



## 저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2014년 2월  
석사학위 논문

# 발파공간 지연시차가 지반진동에 미치는 영향

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

김 지 수

발파공간 지연시차가 지반진동에  
미치는 영향

Influence of delay time on the ground vibration

2014년 2월 25일

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

김 지 수

발파공간 지연시차가 지반진동에  
미치는 영향

지도교수    강    추    원

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2013년 10월

조 선 대 학 교    대 학 원

에너지자원공학과

김    지    수

# 김지수의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 고진석 ㉠

위원 조선대학교 교수 박천영 ㉠

위원 조선대학교 교수 강추원 ㉠

2013년 12월

조선대학교 대학원

# < 목 차 >

List of Tables .....	iv
List of Figures .....	vi
Abstract .....	viii
1. 서론 .....	1
2. 이론적 배경 .....	4
2.1 진동의 기초 이론 .....	4
2.1.1 진동의 기본용어 .....	4
2.1.2 진동의 물리적인 크기 .....	8
2.1.3 지반진동의 특징 .....	10
2.1.4 진동량의 표현 .....	10
2.2 발파에 의한 암석파쇄이론 .....	12
2.2.1 Crater .....	12
2.2.2 기체팽창 .....	12
2.2.3 반사파 .....	13
2.2.4 충격파와 가스압 .....	13
2.3 파동의 전파 이론 .....	14
2.3.1 파동의 중첩과 간섭 .....	16
2.4 발파진동의 발생과 전파 .....	17
2.4.1 발파진동의 발생 특성 .....	17
2.4.2 발파진동의 전파 특성 .....	18

2.5	Langefors 시차이론 .....	22
2.6	발파진동의 예측방법 .....	25
2.6.1	환산거리의 유도 .....	25
2.6.2	95% 신뢰식의 결정 .....	27
3.	현장실험 .....	29
3.1	대상현장의 지형 및 지질 .....	29
3.2	현장실험개요 .....	31
3.3	현장실험 방법 및 결과 .....	31
3.3.1	실험 방법 .....	31
3.3.2	현장실험의 계측 .....	33
3.3.3	현장실험 계측 결과 .....	34
4.	분석 .....	35
4.1	Case 1의 성분별 회귀분석 .....	36
4.2	Case 1의 PPV와 PVS의 회귀분석 .....	39
4.3	Case 2의 성분별 회귀분석 .....	41
4.4	Case 2의 PPV와 PVS의 회귀분석 .....	44
5.	고찰 .....	46
5.1	성분별(T, V, L) 입자속도에 의한 지반진동 예측 .....	46
5.1.1	Case 1의 성분별 지반진동 예측 .....	46
5.1.2	Case 2의 성분별 지반진동 예측 .....	52
5.2	최대입자속도(PPV)와 최대벡터합(PVS)에 의한 지반진동 예측 .....	57

5.2.1 최대입자속도(PPV)에 의한 지반진동 예측 .....	57
5.2.2 최대벡터합(PVS)에 의한 지반진동 예측 .....	62
6. 결론 .....	66
참 고 문 헌 .....	68
Appendix .....	70



## < List of Tables >

Table 2.1	Vibration unit .....	10
Table 2.2	The shock wave value of total energy .....	14
Table 2.3	Comparison of blasting vibration and earthquake .....	20
Table 2.4	Parameters which influence ground motion .....	21
Table 2.5	Variable considered in a dimensional analysis of explosion phenomena .....	27
Table 3.1	Experimental conditions .....	32
Table 4.1	Analysis conditions .....	35
Table 4.2	Prediction equation of ground vibration for component velocity(Case 1) .....	37
Table 4.3	Prediction equation of ground vibration for PPV and PVS(Case 1) .....	39
Table 4.4	Prediction equation of ground vibration for component velocity(Case 2) .....	42
Table 4.5	Prediction equation of ground vibration for PPV and PVS(Case 2) .....	44
Table 5.1	The influence of charge per delay on the predicted ground vibration velocity for Case 1 .....	49
Table 5.2	Maximum ratio of increase on rate of velocity components for Case 1 .....	50
Table 5.3	The influence of charge per delay on the predicted ground vibration velocity for Case 2 .....	54
Table 5.4	Maximum ratio of increase on rate of velocity components for Case 2 .....	55

Table 5.5 The influence of charge per delay on the predicted ground vibration velocity for PPV .....	59
Table 5.6 Maximum ratio of increase on rate of velocity components for PPV .....	60
Table 5.7 The influence of charge per delay on the predicted ground vibration velocity for PVS .....	63
Table 5.8 Maximum ratio of increase on rate of velocity components for PVS .....	64

## < List of Figures >

Figure 2.1 Harmonic oscillation .....	7
Figure 2.2 The size of sine wave vibration .....	7
Figure 2.3 Body wave and Rayleigh wave .....	15
Figure 2.4 Vertical displacement component of P wave, S wave and Rayleigh wave in a short duration period .....	15
Figure 2.5 Constructive interference .....	17
Figure 2.6 Destructive interference .....	17
Figure 2.7 Schematic of the fracturing and deformation around an explosion in rock .....	18
Figure 2.8 Measuring direction of ground vibration .....	19
Figure 2.9 Ground vibration from five different charge and with delays 0~100ms .....	24
Figure 3.1 Site map of study area .....	29
Figure 3.2 Geological map of study area .....	30
Figure 3.3 Blasting pattern .....	32
Figure 3.4 Foreground and measurements of study area .....	33
Figure 4.1 Relationship between T, V, L components and scaled distance(Case 1) .....	38
Figure 4.2 Relationship between peak particle velocity(PPV), peak vector sum(PVS) and scaled distance(Case 1) .....	40
Figure 4.3 Relationship between T, V, L components and scaled distance(Case 2) .....	43
Figure 4.4 Relationship between peak particle velocity(PPV), peak vector sum(PVS) and scaled distance(Case 2) .....	45

Figure 5.1 Relationship between predicted ground vibration velocity (component) and distance for Case 1 .....	51
Figure 5.2 Relationship between ratio of increase and distance for Case 1(component velocity) .....	51
Figure 5.3 Relationship between predicted ground vibration velocity (component) and distance for Case 2 .....	56
Figure 5.4 Relationship between ratio of increase and distance for Case 2(component velocity) .....	56
Figure 5.5 Relationship between predicted ground vibration velocity (PPV) and distance for different delay time .....	61
Figure 5.6 Relationship between ratio of increase and distance for different delay time(PPV) .....	61
Figure 5.7 Relationship between predicted ground vibration velocity (PVS) and distance for different delay time .....	65
Figure 5.8 Relationship between ratio of increase and distance for different delay time(PVS) .....	65

# ABSTRACT

## Influence of priming location on the ground vibration

Kim, Ji Soo

Advisor : Prof. Kang, Choo Won, Ph.D.

Department. of Energy & Resource Engineering,

Graduate School of Chosun University

In the past, rock blasting work for excavation work on the ground was limited. In recent years, a large building from the mountains wallpaper Dig site and construction of apartments for redevelopment for housing and crowded around the existing structures within the city center is underway. Furthermore, the underground reserve base, development of underground space has been expanded to in deep underground is increasing the demand. This specialization of blasting construction, enlargement, depending on the national scene with a large blast on the rise, and the use of explosives is increasing each year.

Today, our society through the process of industrialization continued growth comes during a highly neglected environmental problems, especially in the field of construction noise and vibration issues are rapidly emerging in recent years. This quantitative growth to qualitative growth in the pursuit of change is the situation. In addition, the government, like in reality, considering the environmental impact of the regulatory environment, as a means of dispute conciliation committee established by the permanent organization is operating the sleep. So blasting operations are subject to the more stringent regulations.

Blasting engineers compared to conventional blasting methods are looking for effective vibration control methods. And when the blasting was designed they considered a top priority to safety in efficiency, reliability and safety of design

variables.

Determining the propagation characteristics of blasting vibration factors are location and blasting conditions. Location means that the blasting site and the geometric shape of the structure, the target of rocks and geological features include the mechanical properties. Blasting conditions means that the type of using explosives, weight per delay, composition charging, blasting method, tamping condition, number of free face, distance.

Test blasts (2~3holes) were carried out a total of 16 times using different spacing, burden, drilling length, charge per delay and was derived the formula to predict blast vibration. This study investigated the characteristics of vibration by analysis of the nomogram and prediction of ground vibration about component (Transverse, Vertical, Longitudinal) particle velocity, peak particle velocity (PPV), peak vector sum (PVS) from delay time (20, 25ms) by the formula to predict ground vibration.

This study investigated the characteristics of vibration by analysis of the nomogram and prediction of ground vibration about component (Transverse, vertical, longitudinal) particle velocity, peak particle velocity (PPV), peak vector sum (PVS) from delay time by the formula to predict ground vibration. And it analyzed the trends of vibration damping by standards charge 0.5, 1.6, 5, 15kg. Standards charge is "Blasting design and construction guidelines to road construction" by the Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. Depending on the charge in favor of vibration control method is proposed. Thus, when the design was to be used as a variable.

The result of this study can be summarized as follows

(1) Vibration velocity were predicted from an average ground vibration prediction equation of component (T, V, L) velocity depending on the delay time (20, 25ms) at 5~200m distance.

As a result, the vibration level of transverse component of the vibration level is lower than the vertical and longitudinal component of the vibration levels in the near distance and the vibration level of transverse component of the vibration level

is higher than the vertical and longitudinal component of the vibration levels in the long distance.

The vibration level of longitudinal component of the vibration level is lower than the vertical component of the vibration levels and the vibration level of longitudinal component of the vibration level is higher than the transverse component of the vibration levels in the near distance.

(2) Vibration velocity were predicted from an average ground vibration prediction equation of peak particle velocity(PPV) and peak vector sum(PVS) depending on the delay time and priming location at 5~200m distance.

The case of 1(20ms) and 2(25ms) reversal of the two components were tend to be different, but vibration level of Case 2(25ms) in the near distance were predicted lower and vibration level of Case 2(20ms) in the long distance was predicted lower.

# 1. 서론

과거에는 암반굴착작업을 위한 발파작업이 지상에서 국한되었으나 근래에는 산간벽지에서부터 대형빌딩 터파기 현장이나 도심 재개발을 위한 아파트 건설공사를 위하여 기존 구조물 주변과 주거시설이 밀집한 도심 내에서도 진행되고 있고 지하비축기지, 지하공간 개발 등으로 지하심부에 까지 확대되었으며 그 수요가 증가하고 있는 실정이다. 또한 최근 들어 발파공사의 전문화, 대형화에 따라 대규모 발파 현장이 전국적으로 증가 추세에 있으며, 화약의 사용 또한 매년 증가하고 있다.

오늘날 우리사회는 산업화 과정을 통하여 고도의 성장을 지속해오는 동안에 등한시 되었던 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 조정 위원회를 상설기구로 발족시켜 운영하고 있는 실정이다. 그래서 발파 작업은 더욱 엄격한 규제를 받게 되었으며, 발파기술자들은 종래의 발파방법보다 효과적으로 진동제어를 하려는 관점에서 발파 설계 시 효율성, 안정성 및 안전성 등의 설계변수들 중에서도 안전성을 가장 우선적인 기준으로 고려하고 있다.

발파로 인해 발생하는 발파재해들 중 발파진동의 저감을 위한 방법으로 동시에 기폭되는 화약량인 지발당 장약량을 줄임으로써 발파지점에서 발생하는 발파진동을 저감시키는 방법과 라인드릴링이나 프리스플리팅 등의 조절발파법을 이용하여 발파진동을 진동 전과 경로상에서 차단하는 방법이 널리 적용되고 있다. 그러나 발파작업의 시공성과 경제성을 고려할 때 지발당 장약량을 줄임으로써 발파진동을 제어하는 데는 한계가 있고, 진동 전과 경로 상에서 발파진동을 차단하는 방법은 정량적인 진동저감 효과를 제시할 수 있을 만큼의 충분한 연구결과가 제시되어있지 못한 실정이다.

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

발파진동의 전파특성에 관한 연구로 양형식 등(2010)은 제주도에 분포하는 스킨리아층에서의 암반 발파 특성연구를 실시한 결과 스킨리아층은 발파로 인해 생긴 진동을



멀리 전파하고 감쇠가 줄어드는 특성이 나타났고, 최형빈 등(2010)은 소량의 폭약으로 인위적인 진동에너지를 발생시키는 발파시험에 전자뇌관을 처음 적용하였다. 시험장소인 도심지 특정지역에서 전자뇌관을 이용한 시추공 발파시험 결과 얻어진 진동추정식으로 민원발생 특정장소에서 진동속도 예측이 가능토록 하였으며, 또한 전기뇌관과 전자뇌관 지연시차의 상관관계, 국내 문헌 연구결과 얻어진 시추공 발파 PPV의 상관관계를 비교·분석하여 시추공 발파의 유용성 및 중요성에 대해 연구하였다.

본 연구와 유사한 연구인 발파진동의 전파 특성을 결정짓는 인자 중 지연시차에 관한 연구로 두준기(2000)는 전기식 지발뇌관을 이용하여 지발뇌관 자체의 초시와 다단발파기에 의해 조정된 초시를 이용하여 발파패턴을 설계할 때에는 선 발파공과 후 발파공의 초시가 뒤바뀌거나 8ms 이내의 중복시차가 나타나지 않도록 뇌관배열에 세심한 주의를 기울이지 않으면 발파설계에서 규정한 허용진동 값보다 큰 발파진동이 발생할 수 있다고 하였고, 송영석 등(2004)은 국내 석회석 광산에 적용되는 지발시차는 20ms나 25ms로 한정되어 있으며 기폭시차의 오차에 따른 진동 예측의 불확실성 및 파쇄입도의 불균일 등의 한계점에 당면했다고 한다. 따라서 기폭 시스템보다는 발파 규모를 줄이고 있는 실정이다. 이는 환경적인 측면에 맞추기 위하여 기술적인 측면을 고려하지 못하는 방법으로 발파가 이루어지고 있기 때문에, 이를 개선하고 보다 더 효과적인 발파를 시행하기 위하여 정확한 초시의 전자뇌관을 적용하여 현장에 경제성을 향상시키고, 환경적인 측면에서도 만족할 수 있는 최적의 기폭시차 연구하였다. 그리고 윤지선 등(2008)은 진동제어가 절실히 필요한 상황에서 진동제어에 효과가 있는 전자뇌관을 이용하여 불쾌감을 주던 발파음을 쾌적한 발파음으로 전환하고자 연주식 발파공법 개발에 대한 연구가 진행되어왔으며, 리듬감 구현에 중점을 두고 실험을 실시하였다. 그 결과 실험 현장의 최적지연초시는 34ms를 나타내었고, 50ms 이상에서는 수렴하는 경향을 보인다고 하였다.

이와 같이 지금까지 이루어진 연구들을 살펴보면 발파진동의 복합적인 원인에 반하여 단편적인 연구로 진행되거나 연구가 이루어지거나 적용범위가 연구가 이루어진 해당 현장만으로 국한적으로 나타나며 발파설계 인자로서 이용되는 데 한계를 보였다.

본 연구는 발파공간 지연시차에 의한 진동의 전파 특성을 파악하기 위해서 공간격, 저항선, 천공장 그리고 장약량 등을 달리하여 총 16회의 시험발파(2~3공)를 실시하여 지반진동 예측식을 도출하였다. 그리고 도출된 평균(50%) 지반진동 예측식을 이용하여 발파공간 지연시차와 기폭위치에 따른 성분별(transverse, vertical, longitudinal component) 입자속도, 최대입자속도(PPV) 및 최대벡터합(PVS)의 노모그램 분석과 지반진동 예측을 통해 진동특성을 규명하였고, 국토해양부의 “도로공사 노천발파 설계 시공 지침 및 요

령”에 제시된 표준발파공법의 공법별 경계 기준 장약량인 0.5, 1.6, 5, 15kg을 적용하여 지연시차에 따른 진동 증가율을 비교분석하였다. 그리하여 장약량에 따라 진동제어에 유리한 발파방법을 제안하여 발파설계의 인자로 사용할 수 있도록 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 진동의 기초 이론

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

발파에 의한 지반진동은 암반 중에 밀폐된 상태로 놓인 폭약이 폭굉하여 발생하는 폭약의 폭굉압은 기폭 후 수  $\mu\text{sec}$ 에서 최고치에 달하고 그 압력은 5~20만 기압으로 추정되며, 이 값은 주위의 암반 강도보다 훨씬 높다.

이와 같은 초고압의 충격하중을 받은 암석은 그 충격점 가까이에 있어서는 유동적 성격을 나타내고 이 유동파는 전파와 함께 감쇠하고 탄성파에 가까운 충격파로 이행한다.

파쇄영역을 통과해서 주위 암반에 3차원적으로 방사된 파동은 암반에 균열을 주면서 전파해가지만 거리에 따라 그 감쇠가 현저하며 암반에 대한 파괴작용조차 없는 탄성파로 된다. 여기까지의 영역을 소성영역이라고 하며, 그 후 탄성파가 전파해 가는 영역을 탄성영역이라고 한다.

한편, 장약공 내의 폭약의 폭발로 인하여 발생한 총 에너지 중 대부분은 주위 암석을 파괴, 이동시키지만 이 에너지 중 0.5~20%는 탄성파로 변화되어 암반을 전파해 감으로써 폭원으로부터 떨어진 지점에서 암석 또는 지표면에서 진폭과 주기는 갖는 진동으로 나타난다.

#### 2.1.1 진동의 기본용어

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

전하는 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 고려해보자. 어떤 시간 t에 있어서 점 A의 위치 X가 시간적으로 정현 변화한다고 가정하면 x의 관계는 다음 식 (2.1)으로 표현된다.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

따라서,  $\omega$ 는  $2\pi$ 시간 사이에  $x$ 가 몇 회 동일한 상태로 되돌아오는가를 나타내는 횟수를 나타내며 단진동수 또는 각진동수라 부른다. 시간적으로 변화하는 진동현상을 표현하는 데는 변위 외에 속도와 가속도가 있다. 속도는 변위의 시간에 대한 변화의 비율이고, 가속도는 속도의 시간적 변화의 비율이다. 따라서 속도  $v$ 는 변위  $x$ 를 시간  $t$ 로 미분해서 얻어진다. 정현진동의 경우는 식 (2.1)에 의해 식 (2.6)과 같이 된다.

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

$\omega X$ 는 이때의 최대치로 속도 진폭이라 부른다. 또 가속도  $a$ 는 속도  $v$ 를 시간  $t$ 로 미분하여 얻어지는데 식 (2.6)에 의해 식 (2.7)과 같이 되며  $\omega^2 X$ 는 가속도진폭이라 부른다.

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

Figure 2.1은 정현진동의 경우 변위, 속도 및 가속도의 파형을 나타낸다. 위상각  $\phi$ 는 0의 경우이다.

Figure 2.1에서 알 수 있듯이 속도의 파형은 변위의 파형에 비해  $90^\circ$  진행해 있다. 이것을 위상이  $90^\circ$  나아갔다고 한다. 이것은 식 (2.1)과 식 (2.6)에 명확히 나타나 있다. 마찬가지로 가속도의 위상은 속도의 위상보다  $90^\circ$  더 진행하고 있고 가속도의 위상은 변위의 위상보다  $180^\circ$  진행하고 있음을 알 수 있다.

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

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

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

$$= \frac{X}{\sqrt{2}} \approx 0.707X \quad (2.8)$$

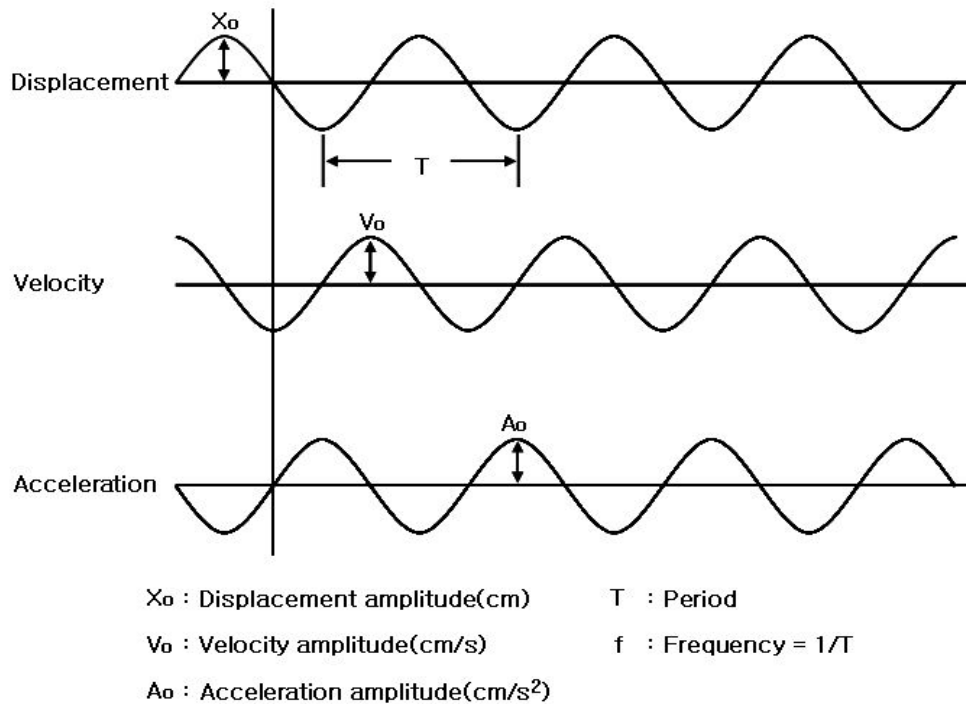
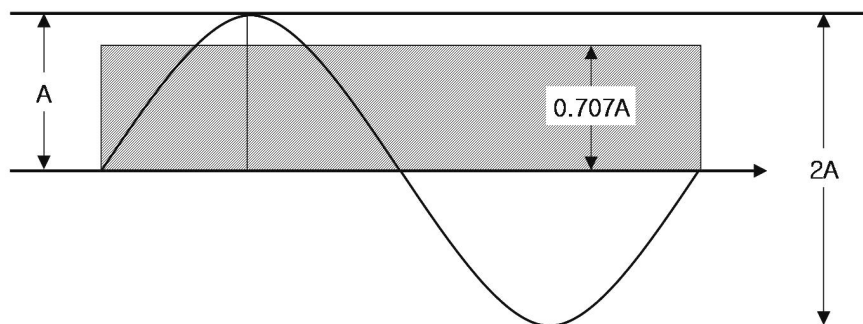


Figure 2.1 Harmonic oscillation.



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

Figure 2.2 The size of sine wave vibration.

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

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

## 2.1.2 진동의 물리적인 크기

진동변위(displacement)는 정지상태로부터 움직인 폭을 표시하며, 전체진폭(peak to peak치)과 편진폭(0 to peak치)이 있다. 일반적으로 진폭은 편진폭을 의미한다. 단위는 m이지만, 실제의 진폭은 매우 작아  $\mu\text{m}$ (1/1,000mm)를 사용한다. 공해진동에 있어서는 대부분 500 $\mu\text{m}$  이하의 변위를 대상으로 한다. 지반진동을 정현파 진동으로 가정하면 지표면에서의 변위는 식 (2.9)와 같다.

$$X = A_0 \sin(\omega t) \quad (2.9)$$

여기서,  $X$ 는 변위진폭,  $A_0$ 는 변위진폭의 최대치,  $\omega$ 는 각진동수,  $t$ 는 시간을 나타낸다.

진동속도(velocity)란 단위 시간당의 변위량으로, 단위는 m/s이며, 표기 기호는 일반적으로  $v$ 로 나타낸다. 진동속도는 변위진폭을 미분함에 의해 구할 수 있으며, 식 (2.10)과 같으며, 이로부터 진동 속도 최대치(peak치)는  $A_0\omega$ 임을 알 수 있다.

$$v = A_0\omega \cos(\omega t) \quad (2.10)$$

단위 시간당 속도 변위량을 진동가속도(acceleration)라고 하며, 단위는  $\text{m/s}^2$ ( $\text{gal}=\text{cm/s}^2$ ,  $g=9.8\text{m/s}^2$ )이며, 중력가속도는 980gal(1G)이다. 지진에 의해 피해가 발생한 경우는 200~300gal정도가 되며, 공해진동에서는 30gal(많은 사람이 진동을 느낌) 전후를 대상으로 하고 있다. 진동가속도  $a$ 는 식 (2.11)과 같다.

$$a = -\omega^2 A_0 \sin(\omega t) \quad (2.11)$$

식 (2.11)로부터 진동가속도 최대치(peak치)는  $A_0\omega^2$ 임을 알 수 있다.

피크-피크값(peak to peak치,  $2A_0$ )은 전체 진폭을 말하며, 일반적으로 진폭이라 표기하며, 짧은 시간의 충격 등을 크기로 나타내기에 특히 유용하다. 이 값은 단지 최대값만을 표시할 뿐이며 시간에 대한 변화량은 나타나지 않는다.

그리고, 최대값(peak치,  $A_0$ )은 편진폭을 말하며, 일반적으로 진폭이라 표기하며, 짧은 시간의 충격 등을 크기로 나타내기에 특히 유용하다. 이 값은 단지 최대 값을 표시할 뿐이며 시간에 대한 변화량은 나타나지 않는다.

평균값( $2A_0/\pi$ )은 파의 시간에 대한 변화량을 표시하지만 어떤 유용한 물리적 양과는 직접 관련이 없기에 실제적으로 사용범위가 국한되어 있다.

시간에 대한 변화량을 고려하고 진동의 파괴적 능력을 나타내는 에너지양과 직접 관련된 진폭을 표시하는 실효치(RMS값,  $A_0/2^{0.5}$ )는 진동크기의 표현에 가장 적절하다.

진동가속도레벨(Vibration acceleration level, VAL)은 측정대상 진동의 가속도 실효치를  $A_r(m/s^2)$ , 기준진동의 가속도 실효치를  $A_0(10^{-5}m/s^2)$ 라 하면, 진동가속도 레벨  $L_a(dB)$ 은 식 (2.12)로 표시된다.

$$L_a = 20\log(A_r/A_0) \text{ (dB)} \quad (2.12)$$

인체에 느껴지는 약한 진동의 진동 가속도 레벨을 60dB, 진도 4정도의 진동가속도 레벨은 94dB이다. 인체에 느껴지는 가장 약한 진동의 가속도레벨은 0dB이 아니며, 약 50dB정도이다.

진동레벨(Vibration level, VL)이란 단순한 물리량인 진동가속도레벨을 진동평가지 이 값에 인체진동감각에 따른 주파수보정을 하여 평가(합산)한 것을 진동레벨이라 하며, 식 (2.13)과 같다.

$$VL = VAL + W_n \text{ (dB(V))} \quad (2.13)$$

여기서,  $W_n$ 은 인체감각에 따른 주파수 보정치이다.



### 2.1.3 지반진동의 특징

발파에 의해 발생한 지반진동은 어느 점에서 생각하면 시간경과와 함께 항상 진동의 크기가 변화하고 있지만 지반운동은 일반적으로 변위(displacement: D), 입자속도 (particle velocity: V), 가속도(acceleration: A) 3성분과 주파수(frequency: f)로 표시된다.

지반을 따라 전파되는 발파진동으로 인해 구조물과 인체에 대하여 미치는 영향이 문제가 되고 있으며, 발파재해의 대부분은 발파진동이 점하고 있다.

발파소음에 대해서는 발파작업에 따라 발생하는 파동의 문제란 점에서 발파진동과 유사한 현상이지만 심리적인 것에 한정된다. 최근 문제시되고 있는 저주파 소음의 경우 발파규모, 발파 형태에 의해 파생되는 경향이 심하므로, 충분한 대책을 필요로 한다.

발파에 의해 발생하는 폭풍압은 공기의 압력파로써 구조물의 운동을 일으켜 벽의 균열과 창문파괴를 유발할 수 있으며, 인간에게 미치는 영향을 정량적으로 분석하기에는 매우 어려운 점이 있다.

### 2.1.4 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 2.1에 나타내는 각종 단위들도 사용된다.

Table 2.1 Vibration unit

Classification	Basic unit	The others
Displacement	cm	$\mu=10^{-3}\text{mm}=10^{-4}\text{cm}$ mm= $10^{-1}\text{cm}$ m= $10^2\text{cm}$
Velocity	cm/sec	mm/sec= $10^{-1}\text{cm/sec}$ Kine=1cm/sec m/sec= $10^2\text{cm/sec}$
Acceleration	cm/sec <sup>2</sup> (gal)	gal=1cm/sec <sup>2</sup> g= $980\text{cm/sec}^2 \approx 1000\text{gal}$ m/sec <sup>2</sup> = $10^2\text{cm/sec}^2$

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

$$\text{속도 진폭} \quad V = \omega X = 2\pi f X \quad (2.9)$$

$$\text{가속도 진폭} \quad A = \omega V = \omega^2 X = (2\pi f)^2 X \quad (2.10)$$

따라서, 변위, 속도, 가속도의 각 진폭을 상호 환산할 수 있다.

진동의 크기를 나타내는 cm, cm/sec, cm/sec<sup>2</sup>라는 단위는 직선 척도에서 숫자로서는 쉽게 알 수 있지만 실제로는 알기 어려운 것도 있다. 또, 인간의 감각에 관계되는 양은 그 양이 2배로 되어도 사람의 감각의 정도는 2배로 되지 않고 Weber·Fefiner의 법칙에 의하여 등차 급수적으로 대응한다. 즉, 대수 척도에 대응한다. 이와 같은 사고로부터 음향 쪽에서는 일찍부터 대수척도인 dB(decibel)이 사용되어 왔다. 공해진동에서도 최초에는 속도의 Peak치로 규제하는 방법이 널리 사용되었으나 최근 dB이 우리나라에서 공식으로 사용되게 되었다.

가속도 레벨은 진동가속도를 dB단위로 나타낸 것으로서 식 (2.11)로 정의된다.

$$\text{가속도 레벨} \quad L = 20\log_{10} \frac{A}{A_0} (dB) \quad (2.11)$$

여기서, A는 측정치의 가속도 실효치(m/sec<sup>2</sup>), A<sub>0</sub>는 기준치(10<sup>-5</sup>m/sec<sup>2</sup>)를 나타낸다.

그 외에 속도, 변위에 대해서도 식 (2.11)과 같은 모양의 표시법에서 속도에 대해서는 20log<sub>10</sub>(v/v<sub>0</sub>)(v<sub>0</sub>=10<sup>-6</sup>kine), 변위에 대해서는 20log<sub>10</sub>(d/d<sub>0</sub>)(d<sub>0</sub>=10<sup>-11</sup>m)로 나타낸다. 그런데 가속도 레벨은 대수 표시이기 때문에 가속도가 원래 가속도의 2배로 되어도 가속도 레벨은 2배로 되지 않고 가속도 레벨은 20log<sub>10</sub>2≒6dB만 증가하게 된다.

식 (2.11)로 정의된 가속도 레벨은 인체감각 등에는 관계없는 물리량의 표시인데 진동이 인체 또는 건물 등에 미치는 영향은 진폭과 진동수에 의존하며 또, 연직운동과 수평진동에서는 감지방법이 다르다. 그래서 ISO(국제표준화기구)의 인체의 진동에 대한 진동폭로기준에 의하여 전기의 가속도 레벨에 주파수에 의한 인간의 진동감각에 보정한 것을 진동레벨(보정가속도 레벨)이라 한다.

연직방향에 대하여 진동레벨을 식으로 정의하면 식 (2.11)에 있어서 A<sub>0</sub>를 식 (2.12)와 같이 주파수마다 보정한 것이 된다.

$$\begin{aligned}
1 \leq f \leq 4 & \quad A_0 = 2 \times 10^{-5} f^{-\frac{1}{2}} (\text{m/sec}^2) \\
4 \leq f \leq 8 & \quad A_0 = 10^{-5} (\text{m/sec}^2) \\
8 \leq f \leq 90 & \quad A_0 = 0.125 \times 10^{-5} f (\text{m/sec}^2)
\end{aligned}
\tag{2.12}$$

예를 들면, 인체감각의 하한 한계치를 진동레벨로서 계산해 보면 다음과 같다.

$$20 \log_{10} \left( \frac{10^{-2}}{10^{-5}} \right) = 60 \text{dB}
\tag{2.13}$$

즉, 한계치는 연직진동의 4~8Hz 및 수평진동의 1~2Hz에 대하여 1gal( $10^{-2} \text{m/sec}^2$ ) 정도로서 식 (2.13)과 같다.

## 2.2 발파에 의한 암석파쇄이론

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

### 2.2.1 Crater

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

### 2.2.2 기체 팽창

발파에 의해 발파공에 작용하는 압력은 기체 팽창에 의한 가스압의 절반 정도의 크기

이며, 충격파의 형태로 주변 암반에 전달된다. 충격파에 의한 분쇄대는 발파공 반경의 약 2배 거리까지 형성되고, 그 이후 방향성이 나타나는 몇 개의 방사상 균열이 형성된다. 충격파가 자유면에 도달하면 균열들에 가스압이 작용하여 균열이 성장하며, 이러한 균열의 성장이 자유면에 이르면 암석은 그때까지 남아 있는 가스압에 의한 변위가 발생한다.

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

### 2.2.3 반사파

반사 응력파에 의한 암석 파쇄의 용이성은 인장강도와 압축강도를 사용하여 나타내는데, 그 비를 파쇄용이 계수(blastability coefficient)라 한다. 암석은 인장력에 약하므로 파쇄용이 계수가 클수록 파쇄가 쉽게 된다. 파쇄용이 계수는 10에서 100사이의 값을 지닌다. 반사파 이론은 암반이 인장 파쇄에 약하기에 주된 에너지를 자유면에서 반사된 인장파로 보고 암반의 응력 상태와 파괴조건식을 비교하여 설명하는 이론이다. 발파공에 인접한 지역에서는 압축응력파에 의한 파쇄가, 바깥 지역은 인장응력파에 의한 파쇄가 주로 이루어진다. 이 이론에 의하면, 폭굉파가 자유면이나 물리적인 성질이 다른 매질 경계에 도달하면 암반에 강한 충격을 주고 그 결과 새로운 응력파가 발생하여 내부로 전달되어 암석이 판의 형태로 파쇄(spalling, scabbing or slabbing)되고 또다시 새로운 자유면이 형성되는 과정이 반복하여 일어난다고 파쇄 기구를 정의한다(Obert, et al., 1949, 1950; Hino, 1956; Duvall, et al., 1962, 1963).

### 2.2.4 충격파와 가스압

Kutter and Fairhurst(1971)는 충격파와 가스압 중 하나를 파쇄기구의 주된 에너지원으로

로 설명하는 기존의 이론에 대해 파쇄는 두 가지 에너지원의 복합적인 작용으로 이루어진다고 실험에 의해 밝혔다. 이 이론에 의하면 짧은 시간에 막대한 크기로 생성된 폭굉파는 주변 매질로 전달되나, 그 지속 시간이 비교적 긴 가스압이 준정적거동 상태를 유지하며 이미 형성된 균열을 확장, 전진시킨다는 것이다.

이외에도 Torque theory(Atlas Powder Company, 1987), Nuclei theory(Barker, et al., 1978; Winzer, et al., 1979; Fourney, et al., 1983; Adams, et al., 1983; McHugh, 1983) 등의 파쇄기구 설명 이론이 있으나 일반적으로 충격파가 균열을 형성하고 가스압이 균열을 확장, 전진시킨다는 것이 일반적으로 받아들여지고 있다. Table 2.2는 전체 에너지 중에서 충격파가 차지하는 비를 나타내며, 약 15% 내외이다. 또한 가스압이 20~40%이며 그 이외의 에너지는 비역학적인 일로 손실된 에너지이다.

Table 2.2 The shock wave value of total energy

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

## 2.3 파동의 전파 이론

짧은 지속시간을 갖는 충격파가 탄성 공간의 표면 어느 지점에서 발생하면 입체파는 Figure 2.3과 같이 반원형의 파면을 그리면서 전파된다. 충격지점으로부터 일정한 거리에 떨어진 지점에서는 전달된 파동에 의해 수직 변위가 지표에서 발생한다. 이때 종파가 가장 빠른 전달속도를 가지므로 가장 먼저 도달하고, 다음이 횡파, Rayleigh파의 순서로 도달하게 되며, 이것을 그림으로 표현하면 Figure 2.4와 같다.

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

종파, 횡파, Rayleigh파 등의 파가 존재한다.

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

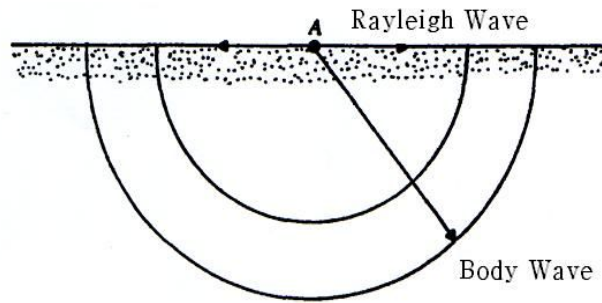


Figure 2.3 Body wave and Rayleigh wave.

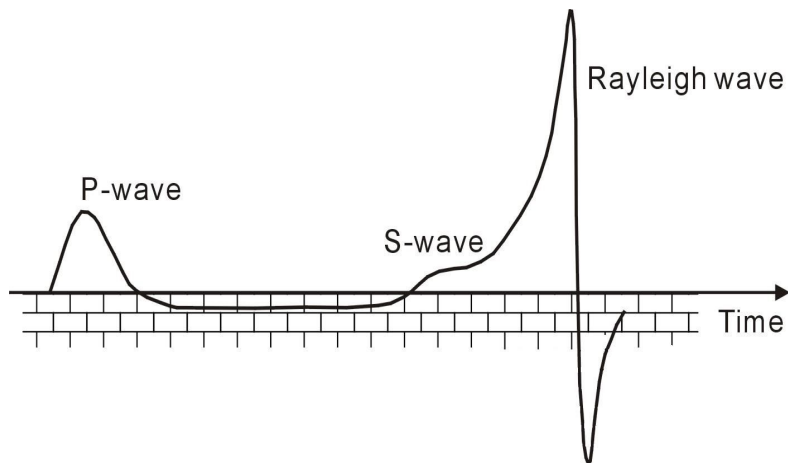


Figure 2.4 Vertical displacement component of P wave, S wave and Rayleigh wave in a short duration period.

### 2.3.1 파동의 중첩과 간섭

자연에 존재하는 많은 재미있는 파동 현상들을 움직이는 파동 하나만 가지고 기술하기란 불가능하다. 그 대신 두 개 또는 그 이상의 파동이 공간의 동일한 영역을 통과할 때 어떤 일이 발생하는지에 대해서 분석할 수 있어야 한다. 그러한 분석을 위하여 중첩의 원리(principle of superposition)를 이용할 수 있다.

둘 또는 그 이상의 진행 파동이 매질을 통과할 경우, 그 결과 생기는 파동은 각 지점에서 각 파동의 변위를 서로 합함으로써 얻어지는데 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 않고 서로 통과할 수 있다는 것이다. 예를 들면, 돌 두 개를 연못에 던질 때, 퍼져나가는 원형 파동은 서로 파괴하지는 않는다. 사실 잔물결들도 서로 통과한다. 마찬가지로 두 음원에서 나온 음파들이 공기를 통과할 때, 그들은 서로를 통과한다. 주어진 위치에서 듣는 소리는 두 음파에 의한 교란의 결과이다.

Figure 2.5(a)와 2.5(b)는 같은 진폭과 진동수를 갖는 두 파동을 보여 준다. 어느 순간 이들 두 음파가 공간의 같은 영역을 통과하려 한다면, 그 순간의 결과로서 생기는 파동은 Figure 2.5(c)와 같은 형태를 갖게 될 것이다. 예를 들어 이들 파동의 진폭이 1m인 수면파라고 가정해 보자. 마루가 마루를 만나고 골을 만나 중첩하는 순간, 그 결과 생기는 파동은 2m의 진폭을 갖는다.

이와 같은 경우의 “파동은 위상이 같다”라고 하고 “보강간섭(constructive interference)을 일으킨다”라고 한다.

반면, Figure 2.6(a)와 2.6(b)는 두 개의 유사한 파동을 보여주지만 한 파동의 마루가 다른 파동의 골과 일치한다. 즉, 한 파동은 다른 파동과 역으로 관련되어 있으며, 그 결과 생기는 파동은 Figure 2.6(c)와 같이 완전히 상쇄된 상태를 보인다. 이들이 함께 진행하는 수면파라고 하면, 두 파동 중의 한 파동은 물방울을 위로 당기려 하며, 같은 순간 다른 파동은 아래로 당기려고 한다. 이러한 상황에서 “두 파동은 180° 위상이 어긋났다”라고 하며 “상쇄간섭(destructive interference)을 일으킨다”라고 한다.

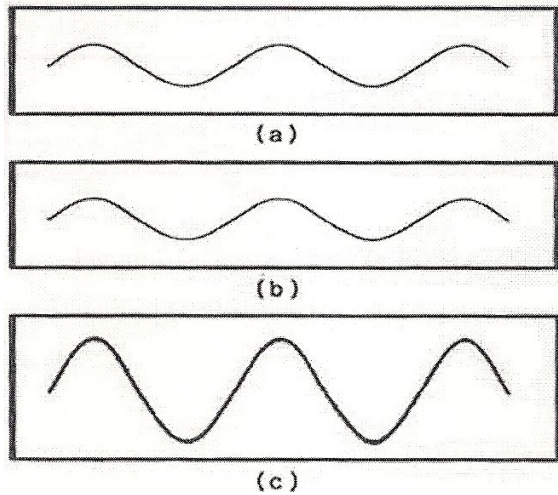


Figure 2.5 Constructive interference

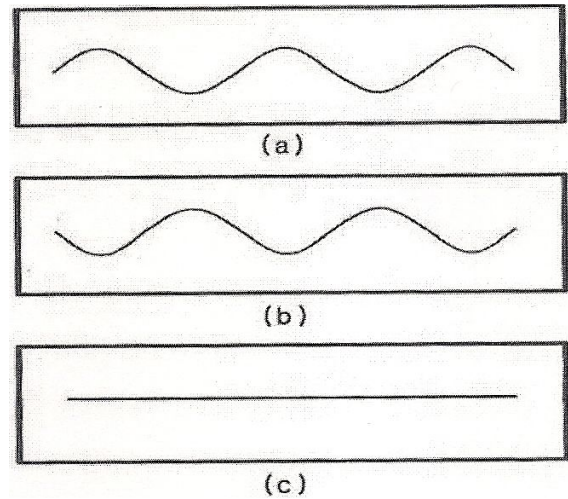


Figure 2.6 Destructive interference

## 2.4 발파진동의 발생과 전파

### 2.4.1 발파진동의 발생 특성

폭약이 장약공 내에서 폭발하면 그 폭약은 기폭 후 수  $\mu\text{sec}$ 에서 최고치에 달하고 그 압력은 5~20만 기압에 달하는 강력한 충격압과 연소된 화약에 의한 가스압 및 3000°C 이상의 고온이 발생한다. 이 때 Figure 2.7과 같이 충격압과 고온에 의해 발파공에서 수~수십 mm 이내에 인접한 암반은 녹아내리거나 잘게 파쇄되어 파쇄대를 형성하고, 연속되는 가스압과 충격파의 전달로 인해 파쇄대 외부의 암반에는 균열이 발생되어 전파되는 균열대를 형성하게 된다. 이렇게 폭원으로부터 전파된 3차원적 충격압에 의한 충격파는 거리에 따라 현저히 감쇠되어 발파에 의한 에너지의 0.5~20%가 탄성파의 형태로 균열대 외부의 암반 중에 전파되어 간다. 이렇게 전달된 탄성파는 암반 중에 전파되어 가면서 지반의 진동을 발생시키게 되는데, 이를 지반진동(ground vibration)이라 한다.

암반 중으로 전달되는 탄성파는 암반내부로 전달되는 입체파(P파, S파)와 물체의 표면을 따라 이동하는 표면파(Rayleigh파, Love파)로 나뉜다. 이러한 탄성파가 암반 중을 전파하면서 지반진동을 일으키게 되는데 한 점에서 지면의 운동은 진폭과 주기를 갖는 진동으로 나타난다. 이와 같은 발파에 의한 지반진동은 입자변위(particle displacement), 입자속도(particle velocity), 입자가속도(particle acceleration)의 3종류로 표시되고 있다.



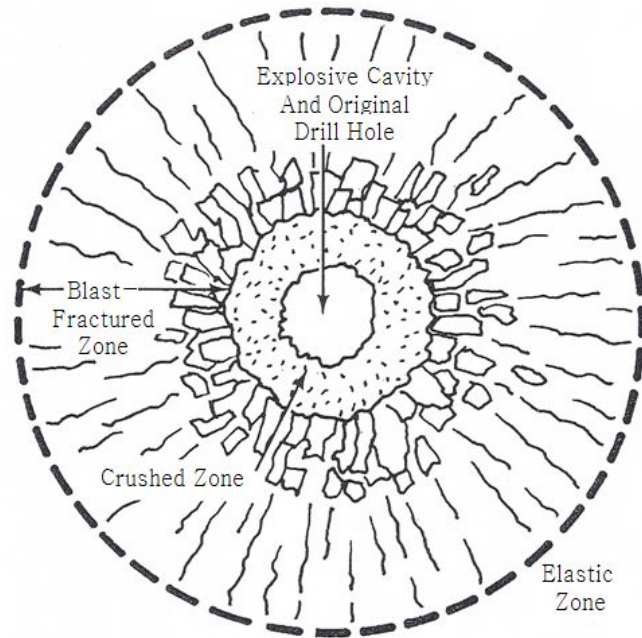


Figure 2.7 Schematic of the fracturing and deformation around an explosion in rock (Dupont, 1980).

## 2.4.2 발파진동의 전파 특성

발파에 의해 발생하는 파들은 P파(primary wave; 압축파, 종파, ), S파(secondary wave; 전단파, 횡파, ) 및 표면파(Rayleigh wave)의 세 가지 범부에서 나눌 수 있으며, 지표 진동에서 가장 영향이 크게 작용되는 것은 표면파이다. P파와 S파는 실체파 또는 물체파(body wave)라고 한다.

실체파들은 발파 시 가까운 거리에서 주로 나타나며, 이러한 실체파들은 매질의 특성이 다른 암석이나 토양층, 지표면과 같은 경계를 만날 때까지 외부로 향해 구상으로 전파되고, 실체파가 전파 도중 다양한 경계면을 만나면 반사, 굴절이 일어나 표면파가 생성된다.

가까운 거리에서는 세 개의 파가 모두 함께 도달하여 파의 형태를 구별하기가 대단히 복잡하지만, 먼 거리에서는 느리게 전파되는 전단파와 표면파가 압축파로부터 분리되기 시작하여 구분된다.

지반진동의 측정은 그 방향에 따라 Figure 2.8과 같이 폭원으로부터 측점을 향하는 평면상파의 진행방향성분(longitudinal 혹은 radial component), 진행방향에 직교하는 수직

방향성분(vertical component), 이들 두 방향과 직각을 이루는 접선방향성분(transverse component)의 세 방향으로 이루어진다.

발파진동은 진행방향에는 종파(P파)가 우세하며, 접선성분에는 횡파(S파)가 수직성분에는 표면파(Rayleigh파)가 우세하며, 이 3성분은 크기 및 진동주파수가 각각 다르고 복합파이기 때문에 운동하는 모양이 대단히 불규칙하고 복잡하다. 따라서 3 성분 중 각각 단일성분(V, T, L)에 대한 크기와 우월성분의 최대치가 원하는 계측 위치에서 측정될 수 있어야 한다.

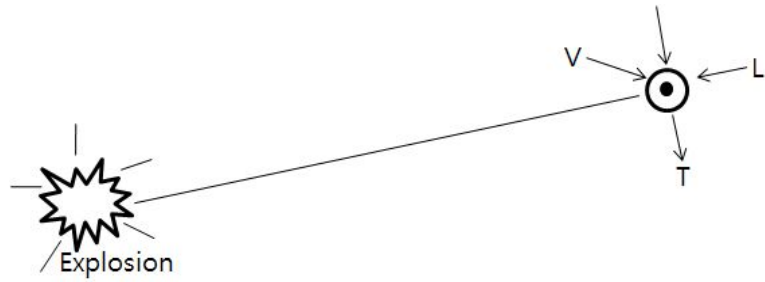


Figure 2.8 Measuring direction of ground vibration.

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

한편 발파에 의한 지반진동을 단순조화진동(simple harmonic motion)으로 보면 입자변위(D), 입자속도(V), 입자가속도(A)의 표시법 사이에는 식 (2.14)와 식 (2.15)와 같은 관계가 성립한다.

$$V = 2\pi f \cdot D \tag{2.14}$$

$$A = 2\pi f \cdot V \tag{2.15}$$

여기서, f는 최대 진폭에서의 진동주파수이다.

지반진동의 크기를 표시하거나 허용수준을 설정하려면 지반진동 크기를 비교할 수 있는 척도가 필요하며, 그 크기정도를 입자변위·입자속도·입자가속도의 3가지 형태로 표시할 수 있다.

Table 2.3과 같이 지진동(earthquake vibration)은 발파진동에 비해 그 주파수가 작고

지속시간이 길며 진원이 깊은 지중이어서 종파, 횡파, 표면파가 분리되어 지표 중에 도달하나, 발파진동은 발파원이 측점에 가까워 이들 각각의 파가 측점에 동시에 도달하고, 또 고주파인 관계로 쉽게 감쇠가 일어나며 지진에 비하여 파형이 비교적 단순하다.

현재까지 세계적으로 연구된 결과에 의하면 주파수가 수십에서 수백 Hz 범위인 발파진동에서 주로 주거 구조물의 피해 정도는 진동변위속도에 비례한다. 따라서 그 규제기준을 진동속도로 삼고 있다.

Table 2.3 Comparison of blasting vibration and earthquake

Sort	Blasting vibration	Earthquake
Focal depth	Ground or inside of close ground	Over underground 10km
Vibration frequency	Several 10 to several 100Hz	1 Hz of below
Vibration duration	Within 0.1s	Over 10s, minute unit(a big earthquake)
Vibration waveform	Simple	Complex

폭약이 폭발할 때 발파에 필요한 최대의 효과를 얻기 위해서는 충분한 에너지가 전달되어야 한다. 폭약의 종류와 특성, 자유면의 수와 크기, 암반의 구조(절리, 층리, 박리 및 균열), 천공경과 천공간격, 장약량과 장약공법, 전색의 정도, 발파공의 배치, 기폭시차 배열 등에 따라 발파효과가 좌우된다.

이 때 암석의 강도에 비하여 폭력이 약하고 전색이 불완전하면 기대한 발파효과를 얻기 어려우며 이때는 대상 암반의 발파에 대한 저항선과 여러 가지 폭약이 가지는 발파 영향 요소 등에 대해서도 충분한 검토를 하여야 한다.

발파진동의 전파특성을 결정하는 조건은 크게 입지조건과 발파조건으로 나눌 수 있다. 입지조건은 발파부지와 인근 구조물의 기하학적 형태, 대상암반의 지질학적 특성 및 역학적 성질 등을 말하며, 발파조건은 사용하는 폭약, 장약량, 기폭방법, 폭원과의 거리 등을 말한다.

이 중에서 발파조건은 조절 가능한 변수로, 입지조건은 조절 불가능한 변수로 구분 가

능하며, 발파진동의 영향을 최소한으로 하기 위해서는 조절 가능한 변수들을 잘 파악하여 이를 적극 활용하여야 한다.

Table 2.4는 발파진동 변수에 대한 영향을 나타내었다.

Table 2.4 Parameters which influence ground motion

Parameter	Items	Influence on ground motion		
		Significant	Moderately signif.	Insignif.
Controllable parameters	A. Delay interval	○		
	B. Charge weight per delay	○		
	C. Explosives type	○		
	D. Burden and spacing		○	
	E. Hole diameter and drilling angle		○	
	F. Stemming			○
	G. Direction of initiation			○
	H. Charge weight per blasting			○
Uncontrollable parameters	A. Distance of blast site and structure	○		
	B. Geography		○	
	C. Soil type and layer depth		○	
	D. Rock condition		○	
	E. Atmospheric condition			○

## 2.5 Langefors 시차이론

Langefors에 의해 지연시차의 서로 다른 인자인 공수, 주파수가 발파진동에 얼마나 영향을 미치는가에 대한 최종적인 결론이 제시되었다. 간섭의 영향은 지연시차( $\tau$ )가 주기( $T$ )만큼 크거나 정수의 곱으로 적용될 때 얻어지고, 진동의 협동은 서로 다른 지연시차에서 진동이 합해짐으로서 발생한다. 이것은  $H$ 가 정수의 비율일 때 적용된다(Langefors and Kihlström, 1978). 그 관계는 식 (2.16)과 같다.

$$\tau = HT \quad (2.16)$$

다른 한편으로  $H$ 는 서로 다른 파를 단절시키거나 또 다른 것을 약화(상쇄간섭)시키는 반값의 기수이다. 이것은 거의 완벽하게  $H$ 가  $1/2$ 일 때 발생한다. 그러나  $H$  값이  $5/2$ 보다 더 높은 값이면 보강이나 상쇄간섭에 의해 규정된 영향은 이 규칙을 따르지 않는다.

연속하여 기폭하는 공의 간섭은 다른 방법으로 얻을 수 있다. 일반적인 상태의  $K$ 는 정수이지만,  $K$ 와  $n$ 사이의 비율은 정수가 아니다. 다시 말해서,  $K/n \neq 1, 2, 3, \dots$ 이다. 그 관계는 식 (2.17)과 같이 표현할 수 있다.

$$n\tau = KT \quad (2.17)$$

여기서,  $n$ 은 지발 수(단수)를 나타내며,  $n\tau$ 는 1회 발파의 전체 시간을 가리킨다. 이것은 실제적인 적용에 있어 중요한 의미를 갖는다. 앞의 간단한 간섭 상태에 의하면 정확한 단차는 주파수가 요구되지만, 식 (2.17)에 따른 간섭 상태는 매우 광범위한 범위 내에서 이루어질 수 있다.

지발의 수가 증가하면 지반진동의 진폭이 감소한다는 결과가 많은 문헌에 나타나 있다 (Dowding, 1984). 또한 지발 수가 증가하면  $K$ 값이 정수에 근접하게 되는 것은 위에서 나타나는 명확한 결과이다. Figure 2.9는 5공의 발파에서  $K$ 값의 변화에 따른 진동의 정도를 보이며  $K$ 값이 정수(1과 2)일 때 진폭이 가장 낮음을 알 수 있다.

지연시차가 주기만큼 길거나 또는 값이 두 배가 될 경우( $\tau=T$  or  $2T$ ), 서로 다른 장약 공으로부터 진동의 협동을 피하는 것이 불가능 하다. 만약, 1회의 발파가 수 많은 지연단수를 가진다면  $3T$ 나 그 이상의 상대적인 시간거리에 놓인 지연시차를 갖는 발파공은 일

반적으로 비협동(non-cooperative)이라는 것을 예상할 수 있으며 상쇄간섭을 포함한다면 서로 다른 단차 간의 협동은  $\tau > 2.5T$ 일 때에 일어나지 않는다고 추측할 수 있다.

즉, Långefors의 시차이론에 의하면 지발당 장약량은 2.5T 내로 기폭되는 공의 총 장약량으로 평가될 수 있다. 그러나 지반에 따라 변화되는 주파수를 모두 고려하기란 불가능하며 고려한다 할지라도 상쇄나 보강간섭을 모두 포함하므로 자료처리가 더 난해해질 수 있다. 그러므로 Långefors의 시차이론에 의한 지발당 장약량의 규정이 더 정량적이라 할지라도 환산거리 식의 지발당 장약량의 적용에는 불가능 할 것으로 사료된다.

현재 국내에서 사용하고 있는 환산거리 식의 지발당 장약량은 진동의 예측과 관리, 평가의 신뢰성이 요구되는 단순화를 추구하는데 그 중요성을 가지고 있다. 8ms 기준을 사용하는 환산거리식에 의한 발파진동의 예측과 관리, 평가에 있어서 대두되는 문제점은 지반조건, 발파방법 등을 따라 변하는 주파수 특성을 고려하여 발파진동을 예측하는 방법도 조정해야 한다.

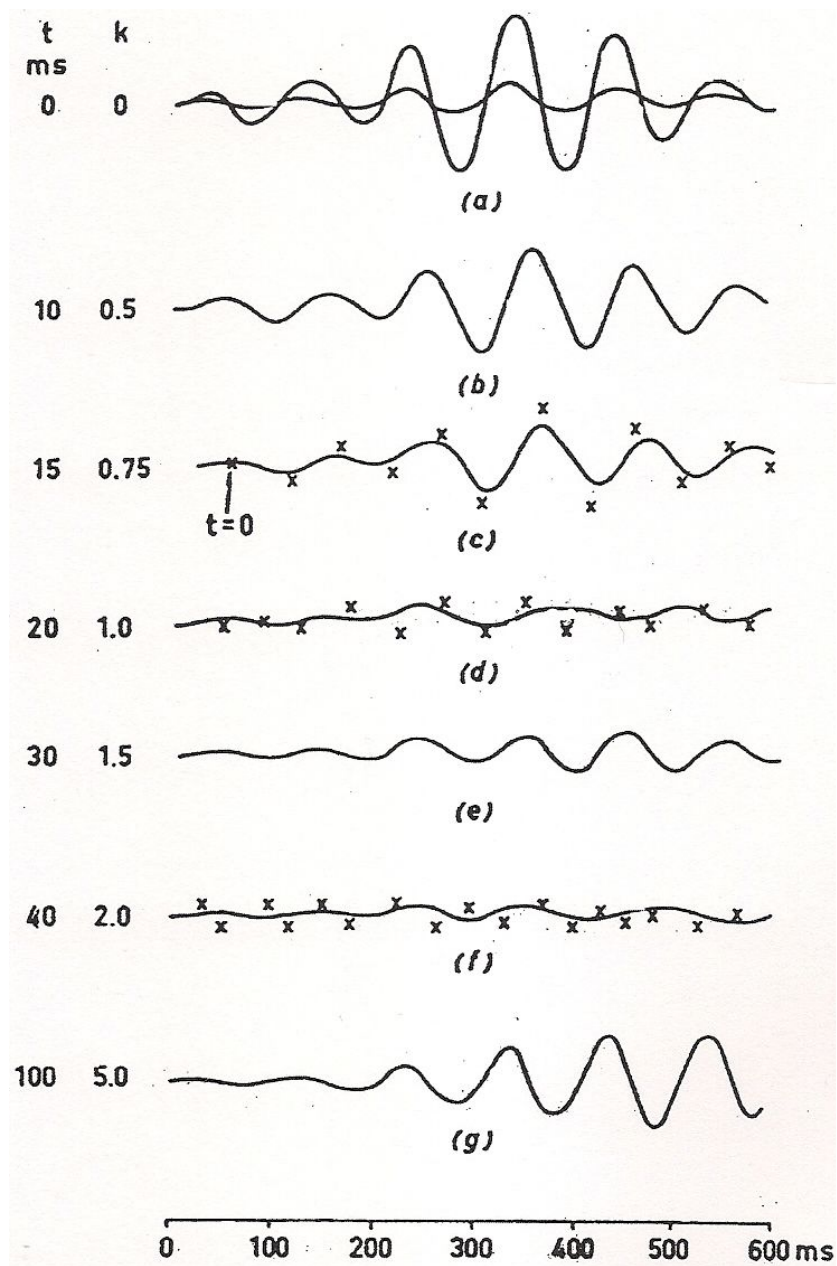


Figure 2.9 Ground vibrations from five different charge and with delays 0~100ms(Langefors and Kihlström, 1978).

## 2.6 발파진동의 예측방법

발파진동을 예측하는 대표적인 두 가지 방법은 환산거리 방식(Duvall, et al., 1963; Devine, 1966; Bicholls, et al., 1971; Bollinger, 1971; Ash, 1973; Archibald, 1976; Dupont, 1980; Calvin, et al., 1990)과 장약레벨 방식(Langefors, 1978)을 들 수 있다. 환산거리 방식은 거리와 장약량의 자승근 혹은 삼승근 관계인 환산거리(scaled distance) 개념에 의한 발파진동의 예측방법이며, Langefors의 장약레벨 방식은 각각의 장약레벨과 거리와의 관계인 장약레벨(charge levels) 개념에 의해 진동속도를 예측한다. 국내에서는 이들 방법 중 환산거리 개념에 의한 발파진동의 예측이 일반화되어 있다.

### 2.6.1 환산거리의 유도

환산거리는 지발당 장약량(W)과 거리(D)가 변화할 때 최대 입자속도를 예측하는데 필요한 것이다. 가장 보편적인 두 가지 환산거리는 자승근 환산거리( $D/W^{1/2}$ )와 삼승근 환산거리( $D/W^{1/3}$ )이다. Hendron(1969)은 발파진동을 조절하는데 Table 2.5의 변수들이 중요한 의미를 갖는 것으로 생각하였다.

발파에 의한 진동과 이것이 구조물에 미치는 영향으로는 Buckingham Pi 무차원 해석 이론(Langhaar, 1951)에 의하면 발파현상과 관련되는 6개의 독립변수와 무차원 변수가 있고 이들 변수는  $u/D$ ,  $\dot{u}/c$ ,  $\ddot{u}D/c^2$ ,  $ft$ ,  $tc/D$  및  $W/\rho c^2 D^3$ 이다. 처음 4개는 종속변수이고 나중 2개는 독립변수들이 조합된 것이다. 앞의 변수들은 어떤 멱승을 하거나 서로 곱해질 수 있고 하나의 무차원 변수는 다른 무차원 변수의 함수일 수 있다.

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

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

발파에 의해 발생한 지반진동의 크기는 폭원으로부터 계측지점까지의 거리에 반비례하고, 1회 발파 당 동시에 폭발하는 장약량에 비례하므로(Devine, 1966) 거리와 장약량의 함수관계를 환산거리로 표기하며, 이것은 지발당 장약량과 거리가 변화할 때 최대진동속도를 예측하는데 필요한 것이다.



환산거리에 의한 발파진동 예측식은 다음 식 (2.18)과 같다.

$$V = K(SD)^n \tag{2.18}$$

여기서, V는 진동속도, K는 입지상수, n은 감쇠상수, SD는 환산거리로써 발파원과 수신점과의 거리(D)와 지발당 장약량(W)의 관계로 다음 식 (2.19), (2.20)과 같이 각각 자승근 및 삼승근으로 표시된다.

$$SD = \frac{D}{\sqrt{W}} \tag{2.19}$$

$$SD = \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \tag{2.20}$$

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

환산거리식은 두 변수를 분리하고 지수계수를 달리하면 적합도가 더 높은 일반식 (2.21)이 얻어진다.

$$V = KW^aD^b \tag{2.21}$$

a와 b는 각각 지수계수와 감쇠계수이다. 일반식 (2.21)은 높은 적합도에도 불구하고 설계의 어려움 때문에 많이 적용되고 있지 않고 있다.

식 (2.18)과 (2.21)로 구해지는 진동수준은 평균 진동 수준이므로 발파설계에 직접 이용할 수 없다. 따라서 정규분포의 특성을 이용하여 신뢰수준 95% 발파진동 예측식을 구하고 현장여건에 맞는 허용 진동수준으로부터 허용 환산거리를 산출하게 된다.

Table 2.5 Variable considered in a dimensional analysis of explosion phenomena  
(Ambraseys and Hendron, 1968)

Parameters	Symbol	Dimension*
Independent		
Energy (per delay)	W	FL
Distance	D	L
Seismic velocity	c	LT <sup>-1</sup>
Density of rock mass	ρ	Ft <sup>2</sup> L <sup>-4</sup>
Time	t	t
Dependent		
Ground displacement	u	L
Ground particle velocity	ū	LT <sup>-1</sup>
Ground acceleration	ü	LT <sup>-2</sup>
Frequency	f	t <sup>-1</sup>

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

## 2.6.2 95% 신뢰식의 결정

발파설계를 위해서는 대상 지역의 시험발파를 통한 K, n 상수 값을 정의하는 것이 중요하며, K, n 값이 결정되고, 허용 진동속도가 주어지면 발파진동식에서 폭원으로부터 거리와 지발당 장약량과의 관계를 나타내는 노모그램을 작성할 수 있다.

입지상수의 결정방법은 측정 자료처리를 로그-로그 그래프 상에서 최소자승법에 의해 최적 적합식(best fit line)을 구하며 이를 50% 신뢰식이라고 한다.

입지상수 K의 50% 값을 K<sub>0</sub>라 하고 95%, 99%의 K값을 각각 K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>라 하면 K<sub>0</sub>, K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> 값은 로그 정규분포의 특성을 이용하여 식 (2.22), (2.23), (2.24)와 같이 구할 수 있다.

$$K_0 = \exp A_0 \quad (2.22)$$

$$K_1 = \exp(A_0 + 1.645\sigma) \quad (2.23)$$

$$K_2 = \exp(A_0 + 2.326\sigma) \quad (2.24)$$

여기서,  $\sigma$ 는 표준편차이다. 또한 신뢰식의 기울기  $n$ 은 동일하다.

### 3. 현장실험

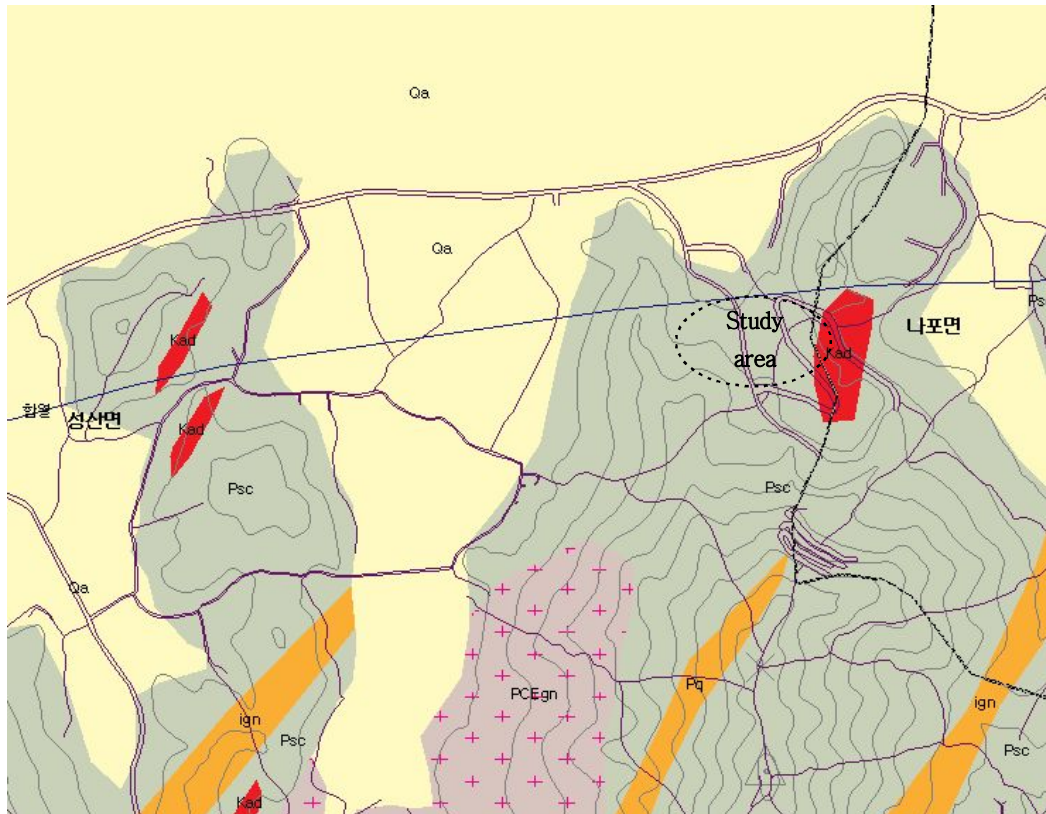
#### 3.1 대상현장의 지형 및 지질

본 연구지역은 군산시 성산면 성덕리 산 2-1번지로 장항~군산간 29번 국도상의 당선리와 금강하구둑을 지나 요동에서 북동측으로 분지된 709호선 지방도를 따라 약 4km지점에 위치한다. 노령산맥과 차령산맥 남서연장부에 해당하며 실험지역 일대에는 북동방향의 능선(망해산 230.3m~취성산 205.0m~용천산 141.0m)과 남북 방향의 오성산(227.7m) 능선이 발달한 지역이다(Figure 3.1).

연구지역의 지질은 광역적으로 살펴보면, 함열도폭(1:50000) 남동부일대에는 고생대 편마암류를 포함한 변성퇴적암류를 기반암으로 하고 중생대 쥐라기로 추정되는 편마암류와 후기에 이들을 관입한 백악기 관입암류(섬록암, 석영반암, 암맥) 등으로 구성된다. 석영반암은 중생대 백악기 관입암류로 함열도폭 북부에 주로 발달했다. 편암은 함열도폭 북서부 구릉지대에 주로 분포하고, 하부로부터 편암류, 함라산층, 규암층 순으로 구성된다(Figure 3.2).



Figure 3.1 Site map of study area.



Kad : Acidic dyke(Cretaceous period of mesozoic era)

Psc : Schist tribe(Paleozoic era)

Pq : Quartzite(Paleozoic era)

ign : Silica layer(Paleozoic era)

Qa : Diluvium and Alluvium(Quarternary period of cenozoic era)

PCEgn : Granite gneiss

Figure 3.2 Geological map of study area.

## 3.2 현장실험개요

발파공간 지연시차에 따라 발파에 의한 진동의 전파 특성을 파악하기 위해서는 정해진 공간격, 저항선, 천공장, 그리고 장약량 등에 따라 실규모 시험발파를 하고 이때에 발생하는 지반진동을 계측기를 사용하여 측정 한다. 그리고 측정된 자료를 분석하여 발파공간 지연시차에 따라 발생할 수 있는 진동정도를 예측하여 지연시차에 따른 지반진동의 전파 특성을 규명한다. 본 연구에서는 지연시차와 기폭위치에 따른 2~3공 발파를 통해 진동을 계측하는 방식으로 현장실험을 진행하였다.

## 3.3 현장실험 방법 및 결과

### 3.3.1 실험 방법

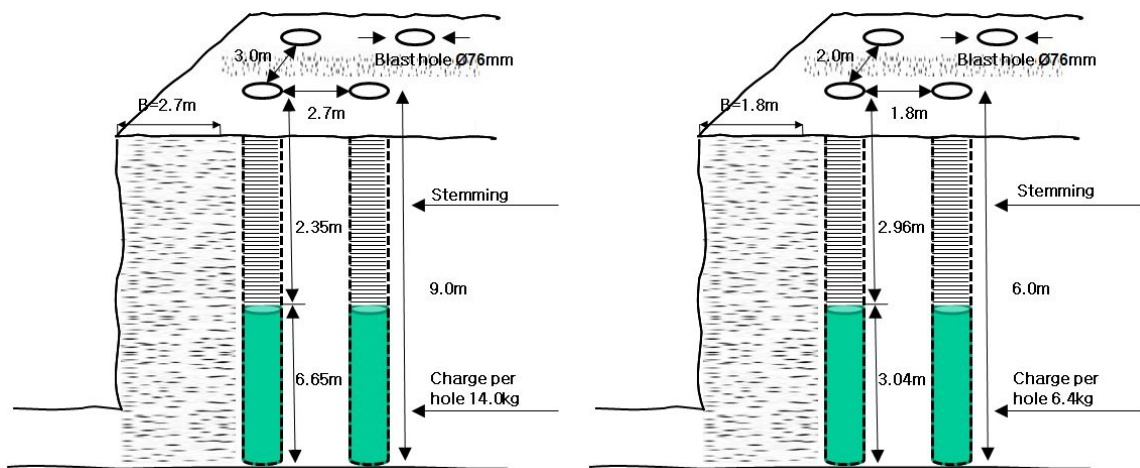
본 연구의 현장실험지역은 전라북도 군산시 성산면 성덕리 산 2-1번지에 위치한 연구 지역에서 총 16회 발파에 대한 현장실험을 실시하였다.

실험 조건은 Table 3.1과 같다. 1~13회 발파는 공경  $\Phi 76\text{mm}$ , 공간격 3.0m, 저항선 2.7m, 천공장 9.0m, 그리고 지발당 장약량 14kg, 14~16회 발파는 공경  $\Phi 76\text{mm}$ , 공간격 2.0m, 저항선 1.8m, 천공장 6.0m, 그리고 지발당 장약량 6.4kg을 사용하여 2~3공 시험발파를 실시하였다.

폭약은 약경이  $\Phi 50\text{mm}$ 인 에멀전 폭약을 사용하였고, 뇌관은 순발 전기뇌관을 사용하였다. 그리고 발파공간의 지연시차는 지발뇌관의 발화오차를 배제하기 위해 다단식 발파기를 사용하여 지연시차를 부여하였고, 발파패턴은 Figure 3.3과 같다.

Table 3.1 Experimental conditions

Blasting No.	1~6	7~8	9~12	13	14	15~16
Explosive diameter (mm)	Emulsion type $\Phi 50$					
Detonator	DS Detonator					
Diameter (mm)	$\Phi 76$					
Drilling Length (m)	9.0			6.0		
Spacing (m)	3.0			2.0		
Burden (m)	2.7			1.8		
Charge per delay (kg)	14			6.4		
Delay time (ms)	20		25		25	
Blasting holes (ea)	2	3	2	3	2	2



(a) Blasting pattern for holes of Blasting No. 1~13

(b) Blasting pattern for holes of Blasting No. 14~16

Figure 3.3 Blasting pattern



### 3.3.2 현장실험의 계측

현장실험의 계측은 PMT사의 eXAD-8 6대와 InstanTel사의 Blastmate II, III 28대의 계측기기를 사용하여 계측을 실시하였다. 실험 계측에 사용된 eXAD-8와 Blastmate II, III는 현장의 발파 및 건설장비 등을 이용한 작업 시 발생하는 소음, 진동 등을 계측하여 진행, 접선, 수직 및 주파수 등을 현장에서 인쇄하여 진동 계측 값을 손쉽게 확인할 수 있으며, 지발당 장약량(charge weight per delay)과 거리(distance)를 수동으로 입력하면 이를 환산거리(scaled distance)로 자동으로 계산하는 기능뿐만 아니라, 진동측정의 주파수 및 시간이력 등을 상세히 보여주는 국내에서 가장 널리 사용되고 있는 진동 측정기이라 할 수 있다. eXAD-8와 Blastmate II, III의 진동측정 범위는 0.013~25.4cm/sec이다. 주파수 분석을 수행하고자 할 때 모두 ZC(Zero Cross Frequency)와 고속 푸리에 변환(FFT, Fast Fourier Transform)이 가능하며 USBM/OSMRE와 DIN 4150 주파수 분석이 가능하다. Figure 3.4는 현장 실험장소와 계측 장면이다.



Figure 3.4 Foreground and Measurements of study area.



### 3.3.3 현장실험 계측 결과

Table 3.1의 발파조건과 Figure 3.4의 발파패턴으로 16회에 걸쳐 실시된 지반진동 계측 결과 총 544개의 자료를 획득하였으며 계측된 자료는 부록에 첨부하였다. 그리고 지반진동의 계측은 Figure 3.4와 같이 34대의 계측기를 사용하여 발파 지점과 23~227m의 거리에서 행해 졌다.

부록에 첨부된 현장실험 계측결과표에 따르면 접선성분(Transverse component) 입자속도의 경우 0.127~80.203mm/sec, 수직성분(Vertical component) 입자속도의 경우 0.127~84.961mm/sec, 진행성분(Longitudinal component) 입자속도의 경우 0.127~81.642mm/sec, 최대입자속도(Peak Particle Velocity, PPV)의 경우 0.191~84.961mm/sec, 최대벡터합(Peak Vector Sum, PVS) 입자속도의 경우 0.197~107.047mm/sec로 계측되었다.

## 4. 분석

현장실험을 통해 계측된 지반진동 데이터(부록 참고)에서 지연시차별로 성분별(T, V, L) 진동데이터와 최대입자속도(Peak Particle Velocity, PPV)와 최대벡터합(Peak Vector Sum, PVS) 데이터를 이용하여 회귀분석을 실시하였다. 입지상수 K와 n을 구하기 위하여 진동속도와 환산거리의 로그-로그 그래프 상에서 1차 상관관계를 보이는 특성을 이용하였다. 그리고 통계처리하여 지반진동 예측식을 구하였다. 지반진동 데이터의 전산처리는 TunDesign™ 4의 보조프로그램인 TDTestBlast를 사용하였다.

분석별로 지연시차, 기폭위치의 조건은 다음의 Table 4.1과 같다.

Table 4.1 Analysis conditions

Case	Delay time (ms)	Applied Blasting No.	Number of data
1	20	1~8, 14	306
2	25	9~13, 15~16	238

## 4.1 Case 1의 성분별 회귀분석

Table 4.2는 현장실험을 통해 계측된 지반진동 데이터 중 지연시차가 20ms인 각 성분별 데이터만 수집하여 회귀분석을 실시한 50, 95% 지반진동 예측식이다.

Table 4.2의 성분별 지반진동 예측식을 이용하여 노모그램 분석을 실시한 결과는 Figure 4.1과 같다. 여기서,  $V_T$ 는 접선방향성분의 진동속도,  $V_V$ 는 수직방향성분의 진동속도,  $V_L$ 은 진행방향성분의 진동속도이다.

SRSD의 성분별 평균(50%) 지반진동 예측식에서  $0.1 \sim 1000\text{kg/w}^{1/2}$  범위의 환산거리에 따라 성분별 진동성분의 경향을 예측하였다. 그 결과는 환산거리 범위가 0.1에서 26.9까지는 수직방향 성분의 진동이 가장 크게, 접선방향 성분의 가장 진동이 작게, 26.9에서 34.8까지는 진행방향 성분이 가장 크게, 접선방향 성분이 가장 작게, 34.8에서 43.5까지는 진행방향 성분이 가장 크게, 수직방향 성분이 가장 작게, 43.5에서 1000까지는 접선방향 성분이 가장 크게, 수직방향 성분이 가장 작게 예측되었다.

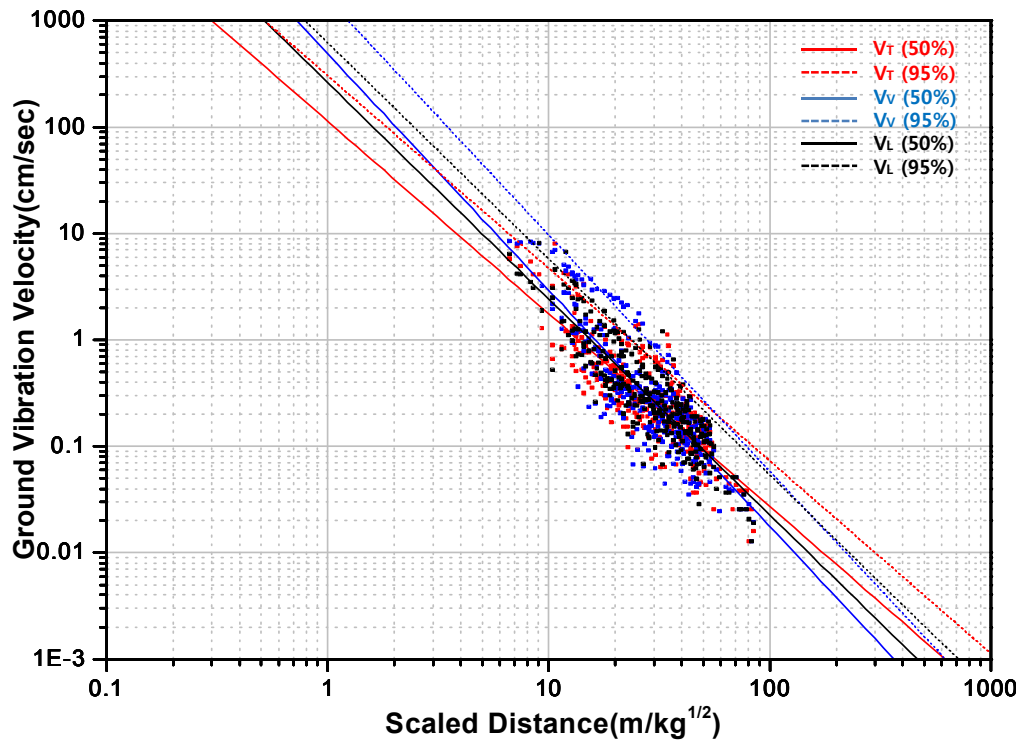
$0.1 \leq SD < 26.9\text{kg/w}^{1/2}$	$V_V > V_L > V_T$
$26.9 \leq SD < 34.8\text{kg/w}^{1/2}$	$V_L > V_V > V_T$
$34.8 \leq SD < 43.5\text{kg/w}^{1/2}$	$V_L > V_T > V_V$
$43.5 \leq SD \leq 1000\text{kg/w}^{1/2}$	$V_T > V_L > V_V$

CRSD의 성분별 평균(50%) 지반진동 예측식에서  $0.1 \sim 1000\text{kg/w}^{1/3}$  범위의 환산거리에 따라 성분별 진동성분의 경향을 예측하였다. 그 결과는 환산거리 범위가 0.1에서 42.1까지는 수직방향 성분의 진동이 가장 크게, 접선방향 성분의 가장 진동이 작게, 42.1에서 51.5까지는 진행방향 성분이 가장 크게, 접선방향 성분이 가장 작게, 51.5에서 61.0까지는 진행방향 성분이 가장 크게, 수직방향 성분이 가장 작게, 61.0에서 1000까지는 접선방향 성분이 가장 크게, 수직방향 성분이 가장 작게 예측되었다.

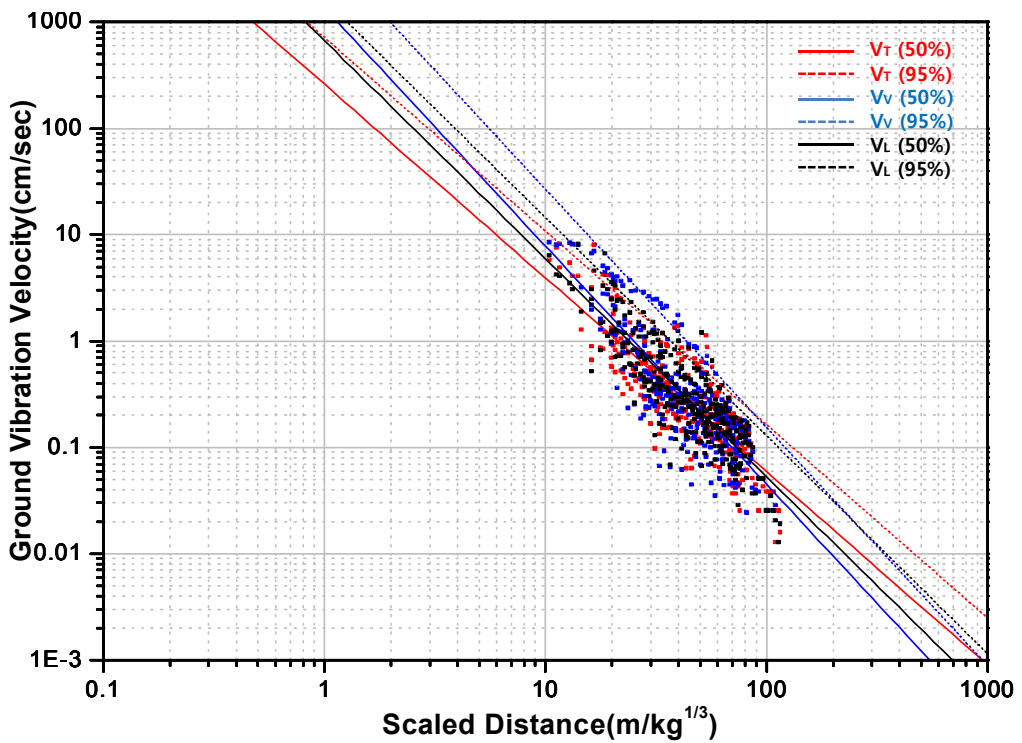
$0.1 \leq SD < 42.1\text{kg/w}^{1/2}$	$V_V > V_L > V_T$
$42.1 \leq SD < 51.5\text{kg/w}^{1/2}$	$V_L > V_V > V_T$
$51.5 \leq SD < 61.0\text{kg/w}^{1/2}$	$V_L > V_T > V_V$
$61.0 \leq SD \leq 1000\text{kg/w}^{1/2}$	$V_T > V_L > V_V$

Table 4.2 Prediction equation of ground vibration for component velocity(Case 1)

Transverse component velocity			
Square root method	Prediction equation	50%	$V_{50} = 113.83 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.81}$
		95%	$V_{95} = 304.40 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.81}$
	R		0.841
Cube root method	Prediction equation	50%	$V_{50} = 259.56 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.82}$
		95%	$V_{95} = 714.87 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.82}$
	R		0.824
Vertical component velocity			
Square root method	Prediction equation	50%	$V_{50} = 487.70 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-2.22}$
		95%	$V_{95} = 1607.19 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-2.22}$
	R		0.861
Cube root method	Prediction equation	50%	$V_{50} = 1358.84 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-2.24}$
		95%	$V_{95} = 4646.31 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-2.24}$
	R		0.845
Longitudinal component velocity			
Square root method	Prediction equation	50%	$V_{50} = 260.97 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-2.03}$
		95%	$V_{95} = 619.56 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-2.03}$
	R		0.885
Cube root method	Prediction equation	50%	$V_{50} = 667.90 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-2.05}$
		95%	$V_{95} = 1622.06 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-2.05}$
	R		0.869



(a) square root



(b) cube root

Figure 4.1 Relationship between T, V, L components velocity and scaled distance(Case 1).

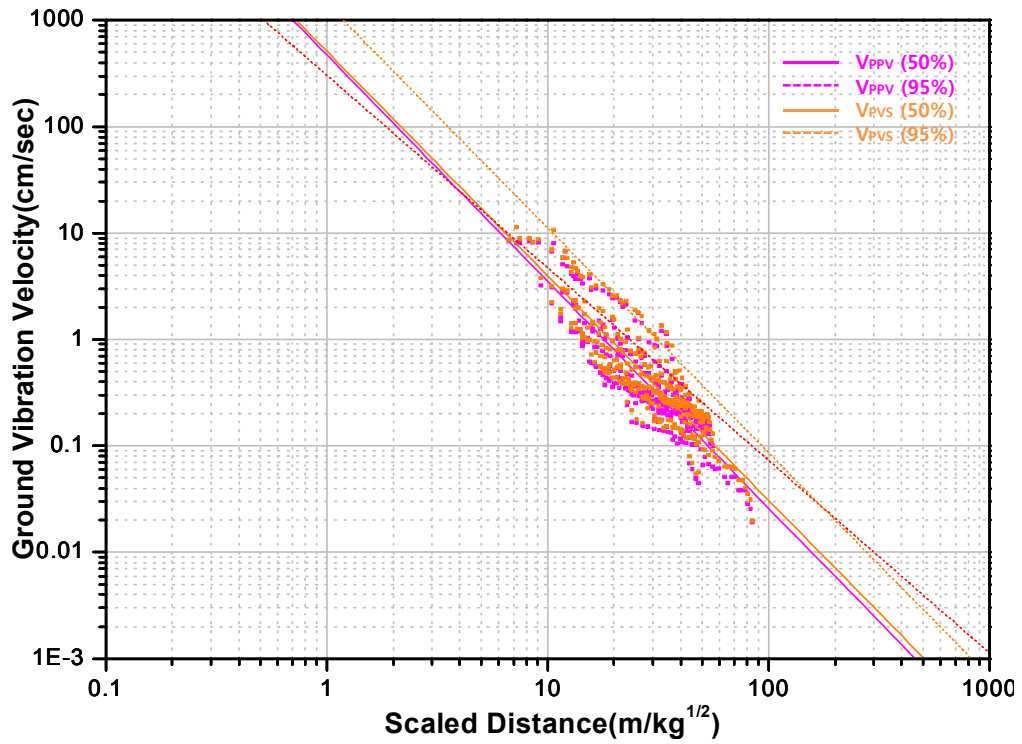
## 4.2 Case 1의 PPV와 PVS의 회귀분석

Table 4.3은 현장실험을 통해 계측된 지반진동 데이터 중 지연시차가 20ms인 PPV와 PVS 데이터만 수집하여 회귀분석을 실시한 50, 95% 지반진동 예측식이다.

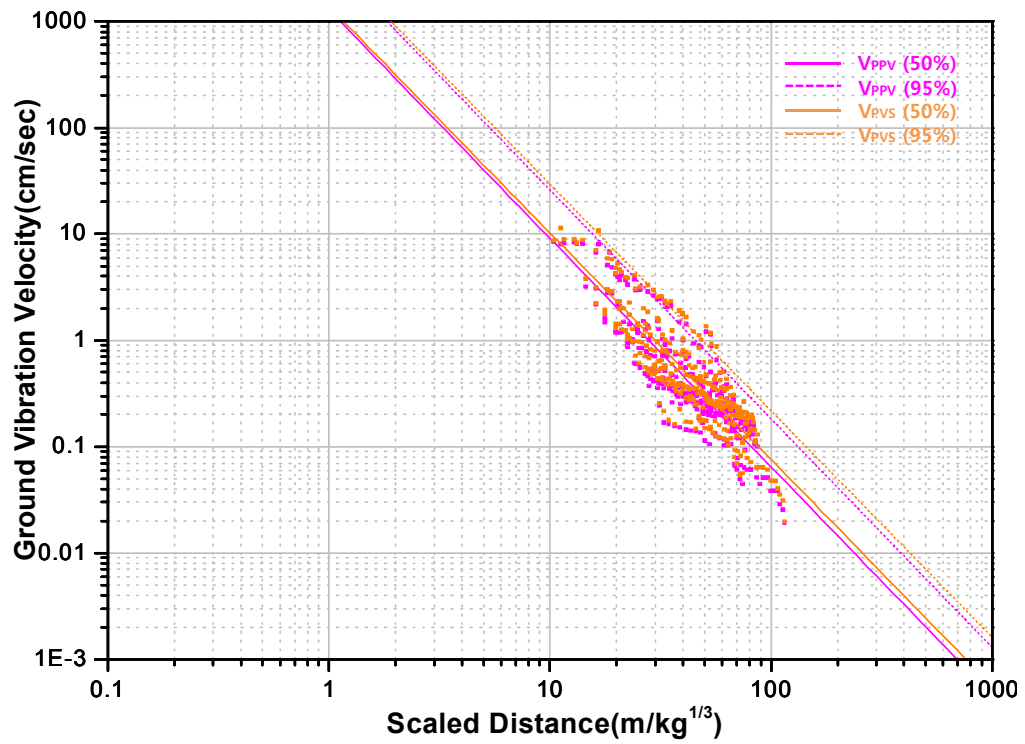
Table 4.3의 PPV와 PVS의 지반진동 예측식을 이용하여 노모그램 분석을 실시한 결과는 Figure 4.2와 같다. 여기서,  $V_{PPV}$ 는 최대입자속도,  $V_{PVS}$ 는 최대벡터합이다.

Table 4.3 Prediction equation of ground vibration for PPV and PVS(Case 1)

Peak particle velocity			
Square root method	Prediction equation	50%	$V_{50} = 472.23 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-2.13}$
		95%	$V_{95} = 1313.86 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-2.13}$
	R		0.894
Cube root method	Prediction equation	50%	$V_{50} = 1285.16 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-2.15}$
		95%	$V_{95} = 3653.97 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-2.15}$
	R		0.879
Peak vector sum			
Square root method	Prediction equation	50%	$V_{50} = 511.41 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-2.11}$
		95%	$V_{95} = 1438.76 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-2.11}$
	R		0.895
Cube root method	Prediction equation	50%	$V_{50} = 1378.58 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-2.13}$
		95%	$V_{95} = 3962.76 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-2.13}$
	R		0.881



(a) square root



(b) cube root

Figure 4.2 Relationship between peak particle velocity(PPV), peak vector sum(PVS) and scaled distance(Case 1).

### 4.3 Case 2의 성분별 회귀분석

Table 4.4는 현장실험을 통해 계측된 지반진동 데이터 중 지연시차가 25ms인 각 성분별 데이터만 수집하여 회귀분석을 실시한 50, 95% 지반진동 예측식이다.

Table 4.4의 성분별 지반진동 예측식을 이용하여 노모그램 분석을 실시한 결과는 Figure 4.3과 같다. 여기서,  $V_T$ 는 접선방향성분의 진동속도,  $V_V$ 는 수직방향성분의 진동속도,  $V_L$ 은 진행방향성분의 진동속도이다.

SRSD의 성분별 평균(50%) 지반진동 예측식에서  $0.1 \sim 1000\text{kg/w}^{1/2}$  범위의 환산거리에 따라 성분별 진동성분의 경향을 예측하였다. 그 결과는 환산거리 범위가 0.1에서 19.3까지는 수직방향 성분의 진동이 가장 크게, 접선방향 성분의 가장 진동이 작게, 19.3에서 30.9까지는 진행방향 성분이 가장 크게, 접선방향 성분이 가장 작게, 30.9에서 34.7까지는 진행방향 성분이 가장 크게, 수직방향 성분이 가장 작게, 34.7에서 1000까지는 접선방향 성분이 가장 크게, 수직방향 성분이 가장 작게 예측되었다.

$0.1 \leq SD < 19.3\text{kg/w}^{1/2}$	$V_V > V_L > V_T$
$19.3 \leq SD < 30.9\text{kg/w}^{1/2}$	$V_L > V_V > V_T$
$30.9 \leq SD < 34.7\text{kg/w}^{1/2}$	$V_L > V_T > V_V$
$34.7 \leq SD \leq 1000\text{kg/w}^{1/2}$	$V_T > V_L > V_V$

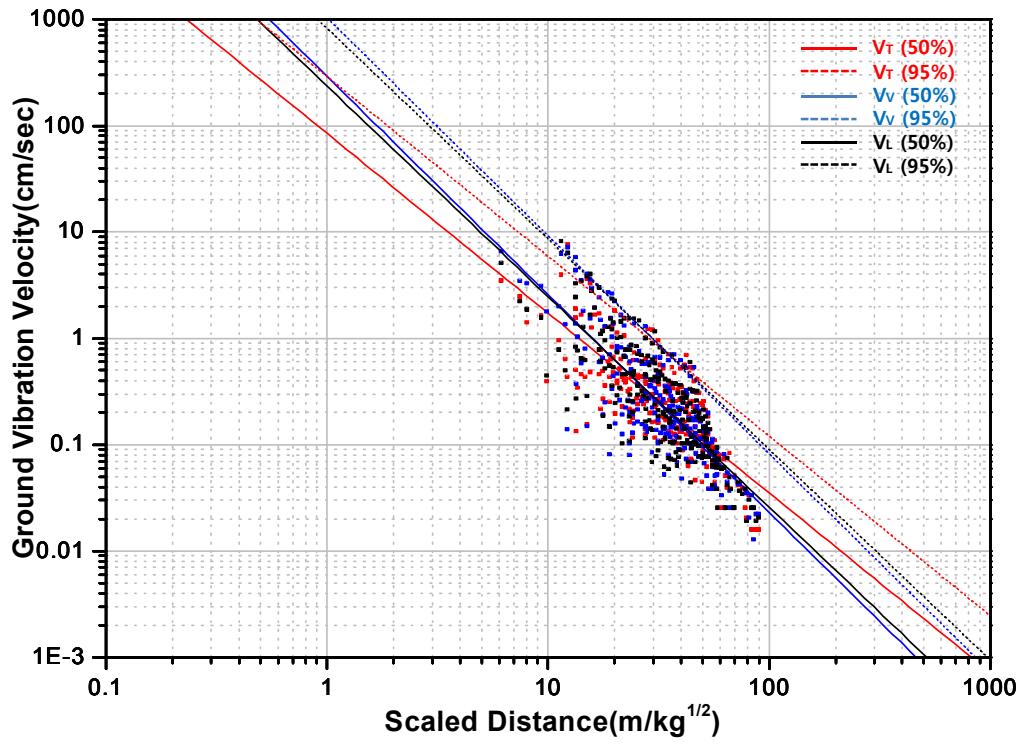
CRSD의 성분별 평균(50%) 지반진동 예측식에서  $0.1 \sim 1000\text{kg/w}^{1/3}$  범위의 환산거리에 따라 성분별 진동성분의 경향을 예측하였다. 그 결과는 환산거리 범위가 0.1에서 44.3까지는 수직방향 성분의 진동이 가장 크게, 접선방향 성분의 가장 진동이 작게, 44.3에서 50.3까지는 진행방향 성분이 가장 크게, 접선방향 성분이 가장 작게, 50.3에서 52.1까지는 진행방향 성분이 가장 크게, 수직방향 성분이 가장 작게, 52.1에서 1000까지는 접선방향 성분이 가장 크게, 수직방향 성분이 가장 작게 예측되었다.

$0.1 \leq SD < 44.3\text{kg/w}^{1/2}$	$V_V > V_L > V_T$
$44.3 \leq SD < 50.3\text{kg/w}^{1/2}$	$V_L > V_V > V_T$
$50.3 \leq SD < 52.1\text{kg/w}^{1/2}$	$V_L > V_T > V_V$
$52.1 \leq SD \leq 1000\text{kg/w}^{1/2}$	$V_T > V_L > V_V$

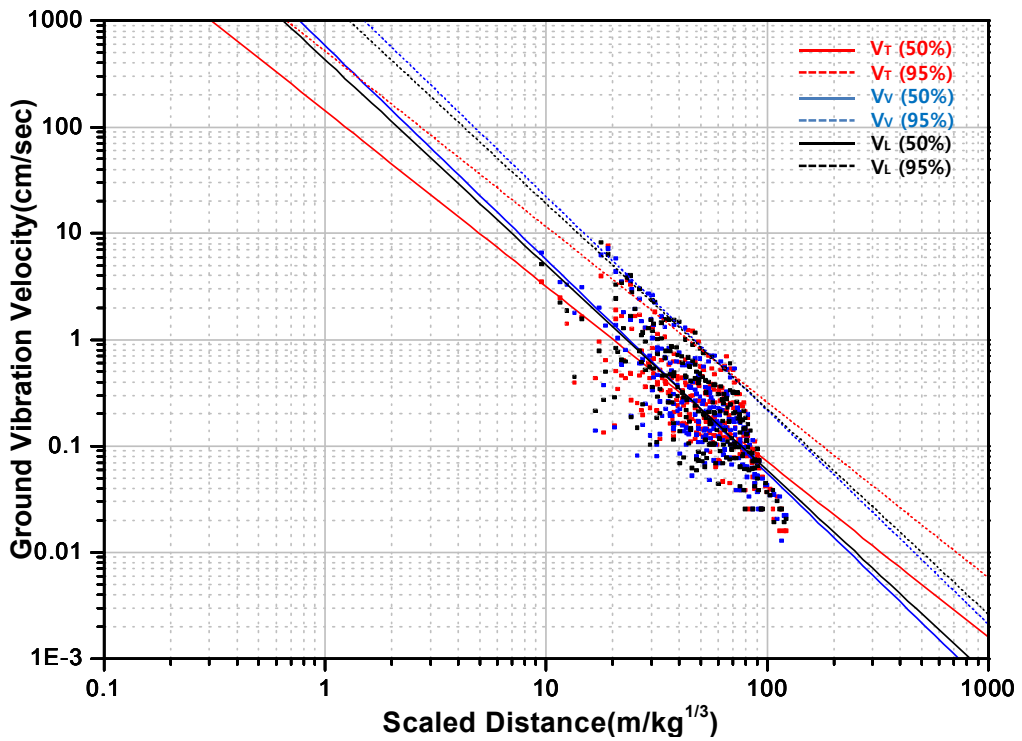


Table 4.4 Prediction equation of ground vibration for component velocity(Case 2)

Transverse component velocity			
Square root method	Prediction equation	50%	$V_{50} = 84.46 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.69}$
		95%	$V_{95} = 289.79 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.69}$
	R		0.796
Cube root method	Prediction equation	50%	$V_{50} = 141.83 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.65}$
		95%	$V_{95} = 515.95 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.65}$
	R		0.750
Vertical component velocity			
Square root method	Prediction equation	50%	$V_{50} = 290.41 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-2.05}$
		95%	$V_{95} = 1034.53 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-2.05}$
	R		0.824
Cube root method	Prediction equation	50%	$V_{50} = 580.93 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-2.01}$
		95%	$V_{95} = 2271.79 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-2.01}$
	R		0.783
Longitudinal component velocity			
Square root method	Prediction equation	50%	$V_{50} = 236.05 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.98}$
		95%	$V_{95} = 823.41 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.98}$
	R		0.814
Cube root method	Prediction equation	50%	$V_{50} = 428.98 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.93}$
		95%	$V_{95} = 1622.03 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.93}$
	R		0.767



(a) square root



(b) cube root

Figure 4.3 Relationship between T, V, L components velocity and scaled distance(Case 2).

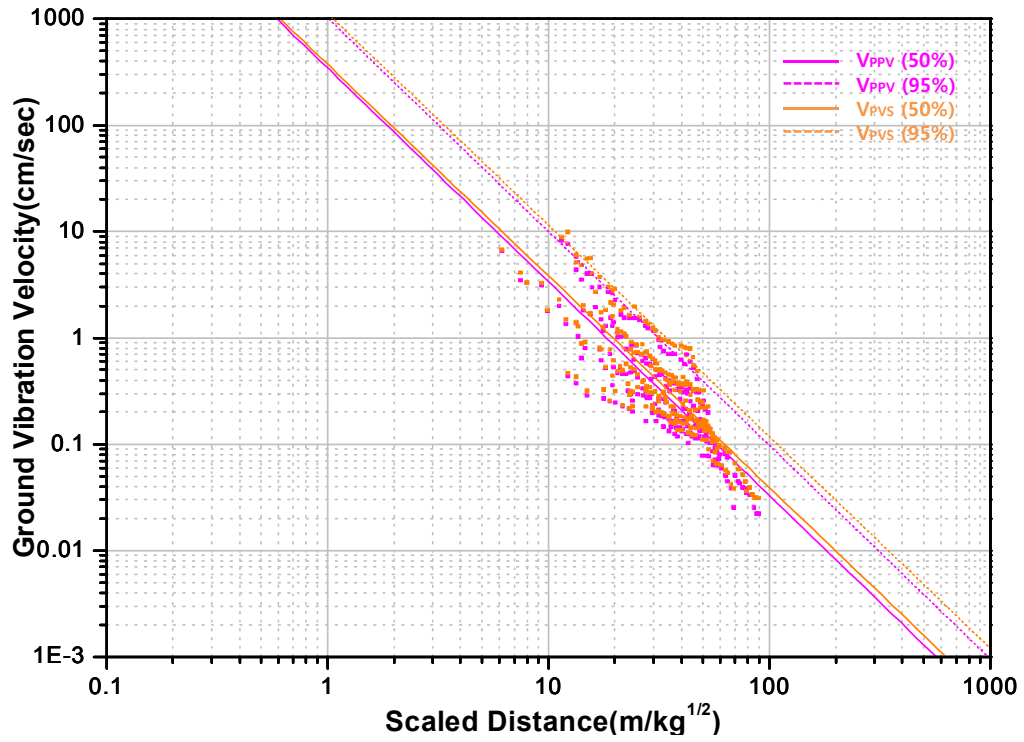
#### 4.4 Case 2의 PPV와 PVS의 회귀분석

Table 4.5는 현장실험을 통해 계측된 지반진동 데이터 중 지연시차가 25ms인 PPV와 PVS 데이터만 수집하여 회귀분석을 실시한 50, 95% 지반진동 예측식이다.

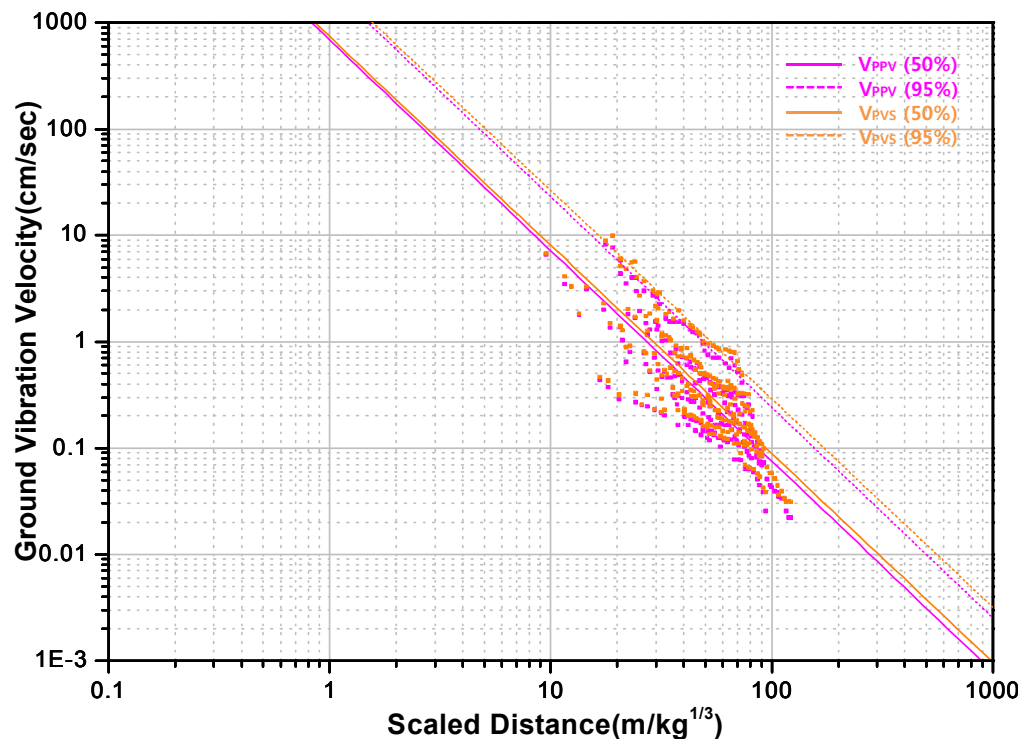
Table 4.5의 PPV와 PVS의 지반진동 예측식을 이용하여 노모그램 분석을 실시한 결과는 Figure 4.4와 같다. 여기서,  $V_{PPV}$ 는 최대입자속도,  $V_{PVS}$ 는 최대벡터합이다.

Table 4.5 Prediction equation of ground vibration for PPV and PVS(Case 2)

Peak particle velocity			
Square root method	Prediction equation	50%	$V_{50} = 345.80 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-2.01}$
		95%	$V_{95} = 1023.63 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-2.01}$
	R		0.855
Cube root method	Prediction equation	50%	$V_{50} = 687.97 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.98}$
		95%	$V_{95} = 2202.39 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.98}$
	R		0.814
Peak vector sum			
Square root method	Prediction equation	50%	$V_{50} = 374.54 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.99}$
		95%	$V_{95} = 1125.75 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.99}$
	R		0.851
Cube root method	Prediction equation	50%	$V_{50} = 736.12 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.96}$
		95%	$V_{95} = 2414.84 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.96}$
	R		0.809



(a) square root



(b) cube root

Figure 4.4 Relationship between peak particle velocity(PPV), peak vector sum(PVS) and scaled distance(Case 2).

## 5. 고찰

본 고찰에 사용된 지발당 장약량은 국토해양부의 “도로공사 노천발파 설계시공 지침 및 요령”에 제시된 표준발파공법의 공법별 경계 기준 장약량인 0.5, 1.6, 5, 15kg을 적용하여 기폭위치별로 성분별(T, V, L) 입자속도, 최대입자속도(PPV) 및 최대벡터합(PVS)을 비교분석하였다.

### 5.1 성분별(T, V, L) 입자속도에 의한 지반진동 예측

#### 5.1.1 Case 1의 성분별 지반진동 예측

Case 1의 SRSD의 성분별(T, V, L) 평균(50%) 지반진동 예측식은 Table 4.2와 같다.

지반진동 예측 결과 접선성분(T)은 다른 성분에 비해 근거리 진동이 가장 적게 발생되나 감쇠가 적어 멀리 전파하므로 원거리 진동은 가장 크게 발생된다. 수직성분(V)은 다른 성분에 비해 근거리에서는 진동이 크게 발생되나 감쇠가 가장 커서 멀리 전파하지 못하므로 원거리 진동은 가장 적게 발생된다. 진행성분(L)은 수직성분(V)보다 근거리 진동이 적게 발생되나 수직성분(V)보다 감쇠가 적어 원거리 진동은 크게 발생한다(Figure 4.1(a)).

Case 1의 성분별(T, V, L) 지반진동을 예측하기 위해 SRSD의 평균 지반진동 예측식으로 거리에 따른 예측 진동치를 Figure 5.1과 같이 도시하였다.

Table 5.1은 Case 1에서 거리에 따른 성분별(T, V, L) 예측진동치와 증감율을 나타낸 표이다.

Case 1에서 성분별(T, V, L) 입자속도의 평균 지반진동 예측식을 통한 5~200m의 이격거리에서 진동속도를 예측한 결과 장약량이 증가함에 따라 각 성분별 진동수준이 역전되는 거리가 증가되는 것으로 예측되었다. 보통 접선성분의 진동수준은 근거리에서는 다른 성분에 비해 가장 작은 진동수준이 예측되었고, 거리가 멀어질수록 다른 성분에 비해 진동수준이 점차 커지는 것으로 예측되었으며, 수직성분의 진동수준은 접선성분의 진동수준 경향과 반대 현상이 예측되었다. 진행성분의 진동수준은 근거리에서는 수직성분의 진동수준보다 작고, 접선성분 진동수준보다 크게 예측되었다. 그리고 장약량에 따라 다

르지만 일정거리에서는 가장 큰 진동수준이 예측되다가 원거리에서는 접선성분의 진동 수준보다 작고, 수직성분 진동수준보다 크게 예측되었다.

(1) 지발당 장약량이 0.5kg일 때

5~200m까지의 거리에서 수직성분 예측진동속도는 접선성분 예측진동속도에 비해 5~24m 구간에서는 최대 47.95% 높게 예측되었고, 25~200m 구간에서는 최대 136.18% 낮게 예측되었다. 그리고 진행성분 예측진동속도에 비해 5~19m 구간에서는 최대 22.40% 높게 예측되었고, 20~200m 구간에서는 최대 56.40% 낮게 예측되었다. 진행성분 예측진동속도는 접선성분 예측속도에 비해 5~30m 구간에서는 최대 32.93% 높게 예측되었고, 31~200m 구간에서는 최대 51.01% 낮게 예측되었다(Table 5.2, Figure 5.2).

(2) 지발당 장약량이 1.6kg일 때

5~200m까지의 거리에서 수직성분 예측진동속도는 접선성분 예측진동속도에 비해 5~43m 구간에서는 최대 58.99% 높게 예측되었고, 44~200m 구간에서는 최대 86.07% 낮게 예측되었다. 그리고 진행성분 예측진동속도에 비해 5~33m 구간에서는 최대 30.52% 높게 예측되었고, 34~200m 구간에서는 최대 40.04% 낮게 예측되었다. 진행성분 예측진동속도는 접선성분 예측속도에 비해 5~54m 구간에서는 최대 40.98% 높게 예측되었고, 55~200m 구간에서는 최대 32.87% 낮게 예측되었다(Table 5.2, Figure 5.2).

(3) 지발당 장약량이 5kg일 때

5~200m까지의 거리에서 수직성분 예측진동속도는 접선성분 예측진동속도에 비해 5~77m 구간에서는 최대 67.54% 높게 예측되었고, 78~200m 구간에서는 최대 47.31% 낮게 예측되었다. 그리고 진행성분 예측진동속도에 비해 5~60m 구간에서는 최대 37.65% 높게 예측되었고, 61~200m 구간에서는 최대 25.67% 낮게 예측되었다. 진행성분 예측진동속도는 접선성분 예측속도에 비해 5~97m 구간에서는 최대 47.93% 높게 예측되었고, 98~200m 구간에서는 최대 17.22% 낮게 예측되었다(Table 5.2, Figure 5.2).

(4) 지발당 장약량이 15kg일 때

5~200m까지의 거리에서 수직성분 예측진동속도는 접선성분 예측진동속도에 비해 5~134m 구간에서는 최대 74.08% 높게 예측되었고, 135~200m 구간에서는 최대 17.61% 낮게 예측되었다. 그리고 진행성분 예측진동속도에 비해 5~104m 구간에서는 최대 43.83%

높게 예측되었고, 105~200m 구간에서는 최대 13.22% 낮게 예측되었다. 진행성분 예측 진동속도는 접선성분 예측속도에 비해 5~168m 구간에서는 최대 53.86% 높게 예측되었고, 169~200m 구간에서는 최대 3.88% 낮게 예측되었다(Table 5.2, Figure 5.2).

Table 5.1 The influence of charge per delay on the predicted ground vibration velocity for Case 1

Distance (m)	Charge per delay (kg)	Predicted ground vibration velocity (cm/sec)			Ratio of increase (%)		
		V <sub>T</sub>	V <sub>V</sub>	V <sub>L</sub>	(V <sub>V</sub> -V <sub>T</sub> )/V <sub>V</sub>	(V <sub>V</sub> -V <sub>L</sub> )/V <sub>V</sub>	(V <sub>L</sub> -V <sub>T</sub> )/V <sub>L</sub>
5	0.5	3.301	<b>6.343</b>	4.922	47.95	22.40	32.93
10		0.942	<b>1.361</b>	1.205	30.85	11.48	21.88
20		0.269	0.292	<b>0.295</b>	8.12	-0.98	9.01
40		<b>0.077</b>	0.063	0.072	-22.08	-15.19	-5.98
60		<b>0.037</b>	0.025	0.032	-44.16	-24.42	-15.87
80		<b>0.022</b>	0.013	0.018	-62.21	-31.41	-23.44
100		<b>0.015</b>	0.008	0.011	-77.75	-37.10	-29.65
120		<b>0.010</b>	0.005	0.008	-91.55	-41.93	-34.96
140		<b>0.008</b>	0.004	0.006	-104.05	-46.15	-39.61
160		<b>0.006</b>	0.003	0.004	-115.53	-49.91	-43.78
180		<b>0.005</b>	0.002	0.003	-126.19	-53.30	-47.55
200		<b>0.004</b>	0.002	0.003	-136.18	-56.40	-51.01
5	1.6	9.459	<b>23.068</b>	16.027	58.99	30.52	40.98
10		2.698	<b>4.951</b>	3.924	45.52	20.74	31.26
20		0.769	<b>1.063</b>	0.961	27.61	9.58	19.94
40		0.219	0.228	<b>0.235</b>	3.82	-3.14	6.75
60		<b>0.105</b>	0.093	0.103	-13.58	-11.40	-1.95
80		<b>0.063</b>	0.049	0.058	-27.80	-17.66	-8.62
100		<b>0.042</b>	0.030	0.037	-40.04	-22.76	-14.08
120		<b>0.030</b>	0.020	0.025	-50.91	-27.08	-18.75
140		<b>0.023</b>	0.014	0.018	-60.76	-30.86	-22.85
160		<b>0.018</b>	0.011	0.014	-69.80	-34.22	-26.51
180		<b>0.014</b>	0.008	0.011	-78.21	-37.26	-29.83
200		<b>0.012</b>	0.006	0.009	-86.07	-40.04	-32.87
5	5	26.527	<b>81.714</b>	50.949	67.54	37.65	47.93
10		7.565	<b>17.539</b>	12.475	56.87	28.87	39.36
20		2.158	<b>3.765</b>	3.055	42.69	18.86	29.37
40		0.615	<b>0.808</b>	0.748	23.85	7.44	17.73
60		0.295	<b>0.328</b>	0.328	10.08	0.03	10.06
80		0.175	0.173	<b>0.183</b>	-1.18	-5.59	4.18
100		<b>0.117</b>	0.106	0.116	-10.87	-10.16	-0.64
120		<b>0.084</b>	0.071	0.080	-19.48	-14.05	-4.76
140		<b>0.064</b>	0.050	0.059	-27.27	-17.44	-8.37
160		<b>0.050</b>	0.037	0.045	-34.43	-20.45	-11.61
180		<b>0.040</b>	0.029	0.035	-41.08	-23.18	-14.54
200		<b>0.033</b>	0.023	0.029	-47.31	-25.67	-17.22

Note) V<sub>T</sub>=transverse component velocity, V<sub>V</sub>=vertical component velocity, V<sub>L</sub>=longitudinal component velocity



Table 5.1 Continues

Distance (m)	Charge per delay (kg)	Predicted ground vibration velocity (cm/sec)			Ratio of increase (%)		
		$V_T$	$V_V$	$V_L$	$(V_V-V_T)/V_V$	$(V_V-V_L)/V_V$	$(V_L-V_T)/V_L$
5	15	71.694	<b>276.631</b>	155.387	74.08	43.83	53.86
10		20.447	<b>59.376</b>	38.047	65.56	35.92	46.26
20		5.831	<b>12.745</b>	9.316	54.25	26.90	37.41
40		1.663	<b>2.736</b>	2.281	39.21	16.61	27.10
60		0.798	<b>1.112</b>	1.002	28.21	9.93	20.29
80		0.474	<b>0.587</b>	0.559	19.23	4.87	15.09
100		0.317	<b>0.358</b>	0.355	11.49	0.75	10.81
120		0.228	0.239	<b>0.245</b>	4.62	-2.74	7.16
140		0.172	0.170	<b>0.179</b>	-1.61	-5.80	3.96
160		0.135	0.126	<b>0.137</b>	-7.32	-8.52	1.10
180		<b>0.109</b>	0.097	0.108	-12.63	-10.97	-1.50
200		<b>0.090</b>	0.077	0.087	-17.61	-13.22	-3.88

Note)  $V_T$ =transverse component velocity,  $V_V$ =vertical component velocity,  $V_L$ =longitudinal component velocity

Table 5.2 Maximum ratio of increase on rate of velocity components for Case 1

Charge per delay (kg)	Rate of velocity components	Distance (m)	Maximum ratio of increase (%)
0.5	$(V_V-V_T)/V_V$	5~24	47.95
		25~200	-136.18
	$(V_V-V_L)/V_V$	5~19	22.40
		20~200	-56.40
		$(V_L-V_T)/V_L$	5~30
31~200	-51.01		
1.6	$(V_V-V_T)/V_V$	5~43	58.99
		44~200	-86.07
	$(V_V-V_L)/V_V$	5~33	30.52
		34~200	-40.04
		$(V_L-V_T)/V_L$	5~54
55~200	-32.87		
5	$(V_V-V_T)/V_V$	5~77	67.54
		78~200	-47.31
	$(V_V-V_L)/V_V$	5~60	37.65
		61~200	-25.67
		$(V_L-V_T)/V_L$	5~97
98~200	-17.22		
15	$(V_V-V_T)/V_V$	5~134	74.08
		135~200	-17.61
	$(V_V-V_L)/V_V$	5~104	43.83
		105~200	-13.22
		$(V_L-V_T)/V_L$	5~168
169~200	-3.88		

Note) (+) : increase, (-) : decrease

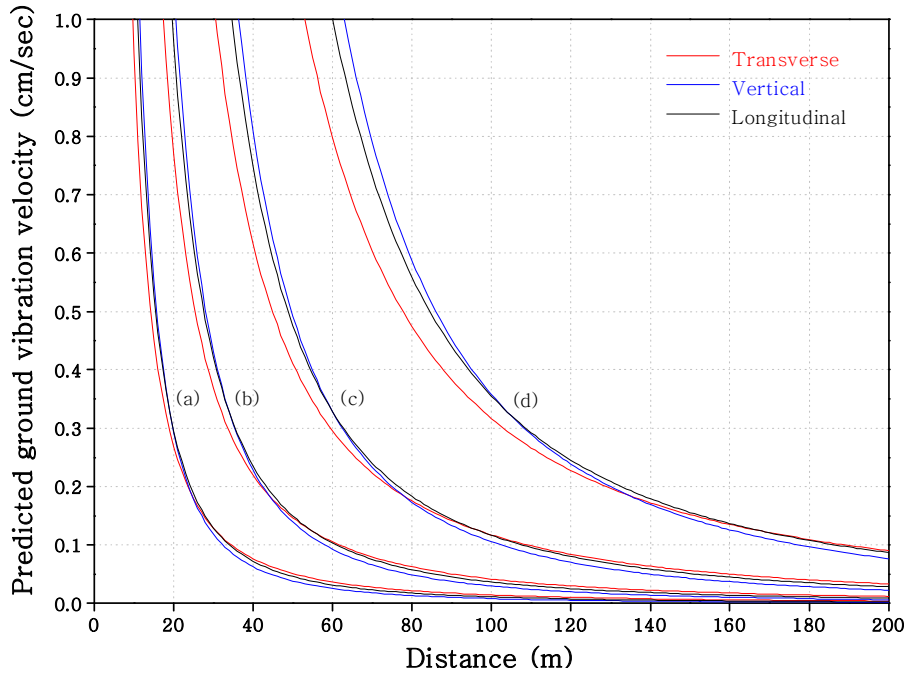


Figure 5.1 Relationship between predicted ground vibration velocity(component) and distance for Case 1: charge per delay=(a) 0.5kg, (b) 1.6kg, (c) 5kg, (d) 15kg.

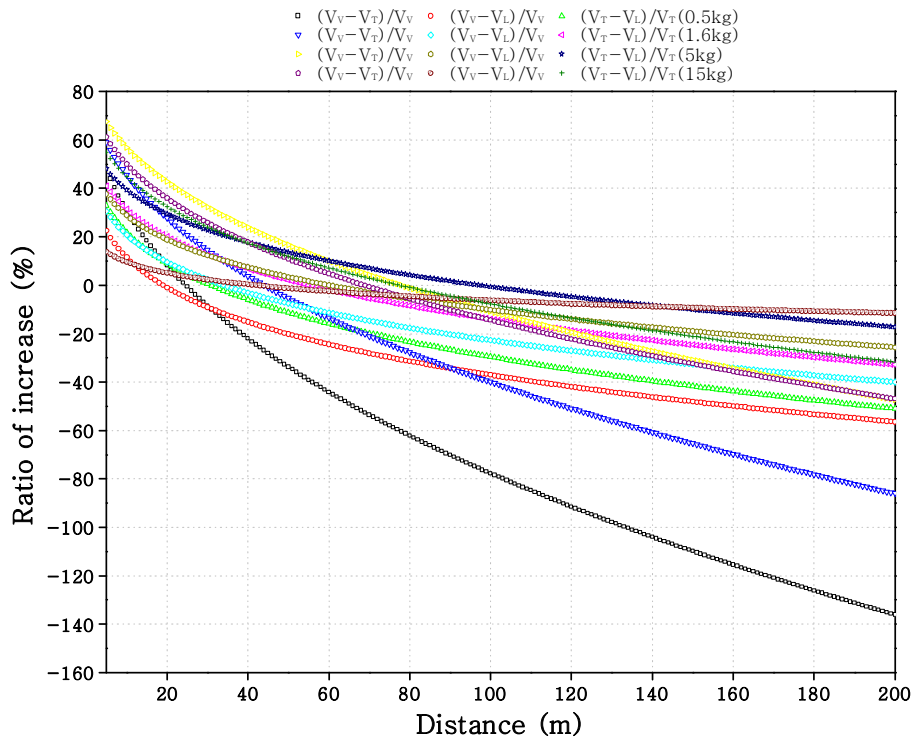


Figure 5.2 Relationship between ratio of increase and distance for Case 1 (component velocity).

## 5.1.2 Case 2의 성분별 지반진동 예측

Case 2의 SRSD의 성분별(T, V, L) 평균(50%) 지반진동 예측식은 Table 4.4와 같다.

지반진동 예측 결과 접선성분(T)은 다른 성분에 비해 근거리 진동이 가장 적게 발생되나 감쇠가 적어 멀리 전파하므로 원거리 진동은 가장 크게 발생된다. 수직성분(V)은 다른 성분에 비해 근거리에서는 진동이 크게 발생되나 감쇠가 가장 커서 멀리 전파하지 못하므로 원거리 진동은 가장 적게 발생된다. 진행성분(L)은 수직성분(V)보다 근거리 진동이 적게 발생되나 수직성분(V)보다 감쇠가 적어 원거리 진동은 크게 발생한다(Figure 4.3(a)).

Case 2의 성분별(T, V, L) 지반진동을 예측하기 위해 SRSD의 평균 지반진동 예측식으로 거리에 따른 예측 진동치를 Figure 5.3과 같이 도시하였다.

Table 5.3은 Case 2에서 거리에 따른 성분별(T, V, L) 예측진동치와 증감율을 나타낸 표이다.

Case 2에서 성분별(T, V, L) 입자속도의 평균 지반진동 예측식을 통한 5~200m의 이격거리에서 진동속도를 예측한 결과 장약량이 증가함에 따라 각 성분별 진동수준이 역전되는 거리가 증가되는 것으로 예측되었다. 보통 접선성분의 진동수준은 근거리에서는 다른 성분에 비해 가장 작은 진동수준이 예측되었고, 거리가 멀어질수록 다른 성분에 비해 진동수준이 점차 커지는 것으로 예측되었으며, 수직성분의 진동수준은 접선성분의 진동수준 경향과 반대 현상이 예측되었다. 진행성분의 진동수준은 근거리에서는 수직성분의 진동수준보다 작고, 접선성분 진동수준보다 크게 예측되었다. 그리고 장약량에 따라 다르지만 일정거리에서는 가장 큰 진동수준이 예측되다가 원거리에서는 접선성분의 진동수준보다 작고, 수직성분 진동수준보다 크게 예측되었다. 이와 같이 Case 1과 Case 2의 성분별 예측진동 경향은 비슷하게 나타났다.

### (1) 지발당 장약량이 0.5kg일 때

5~200m까지의 거리에서 수직성분 예측진동속도는 접선성분 예측진동속도에 비해 5~21m 구간에서는 최대 41.06% 높게 예측되었고, 22~200m 구간에서는 최대 122.39% 낮게 예측되었다. 그리고 진행성분 예측진동속도에 비해 5~13m 구간에서는 최대 6.59% 높게 예측되었고, 14~200m 구간에서는 최대 20.93% 낮게 예측되었다. 진행성분 예측진동속도는 접선성분 예측속도에 비해 5~24m 구간에서는 최대 36.90% 높게 예측되었고,

25~200m 구간에서는 최대 83.91% 낮게 예측되었다(Table 5.4, Figure 5.4).

(2) 지발당 장약량이 1.6kg일 때

5~200m까지의 거리에서 수직성분 예측진동속도는 접선성분 예측진동속도에 비해 5~38m 구간에서는 최대 52.20% 높게 예측되었고, 39~200m 구간에서는 최대 80.38% 낮게 예측되었다. 그리고 진행성분 예측진동속도에 비해 5~23m 구간에서는 최대 10.32% 높게 예측되었고, 24~200m 구간에서는 최대 16.10% 낮게 예측되었다. 진행성분 예측진동속도는 접선성분 예측속도에 비해 5~43m 구간에서는 최대 46.70% 높게 예측되었고, 44~200m 구간에서는 최대 55.36% 낮게 예측되었다(Table 5.4, Figure 5.4).

(3) 지발당 장약량이 5kg일 때

5~200m까지의 거리에서 수직성분 예측진동속도는 접선성분 예측진동속도에 비해 5~68m 구간에서는 최대 61.06% 높게 예측되었고, 69~200m 구간에서는 최대 46.93% 낮게 예측되었다. 그리고 진행성분 예측진동속도에 비해 5~41m 구간에서는 최대 13.82% 높게 예측되었고, 42~200m 구간에서는 최대 11.57% 낮게 예측되었다. 진행성분 예측진동속도는 접선성분 예측속도에 비해 5~77m 구간에서는 최대 54.81% 높게 예측되었고, 78~200m 구간에서는 최대 31.70% 낮게 예측되었다(Table 5.4, Figure 5.4).

(4) 지발당 장약량이 15kg일 때

5~200m까지의 거리에서 수직성분 예측진동속도는 접선성분 예측진동속도에 비해 5~118m 구간에서는 최대 68.05% 높게 예측되었고, 119~200m 구간에서는 최대 20.57% 낮게 예측되었다. 그리고 진행성분 예측진동속도에 비해 5~72m 구간에서는 최대 17.08% 높게 예측되었고, 73~200m 구간에서는 최대 7.36% 낮게 예측되었다. 진행성분 예측진동속도는 접선성분 예측속도에 비해 5~134m 구간에서는 최대 61.47% 높게 예측되었고, 135~200m 구간에서는 최대 12.31% 낮게 예측되었다(Table 5.4, Figure 5.4).

Table 5.3 The influence of charge per delay on the predicted ground vibration velocity for Case 2

Distance (m)	Charge per delay (kg)	Predicted ground vibration velocity (cm/sec)			Ratio of increase (%)		
		V <sub>T</sub>	V <sub>V</sub>	V <sub>L</sub>	(V <sub>V</sub> -V <sub>T</sub> )/V <sub>V</sub>	(V <sub>V</sub> -V <sub>L</sub> )/V <sub>V</sub>	(V <sub>L</sub> -V <sub>T</sub> )/V <sub>L</sub>
5	0.5	3.098	<b>5.256</b>	4.909	41.06	6.59	36.90
10		0.960	<b>1.269</b>	1.244	24.36	1.95	22.86
20		0.298	0.306	<b>0.315</b>	2.92	-2.93	5.68
40		<b>0.092</b>	0.074	0.080	-24.59	-8.04	-15.32
60		<b>0.046</b>	0.032	0.036	-44.17	-11.15	-29.71
80		<b>0.029</b>	0.018	0.020	-59.91	-13.42	-40.99
100		<b>0.020</b>	0.011	0.013	-73.28	-15.20	-50.42
120		<b>0.014</b>	0.008	0.009	-85.04	-16.68	-58.58
140		<b>0.011</b>	0.006	0.007	-95.60	-17.95	-65.83
160		<b>0.009</b>	0.004	0.005	-105.23	-19.05	-72.38
180		<b>0.007</b>	0.003	0.004	-114.12	-20.04	-78.37
200		<b>0.006</b>	0.003	0.003	-122.39	-20.93	-83.91
5	1.6	8.277	<b>17.315</b>	15.528	52.20	10.32	46.70
10		2.565	<b>4.181</b>	3.936	38.65	5.86	34.83
20		0.795	<b>1.010</b>	0.998	21.26	1.18	20.32
40		0.246	0.244	<b>0.253</b>	-1.06	-3.73	2.58
60		<b>0.124</b>	0.106	0.113	-16.94	-6.72	-9.58
80		<b>0.076</b>	0.059	0.064	-29.70	-8.89	-19.11
100		<b>0.052</b>	0.037	0.041	-40.55	-10.61	-27.07
120		<b>0.038</b>	0.026	0.029	-50.08	-12.03	-33.97
140		<b>0.030</b>	0.019	0.021	-58.65	-13.24	-40.10
160		<b>0.024</b>	0.014	0.016	-66.46	-14.30	-45.63
180		<b>0.019</b>	0.011	0.013	-73.67	-15.25	-50.69
200		<b>0.016</b>	0.009	0.010	-80.38	-16.10	-55.36
5	5	21.678	<b>55.672</b>	47.976	61.06	13.82	54.81
10		6.719	<b>13.444</b>	12.161	50.02	9.54	44.75
20		2.082	<b>3.247</b>	3.083	35.86	5.04	32.45
40		0.645	<b>0.784</b>	0.781	17.68	0.32	17.42
60		0.325	0.341	<b>0.350</b>	4.75	-2.55	7.11
80		<b>0.200</b>	0.189	0.198	-5.65	-4.63	-0.97
100		<b>0.137</b>	0.120	0.127	-14.49	-6.28	-7.72
120		<b>0.101</b>	0.082	0.089	-22.25	-7.65	-13.57
140		<b>0.078</b>	0.060	0.065	-29.23	-8.81	-18.76
160		<b>0.062</b>	0.046	0.050	-35.59	-9.84	-23.45
180		<b>0.051</b>	0.036	0.040	-41.47	-10.75	-27.74
200		<b>0.043</b>	0.029	0.032	-46.93	-11.57	-31.70

Note) V<sub>T</sub>=transverse component velocity, V<sub>V</sub>=vertical component velocity, V<sub>L</sub>=longitudinal component velocity

Table 5.3 Continues

Distance (m)	Charge per delay (kg)	Predicted ground vibration velocity (cm/sec)			Ratio of increase (%)		
		V <sub>T</sub>	V <sub>V</sub>	V <sub>L</sub>	$(V_V - V_T) / V_V$	$(V_V - V_L) / V_V$	$(V_L - V_T) / V_L$
5	15	54.852	<b>171.668</b>	142.355	68.05	17.08	61.47
10		17.000	<b>41.455</b>	36.086	58.99	12.95	52.89
20		5.269	<b>10.011</b>	9.147	47.37	8.62	42.40
40		1.633	<b>2.417</b>	2.319	32.45	4.08	29.58
60		0.823	<b>1.053</b>	1.039	21.84	1.32	20.79
80		0.506	0.584	<b>0.588</b>	13.31	-0.69	13.90
100		0.347	0.369	<b>0.378</b>	6.06	-2.27	8.14
120		0.255	0.254	<b>0.263</b>	-0.32	-3.59	3.16
140		<b>0.197</b>	0.185	0.194	-6.04	-4.71	-1.27
160		<b>0.157</b>	0.141	0.149	-11.26	-5.69	-5.27
180		<b>0.129</b>	0.111	0.118	-16.08	-6.57	-8.93
200		<b>0.108</b>	0.089	0.096	-20.57	-7.36	-12.31

Note) V<sub>T</sub>=transverse component velocity, V<sub>V</sub>=vertical component velocity, V<sub>L</sub>=longitudinal component velocity

Table 5.4 Maximum ratio of increase on rate of velocity components for Case 2

Charge per delay (kg)	Rate of velocity components	Distance (m)	Maximum ratio of increase (%)
0.5	$(V_V - V_T) / V_V$	5~21	41.06
		22~200	-122.39
	$(V_V - V_L) / V_V$	5~13	6.59
		14~200	-20.93
		$(V_L - V_T) / V_L$	5~24
25~200	-83.91		
1.6	$(V_V - V_T) / V_V$	5~38	52.20
		39~200	-80.38
	$(V_V - V_L) / V_V$	5~23	10.32
		24~200	-16.10
		$(V_L - V_T) / V_L$	5~43
44~200	-55.36		
5	$(V_V - V_T) / V_V$	5~68	61.06
		69~200	-46.93
	$(V_V - V_L) / V_V$	5~41	13.82
		42~200	-11.57
		$(V_L - V_T) / V_L$	5~77
78~200	-31.70		
15	$(V_V - V_T) / V_V$	5~118	68.05
		119~200	-20.57
	$(V_V - V_L) / V_V$	5~72	17.08
		73~200	-7.36
		$(V_L - V_T) / V_L$	5~134
135~200	-12.31		

Note) (+) : increase, (-) : decrease

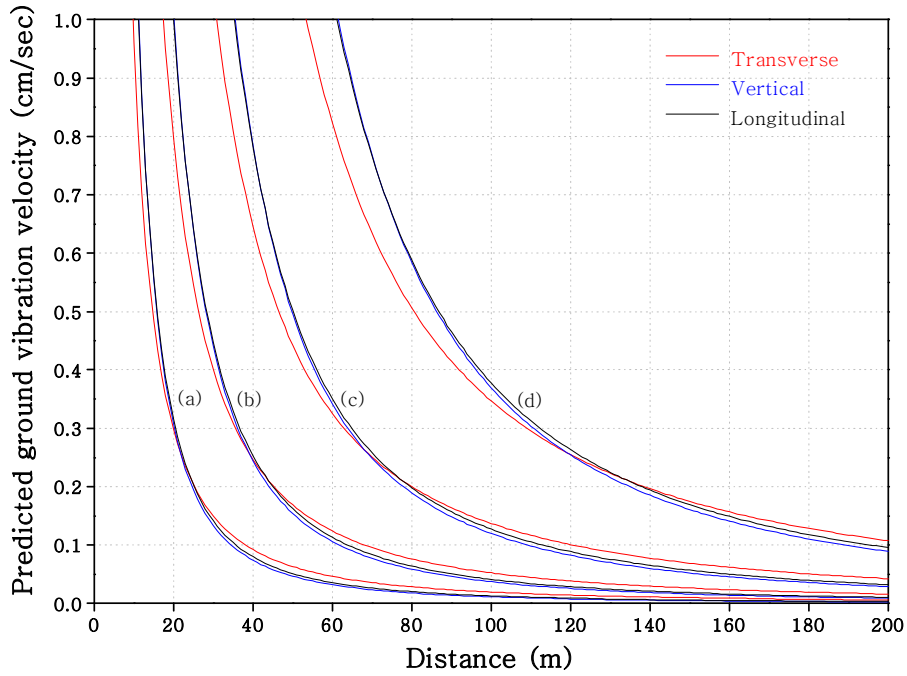


Figure 5.3 Relationship between predicted ground vibration velocity(component) and distance for Case 2: charge per delay=(a) 0.5kg, (b) 1.6kg, (c) 5kg, (d) 15kg.

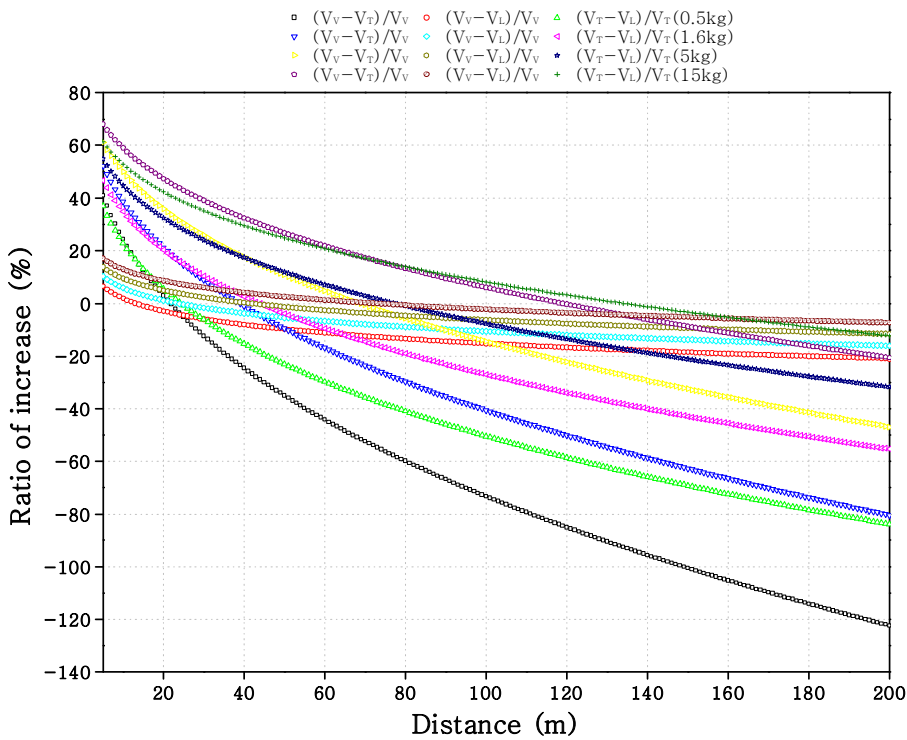


Figure 5.4 Relationship between ratio of increase and distance for Case 2 (component velocity).

## 5.2 최대입자속도(PPV)와 최대벡터합(PVS)에 의한 지반진동 예측

지연시차에 따른 최대입자속도(PPV)와 최대벡터합(PVS)의 평균(50%) 지반진동 예측식은 Table 4.3과 4.5와 같다.

최대입자속도(PPV)와 최대벡터합(PVS)의 평균 지반진동 예측식으로 지연시차의 노모그램 분석(Figure 4.2(a), 4.4(a))을 실시하였다.

최대입자속도와 최대벡터합 모두 자승근 환산거리가  $13.4\text{kg}/\text{w}^{1/2}$  이내에서는 지연시차가 25ms인 Case 2가 지연시차가 20ms인 Case 1보다 낮은 진동수준으로 분석되었고, 자승근 환산거리가  $13.5\text{kg}/\text{w}^{1/2}$  이상에서는 지연시차가 20ms인 Case 1이 지연시차가 25ms인 Case 2보다 낮은 진동수준으로 분석되었다.

SRSD의 성분별 평균(50%) 지반진동 예측식에서  $0.1\sim 1000\text{kg}/\text{w}^{1/2}$  범위의 환산거리에서 최대입자속도와 최대벡터합의 지반진동수준을 비교해 본 결과 최대입자속도는 최대벡터합보다 Case 1은 최소 3.42%에서 최대 24.34% 낮은 진동수준을 보이며, Case 2는 최소 3.44%에서 최대 24.36% 낮은 진동수준을 보인다.

### 5.2.1 최대입자속도(PPV)에 의한 지반진동 예측

최대입자속도에 의한 지반진동을 예측하기 위해 SRSD의 평균 지반진동 예측식으로 거리에 따른 예측 진동치를 Figure 5.5와 같이 도시하였고, Table 5.5는 예측진동치와 증감율을 나타낸 표이다.

최대입자속도(PPV)의 평균 지반진동 예측식을 통한 5~200m의 이격거리에서 진동속도를 예측한 결과 장약량이 증가함에 따라 최대입자속도의 진동수준이 역전되는 거리가 증가되는 되지만 근거리에서는 지연시차가 25ms인 Case 2, 원거리에서는 지연시차가 20ms인 Case 1의 진동수준이 낮게 예측되었다.

#### (1) 지발당 장약량이 0.5kg일 때

5~200m까지의 거리에서 Case 1의 예측진동속도는 Case 2의 예측진동속도에 비해 5~9m 구간에서는 최대 7.40% 높게 예측되었고, 10~200m 구간에서는 최대 44.16% 낮게 예측되었다(Table 5.6, Figure 5.6).



(2) 지발당 장약량이 1.6kg일 때

5~200m까지의 거리에서 Case 1의 예측진동속도는 Case 2의 예측진동속도에 비해 5~16m 구간에서는 최대 13.64% 높게 예측되었고, 17~200m 구간에서는 최대 34.45% 낮게 예측되었다(Table 5.6, Figure 5.6).

(3) 지발당 장약량이 5kg일 때

5~200m까지의 거리에서 Case 1의 예측진동속도는 Case 2의 예측진동속도에 비해 5~30m 구간에서는 최대 19.35% 높게 예측되었고, 31~200m 구간에서는 최대 25.56% 낮게 예측되었다(Table 5.6, Figure 5.6).

(4) 지발당 장약량이 15kg일 때

5~200m까지의 거리에서 Case 1의 예측진동속도는 Case 2의 예측진동속도에 비해 5~51m 구간에서는 최대 24.49% 높게 예측되었고, 52~200m 구간에서는 최대 17.55% 낮게 예측되었다(Table 5.6, Figure 5.6).

Table 5.5 The influence of charge per delay on the predicted ground vibration velocity for PPV

Distance (m)	Charge per delay (kg)	Predicted ground vibration velocity (cm/sec)		Ratio of increase (%)
		PPV <sub>Case1</sub>	PPV <sub>Case2</sub>	(PPV <sub>Case1</sub> -PPV <sub>Case2</sub> )/PPV <sub>Case1</sub>
5	0.5	<b>7.324</b>	6.782	7.40
10		1.673	<b>1.684</b>	-0.63
20		0.382	<b>0.418</b>	-9.36
40		0.087	<b>0.104</b>	-18.84
60		0.037	<b>0.046</b>	-24.77
80		0.020	<b>0.026</b>	-29.15
100		0.012	<b>0.016</b>	-32.66
120		0.008	<b>0.011</b>	-35.59
140		0.006	<b>0.008</b>	-38.12
160		0.005	<b>0.006</b>	-40.35
180		0.004	<b>0.005</b>	-42.35
200		0.003	<b>0.004</b>	-44.16
5	1.6	<b>25.278</b>	21.829	13.64
10		<b>5.775</b>	5.420	6.15
20		1.319	<b>1.346</b>	-1.99
40		0.301	<b>0.334</b>	-10.83
60		0.127	<b>0.148</b>	-16.36
80		0.069	<b>0.083</b>	-20.45
100		0.043	<b>0.053</b>	-23.72
120		0.029	<b>0.037</b>	-26.45
140		0.021	<b>0.027</b>	-28.81
160		0.016	<b>0.021</b>	-30.89
180		0.012	<b>0.016</b>	-32.76
200		0.010	<b>0.013</b>	-34.45
5	5	<b>85.065</b>	68.606	19.35
10		<b>19.434</b>	17.033	12.35
20		<b>4.440</b>	4.229	4.75
40		1.014	<b>1.050</b>	-3.51
60		0.428	<b>0.465</b>	-8.67
80		0.232	<b>0.261</b>	-12.49
100		0.144	<b>0.166</b>	-15.54
120		0.098	<b>0.115</b>	-18.10
140		0.070	<b>0.085</b>	-20.30
160		0.053	<b>0.065</b>	-22.24
180		0.041	<b>0.051</b>	-23.98
200		0.033	<b>0.041</b>	-25.56

Note) PPV<sub>Case1</sub>=PPV of Case 1, PPV<sub>Case2</sub>=PPV of Case 2

Table 5.5 Continues

Distance (m)	Charge per delay (kg)	Predicted ground vibration velocity (cm/sec)		Ratio of increase (%)
		PPV <sub>Case1</sub>	PPV <sub>Case2</sub>	$(PPV_{Case1}-PPV_{Case2})/PPV_{Case1}$
5	15	<b>274.085</b>	206.951	24.49
10		<b>62.617</b>	51.380	17.94
20		<b>14.305</b>	12.756	10.83
40		<b>3.268</b>	3.167	3.09
60		1.378	<b>1.402</b>	-1.74
80		0.747	<b>0.786</b>	-5.31
100		0.464	<b>0.502</b>	-8.17
120		0.315	<b>0.348</b>	-10.56
140		0.227	<b>0.255</b>	-12.63
160		0.171	<b>0.195</b>	-14.45
180		0.133	<b>0.154</b>	-16.07
200		0.106	<b>0.125</b>	-17.55

Note) PPV<sub>Case1</sub>=PPV of Case 1, PPV<sub>Case2</sub>=PPV of Case 2

Table 5.6 Maximum ratio of increase on rate of velocity components for PPV

Charge per delay (kg)	Rate of velocity components	Distance (m)	Maximum ratio of increase (%)
0.5	$(PPV_{Case1}-PPV_{Case2})/PPV_{Case1}$	5~9	7.40
		10~200	-44.16
1.6	$(PPV_{Case1}-PPV_{Case2})/PPV_{Case1}$	5~16	13.64
		17~200	-34.45
5	$(PPV_{Case1}-PPV_{Case2})/PPV_{Case1}$	5~30	19.35
		31~200	-25.56
15	$(PPV_{Case1}-PPV_{Case2})/PPV_{Case1}$	5~51	24.49
		52~200	-17.55

Note) (+) : increase, (-) : decrease

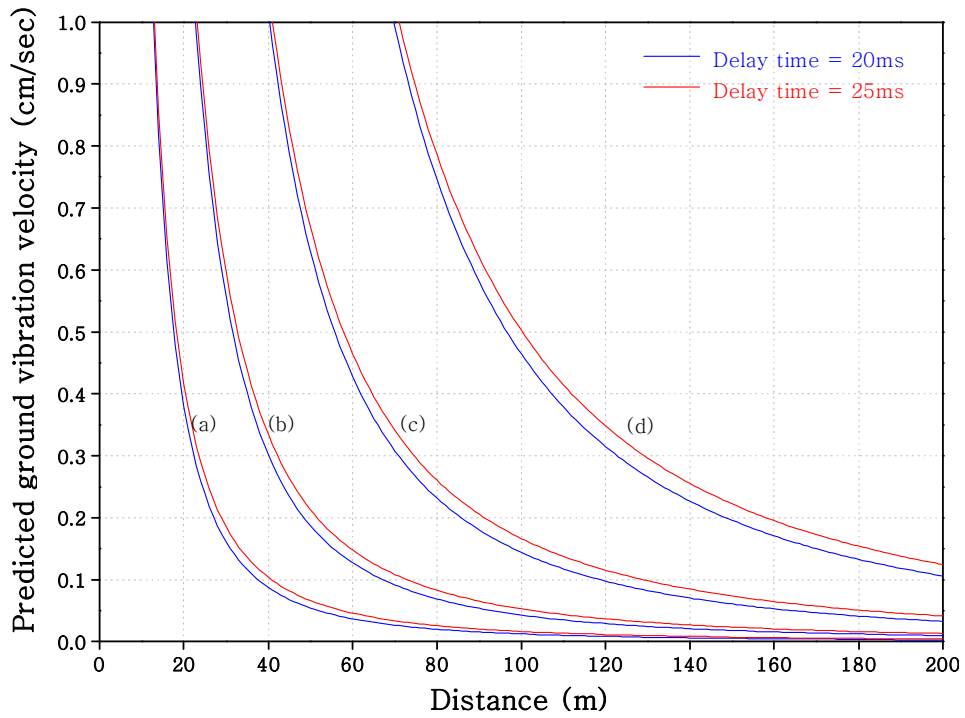


Figure 5.5 Relationship between predicted ground vibration velocity(PPV) and distance for different delay time.

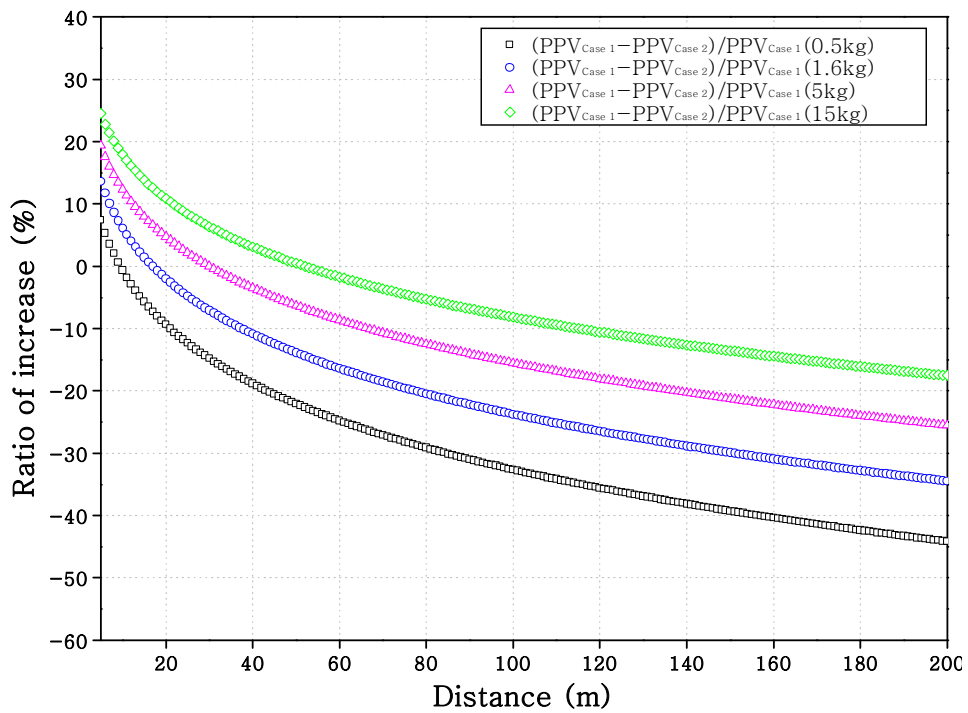


Figure 5.6 Relationship between ratio of increase and distance for different delay time(PPV).

## 5.2.2 최대벡터합(PVS)에 의한 지반진동 예측

최대벡터합에 의한 지반진동을 예측하기 위해 SRSD의 평균 지반진동 예측식으로 거리에 따른 예측 진동치를 Figure 5.7과 같이 도시하였고, Table 5.7은 예측진동치와 증감율을 나타낸 표이다.

최대벡터합(PVS)의 평균 지반진동 예측식을 통한 5~200m의 이격거리에서 진동속도를 예측한 결과 장약량이 증가함에 따라 최대벡터합의 진동수준이 역전되는 거리가 증가되는 되지만 근거리에서는 지연시차가 25ms인 Case 2, 원거리에서는 지연시차가 20ms인 Case 1의 진동수준이 낮게 예측되었다.

### (1) 지발당 장약량이 0.5kg일 때

5~200m까지의 거리에서 Case 1의 예측진동속도는 Case 2의 예측진동속도에 비해 5~9m 구간에서는 최대 7.39% 높게 예측되었고, 10~200m 구간에서는 최대 44.18% 낮게 예측되었다(Table 5.8, Figure 5.8).

### (2) 지발당 장약량이 1.6kg일 때

5~200m까지의 거리에서 Case 1의 예측진동속도는 Case 2의 예측진동속도에 비해 5~16m 구간에서는 최대 13.63% 높게 예측되었고, 17~200m 구간에서는 최대 34.46% 낮게 예측되었다(Table 5.8, Figure 5.8).

### (3) 지발당 장약량이 5kg일 때

5~200m까지의 거리에서 Case 1의 예측진동속도는 Case 2의 예측진동속도에 비해 5~29m 구간에서는 최대 19.34% 높게 예측되었고, 30~200m 구간에서는 최대 25.58% 낮게 예측되었다(Table 5.8, Figure 5.8).

### (4) 지발당 장약량이 15kg일 때

5~200m까지의 거리에서 Case 1의 예측진동속도는 Case 2의 예측진동속도에 비해 5~51m 구간에서는 최대 24.48% 높게 예측되었고, 52~200m 구간에서는 최대 17.57% 낮게 예측되었다(Table 5.8, Figure 5.8).

Table 5.7 The influence of charge per delay on the predicted ground vibration velocity for PVS

Distance (m)	Charge per delay (kg)	Predicted ground vibration velocity (cm/sec)		Ratio of increase (%)
		PVS <sub>Case1</sub>	PVS <sub>Case2</sub>	(PVS <sub>Case1</sub> -PVS <sub>Case2</sub> )/PVS <sub>Case1</sub>
5	0.5	<b>8.248</b>	7.639	7.39
10		1.911	<b>1.923</b>	-0.64
20		0.443	<b>0.484</b>	-9.37
40		0.103	<b>0.122</b>	-18.86
60		0.044	<b>0.054</b>	-24.79
80		0.024	<b>0.031</b>	-29.17
100		0.015	<b>0.020</b>	-32.68
120		0.010	<b>0.014</b>	-35.61
140		0.007	<b>0.010</b>	-38.14
160		0.006	<b>0.008</b>	-40.37
180		0.004	<b>0.006</b>	-42.37
200		0.003	<b>0.005</b>	-44.18
5	1.6	<b>28.138</b>	24.302	13.63
10		<b>6.518</b>	6.118	6.14
20		1.510	<b>1.540</b>	-2.00
40		0.350	<b>0.388</b>	-10.85
60		0.149	<b>0.173</b>	-16.38
80		0.081	<b>0.098</b>	-20.46
100		0.051	<b>0.063</b>	-23.73
120		0.034	<b>0.044</b>	-26.47
140		0.025	<b>0.032</b>	-28.83
160		0.019	<b>0.025</b>	-30.91
180		0.015	<b>0.019</b>	-32.77
200		0.012	<b>0.016</b>	-34.46
5	5	<b>93.617</b>	75.513	19.34
10		<b>21.686</b>	19.010	12.34
20		<b>5.024</b>	4.785	4.74
40		1.164	<b>1.205</b>	-3.52
60		0.495	<b>0.538</b>	-8.68
80		0.270	<b>0.303</b>	-12.50
100		0.168	<b>0.195</b>	-15.56
120		0.115	<b>0.135</b>	-18.11
140		0.083	<b>0.100</b>	-20.32
160		0.062	<b>0.076</b>	-22.26
180		0.049	<b>0.060</b>	-24.00
200		0.039	<b>0.049</b>	-25.58

Note) PVS<sub>Case1</sub>=PVS of Case 1, PVS<sub>Case2</sub>=PVS of Case 2

Table 5.7 Continues

Distance (m)	Charge per delay (kg)	Predicted ground vibration velocity (cm/sec)		Ratio of increase (%)
		PVS <sub>Case1</sub>	PVS <sub>Case2</sub>	(PVS <sub>Case1</sub> -PVS <sub>Case2</sub> )/PVS <sub>Case1</sub>
5	15	<b>298.345</b>	225.299	24.48
10		<b>69.111</b>	56.716	17.93
20		<b>16.009</b>	14.278	10.82
40		<b>3.709</b>	3.594	3.08
60		1.576	<b>1.604</b>	-1.75
80		0.859	<b>0.905</b>	-5.33
100		0.536	<b>0.580</b>	-8.18
120		0.365	<b>0.404</b>	-10.58
140		0.264	<b>0.297</b>	-12.64
160		0.199	<b>0.228</b>	-14.46
180		0.155	<b>0.180</b>	-16.09
200		0.124	<b>0.146</b>	-17.57

Note) PVS<sub>Case1</sub>=PVS of Case 1, PVS<sub>Case2</sub>=PVS of Case 2

Table 5.8 Maximum ratio of increase on rate of velocity components for PVS

Charge per delay (kg)	Rate of velocity components	Distance (m)	Maximum ratio of increase (%)
0.5	$(PVS_{Case1}-PVS_{Case2})$ /PVS <sub>Case1</sub>	5~9	7.39
		10~200	-44.18
1.6	$(PVS_{Case1}-PVS_{Case2})$ /PVS <sub>Case1</sub>	5~16	13.63
		17~200	-34.46
5	$(PVS_{Case1}-PVS_{Case2})$ /PVS <sub>Case1</sub>	5~29	19.34
		30~200	-25.58
15	$(PVS_{Case1}-PVS_{Case2})$ /PVS <sub>Case1</sub>	5~51	24.48
		52~200	-17.57

Note) (+) : increase, (-) : decrease

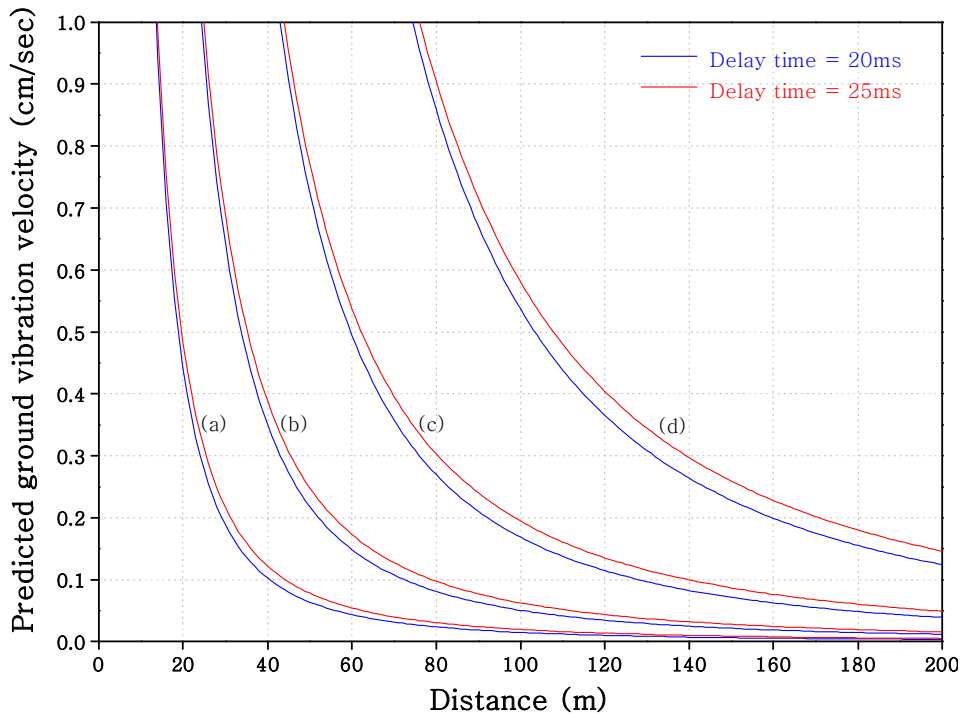


Figure 5.7 Relationship between predicted ground vibration velocity(PVS) and distance for different delay time.

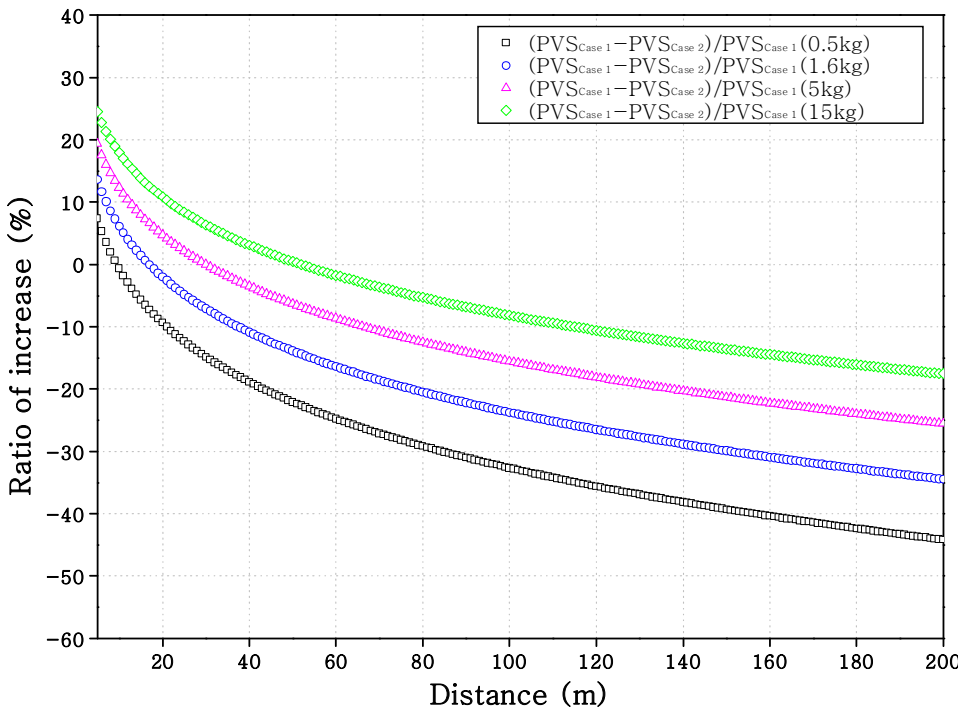


Figure 5.8 Relationship between ratio of increase and distance for different delay time(PVS).



## 6. 결론

본 연구는 발파공간 지연시차에 의한 진동의 전파 특성을 파악하기 위해서 공간격, 저항선, 천공장 그리고 장약량 등을 달리하여 총 16회의 시험발파(2~3공)를 실시하여 지반진동 예측식을 도출하였다. 그리고 도출된 평균(50%) 지반진동 예측식을 이용하여 발파공간 지연시차와 기폭위치에 따른 성분별(transverse, vertical, longitudinal component) 입자속도, 최대입자속도(PPV) 및 최대벡터합(PVS)의 노모그램 분석과 지반진동 예측을 통해 진동특성을 규명하였고, 국토해양부의 “도로공사 노천발파 설계 시공 지침 및 요령”에 제시된 표준발파공법의 공법별 경계 기준 장약량인 0.5, 1.6, 5, 15kg을 적용하여 지연시차에 따른 진동 증가율을 비교분석하였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구지역에서 총 16회의 시험발파를 통해 이격거리 23~227m 지점에서 총 544개의 자료를 획득하였다. 계측결과는 접선성분(Transverse component) 입자속도의 경우 0.127~80.203mm/sec, 수직성분(Vertical component) 입자속도의 경우 0.127~84.961mm/sec, 진행성분(Longitudinal component) 입자속도의 경우 0.127~81.642mm/sec, 최대입자속도(Peak Particle Velocity, PPV)의 경우 0.191~84.961mm/sec, 최대벡터합(Peak Vector Sum, PVS) 입자속도의 경우 0.197~107.047mm/sec로 계측되었다.

2. 지연시차가 20ms인 Case 1과 지연시차가 25ms인 Case 2에서 성분별(T, V, L) 입자속도의 평균 지반진동 예측식을 통한 5~200m의 이격거리에서 진동속도를 예측한 결과 장약량이 증가함에 따라 각 성분별 진동수준이 역전되는 거리가 증가되는 것으로 예측되었다. 보통 접선성분의 진동수준은 근거리에서는 다른 성분에 비해 가장 작은 진동수준이 예측되었고, 거리가 멀어질수록 다른 성분에 비해 진동수준이 점차 커지는 것으로 예측되었으며, 수직성분의 진동수준은 접선성분의 진동수준 경향과 반대 현상이 예측되었다. 진행성분의 진동수준은 근거리에서는 수직성분의 진동수준보다 작고, 접선성분 진동수준보다 크게 예측되었다. 그리고 장약량에 따라 다르지만 일정거리에서는 가장 큰 진동수준이 예측되다가 원거리에서는 접선성분의 진동수준보다 작고, 수직성분 진동수준보다 크게 예측되었다.

3. 최대입자속도(PPV)와 최대백터합(PVS)의 평균 지반진동 예측식을 통한 5~200m의 이격거리에서 진동속도를 예측한 결과 장약량이 증가함에 따라 최대입자속도와 최대백터합의 진동수준이 역전되는 거리가 증가되지만 근거리에서는 지연시차가 25ms인 Case 2, 원거리에서는 지연시차가 20ms인 Case 1의 진동수준이 낮게 예측되었다.

4. 본 연구수행 결과 지연시차에 따른 접선성분, 수직성분, 진행성분 입자속도, 최대입자속도, 최대백터합의 진동특성을 규명하였고, 표준발파공법의 경계 장약량으로 지연시차 별 예측지반진동속도를 구하여 발파원과 보안물건 간의 거리에 따라 진동제어 측면에서 유리한 발파방법을 결정할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구는 기존에 상용화 되고 있는 뇌관의 지연시차를 이용하여 지반진동을 규명하였는데, 사용이 증가하고 있는 전자 뇌관 등의 지연시차 구현이 다양한 뇌관의 사용이 늘어남으로 다양한 기폭시차에 따른 지반진동에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- 강추원, 2009, 제2판 발파공학 A to Z, 구미서관.
- 두준기, 2000, 지발너관의 시차와 다단발파에 대한 고찰, 대한화약발파공학회지, Vol. 18. No. 4, pp. 29-41.
- 송영석, 이윤재, 민형동, Dave Kay, 2004, 석회석 광산에서 전자너관의 적용성에 관한 연구, 대한화약발파공학회지, Vol. 22, No. 2, pp. 1-11.
- 윤지선, 최성현, 배상훈, 2008, 연주식 발파공법 개발에 대한 기초적 연구(리듬감 부여에 관하여), 대한화약발파공학회지, Vol. 26, No. 1, pp. 39-48.
- Adams, T. F., Demuth, R. B., Margolin, L. G., and Nichols, B. D., 1983, Simulation of Rock Blasting with the Shale Code. Proceedings of the First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, pp. 361-373.
- Altas Power Company, 1987, Explosives and Rock Blasting, pp.157-201, 321-406.
- Ambraseys, N. R., and Hendron, A. J., 1968, Dynamic Behavior of Rock Masses, in Rock Mechanics in Engineering Practice, pp. 203-227.
- Archibald, J., 1976, Blasting Vibration Laboratory Manual. Kingston, Ontario, Canada: Queen's University, Mining Engineering Department.
- Ash, R. L., 1973, The Influence of Geological Discontinuities on Rock Blasting, Unpublished doctoral dissertation, University of Minnesota.
- Bicholls, H., Johnson, c., Duvall, W., 1971, Blasting Vibrations and Their Effects on Structures, Bulletin 656.
- Bollinger G. A., 1971, Blasting Vibration Analysis, pp. 58-88.
- Calvin J. Konya, and Edward J. Walter, 1990, Surface Blast Design, pp. 35-58.
- Devine, J. R., 1966, Avoiding Damage to Residences from Blasting Vibrations, Highway Research Record 135, pp. 35-44.
- Dowding C. H., 1984, Blast Vibration Monitoring and Control, Prentice Hall, pp. 7-40, 264-276.
- Dupont Co., 1977, Blaster' Hand Book, Technical Services Division, E.I. Dupont, pp. 494.
- Dupont Co., 1980, Blaster's Hand Book, 16th Edition, pp.423-446.

Duvall, W., Johnson, C., Meyer, A., and Devine, J., 1963, Vibrations from Instantaneous and Millisecond Delayed Blasts, RI 6151.

Johansson, C. H., and Persson, P. A., 1970, Detonics of High Explosives, New York, Academic Press.

Langefors U. and Kihlström B., 1978, The modern technique of Rock Blasting, Third edition, pp. 258–293.

McHugh, S., 1983, Computational Simulations of Dynamically Induced Fracture and Fragmentation, Proceedings of the First International Symposium on Rock by Blasting, pp. 407–418.

Obert, L., and Duvall, W. I., 1950, Generation and Propagation of Strain Waves in Rock, USBM, RI 4663.

Persson, P. A., Lundborg, N., and Johansson, C. H., 1970, The Basic Mechanism in Rock Blasting. Proceedings of the 2nd Congress of the International Society for Rock Mechanics, Belgrade.

# Appendix

(Measurement results)

< Blasting No. 1 >

No.	Ground vibration velocity (mm/sec)					Distance (m)	Weight (kg)
	T	V	L	PPV	PVS		
1	75.469	79.983	41.822	79.983	113.741	27	14
2	54.339	83.399	34.819	83.399	88.691	31	14
3	40.992	80.203	81.203	81.203	87.572	34	14
4	80.203	69.857	45.750	80.203	107.047	40	14
5	42.310	50.728	32.964	50.728	58.347	44	14
6	41.400	48.400	30.600	48.400	58.290	46	14
7	25.400	42.500	35.700	42.500	42.911	48	14
8	17.900	39.600	34.100	39.600	52.851	49	14
9	31.574	36.795	33.282	36.795	46.443	50	14
10	26.300	40.400	23.900	40.400	43.836	51	14
11	33.400	32.600	23.000	33.400	38.467	54	14
12	14.900	37.300	18.400	37.300	41.099	58	14
13	12.700	29.700	13.100	29.700	32.121	62	14
14	13.200	28.700	18.500	28.700	32.960	67	14
15	7.620	26.300	11.900	26.300	29.641	71	14
16	7.110	24.500	12.200	24.500	25.480	74	14
17	11.600	24.600	11.900	24.600	25.882	77	14
18	9.680	22.400	6.970	22.400	23.419	80	14
19	5.840	20.400	11.800	20.400	21.963	82	14
20	9.220	21.100	4.890	21.100	23.072	85	14
21	13.400	14.900	8.320	14.900	19.014	93	14
22	14.000	17.600	12.400	17.600	17.863	96	14
23	8.620	14.200	5.560	14.200	16.494	100	14
24	8.430	9.290	8.640	9.290	12.123	108	14
25	6.840	8.840	3.940	8.840	11.147	114	14
26	6.110	8.600	5.240	8.600	10.058	117	14
27	6.430	5.030	12.000	12.000	13.438	123	14
28	11.200	6.180	4.290	11.200	11.668	129	14
29	8.750	7.190	4.940	8.750	9.202	130	14
30	5.730	3.100	6.520	6.520	8.706	137	14
31	3.220	2.830	2.480	3.220	4.213	142	14
32	3.320	1.810	2.050	3.320	3.536	147	14
33	1.810	2.270	1.870	2.270	2.614	153	14
34	2.490	2.110	2.350	2.490	2.506	157	14

< Blasting No. 2 >

No.	Ground vibration velocity (mm/sec)					Distance (m)	Weight (kg)
	T	V	L	PPV	PVS		
1	12.810	31.915	18.886	31.915	37.925	35	14
2	6.588	21.716	5.197	21.716	22.211	39	14
3	8.613	12.737	14.738	14.738	17.466	43	14
4	8.174	11.712	7.027	11.712	14.139	50	14
5	4.416	9.662	5.612	9.662	10.413	55	14
6	6.027	6.027	6.149	6.149	9.814	58	14
7	5.940	2.510	2.600	5.940	6.081	61	14
8	3.110	1.860	4.870	4.870	5.564	65	14
9	2.980	2.000	4.600	4.600	5.246	67	14
10	2.290	2.410	4.320	4.320	5.399	69	14
11	1.670	2.710	4.210	4.210	4.949	72	14
12	3.330	3.910	3.870	3.910	6.304	75	14
13	2.940	2.050	3.510	3.510	4.020	79	14
14	1.520	1.840	3.830	3.830	3.835	82	14
15	2.160	2.590	2.560	2.590	3.831	86	14
16	3.290	1.210	2.830	3.290	3.509	89	14
17	2.520	1.430	2.410	2.520	3.167	94	14
18	2.140	2.210	2.600	2.600	2.859	100	14
19	1.480	1.050	2.760	2.760	2.800	102	14
20	1.240	0.905	2.750	2.750	2.777	106	14
21	0.762	1.560	2.380	2.380	2.502	110	14
22	0.825	1.250	1.840	1.840	1.917	114	14
23	1.110	1.670	1.140	1.670	1.767	118	14
24	1.730	1.100	0.667	1.730	1.752	123	14
25	0.841	0.810	1.510	1.510	1.517	129	14
26	1.000	1.000	1.320	1.320	1.738	135	14
27	0.667	1.220	1.030	1.220	1.583	141	14
28	1.160	0.587	0.921	1.160	1.450	149	14
29	1.080	0.857	0.698	1.080	1.399	153	14
30	0.889	1.060	0.762	1.060	1.191	159	14
31	0.492	0.444	0.683	0.683	0.799	164	14
32	0.365	0.460	0.603	0.603	0.686	169	14
33	0.365	0.413	0.492	0.492	0.547	175	14
34	0.429	0.444	0.286	0.444	0.562	180	14

< Blasting No. 3 >

No.	Ground vibration velocity (mm/sec)					Distance (m)	Weight (kg)
	T	V	L	PPV	PVS		
1	12.054	44.310	66.588	66.588	67.753	45	14
2	13.298	41.358	24.644	41.358	47.669	48	14
3	10.516	36.698	24.595	36.698	39.164	53	14
4	11.248	29.329	23.180	29.329	30.585	59	14
5	4.465	14.030	15.030	15.030	19.788	64	14
6	6.220	11.000	13.700	13.700	18.477	67	14
7	5.710	12.500	15.100	15.100	16.148	74	14
8	4.587	12.834	11.541	12.834	15.407	75	14
9	2.410	6.350	10.200	10.200	11.239	78	14
10	3.430	7.940	9.110	9.110	10.073	80	14
11	3.780	5.730	7.920	7.920	9.448	84	14
12	2.350	3.570	7.330	7.330	7.740	89	14
13	2.000	4.910	6.130	6.130	7.301	94	14
14	2.190	5.490	4.570	5.490	6.907	99	14
15	3.520	3.290	4.780	4.780	5.810	103	14
16	4.760	3.140	4.440	4.760	5.478	107	14
17	2.750	3.980	4.290	4.290	5.579	110	14
18	1.870	2.860	3.910	3.910	4.340	114	14
19	2.600	3.810	1.380	3.810	4.591	116	14
20	1.700	3.620	2.100	3.620	4.137	119	14
21	1.710	3.020	3.190	3.190	3.955	127	14
22	1.540	3.350	1.790	3.350	3.710	131	14
23	1.980	3.440	3.330	3.440	3.602	135	14
24	3.020	2.250	2.170	3.020	3.582	144	14
25	2.170	2.480	2.460	2.480	3.370	149	14
26	2.830	2.240	2.250	2.830	3.482	152	14
27	1.780	1.890	2.410	2.410	3.005	158	14
28	2.940	2.730	1.320	2.730	3.065	164	14
29	0.952	2.300	1.430	2.300	2.406	165	14
30	2.060	1.830	1.700	2.060	2.127	172	14
31	1.400	1.080	1.440	1.440	2.011	177	14
32	0.460	1.760	1.220	1.760	1.863	182	14
33	1.060	1.460	1.240	1.460	1.648	188	14
34	0.952	1.270	0.825	1.270	1.334	192	14



< Blasting No. 4 >

No.	Ground vibration velocity (mm/sec)					Distance (m)	Weight (kg)
	T	V	L	PPV	PVS		
1	5.734	9.345	12.176	12.176	12.900	48	14
2	11.900	3.620	7.240	11.900	12.509	51	14
3	3.140	5.400	9.380	9.380	10.337	54	14
4	3.940	2.330	9.520	9.520	9.725	57	14
5	4.856	8.467	4.709	8.467	9.639	61	14
6	3.684	7.808	7.808	7.808	8.832	66	14
7	6.246	7.222	4.099	7.222	8.197	69	14
8	5.320	2.790	7.000	7.000	8.006	72	14
9	5.380	3.570	2.680	5.380	6.458	77	14
10	4.600	3.210	5.450	5.450	5.679	80	14
11	4.100	2.490	4.710	4.710	5.945	86	14
12	3.001	4.538	4.124	4.538	5.145	90	14
13	1.870	3.920	3.890	3.920	5.457	94	14
14	1.910	3.180	2.970	3.180	4.701	99	14
15	2.240	3.330	3.440	3.440	4.555	104	14
16	2.890	2.020	3.100	3.100	4.483	108	14
17	2.620	2.400	3.250	3.250	4.364	113	14
18	2.830	3.270	3.196	3.270	4.127	117	14
19	3.030	2.330	3.000	3.030	3.959	122	14
20	2.950	2.590	2.210	2.950	3.848	127	14
21	1.320	2.830	3.490	3.490	3.518	133	14
22	3.020	1.940	1.520	3.020	3.377	139	14
23	1.650	0.889	2.540	2.540	2.878	143	14
24	2.100	2.000	1.790	2.100	2.752	150	14
25	1.240	1.160	1.380	1.38	1.662	157	14
26	1.300	1.700	2.190	2.190	2.548	162	14
27	1.910	1.520	1.910	1.910	2.351	167	14
28	1.650	1.520	1.910	1.910	2.332	174	14
29	1.220	0.873	1.890	1.890	2.127	176	14
30	1.860	1.220	1.730	1.860	2.651	182	14
31	1.520	1.780	1.780	1.780	2.082	187	14
32	1.270	1.780	1.270	1.780	1.890	192	14
33	1.380	1.100	1.700	1.700	1.983	198	14
34	1.350	1.140	1.570	1.570	1.678	202	14

< Blasting No. 5 >

No.	Ground vibration velocity (mm/sec)					Distance (m)	Weight (kg)
	T	V	L	PPV	PVS		
1	5.100	11.492	19.496	19.496	19.649	50	14
2	5.246	12.298	7.222	12.298	12.363	53	14
3	7.637	10.248	7.857	10.248	12.790	57	14
4	8.442	7.784	6.100	8.442	9.502	63	14
5	4.099	5.246	4.172	5.246	6.804	68	14
6	5.173	4.880	3.440	5.173	5.467	71	14
7	2.510	4.020	4.430	4.430	5.457	78	14
8	2.540	3.810	4.270	4.270	5.758	80	14
9	1.830	3.460	2.410	3.460	4.288	84	14
10	2.540	2.540	3.300	3.300	3.860	87	14
11	2.060	3.590	2.440	3.590	3.727	92	14
12	2.590	3.160	2.670	3.160	3.837	97	14
13	2.670	2.670	2.250	2.670	3.578	102	14
14	3.180	1.650	2.410	3.180	3.554	108	14
15	1.730	2.970	2.400	2.970	3.489	111	14
16	1.640	2.700	2.050	2.700	3.259	117	14
17	2.030	1.910	2.030	2.030	3.119	119	14
18	2.400	1.810	1.920	2.400	2.832	123	14
19	2.320	1.350	2.410	2.410	2.740	125	14
20	1.350	2.160	1.670	2.160	2.678	130	14
21	2.410	1.140	1.650	2.410	2.669	137	14
22	1.540	1.830	2.300	2.300	2.378	142	14
23	1.840	2.300	1.210	2.300	2.432	146	14
24	1.920	1.060	2.130	2.130	2.648	155	14
25	2.030	1.910	1.650	2.030	2.471	161	14
26	2.030	1.400	1.440	2.030	2.372	164	14
27	1.540	1.300	1.890	1.890	2.245	170	14
28	1.860	0.968	0.778	1.860	1.926	175	14
29	1.780	1.130	1.400	1.780	2.064	177	14
30	1.430	1.650	1.300	1.650	2.113	184	14
31	1.100	1.250	1.540	1.540	1.928	189	14
32	1.590	1.210	1.430	1.590	1.885	194	14
33	1.030	1.480	1.080	1.480	1.850	200	14
34	1.030	0.794	1.050	1.050	1.420	204	14

< Blasting No. 6 >

No.	Ground vibration velocity (mm/sec)					Distance (m)	Weight (kg)
	T	V	L	PPV	PVS		
1	8.833	15.982	17.251	17.251	22.557	55	14
2	5.490	12.517	8.174	12.517	14.494	60	14
3	6.027	12.493	6.978	12.493	14.305	65	14
4	9.980	9.077	6.661	9.980	13.023	68	14
5	5.612	4.319	3.440	5.612	5.839	72	14
6	2.680	3.430	5.130	5.130	5.156	75	14
7	5.124	3.343	3.733	5.124	5.398	80	14
8	1.520	3.050	3.670	3.670	4.832	85	14
9	3.050	2.290	1.520	3.050	3.302	90	14
10	2.570	2.510	3.080	3.080	3.914	92	14
11	1.780	2.160	2.920	2.920	3.410	97	14
12	2.170	1.490	2.700	2.700	2.766	103	14
13	2.710	1.380	1.210	2.710	2.778	107	14
14	2.620	1.210	2.050	2.620	3.147	113	14
15	2.030	1.520	2.540	2.540	3.120	117	14
16	2.620	2.170	2.670	2.670	2.797	122	14
17	2.000	1.620	1.700	2.000	2.662	125	14
18	2.290	1.270	1.270	2.290	2.622	129	14
19	1.940	1.380	1.870	1.940	2.517	131	14
20	1.400	1.910	1.910	1.910	2.460	135	14
21	2.160	0.762	1.600	2.160	2.454	143	14
22	2.050	1.240	1.510	2.050	2.370	148	14
23	1.680	1.350	1.680	1.680	2.388	152	14
24	1.510	1.370	1.350	1.510	1.975	161	14
25	0.889	1.830	0.857	1.830	1.943	167	14
26	1.520	1.170	1.130	1.520	1.902	170	14
27	0.841	1.650	0.667	1.650	1.880	176	14
28	1.780	0.937	0.937	1.780	1.850	182	14
29	1.400	1.270	1.560	1.560	1.649	184	14
30	1.430	1.350	1.100	1.430	1.817	190	14
31	1.400	1.100	1.110	1.400	1.469	195	14
32	0.857	0.714	1.300	1.300	1.425	200	14
33	1.080	0.778	0.841	1.080	1.135	206	14
34	0.921	0.905	1.000	1.000	1.294	210	14

< Blasting No. 7 >

No.	Ground vibration velocity (mm/sec)					Distance (m)	Weight (kg)
	T	V	L	PPV	PVS		
1	57.633	84.961	64.074	84.961	85.897	25	14
2	49.215	81.960	40.894	81.96	88.553	28	14
3	40.968	80.984	30.598	80.984	82.499	32	14
4	31.793	66.758	24.790	66.758	69.964	39	14
5	8.369	27.743	14.982	27.743	30.009	44	14
6	11.566	27.523	11.102	27.523	28.961	46	14
7	9.020	21.600	12.600	21.600	23.313	49	14
8	10.800	21.000	12.700	21.000	23.251	50	14
9	9.700	12.400	12.400	12.400	20.040	51	14
10	7.490	14.100	14.900	14.900	19.757	52	14
11	7.620	14.200	11.900	14.200	17.207	55	14
12	4.700	8.130	11.800	11.800	13.891	60	14
13	7.030	7.100	11.000	11.000	11.307	64	14
14	7.380	5.100	11.000	11.000	11.251	69	14
15	4.700	4.570	9.650	9.650	9.711	74	14
16	3.430	4.320	7.110	7.110	7.937	78	14
17	5.080	4.190	7.620	7.620	8.124	80	14
18	4.450	3.810	6.990	6.990	7.625	82	14
19	8.890	10.400	3.490	10.400	12.373	86	14
20	7.640	4.840	5.110	7.640	8.127	97	14
21	6.240	3.620	10.000	10.000	10.296	97	14
22	6.700	3.020	5.780	6.700	7.669	100	14
23	7.000	3.510	4.370	7.000	7.407	103	14
24	6.190	3.350	5.560	6.190	8.392	114	14
25	5.590	2.970	5.430	5.590	6.251	120	14
26	2.520	3.350	4.570	4.570	4.732	123	14
27	5.020	4.890	3.840	5.020	6.275	129	14
28	3.790	2.750	2.300	3.790	4.227	134	14
29	3.940	2.560	2.560	3.940	4.614	136	14
30	3.030	4.890	2.830	4.890	4.968	142	14
31	3.670	2.330	3.640	3.670	5.101	148	14
32	2.440	2.780	3.790	3.790	4.324	152	14
33	2.520	1.030	2.620	2.620	3.620	158	14
34	1.970	1.680	2.910	2.910	3.006	163	14

< Blasting No. 8 >

No.	Ground vibration velocity (mm/sec)					Distance (m)	Weight (kg)
	T	V	L	PPV	PVS		
1	8.906	19.569	30.646	30.646	31.610	39	14
2	8.174	16.006	8.174	16.006	19.215	43	14
3	6.930	11.736	9.760	11.736	14.168	48	14
4	5.100	7.808	8.638	8.638	11.309	54	14
5	3.538	4.758	5.954	5.954	7.136	59	14
6	4.197	5.490	5.392	5.490	7.556	62	14
7	4.450	4.330	4.850	4.850	7.008	65	14
8	2.830	3.020	3.710	3.710	4.904	68	14
9	4.100	2.370	3.020	4.100	4.794	71	14
10	3.430	2.540	3.560	3.560	4.378	74	14
11	2.190	3.160	3.860	3.860	4.360	77	14
12	3.890	2.870	2.020	3.890	4.295	82	14
13	3.780	3.080	2.480	3.780	4.159	87	14
14	2.790	2.840	2.950	2.950	3.842	92	14
15	2.760	3.570	1.870	3.570	3.795	96	14
16	2.700	2.300	2.620	2.700	3.631	100	14
17	2.590	2.620	3.140	3.140	3.438	103	14
18	1.890	2.700	1.290	2.700	2.984	105	14
19	2.460	2.590	1.670	2.590	2.750	108	14
20	1.760	1.350	2.220	2.220	2.502	112	14
21	1.220	2.030	2.170	2.170	2.355	119	14
22	2.160	2.160	1.980	2.160	3.058	123	14
23	2.110	1.540	1.400	2.110	2.557	127	14
24	2.050	1.320	2.000	2.050	2.396	136	14
25	1.560	1.350	2.000	2.000	2.610	142	14
26	1.700	1.970	1.320	1.970	2.260	145	14
27	1.430	0.937	1.840	1.840	1.871	151	14
28	1.830	1.670	1.320	1.830	2.469	156	14
29	1.330	1.700	1.680	1.700	2.240	158	14
30	1.380	1.290	0.857	1.380	1.584	164	14
31	0.905	0.714	1.210	1.210	1.266	169	14
32	1.190	0.746	0.619	1.190	1.239	174	14
33	0.556	1.080	0.683	1.080	1.086	180	14
34	0.921	0.825	0.698	0.921	1.225	185	14

< Blasting No. 9 >

No.	Ground vibration velocity (mm/sec)					Distance (m)	Weight (kg)
	T	V	L	PPV	PVS		
1	39.650	62.415	81.642	81.642	89.488	43	14
2	15.592	43.530	24.229	43.530	51.094	50	14
3	16.665	35.282	34.184	35.282	48.568	53	14
4	12.639	29.768	27.596	29.768	40.460	59	14
5	6.344	17.983	12.786	17.983	20.150	54	14
6	4.810	15.400	16.600	16.600	17.096	58	14
7	6.393	15.396	15.250	15.396	21.380	72	14
8	6.600	13.700	14.100	14.100	20.369	74	14
9	3.780	8.480	10.100	10.100	11.166	77	14
10	3.300	8.130	10.200	10.200	11.382	80	14
11	3.790	6.670	7.790	7.790	10.292	84	14
12	4.350	5.080	8.590	8.590	9.151	89	14
13	2.710	6.240	8.480	8.480	8.599	94	14
14	2.790	5.760	6.000	6.000	8.654	100	14
15	6.400	4.380	4.570	6.400	7.273	103	14
16	2.790	3.600	5.570	5.570	6.712	108	14
17	2.980	3.980	6.300	6.300	6.392	111	14
18	2.270	3.350	5.790	5.790	6.141	114	14
19	2.350	3.080	4.980	4.980	5.733	116	14
20	4.670	2.910	4.810	4.810	5.009	120	14
21	3.490	2.140	3.170	3.490	4.026	128	14
22	3.620	2.270	1.600	3.620	3.882	133	14
23	3.780	2.640	2.570	3.780	3.809	137	14
24	3.270	2.250	3.050	3.270	3.745	145	14
25	3.480	2.170	2.730	3.480	3.686	151	14
26	2.840	3.060	3.060	3.060	3.592	154	14
27	2.410	2.980	2.290	2.980	3.617	160	14
28	2.510	1.400	2.460	2.510	2.874	165	14
29	2.270	1.790	2.020	2.270	3.252	170	14
30	1.020	1.460	2.080	2.080	2.115	173	14
31	2.050	1.680	1.810	2.050	2.596	178	14
32	1.160	1.140	1.700	1.700	2.210	183	14
33	1.240	0.968	1.440	1.440	1.671	189	14
34	1.210	1.140	1.290	1.290	1.641	194	14

< Blasting No. 10 >

No.	Ground vibration velocity (mm/sec)					Distance (m)	Weight (kg)
	T	V	L	PPV	PVS		
1	76.006	71.516	63.586	76.006	99.087	46	14
2	18.910	57.779	32.794	57.779	59.922	50	14
3	35.868	40.236	38.235	40.236	55.028	56	14
4	32.720	35.429	40.187	40.187	56.030	58	14
5	17.031	24.034	30.085	30.085	36.968	64	14
6	6.030	26.800	12.700	26.800	29.901	70	14
7	8.250	26.200	23.400	26.200	27.939	73	14
8	18.129	22.302	22.619	22.619	28.851	75	14
9	6.350	16.500	14.400	16.500	18.010	80	14
10	4.060	13.200	15.400	15.400	19.245	83	14
11	5.780	8.320	15.400	15.400	16.454	87	14
12	7.290	13.700	15.200	15.200	19.578	92	14
13	6.110	7.460	14.700	14.700	15.716	97	14
14	3.940	13.000	10.000	13.000	14.238	103	14
15	12.300	5.980	6.790	12.300	13.502	106	14
16	12.000	5.970	8.950	12.000	12.389	111	14
17	6.220	6.650	11.600	11.600	11.689	114	14
18	9.490	4.620	3.870	9.490	10.094	118	14
19	5.590	6.600	8.130	8.130	9.621	120	14
20	5.160	5.540	7.480	7.480	9.574	124	14
21	7.030	6.210	2.080	7.030	9.255	131	14
22	5.350	6.990	6.870	6.990	8.753	136	14
23	4.680	7.000	3.730	7.000	8.485	140	14
24	5.190	6.180	3.620	6.180	8.414	149	14
25	5.640	5.460	5.350	5.640	8.202	155	14
26	6.910	5.250	2.830	6.910	7.964	158	14
27	5.350	4.410	5.910	5.910	7.915	164	14
28	5.190	3.160	3.220	5.190	6.573	169	14
29	3.940	5.350	1.050	5.350	5.454	171	14
30	4.100	2.270	3.170	4.100	4.844	177	14
31	2.460	1.640	1.780	2.460	2.507	183	14
32	2.350	1.760	1.750	2.350	2.440	187	14
33	1.250	1.460	1.460	1.460	1.577	193	14
34	1.240	1.320	0.968	1.320	1.481	198	14

< Blasting No. 11 >

No.	Ground vibration velocity (mm/sec)					Distance (m)	Weight (kg)
	T	V	L	PPV	PVS		
1	16.641	19.447	19.447	19.447	27.172	61	14
2	7.784	14.835	10.931	14.835	17.331	65	14
3	12.688	13.030	9.492	13.030	18.296	68	14
4	12.932	10.321	12.078	12.932	15.831	73	14
5	11.224	7.686	7.320	11.224	12.123	77	14
6	10.614	6.783	6.710	10.614	10.973	83	14
7	3.320	6.020	7.780	7.780	7.870	88	14
8	6.210	2.490	4.490	6.210	7.220	91	14
9	4.490	3.680	7.180	7.180	7.295	95	14
10	4.350	2.540	6.940	6.940	6.998	99	14
11	3.760	5.720	4.450	5.720	7.375	104	14
12	3.620	3.540	4.050	4.050	5.424	109	14
13	3.920	2.650	4.290	4.290	5.034	114	14
14	3.680	4.440	4.190	4.440	4.926	119	14
15	4.520	2.490	4.460	4.520	4.862	123	14
16	3.130	3.570	4.130	4.130	4.703	127	14
17	3.030	3.460	4.000	4.000	4.501	131	14
18	3.790	2.840	1.620	3.790	4.463	135	14
19	3.350	2.320	3.760	3.760	4.214	138	14
20	2.560	1.940	3.750	3.750	4.202	141	14
21	3.540	1.940	1.160	3.540	3.618	147	14
22	3.110	2.460	2.510	3.110	4.273	153	14
23	2.100	3.220	2.760	3.220	3.879	158	14
24	2.520	2.430	3.330	3.330	3.648	164	14
25	2.560	1.700	3.170	3.170	3.224	170	14
26	3.060	1.840	2.590	3.060	3.278	176	14
27	3.050	2.080	1.980	3.050	3.251	181	14
28	2.560	1.480	2.140	2.560	3.198	189	14
29	2.110	0.968	1.840	2.110	2.197	193	14
30	1.840	1.980	1.600	1.980	2.248	198	14
31	0.968	0.810	1.380	1.380	1.391	203	14
32	0.698	0.619	0.857	0.857	1.059	207	14
33	0.444	0.508	0.714	0.714	0.838	213	14
34	0.683	0.524	0.651	0.683	0.900	218	14



< Blasting No. 12 >

No.	Ground vibration velocity (mm/sec)					Distance (m)	Weight (kg)
	T	V	L	PPV	PVS		
1	4.904	6.490	11.663	11.663	12.567	66	14
2	4.319	7.027	5.490	7.027	7.780	71	14
3	4.758	4.392	5.319	5.319	6.093	74	14
4	5.148	2.611	3.416	5.148	5.406	79	14
5	3.977	2.220	4.563	4.563	5.676	84	14
6	1.620	2.000	4.680	4.680	5.218	88	14
7	2.080	1.570	4.870	4.870	5.063	92	14
8	4.197	2.147	3.562	4.197	4.520	95	14
9	3.320	1.560	3.160	3.320	3.816	100	14
10	2.780	1.480	2.160	2.780	3.472	104	14
11	1.970	2.710	1.680	2.710	3.437	108	14
12	1.160	1.980	2.380	2.380	3.133	114	14
13	1.600	1.700	2.110	2.110	2.535	118	14
14	1.840	1.380	1.940	1.940	2.991	125	14
15	1.700	1.250	1.840	1.840	2.473	128	14
16	1.650	1.170	1.050	1.650	2.251	134	14
17	1.080	1.650	1.030	1.650	1.949	137	14
18	1.250	1.590	1.060	1.590	1.908	140	14
19	1.030	1.700	1.400	1.700	1.891	143	14
20	1.320	1.640	0.889	1.640	1.824	148	14
21	1.640	0.921	1.410	1.640	1.789	155	14
22	1.480	1.080	1.100	1.480	1.739	160	14
23	1.270	1.020	1.020	1.270	1.709	164	14
24	1.490	1.270	1.000	1.490	1.670	173	14
25	1.130	0.762	0.968	1.130	1.579	179	14
26	0.984	0.984	1.330	1.330	1.556	182	14
27	0.873	1.330	0.825	1.330	1.452	188	14
28	1.380	1.110	1.110	1.380	1.390	194	14
29	0.619	0.508	1.130	1.130	1.358	196	14
30	0.841	1.020	0.873	1.020	1.277	202	14
31	0.921	1.130	0.714	1.130	1.263	208	14
32	1.100	0.413	0.619	1.100	1.159	212	14
33	0.762	0.730	0.937	0.937	1.077	218	14
34	0.619	0.714	0.730	0.730	0.982	222	14

< Blasting No. 13 >

No.	Ground vibration velocity (mm/sec)					Distance (m)	Weight (kg)
	T	V	L	PPV	PVS		
1	34.819	65.978	50.898	65.978	67.221	23	14
2	24.644	34.770	22.204	34.770	41.007	28	14
3	14.054	32.598	18.739	32.598	33.018	30	14
4	16.397	30.842	15.543	30.842	32.615	35	14
5	9.492	19.764	7.832	19.764	22.759	42	14
6	6.393	13.469	4.978	13.469	14.956	45	14
7	5.050	13.700	8.250	13.700	14.018	50	14
8	3.430	10.300	7.630	10.300	12.828	51	14
9	4.590	5.830	6.430	6.430	8.848	53	14
10	4.320	8.000	6.220	8.000	9.117	55	14
11	2.160	5.970	6.100	6.100	7.735	65	14
12	4.600	5.940	7.810	7.810	8.013	64	14
13	3.590	2.480	5.180	5.180	5.293	68	14
14	3.560	3.300	3.560	3.560	4.408	73	14
15	3.970	4.650	2.890	4.650	4.822	77	14
16	4.320	1.910	4.570	4.570	4.933	81	14
17	3.160	2.620	2.540	3.160	3.681	86	14
18	2.540	1.910	2.920	2.920	3.116	88	14
19	1.780	1.910	2.540	2.540	3.074	90	14
20	2.410	1.650	2.920	2.920	3.422	95	14
21	2.380	2.680	2.840	2.840	3.977	101	14
22	2.570	1.320	2.730	2.730	3.052	105	14
23	2.940	1.400	1.410	2.940	3.039	109	14
24	2.640	1.080	0.873	2.640	2.801	118	14
25	2.540	2.670	2.000	2.670	3.107	124	14
26	2.460	1.430	1.140	2.460	2.714	127	14
27	2.600	3.160	1.750	3.160	3.619	133	14
28	1.860	1.460	2.080	2.080	2.231	138	14
29	1.870	2.020	2.030	2.030	3.238	140	14
30	2.640	2.210	2.100	2.640	3.152	148	14
31	2.170	1.510	1.710	2.170	2.374	152	14
32	2.140	1.490	2.020	2.140	2.556	157	14
33	1.920	1.790	1.700	1.920	2.057	163	14
34	1.750	0.937	0.921	1.750	1.827	167	14

< Blasting No. 14 >

No.	Ground vibration velocity (mm/sec)					Distance (m)	Weight (kg)
	T	V	L	PPV	PVS		
1	0.976	2.416	1.293	2.416	2.576	58	6.4
2	1.330	0.667	1.670	1.670	2.150	61	6.4
3	0.921	0.921	1.620	1.620	1.770	64	6.4
4	1.560	0.651	0.683	1.560	1.622	68	6.4
5	1.460	1.510	1.190	1.510	2.234	72	6.4
6	1.440	0.619	0.968	1.440	1.705	77	6.4
7	0.635	1.170	1.400	1.400	1.678	81	6.4
8	0.635	0.444	1.380	1.380	1.467	85	6.4
9	1.342	0.805	0.878	1.342	1.749	89	6.4
10	1.080	0.683	1.140	1.140	1.486	93	6.4
11	1.020	1.050	0.873	1.050	1.453	98	6.4
12	1.330	0.683	1.110	1.330	1.342	102	6.4
13	1.240	0.460	0.698	1.240	1.247	105	6.4
14	1.190	0.349	0.762	1.190	1.203	109	6.4
15	0.651	0.508	1.030	1.030	1.192	114	6.4
16	1.030	0.762	0.889	1.030	1.161	117	6.4
17	0.781	0.439	1.025	1.025	1.037	120	6.4
18	0.586	0.659	0.634	0.659	0.929	128	6.4
19	0.429	0.556	0.778	0.778	0.906	131	6.4
20	0.667	0.460	0.556	0.667	0.815	136	6.4
21	0.254	0.635	0.635	0.635	0.898	141	6.4
22	0.492	0.603	0.397	0.603	0.780	145	6.4
23	0.610	0.244	0.512	0.610	0.715	151	6.4
24	0.512	0.415	0.366	0.512	0.634	160	6.4
25	0.444	0.397	0.365	0.444	0.642	166	6.4
26	0.254	0.381	0.508	0.508	0.635	172	6.4
27	0.429	0.508	0.508	0.508	0.604	179	6.4
28	0.381	0.254	0.254	0.381	0.475	185	6.4
29	0.381	0.254	0.254	0.381	0.475	189	6.4
30	0.381	0.349	0.349	0.381	0.472	194	6.4
31	0.381	0.254	0.254	0.381	0.402	199	6.4
32	0.127	0.286	0.206	0.286	0.353	204	6.4
33	0.254	0.127	0.127	0.254	0.311	210	6.4
34	0.159	0.191	0.190	0.191	0.197	214	6.4

< Blasting No. 15 >

No.	Ground vibration velocity (mm/sec)					Distance (m)	Weight (kg)
	T	V	L	PPV	PVS		
1	3.928	17.788	4.416	17.788	18.348	25	6.4
2	4.343	1.391	2.147	4.343	4.623	31	6.4
3	1.330	3.710	2.710	3.710	4.292	34	6.4
4	1.560	1.490	2.840	2.840	3.160	38	6.4
5	2.680	1.900	1.860	2.680	3.266	45	6.4
6	2.510	0.810	1.480	2.510	2.557	48	6.4
7	1.952	1.562	2.440	2.440	3.142	51	6.4
8	2.270	1.250	1.030	2.270	2.320	55	6.4
9	2.160	0.794	1.840	2.160	2.891	59	6.4
10	1.160	1.290	2.020	2.020	2.267	61	6.4
11	2.130	1.020	1.080	2.130	2.151	59	6.4
12	1.380	1.460	1.640	1.640	2.260	70	6.4
13	1.980	0.841	1.370	1.980	2.123	75	6.4
14	1.586	1.025	1.854	1.854	2.052	80	6.4
15	1.100	1.440	1.460	1.460	1.909	84	6.4
16	1.710	0.794	0.746	1.710	1.830	89	6.4
17	1.300	1.460	0.730	1.460	1.601	91	6.4
18	1.240	1.080	0.714	1.240	1.551	95	6.4
19	1.171	0.683	0.634	1.171	1.354	97	6.4
20	1.320	0.476	1.020	1.320	1.340	102	6.4
21	0.635	1.020	0.683	1.020	1.285	109	6.4
22	0.708	0.683	1.171	1.171	1.228	113	6.4
23	0.460	1.130	0.683	1.130	1.211	117	6.4
24	0.444	0.778	0.746	0.778	1.093	126	6.4
25	0.778	0.762	0.762	0.778	1.098	132	6.4
26	0.381	0.381	0.762	0.762	0.889	135	6.4
27	0.381	0.381	0.635	0.635	0.696	141	6.4
28	0.635	0.381	0.381	0.635	0.660	146	6.4
29	0.381	0.635	0.254	0.635	0.648	148	6.4
30	0.254	0.333	0.587	0.587	0.630	154	6.4
31	0.508	0.254	0.254	0.508	0.568	160	6.4
32	0.397	0.444	0.413	0.444	0.536	164	6.4
33	0.381	0.254	0.381	0.381	0.421	170	6.4
34	0.254	0.254	0.254	0.254	0.381	175	6.4

< Blasting No. 16 >

No.	Ground vibration velocity (mm/sec)					Distance (m)	Weight (kg)
	T	V	L	PPV	PVS		
1	1.244	3.050	1.147	3.05	3.219	70	6.4
2	1.620	2.220	0.683	2.220	2.309	75	6.4
3	1.640	1.370	0.778	1.640	2.012	78	6.4
4	1.840	1.290	1.050	1.840	1.993	82	6.4
5	1.780	0.524	0.619	1.780	1.888	85	6.4
6	1.320	1.270	0.587	1.320	1.798	89	6.4
7	1.440	1.210	0.841	1.440	1.669	96	6.4
8	1.440	0.905	0.762	1.440	1.623	99	6.4
9	0.873	1.380	1.020	1.380	1.550	103	6.4
10	1.240	0.730	1.020	1.240	1.577	107	6.4
11	0.732	1.220	0.439	1.22	1.436	112	6.4
12	1.210	0.825	1.020	1.210	1.404	118	6.4
13	1.196	0.781	0.781	1.196	1.481	122	6.4
14	1.020	0.667	1.170	1.170	1.339	129	6.4
15	0.968	1.060	0.968	1.060	1.417	132	6.4
16	0.825	1.060	0.635	1.060	1.159	140	6.4
17	1.020	0.381	0.413	1.020	1.052	140	6.4
18	0.921	0.667	0.794	0.921	1.067	144	6.4
19	0.810	0.841	0.603	0.841	1.113	147	6.4
20	0.794	0.635	0.603	0.794	0.972	151	6.4
21	0.732	0.805	0.610	0.805	0.920	159	6.4
22	0.397	0.540	0.746	0.746	0.844	164	6.4
23	0.830	0.366	0.488	0.830	0.841	168	6.4
24	0.508	0.492	0.254	0.508	0.657	177	6.4
25	0.413	0.429	0.444	0.444	0.580	183	6.4
26	0.365	0.429	0.365	0.429	0.579	186	6.4
27	0.390	0.342	0.342	0.390	0.513	192	6.4
28	0.254	0.381	0.381	0.381	0.442	198	6.4
29	0.206	0.349	0.191	0.349	0.362	200	6.4
30	0.333	0.206	0.302	0.333	0.390	206	6.4
31	0.159	0.333	0.254	0.333	0.335	212	6.4
32	0.254	0.127	0.254	0.254	0.311	216	6.4
33	0.159	0.222	0.191	0.222	0.317	222	6.4
34	0.159	0.222	0.206	0.222	0.310	227	6.4