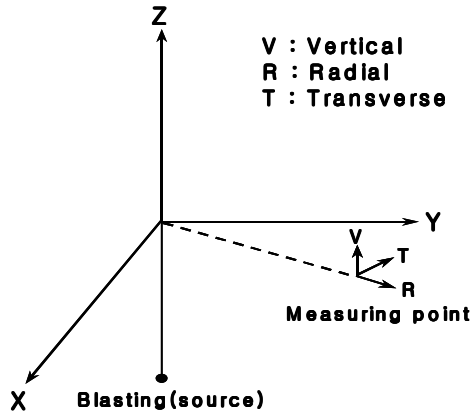


Figure 3.5 Three components of blasting vibration measured in surface

지반진동의 측정은 그 방향에 따라 Figure 3.5와 같이 폭원으로부터 측정점을 향하는 평면상과의 진행성분(Radial 혹은 Longitudinal), 진행방향에 직교하는 수직성분(Vertical), 이들 두 방향과 직각을 이루는 접선성분(Transverse)의 세 성분으로 이루어진다.

이들 세 성분의 상대적 크기는 대상 암반이나 지형 및 발파에 의해 생성된 탄성파 즉, P파(압축파, 종파, Primary Waves), S파(전단파, 횡파, Secondary Waves) 및 표면파인 Rayleigh Waves 등의 상호 간섭에 따라 변하고 진동의 주파수는 각각 다르게 나타난다. 따라서 3성분 중 각각 단일성분(V, T, R)에 대한 크기와 우월성분의 최대치가 원하는 계측 위치에서 측정될 수 있어야 한다.

이러한 탄성파의 파형은 매우 복잡하여 폭원으로부터 근거리에서는 육안상 구분되지 않고 복합파의 형태로 나타나며, 비교적 원거리에서는 전파속도가 느린 표면파가 지배적인 것으로 알려져 있다.

지반진동의 크기를 표시하거나 허용수준을 설정하려면 지반진동 크기를 비교할 수 있는 척도가 필요하며, 그 크기정도를 변위 · 진동속도 · 진동가속도의 세 가지 형태로 표시할 수 있다.

### 3.4 MS 지발에 의한 입자속도의 감소 이론<sup>10)</sup>

MS 지발 뇌관과 다단 발파기의 출현으로 파쇄도를 적절히 유지하면서 입자 속도는 감소시킬 수 있게 되었다. 미광무국(USBM)이 주도한 일련의 실험들(Devine, 1966)은 입자속도를 감소시키는데 있어 MS 지발 발파의 효과를 보여 주고 있다.

같은 석회암 채석장에서 발파공들 사이의 MS 지발초시만 다르게 설계하였고, 다른 조건들은 비슷하게 설계하여 발파를 실시하였으며, 자유면에 수직한 선을 따라 발파점의 일정한 거리에서 입자속도의 시간이력을 기록하였다. 7공과 15공 발파에서 각 지발시간에 대해 거리를 증가시키면서 기록한 최대 속도를 Figure 3.6에 나타내고 있다.

7공 발파에서, MS 지발 발파를 실시한 결과 진행성분(최대정점 입자속도의 성분)의 입자 속도가 3 ~ 5배로 감소되었다. 접선성분(자유면에 대해 평행이고, 세 성분 중 가장 작은 값)에서는 진행성분이나 수직성분에서 만큼 감소 효과가 크지 않았다. 15공 발파에서는 감소효과가 더 작았는데 이는 아마도 절대 기록시간이 길어지는데 따른 뇌관 기록오차에 기인한 것 같다. 7공 지발 발파와는 달리 15공 지발 발파에서는 9ms 지발로 최저입자 속도가 되지 않았으며, 이것도 또한 뇌관의 기록오차와 관련 있을 것으로 생각된다.

지발 간격은 Figure 3.7에서와 같이 정점 파동의 우세 주파수에 영향을 줄 수 있다. 수직성분의 정점 우세 주파수는 순발, 34ms, 9ms 지발에 대해서 각각 16Hz, 33Hz, 100Hz였는데, 이는 지발 시간의 역수이다. 더 먼 거리에서는 9ms 지발 발파의 높은 주파수 성분은 없어지고 16Hz 신호가 우세하다. 이 16Hz 신호는 아마 레일리파의 우세 주파수에 해당할 것이다.

토양층이 얇은 다른 부지에서 중간 정도 거리로 우세 주파수에 대한 지발간격의 영향을 관측하였다(Dowding, 1971). 어떤 학자들은 지발 간격의 결과가 분명하지 않다고 주장한다. 그러나 이런 결론은 두꺼운 토양층에서 발파하여 높은 주파수가 소실되어지는 것을 간과하기 때문일 것이다.

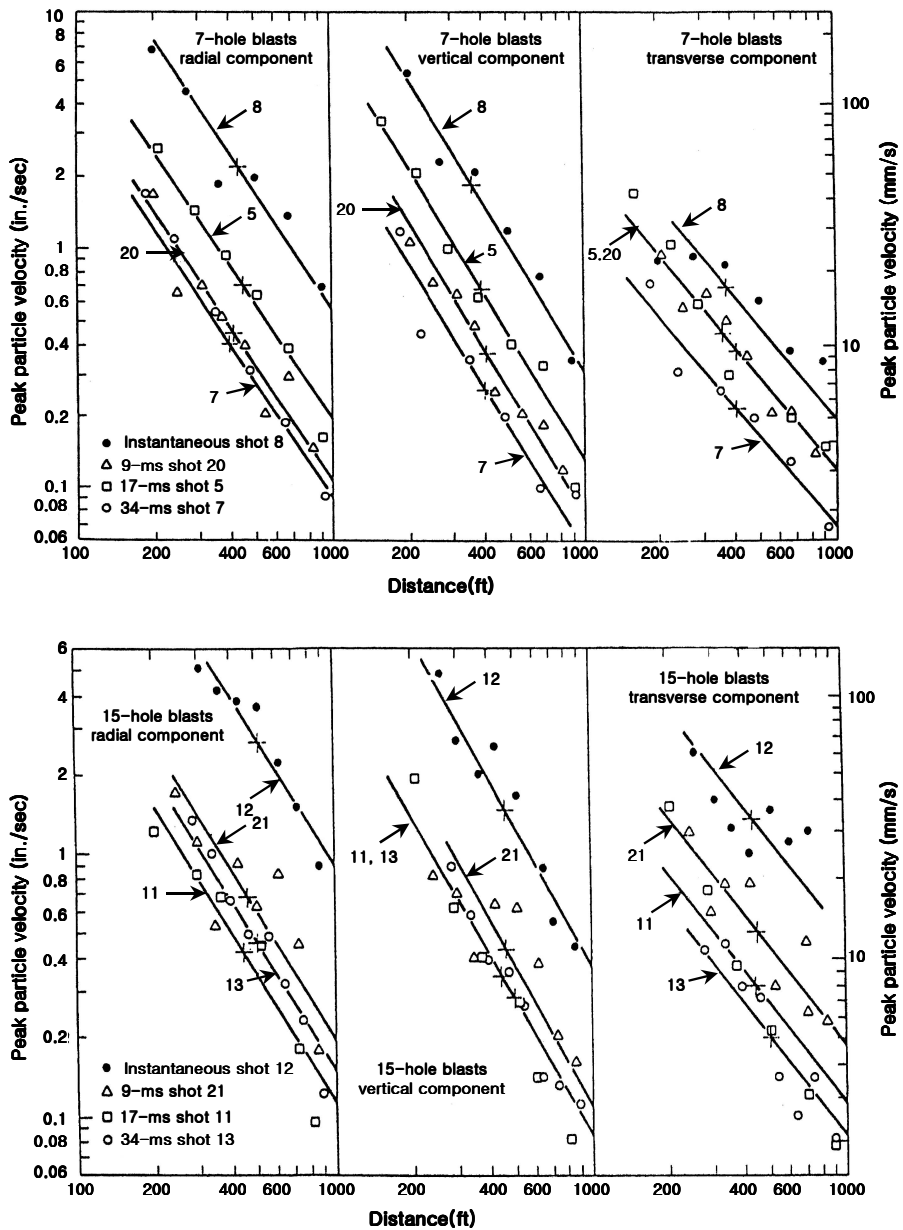


Figure 3.6 Decreasing particle velocities with millisecond delays

(From Nicholls et al., 1971.)



이 실험들의 가장 중요한 결론은 총 장약량보다는 지발당 장약량으로 최대 입자 속도를 더 잘 예측할 수 있다는 것이다. 이 결론은 거리에 따른 입자 속도의 감쇠를 예측하는 거의 모든 환산 기법의 토대가 되었다.

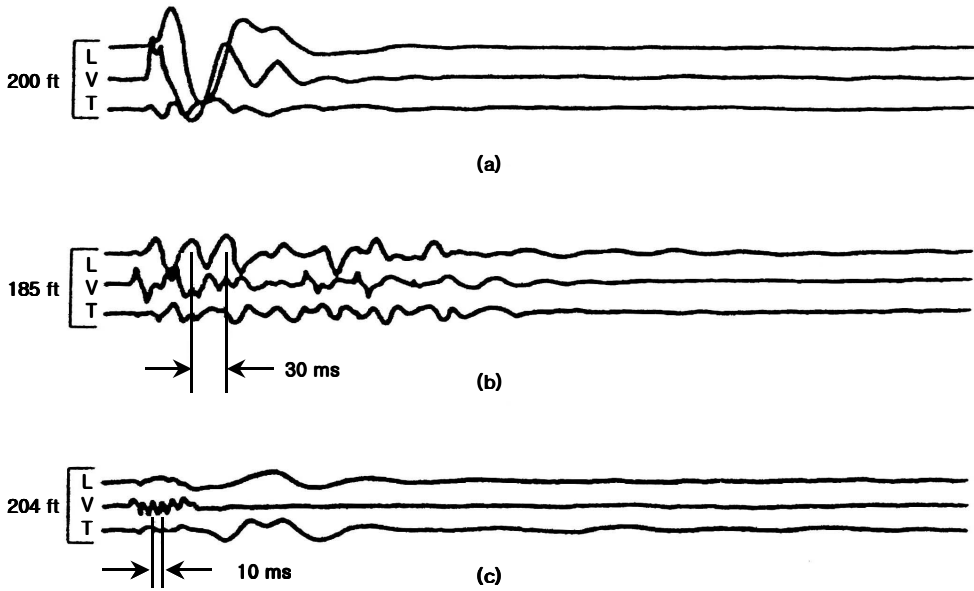


Figure 3.7 Effect of delays on time histories(630kg/total, 90 kg/delay)

(a) Instantaneous; (b) 34ms delay; (c) 9ms delays.

(After Nicholls et al., 1971.)

### 3.5 Cooperating Charge와 시차이론

#### 3.5.1 Cooperating Charge 이론

지발 뇌관을 사용하면 지발 단차 시간당 보다 높은 총 장약량으로 발파가 가능하며, 협동장약은 단차 시간당 총 장약량에 사용된 단차에 대한 적당한 감소인자의 곱으로 정의 되어질 수 있다.<sup>11)</sup>

미국(USBM)에서는 2개의 발파공이 분리된 장약으로 간주되어지기 위해서는 지연단차 시간이 8ms(millisecond)와 동일하거나 이보다 커야한다고 말한다.

Table 3.1의 감소인자는 지표면 진동의 특정 주파수가 60Hz 이상일 경우에만 적용되며, 우세 주파수(주 진동수)가 낮아짐에 따라 감소인자는 1에 가까워진다.

Langefors와 Kihlström(1973년)은 다른 주파수들에서 다양한 분산을 가진 뇌관들에 의한 감소인자를 설명했다. Table 3.1은 주파수가 60Hz 이하일 경우에는 사용할 수 없다.<sup>12)</sup>

Table 3.1 Reduction factors for the number of charges

| Interval time | Interval No. | Reduction factor |
|---------------|--------------|------------------|
| 25ms          | 1 ~ 10       | 1/2              |
| 25ms          | 11 ~ 20      | 1/3              |
| 500ms         | > 20         | 1/6              |

협동장약의 표현은 오직 정확한 거리에서만 적용되므로 다소 부정확하다.

Figure 3.8과 같이 동일한 지연시차를 가진 뇌관을 이용하여 2개의 발파공을 발파 할 때, 진동이 짧은 거리에서 측정되면 2개의 발파공들은 서로 협력되지 않는다. 반면에 먼 거리에서 측정되면 발파공들 사이에서 간섭과 증폭이 일어난다. 발파공들 사이에서의 협력 여부는 아래의 요소에 의해 결정된다.

- 기폭점 사이의 시간 간격
- 모암에서의 진동 전달 속도
- 진동 감쇠 속도
- 관측점에서 장약공까지의 거리
- 장약 형태
- 폭속
- 구속도

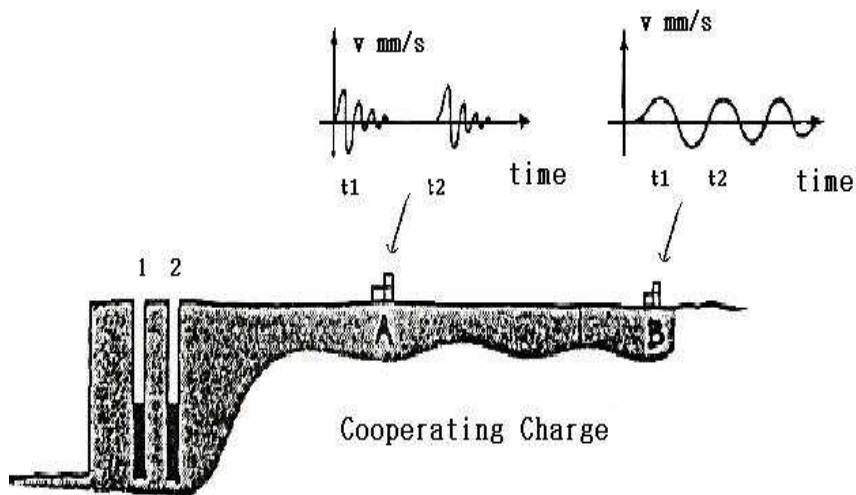


Figure 3.8 Cooperating charge is related to distance

### 3.5.2 *Langefors*의 시차이론

지발 뇌관을 사용함에 있어서 고려해야 할 것은 발파진동의 주기( $T$ )와 사용뇌관의 시차관계이다.

*Langefors*의 시차이론은 다음과 같다.

$$\tau = HT \quad (3.7)$$

여기서,  $\tau$ : 지발뇌관의 시차

$H$ : 상수

$T$ : 발파진동의 주기

$H$ 값이 0.5, 1.5, 2.5일 때 진동의 감쇠가 가장 좋고,  $H$ 값이 정수일 때 진동의 증폭이 가장 크다. 또  $\tau > 3T$ 일 때, 다른 단차간의 협동은 없다.<sup>12)</sup> 그러므로 서로 다른 단차간의 협동은  $\tau > 3T$ 일 때 일어나지 않는다고 가정할 수 있다.

### 3.6 8ms 기준(8ms Criterion)

회귀분석에 이용되는 환산거리(Scaled Distance,  $R/W^{1/2}$ ,  $R/W^{1/3}$ )는 발파진동의 측정지점에서부터 가장 가까운 발파공까지의 거리( $R$ )를 8ms 지연시차마다 총장약량의 제곱근( $W^{1/2}$ ), 또는 세제곱근( $W^{1/3}$ )으로 나누어 준 것으로 정의된다.

8ms 기준은 1960년에 Duvall, Johnson, Meyer 그리고 Devine에 의해 실시된 연구로 제시되었으며, 1963년에 미광무국(USBM)의 RI 6151로 간행되어졌다.<sup>3)</sup>

그 연구는 한 곳의 석회석 채석장에서 실시되었으며, 150 ~ 3000ft의 거리에서 공당장약량 200pound로 하여 8번의 제발 발파와 9, 17, 34ms의 지연시차로 11번의 지발 발파를 수행하였고, 8곳의 지점에서 발파진동을 계측하였다.

이 연구 결과에 의해 Duvall 등은 진동파형이 구조적으로 간섭하지 않게 하기 위해서는 9ms 정도의 지연시차를 사용해야 한다고 주장했고, 그 당시에는 타당한 이론으로 받아들여졌다.

하지만 8ms 기준의 한계는 주파수의 영향이 고려되지 않았다는 점이다. 주파수는 인간과 구조물의 응답에 있어서 진동속도와 동등하게 중요한 매개변수로서 진동속도와는 상호 의존적인 관계이기 때문에 주파수의 영향이 고려되지 않은 8ms 기준은 한계에 도달할 수밖에 없다. 물론 8ms 기준은 그 연구지역에서의 주파수 대역(20 ~ 50Hz)을 갖는 곳에서 적합한 기준이 될지는 모르지만, 저주파수의 현상에서는 진동이 분리되기에는 너무 짧은 시간이며 불합리적이다.<sup>13)</sup>

또한 8ms 기준은 뇌관의 기폭 정확도를 고려하지 않았는데, Davey Bickford USA에 의해 시행된 Conventional shock tube initiators의 기폭 정확도 시험에 의하면 400ms의 비전기식 뇌관의 점화 오차는 -4.25%에서 +7%(383 ~ 428ms)로 나타났다. 그리고 연결용 뇌관(지연시차 9, 17, 25, 34, 42ms)에 각각 400ms 뇌관을 10개씩 연결하여 기폭순서를 검토한 결과 9ms 배열은 50%, 17ms 배열은 40%, 25ms 배열은 20%의 뇌관이 기폭순서에 맞지 않게 기폭 되었고, 34ms 배열은 인접한 두 공이 동시 기폭 되었으며, 42ms 배열만이 올바른 기폭순서대로 기폭 되었다.<sup>14)</sup> 이처럼 뇌관의 기폭오차가 큰 만큼 Duvall 등에 의해 시행된 연구도 설계된 시차대로 발파작업이 수행되지 않았을 가능성이 크며, 오차가 포함된 연구 결과의 타당성은 의문점이 제기될 수밖에 없다.

또한 외국의 경우에 Douglas Anderson은 1989년 Explosives and Blasting Technique의 제 15회 정기 총회에서 8ms 기준에 대한 적용가능성의 의문점을 발표하는 등 많은 논쟁을 진행해왔다.<sup>15)</sup>

## 4. 발파 개요 및 진동 측정

### 4.1 발파 개요

본 연구지역은 광주광역시 북구 각화동 일대의 「○○ 배수지 시설공사」 구간의 노출된 암반 제거 작업을 위한 곳으로 발파조건은 천공경 45mm, 공간격 1.0m, 저항선 0.9m, 천공장 2.5m 조건으로 약경 32mm Newmite Plus I (250g/EA)을 사용하여 1회 발파, 천공경 75mm, 공간격 1.3m, 저항선 1.2m, 천공장 3.3m의 조건으로 약경 50mm Newmite Plus I (800g/EA) 1회 발파, 총 2회 발파를 실시하였다.

사용 뇌관은 Hideto Plus MS 시리즈 전기뇌관과 발파진동파형 분리 분석을 위해 지연시차가 긴 LP 시리즈 전기뇌관을 사용하였다.

Table 4.1 Summary of test blasting

| Conditions \ NO.      | 1     | 2     |
|-----------------------|-------|-------|
| Drilling diameter(mm) | 45    | 75    |
| Drilling depth(m)     | 2.5   | 3.3   |
| Burden(m)             | 0.9   | 1.2   |
| Spacing(m)            | 1.0   | 1.3   |
| Holes per delay       | 1     | 1     |
| Number of holes       | 15    | 15    |
| Charge per hole(kg)   | 0.75  | 1.60  |
| Charge per delay(kg)  | 0.75  | 1.60  |
| Total charge(kg)      | 11.25 | 24.00 |

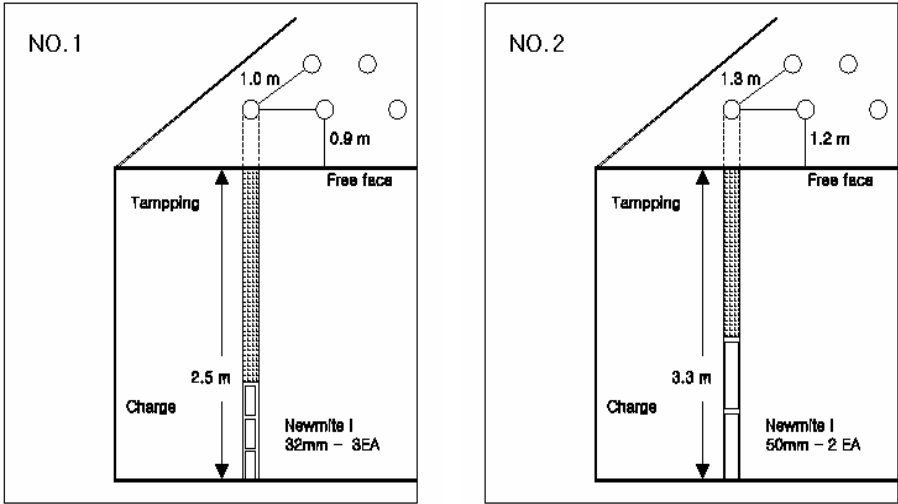


Figure 4.1 Conditions of test blasting

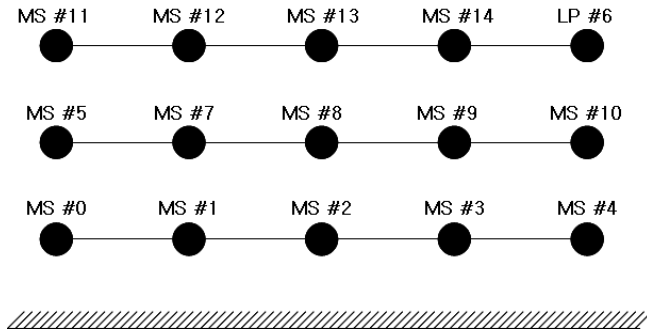


Figure 4.2 Firing pattern

## 4.2 발파진동 측정기

### 4.2.1 발파진동 측정기의 구성

국제암반역학회(ISRM)에서는 오래 전부터 발표되어온 많은 연구결과들을 바탕으로 1992년에 표준방법을 제시하였다.

발파진동의 측정을 위해서는 발파진동 측정기를 사용하여야 한다. 국내에 도입되어 사용되고 있는 발파진동 측정기는 VMS Series(Thomas Instruments INC.), BlastMate Series(Instantel INC.), NS 5400(Nomis Seismographs) 등이 있다.

이들 기종들은 Figure 4.3과 같이 휴대용 발파진동 측정기의 전형적인 모습과 구성요소를 가지고 있다.

- ①물리적인 운동이나 압력을 전류로 바꾸어 주는 변환기 또는 센서(transducer or sensor)
- ②전류를 전달하는 케이블(cable)
- ③증폭장치(amplifier)
- ④최초신호의 상대시간 변화를 보존하는 테이프, 계수형 및 종이기록(recorder)
- ⑤재생된 신호를 최후의 영구적인 기록으로 보존하는 감광지기록계(sensitive paper recorder)

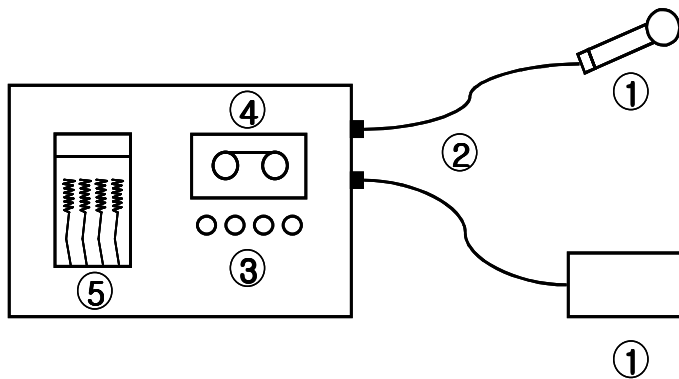


Figure 4.3 Typical drawing of blast monitoring



진동의 세 가지 표현 방법인 진동변위, 진동속도, 진동가속도 중 어느 것도 지반의 운동을 기술하는데 사용될 수 있고 측정도 가능하지만, 진동속도를 측정하는 것이 가장 좋다. 그 이유는 구조물의 피해를 기술하는데 있어서 진동수의 영향을 적게 받으며, 피해정도와 일정한 관계가 있기 때문이다. 또한 구조물의 균열과 직접 관련이 있는 변형을 구하는데 있어서 기본이 되는 변위를 단순히 진동속도의 시간이력을 적분함으로써 계산할 수 있기 때문이다.

한편 발파진동의 세 성분 중 일반적으로 수직성분이 우세하다고 보고되고 있으나 반드시 그런 것은 아니고, 진행성분이 우세하거나 접선성분이 우세한 경우도 있으므로 최대진동속도와 주파수 특성을 알기 위해서 발파진동 측정기는 세성분의 시간이력을 각각 측정할 수 있어야 한다.

#### 4.2.2 발파진동의 측정

연구에 사용된 발파진동 측정기는 Instantel사의 DS-477 및 Minimate Plus를 사용하였다.

측정기는 서로 다른 거리에 일직선상으로 설치하였으며, 계측기의 센서는 모두 지반에 고정하였다. 또한 보다 정확한 발파진동을 측정하기 위하여 발파작업이 이루어지는 암반과 동일한 암반위에 측정기를 설치하였다.

DS-477 및 Minimate Plus는 현장의 발파 및 건설장비 등을 이용한 작업 시 발생하는 소음, 진동 등을 계측하여 진행, 접선, 수직 및 주파수 등을 현장에서 Print하여 진동 계측 값을 손쉽게 확인할 수 있으며, Scaled Distance 등을 수동 입력하면 이를 자동으로 계산하는 기능뿐 만 아니라, 진동 측정의 주파수 및 시간이력 등을 상세히 보여주는 국내에서 가장 널리 사용되고 있는 진동측정기라 할 수 있다.

## 5. 측정결과 및 분석

### 5.1 발파진동 측정결과

본 연구를 위하여 2대의 진동 측정기를 설치하였으며, 총 2회의 시험발파를 실시하였다. 그 결과 총 4개의 진동측정 자료를 획득하였으며 각각의 자료에 Sample Number를 부여하였다.

측정된 진동의 범위는 Table 5.1과 같이 수직성분(Vertical)의 경우 0.683 ~ 9.14mm/s, 접선성분(Transverse)의 경우 0.714 ~ 13.7mm/s, 진행성분(Longitudinal)의 경우 1.06 ~ 16.1mm/s로 나타났다.

Table 5.1 Result of vibration monitoring

| Sample Number (SN.) | Max. Charge per delay (kg) | Distance (m) | Peak Particle Velocity(mm/s) |          |              | Measuring instrument |
|---------------------|----------------------------|--------------|------------------------------|----------|--------------|----------------------|
|                     |                            |              | Transverse                   | Vertical | Longitudinal |                      |
| 1                   | 0.75                       | 30           | 5.08                         | 1.65     | 4.06         | Minimate Plus        |
| 2                   | 0.75                       | 70           | 0.714                        | 0.683    | 1.06         | DS-477               |
| 3                   | 1.60                       | 29           | 13.70                        | 9.14     | 16.10        | Minimate Plus        |
| 4                   | 1.60                       | 69           | 2.64                         | 2.16     | 3.40         | DS-477               |

## 5.2 발파진동 파형의 분리

측정된 4개의 자료 중 발파진동의 파형 분리가 양호한 Sample Number 1(이하 SN. 1으로 표기)과 Sample Number 4(이하 SN. 4로 표기)를 분석 자료로 선택하였으며, 선택된 2개의 자료로부터 다른 발파공의 간섭을 받지 않는 600 ~ 800ms 시간대를 분리하여 분리된 단일공의 수직·접선·진행성분의 PPV(Peak Particle Velocity)를 측정하였다.

그 결과는 다음 Table 5.2와 같으며, SN. 1의 분리된 발파진동 파형에서는 접선 성분이 5.08mm/s, SN. 4에서는 진행성분이 1.413mm/s로 다른 성분의 PPV보다 높게 측정되었으며, 본 연구에서는 진동의 해석에 있어서 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단되는 이 성분들을 분석에 이용하였다.

Table 5.2 Result of separation waveform

| Sample Number<br>(SN.) | Peak Particle Velocity(mm/s) |          |              |
|------------------------|------------------------------|----------|--------------|
|                        | Transverse                   | Vertical | Longitudinal |
| 1                      | 5.08                         | 1.27     | 3.43         |
| 4                      | 0.523                        | 1.032    | 1.413        |

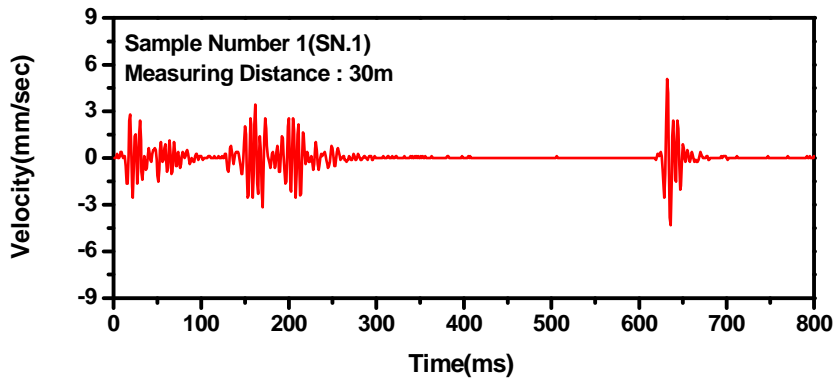


Figure 5.1 Full waveform of SN. 1

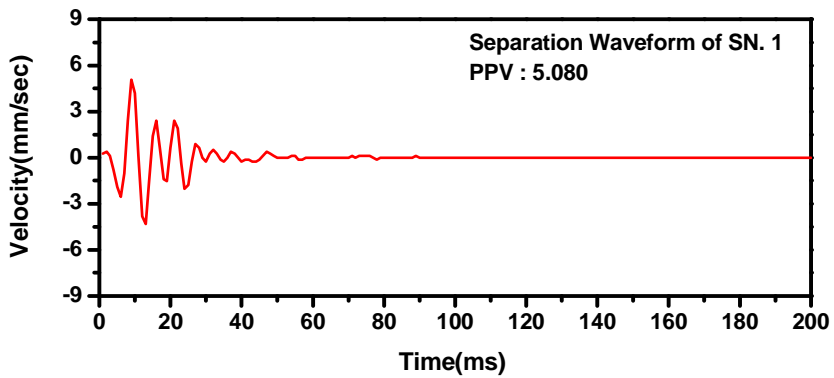


Figure 5.2 Separation waveform of SN. 1

위의 Figure 5.1에 SN. 1의 접선성분의 전체 진동파형을 나타내었고, Figure 5.2에 다른 발파공들로부터 간섭을 받지 않은 600 ~ 800ms 시간대의 분리 진동파형을 나타내었으며, 분리 진동파형의 PPV는 5.080mm/s로 측정되었다.

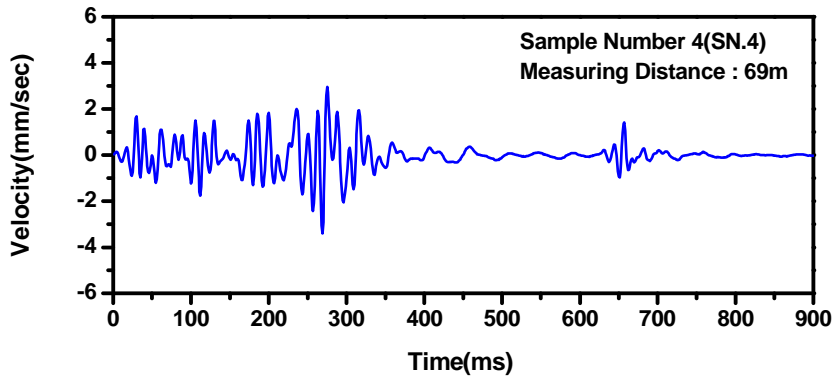


Figure 5.3 Full waveform of SN. 4

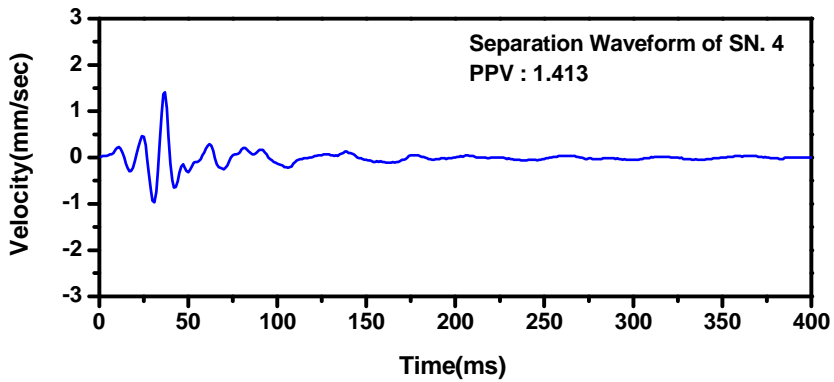


Figure 5.4 Separation waveform of SN. 4

위의 Figure 5.3에 SN. 4의 진행성분의 전체 진동파형을 나타내었고, Figure 5.4에 다른 발파공들로부터 간섭을 받지 않은 600 ~ 800ms 시간대의 분리 진동파형을 나타내었으며, 분리 진동파형의 PPV는 1.413mm/s로 측정되었다.

### 5.3 FFT 분석에 의한 우세 주파수 결정

진동과형 분리 분석을 통해 얻어진 2개의 단일공 자료에 대한 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 실시하여 우세 주파수(Dom. Frequency)를 결정하였다. 해석에 사용된 프로그램은 InstanTel사의 Blastware Version 8.01이다.

Figure 5.5와 Figure 5.6은 각각 SN. 1과 SN. 4의 분리 진동과형에 대한 FFT 분석 결과로서, 각각의 우세 주파수는 164Hz와 79Hz로 나타났다.

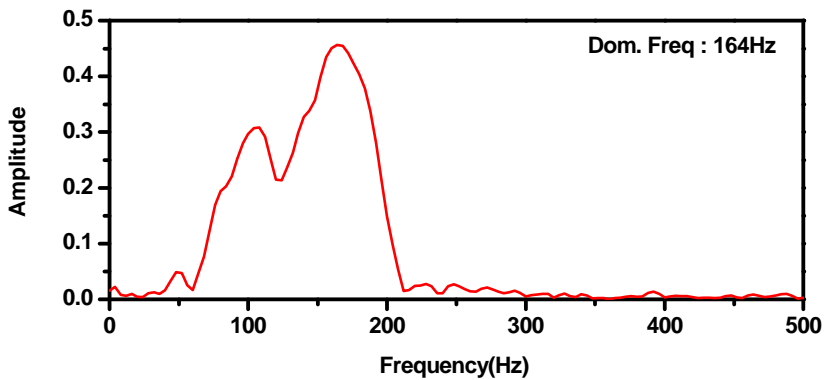


Figure 5.5 Result of FFT analysis(SN. 1)

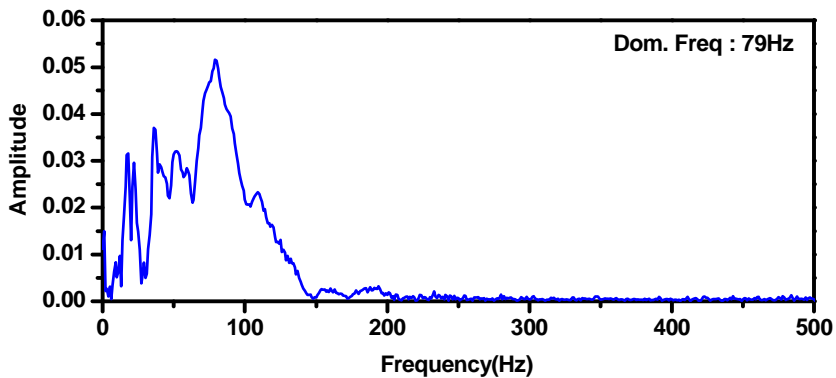


Figure 5.6 Result of FFT analysis(SN. 4)

## 5.4 중첩 모델링에 의한 발파진동 파형 분석

### 5.4.1 중첩 모델링에 의한 PPV 측정

진동의 지속시간과 지연시차의 연관성 및 발파공수의 변화가 PPV에 미치는 영향 등을 검토하기 위하여 SN. 1과 SN. 4로부터 획득한 분리 진동파형을 각각 2 ~ 15공으로 발파공수를 조절하면서 발파공들 사이의 지연시차를 1ms부터 80ms까지 1ms 간격으로 증가시켜 중첩 모델링을 실시하였으며, 그 결과 측정된 PPV를 Table 5.3과 Table 5.4에 나타내었다.

### 5.4.2 진동의 지속시간과 지연시차의 연관성 검토

발파 진동은 크게 충격진동과 매질의 탄성적인 성질에 의한 자유진동으로 구분할 수 있으며, 이러한 관점에서 발파진동의 지속시간은 충격진동의 지속시간과, 매질의 탄성적인 성질에 의한 자유진동의 지속시간이 합해진 것으로 해석할 수 있다.<sup>16)</sup>

하지만 본 연구에서는 단순히 진동 지속시간의 길이와 지연시차와의 연관성을 알아보기 위해 임의적으로 분리 진동파형 PPV의 20%이상의 진동(SN. 1 : 1.016mm/s, SN. 4 : 0.283mm/s)이 발생하는 시점까지만 진동의 지속시간으로 구분하였으며, 이를 통해 SN. 1은 25ms, SN. 4는 70ms로 진동 지속시간이 결정되었다.

Table 5.3과 Table 5.4로부터 SN. 1은 지연시차 25ms, SN. 4는 지연시차 70ms를 기준으로 그 지연시차 이후 발파공수에 관계없이 분리 진동파형의 PPV와 같거나 거의 차이가 나타나지 않았다.

이는 진동의 지속시간과 발파공 사이의 간섭이 없어지는 지연시차가 일치함을 보여주며, 진동의 지속시간이 길어질수록 다른 발파공들에 의한 간섭을 받지 않기 위해서는 발파공들 사이의 지연시차 또한 길어져야 할 것으로 판단된다.

Table 5.3 PPV of SN. 1 by superposition modeling analysis(unit : mm/s)

| SN.1 | 2<br>Hole | 3<br>Hole | 4<br>Hole | 5<br>Hole | 6<br>Hole | 7<br>Hole | 8<br>Hole | 9<br>Hole | 10<br>Hole | 11<br>Hole | 12<br>Hole | 13<br>Hole | 14<br>Hole | 15<br>Hole |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1ms  | 9.271     | 11.684    | 11.811    | 10.795    | 8.255     | 6.731     | 8.255     | 8.128     | 7.493      | 6.350      | 6.604      | 6.858      | 7.493      | 8.509      |
| 2ms  | 6.604     | 4.191     | 4.445     | 3.810     | 3.810     | 4.064     | 4.699     | 3.937     | 3.937      | 3.937      | 3.937      | 3.937      | 3.937      | 3.937      |
| 3ms  | 3.175     | 3.810     | 2.794     | 3.683     | 2.921     | 2.921     | 2.921     | 2.921     | 2.921      | 2.921      | 2.921      | 2.921      | 2.921      | 2.921      |
| 4ms  | 3.683     | 3.429     | 3.810     | 3.429     | 3.429     | 3.429     | 3.429     | 3.429     | 3.429      | 3.429      | 3.429      | 3.429      | 3.429      | 3.429      |
| 5ms  | 5.715     | 6.223     | 5.461     | 5.334     | 5.334     | 5.588     | 5.461     | 5.334     | 5.334      | 5.334      | 5.334      | 5.207      | 5.207      | 5.207      |
| 6ms  | 6.604     | 8.890     | 9.779     | 10.033    | 10.160    | 10.160    | 10.160    | 10.160    | 10.160     | 10.160     | 10.160     | 10.160     | 10.160     | 10.160     |
| 7ms  | 7.493     | 7.874     | 7.874     | 7.874     | 7.874     | 7.874     | 7.874     | 7.874     | 7.874      | 7.874      | 7.874      | 7.874      | 7.874      | 7.874      |
| 8ms  | 6.223     | 6.223     | 6.223     | 6.223     | 6.223     | 6.223     | 6.223     | 6.223     | 6.223      | 6.223      | 6.223      | 6.223      | 6.223      | 6.223      |
| 9ms  | 5.207     | 5.207     | 5.207     | 5.207     | 5.207     | 5.207     | 5.207     | 5.207     | 5.207      | 5.207      | 5.207      | 5.207      | 5.207      | 5.207      |
| 10ms | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334      | 5.334      | 5.334      | 5.334      | 5.334      | 5.334      |
| 11ms | 6.604     | 7.112     | 7.366     | 7.366     | 7.366     | 7.366     | 7.366     | 7.366     | 7.366      | 7.366      | 7.366      | 7.366      | 7.366      | 7.366      |
| 12ms | 7.493     | 7.747     | 7.747     | 7.747     | 7.747     | 7.747     | 7.747     | 7.747     | 7.747      | 7.747      | 7.747      | 7.747      | 7.747      | 7.747      |
| 13ms | 6.985     | 6.858     | 6.985     | 6.985     | 7.112     | 7.112     | 7.112     | 7.112     | 7.112      | 7.112      | 7.112      | 7.112      | 7.112      | 7.112      |
| 14ms | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      |
| 15ms | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      |
| 16ms | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      |
| 17ms | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      |
| 18ms | 5.969     | 5.969     | 5.969     | 5.969     | 5.969     | 5.969     | 5.969     | 5.969     | 5.969      | 5.969      | 5.969      | 5.969      | 5.969      | 5.969      |
| 19ms | 5.715     | 6.096     | 6.096     | 6.096     | 6.096     | 6.096     | 6.096     | 6.096     | 6.096      | 6.096      | 6.096      | 6.096      | 6.096      | 6.096      |
| 20ms | 5.080     | 5.207     | 5.207     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334      | 5.334      | 5.334      | 5.334      | 5.334      | 5.334      |
| 21ms | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      |
| 22ms | 5.334     | 5.334     | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461      | 5.461      | 5.461      | 5.461      | 5.461      | 5.461      |
| 23ms | 5.588     | 5.715     | 5.715     | 5.715     | 5.715     | 5.715     | 5.715     | 5.715     | 5.715      | 5.715      | 5.715      | 5.715      | 5.715      | 5.715      |
| 24ms | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334      | 5.334      | 5.334      | 5.334      | 5.334      | 5.334      |
| 25ms | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      |
| 26ms | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      |
| 27ms | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      |
| 28ms | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461      | 5.461      | 5.461      | 5.461      | 5.461      | 5.461      |
| 29ms | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334      | 5.334      | 5.334      | 5.334      | 5.334      | 5.334      |
| 30ms | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      |
| 31ms | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      |
| 32ms | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      |
| 33ms | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      |
| 34ms | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      |
| 35ms | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      |
| 36ms | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      |
| 37ms | 5.207     | 5.207     | 5.207     | 5.207     | 5.207     | 5.207     | 5.207     | 5.207     | 5.207      | 5.207      | 5.207      | 5.207      | 5.207      | 5.207      |
| 38ms | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461      | 5.461      | 5.461      | 5.461      | 5.461      | 5.461      |
| 39ms | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334      | 5.334      | 5.334      | 5.334      | 5.334      | 5.334      |
| 40ms | 5.207     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334     | 5.334      | 5.334      | 5.334      | 5.334      | 5.334      | 5.334      |





Table 5.4 PPV of SN. 4 by superposition modeling analysis(unit : mm/s)

| SN.4 | 2<br>Hole | 3<br>Hole | 4<br>Hole | 5<br>Hole | 6<br>Hole | 7<br>Hole | 8<br>Hole | 9<br>Hole | 10<br>Hole | 11<br>Hole | 12<br>Hole | 13<br>Hole | 14<br>Hole | 15<br>Hole |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1ms  | 2.778     | 3.842     | 4.810     | 5.255     | 5.620     | 5.493     | 5.207     | 4.715     | 4.064      | 4.032      | 4.223      | 4.350      | 4.461      | 4.556      |
| 2ms  | 2.429     | 2.826     | 2.667     | 2.048     | 2.159     | 2.270     | 2.365     | 2.397     | 2.318      | 2.127      | 1.842      | 1.794      | 2.000      | 2.238      |
| 3ms  | 2.032     | 1.651     | 1.461     | 1.572     | 1.651     | 1.540     | 1.254     | 1.286     | 1.524      | 1.715      | 1.715      | 1.651      | 1.476      | 1.302      |
| 4ms  | 1.429     | 1.159     | 1.254     | 1.254     | 1.000     | 1.064     | 1.318     | 1.334     | 1.270      | 1.064      | 0.968      | 0.873      | 0.857      | 0.841      |
| 5ms  | 0.873     | 0.984     | 1.032     | 0.778     | 0.937     | 1.143     | 1.080     | 0.921     | 0.873      | 0.746      | 0.794      | 0.841      | 1.048      | 1.111      |
| 6ms  | 0.921     | 1.016     | 0.762     | 0.968     | 1.080     | 1.000     | 0.873     | 0.762     | 0.746      | 0.921      | 1.095      | 1.127      | 1.111      | 1.048      |
| 7ms  | 0.953     | 1.016     | 0.841     | 1.064     | 0.984     | 0.889     | 0.762     | 0.841     | 1.064      | 1.095      | 1.080      | 1.016      | 0.984      | 0.889      |
| 8ms  | 1.080     | 1.080     | 1.222     | 1.143     | 1.191     | 1.143     | 1.254     | 1.111     | 1.159      | 1.207      | 1.191      | 1.127      | 1.159      | 1.111      |
| 9ms  | 1.349     | 1.556     | 1.445     | 1.667     | 1.603     | 1.556     | 1.540     | 1.746     | 1.778      | 1.746      | 1.699      | 1.603      | 1.651      | 1.730      |
| 10ms | 1.635     | 1.730     | 1.667     | 1.699     | 1.635     | 1.492     | 1.508     | 1.540     | 1.508      | 1.461      | 1.429      | 1.429      | 1.540      | 1.588      |
| 11ms | 1.810     | 1.810     | 1.842     | 1.762     | 1.762     | 1.826     | 1.826     | 1.842     | 1.826      | 1.826      | 1.826      | 1.826      | 1.842      | 1.826      |
| 12ms | 1.857     | 2.016     | 2.032     | 2.127     | 2.064     | 2.111     | 2.143     | 2.064     | 2.064      | 2.064      | 2.080      | 2.064      | 2.064      | 2.064      |
| 13ms | 1.873     | 2.096     | 2.080     | 2.191     | 2.159     | 2.223     | 2.207     | 2.207     | 2.238      | 2.238      | 2.238      | 2.238      | 2.254      | 2.254      |
| 14ms | 1.778     | 1.937     | 1.889     | 1.873     | 1.873     | 1.873     | 1.889     | 1.889     | 1.921      | 1.873      | 1.873      | 1.889      | 1.905      | 1.921      |
| 15ms | 1.635     | 1.699     | 1.619     | 1.651     | 1.651     | 1.651     | 1.651     | 1.651     | 1.651      | 1.651      | 1.651      | 1.651      | 1.651      | 1.651      |
| 16ms | 1.476     | 1.524     | 1.461     | 1.540     | 1.540     | 1.540     | 1.540     | 1.540     | 1.540      | 1.540      | 1.540      | 1.540      | 1.540      | 1.540      |
| 17ms | 1.334     | 1.365     | 1.318     | 1.397     | 1.397     | 1.397     | 1.397     | 1.397     | 1.397      | 1.429      | 1.445      | 1.461      | 1.476      | 1.492      |
| 18ms | 1.318     | 1.461     | 1.397     | 1.540     | 1.508     | 1.476     | 1.476     | 1.461     | 1.461      | 1.461      | 1.461      | 1.508      | 1.476      | 1.492      |
| 19ms | 1.334     | 1.524     | 1.445     | 1.635     | 1.572     | 1.572     | 1.683     | 1.683     | 1.667      | 1.667      | 1.730      | 1.699      | 1.730      | 1.778      |
| 20ms | 1.381     | 1.508     | 1.381     | 1.445     | 1.461     | 1.445     | 1.492     | 1.524     | 1.492      | 1.508      | 1.540      | 1.540      | 1.572      | 1.556      |
| 21ms | 1.461     | 1.572     | 1.445     | 1.476     | 1.556     | 1.445     | 1.429     | 1.461     | 1.461      | 1.413      | 1.429      | 1.413      | 1.429      | 1.413      |
| 22ms | 1.524     | 1.730     | 1.603     | 1.603     | 1.619     | 1.619     | 1.619     | 1.619     | 1.619      | 1.619      | 1.619      | 1.619      | 1.619      | 1.619      |
| 23ms | 1.603     | 1.778     | 1.794     | 1.730     | 1.730     | 1.730     | 1.730     | 1.730     | 1.730      | 1.730      | 1.730      | 1.730      | 1.730      | 1.730      |
| 24ms | 1.667     | 1.778     | 1.873     | 1.810     | 1.810     | 1.810     | 1.810     | 1.810     | 1.810      | 1.810      | 1.810      | 1.810      | 1.810      | 1.810      |
| 25ms | 1.699     | 1.889     | 1.953     | 1.905     | 2.000     | 1.937     | 1.937     | 1.937     | 1.937      | 1.937      | 1.937      | 1.937      | 1.937      | 1.937      |
| 26ms | 1.667     | 1.889     | 2.016     | 2.000     | 2.096     | 2.048     | 2.048     | 2.048     | 2.048      | 2.048      | 2.048      | 2.048      | 2.048      | 2.048      |
| 27ms | 1.619     | 1.778     | 1.937     | 1.921     | 1.953     | 1.921     | 1.921     | 1.921     | 1.921      | 1.921      | 1.921      | 1.921      | 1.921      | 1.921      |
| 28ms | 1.572     | 1.667     | 1.762     | 1.778     | 1.778     | 1.794     | 1.810     | 1.810     | 1.810      | 1.810      | 1.810      | 1.810      | 1.810      | 1.810      |
| 29ms | 1.508     | 1.508     | 1.508     | 1.524     | 1.540     | 1.540     | 1.540     | 1.540     | 1.540      | 1.540      | 1.540      | 1.540      | 1.540      | 1.540      |
| 30ms | 1.476     | 1.508     | 1.508     | 1.508     | 1.508     | 1.508     | 1.508     | 1.508     | 1.508      | 1.508      | 1.508      | 1.508      | 1.508      | 1.508      |
| 31ms | 1.476     | 1.540     | 1.540     | 1.540     | 1.540     | 1.540     | 1.540     | 1.540     | 1.540      | 1.540      | 1.540      | 1.540      | 1.540      | 1.540      |
| 32ms | 1.461     | 1.540     | 1.540     | 1.540     | 1.540     | 1.540     | 1.540     | 1.540     | 1.540      | 1.540      | 1.540      | 1.540      | 1.540      | 1.540      |
| 33ms | 1.445     | 1.524     | 1.524     | 1.524     | 1.524     | 1.524     | 1.524     | 1.524     | 1.524      | 1.524      | 1.524      | 1.524      | 1.524      | 1.524      |
| 34ms | 1.445     | 1.524     | 1.524     | 1.524     | 1.524     | 1.524     | 1.524     | 1.524     | 1.524      | 1.524      | 1.524      | 1.524      | 1.524      | 1.524      |
| 35ms | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445      | 1.445      | 1.445      | 1.445      | 1.445      | 1.445      |
| 36ms | 1.429     | 1.429     | 1.429     | 1.429     | 1.429     | 1.429     | 1.429     | 1.429     | 1.429      | 1.429      | 1.429      | 1.429      | 1.429      | 1.429      |
| 37ms | 1.429     | 1.429     | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445      | 1.445      | 1.445      | 1.445      | 1.445      | 1.445      |
| 38ms | 1.461     | 1.461     | 1.476     | 1.476     | 1.476     | 1.476     | 1.476     | 1.492     | 1.524      | 1.524      | 1.524      | 1.524      | 1.524      | 1.524      |
| 39ms | 1.476     | 1.461     | 1.461     | 1.461     | 1.508     | 1.508     | 1.508     | 1.508     | 1.540      | 1.572      | 1.572      | 1.572      | 1.572      | 1.572      |
| 40ms | 1.476     | 1.461     | 1.461     | 1.461     | 1.461     | 1.461     | 1.461     | 1.461     | 1.461      | 1.461      | 1.461      | 1.461      | 1.461      | 1.461      |

Table 5.4 Continued(unit : mm/s)

| SN.4 | 2<br>Hole | 3<br>Hole | 4<br>Hole | 5<br>Hole | 6<br>Hole | 7<br>Hole | 8<br>Hole | 9<br>Hole | 10<br>Hole | 11<br>Hole | 12<br>Hole | 13<br>Hole | 14<br>Hole | 15<br>Hole |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 41ms | 1.492     | 1.492     | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445      | 1.445      | 1.445      | 1.445      | 1.445      | 1.445      |
| 42ms | 1.524     | 1.556     | 1.508     | 1.508     | 1.508     | 1.508     | 1.508     | 1.508     | 1.508      | 1.508      | 1.508      | 1.508      | 1.508      | 1.508      |
| 43ms | 1.588     | 1.635     | 1.588     | 1.588     | 1.588     | 1.588     | 1.588     | 1.588     | 1.588      | 1.588      | 1.588      | 1.588      | 1.588      | 1.588      |
| 44ms | 1.619     | 1.667     | 1.603     | 1.603     | 1.603     | 1.603     | 1.603     | 1.603     | 1.603      | 1.603      | 1.603      | 1.603      | 1.603      | 1.603      |
| 45ms | 1.619     | 1.683     | 1.651     | 1.651     | 1.683     | 1.667     | 1.667     | 1.667     | 1.667      | 1.667      | 1.667      | 1.667      | 1.667      | 1.667      |
| 46ms | 1.588     | 1.651     | 1.699     | 1.699     | 1.730     | 1.746     | 1.778     | 1.778     | 1.778      | 1.778      | 1.778      | 1.778      | 1.778      | 1.778      |
| 47ms | 1.540     | 1.588     | 1.635     | 1.635     | 1.635     | 1.651     | 1.683     | 1.683     | 1.683      | 1.683      | 1.683      | 1.683      | 1.683      | 1.683      |
| 48ms | 1.508     | 1.556     | 1.572     | 1.540     | 1.524     | 1.524     | 1.540     | 1.540     | 1.540      | 1.540      | 1.540      | 1.540      | 1.540      | 1.540      |
| 49ms | 1.476     | 1.540     | 1.524     | 1.476     | 1.476     | 1.476     | 1.476     | 1.476     | 1.476      | 1.476      | 1.476      | 1.476      | 1.476      | 1.476      |
| 50ms | 1.476     | 1.572     | 1.524     | 1.508     | 1.508     | 1.508     | 1.508     | 1.508     | 1.508      | 1.508      | 1.508      | 1.508      | 1.508      | 1.508      |
| 51ms | 1.508     | 1.635     | 1.603     | 1.588     | 1.588     | 1.588     | 1.588     | 1.588     | 1.588      | 1.588      | 1.588      | 1.588      | 1.588      | 1.588      |
| 52ms | 1.540     | 1.635     | 1.619     | 1.588     | 1.588     | 1.588     | 1.588     | 1.588     | 1.588      | 1.588      | 1.588      | 1.588      | 1.588      | 1.588      |
| 53ms | 1.572     | 1.635     | 1.619     | 1.603     | 1.603     | 1.603     | 1.603     | 1.603     | 1.603      | 1.603      | 1.603      | 1.603      | 1.603      | 1.603      |
| 54ms | 1.572     | 1.572     | 1.572     | 1.572     | 1.556     | 1.572     | 1.572     | 1.572     | 1.572      | 1.572      | 1.572      | 1.572      | 1.572      | 1.572      |
| 55ms | 1.572     | 1.556     | 1.572     | 1.588     | 1.603     | 1.635     | 1.635     | 1.635     | 1.635      | 1.635      | 1.635      | 1.635      | 1.635      | 1.635      |
| 56ms | 1.524     | 1.524     | 1.524     | 1.540     | 1.556     | 1.572     | 1.572     | 1.572     | 1.572      | 1.572      | 1.572      | 1.572      | 1.572      | 1.572      |
| 57ms | 1.476     | 1.476     | 1.476     | 1.508     | 1.508     | 1.508     | 1.508     | 1.508     | 1.508      | 1.508      | 1.508      | 1.508      | 1.508      | 1.508      |
| 58ms | 1.429     | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445      | 1.445      | 1.445      | 1.445      | 1.445      | 1.445      |
| 59ms | 1.429     | 1.429     | 1.429     | 1.429     | 1.429     | 1.429     | 1.429     | 1.429     | 1.429      | 1.429      | 1.429      | 1.429      | 1.429      | 1.429      |
| 60ms | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445     | 1.445      | 1.445      | 1.445      | 1.445      | 1.445      | 1.445      |
| 61ms | 1.461     | 1.461     | 1.461     | 1.461     | 1.461     | 1.461     | 1.461     | 1.461     | 1.461      | 1.461      | 1.461      | 1.461      | 1.461      | 1.461      |
| 62ms | 1.476     | 1.476     | 1.476     | 1.476     | 1.476     | 1.476     | 1.476     | 1.476     | 1.476      | 1.476      | 1.476      | 1.476      | 1.476      | 1.476      |
| 63ms | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492      | 1.492      | 1.492      | 1.492      | 1.492      | 1.492      |
| 64ms | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492      | 1.492      | 1.492      | 1.492      | 1.492      | 1.492      |
| 65ms | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492      | 1.492      | 1.492      | 1.492      | 1.492      | 1.492      |
| 66ms | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492      | 1.492      | 1.492      | 1.492      | 1.492      | 1.492      |
| 67ms | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492      | 1.492      | 1.492      | 1.492      | 1.492      | 1.492      |
| 68ms | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492     | 1.492      | 1.492      | 1.492      | 1.492      | 1.492      | 1.492      |
| 69ms | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      |
| 70ms | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      |
| 71ms | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      |
| 72ms | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      |
| 73ms | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      |
| 74ms | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      |
| 75ms | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      |
| 76ms | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      |
| 77ms | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      |
| 78ms | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      |
| 79ms | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      |
| 80ms | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413     | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      | 1.413      |

### 5.4.3 발파공수의 변화가 PPV에 미치는 영향

PPV에 미치는 발파공수의 영향을 알아보기 위하여 동일 지연시차내의 2 ~ 15공의 PPV를 비교 분석하였으며, 그 결과 SN. 1의 경우 지연시차 7 ~ 23ms 사이에서 최대 PPV와 최소 PPV의 차가 분리 진동파형 PPV의 10%(0.508mm/s) 내로 측정되었고, 24 ~ 80ms 사이에서는 발파공수에 관계없이 동일한 PPV로 측정되었다.

또한 SN. 4의 경우에는 지연시차 5 ~ 58ms 사이의 동일 지연시차 내에서 최대 PPV와 최소 PPV의 차가 대부분 분리 진동파형 PPV의 20%(0.283mm/s)내로 측정되었고, 59 ~ 80ms 사이에서는 발파공수에 관계없이 같은 지연시차 내에서 동일한 PPV로 측정되어 발파공수의 영향은 크게 작용하지 않는 것으로 판단된다.

그리고 SN. 1의 지연시차 6ms 이내와 SN. 4의 지연시차 4ms 이내의 측정결과는 발파공수에 따라 진동의 편차가 크게 측정되었으나, 발파공수의 증가에 따라 진동의 증가가 이루어 지지 않았다는 점에서 발파공수의 영향보다는 발파공들 사이의 진동의 보강 간섭과 상쇄 간섭에 의한 영향이 더욱 크게 작용되었을 것으로 판단된다.

위의 분석 자료를 토대로 PPV는 발파공수의 변화 보다는 발파공들 사이의 지연시차에 의한 진동의 중첩, 즉 보강 간섭과 상쇄 간섭으로 인한 영향이 더욱 중요한 매개변수로 작용했다고 판단된다.

Table 5.3과 Table 5.4를 살펴보면 PPV는 지연시차의 증가와 함께 증가와 감소를 반복하며, 그 후 일정 지연시차의 시간대에서 분리 진동파형의 PPV로 수렴되어 지는데, Figure 5.7 ~ Figure 5.34에 PPV 증가부분의 최대값과 감소부분의 최소값에서의 중첩 모델링 진동파형을 나타내었다.

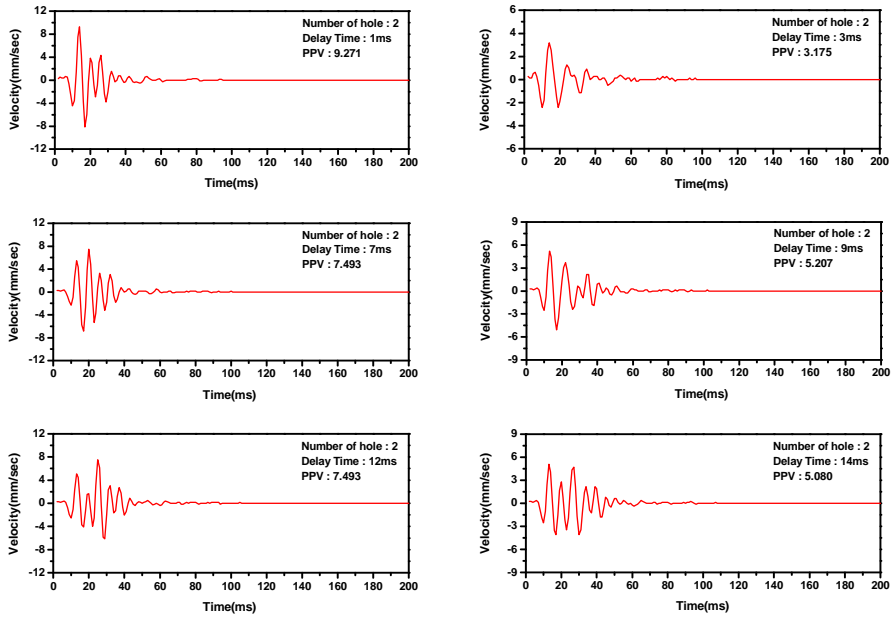


Figure 5.7 Superposition modeling waveform of SN. 1(2 hole)

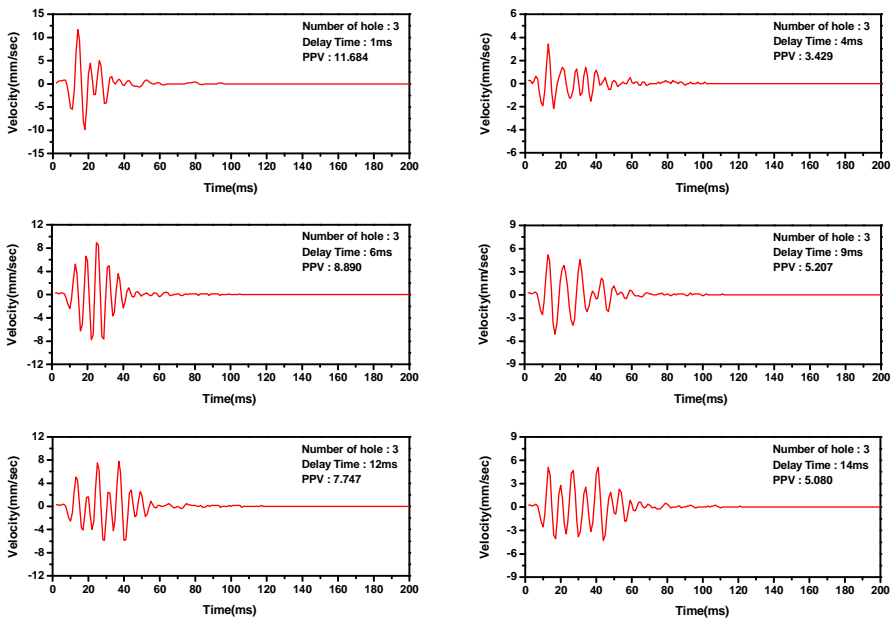


Figure 5.8 Superposition modeling waveform of SN. 1(3 hole)

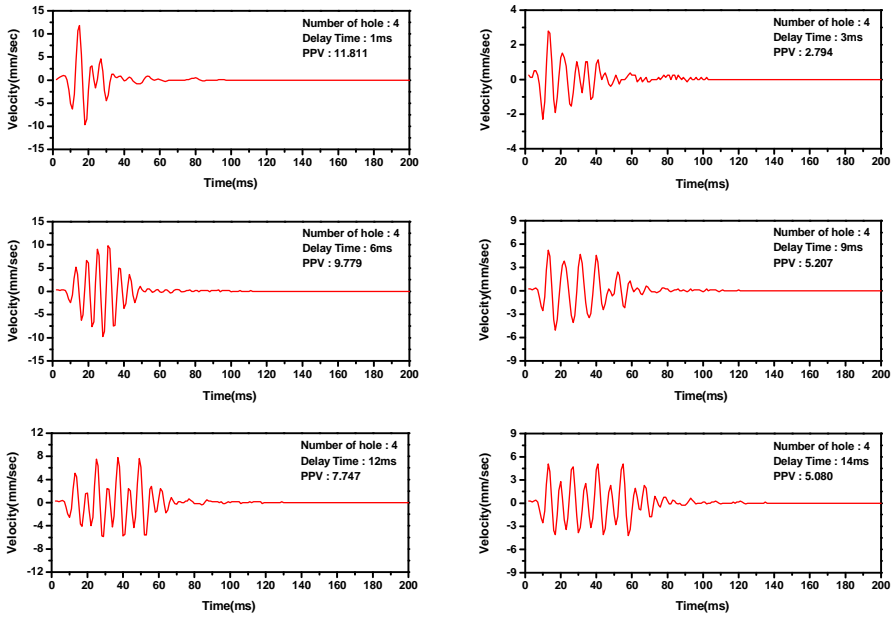


Figure 5.9 Superposition modeling waveform of SN. 1(4 hole)

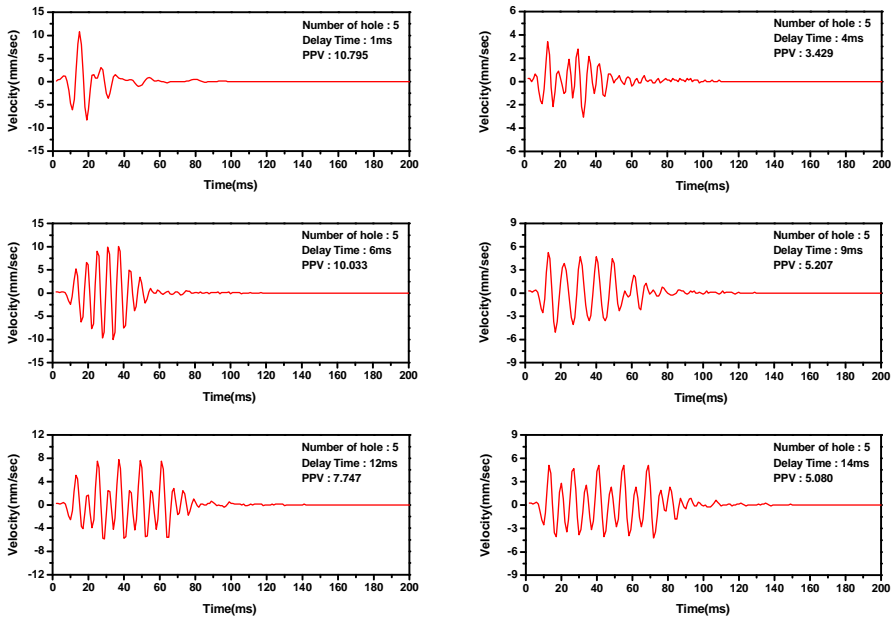


Figure 5.10 Superposition modeling waveform of SN. 1(5 hole)

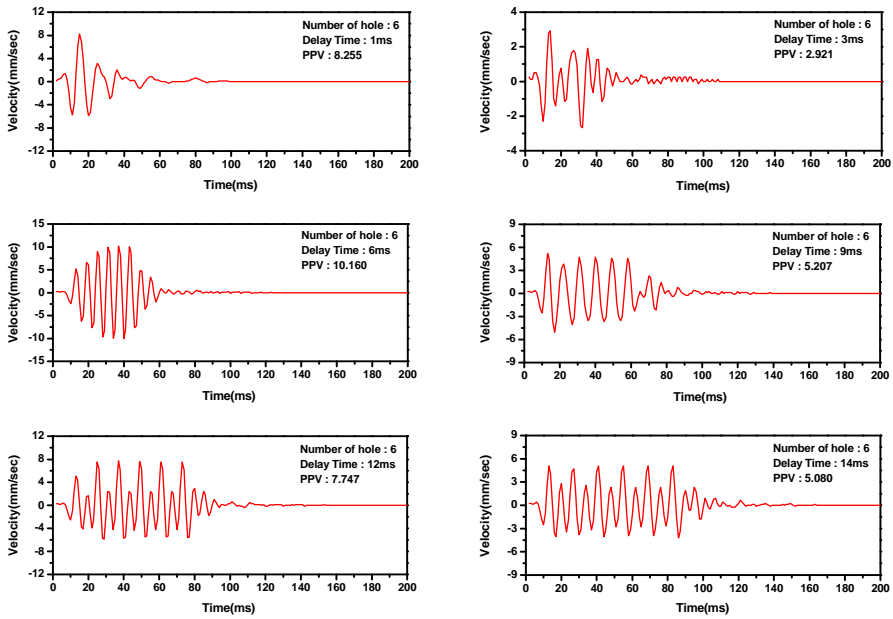


Figure 5.11 Superposition modeling waveform of SN. 1(6 hole)

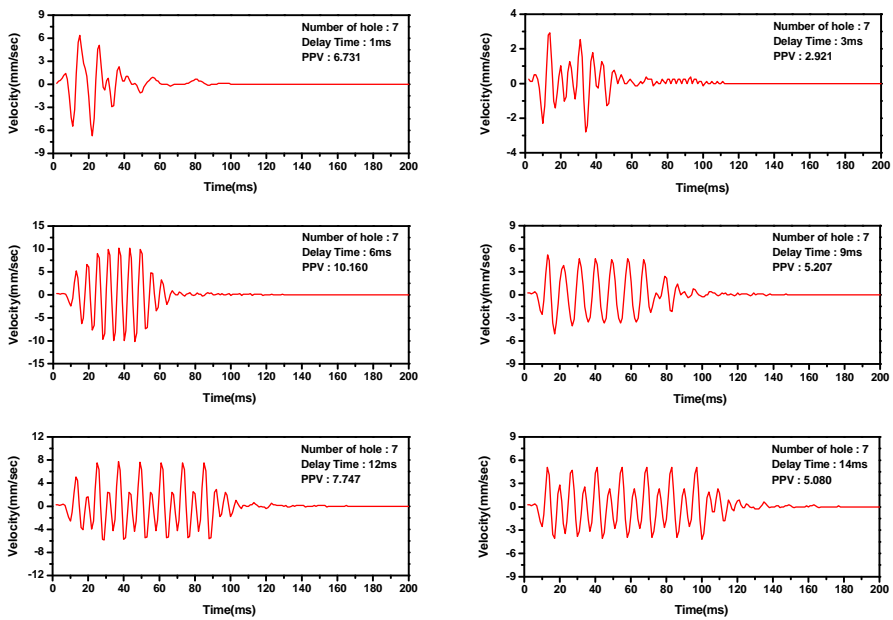


Figure 5.12 Superposition modeling waveform of SN. 1(7 hole)

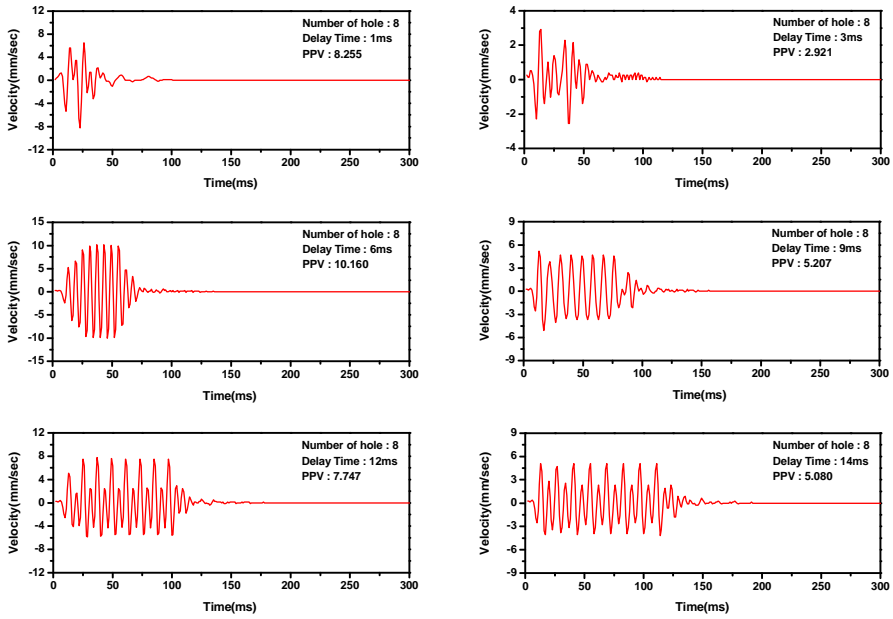


Figure 5.13 Superposition modeling waveform of SN. 1(8 hole)

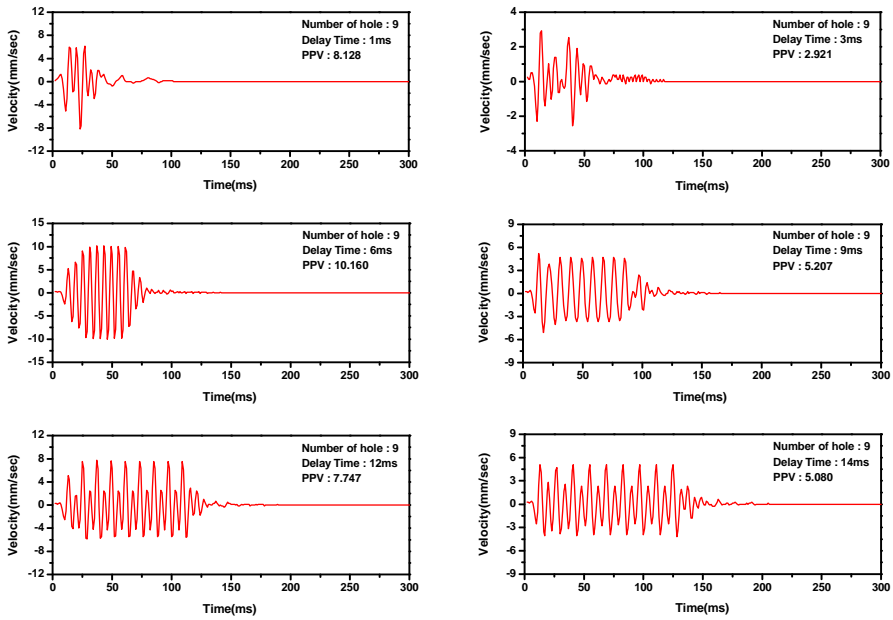


Figure 5.14 Superposition modeling waveform of SN. 1(9 hole)



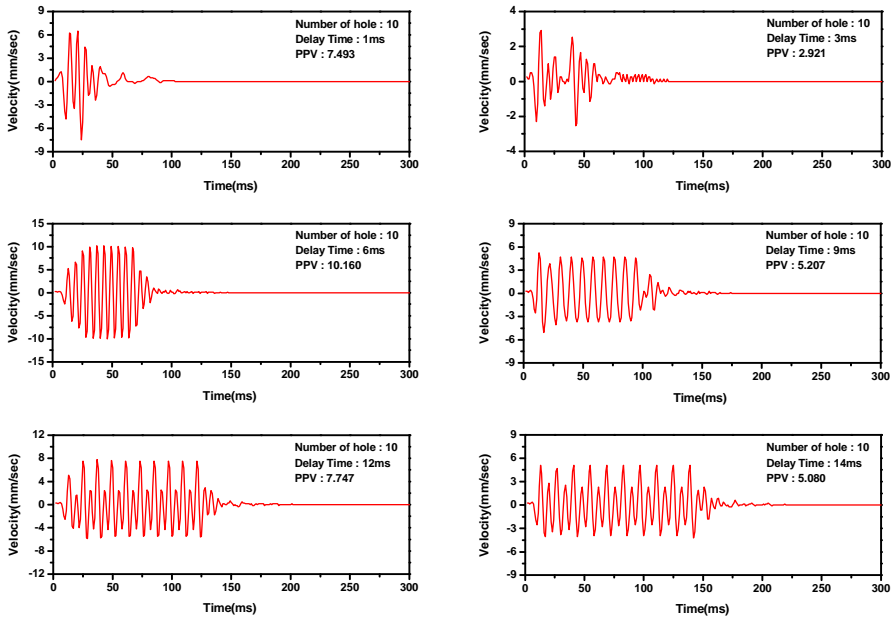


Figure 5.15 Superposition modeling waveform of SN. 1(10 hole)

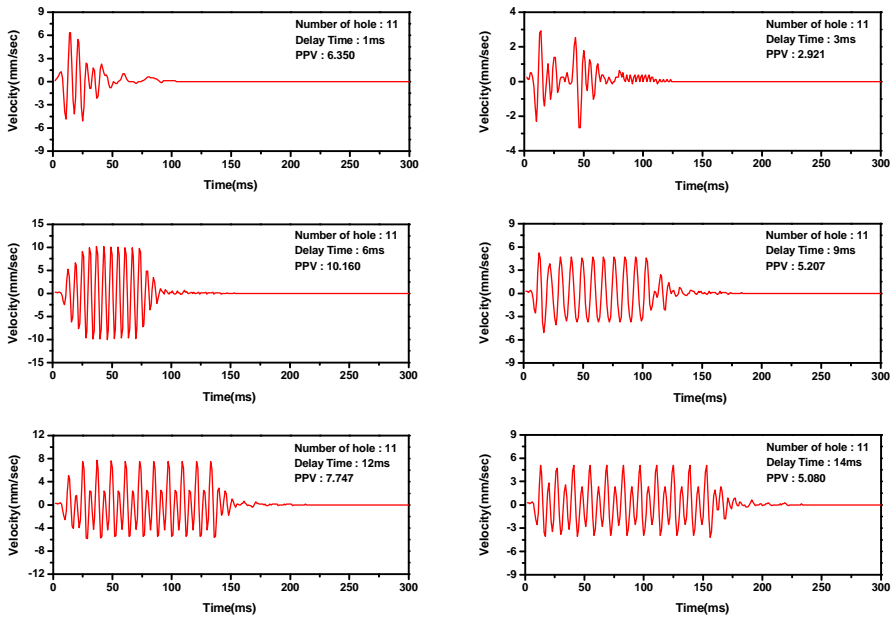


Figure 5.16 Superposition modeling waveform of SN. 1(11 hole)

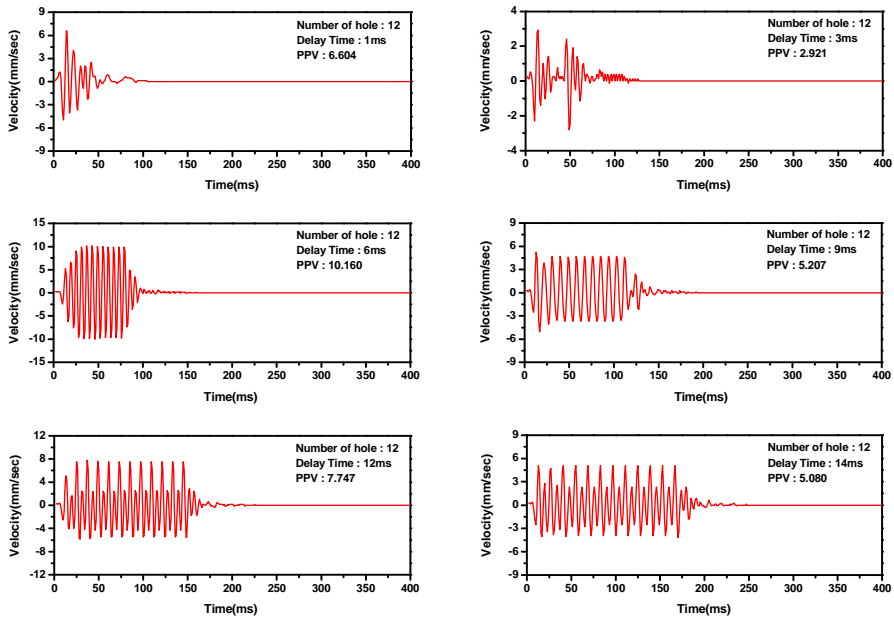


Figure 5.17 Superposition modeling waveform of SN. 1(12 hole)

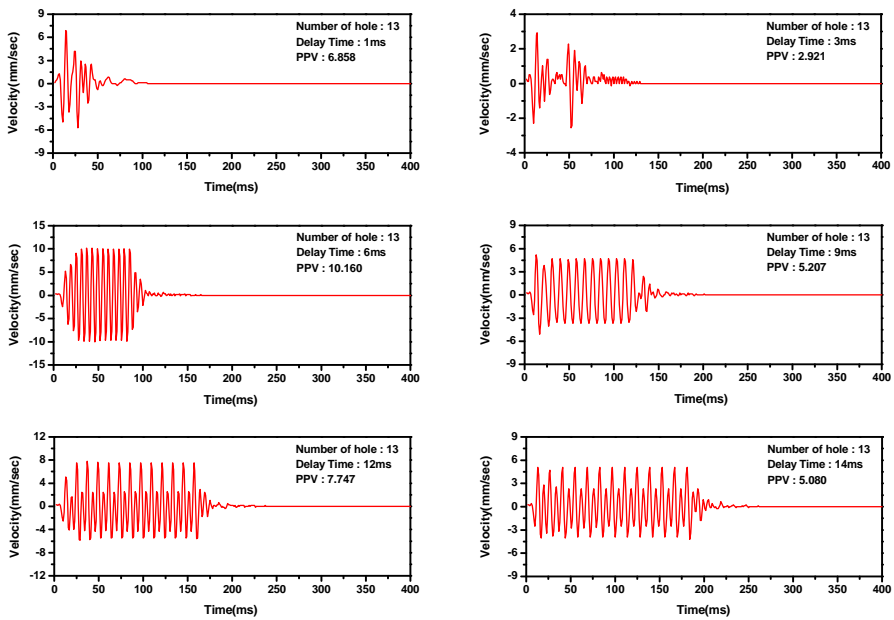


Figure 5.18 Superposition modeling waveform of SN. 1(13 hole)

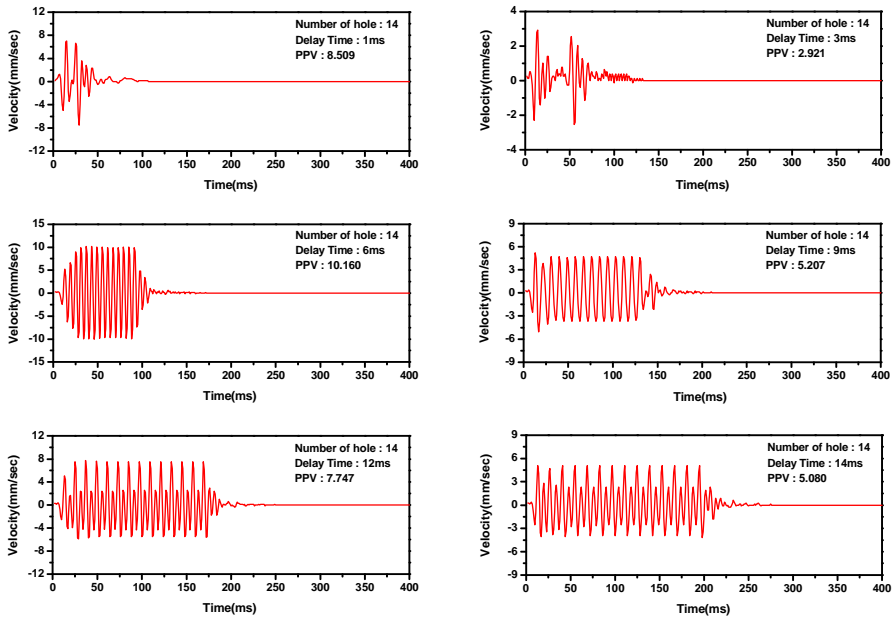


Figure 5.19 Superposition modeling waveform of SN. 1(14 hole)

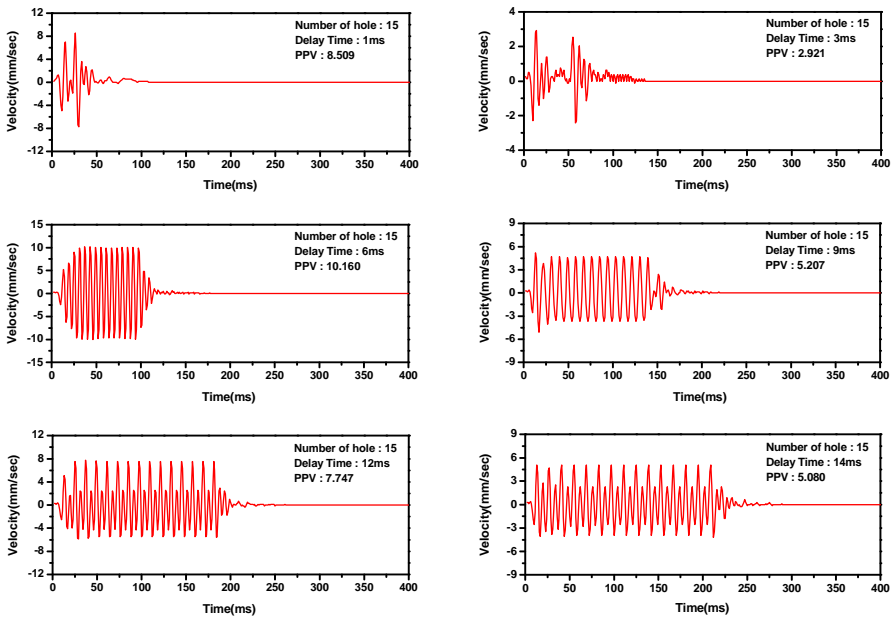


Figure 5.20 Superposition modeling waveform of SN. 1(15 hole)

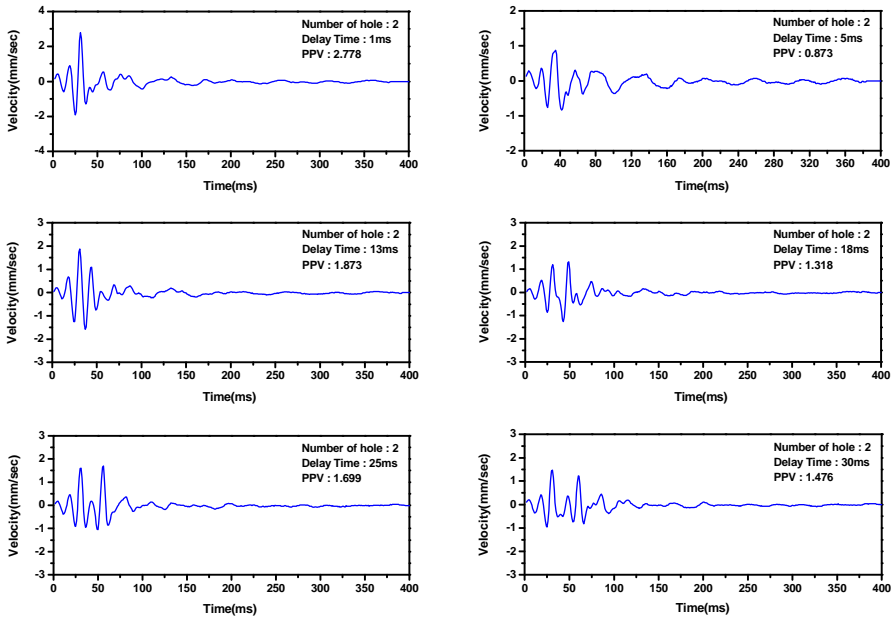


Figure 5.21 Superposition modeling waveform of SN. 4(2 hole)

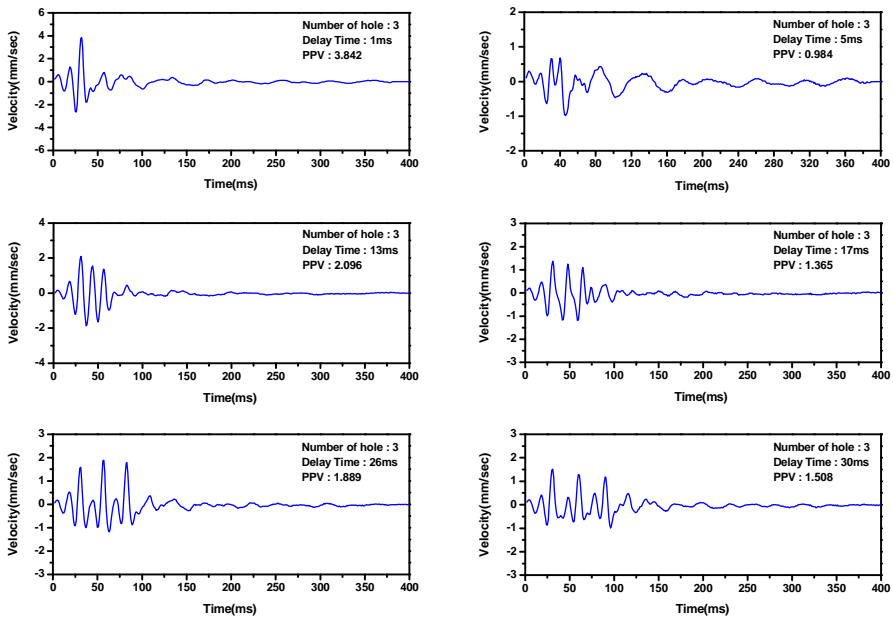


Figure 5.22 Superposition modeling waveform of SN. 4(3 hole)

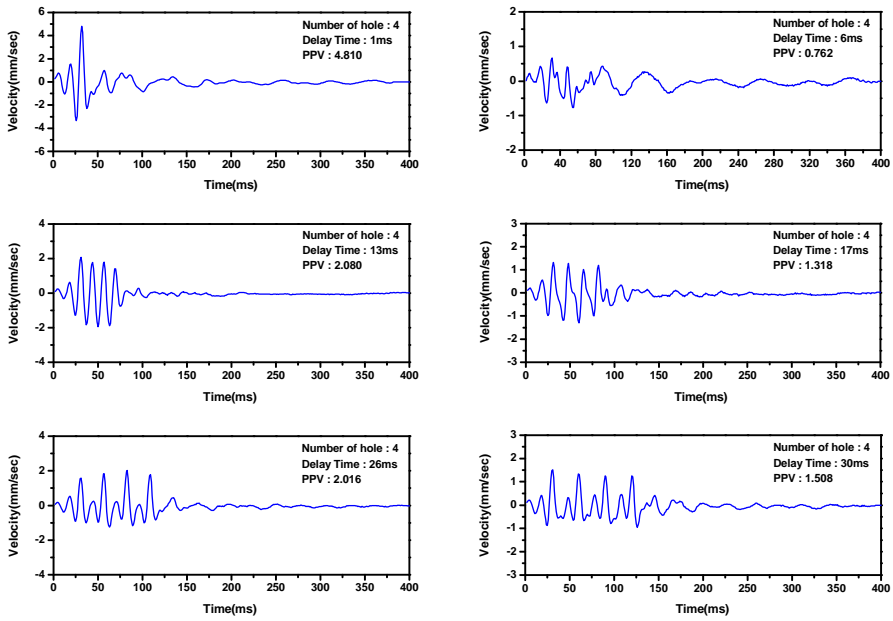


Figure 5.23 Superposition modeling waveform of SN. 4(4 hole)

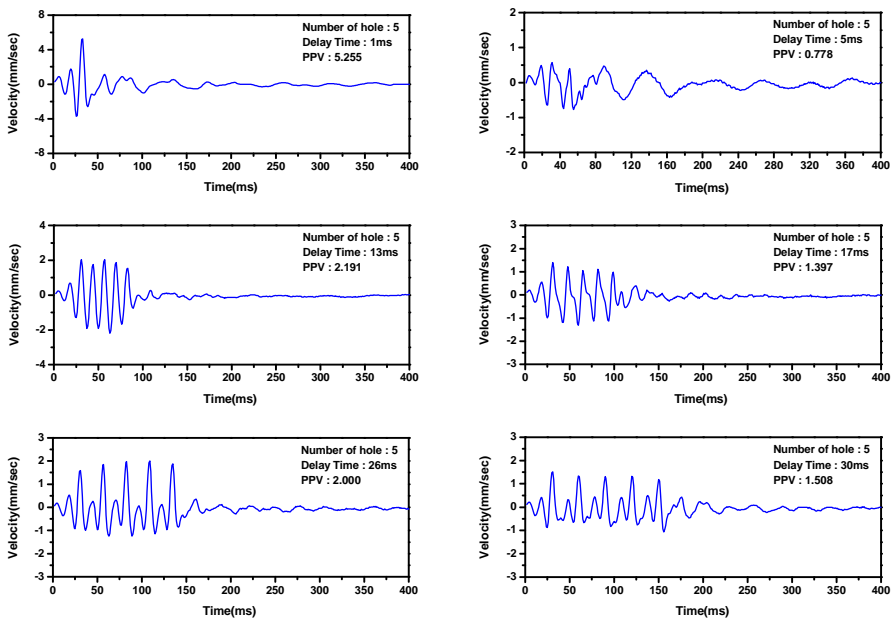


Figure 5.24 Superposition modeling waveform of SN. 4(5 hole)

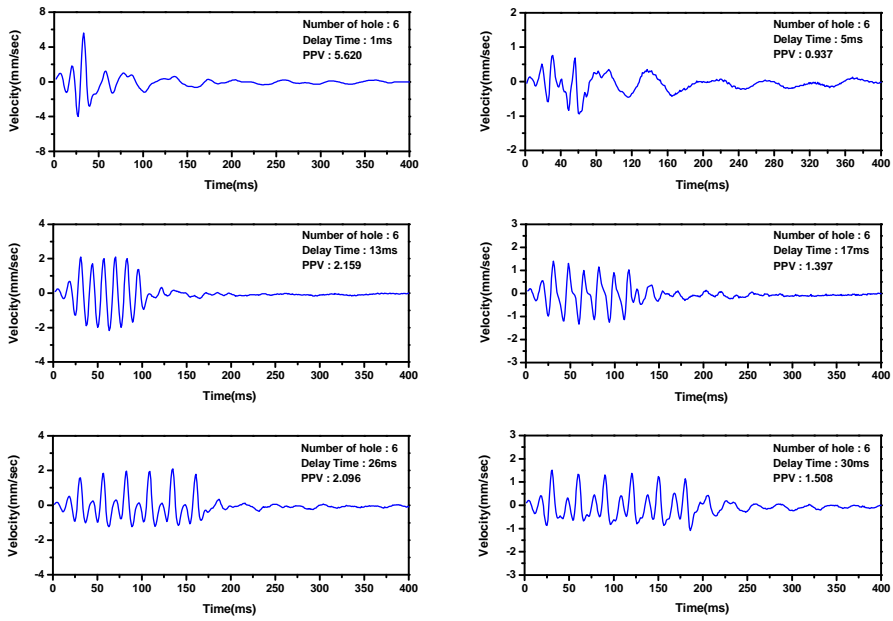


Figure 5.25 Superposition modeling waveform of SN. 4(6 hole)

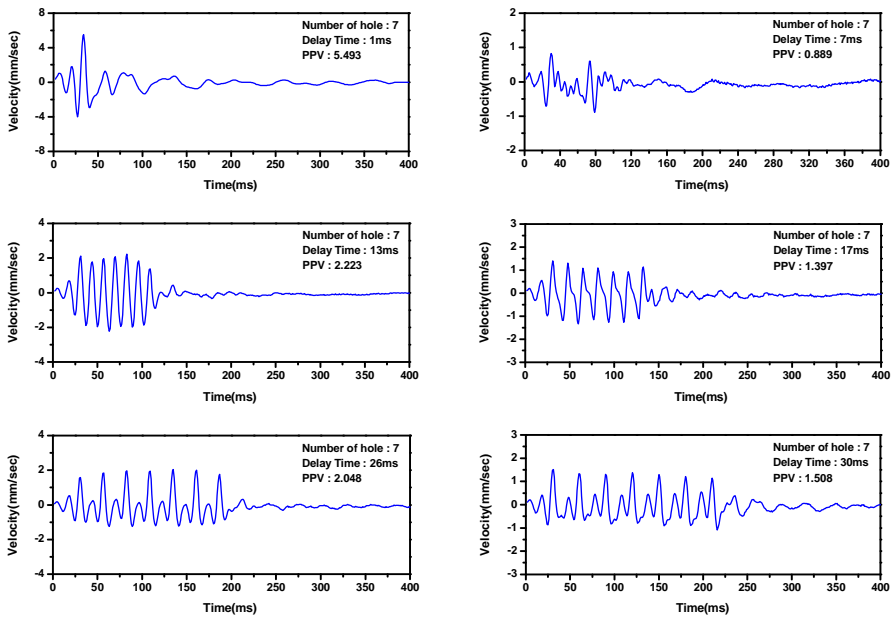


Figure 5.26 Superposition modeling waveform of SN. 4(7 hole)

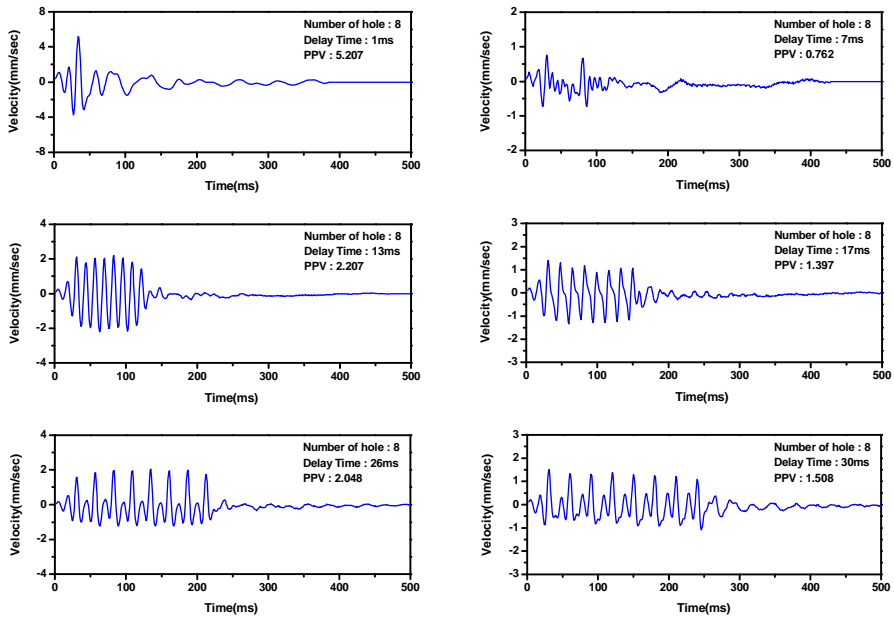


Figure 5.27 Superposition modeling waveform of SN. 4(8 hole)

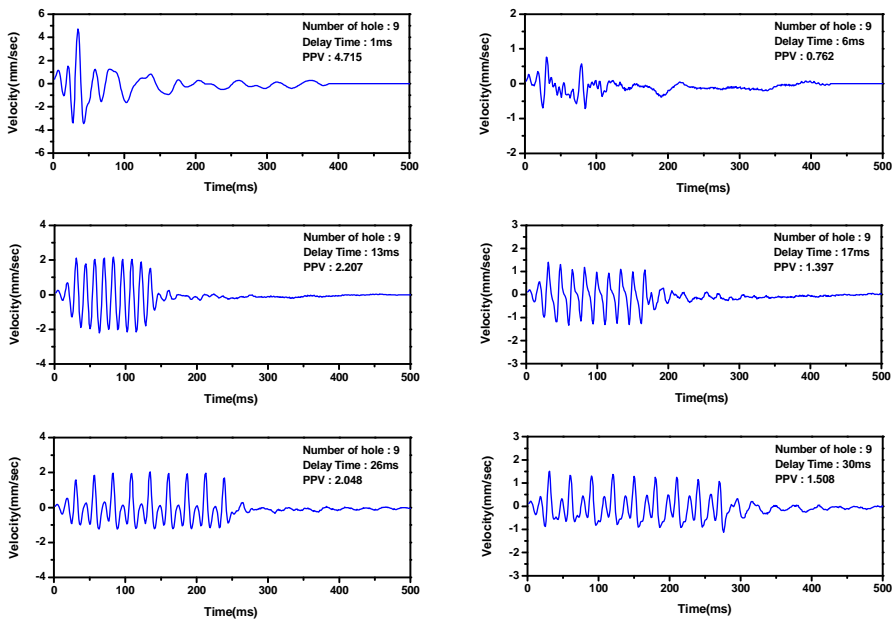


Figure 5.28 Superposition modeling waveform of SN. 4(9 hole)

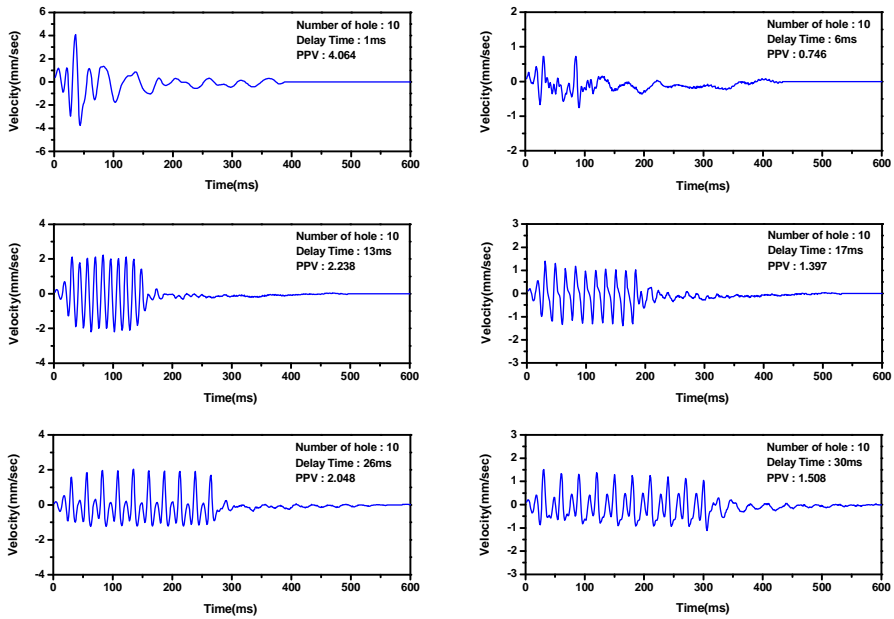


Figure 5.29 Superposition modeling waveform of SN. 4(10 hole)

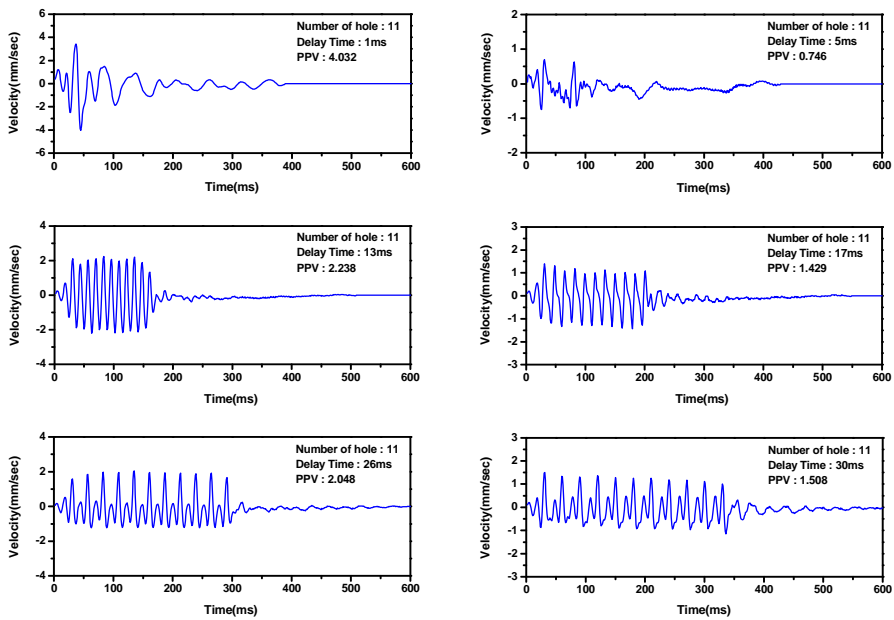


Figure 5.30 Superposition modeling waveform of SN. 4(11 hole)



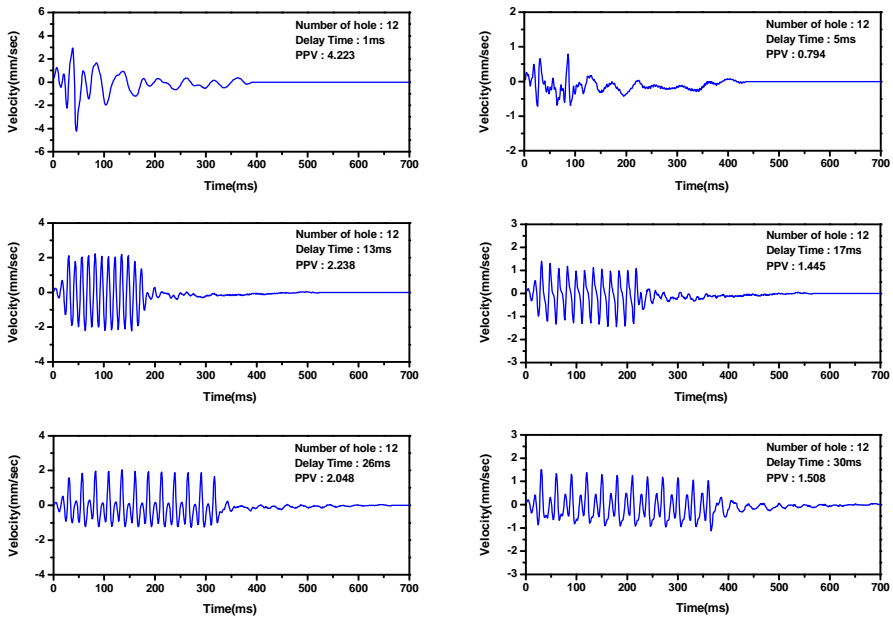


Figure 5.31 Superposition modeling waveform of SN. 4(12 hole)

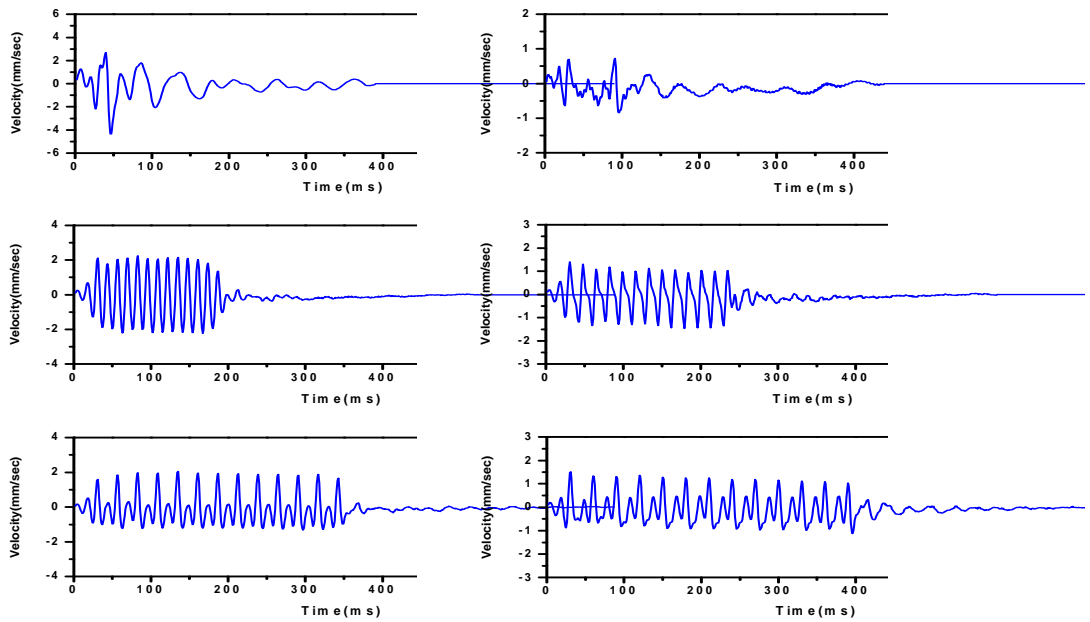


Figure 5.32 Superposition modeling waveform of SN. 4(13 hole)

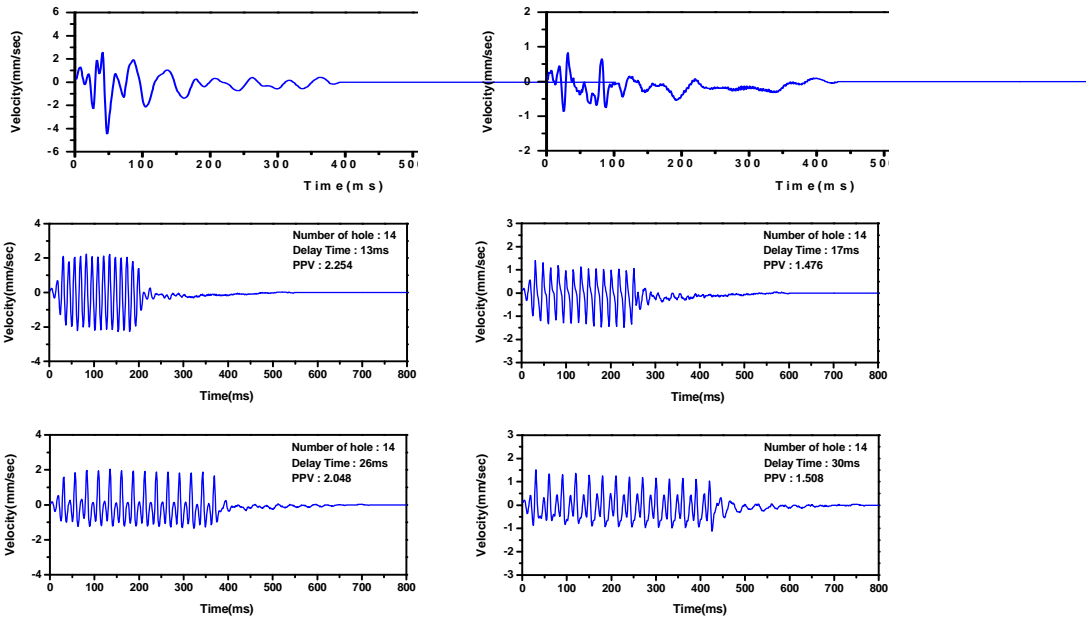


Figure 5.33 Superposition modeling waveform of SN. 4(14 hole)

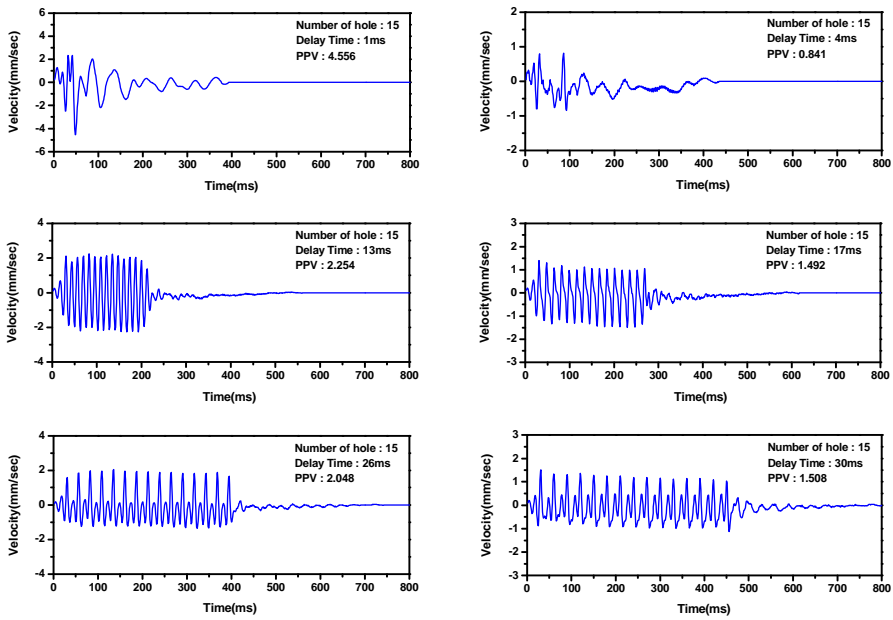


Figure 5.34 Superposition modeling waveform of SN. 4(15 hole)

## 5.5 Langefors의 시차이론을 통한 결과 검토

FFT 분석에 의한 결과로서 SN. 1의 우세 주파수는 164Hz, SN. 4의 우세 주파수는 79Hz로서, 식  $f=1/T$ 에 의해 주기  $T$ 는 각각 약 6ms와 13ms가 된다.

Langefors 시차이론의 타당성 검토를 위하여 SN. 1과 SN. 4의 0.5  $T$  1  $T$  1.5  $T$  2  $T$  2.5  $T$  3  $T$  및 이후의 특징적인 지연시차에서의 PPV를 Table 5.5와 Table 5.6에 각각 나타내었으며, Figure 5.35와 Figure 5.36에 지연시차에 따른 PPV의 변화를 도시하였다.

SN. 1의 경우 0.5  $T$ 의 지연시차에서 분리 진동파형 PPV(5.080mm/s)의 25 ~ 42.5%의 감소를 보였으며 1.5  $T$  2.5  $T$ 의 지연시차에서는 동일하거나 거의 차이(2% 증가)가 나지 않았다. 그리고 발파공수와는 크게 상관없이 1  $T$ 에서는 200%, 2  $T$ 에서는 47.5%, 3  $T$ 에서는 20%의 증가를 보였다.

SN. 4의 경우 또한 0.5  $T$ 의 지연시차에서 분리 진동파형 PPV(1.413mm/s)의 20 ~ 47%감소, 1.5  $T$ 에서 5.6%의 감소에서 25.8%증가, 2.5  $T$ 에서 9% 증가를 보였으며, 1  $T$ 에서 32 ~ 60%, 2  $T$ 에서는 18 ~ 45%, 3  $T$ 에서 3.4 ~ 11% 증가를 보였다.

그리고 3T 이상의 지연시차에서는 SN. 1이 분리 진동파형 PPV의 0 ~ 12.5%(5.080 ~ 5.715mm/s), SN. 4는 0 ~ 25.8%(1.413 ~ 1.778mm/s) 증가를 보였다.

이 분석 결과는  $H$ 값이 0.5, 1.5, 2.5일 때 진동의 감쇠가 가장 좋고,  $H$ 값이 정수일 때 진동의 증폭이 가장 크다는 Langefors의 시차이론과 잘 부합된다. 그리고 3  $T$ 를 초과하는 지연시차에서 최대 25.8%의 증가(SN. 4)를 보였으나, 이는 SN. 4의 진동 지속시간이 상대적으로 길고, 분리 진동파형 PPV(1.413mm/s)가 상대적으로 낮기 때문인 것으로 생각된다.

Table 5.5 PPV of SN. 1 per period(unit : mm/s)

| SN.1           | 2<br>Hole | 3<br>Hole | 4<br>Hole | 5<br>Hole | 6<br>Hole | 7<br>Hole | 8<br>Hole | 9<br>Hole | 10<br>Hole | 11<br>Hole | 12<br>Hole | 13<br>Hole | 14<br>Hole | 15<br>Hole |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.5T<br>(3ms)  | 3.175     | 3.810     | 2.794     | 3.683     | 2.921     | 2.921     | 2.921     | 2.921     | 2.921      | 2.921      | 2.921      | 2.921      | 2.921      | 2.921      |
| 1T<br>(6ms)    | 6.604     | 8.890     | 9.779     | 10.033    | 10.160    | 10.160    | 10.160    | 10.160    | 10.160     | 10.160     | 10.160     | 10.160     | 10.160     | 10.160     |
| 1.5T<br>(9ms)  | 5.207     | 5.207     | 5.207     | 5.207     | 5.207     | 5.207     | 5.207     | 5.207     | 5.207      | 5.207      | 5.207      | 5.207      | 5.207      | 5.207      |
| 2T<br>(12ms)   | 7.493     | 7.747     | 7.747     | 7.747     | 7.747     | 7.747     | 7.747     | 7.747     | 7.747      | 7.747      | 7.747      | 7.747      | 7.747      | 7.747      |
| 2.5T<br>(15ms) | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080     | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      | 5.080      |
| 3T<br>(19ms)   | 5.715     | 6.096     | 6.096     | 6.096     | 6.096     | 6.096     | 6.096     | 6.096     | 6.096      | 6.096      | 6.096      | 6.096      | 6.096      | 6.096      |
| 23ms           | 5.588     | 5.715     | 5.715     | 5.715     | 5.715     | 5.715     | 5.715     | 5.715     | 5.715      | 5.715      | 5.715      | 5.715      | 5.715      | 5.715      |
| 28ms           | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461      | 5.461      | 5.461      | 5.461      | 5.461      | 5.461      |
| 38ms           | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461     | 5.461      | 5.461      | 5.461      | 5.461      | 5.461      | 5.461      |

Table 5.6 PPV of SN. 4 per period(unit : mm/s)

| SN.4           | 2<br>Hole | 3<br>Hole | 4<br>Hole | 5<br>Hole | 6<br>Hole | 7<br>Hole | 8<br>Hole | 9<br>Hole | 10<br>Hole | 11<br>Hole | 12<br>Hole | 13<br>Hole | 14<br>Hole | 15<br>Hole |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.5T<br>(6ms)  | 0.921     | 1.016     | 0.762     | 0.968     | 1.080     | 1.000     | 0.873     | 0.762     | 0.746      | 0.921      | 1.095      | 1.127      | 1.111      | 1.048      |
| 1T<br>(13ms)   | 1.873     | 2.096     | 2.080     | 2.191     | 2.159     | 2.223     | 2.207     | 2.207     | 2.238      | 2.238      | 2.238      | 2.238      | 2.254      | 2.254      |
| 1.5T<br>(19ms) | 1.334     | 1.524     | 1.445     | 1.635     | 1.572     | 1.572     | 1.683     | 1.683     | 1.667      | 1.667      | 1.730      | 1.699      | 1.730      | 1.778      |
| 2T<br>(26ms)   | 1.667     | 1.889     | 2.016     | 2.000     | 2.096     | 2.048     | 2.048     | 2.048     | 2.048      | 2.048      | 2.048      | 2.048      | 2.048      | 2.048      |
| 2.5T<br>(32ms) | 1.461     | 1.540     | 1.540     | 1.540     | 1.540     | 1.540     | 1.540     | 1.540     | 1.540      | 1.540      | 1.540      | 1.540      | 1.540      | 1.540      |
| 3T<br>(39ms)   | 1.476     | 1.461     | 1.461     | 1.461     | 1.508     | 1.508     | 1.508     | 1.508     | 1.540      | 1.572      | 1.572      | 1.572      | 1.572      | 1.572      |
| 46ms           | 1.588     | 1.651     | 1.699     | 1.699     | 1.730     | 1.746     | 1.778     | 1.778     | 1.778      | 1.778      | 1.778      | 1.778      | 1.778      | 1.778      |

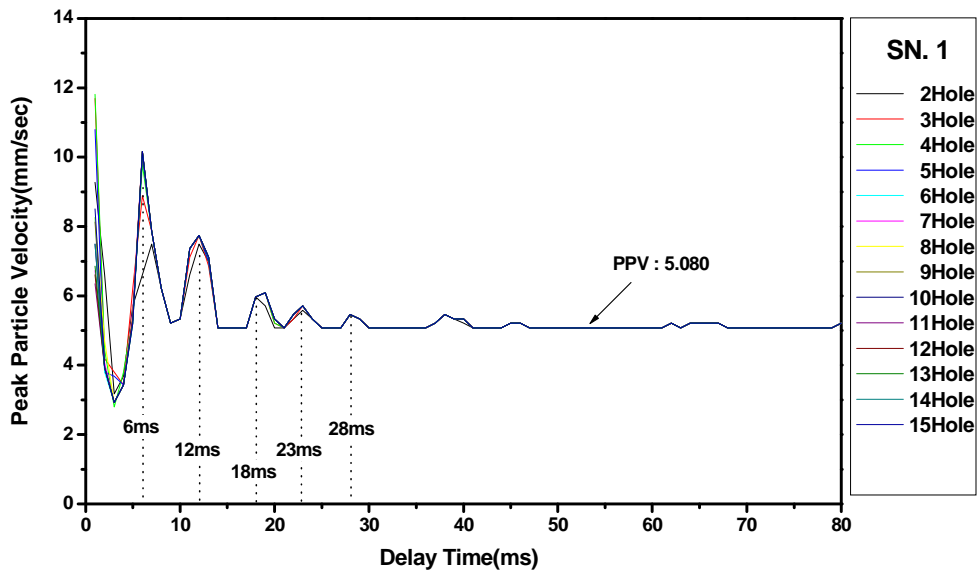


Figure 5.35 Relationship between PPV and delay time by SN. 1

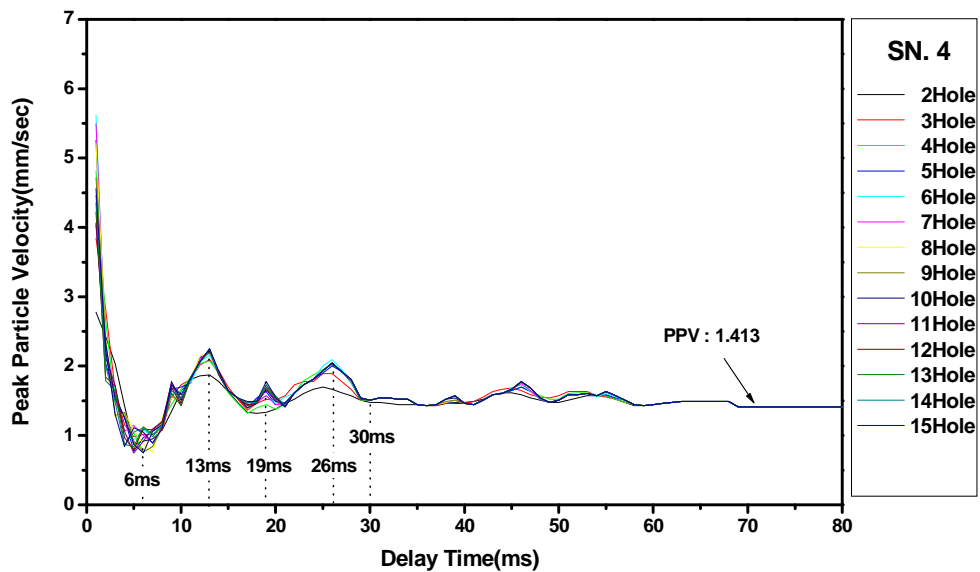


Figure 5.36 Relationship between PPV and delay time by SN. 4

## 6. 결 론

본 연구는 발파진동의 중첩모델링을 통한 발파진동의 특성을 알아보기 위해 측정된 발파진동 파형을 토대로 다른 발파공들로부터 간섭받지 않는 단일공의 진동 파형을 획득하였으며, FFT 분석을 통해 이 진동파형의 우세 주파수를 결정하였다. 또한 분리된 진동파형을 2 ~ 15공으로 발파공수를 조절하면서 1 ~ 80ms까지 1ms의 간격으로 지연시차에 변화를 주어 발파진동을 중첩 모델링하였다. 이로 인해 변화하는 발파진동의 특성을 비교 분석한 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구에서는 측정된 발파진동 SN. 1과 SN. 4를 분리 분석하여 각각의 수직 · 접선 · 진행성분의 PPV(Peak Particle Velocity)를 측정하였다. 분리한 진동파형의 성분별 PPV는 SN. 1에서 접선성분이 5.08mm/s, SN. 4에서 진행성분이 1.413mm/s로 가장 크게 측정되었으며, FFT 주파수 분석에 의해 각각의 우세 주파수는 164Hz와 79Hz로 나타났다.

2. 본 연구에서의 진동 지속시간은 SN. 1이 25ms, SN. 4는 70ms로 결정되었으며, 이 지속시간은 분리 진동파형의 PPV와 동일하거나 거의 차이가 나타나지 않기 위한 최소의 지연시차와 일치하였다.

이는 진동의 지속시간과 발파공 사이의 간섭이 없어지는 지연시차가 일치함을 의미하며, 정밀진동제어가 필요한 발파지역에서는 진동의 지속시간을 충분히 고려한 후 지연시차를 결정하여야 할 것으로 판단된다.

3. 발파공수를 2 ~ 15공으로 변화시키면서 1ms 간격으로 80ms까지 진동 중첩 모델링을 실시한 결과, SN. 1의 경우 지연시차 7ms 이상에서 동일 지연시차 내의 최대 PPV와 최소 PPV의 차가 분리 진동파형 PPV의 10%(0.508mm/s), SN. 4의

경우에는 지연시차 5ms 이상에서 분리 진동파형 PPV의 20%(0.283mm/s)내로 측정되었다.

그리고 SN. 1의 지연시차 6ms, SN. 4의 지연시차 4ms 이하에서의 측정결과는 발파공수에 따라 진동의 편차가 크게 측정되었으나, 발파공수의 증가에 따라 진동의 증가가 이루어 지지 않았다는 점에서 PPV는 발파공수의 변화 보다는 발파공들 사이의 지연시차에 의한 진동의 중첩, 즉 보강 간섭과 상쇄 간섭으로 인한 영향이 더욱 중요한 매개변수로 작용할 것으로 판단된다.

4. Langefors의 시차이론과의 비교·분석을 위하여 SN. 1과 SN. 4의 0.5  $\tau$  1  $\tau$  1.5  $\tau$  2  $\tau$  2.5  $\tau$  3  $\tau$  및 이후의 특징적인 지연시차에서의 PPV를 검토한 결과, SN. 1과 SN. 4 모두 0.5  $\tau$  1.5  $\tau$  2.5  $\tau$ 의 지연시차에서는 분리 진동파형의 PPV보다 조금 증가하거나 오히려 감소하는 경향을 보였고, 1  $\tau$  2  $\tau$  3  $\tau$ 의 지연시차에서는 상당히 증가하는 경향을 보였다.

5. 위의 결론을 토대로 진동의 감쇠가 가장 좋은 0.5  $\tau$  1.5  $\tau$  2.5  $\tau$ 의 지연시차를 사용함이 타당하나 자유롭지 못한 뇌관의 기폭초시와 거리에 따라 다양하게 변화하는 우세 주파수 때문에 3  $\tau$ 를 초과하는 기폭초시 설계가 가장 바람직할 것으로 판단되며, 획일적인 지발당 장약량의 8ms 기준에 대한 연구가 지속되어야 할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 1) 강추원, 『발파공학 A to Z』, 구미서관, 2005, pp. 397-398
- 2) 강추원, 『화약과 산업응용』, 구미서관, 2004, pp. 51-71
- 3) W.I Duvall, C.F. Johnson, A.V.C. Meyer and J.F. Devine, “Vibrations From Instantaneous and Millisecond-Delayed Quarry Blasts”, U.S. Bureau of Mines RI 6151, 1963, pp. 1-34
- 4) Siskind, D.E., Stachura, V.J., Nutting, M.J., “Low-Frequency Vibrations Produced by Surface Mine Blasting over Abandoned Underground Mines”, USBM RI 9028, 1987, pp. 58
- 5) Charles H. Dowding, “Blast Vibration Monitoring and Control”, 1984, pp. 7-22, 24-40
- 6) 박정봉, 『MS발파에서 파형분석과 FFT분석을 통한 협동장약 결정에 관한 연구』, 조선대학교 석사학위논문, 2005, pp. 23-31
- 7) 강추원, 김종인, 박정봉, “협동장약을 고려한 MS 지발 발파 특성 연구”, 『대한화약발파공학회』 23 : 11-18, 2005
- 8) 김대상외, “발파진동의 속도 및 주파수를 고려한 허용 진동치 결정에 관한 연구”, 『한국자원공학회지』, 28 : 444-454, 1991
- 9) 류창하, “발파에 의한 지반진동의 수준 및 주파수 특성 예측”, 『한국 자원공학회 최신엔지니어링 발파 특별 심포지엄 논문집』, pp. 132-141, 1995
- 10) 양형식, 『발파 진동학』, 구미서관, 1994, pp. 25, 57, 58
- 11) Per-Anders Persson, Roger Holmberg, Jaimin Lee, Rock blasting and explosives engineering, 1992, pp. 361-365
- 12) U. Langefors and B. Kihlstrom, The modern technique of Rock Blasting Third edition, 1978, pp. 258-293



- 13) Siskind, David, Vibrations from Blasting : International Society of Explosives Engineers, 2000, pp. 17-30
- 14) W. Reisz, R. McClure and D. Bartley, "Why the 8MS Doesn't Work", International Society of Explosives Engineers, 2 : 1-11, 2006
- 15) D. Anderson, "The 8 Millisecond Criterion : Have We Delayed Too Long in Questioning It?", International Society of Explosives Engineers, 1989
- 16) 임한욱, 김진수, "진동이력분석을 응용한 발파 진동파형의 특성에 관한 연구", 『한국암반공학회』, 9 : 36-37, 1999