

2011년 2월
박사학위 논문

발파공내 기폭위치가 지반진동에 미치는 영향

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

김 재 응

발파공내 기폭위치가 지반진동에 미치는 영향

Influence of priming location on the ground vibration

2011년 2월 25일

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

김 재 응

발파공내 기폭위치가 지반진동에
미치는 영향

지도교수 강 추 원

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함

2010년 10월

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

김 재 응

김재웅의 박사학위 논문을 인준함

위원장	한국지질자원연구원	류 창 하	인
위 원	원앤비기술사사무소	원 연 호	인
위 원	군산대학교 교수	이 연 규	인
위 원	조선대학교 교수	고 진 석	인
위 원	조선대학교 교수	강 추 원	인

2010년 12월

조선대학교 대학원

< 목 차 >

List of Tables	iv
List of Figures	vi
Abstract	ix
1. 서론	1
2. 이론적 배경	6
2.1 발파진동 이론	6
2.1.1 진동의 정의	6
2.1.2 진동의 물리적인 크기	11
2.1.3 지반진동의 특징	13
2.1.4 진동량의 표현	14
2.2 발파에 의한 암석파쇄이론	15
2.2.1 Crater	15
2.2.2 기체팽창	15
2.2.3 반사파	16
2.2.4 충격파와 가스압	17
2.3 파동의 전파 이론	18
2.4 발파진동의 발생과 전파	20
2.4.1 발파진동의 발생	20
2.4.2 발파진동의 일반적인 특성	23

2.4.3	발파진동의 전파특성	26
2.4.4	발파진동의 예측방법	28
2.5	기폭방법	31
2.5.1	정기폭	33
2.5.2	역기폭	33
2.5.3	중간기폭	34
3.	현장실험	35
3.1	대상현장의 지형 및 지질	35
3.1.1	연구지역 I, II	35
3.1.2	연구지역 III	35
3.2	실내물성실험	39
3.2.1	실내물성실험의 종류	39
3.2.2	실내물성실험에 의한 결과분석	39
3.3	현장실험개요	42
3.4	현장실험 방법 및 결과	42
3.4.1	실험 방법	42
3.4.2	현장실험의 계측	45
3.4.3	현장실험 계측 결과	49
4.	분석	50
4.1	정기폭에서 성분별(T, V, L) 회귀분석 및 예측	50
4.2	중간기폭에서 성분별(T, V, L) 회귀분석 및 예측	53
4.3	역기폭에서 성분별(T, V, L) 회귀분석 및 예측	56

4.4 기폭위치에 따른 최대입자속도(PPV)의 회귀분석 및 예측	59
4.5 기폭위치에 따른 최대벡터합(PVS)의 회귀분석 및 예측	62
5. 고찰	65
5.1 기폭위치에 따른 성분별(T, V, L) 입자속도의 진동특성 고찰	65
5.1.1 정기폭에서 성분별(T, V, L) 입자속도	66
5.1.2 중간기폭에서 성분별(T, V, L) 입자속도	74
5.1.3 역기폭에서 성분별(T, V, L) 입자속도	81
5.2 기폭위치에 따른 최대입자속도(PPV)와 최대벡터합(PVS)의 진동특성 고찰	88
5.2.1 기폭위치에 따른 최대입자속도(PPV)	88
5.2.2 기폭위치에 따른 최대벡터합(PVS)	96
5.3 표준발파공법에서 기폭위치 적용	103
6. 결론	105
참 고 문 헌	108
Appendix	112

<List of Tables>

Table 2.1	Vibration unit	14
Table 2.2	The shock wave value of total energy	17
Table 2.3	Comparison of blasting vibration and earthquake	26
Table 2.4	Parameters which influence ground motion	27
Table 2.5	Variable considered in a dimensional analysis of explosion phenomena	29
Table 3.1	Results of rock property test	41
Table 3.2	Experimental conditions	43
Table 4.1	Prediction equation of blasting vibration for component (T, V, L) velocity of top priming	51
Table 4.2	Prediction equation of blasting vibration for component (T, V, L) velocity of middle priming	54
Table 4.3	Prediction equation of blasting vibration for component (T, V, L) velocity of bottom priming	57
Table 4.4	Prediction equation of blasting vibration for peak particle velocity (PPV) of different priming locations	60
Table 4.5	Prediction equation of blasting vibration for peak vector sum (PVS) of different priming locations	63
Table 5.1	The influence of charge per delay on the predicted ground vibration velocity for top priming	69
Table 5.2	Maximum percentage of attenuation on rate of velocity components for top priming	71

Table 5.3 The influence of charge per delay on the predicted ground vibration velocity for middle priming	76
Table 5.4 Maximum percentage of attenuation on rate of velocity components for middle priming	78
Table 5.5 The influence of charge per delay on the predicted ground vibration velocity for bottom priming	83
Table 5.6 Maximum percentage of attenuation on rate of velocity components for bottom priming	85
Table 5.7 The influence of charge per delay on the predicted ground vibration velocity for different priming locations(PPV)	91
Table 5.8 Maximum percentage of attenuation on rate of velocity components for different priming location(PPV)	93
Table 5.9 The influence of charge per delay on the predicted ground vibration velocity for different priming locations(PVS)	98
Table 5.10 Maximum percentage of attenuation on rate of velocity components for different priming location(PVS)	100

<List of Figures>

Figure 2.1 Harmonic oscillation	10
Figure 2.2 The size of sine wave vibration	10
Figure 2.3 Body wave and Rayleigh wave	19
Figure 2.4 Vertical displacement component of P wave, S wave and Rayleigh wave in a short duration period	19
Figure 2.5 Advancing detonation in blast hole produces shot period detonation pressure and long period explosion pressure	22
Figure 2.6 Schematic of the fracturing and deformation around an explosion in rock	23
Figure 2.7 Measuring direction of ground vibration	24
Figure 2.8 Position of primer	32
Figure 3.1 Site map of study area	37
Figure 3.2 Geology genealogy of study area	38
Figure 3.3 Blasting pattern	44
Figure 3.4 Measurements of study area I	46
Figure 3.5 Measurements of study area II	47
Figure 3.6 Measurements of study area III	48
Figure 4.1 Relationship between T, V, L component velocity and square root scaled distance of top priming	52
Figure 4.2 Relationship between T, V, L component velocity and cube root scaled distance of top priming	52

Figure 4.3 Relationship between T, V, L component velocity and square root scaled distance of middle priming	55
Figure 4.4 Relationship between T, V, L component velocity and cube root scaled distance of middle priming	55
Figure 4.5 Relationship between T, V, L component velocity and square root scaled distance of bottom priming	58
Figure 4.6 Relationship between T, V, L component velocity and cube root scaled distance of bottom priming	58
Figure 4.7 Relationship between peak particle velocity(PPV) and square root scaled distance of different priming locations	61
Figure 4.8 Relationship between peak particle velocity(PPV) and cube root scaled distance of different priming locations	61
Figure 4.9 Relationship between peak vector sum(PVS) and square root scaled distance of different priming locations	64
Figure 4.10 Relationship between peak vector sum(PVS) and cube root scaled distance of different priming locations	64
Figure 5.1 Relationship between predicted ground vibration velocity and distance for top priming	72
Figure 5.2 Relationship between percentage of attenuation and distance for top priming	73
Figure 5.3 Relationship between predicted ground vibration velocity and distance for middle priming	79
Figure 5.4 Relationship between percentage of attenuation and distance for middle priming	80

Figure 5.5 Relationship between predicted ground vibration velocity and distance for bottom priming	86
Figure 5.6 Relationship between percentage of attenuation and distance for bottom priming	87
Figure 5.7 Relationship between predicted ground vibration velocity and distance for different priming locations(PPV)	94
Figure 5.8 Relationship between percentage of attenuation and distance for different priming locations(PPV)	95
Figure 5.9 Relationship between predicted ground vibration velocity and distance for different priming locations(PVS)	101
Figure 5.10 Relationship between percentage of attenuation and distance for different priming locations(PVS)	102
Figure 5.11 Relationship between charge per delay and monitoring distance where the two levels of particle velocity from middle and top priming blasting are reversed	104

ABSTRACT

Influence of priming location on the ground vibration

By Kim, Jae Woong

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

Dept. of Energy & Resource Engineering,

Graduate School of Chosun University

The ground excavation by use of various kinds of commercial explosives has been widely employed in mining, civil engineering and construction works such as surface mining, deep mining for extracting useful mineral, driving tunnels for subway and public transportation, excavation of the basement in urban area, and the construction of huge underground storage caverns.

Excavation by blasting in densely populated urban areas, however, has caused various public grievances, which urges blasting engineers to use the blasting methods which could reduce the ground vibration effectively. At the same time, the safety has become a key design parameter in preference to the efficiency and reliability.

The influence of the priming location on the ground vibration has been studied in this thesis. In the most of previous studies dealing with the ground vibration, the effect of the priming location was neglected or

considered in a limited way which is plausible only in the relevant site. Considering the fact that the mechanism of ground vibration caused by blasting is quite complex, the priming location can have a considerable effect on the ground vibration in certain situations and can be an important parameter in a blasting design.

This study was carried out to identify the characteristics of the rock in laboratory experiments. For the experiment, samples were collected in the study area I (quartz porphyry of area), study area II (schist of area), study area III (gneiss of area). In order to identify the characteristics of blasting according to the priming location of each study area (quartz porphyry, schist, gneiss) and blasting conditions (top priming, middle priming, bottom priming), this study was carried out 9 cases single hole test blasting and was derived the formula to predict blast vibration. And in order to identify the characteristics of the propagation depending on priming location, test blasts were carried out a total of 72 times using different spacing, burden, drilling length, charge and was derived the formula to predict blast vibration.

This study investigated the characteristics of vibration by analysis of the nomogram about particle velocity, peak particle velocity (PPV) and peak vector sum (PVS) from priming location (transverse, vertical, longitudinal component) by the formula to predict blast 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.

The result of this study can be summarized as follows.

(1) In top priming, vibration velocity were predicted by an average ground vibration prediction equation of particle velocity(T, V, L) at 10~100m distance. As a result, longitudinal component of vibration velocity from charge within 3.8kg were predicted higher. More than 3.8kg, vertical component in the near distance was predicted higher and longitudinal component in the long distance were predicted higher. The case of transverse component and vertical component depending on the amount of charge reversal of the two components were tend to be different, but vibration velocity of transverse component in the near distance were predicted lower and vibration level of vertical component in the long distance was predicted lower.

(2) In middle priming, vibration velocity were predicted by an average ground vibration prediction equation of particle velocity(T, V, L) at 10~100m distance. As a result, longitudinal component of vibration velocity from charge were predicted higher. The case of transverse component and Vertical component depending on the amount of charge reversal of the two components were tend to be different, but vibration velocity of transverse component in the near distance were predicted lower and vibration level of vertical component in the long distance was predicted lower.

(3) In bottom priming, vibration velocity were predicted by an average ground vibration prediction equation of particle velocity(T, V, L) at 10~100m distance. As a result, longitudinal component of vibration velocity from charge within 8.1kg were predicted higher. More than 8.1kg, Vertical

component in the near distance was predicted higher and longitudinal component in the long distance were predicted higher. The case of transverse component and Vertical component depending on charge within 8.7kg reversal of the two components were tend to be different, but vibration velocity of transverse component in the near distance were predicted lower and vibration level of vertical component in the long distance was predicted lower. And more 8.7kg, vibration level of longitudinal component was predicted lower.

(4) Vibration velocity were predicted from an average ground vibration prediction equation of peak particle velocity(PPV) depending on the priming location at the vibratory rate of 10~100m distance. As a result, vibration level of the top priming from charge within 1.1kg was predicted higher. More than 1.1kg, the bottom priming was predicted higher in the near distance and the top priming was predicted higher in the long distance. The middle priming and the bottom priming depending on charge were tend to be different reversal of the two components, but the middle priming in the near distance was predicted lower and the bottom priming in the long distance was predicted lower.

(5) Vibration velocity were predicted from an average ground vibration prediction equation of peak vector sum(PVS) depending on the priming location at the vibratory rate of 10~100m distance. As a result, vibration velocity from charge within 1.3kg was predicted higher. From vibration velocity from charge more 1.3kg, the bottom priming was predicted higher in the near distance and the top priming in the long distance was predicted higher. The middle priming and the bottom priming depending

on charge were tend to be different reversal of the two components, but the middle priming in the near distance was predicted lower and the bottom priming in the long distance was predicted lower.

1. 서론

전 국토의 2/3 이상이 산지로 이루어진 우리나라는 산업의 발달과 경제성장 등으로 인한 빈번한 국토 개발에서 굴착작업은 간과할 수 없는 부분이다. 화약발파를 이용한 굴착방법을 이용한 굴착작업이 주를 이루고 있으며, 이는 우리나라뿐만 아니라 전 세계적인 추세이기도 하다. 산업용 화약류를 사용하는 굴착작업은 노천광산 및 심부광산의 유용광물자원의 채취, 고속도로 및 지하철 건설, 도심지 내의 지하 터파기 작업, 지하 대공동 등 광업, 토목, 건설 분야 등 각종 작업에서 널리 이용되고 있다. 또한, 근래에는 사회의식구조의 변화로 인구가 밀집한 도심지 부근에서의 암반 굴착작업은 발파재해와 관련된 많은 민원을 낳고 있다. 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 조절 발파법을 이용하여 발파진동을 진동 전파 경로상에서 차단하는 방법이 널리 적용되고 있다. 그러나 발파작업의 시공성과 경제성을 고려할 때 지발당 장약량을 줄임으로써 발파진동을 제어하는 데는 한계가 있고, 진동 전파 경로상에서 발파진동을 차단하는 방법은 정량적인 진동저감 효과를 제시할 수 있을 만큼의 충분한 연구결과가 제시되어있지 못한 실정이다.

발파지점에서 발생하는 발파진동의 크기에는 지발당 장약량 이외에도 암반상태, 사용화약, 천공패턴, 발파공 직경과 화약 직경과의 비, 기폭방법, 전

색상태 등 많은 변수들이 영향을 미치게 된다.

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, 발파 유형, 폭원과 측정간의 거리 등을 가리킨다.

발파진동의 전파 특성을 결정짓는 인자로서 발파조건에 대한 연구 중 妹澤克推金井淸(1936)의 연구에 의하면 발파압력이 최고치가 되는 시간이 짧은 화약류를 사용하면 진동이 크고 주파수가 높게 되는 경향이 있고, 발파압력이 최고치가 되는 시간이 긴 화약류를 사용하면 진동이 감소되고 주파수도 낮아지는 것으로 나타난다. 한편, 발파압력의 시동시간은 폭속과 밀접한 관계가 있으며, 일반적으로 폭속이 빠른 화약류일수록 최고 발파압력에 도달하는 시간이 짧게 되므로 발파에 의한 지반진동 및 주파수도 사용하는 화약류의 폭속과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 이에 강대우와 안봉도(2007)는 발파원으로부터 어느 정도의 거리에서는 폭속이 감소함에 따라 진동이 감소하는 에멀전 폭약의 폭속 변화에 따른 진동특성을 연구하였으나, 3종류의 폭속에 대해서만 연구가 이루어졌다.

이경운(1984)은 발파진동상수 및 감쇠지수의 결정에 있어서 폭약의 종류에 따른 특성, 폭약의 사용량, 전색의 상태와 장약밀도, 자유면의 수, 발파원과 진동 측정점까지의 거리, 지층조건 등에 따라 차이가 크게 나타난다고 하였고, 윤대진(1992)은 암질이 각기 다른 6지역의 발파현장에서 실측한 자료와 기 측정된 국내 측정자료를 토대로 국내의 암질별 발파진동 특성을 고찰하였는데 그 결과 암의 압축강도가 증가함에 따라 발파진동속도가 증가함을 알 수 있었다.

RQD 값과 진동의 상관관계를 파악하여 진동 예측식을 제안한 천병식과

오민열(1995)은 RQD에 의한 발파진동 추정에 관한 연구에서는 진동 예측식의 적용범위가 연구에 적용된 지발당 장약량 및 발파원과 발파진동 측정점과의 거리가 20~25m인 터널발파의 경우로만 한정되고 있다.

안명석과 박중남(1999)은 대구 규장암 지역에서 발파 및 진동을 측정하여 K 및 n의 변화 추이에 대해 연구한 결과 K 및 n의 차이는 풍화 및 절리가 비교적 많고 강도가 비교적 약한 상부 풍화암 내지 연암층에서 풍화 및 절리가 비교적 적으며 강도가 강한 하부 암반으로 발파가 진행되면서 진동전파에 따라 나타나는 감쇠현상 때문이라 언급하였고, 안명석(2000)은 영남지역 일대의 주요암반을 대상으로 충격성 지반진동, 소음, 비산먼지 측정 자료를 토대로 굴진 깊이에 따른 암질의 변화가 발파진동상수 및 감쇠지수에 미치는 변화를 연구하였다.

윤성현 등(2003)은 터널 발파에 있어서 진동특성을 규명하기 위하여 V-cut 심발패턴으로 시험발파를 수행하여 터널 진행방향과 진행직각방향으로 발파진동을 계측하여 지반진동 전달특성을 확인하였고, 심동수와 강대우(2004)는 안산암, 화강암, 화강편마암의 3종류의 암반을 대상으로 NPS(New Presplitting) 발파법의 열수로 1~4열로 적용하여 발파로 인한 진동을 발파 전후의 발파진동 값을 기준으로 진동 감쇠효과를 비교하여 그 결과 2열일 때 감쇠효과가 가장 뛰어난 것으로 보고되었다.

규석광의 터널 굴착시 굴진장 향상과 사압현상 및 소력현상을 예방하기 위해 모든 장약공의 장약밀도를 다르게 적용하고, 심발공은 동일 장약공내에 2개의 뇌관을 이용하여 정기폭과 역기폭의 복합기폭방식을 도입한 오이환(2006)등의 연구는 진동특성에 대한 연구가 아닌 발파효율을 중점으로 연구하였다.

Mark Leidig 등(2010)은 다양한 범위의 폭발속도를 갖는 3가지 다른 타입의 폭약(black powder, hevy ANFO, composition B)으로 폭발실험을 수행하

여 지반진동 차이의 정량화 연구를 실시한 결과 발파구역으로부터 거리가 증가하면 PPV의 주파수가 감소하는 특징이 나타났다.

양형식 등(2010)은 제주도에 분포하는 스코리아층에서의 암반 발파 특성연구를 실시한 결과 스코리아층은 발파로 인해 생긴 진동을 멀리 전파하고 감쇠가 줄어드는 특징이 나타났다.

문창일(2000)은 장공발파에서 정기폭, 역기폭으로의 기폭위치를 설정하여 시험한 결과 발파 효율면에서는 역기폭을 이용하는 것이 좋으나, 지반진동으로 전달되는 진동속도를 제어하기 위한 목적일 때는 정기폭의 이용이 더 효율적이라는 결과는 얻음으로써 계단 발파에서 기폭약(Primer)의 위치가 발파진동에 영향을 미침을 보였다. 그러나 이 연구에서는 암반의 특성이나 지질학적 고려가 이루어지지 않았고, 기폭위치는 정기폭과 역기폭만을 연구하여 시험발파가 이루어진 현장에서의 결과로만 국한 되는 것으로 보이며, 일반적인 발파 설계 시 이용되는 데에는 한계가 있을 것으로 보인다.

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 연구지역의 암반 특성을 파악하기 위해 연구지역 I(석영반암 지역), II(편암 지역), III(편마암 지역)의 암석샘플을 채취하여 실내암석실험을 실시하였고, 기폭위치에 따라 발파진동의 전파 특성을 파악하기 위해서 공간격, 저항선, 천공장 그리고 장약량 등을 달리하여 총 72회의 단일공 시험발파를 실시하여 발파진동 예측식을 도출하였다. 그리고 도출된 평균 발파진동 예측식을 통해 기폭위치에 따른 성분별(transverse, vertical, longitudinal component) 입자속도, 최대입자속도(PPV) 및 최대벡터합(PVS)의 노모그램 분석을 통해 진동특성을 규명하였고, 국토해양부의 “도로공사 노천발파 설계

시공 지침”에 제시된 표준발파공법의 공법별 경계 기준 장약량인 0.5, 1.6, 5, 15kg을 적용하여 기폭위치별 진동 감쇠경향을 비교분석하여 발파설계의 인자로 사용할 수 있도록 제안하였다.

2. 이론적 배경

2.1 발파진동 이론

발파에 의한 지반진동은 암반 중에 밀폐된 상태로 놓인 폭약이 폭발하면 그 폭약의 폭발압은 기폭 후 수 μsec 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 감소하고 탄성파에 가까운 충격파로 이행한다.

파쇄영역을 통과해서 주위 암반에 3차원적으로 방사된 파동은 암반 중에 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 암반 중을 전파해 감으로써 폭원으로부터 떨어진 지점에서 암석 중 또는 지표면에서 진폭과 주기는 갖는 진동으로 나타난다.

2.1.1 진동의 정의

진동에서 가장 단순한 것은 시간의 경과와 함께 동일한 형상이 반복되는 것이다. 그러나 일반적으로 진동이 반복되는 간격은 항상 일정시간 간격은 아니고 동일형상이라도 모두 같은 상태가 반복되는 것은 아니다. 이 일정한

시간간격에 동일한 형상이 반복되는 진동을 정상진동이라 하고 그렇지 않은 것을 비정상진동이라 한다. 일정한 회전수로 회전하는 기계에 의한 진동은 정상진동이며 지진에 의한 진동은 비정상진동이다.

공해진동이라고 불리는 진동에는 정상진동의 것도 있지만 비정상진동인 것이 많다. 진동현상을 나타내는 물리량을 진동량이라 하며 변위, 속도, 가속도가 사용된다. 진동하고 있는 점 A의 위치가 시간적으로 $\pm X$ 의 사이에서 반복운동을 되풀이하는 경우를 고려해 보자. 어떤 시간 t에 있어서 점 A의 위치 X가 시간적으로 정현 변화한다고 가정하면 x의 관계를 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 ω (rad/sec)는 각속도이고, ϕ (rad)는 위상각이라 부른다. 식 (2.1)로 나타낸 진동은 정현진동 또는 조화진동이라 부르며 일정한 시간적 변동을 반복하는 정상적인 진동 중에서 가장 중요하고 기본적인 진동이다.

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

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

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

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

ωX 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.

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{dv}{dt} = -\omega^2 X \sin(\omega t + \phi) \\ &= \omega^2 X \sin(\omega t + \phi + \pi) \end{aligned} \quad (2.7)$$

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

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

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

$$\begin{aligned} P_e &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [X \sin(\omega t + \phi)]^2 dt} \\ &= \sqrt{\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} [X \sin(\omega t + \phi)]^2 dt} \\ &= \frac{X}{\sqrt{2}} \cong 0.707X \end{aligned} \quad (2.8)$$

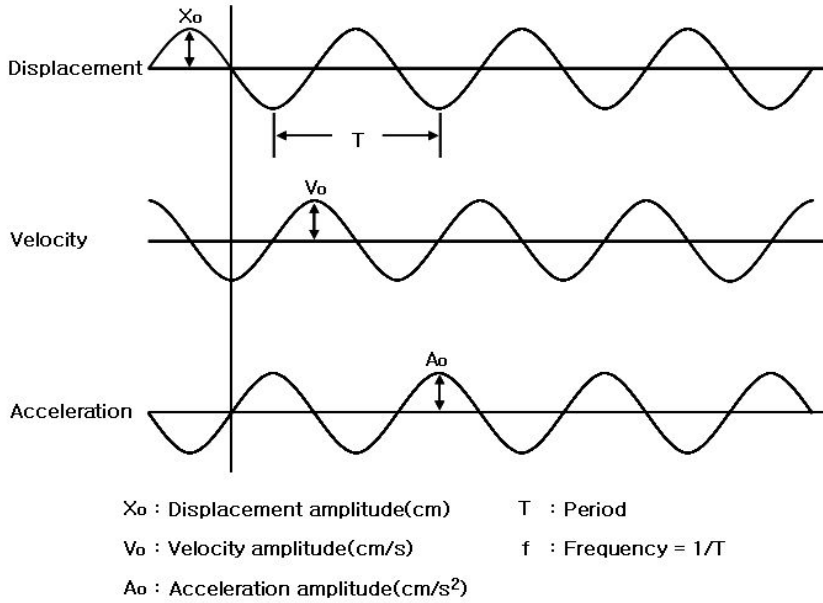


Figure 2.1 Harmonic oscillation.

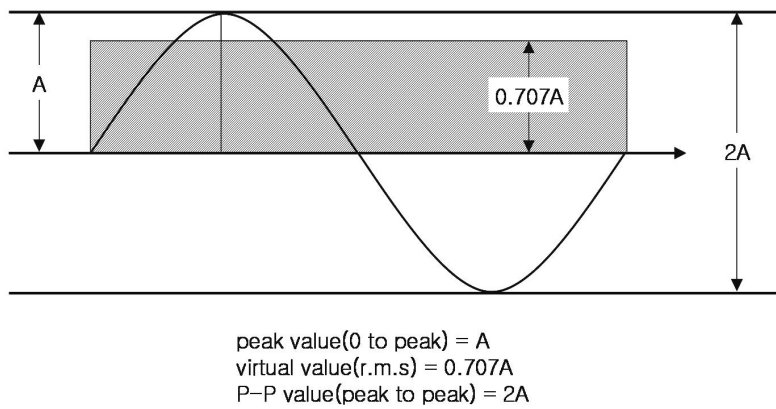


Figure 2.2 The size of sine wave vibration.

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 $\mu\text{m}(1/1,000\text{mm})$ 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, ω 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 m/s^2 ($gal=cm/s^2$, $g=9.8m/s^2$)이며, 중력가속도는 980 gal(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, $2A_0$)는 전체 진폭을 일컬으며 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)는 편진폭을 일컬으며 일반적으로 진폭이라 표기하며, 짧은 시간의 충격 등을 크기로 나타내기에 특히 유용하다. 이 값은 단지 최대 값만을 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 에너지 량과 직접 관련된 진폭을 표시하는 실효치(RMS 값, $A_0/\sqrt{2}$)는 진동크기의 표현에 가장 적절하다.

진동가속도레벨(Vibration acceleration level, VAL)은 측정대상 진동의 가

속도 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.

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

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

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

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

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) 3 성분과 주파수(frequency: f)로 표시된다.

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

발파소음에 대해서는 발파작업에 따라 발생하는 파동의 문제란 점에서 발

파진동과 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 창문과괴를 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/sec²(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}cm m = 10^2cm
Velocity	cm/sec	mm/sec = 10^{-1}cm/sec Kine = 1cm/sec m/sec = 10^2cm/sec
Acceleration	cm/sec ² (gal)	gal = 1cm/sec ² g = 980cm/sec ² \approx 1,000gal m/sec ² = 10^2cm/sec^2

2.2 발파에 의한 암석파쇄이론

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

2.2.1 Crater

가장 전통적인 이론으로 장약량, 최소저항선등의 인자들 간의 관계를 crater 발파에서의 경험에 의해 규명한 경험 이론이다. 최소저항선을 이용하여 장약량을 결정하고 전색 길이(stemming length), 발파공간의 거리(spacing) 등을 계산하여 표준 발파의 장약량을 산출한다. crater 발파는 발파공과 수직인 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 크기이며, 충격파의 형태로 주변 암반에 전달된다. 충격파에 의한 분쇄대는 발파공 반경의 약 2배 거리까지 형성되고, 그 이후 방향성이 나타나는 몇 개의 방사상 균열이 형성된다. 충격파가 자유면에 도달하면 균열들에 가스압이 작용하여 균열이 성장하며, 이러한 균열의 성장이 자유면에 이르면 암석은 그때까지 남아 있는 가스압에 의한 변위가 발생한다.

화약의 폭발에 의해 발생한 에너지는 폭굉압과 가스압의 두 가지 형태로 암

반에 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 주위에서부터 균열이 형성되며, 균열 침단에 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 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; Fourny, 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. 충격지점으로 부터 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 방출 에너지의 절반 이하로 작게 나타나고 나머지는 암석의 표면이나 내부의 자유면을 따라 이동하는 표면파가 된다. 그러므로 지표 부근에서 실시한 발파작업에 의한 진동에는 입체파보다 표면파에 더 많은 에너지가 작용한다. 반면 진동을 측정하는 지점이 발파 지점에서 가까우면 이러한 모든 파는 구분되지 않고 합성되어 함께 복합파 형태로 나타난다. 특히 지하철 건설을 위한 터널 굴착과 같은 도심지에서의 발파는 발파진동 문제를 야기하는 지점이 수십 미터 이내이며 여러 가지 파들이 도달하는 시간이 동시에 이루어지기 때문에 기록상으로 분별하기 어려운 단점이 있다.

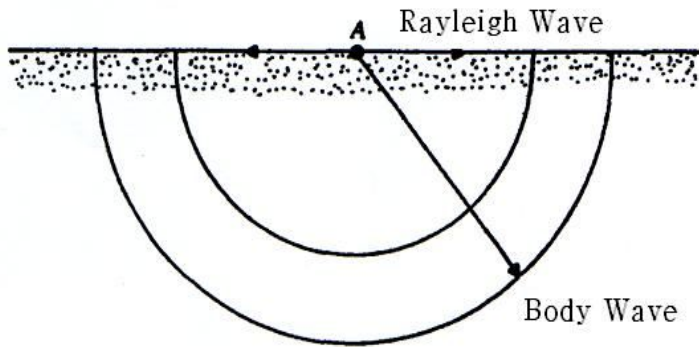


Figure 2.3 Body wave and Rayleigh wave.

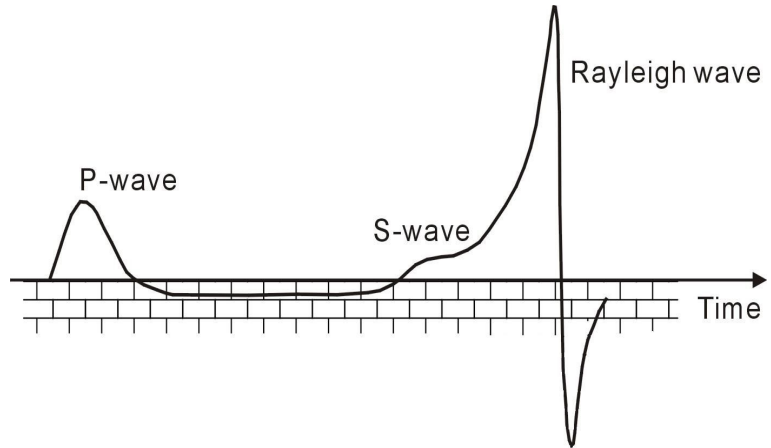


Figure 2.4 Vertical displacement component of P wave, S wave and Rayleigh wave in a short duration period.

2.4 발파진동의 발생과 전파

2.4.1 발파진동의 발생

폭약을 사용한 발파는 물리, 화학, 열역학, 충격과 상호작용 및 암석역학 등의 이론이 복합적으로 작용하여 이루어진다. 폭발에 의해서 발생된 압력파는 암반 중의 모든 방향으로 전파되면서 감소되는데 표면에서는 굴절 및 반사가 일어난다. 이때 폭발에 의한 초기 충격 폭굉압과 지연 폭발 가스압을 정확하게 구별하기는 힘들다. 화약이 폭발 할 때 열과 에너지를 발생하는데 Figure 2.5에서 보듯이 발파공을 따라서 연소면이 앞으로 진행하면 폭굉압 P_d 의 뒤에는 이보다 낮지만 일정하게 지속되는 폭발압 P_e 가 따르게 된다. 폭발압은 폭굉압 보다 좀 서서히 사라지지만 암석을 이동시키는데 필요한 많은 양의 에너지로 작용한다.

폭굉압은 초기에 발파공벽에 바로 인접한 암석을 파쇄시키고 지속되는 폭발로 인해 발파 파쇄대가 밖으로 확장되며(Figure 2.6) 퇴적암의 경우 발파공 직경의 40배에 이르게 된다. 발파에 의해 발생되는 최고압 즉 폭굉압은 10~140kbar(145,000~2,000,000psi)에 달하며 전파 속도는 2700~8400m/sec에 달한다.

실제 발파공에서 폭굉압은 파괴효과에 직접적으로 관련되는 요소이며 기폭작용을 한다. 폭굉압의 측정은 특수 제작된 장치를 사용하여 측정할 수 있다. 압력의 계산식은 다양한 식이 제안되고 있으며 모두 결과에 차이가 있다. 폭발압력은 일반적으로 폭발속도(VOD, velocity of detonation)와 폭약의 밀도 함수로서 식 (2.14)와 같이 표현된다.

$$P_d = \rho \times VOD^2 \times pv \quad (2.14)$$

여기서 P_d 는 폭굉압(kbar)이며 ρ 는 폭약밀도(g/cm^3), VOD 는 폭발속도 (m/sec), pv 는 폭약의 입자속도(cm/sec)를 나타낸다. 폭약밀도와 폭굉압은 알 수 있으나 진동속도는 공기 중에서 발파로 인하여 팽창하는 가스 때문에 입자운동을 사진으로 찍기 불가능하므로 측정될 수 없고, 투명한 플라스틱 용기에 물을 넣고 그 안에서 폭발시키면 사진 촬영이 가능하여 충격과 속도와 입자속도와의 관계로부터 계산할 수 있다. 폭굉속도 VOD 와 폭약밀도 ρ 의 관계식을 표현하면 식(2.15)와 같다(DuPont Co., 1977).

$$P_d = 2.50 \times 10^{-6} \times \rho \times VOD^2 \quad (2.15)$$

또 다른 식으로서 다음 식 (2.16)과 같이 나타낼 수 있다(Dick, 1968).

$$P = 4.18 \times 10^{-7} SGe V_e^2 / (1 + 0.8SGe) \quad (2.16)$$

여기서 P (kbar)는 폭굉압을 나타내며 SGe 는 폭약비중, V_e 는 폭굉속도 (ft/sec)를 의미한다. 발파압력을 산정하기 위해 일반적으로 쓰이는 식으로서 Brown's식이 있는데 다음 식 (2.17)과 같다.

$$P_D = \frac{0.45\rho D_E^2}{1.0 + 0.0008\rho_E} \quad (2.17)$$

여기서 ρ (g/cm^3)는 암반의 밀도이며 ρ_E 는 폭약의 비중을 나타내며 D_E 는

폭약의 폭굉속도를 의미한다.

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

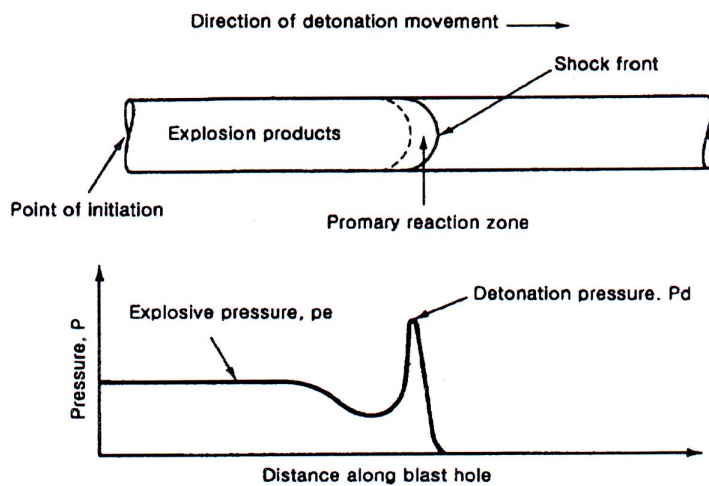


Figure 2.5 Advancing detonation in blast hole produces short period detonation pressure and long period explosion pressure(Dick, 1968).

2.4.2 발파진동의 일반적 특성

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.

폭약이 장약공 내에서 폭발하면 수만에서 수십만 기압에 달하는 강력한 충격압과 가스압, 그리고 대단히 높은 고온이 발생한다. 이 때 Figure 2.6과 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 발생, 전파되어 균열대를 형성하게 된다.

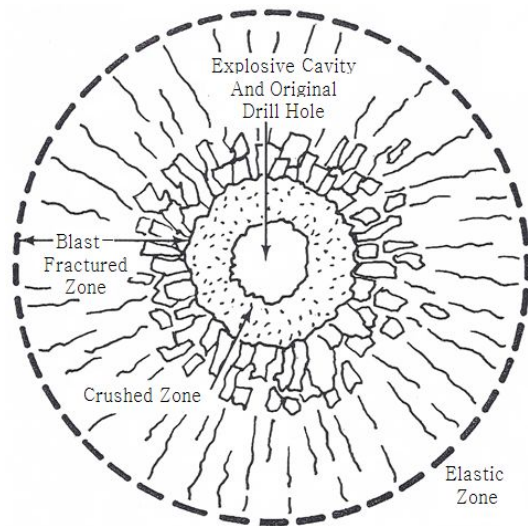


Figure 2.6 Schematic of the fracturing and deformation around an explosion in rock (Dupont, 1980).

폭원으로부터 3차원적으로 전파된 충격압에 의한 충격파는 거리에 따라 현저히 감쇠되어 발파에 의한 에너지의 일부가 탄성파의 형태로 균열대 외부의 암반 중에 전파되어 간다. 이러한 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 점에서의 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.

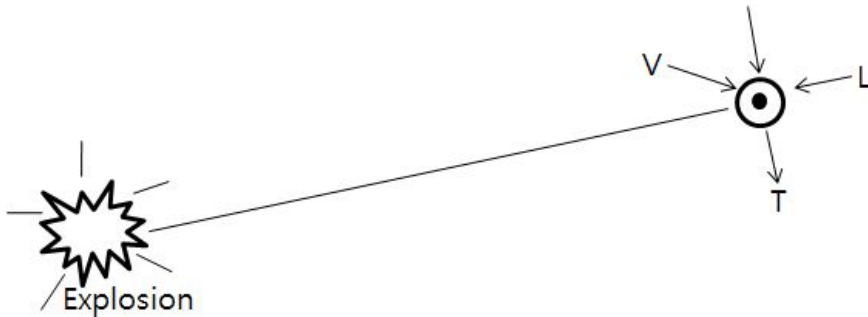


Figure 2.7 Measuring direction of ground vibration.

지반진동의 측정은 그 방향에 따라 Figure 2.7과 같이 폭원으로부터 측정점을 향하는 평면상파의 진행방향성분(longitudinal 혹은 radial component), 진행방향에 직교하는 수직방향성분(vertical component), 이들 두 방향과 직각을 이루는 접선방향성분(transverse component)의 세 방향으로 이루어진다.

이들 3 성분의 상대적 크기는 대상 암반이나 지형 및 발파에 의해 생성된

탄성파 즉, P파(압축파, 종파, primary wave), S파(전단파, 횡파, secondary wave) 및 표면파(Rayleigh wave) 등의 상호 간섭에 따라 변하고 진동 주파수는 각각 다르게 나타난다. 따라서 3 성분 중 각각 단일성분(V, T, L)에 대한 크기와 우월성분의 최대치가 원하는 계측 위치에서 측정될 수 있어야 한다.

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

한편 발파에 의한 지반진동을 단순조화진동(simple harmonic motion)으로 보면 입자변위(D), 입자속도(V), 입자가속도(A)의 표시법 사이에는 식 (2.18) 과 식 (2.19)와 같은 관계가 성립한다.

$$V = 2\pi f \cdot D \quad (2.18)$$

$$A = 2\pi f \cdot V \quad (2.19)$$

여기서, f 는 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

2.4.3 발파진동의 전파특성

폭약이 폭발할 때 발파에 필요한 최대의 효과를 얻기 위해서는 충분한 에너지가 전달이 되어야 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 가능하며, 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			○

2.4.4 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 예측 방법이며, 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.

(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 해석이론(Langhaar, 1951)에 의하면 발파현상과 관련되는 6개의 독립 변수와 무차원 변수가 있고 이들 변수는 u/D , 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 맥승을 하거나 서로 곱해질 수 있고 하나의 무차원 변수는 다른 무차원 변수의 함수일 수 있다.

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

의미를 가진다.

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

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^{-1}
Density of rock mass	ρ	Ft^2L^{-4}
Time	t	t
Dependent		
Ground displacement	u	L
Ground particle velocity	\dot{u}	Lt^{-1}
Ground acceleration	\ddot{u}	Lt^{-2}
Frequency	f	t^{-1}

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

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

환산거리에 의한 발파진동 예측식은 다음 식 (2.20)과 같다.

$$V = K(SD)^n \quad (2.20)$$

여기서, V 는 진동속도, K 는 입지상수, n 은 감쇠상수, SD 는 환산거리로써 발파원과 수신점과의 거리(D)와 지발당 장약량(W)은 다음 식 (2.21), (2.22)와 같이 각각 자승근 및 삼승근으로 표시된다.

$$SD = \frac{D}{\sqrt{W}} \quad (2.21)$$

$$SD = \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \quad (2.22)$$

K 와 n 은 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 (2.23)이 얻어진다.

$$V = KW^a D^b \quad (2.23)$$

a 와 b 는 각각 지수계수와 감쇠계수이다. 일반식 (2.23)은 높은 적합도에도 불구하고 설계의 어려움 때문에 많이 적용되고 있지 않고 있다.

식 (2.20)과 (2.23)으로 구해지는 진동수준은 평균 진동수준이므로 발파설계에 직접 이용할 수 없다. 따라서 정규분포의 특성을 이용하여 신뢰수준 95% 발파진동 예측식을 구하고 현장여건에 맞는 허용 진동수준으로부터 허용 환산거리를 산출하게 된다.

(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 K 의 50% 값을 K_0 라 하고 95%, 99%의 K 값을 각각 K_1 , K_2 라 하면 K_0 , K_1 , K_2 값은 로그 정규분포의 특성을 이용하여 식 (2.24), (2.25), (2.26)과 같이 구할 수 있다.

$$K_0 = \exp A_0 \quad (2.24)$$

$$K_1 = \exp(A_0 + 1.645\sigma) \quad (2.25)$$

$$K_2 = \exp(A_0 + 2.326\sigma) \quad (2.26)$$

여기서, σ 는 표준편차이다. 또한 신뢰식의 기울기 n 은 동일하다.

2.5 기폭방법

MAHA(The Mine Safety Health Administration of U.S.A)는 기폭약(Primer)을 다른 폭약이나 발파제를 기폭시키는 데 이용되는 뇌관으로 기폭 가능한 폭약장치로 정의한다. 기폭약(primer)에는 뇌관이나 다른 기폭장치, 즉 도폭선이 포함된다.

기폭약(primer)은 높은 폭속과 높은 폭발력을 가진 뇌관으로 기폭이 가능

하도록 만들어져야 한다. 기폭약(primer)은 장전된 폭약의 폭발파가 이동될 방향을 향하는 위치에 설치될 때 더욱 효과적이다. 이것을 directional priming이라한다. 따라서 전장약을 향하는 기폭약(primer)에 기폭장치를 설치하는 것이 가장 좋다. 먼저 공구를 향하는 뇌관을 가진 기폭약(primer)를 공에 설치한다. 뇌관을 포함한 기폭약(primer)이 공구와 전장약을 향하는 공저에 설치될 때 이것이 역기폭방법(bottom priming)으로 알려져 있다. 반면에 뇌관을 포함한 기폭약(primer)이 공저를 향하며, 공구나 공구부근에 설치될 때 이것은 정기폭(top priming)으로 알려져 있다. 기폭약(primer)의 적절한 위치는 안정성과 효율성 둘 다의 관점에서 중요하다.

노천에서의 대발파 방식은 그 응용에 따라 다변화가 가능하며 기폭방법에도 도폭선, 전기뇌관, 비전기뇌관 등을 이용할 수 있고, 최근에는 plasma와 같이 충격파이론에 의한 발파방식도 고안되어 발전하고 있다.

Figure 2.8은 기폭약(primer)의 장전위치에 따른 기폭방법을 나타낸 그림이다.

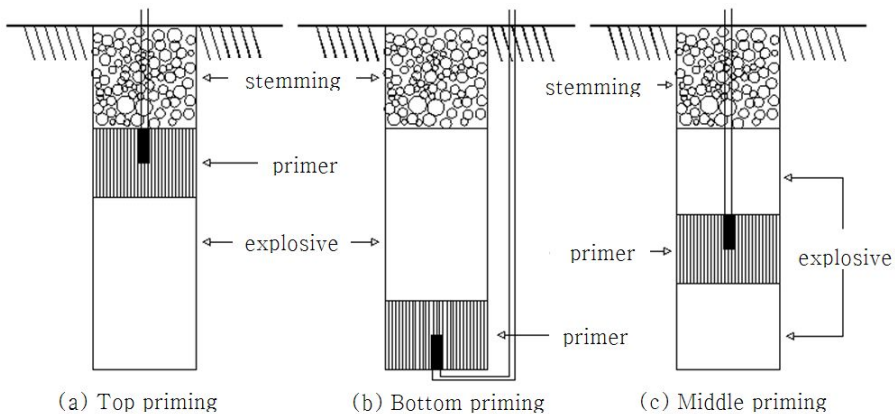


Figure 2.8 Position of primer

2.5.1 정기폭(Top priming)

뇌관을 포함한 기폭약(primer)이 공저를 향하며, 공구나 공구부근에 설치될 때 이것은 정기폭(top priming)이라고 한다(Figure 2.8(a)).

정기폭은 대구경의 시추공에서는 넓은 공간으로 인해 별 문제가 없지만 좁은 간격의 소구경 시추공에서는 공의 윗부분에서 지반운동으로 인해 cut off가 발생할지도 모른다. 때문에 정기폭은 역기폭을 사용하기에는 안전에 부적절한 고려사항이 있을 때 사용한다.

발파공의 입구 쪽에 기폭점을 두는 것이 안쪽에 두는 것보다 충격파가 자유면에 도달하는 시간이 빠르기 때문에 자유면에서 반사하는 반사파의 세기가 크다는 점으로부터 정기폭이 역기폭보다 발파위력이 크다고 주장되고 있으며, 순폭성에 있어서도 정기폭이 우수하다고 보고되고 있다. 기술적으로도 역기폭일 때는 폭발력이 주변에 크게 미쳐서 파쇄를 조장하게 됨에 따라 폭약이 5% 절약되는 경향도 보고되고 있다.

2.5.2 역기폭(Bottom priming)

뇌관을 포함한 기폭약(primer)이 공구와 전체 장약을 향하는 공저에 설치될 때 이것이 역기폭방법(bottom priming)이라고 한다(Figure 2.8(b)).

역기폭은 팽창가스가 더 오래 지속되고 그 결과 밀거나 작용하는 힘이 더 오래 지속된다. 역기폭은 암반변위가 중요한 요소인 지반굴착, 절하발파, 고속도로 굴착 등 다중열 발파에서 적용될 수 있다.

관점에 따라 여러 견해와 주장이 엇갈리고 있으나, 시추공의 cut off 감소, 공저에서 약포의 불폭 감소, 많은 암반변위 발생, 막힌 공으로부터 전폭약을

재장약의 가능 등의 이유로 역기폭이 널리 이용된다.

일반적으로 역기폭은 각선의 길이가 비경제적이며 폭약을 다져 넣는 데도 주의해야 하지만 정기폭일 경우에는 폭약을 다져 넣는데 비교적 안전하다.

단발발파로부터 장약의 cut off에 장약분리의 위험이 있을 때나 지연뇌관을 사용하는 근접공에서 유리하다. 기폭점이 안쪽에 있으므로 발파위력이 내부에 더욱 크게 작용하여 잔류공을 남기는 일은 없다. 일반적으로 장공을 발파할 때에는 역기폭으로 장전하는 것이 효과적이다.

2.5.3 중간기폭(Middle priming)

기폭점을 공입구와 공저의 중간부분에 두는 것(Figure 2.8(c))으로 장약의 길이가 길 경우에 많이 사용된다. 비교적 둔감한 초유폭약을 이용하여 긴 장약을 기폭 할 경우에는 끝부분에 전폭약을 설치할 수도 있다.

3. 현장실험

3.1 대상현장의 지형 및 지질

3.1.1 연구지역 I, II

본 연구지역은 군산시 성산면 성덕리 산 2-1번지로 장항~군산간 29번 국도상의 당선리와 금강하구둑을 지나 요동에서 북동측으로 분지된 709호선 지방도를 따라 약 4km 지점에 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, 합라산층, 규암층 순으로 구성된다(Figure 3.2).

3.1.2 연구지역 III

군산시의 산지는 북동부의 취성산지, 중앙부의 금성산지, 서부의 영병산지의 3구역으로 나눌 수 있다. 취성산지는 옥구반도의 골격을 이루는 지대로 합라산(241m)에서 태초산까지이다. 이 산지의 분포지대는 군산시의 북동부인

나포, 서수, 성산, 임피, 개정면이며, 구성암석은 선캠브리아기의 화강암질 편마암이다. 본 연구지역은 군산시 나포면 서포리 산 21-8번지로 군산시의 북동부이고 취성산지의 서측 단부에 위치하고 있다(Figure 3.1).

군산지역의 지질도를 살펴보면 비교적 단순한 암상분포로 구성되어 있다. 기반암으로 생각할 수 있는 경기편마암 복합체인 서산층군을 비롯하여 화강암질 편마암, 안구상 편마암 이들을 부정합으로 덮는 평안누층군이 소규모로 옥구읍 남쪽을 노출 분포하고, 이 평안누층군을 중생대 신라층군이 역시 부정합으로 피복하고 있다. 이들 신라층군은 중생대말의 화산활동으로 관입 또는 분출해 온 산성화산암류로 관입 또는 피복되어 있다. 이들 암석은 북북동 내지 남남서 방향으로 선캠브리아기의 서산층군, 화강암질 편마암, 안구상 편마암이 달리고 저 멀리 바다로 건너 섬들을 이루고 있다. 본 연구지역인 나포면 서포리가 이 지역에 속하는 암석지대이다(Figure 3.2).



Figure 3.1 Site map of study area.

Quaternary Period

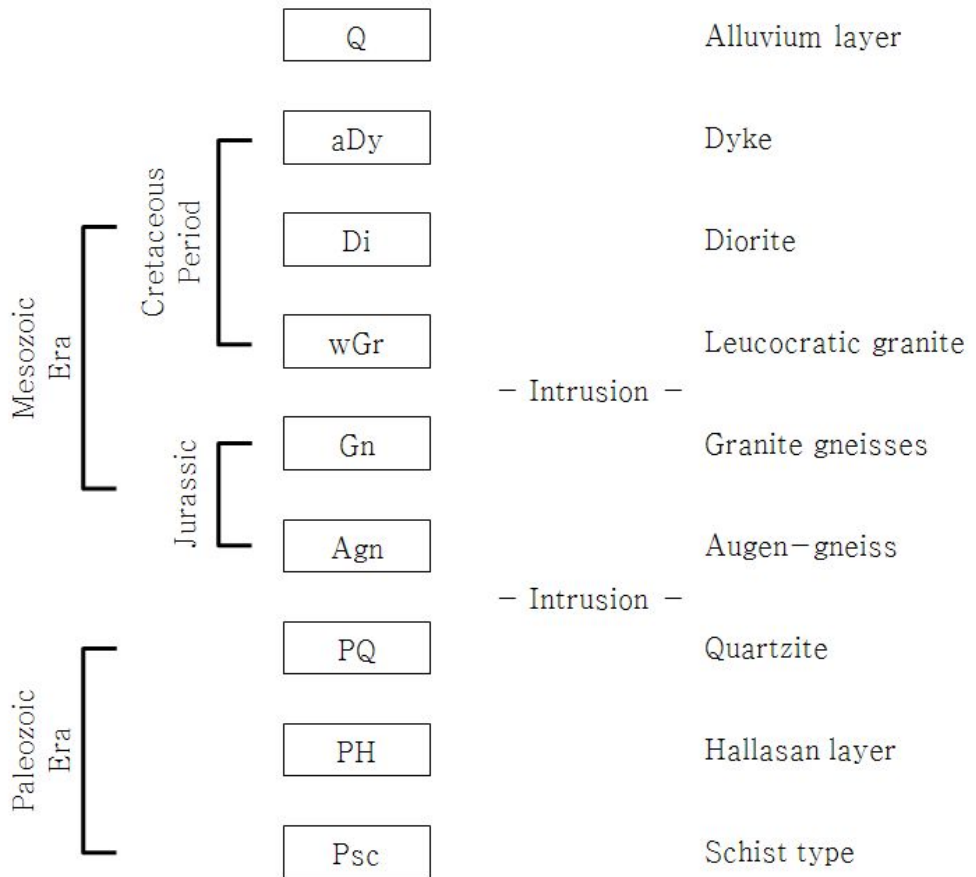


Figure 3.2 Geology genealogy of study area.

3.2 실내물성실험

3.2.1 실내물성실험의 종류

연구지역 I(석영반암 지역), II(편암 지역), III(편마암 지역)에서 블록 시험편을 채취하여 코어 천공기를 사용하여 NX 크기의 코어 시험편을 시추하였다. 다양한 실내물성실험을 위해 ISRM 규정에 맞도록 시험편을 성형·제작하였다.

실내물성실험의 종류는 비중, 공극률, 탄성과 전파속도, 일축압축강도이며, 각각의 실내물성실험은 각 3회씩 실시하였다.

위에 열거한 각 시험은 ISRM(International Society for Rock Mechanics)의 제안방법과 ASTM(American Society for Testing Materials)의 표준시험법에 의거하여 실시하였다.

3.2.2 실내물성실험에 의한 결과분석

(1) 비중, 공극률

비중, 공극률은 METTLER TOLEDO사의 AG Balance, desiccator 및 건조오븐을 사용하여 구하였다. 그 결과 연구지역 I(석영반암 지역)의 비중은 $2.542\sim 2.563\text{g/cm}^3$ 범위로 분포하며 평균 2.552g/cm^3 이고, 공극률은 $2.649\sim 4.018\%$ 범위로 분포하며 평균 3.436% 로 측정되었다. 연구지역 II(편암지역)의 비중은 $2.721\sim 2.923\text{g/cm}^3$ 범위로 분포하며 평균 2.824g/cm^3 이고, 공극률은 $0.725\sim 1.154\%$ 범위로 분포하며 평균 0.890% 로 측정되었다. 연구지역 III(편마암 지역)의 비중은 $2.635\sim 2.646\text{g/cm}^3$ 범위로 분포하며 평균 2.641

g/cm^3 이고, 공극률은 0.571~0.939% 범위로 분포하며 평균 0.778%로 측정되었다.

(2) 탄성과 전파속도 (P파속도)

탄성과 전파속도(P파속도)는 OYO사의 New Sonicviewer로 P파의 전파속도를 구하였다. 그 결과 연구지역 I(석영반암 지역)의 P파 전파속도는 3638~4101m/s 범위로 분포하며 평균 3979m/s로 측정되었다. 연구지역 II(편암지역)의 P파 전파속도는 4640~5011m/s 범위로 분포하며 평균 4851m/s로 측정되었다. 연구지역 III(편마암 지역)의 P파 전파속도는 4940~5510m/s 범위로 분포하며 평균 5363m/s로 측정되었다.

(3) 일축압축강도

일축압축강도는 만능재료시험기(Universal Testing Machine, UTM, Model No. KPUT-100)를 사용하여 구하였다. 그 결과 연구지역 I(석영반암 지역)의 일축압축강도는 543~621kgf/cm² 범위로 분포하며 평균 593kgf/cm²로 측정되었다. 연구지역 II(편암지역)의 일축압축강도는 885~1023kgf/cm² 범위로 분포하며 평균 985kgf/cm²로 측정되었다. 연구지역 III(편마암 지역)의 일축압축강도는 1136~1435kgf/cm² 범위로 분포하며 평균 1321kgf/cm²로 측정되었다.

(4) 탄성계수

탄성계수는 일축압축시험 시 구한 강도와 일축시험편에 부착한 CAS사의 스트레인 게이지를 통해 VISHAY사의 Portable Strain Indicator에서 읽은 축 방향 변형률을 나누어 구하였다. 그 결과 연구지역 I(석영반암 지역)의

탄성계수는 $2.43\sim 2.85\times 10^5\text{kgf/cm}^2$ 범위로 분포하며 평균 $2.61\times 10^5\text{kgf/cm}^2$ 로 측정되었다. 연구지역 II(편암지역)의 탄성계수는 $2.82\sim 3.75\times 10^5\text{kgf/cm}^2$ 범위로 분포하며 평균 $3.46\times 10^5\text{kgf/cm}^2$ 로 측정되었다. 연구지역 III(편마암 지역)의 탄성계수는 $3.91\sim 4.67\times 10^5\text{kgf/cm}^2$ 범위로 분포하며 평균 $4.43\times 10^5\text{kgf/cm}^2$ 로 측정되었다.

다음 Table 3.1은 조사지역의 주요 실내실험 결과를 나타내었다.

Table 3.1 Results of rock property test

Rock type	Study area I	Study area II	Study area III
Specific gravity	2.542~2.563 (2.55)	2.721~2.923 (2.82)	2.635~2.646 (2.64)
Porosity (%)	2.649~4.018 (3.436)	0.725~1.154 (0.890)	0.571~0.939 (0.778)
P wave velocity (m/sec)	3638~4101 (3979)	4640~5011 (4851)	4940~5510 (5363)
Young's modulus ($\times 10^5\text{kgf/cm}^2$)	2.43~2.85 (2.61)	2.82~3.75 (3.46)	3.91~4.67 (4.43)
Uni. comp. strength (kgf/cm^2)	543~621 (593)	885~1023 (985)	1136~1435 (1321)

3.3 현장실험개요

기폭위치에 따라 발파에 의한 진동의 전파 특성을 파악하기 위해서는 정해진 공간격, 저항선, 천공장, 그리고 장약량 등에 따라 시험발파를 하고 이때에 발생하는 발파진동을 발파진동 계측기를 사용하여 측정하여야 한다. 그리고 측정된 자료를 분석하여 기폭위치에 따라 발생할 수 있는 진동정도를 예측하여 기폭위치에 따른 발파진동의 전파 특성을 규명한다. 본 연구에서는 연구지역 I, II, III에서 천공장과 기폭위치에 따른 단일공 발파진동을 계측하는 방식으로 현장실험을 진행하였다.

3.4 현장실험 방법 및 결과

3.4.1 실험 방법

본 연구의 현장실험지역은 전라북도 군산시 성산면 성덕리 산 2-1번지에 위치한 연구지역 I(석영반암 지역)과 II(편암 지역)와 군산시 나포면 서포리 산 21-8번지에 위치한 연구지역 III(편마암 지역)에서 총 72회 발파에 대한 현장실험을 실시하였다.

실험 조건은 Table 3.2와 같다. 연구지역 별로 1~6회는 공경 $\Phi 76\text{mm}$, 공간격 2.0m, 저항선 1.8m, 천공장 6.0m, 그리고 지발당 장약량 6.4kg, 7~12회는 공경 $\Phi 76\text{mm}$, 공간격 3.0m, 저항선 2.7m, 천공장 9.0m, 그리고 지발당 장약량 14kg, 13~18회는 공경 $\Phi 76\text{mm}$, 공간격 2.0m, 저항선 1.8m, 천공장 6.0m, 그리고 지발당 장약량 6.5kg, 19~24회는 공경 $\Phi 76\text{mm}$, 공간격 3.0m, 저항선 2.7m, 천공장 9.0m, 그리고 지발당 장약량 14kg을 사용하여 단일공

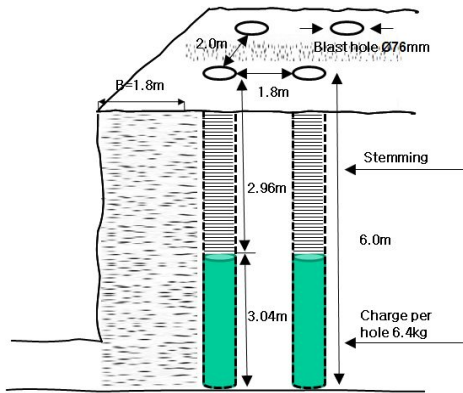
시험발파를 실시하였다.

이상과 같이 현장실험은 연구지역별로 24회씩 총 72회 발파를 실시하였고 폭속이 다른 2가지 종류의 에멀전 폭약을 사용하였다.(Table 3.2).

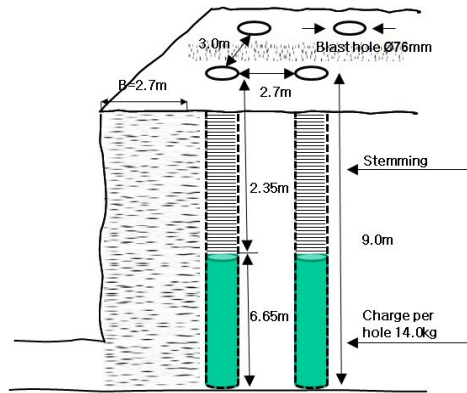
뇌관은 MS 지발 전기뇌관이 사용되었으며 발파패턴은 Figure 3.3과 같다.

Table 3.2 Experimental conditions

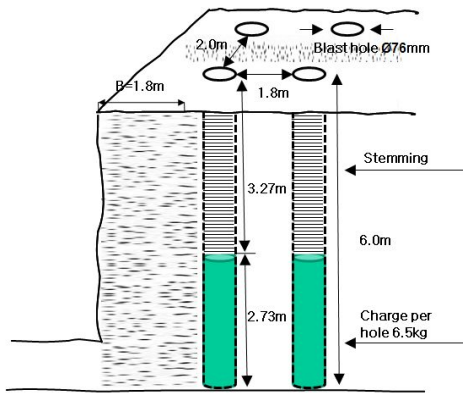
No.	1~6	7~12	13~18	19~24
Explosive	Emulsion type			
Explosive diameter(mm)	Φ50			
Detonator	MS Detonator			
Diameter (mm)	76			
Drilling Length(m)	6.0	9.0	6.0	9.0
Spacing (m)	2.0	3.0	2.0	3.0
Burden (m)	1.8	2.7	1.8	2.7
Charge per hole(kg)	6.4	14	6.5	14
Charge per delay(kg)	6.4	14	6.5	14
Number of hole(ea)	1			



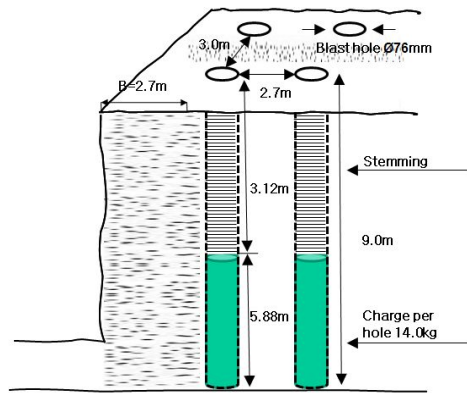
(a) Blasting pattern for holes of #1~#6



(b) Blasting pattern for holes of #7~#12



(c) Blasting pattern for holes of #13~#18



(d) Blasting pattern for holes of #19~#24

Figure 3.3 Blasting pattern.

3.4.2 현장실험의 계측

현장실험의 계측은 총 23대의 계측기기(Instantel사의 Blastmate II, III 14대와 PMT사의 eXAD-8 6대, wave science corporation사의 wave on 3대)를 사용하여 계측을 실시하였다. 실험 계측에 사용된 Blastmate II, III, eXAD-8 그리고 wave on은 현장의 발파 및 건설장비 등을 이용한 작업 시 발생하는 소음, 진동 등을 계측하여 진행, 접선, 수직 및 주파수 등을 현장에서 인쇄하여 진동 계측값을 손쉽게 확인할 수 있다. 그리고 지발당 장약량(charge weight per delay)과 거리(distance)를 수동으로 입력하면 이를 환산거리(Scaled distance)로 자동으로 계산하는 기능뿐만 아니라, 진동측정의 주파수 및 시간이력 등을 상세히 보여주는 국내에서 가장 널리 사용되고 있는 진동 측정기기라 할 수 있다.

Blastmate II, III의 측정범위는 $0.013 \sim 25.4 \text{ cm/sec}$, eXAD-8의 측정범위는 $0.051 \sim 25.4 \text{ cm/sec}$ 이며, wave on은 $0 \sim 25 \text{ cm/sec}$ 이다. 주파수 분석을 수행하고자 할 때 모두 ZC(Zero Cross Frequency)와 고속 푸리에 변환(FFT, Fast Fourier Transform)이 가능하며 USBM/OSMRE와 DIN4150 주파수 분석이 가능하다.

Figure 3.4~3.6은 실험 현장의 사진 및 계측 장면이다.



Figure 3.4 Measurements of study area I .



Figure 3.5 Measurements of study area II.



Figure 3.6 Measurements of study area III.

3.4.3 현장실험 계측 결과

Table 3.2의 발파조건과 Figure 3.3의 발파패턴으로 총 72회에 걸쳐 실시된 발파진동 계측 결과 총 1044개의 자료를 획득하였으며 계측된 자료는 부록에 첨부하였다. 그리고 발파진동의 계측은 Figure 3.4~3.6과 같이 11~23대의 계측기를 사용하여 발파 지점과 5~109m의 거리에서 행해 졌다.

부록에 첨부된 연구지역별 현장실험 계측결과표에 따르면 접선성분 (Transverse component) 입자속도의 경우 0.020~21.5cm/sec, 수직성분 (Vertical component) 입자속도의 경우 0.027~24.9cm/sec, 진행성분 (Longitudinal component) 입자속도의 경우 0.031~25.3cm/sec, 최대입자속도 (PPV, Peak Particle Velocity)의 경우 0.031~25.3cm/sec, 최대벡터합(PPV, Peak Particle Velocity) 입자속도의 경우 0.023~30.0cm/sec로 계측되었다.

4. 분석

4.1 정기폭에서 성분별(T, V, L) 회귀분석 및 예측

현장실험을 통해 계측된 지반진동 데이터(부록 참고)에서 정기폭에 의한 성분별(T, V, L) 데이터만을 수집하였다. 입지상수 K와 n을 구하기 위하여 최대진동속도와 환산거리의 로그-로그 그래프 상에서 1차 상관관계를 보이는 특성을 이용하였다. 그리고 통계처리하여 지반진동 예측식을 구하였다. 성분별 지반진동 데이터의 전산처리는 TunDesign™ 4의 보조프로그램인 TDTestBlast를 사용하였다.

Table 4.1은 현장실험을 통해 계측된 지반진동 데이터를 정기폭에서 각 성분별 데이터만 수집하여 회귀분석을 실시한 50, 95% 지반진동 예측식이다.

Table 4.1의 평균(50%) 지반진동 예측식을 이용하여 노모그램 분석을 실시한 결과(Figure 4.1, 4.2)는 다음과 같이 분석되었다. 여기서, V_T 는 접선방향성분의 진동속도, V_V 는 수직방향성분의 진동속도, V_L 은 진행방향성분의 진동속도이다.

(1) 자승근의 경우

$$SD < 5.1kg/w^{1/2} \quad V_V > V_L > V_T$$

$$5.1 \leq SD < 18.1kg/w^{1/2} \quad V_L > V_V > V_T$$

$$SD \geq 18.1kg/w^{1/2} \quad V_L > V_T > V_V$$

(2) 삼승근의 경우

$$SD < 7.2kg/w^{1/2} \quad V_V > V_L > V_T$$

$$7.2 \leq SD < 28.7kg/w^{1/2} \quad V_L > V_V > V_T$$

$$SD \geq 28.7kg/w^{1/2} \quad V_L > V_T > V_V$$

Table 4.1 Prediction equation of blasting vibration for component(T, V, L) velocity of top priming

Component	Square root method		Cube root method		Number of data	
		Prediction equation	r	Prediction equation		r
Transverse	50%	$V_{50} = 46.64 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.67}$	0.76	50%	$V_{50} = 86.29 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.67}$	0.76
	95%	$V_{95} = 148.46 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.67}$		95%	$V_{95} = 301.28 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.67}$	
Vertical	50%	$V_{50} = 76.40 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.84}$	0.82	50%	$V_{50} = 147.53 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.83}$	0.82
	95%	$V_{95} = 218.34 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.84}$		95%	$V_{95} = 432.69 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.83}$	
Longitudinal	50%	$V_{50} = 56.85 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.66}$	0.80	50%	$V_{50} = 105.54 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.66}$	0.80
	95%	$V_{95} = 158.54 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.66}$		95%	$V_{95} = 289.03 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.66}$	

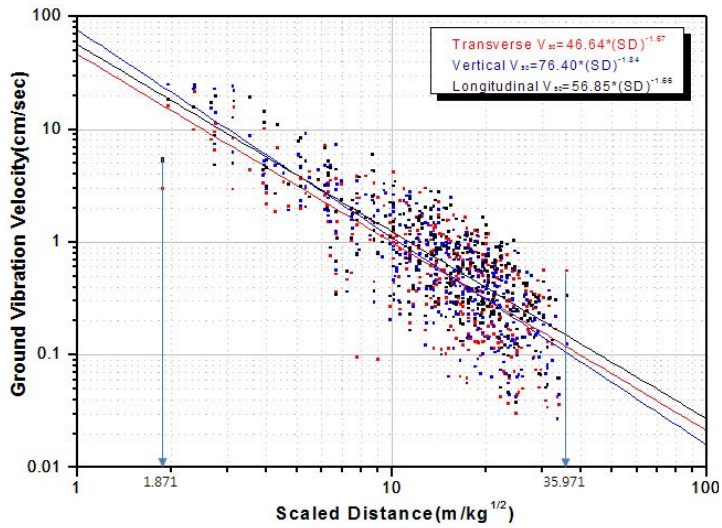


Figure 4.1 Relationship between T, V, L component velocity and square root scaled distance of top priming.

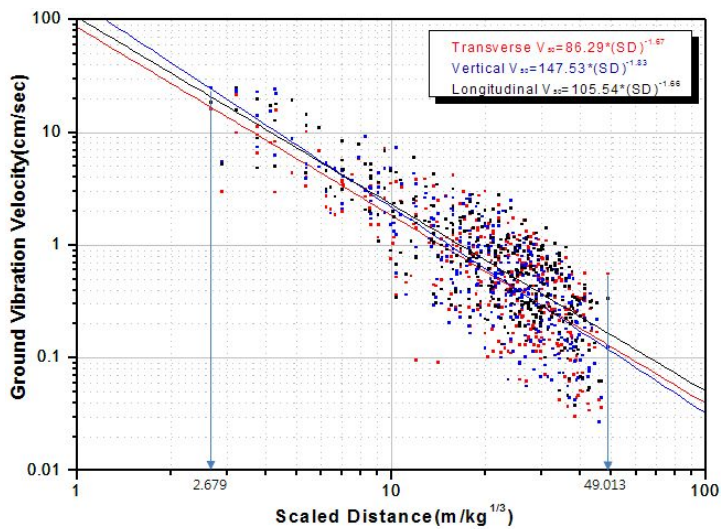


Figure 4.2 Relationship between T, V, L component velocity and cube root scaled distance of top priming.

4.2 중간기폭에서 성분별(T, V, L) 회귀분석 및 예측

현장실험을 통해 계측된 지반진동 데이터(부록 참고)에서 중간기폭에 의한 성분별(T, V, L) 데이터만을 수집하였다. 입지상수 K와 n을 구하기 위하여 최대진동속도와 환산거리의 로그-로그 그래프 상에서 1차 상관관계를 보이는 특성을 이용하였다. 그리고 통계처리하여 지반진동 예측식을 구하였다.

Table 4.2는 현장실험을 통해 계측된 지반진동 데이터를 중간기폭에서 각 성분별 데이터만 수집하여 회귀분석을 실시한 50, 95% 지반진동 예측식이다.

Table 4.2의 평균(50%) 지반진동 예측식을 이용하여 노모그램 분석을 실시한 결과(Figure 4.3, 4.4)는 다음과 같이 분석되었다.

(1) 자승근의 경우

$$\begin{array}{ll} \text{SD} < 2.5\text{kg}/w^{1/2} & V_V > V_L > V_T \\ 2.5 \leq \text{SD} < 24.5\text{kg}/w^{1/2} & V_L > V_V > V_T \\ \text{SD} \geq 24.5\text{kg}/w^{1/2} & V_L > V_T > V_V \end{array}$$

(2) 삼승근의 경우

$$\begin{array}{ll} \text{SD} < 1.9\text{kg}/w^{1/2} & V_V > V_L > V_T \\ 1.9 \leq \text{SD} < 6.2\text{kg}/w^{1/2} & V_L > V_V > V_T \\ \text{SD} \geq 6.2\text{kg}/w^{1/2} & V_L > V_T > V_V \end{array}$$

Table 4.2 Prediction equation of blasting vibration for component(T, V, L) velocity of middle priming

Component	Square root method		Cube root method		Number of data	
	Prediction equation		r	Prediction equation		r
Transverse	50%	$V_{50} = 46.94 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.71}$	0.80	50%	$V_{50} = 86.79 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.70}$	0.79
	95%	$V_{95} = 153.40 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.71}$		95%	$V_{95} = 294.27 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.70}$	
Vertical	50%	$V_{50} = 66.68 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.82}$	0.86	50%	$V_{50} = 124.83 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.80}$	0.85
	95%	$V_{95} = 176.96 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.82}$		95%	$V_{95} = 365.04 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.80}$	
Longitudinal	50%	$V_{50} = 59.84 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.70}$	0.82	50%	$V_{50} = 109.99 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.69}$	0.81
	95%	$V_{95} = 173.85 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.70}$		95%	$V_{95} = 348.23 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.69}$	

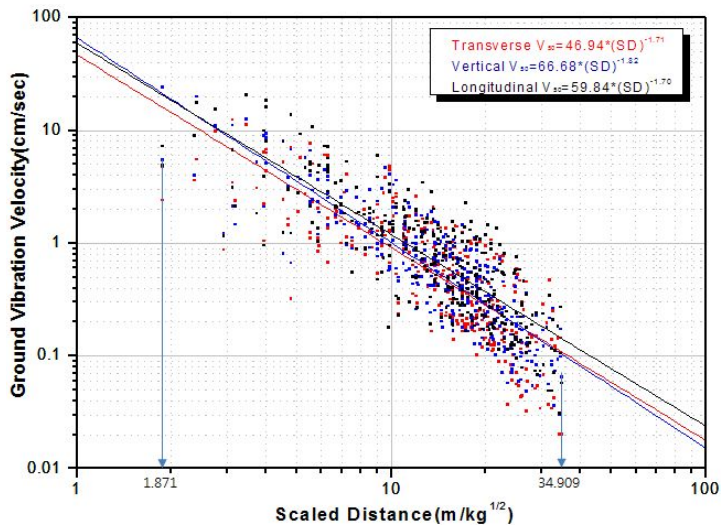


Figure 4.3 Relationship between T, V, L component velocity and square root scaled distance of middle priming.

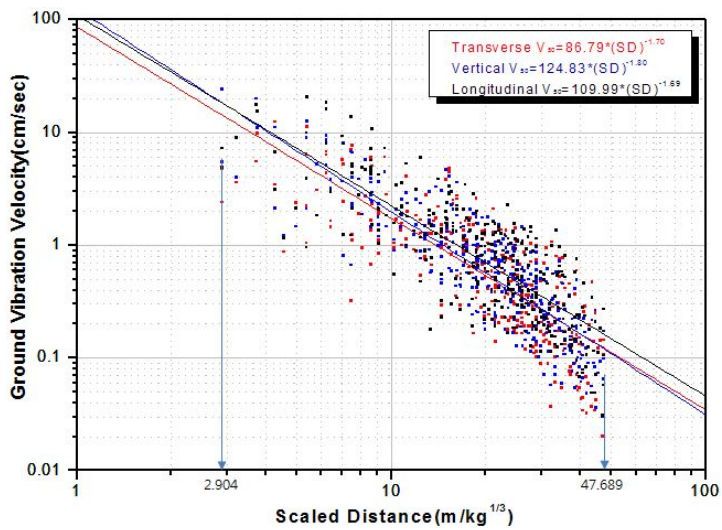


Figure 4.4 Relationship between T, V, L component velocity and cube root scaled distance of middle priming.

4.3 역기폭에서 성분별(T, V, L) 회귀분석 및 예측

현장실험을 통해 계측된 지반진동 데이터(부록 참고)에서 역기폭에 의한 성분별(T, V, L) 데이터만을 수집하였다. 입지상수 K와 n을 구하기 위하여 최대진동속도와 환산거리의 로그-로그 그래프 상에서 1차 상관관계를 보이는 특성을 이용하였다. 그리고 통계처리하여 지반진동 예측식을 구하였다.

Table 4.3은 현장실험을 통해 계측된 지반진동 데이터를 역기폭에서 각 성분별 데이터만 수집하여 회귀분석을 실시한 50, 95% 지반진동 예측식이다.

Table 4.3의 평균(50%) 지반진동 예측식을 이용하여 노모그램 분석을 실시한 결과(Figure 4.5, 4.6)는 다음과 같이 분석되었다.

(1) 자승근의 경우

$SD < 3.6kg/w^{1/2}$	$V_V > V_L > V_T$
$3.6 \leq SD < 36.3kg/w^{1/2}$	$V_L > V_V > V_T$
$SD \geq 36.3kg/w^{1/2}$	$V_L > V_T > V_V$

(2) 삼승근의 경우

$SD < 5.0kg/w^{1/2}$	$V_V > V_L > V_T$
$5.0 \leq SD < 37.3kg/w^{1/2}$	$V_L > V_V > V_T$
$SD \geq 37.3kg/w^{1/2}$	$V_L > V_T > V_V$

Table 4.3 Prediction equation of blasting vibration for component(T, V, L) velocity of bottom priming

Component	Square root method		Cube root method		Number of data	
		Prediction equation	r	Prediction equation		r
Transverse	50%	$V_{50} = 64.20 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.81}$	0.81	50%	$V_{50} = 122.43 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.79}$	0.80
	95%	$V_{95} = 233.07 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.81}$		95%	$V_{95} = 449.69 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.79}$	
Vertical	50%	$V_{50} = 88.64 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.90}$	0.85	50%	$V_{50} = 175.70 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.89}$	0.84
	95%	$V_{95} = 266.05 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.90}$		95%	$V_{95} = 537.83 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.89}$	
Longitudinal	50%	$V_{50} = 77.16 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.79}$	0.83	50%	$V_{50} = 144.96 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.77}$	0.82
	95%	$V_{95} = 229.61 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.79}$		95%	$V_{95} = 454.74 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.77}$	

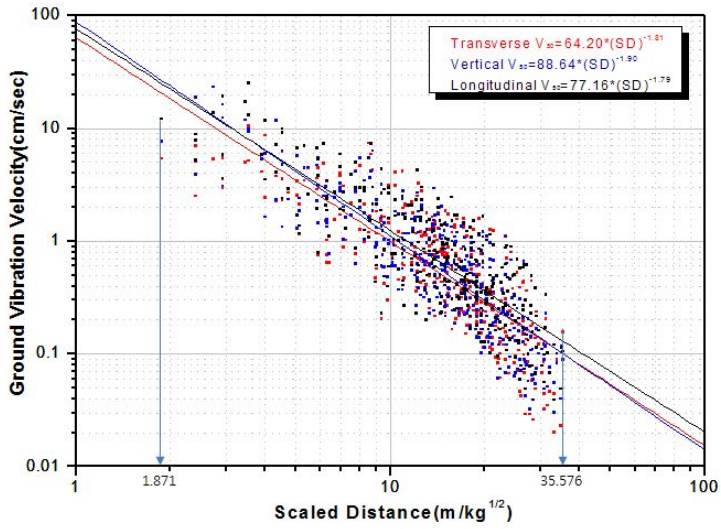


Figure 4.5 Relationship between T, V, L component velocity and square root scaled distance of bottom priming.

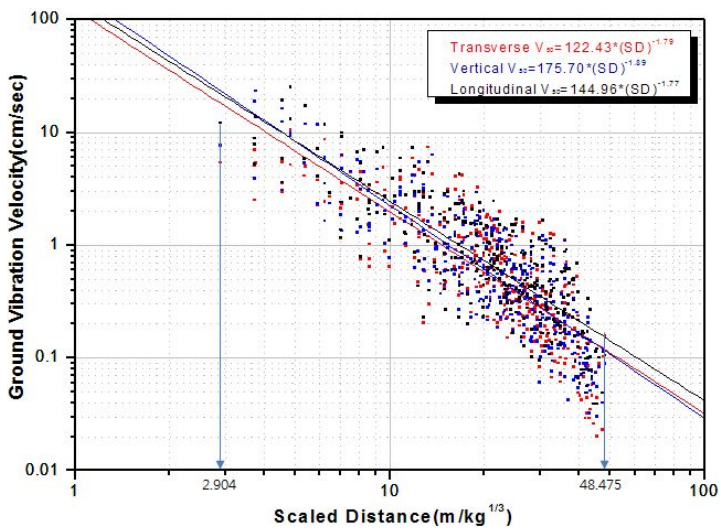


Figure 4.6 Relationship between T, V, L component velocity and cube root scaled distance of bottom priming.

4.4 기폭위치에 따른 최대입자속도(PPV)의 회귀분석 및 예측

현장실험을 통해 계측된 지반진동 데이터(부록 참고)에서 기폭위치에 따른 최대입자속도(PPV) 데이터만을 수집하였다. 입지상수 K와 n을 구하기 위하여 최대진동속도와 환산거리의 로그-로그 그래프 상에서 1차 상관관계를 보이는 특성을 이용하였다. 그리고 통계처리하여 지반진동 예측식을 구하였다.

Table 4.4는 현장실험을 통해 계측된 지반진동 데이터를 기폭위치에 따른 최대입자속도(PPV) 데이터만 수집하여 회귀분석을 실시한 50, 95% 지반진동 예측식이다.

Table 4.4의 평균(50%) 지반진동 예측식을 이용하여 노모그램 분석을 실시한 결과(Figure 4.7, 4.8)는 다음과 같이 분석되었다. 여기서, $PPV_{T.P}$ 는 정기폭의 최대입자속도, $PPV_{M.P}$ 는 중간기폭의 최대입자속도, $PPV_{B.P}$ 은 역기폭의 최대입자속도이다.

(1) 자승근의 경우

$SD < 3.7kg/w^{1/2}$	$PPV_{B.P} > PPV_{M.P} > PPV_{T.P}$
$3.7 \leq SD < 9.6kg/w^{1/2}$	$PPV_{B.P} > PPV_{T.P} > PPV_{M.P}$
$9.6 \leq SD < 21.8kg/w^{1/2}$	$PPV_{T.P} > PPV_{B.P} > PPV_{M.P}$
$SD \geq 21.8kg/w^{1/2}$	$PPV_{T.P} > PPV_{M.P} > PPV_{B.P}$

(2) 삼승근의 경우

$SD < 3.5kg/w^{1/2}$	$PPV_{B.P} > PPV_{M.P} > PPV_{T.P}$
$3.5 \leq SD < 13.4kg/w^{1/2}$	$PPV_{B.P} > PPV_{T.P} > PPV_{M.P}$
$13.4 \leq SD < 51.4kg/w^{1/2}$	$PPV_{T.P} > PPV_{B.P} > PPV_{M.P}$
$SD \geq 51.4kg/w^{1/2}$	$PPV_{T.P} > PPV_{M.P} > PPV_{B.P}$

Table 4.4 Prediction equation of blasting vibration for peak particle velocity(PPV) of different priming locations

Priming location	Square root method		Cube root method		Number of data	
		Prediction equation	r	Prediction equation		r
Top priming	50%	$V_{50} = 78.72 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.71}$	0.82	50%	$V_{50} = 150.36 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.71}$	359
	95%	$V_{95} = 202.57 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.71}$		95%	$V_{95} = 411.44 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.71}$	
Middle priming	50%	$V_{50} = 85.07 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.77}$	0.85	50%	$V_{50} = 161.94 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.77}$	339
	95%	$V_{95} = 223.90 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.77}$		95%	$V_{95} = 461.77 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.77}$	
Bottom priming	50%	$V_{50} = 105.43 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.84}$	0.84	50%	$V_{50} = 205.00 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.83}$	346
	95%	$V_{95} = 303.60 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.84}$		95%	$V_{95} = 627.63 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.83}$	

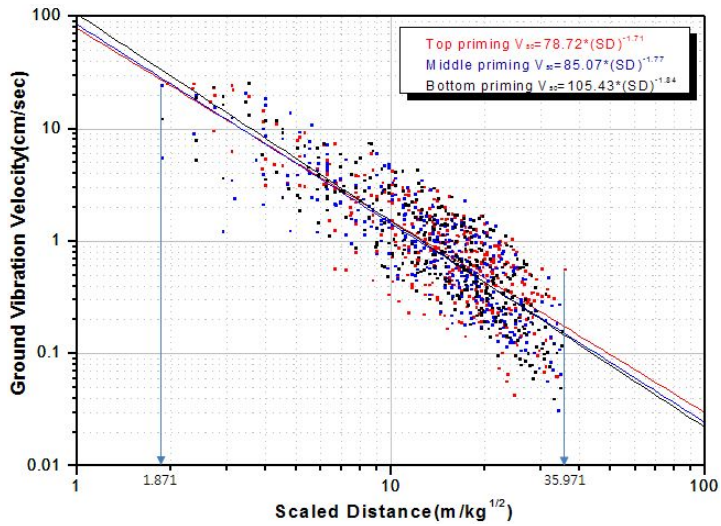


Figure 4.7 Relationship between peak particle velocity (PPV) and square root scaled distance of different priming locations.

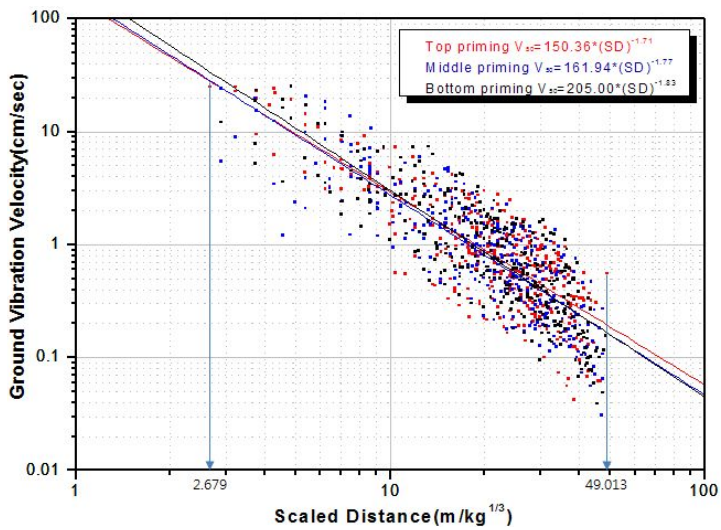


Figure 4.8 Relationship between peak particle velocity (PPV) and cube root scaled distance of different priming locations.

4.5 기폭위치에 따른 최대백터합(PVS)의 회귀분석 및 예측

현장실험을 통해 계측된 지반진동 데이터(부록 참고)에서 기폭위치에 따른 최대백터합(PVS) 데이터만을 수집하였다. 입지상수 K와 n을 구하기 위하여 최대진동속도와 환산거리의 로그-로그 그래프 상에서 1차 상관관계를 보이는 특성을 이용하였다. 그리고 통계처리하여 지반진동 예측식을 구하였다.

Table 4.5는 현장실험을 통해 계측된 지반진동 데이터를 기폭위치에 따른 최대백터합(PVS) 데이터만 수집하여 회귀분석을 실시한 50, 95% 지반진동 예측식이다.

Table 4.5의 평균(50%) 지반진동 예측식을 이용하여 노모그램 분석을 실시한 결과(Figure 4.9, 4.10)는 다음과 같이 분석되었다.

(1) 자승근의 경우

$SD < 3.2kg/w^{1/2}$	$PVS_{BP} > PVS_{MP} > PVS_{TP}$
$3.2 \leq SD < 9.0kg/w^{1/2}$	$PVS_{BP} > PVS_{TP} > PVS_{MP}$
$9.0 \leq SD < 21.7kg/w^{1/2}$	$PVS_{TP} > PVS_{BP} > PVS_{MP}$
$SD \geq 21.7kg/w^{1/2}$	$PVS_{TP} > PVS_{MP} > PVS_{BP}$

(2) 삼승근의 경우

$SD < 3.9kg/w^{1/2}$	$PVS_{BP} > PVS_{MP} > PVS_{TP}$
$3.9 \leq SD < 15.8kg/w^{1/2}$	$PVS_{BP} > PVS_{TP} > PVS_{MP}$
$15.8 \leq SD < 52.0kg/w^{1/2}$	$PVS_{TP} > PVS_{BP} > PVS_{MP}$
$SD \geq 52.0kg/w^{1/2}$	$PVS_{TP} > PVS_{MP} > PVS_{BP}$

Table 4.5 Prediction equation of blasting vibration for peak vector sum(PVS) of different priming locations

Priming location	Square root method		Cube root method		Number of data	
		Prediction equation	r	Prediction equation		r
Top priming	50%	$V_{50} = 94.63 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.73}$	0.81	50%	$V_{50} = 181.28 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.73}$	359
	95%	$V_{95} = 240.99 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.73}$		95%	$V_{95} = 481.81 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.73}$	
Middle priming	50%	$V_{50} = 101.35 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.79}$	0.85	50%	$V_{50} = 193.93 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.78}$	339
	95%	$V_{95} = 268.47 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.79}$		95%	$V_{95} = 547.69 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.78}$	
Bottom priming	50%	$V_{50} = 125.67 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.86}$	0.85	50%	$V_{50} = 245.60 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.84}$	346
	95%	$V_{95} = 374.77 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.86}$		95%	$V_{95} = 728.19 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.84}$	

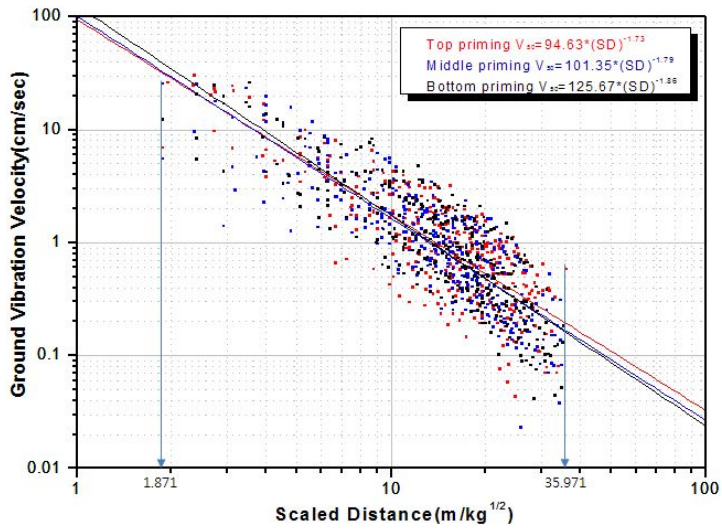


Figure 4.9 Relationship between peak vector sum(PVS) and square root scaled distance of different priming locations.

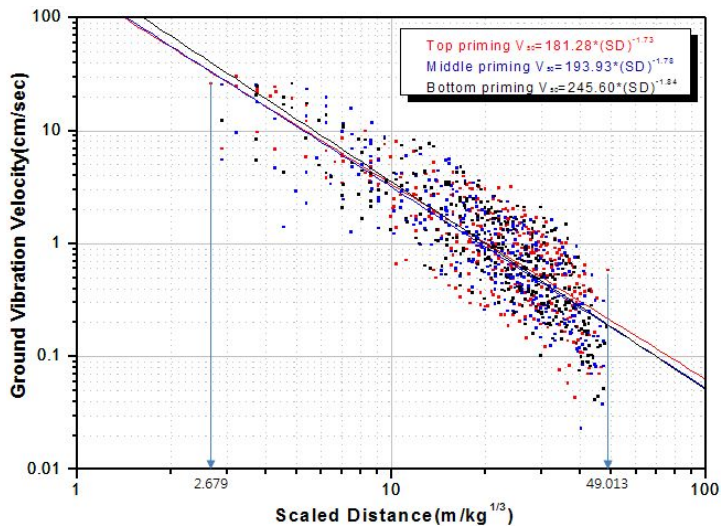


Figure 4.10 Relationship between peak vector sum(PVS) and cube root scaled distance of different priming locations.

5. 고찰

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

5.1 기폭위치에 따른 성분별(T, V, L) 입자속도의 진동특성 고찰

기폭위치에 따른 각 성분별(T, V, L) 입자속도의 평균 지반진동 예측식은 Table 4.1~4.3과 같다.

접선성분(T), 진행성분(L) 입자속도의 평균 지반진동 예측식으로 기폭위치별 노모그램 분석을 실시한 결과 정기폭의 근거리 지반진동은 세 기폭방법 중 가장 낮게 나타났으나 감쇠가 작아서 어느 정도 이격되면 가장 큰 지반진동이 나타났다. 그러나 접선성분(T)의 경우 지발당 장약량이 0.8kg이내이면 근거리에서는 정기폭이 중간기폭보다 지반진동 수준이 더 크게 예측되었다. 중간기폭은 역기폭보다 지반진동 수준이 낮았으나 거리가 어느 정도 이격되면 역기폭보다 크게 나타났다. 역기폭의 지반진동은 가장 크게 나타나나 감쇠가 커서 진동이 멀리 전파하지 않는 경향이 나타났다(Figure 4.1, 4.2, 4.5, 4.6).

수직성분(V) 입자속도의 평균 지반진동 예측식으로 기폭위치별 노모그램 분석을 실시한 결과 정기폭의 근거리 지반진동은 역기폭보다 작았으나 감쇠가 작아서 어느 정도 이격되면 가장 큰 지반진동이 나타났다. 중간기폭은 근

거리 지반진동이 세 기폭방법 중 가장 낮게 나타났으나 감쇠가 작아서 거리가 어느 정도 이격되면 역기폭보다 크게 나타났다. 역기폭의 지반진동은 가장 크게 나타나나 감쇠가 커서 진동이 멀리 전파하지 않는 경향이 나타났다 (Figure 4.3, 4.4).

각 성분별 평균 지반진동 예측식으로 분석한 결과 접선성분(T)과 진행성분(L)은 기폭위치에 따라 입지상수(K)와 감쇠지수(n)의 변화가 비슷한 경향이 나타났으나, 수직성분(V)의 경우 다른 경향이 나타났다.

기폭위치에 따른 성분별(T, V, L) 입자속도의 진동특성을 고찰하기 위해 Table 4.1~4.3의 평균 지반진동 예측식으로 거리에 따른 예측진동치를 Figure 5.1, 5.3, 5.5와 같이 도시하였다.

5.1.1 정기폭에서 성분별(T, V, L) 입자속도

Table 5.1은 정기폭에서 거리에 따른 성분별(T, V, L) 예측진동치와 감쇠정도를 나타낸 표이다.

정기폭에서 성분별(T, V, L) 입자속도의 평균 지반진동 예측식을 통한 10~100m의 이격거리에서 진동속도를 예측한 결과 장약량이 3.8kg 이내에서는 진행성분의 진동수준이 높게 예측되었고, 3.8kg 이상에서는 근거리에서는 수직성분이 원거리에서는 진행성분이 높게 예측되었다. 접선성분과 수직성분의 경우 장약량에 따라 두 성분의 역전되는 경향이 다르지만 대부분 근거리에서는 접선성분이 원거리에서는 수직성분의 진동수준이 낮게 예측되었다.

(1) 지발당 장약량이 0.5kg일 때

10~100m까지의 거리에서 접선성분(T)의 예측진동속도는 진행성분(L)의 예

측진동속도에 비해 최대 21.92%, 수직성분(V)의 예측진동속도는 진행성분(L)의 예측진동속도에 비해 최대 44.88%의 진동 감쇠효과가 예측되었다. 수직성분(V)의 예측진동속도는 10~13m 구간에서 접선성분(T)에 비해 최대 4.41%의 진동 증폭효과가 예측되었으나, 13~100m 구간에서는 접선성분(T)에 비해 최대 29.41%의 진동 감쇠효과가 예측되었다(Table 5.2, Figure 5.1~5.2).

(2) 지발당 장약량이 1.6kg일 때

10~100m까지의 거리에서 접선성분(T)의 예측진동속도는 진행성분(L)의 예측진동속도에 비해 최대 21.47%, 수직성분(V)의 예측진동속도는 진행성분(L)의 예측진동속도에 비해 최대 38.80%의 진동 감쇠효과가 예측되었다. 수직성분(V)의 예측진동속도는 10~24m 구간에서 접선성분(T)에 비해 최대 15.26%의 진동 증폭효과가 예측되었으나, 24~100m 구간에서는 접선성분(T)에 비해 최대 22.07%의 진동 감쇠효과가 예측되었다(Table 5.2, Figure 5.1~5.2).

(3) 지발당 장약량이 5kg일 때

10~100m까지의 거리에서 접선성분(T)의 예측진동속도는 진행성분(L)의 예측진동속도에 비해 최대 21.02%의 진동 감쇠효과가 예측되었다. 수직성분(V)의 예측진동속도는 10~12m 구간에서 진행성분(L)에 비해 최대 2.63%, 10~41m 구간에서 접선성분(T)의 비해 최대 26.98%의 진동 증폭효과가 예측되었으나, 12~100m 구간에서는 진행성분(L)에 비해 최대 32.19%, 41~100m 구간에서는 접선성분(T)에 비해 최대 14.15%의 진동 감쇠효과가 예측되었다(Table 5.2, Figure 5.1~5.2).

(4) 지발당 장약량이 15kg일 때

10~100m까지의 거리에서 접선성분(T)의 예측진동속도는 진행성분(L)의 예

측진동속도에 비해 최대 20.58%의 진동 감쇠효과가 예측되었다. 수직성분(V)의 예측진동속도는 10~21m 구간에서 진행성분(L)에 비해 최대 13.30%, 10~71m 구간에서 접선성분(T)의 비해 최대 39.41%의 진동 증폭효과가 예측되었으나, 21~100m 구간에서는 진행성분(L)에 비해 최대 25.15%, 71~100m 구간에서는 접선성분(T)에 비해 최대 5.75%의 진동 감쇠효과가 예측되었다(Table 5.2, Figure 5.1~5.2).

Table 5.1 The influence of charge per delay on the predicted ground vibration velocity for top priming

Distance (m)	Charge per delay (kg)	Predicted ground vibration velocity (cm/sec)			Percentage of attenuation (%)		
		V _T	V _V	V _L	V _L : V _T	V _L : V _V	V _T : V _V
10	0.5	0.559	0.584	0.700	20.10	16.58	-4.41
20		0.176	0.163	0.221	20.66	26.36	7.19
30		0.089	0.077	0.113	20.98	31.55	13.38
40		0.055	0.046	0.070	21.20	35.00	17.51
50		0.038	0.030	0.048	21.38	37.56	20.58
60		0.028	0.022	0.036	21.52	39.58	23.01
70		0.022	0.016	0.028	21.64	41.23	25.00
80		0.017	0.013	0.022	21.75	42.63	26.68
90		0.014	0.010	0.018	21.84	43.83	28.13
100		0.012	0.008	0.015	21.92	44.88	29.41
10	1.6	1.476	1.702	1.837	19.64	7.37	-15.26
20		0.464	0.475	0.581	20.19	18.24	-2.45
30		0.236	0.225	0.297	20.52	23.99	4.37
40		0.146	0.133	0.184	20.74	27.83	8.94
50		0.100	0.088	0.127	20.92	30.67	12.33
60		0.074	0.063	0.094	21.07	32.91	15.00
70		0.057	0.047	0.073	21.19	34.74	17.20
80		0.046	0.037	0.058	21.29	36.29	19.06
90		0.038	0.030	0.048	21.38	37.63	20.67
100		0.032	0.025	0.040	21.47	38.80	22.07

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

Table 5.1 Continued

Distance (m)	Charge per delay (kg)	Predicted ground vibration velocity (cm/sec)			Percentage of attenuation (%)		
		V _T	V _V	V _L	V _L : V _T	V _L : V _V	V _T : V _V
10	5	3.823	4.855	4.730	19.18	-2.63	-26.98
20		1.201	1.356	1.497	19.74	9.41	-12.87
30		0.610	0.643	0.764	20.06	15.79	-5.35
40		0.378	0.379	0.474	20.29	20.04	-0.32
50		0.260	0.251	0.327	20.47	23.18	3.41
60		0.192	0.180	0.242	20.61	25.66	6.36
70		0.148	0.135	0.187	20.74	27.70	8.78
80		0.119	0.106	0.150	20.84	29.41	10.83
90		0.097	0.085	0.123	20.94	30.90	12.60
100		0.082	0.070	0.103	21.02	32.19	14.15
10	15	9.567	13.338	11.773	18.73	-13.30	-39.41
20		3.007	3.726	3.725	19.30	-0.01	-23.92
30		1.528	1.767	1.900	19.62	7.03	-15.66
40		0.945	1.041	1.179	19.85	11.72	-10.14
50		0.651	0.690	0.814	20.03	15.20	-6.04
60		0.480	0.494	0.601	20.18	17.94	-2.81
70		0.371	0.372	0.466	20.30	20.18	-0.15
80		0.297	0.291	0.373	20.41	22.08	2.10
90		0.244	0.234	0.307	20.50	23.71	4.04
100		0.205	0.193	0.258	20.58	25.15	5.75

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

Table 5.2 Maximum percentage of attenuation on rate of velocity components for top priming

Charge per delay (kg)	Rate of velocity components	Distance (m)	Maximum percentage of attenuation (%)
0.5	$V_L : V_T$	10~100	21.92
	$V_L : V_V$	10~100	44.88
	$V_T : V_V$	10~13	-4.41
		13~100	29.41
1.6	$V_L : V_T$	10~100	21.47
	$V_L : V_V$	10~100	38.80
	$V_T : V_V$	10~24	-15.26
		24~100	22.07
5	$V_L : V_T$	10~100	21.02
	$V_L : V_V$	10~12	-2.63
		12~100	32.19
	$V_T : V_V$	10~41	-26.98
41~100		14.15	
15	$V_L : V_T$	10~100	20.58
	$V_L : V_V$	10~21	-13.30
		21~100	39.41
	$V_T : V_V$	10~71	-25.15
71~100		5.75	

Note) (+) : attenuation, (-) : amplification

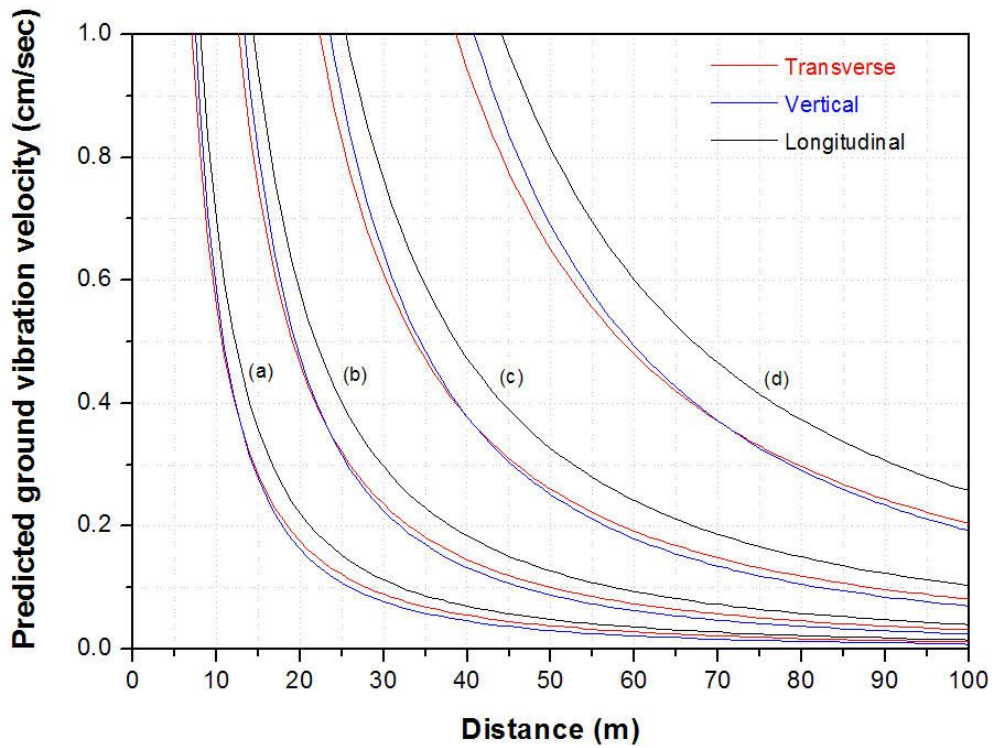


Figure 5.1 Relationship between predicted ground vibration velocity and distance for top priming: (a) charge per delay=0.5kg, (b) charge per delay=1.6kg, (c) charge per delay=5kg, (d) charge per delay=15kg.

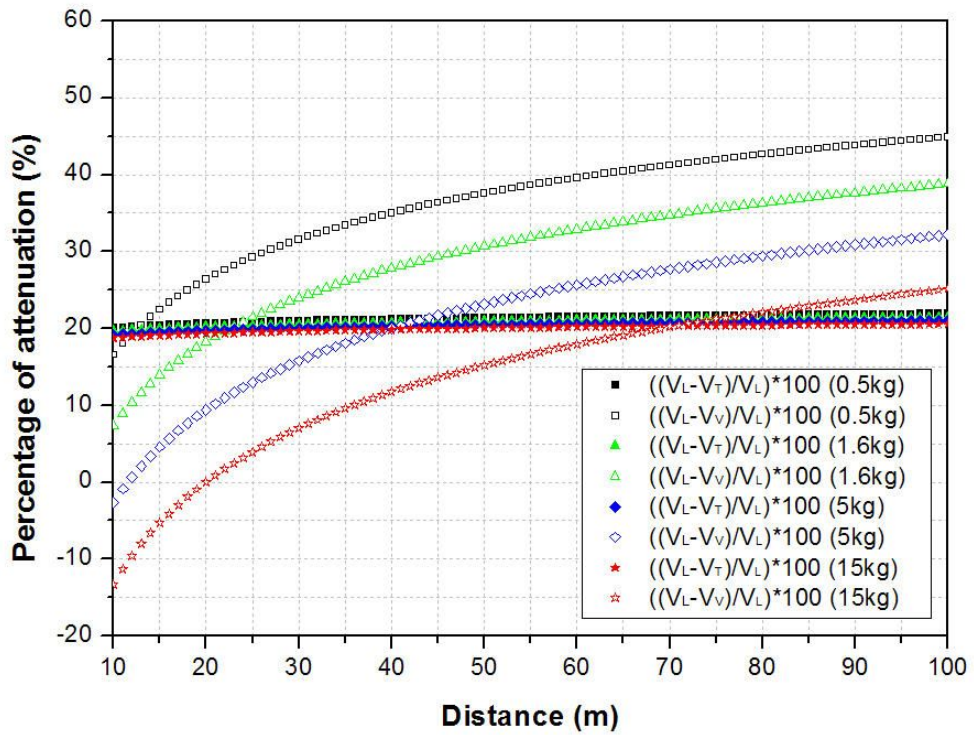


Figure 5.2 Relationship between percentage of attenuation and distance for top priming.

5.1.2 중간기폭에서 성분별(T, V, L) 입자속도

Table 5.3은 중간기폭에서 거리에 따른 성분별(T, V, L) 예측진동치와 감쇠 정도를 나타낸 표이다.

중간기폭에서 성분별(T, V, L) 입자속도의 평균 지반진동 예측식을 통한 10~100m의 이격거리에서 진동속도를 예측한 결과 대부분의 장약량에서 진행성분의 진동수준이 높게 예측되었다. 접선성분과 수직성분의 경우 장약량에 따라 두 성분의 역전되는 경향이 다르지만 대부분 근거리에서는 접선성분이 원거리에서는 수직성분의 진동수준이 낮게 예측되었다.

(1) 지발당 장약량이 0.5kg일 때

10~100m까지의 거리에서 접선성분(T)의 예측진동속도는 진행성분(L)의 예측진동속도에 비해 최대 25.35%, 수직성분(V)의 예측진동속도는 진행성분(L)의 예측진동속도에 비해 최대 38.49%의 진동 감쇠효과가 예측되었다. 수직성분(V)의 예측진동속도는 10~18m 구간에서 접선성분(T)에 비해 최대 6.14%의 진동 증폭효과가 예측되었으나, 18~100m 구간에서는 접선성분(T)에 비해 최대 17.61%의 진동 감쇠효과가 예측되었다(Table 5.4, Figure 5.3~5.4).

(2) 지발당 장약량이 1.6kg일 때

10~100m까지의 거리에서 접선성분(T)의 예측진동속도는 진행성분(L)의 예측진동속도에 비해 최대 24.91%, 수직성분(V)의 예측진동속도는 진행성분(L)의 예측진동속도에 비해 최대 34.04%의 진동 감쇠효과가 예측되었다. 수직성분(V)의 예측진동속도는 10~31m 구간에서 접선성분(T)에 비해 최대 13.16%의 진동 증폭효과가 예측되었으나, 31~100m 구간에서는 접선성분(T)에 비해

최대 12.16%의 진동 감쇠효과가 예측되었다(Table 5.4, Figure 5.3~5.4).

(3) 지발당 장약량이 5kg일 때

10~100m까지의 거리에서 접선성분(T)의 예측진동속도는 진행성분(L)의 예측진동속도에 비해 최대 24.48%, 수직성분(V)의 예측진동속도는 진행성분(L)의 예측진동속도에 비해 최대 29.38%의 진동 감쇠효과가 예측되었다. 수직성분(V)의 예측진동속도는 10~55m 구간에서 접선성분(T)에 비해 최대 20.47%의 진동 증폭효과가 예측되었으나, 55~100m 구간에서는 접선성분(T)에 비해 최대 6.48%의 진동 감쇠효과가 예측되었다(Table 5.4, Figure 5.3~5.4).

(4) 지발당 장약량이 15kg일 때

10~100m까지의 거리에서 접선성분(T)의 예측진동속도는 진행성분(L)의 예측진동속도에 비해 최대 24.07%, 수직성분(V)의 예측진동속도는 진행성분(L)의 예측진동속도에 비해 최대 24.57%의 진동 감쇠효과가 예측되었다. 수직성분(V)의 예측진동속도는 10~95m 구간에서 접선성분(T)에 비해 최대 27.98%의 진동 증폭효과가 예측되었으나, 95~100m 구간에서는 접선성분(T)에 비해 최대 0.66%의 진동 감쇠효과가 예측되었다(Table 5.4, Figure 5.3~5.4).

Table 5.3 The influence of charge per delay on the predicted ground vibration velocity for middle priming

Distance (m)	Charge per delay (kg)	Predicted ground vibration velocity (cm/sec)			Percentage of attenuation (%)		
		V _T	V _V	V _L	V _L : V _T	V _L : V _V	V _T : V _V
10	0.5	0.506	0.537	0.662	23.61	18.91	-6.14
20		0.155	0.152	0.204	24.14	25.39	1.65
30		0.077	0.073	0.102	24.44	28.93	5.94
40		0.047	0.043	0.063	24.66	31.34	8.87
50		0.032	0.029	0.043	24.83	33.16	11.08
60		0.024	0.021	0.031	24.96	34.60	12.84
70		0.018	0.016	0.024	25.08	35.80	14.31
80		0.014	0.012	0.019	25.18	36.82	15.56
90		0.012	0.010	0.016	25.27	37.71	16.65
100		0.010	0.008	0.013	25.35	38.49	17.61
10	1.6	1.368	1.548	1.780	23.16	13.05	-13.16
20		0.418	0.438	0.548	23.69	19.99	-4.85
30		0.209	0.210	0.275	24.00	23.79	-0.28
40		0.128	0.124	0.169	24.22	26.38	2.85
50		0.087	0.083	0.115	24.39	28.32	5.20
60		0.064	0.059	0.085	24.53	29.87	7.09
70		0.049	0.045	0.065	24.64	31.16	8.65
80		0.039	0.035	0.052	24.74	32.25	9.98
90		0.032	0.028	0.042	24.83	33.21	11.14
100		0.027	0.023	0.036	24.91	34.04	12.16

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

Table 5.3 Continued

Distance (m)	Charge per delay (kg)	Predicted ground vibration velocity (cm/sec)			Percentage of attenuation (%)		
		V _T	V _V	V _L	V _L : V _T	V _L : V _V	V _T : V _V
10	5	3.624	4.366	4.689	22.72	6.90	-20.47
20		1.108	1.236	1.443	23.26	14.33	-11.63
30		0.554	0.591	0.724	23.57	18.40	-6.76
40		0.339	0.350	0.444	23.79	21.17	-3.44
50		0.231	0.233	0.304	23.96	23.25	-0.93
60		0.169	0.167	0.223	24.10	24.91	1.08
70		0.130	0.126	0.172	24.21	26.29	2.74
80		0.103	0.099	0.137	24.31	27.46	4.16
90		0.085	0.080	0.112	24.40	28.48	5.39
100		0.071	0.066	0.094	24.48	29.38	6.48
10	15	9.270	11.864	11.931	22.30	0.56	-27.98
20		2.834	3.360	3.672	22.83	8.49	-18.58
30		1.417	1.606	1.843	23.15	12.84	-13.41
40		0.866	0.952	1.130	23.37	15.80	-9.88
50		0.591	0.634	0.773	23.54	18.02	-7.21
60		0.433	0.455	0.567	23.68	19.80	-5.09
70		0.333	0.344	0.437	23.80	21.27	-3.32
80		0.265	0.270	0.348	23.90	22.52	-1.81
90		0.216	0.218	0.285	23.99	23.61	-0.50
100		0.181	0.180	0.238	24.07	24.57	0.66

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

Table 5.4 Maximum percentage of attenuation on rate of velocity components for middle priming

Charge per delay (kg)	Rate of velocity components	Distance (m)	Maximum percentage of attenuation (%)
0.5	$V_L : V_T$	10~100	25.35
	$V_L : V_V$	10~100	38.49
	$V_T : V_V$	10~18	-6.14
		18~100	17.62
1.6	$V_L : V_T$	10~100	24.91
	$V_L : V_V$	10~100	34.04
	$V_T : V_V$	10~31	-13.16
		31~100	12.16
5	$V_L : V_T$	10~100	24.48
	$V_L : V_V$	10~100	29.38
	$V_T : V_V$	10~55	-20.47
		55~100	6.48
15	$V_L : V_T$	10~100	24.07
	$V_L : V_V$	10~100	24.57
	$V_T : V_V$	10~95	-27.98
		95~100	0.66

Note) (+) : attenuation, (-) : amplification

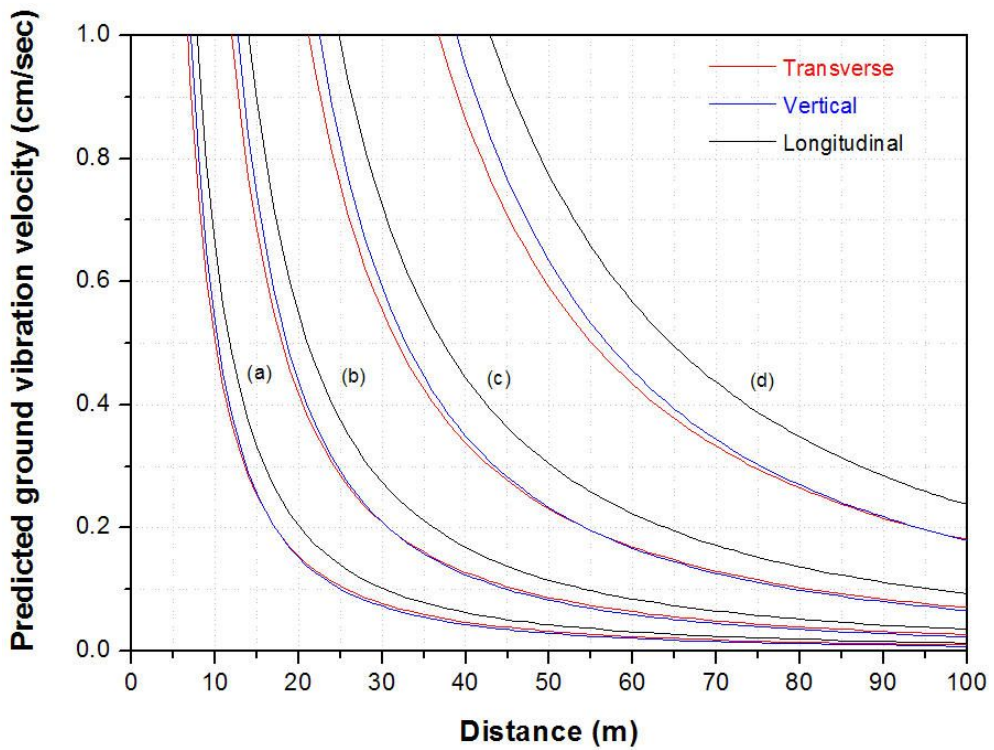


Figure 5.3 Relationship between predicted ground vibration velocity and distance for middle priming: (a) charge per delay=0.5kg, (b) charge per delay=1.6kg, (c) charge per delay=5kg, (d) charge per delay=15kg.

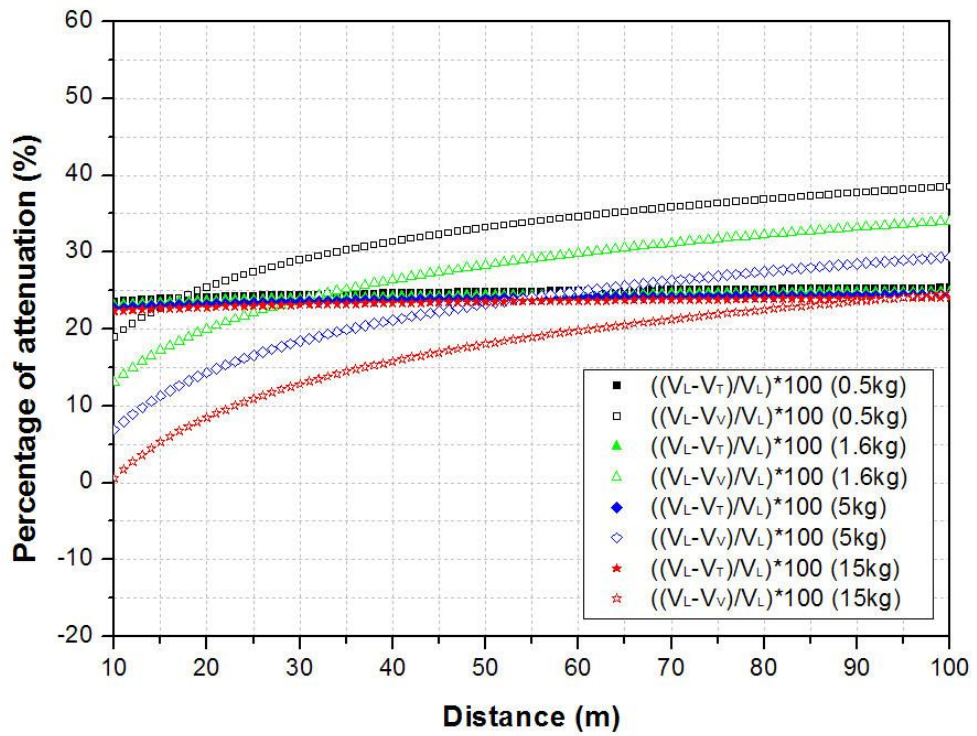


Figure 5.4 Relationship between percentage of attenuation and distance for middle priming.

5.1.3 역기폭에서 성분별(T, V, L) 입자속도

Table 5.5는 역기폭에서 거리에 따른 성분별(T, V, L) 예측진동치와 감쇠정도를 나타낸 표이다.

역기폭에서 성분별(T, V, L) 입자속도의 평균 지반진동 예측치를 통한 10~100m의 이격거리에서 진동속도를 예측한 결과 장약량이 8.1kg 이내에서는 진행성분의 진동수준이 높게 예측되었고, 8.1kg 이상에서는 근거리에서는 수직성분이 원거리에서는 진행성분이 높게 예측되었다. 접선성분과 수직성분의 경우 장약량이 8.7kg 이내에서는 두 성분의 역전되는 경향이 다르지만 대부분 근거리에서는 접선성분이 원거리에서는 수직성분의 진동수준이 낮게 예측되었고, 8.7kg 이상에서는 진행성분의 진동수준이 낮게 예측되었다.

(1) 지발당 장약량이 0.5kg일 때

10~100m까지의 거리에서 접선성분(T)의 예측진동속도는 진행성분(L)의 예측진동속도에 비해 최대 24.64%, 수직성분(V)의 예측진동속도는 진행성분(L)의 예측진동속도에 비해 최대 33.37%의 진동 감쇠효과가 예측되었다. 수직성분(V)의 예측진동속도는 10~26m 구간에서 접선성분(T)에 비해 최대 8.78%의 진동 증폭효과가 예측되었으나, 26~100m 구간에서는 접선성분(T)에 비해 최대 11.58%의 진동 감쇠효과가 예측되었다(Table 5.6, Figure 5.5~5.6).

(2) 지발당 장약량이 1.6kg일 때

10~100m까지의 거리에서 접선성분(T)의 예측진동속도는 진행성분(L)의 예측진동속도에 비해 최대 23.76%, 수직성분(V)의 예측진동속도는 진행성분(L)의 예측진동속도에 비해 최대 28.97%의 진동 감쇠효과가 예측되었다. 수직성

분(V)의 예측진동속도는 10~46m 구간에서 접선성분(T)에 비해 최대 14.63%의 진동 증폭효과가 예측되었으나, 46~100m 구간에서는 접선성분(T)에 비해 최대 6.83%의 진동 감쇠효과가 예측되었다(Table 5.6, Figure 5.5~5.6).

(3) 지발당 장약량이 5kg일 때

10~100m까지의 거리에서 접선성분(T)의 예측진동속도는 진행성분(L)의 예측진동속도에 비해 최대 22.89%, 수직성분(V)의 예측진동속도는 진행성분(L)의 예측진동속도에 비해 최대 24.37%의 진동 감쇠효과가 예측되었다. 수직성분(V)의 예측진동속도는 10~81m 구간에서 접선성분(T)에 비해 최대 20.66%의 진동 증폭효과가 예측되었으나, 81~100m 구간에서는 접선성분(T)에 비해 최대 1.93%의 진동 감쇠효과가 예측되었다(Table 5.6, Figure 5.5~5.6).

(4) 지발당 장약량이 15kg일 때

10~100m까지의 거리에서 접선성분(T)의 예측진동속도는 진행성분(L)의 예측진동속도에 비해 최대 22.03%의 진동 감쇠효과가 예측되었다. 수직성분(V)의 예측진동속도는 10~14m 구간에서 진행성분(L)에 비해 최대 3.50%의 진동 증폭효과가 예측되었으나, 14~100m 구간에서는 진행성분(L)에 비해 최대 19.66%의 진동 감쇠효과가 예측되었다. 수직성분(V)의 예측진동속도는 접선성분(T)에 비해 최대 26.77%의 진동 증폭효과가 예측되었다(Table 5.6, Figure 5.5~5.6).

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

Distance (m)	Charge per delay (kg)	Predicted ground vibration velocity (cm/sec)			Percentage of attenuation (%)		
		V _T	V _V	V _L	V _L : V _T	V _L : V _V	V _T : V _V
10	0.5	0.531	0.578	0.673	21.09	14.16	-8.78
20		0.151	0.155	0.195	22.18	20.46	-2.20
30		0.073	0.072	0.094	22.80	23.93	1.46
40		0.043	0.041	0.056	23.25	26.30	3.98
50		0.029	0.027	0.038	23.59	28.09	5.89
60		0.021	0.019	0.027	23.87	29.52	7.42
70		0.016	0.014	0.021	24.10	30.70	8.70
80		0.012	0.011	0.016	24.30	31.71	9.79
90		0.010	0.009	0.013	24.48	32.59	10.74
100		0.008	0.007	0.011	24.64	33.37	11.58
10	1.6	1.521	1.744	1.906	20.17	8.49	-14.63
20		0.434	0.467	0.551	21.27	15.21	-7.69
30		0.208	0.216	0.267	21.90	18.91	-3.83
40		0.124	0.125	0.159	22.35	21.43	-1.18
50		0.083	0.082	0.107	22.70	23.34	0.83
60		0.059	0.058	0.077	22.98	24.86	2.45
70		0.045	0.043	0.059	23.21	26.12	3.79
80		0.035	0.034	0.046	23.42	27.20	4.94
90		0.029	0.027	0.037	23.60	28.14	5.94
100		0.024	0.022	0.031	23.76	28.97	6.83

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

Table 5.5 Continued

Distance (m)	Charge per delay (kg)	Predicted ground vibration velocity (cm/sec)			Percentage of attenuation (%)		
		V _T	V _V	V _L	V _L : V _T	V _L : V _V	V _T : V _V
10	5	4.267	5.148	5.284	19.25	2.57	-20.66
20		1.217	1.379	1.528	20.36	9.72	-13.36
30		0.584	0.638	0.739	21.01	13.66	-9.30
40		0.347	0.370	0.442	21.46	16.35	-6.50
50		0.232	0.242	0.296	21.81	18.38	-4.39
60		0.167	0.171	0.214	22.09	20.00	-2.69
70		0.126	0.128	0.162	22.33	21.35	-1.27
80		0.099	0.099	0.128	22.54	22.49	-0.06
90		0.080	0.079	0.103	22.72	23.49	0.99
100		0.066	0.065	0.086	22.89	24.37	1.93
10	15	11.532	14.619	14.125	18.36	-3.50	-26.77
20		3.289	3.917	4.085	19.48	4.10	-19.10
30		1.579	1.813	1.977	20.13	8.29	-14.84
40		0.938	1.050	1.181	20.59	11.14	-11.90
50		0.626	0.687	0.792	20.95	13.30	-9.68
60		0.450	0.486	0.572	21.23	15.02	-7.89
70		0.341	0.362	0.434	21.48	16.45	-6.40
80		0.267	0.281	0.342	21.69	17.67	-5.13
90		0.216	0.225	0.277	21.87	18.73	-4.02
100		0.179	0.184	0.229	22.03	19.66	-3.04

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

Table 5.6 Maximum percentage of attenuation on rate of velocity components for bottom priming

Charge per delay (kg)	Rate of velocity components	Distance (m)	Maximum percentage of attenuation (%)
0.5	$V_L : V_T$	10~100	24.64
	$V_L : V_V$	10~100	33.37
	$V_T : V_V$	10~26	-8.78
		26~100	11.58
1.6	$V_L : V_T$	10~100	23.76
	$V_L : V_V$	10~100	28.97
	$V_T : V_V$	10~46	-14.63
		46~100	6.83
5	$V_L : V_T$	10~100	22.89
	$V_L : V_V$	10~100	24.37
	$V_T : V_V$	10~81	-20.66
		55~100	1.93
15	$V_L : V_T$	10~100	22.03
	$V_L : V_V$	10~14	-3.50
		14~100	19.66
	$V_T : V_V$	10~100	-26.77

Note) (+) : attenuation, (-) : amplification

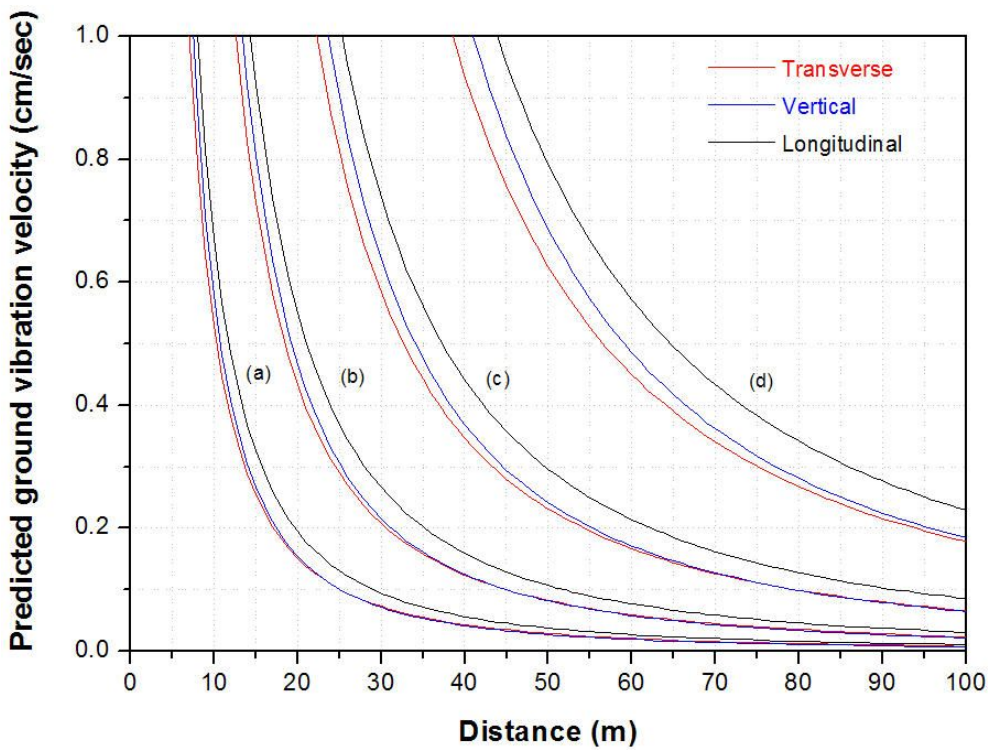


Figure 5.5 Relationship between predicted ground vibration velocity and distance for bottom priming: (a) charge per delay=0.5kg, (b) charge per delay=1.6kg, (c) charge per delay=5kg, (d) charge per delay=15kg.

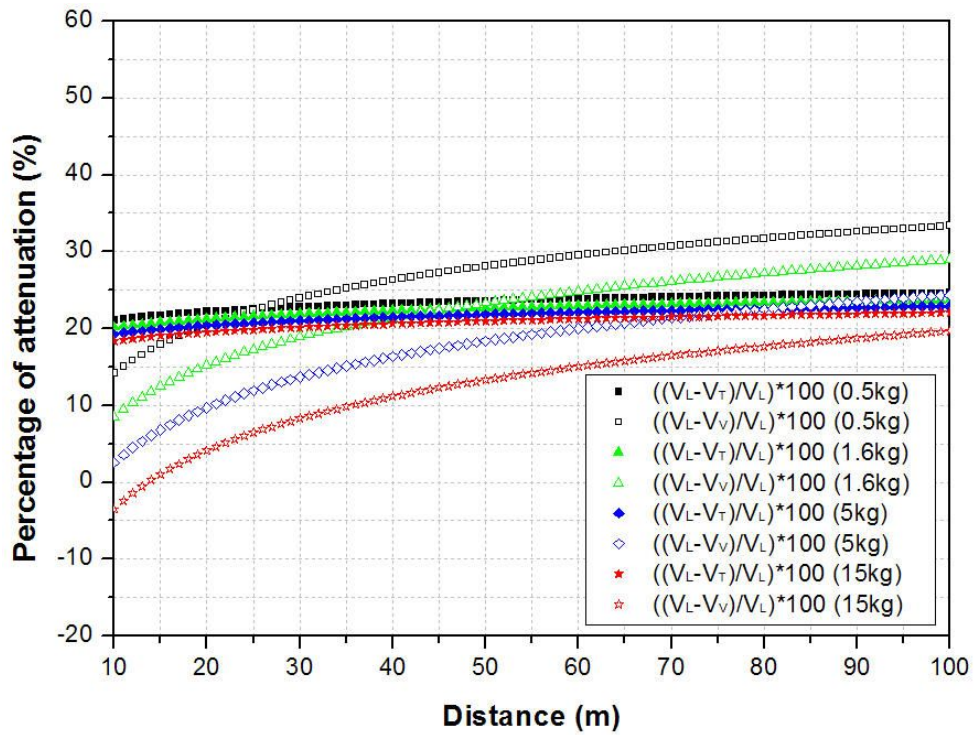


Figure 5.6 Relationship between percentage of attenuation and distance for bottom priming.

5.2 기폭위치에 따른 최대입자속도(PPV)와 최대백터합(PVS)의 진동특성 고찰

기폭위치에 따른 최대입자속도(PPV)와 최대백터합(PVS)의 평균 지반진동 예측식은 Table 4.4~4.5과 같다.

최대입자속도(PPV)와 최대백터합(PVS)의 평균 지반진동 예측식으로 기폭 위치별 노모그램 분석을 실시한 결과(Figure 4.7~4.10) 정기폭의 지반진동은 근거리에서는 낮게 나타났으나 감쇠가 작아서 거리가 어느 정도 이격되면 가장 큰 지반진동이 나타났다. 중간기폭의 근거리 지반진동은 역기폭보다 낮게 나타났으나 거리가 어느 정도 이격되면서 역기폭보다 높은 지반진동이 나타났다. 역기폭의 지반진동은 가장 크게 나타나나 감쇠가 커서 지반진동이 급격히 줄어드는 경향이 나타났다.

자승근 환산거리가 $1\text{m}/\text{kg}^{1/2}$ 에서 최대입자속도(PPV)와 최대백터합(PVS)의 지반진동수준을 비교해 보면 최대백터합(PVS)이 최대입자속도(PPV)보다 약 20%정도 높은 진동수준이 나타났다.

기폭위치에 따른 최대입자속도(PPV)와 최대백터합(PVS)의 진동특성을 고찰하기 위해 Table 4.4와 4.5의 평균 지반진동 예측식으로 거리에 따른 예측진동치를 Figure 5.7, 5.9와 같이 도시하였다.

5.2.1 기폭위치에 따른 최대입자속도(PPV)

Table 5.7은 기폭위치에 따른 거리별 최대입자속도(PPV)의 예측진동치와 감쇠정도를 나타낸 표이다.

기폭위치에 따른 최대입자속도(PPV)의 평균 지반진동 예측식을 통한 10~

100m의 이격거리에서 진동속도를 예측한 결과 장약량이 1.1kg이내에서는 정기폭의 진동수준이 높게 예측되었고, 1.1kg 이상에서는 근거리에서는 역기폭이 원거리에서는 정기폭이 높게 예측되었다. 중간기폭과 역기폭의 경우 장약량에 따라 두 성분의 역전되는 경향이 다르지만 대부분 근거리에서는 중간기폭이 원거리에서는 역기폭의 진동수준이 낮게 예측되었다.

(1) 지발당 장약량이 0.5kg일 때

10~100m까지의 거리에서 중간기폭의 예측진동속도는 정기폭의 예측진동속도에 비해 최대 19.71%, 역기폭의 예측진동속도는 정기폭의 예측진동속도에 비해 최대 29.64%의 진동 감쇠효과가 예측되었다. 역기폭의 예측진동속도는 10~15m 구간에서 중간기폭에 비해 최대 2.96%의 진동 증폭효과가 예측되었으나, 15~100m 구간에서는 중간기폭의 예측진동속도보다 최대 12.37%의 진동 감쇠효과가 예측되었다(Table 5.8, Figure 5.7~5.8).

(2) 지발당 장약량이 1.6kg일 때

10~100m까지의 거리에서 중간기폭의 예측진동속도는 정기폭의 예측진동속도에 비해 최대 16.86%의 진동 감쇠효과가 예측되었다. 역기폭의 예측진동속도는 10~12m 구간에서 정기폭에 비해 최대 2.36%, 10~28m 구간에서 중간기폭에 비해 최대 7.23%의 진동 증폭효과가 예측되었으나, 12~100m 구간에서는 정기폭보다 최대 24.12%, 28~100m 구간에서는 중간기폭보다 최대 8.73%의 진동 감쇠효과가 예측되었다(Table 5.8, Figure 5.7~5.8).

(3) 지발당 장약량이 5kg일 때

10~100m까지의 거리에서 중간기폭의 예측진동속도는 정기폭의 예측진동속도에 비해 최대 13.97%의 진동 감쇠효과가 예측되었다. 역기폭의 예측진동속

도는 10~22m 구간에서 정기폭에 비해 최대 10.23%, 10~47m 구간에서 중간기폭에 비해 최대 11.60%의 진동 증폭효과가 예측되었으나, 22~100m 구간에서는 정기폭보다 최대 18.28%, 47~100m 구간에서는 중간기폭보다 최대 5.02%의 진동 감쇠효과가 예측되었다(Table 5.8, Figure 5.7~5.8).

(4) 지발당 장약량이 15kg일 때

10~100m까지의 거리에서 중간기폭의 예측진동속도는 10~14m 구간에서 정기폭보다 최대 2.09%의 진동 증폭효과가 예측되었고, 14~100m 구간에서 정기폭보다 최대 11.09%의 진동 감쇠효과가 예측되었다. 역기폭의 예측진동속도는 10~36m 구간에서 정기폭에 보다 최대 18.39%, 10~83m 구간에서 중간기폭에 비해 최대 15.97%의 진동 증폭효과가 예측되었으나, 36~100m 구간에서는 정기폭보다 최대 12.23%, 83~100m 구간에서는 중간기폭보다 최대 1.29%의 진동 감쇠효과가 예측되었다(Table 5.8, Figure 5.7~5.8).

Table 5.7 The influence of charge per delay on the predicted ground vibration velocity for different priming locations(PPV)

Distance (m)	Charge per delay (kg)	Predicted ground vibration velocity (cm/sec)			Percentage of attenuation (%)		
		PPV _{TP}	PPV _{MP}	PPV _{BP}	PPV _{TP} : PPV _{MP}	PPV _{TP} : PPV _{BP}	PPV _{MP} : PPV _{BP}
10	0.5	0.849	0.782	0.805	7.81	5.09	-2.96
20		0.259	0.229	0.225	11.57	13.27	1.92
30		0.130	0.112	0.107	13.70	17.72	4.66
40		0.079	0.067	0.063	15.17	20.74	6.57
50		0.054	0.045	0.042	16.30	23.01	8.01
60		0.040	0.033	0.030	17.21	24.81	9.18
70		0.030	0.025	0.022	17.97	26.30	10.15
80		0.024	0.020	0.018	18.63	27.57	10.99
90		0.020	0.016	0.014	19.20	28.67	11.72
100		0.017	0.013	0.012	19.71	29.64	12.37
10	1.6	2.294	2.190	2.348	4.54	-2.36	-7.23
20		0.701	0.642	0.656	8.43	6.46	-2.16
30		0.351	0.313	0.311	10.63	11.26	0.70
40		0.214	0.188	0.183	12.16	14.52	2.68
50		0.146	0.127	0.122	13.33	16.96	4.19
60		0.107	0.092	0.087	14.27	18.91	5.41
70		0.082	0.070	0.065	15.06	20.52	6.42
80		0.066	0.055	0.051	15.74	21.88	7.29
90		0.054	0.045	0.041	16.33	23.07	8.05
100		0.045	0.037	0.034	16.86	24.12	8.73

Note) PPV_{TP}=PPV of top priming, PPV_{MP}=PPV of middle priming, PPV_{BP}=PPV of bottom priming

Table 5.7 Continued

Distance (m)	Charge per delay (kg)	Predicted ground vibration velocity (cm/sec)			Percentage of attenuation (%)		
		PPV _{TP}	PPV _{MP}	PPV _{BP}	PPV _{TP} : PPV _{MP}	PPV _{TP} : PPV _{BP}	PPV _{MP} : PPV _{BP}
10	5	6.077	6.003	6.699	1.22	-10.23	-11.60
20		1.858	1.760	1.871	5.25	-0.73	-6.31
30		0.929	0.859	0.887	7.52	4.44	-3.34
40		0.568	0.516	0.523	9.11	7.95	-1.28
50		0.388	0.348	0.347	10.31	10.58	0.29
60		0.284	0.252	0.248	11.29	12.67	1.56
70		0.218	0.192	0.187	12.11	14.40	2.61
80		0.174	0.151	0.146	12.81	15.88	3.52
90		0.142	0.123	0.118	13.42	17.16	4.31
100		0.118	0.102	0.097	13.97	18.28	5.02
10	15	15.547	15.871	18.406	-2.09	-18.39	-15.97
20		4.752	4.654	5.141	2.07	-8.19	-10.48
30		2.376	2.270	2.438	4.42	-2.64	-7.39
40		1.453	1.364	1.436	6.06	1.13	-5.25
50		0.992	0.919	0.952	7.31	3.96	-3.62
60		0.726	0.666	0.681	8.32	6.21	-2.30
70		0.558	0.507	0.513	9.16	8.07	-1.20
80		0.444	0.400	0.401	9.89	9.65	-0.26
90		0.363	0.325	0.323	10.52	11.02	0.56
100		0.303	0.270	0.266	11.09	12.23	1.29

Note) PPV_{TP}=PPV of top priming, PPV_{MP}=PPV of middle priming, PPV_{BP}=PPV of bottom priming

Table 5.8 Maximum percentage of attenuation on rate of velocity components for different priming locations(PPV)

Charge per delay (kg)	Rate of velocity components	Distance (m)	Maximum percentage of attenuation (%)
0.5	PPV _{TP} : PPV _{MP}	10~100	19.71
	PPV _{TP} : PPV _{BP}	10~100	29.64
	PPV _{MP} : PPV _{BP}	10~15	-2.96
		15~100	12.37
1.6	PPV _{TP} : PPV _{MP}	10~100	16.86
	PPV _{TP} : PPV _{BP}	10~12	-2.36
		12~100	24.12
	PPV _{MP} : PPV _{BP}	10~28	-7.23
28~100		8.73	
5	PPV _{TP} : PPV _{MP}	10~100	13.97
	PPV _{TP} : PPV _{BP}	10~22	-10.23
		22~100	18.28
	PPV _{MP} : PPV _{BP}	10~47	-11.60
47~100		5.02	
15	PPV _{TP} : PPV _{MP}	10~14	-2.09
		14~100	11.09
	PPV _{TP} : PPV _{BP}	10~36	-18.39
		36~100	12.23
	PPV _{MP} : PPV _{BP}	10~83	-15.97
		83~100	1.29

Note) (+) : attenuation, (-) : amplification

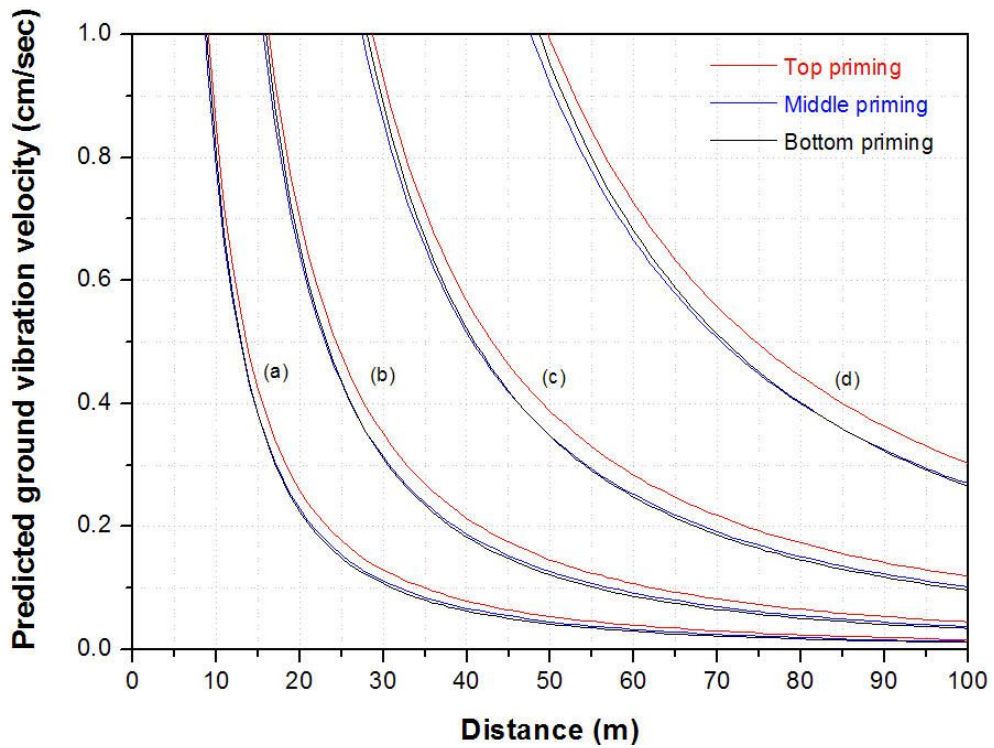


Figure 5.7 Relationship between predicted ground vibration velocity and distance for different priming locations(PPV): (a) charge per delay=0.5kg, (b) charge per delay=1.6kg, (c) charge per delay=5kg, (d) charge per delay=15kg.

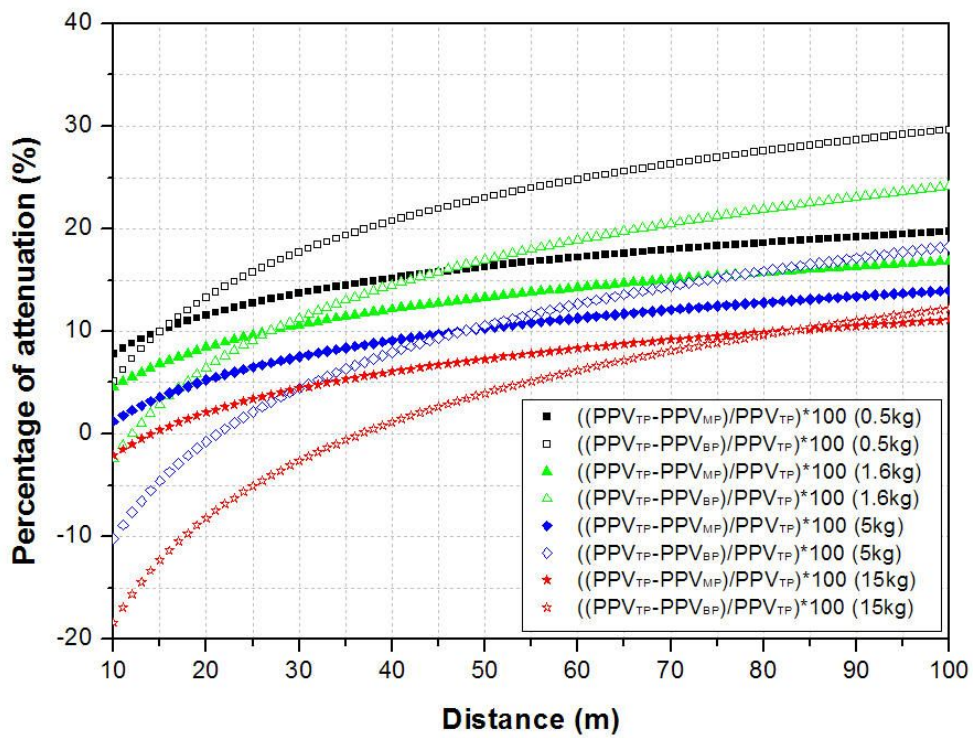


Figure 5.8 Relationship between percentage of attenuation and distance for different priming locations(PPV).

5.2.2 기폭위치에 따른 최대백터합(PVS)

Table 5.9는 기폭위치에 따른 거리별 최대백터합(PVS)의 예측진동치와 감쇠 정도를 나타낸 표이다.

기폭위치에 따른 최대백터합(PVS)의 평균 지반진동 예측식을 통한 10~100m의 이격거리에서 진동속도를 예측한 결과 장약량이 1.3kg이내에서는 정기폭의 진동수준이 높게 예측되었고, 1.3kg 이상에서는 근거리에서는 역기폭이 원거리에서는 정기폭이 높게 예측되었다. 중간기폭과 역기폭의 경우 장약량에 따라 두 성분의 역전되는 경향이 다르지만 대부분 근거리에서는 중간기폭이 원거리에서는 역기폭의 진동수준이 낮게 예측되었다.

(1) 지발당 장약량이 0.5kg일 때

10~100m까지의 거리에서 중간기폭의 예측진동속도는 정기폭의 예측진동속도에 비해 최대 20.43%의 진동감쇠효과가 예측되었고, 역기폭의 예측진동속도는 정기폭의 예측진동속도에 비해 최대 30.24%의 진동 감쇠효과가 예측되었다. 역기폭의 예측진동속도는 10~16m 구간에서 중간기폭에 비해 최대 3.01%의 진동 증폭효과가 예측되었으나, 16~100m 구간에서는 중간기폭보다 최대 12.33%의 진동 감쇠효과가 예측되었다(Table 5.10, Figure 5.9~5.10).

(2) 지발당 장약량이 1.6kg일 때

10~100m까지의 거리에서 중간기폭의 예측진동속도는 정기폭의 예측진동속도에 비해 최대 17.60%의 진동감쇠효과가 예측되었다. 역기폭의 예측진동속도는 10~12m 구간에서 정기폭에 비해 최대 1.50%, 10~28m 구간에서 중간기폭에 비해 최대 7.29%의 진동 증폭효과가 예측되었으나, 12~100m 구간에서는

정기폭보다 최대 24.76%, 28~100m 구간에서는 중간기폭보다 최대 8.68%의 진동 감쇠효과가 예측되었다(Table 5.10, Figure 5.9~5.10).

(3) 지발당 장약량이 5kg일 때

10~100m까지의 거리에서 중간기폭의 예측진동속도는 정기폭의 예측진동속도에 비해 최대 14.74%의 진동감쇠효과가 예측되었다. 역기폭의 예측진동속도는 10~20m 구간에서 정기폭에 비해 최대 9.30%, 10~49m 구간에서 중간기폭에 비해 최대 11.65%의 진동 증폭효과가 예측되었으나, 20~100m 구간에서는 정기폭보다 최대 18.97%, 49~100m 구간에서는 중간기폭보다 최대 4.97%의 진동 감쇠효과가 예측되었다(Table 5.10, Figure 5.9~5.10).

(4) 지발당 장약량이 15kg일 때

10~100m까지의 거리에서 중간기폭의 예측진동속도는 10~13m 구간에서 정기폭보다 최대 1.18%의 진동 증폭효과가 예측되었고, 13~100m 구간에서 정기폭보다 최대 11.88%의 진동 감쇠효과가 예측되었다. 역기폭의 예측진동속도는 10~35m 구간에서 정기폭에 비해 최대 17.39%, 10~84m 구간에서는 중간기폭에 비해 최대 16.03%의 진동 증폭효과가 예측되었으나, 35~100m 구간에서는 정기폭보다 최대 12.97%, 84~100m 구간에서는 중간기폭보다 최대 1.24%의 진동 감쇠효과가 예측되었다(Table 5.10, Figure 5.9~5.10).

Table 5.9 The influence of charge per delay on the predicted ground vibration velocity for different priming locations(PVS)

Distance (m)	Charge per delay (kg)	Predicted ground vibration velocity (cm/sec)			Percentage of attenuation (%)		
		PVS _{TP}	PVS _{MP}	PVS _{BP}	PVS _{TP} : PVS _{MP}	PVS _{TP} : PVS _{BP}	PVS _{MP} : PVS _{BP}
10	0.5	0.967	0.884	0.910	8.64	5.89	-3.01
20		0.292	0.256	0.251	12.36	14.00	1.87
30		0.145	0.124	0.118	14.47	18.42	4.62
40		0.088	0.074	0.069	15.93	21.41	6.52
50		0.060	0.050	0.046	17.05	23.66	7.97
60		0.044	0.036	0.033	17.95	25.45	9.13
70		0.033	0.027	0.024	18.71	26.92	10.11
80		0.027	0.021	0.019	19.35	28.18	10.95
90		0.022	0.017	0.015	19.92	29.27	11.68
100		0.018	0.014	0.013	20.43	30.24	12.33
10	1.6	2.646	2.503	2.686	5.39	-1.50	-7.29
20		0.798	0.724	0.740	9.25	7.25	-2.21
30		0.396	0.350	0.348	11.43	12.01	0.65
40		0.240	0.209	0.204	12.94	15.24	2.63
50		0.163	0.140	0.135	14.10	17.66	4.14
60		0.119	0.101	0.096	15.04	19.59	5.36
70		0.091	0.077	0.072	15.82	21.19	6.37
80		0.072	0.061	0.056	16.49	22.54	7.25
90		0.059	0.049	0.045	17.08	23.72	8.01
100		0.049	0.041	0.037	17.60	24.76	8.68

Note) PVS_{TP}=PVS of top priming, PVS_{MP}=PVS of middle priming, PVS_{BP}=PVS of bottom priming

Table 5.9 Continued

Distance (m)	Charge per delay (kg)	Predicted ground vibration velocity (cm/sec)			Percentage of attenuation (%)		
		PVS _{TP}	PVS _{MP}	PVS _{BP}	PVS _{TP} : PVS _{MP}	PVS _{TP} : PVS _{BP}	PVS _{MP} : PVS _{BP}
10	5	7.090	6.941	7.750	2.10	-9.30	-11.65
20		2.137	2.007	2.135	6.09	0.11	-6.37
30		1.060	0.971	1.004	8.35	5.24	-3.39
40		0.644	0.580	0.588	9.92	8.72	-1.33
50		0.438	0.389	0.388	11.12	11.33	0.24
60		0.319	0.281	0.277	12.08	13.41	1.51
70		0.245	0.213	0.208	12.89	15.13	2.57
80		0.194	0.168	0.162	13.59	16.59	3.47
90		0.158	0.136	0.130	14.20	17.85	4.26
100		0.132	0.113	0.107	14.74	18.97	4.97
10	15	18.338	18.553	21.528	-1.18	-17.39	-16.03
20		5.528	5.365	5.930	2.95	-7.28	-10.53
30		2.741	2.596	2.790	5.28	-1.77	-7.44
40		1.666	1.551	1.634	6.90	1.97	-5.30
50		1.133	1.041	1.079	8.14	4.77	-3.67
60		0.826	0.751	0.768	9.14	7.00	-2.35
70		0.633	0.570	0.577	9.97	8.84	-1.25
80		0.502	0.449	0.450	10.69	10.41	-0.31
90		0.410	0.363	0.361	11.32	11.77	0.51
100		0.341	0.301	0.297	11.88	12.97	1.24

Note) PVS_{TP}=PVS of top priming, PVS_{MP}=PVS of middle priming, PVS_{BP}=PVS of bottom priming

Table 5.10 Maximum percentage of attenuation on rate of velocity components for different priming locations(PVS)

Charge per delay (kg)	Rate of velocity components	Distance (m)	Maximum percentage of attenuation (%)
0.5	PVS _{TP} : PVS _{MP}	10~100	20.43
	PVS _{TP} : PVS _{BP}	10~100	30.24
	PVS _{MP} : PVS _{BP}	10~16	-3.01
		16~100	12.33
1.6	PVS _{TP} : PVS _{MP}	10~100	17.06
	PVS _{TP} : PVS _{BP}	10~12	-1.50
		12~100	24.76
	PVS _{MP} : PVS _{BP}	10~28	-7.29
28~100		8.68	
5	PVS _{TP} : PVS _{MP}	10~100	14.74
	PVS _{TP} : PVS _{BP}	10~20	-9.30
		20~100	18.97
	PVS _{MP} : PVS _{BP}	10~49	-11.65
49~100		4.97	
15	PVS _{TP} : PVS _{MP}	10~14	-1.18
		14~100	11.88
	PVS _{TP} : PVS _{BP}	10~35	-17.39
		35~100	12.97
	PVS _{MP} : PVS _{BP}	10~84	-16.03
		84~100	1.24

Note) (+) : attenuation, (-) : amplification

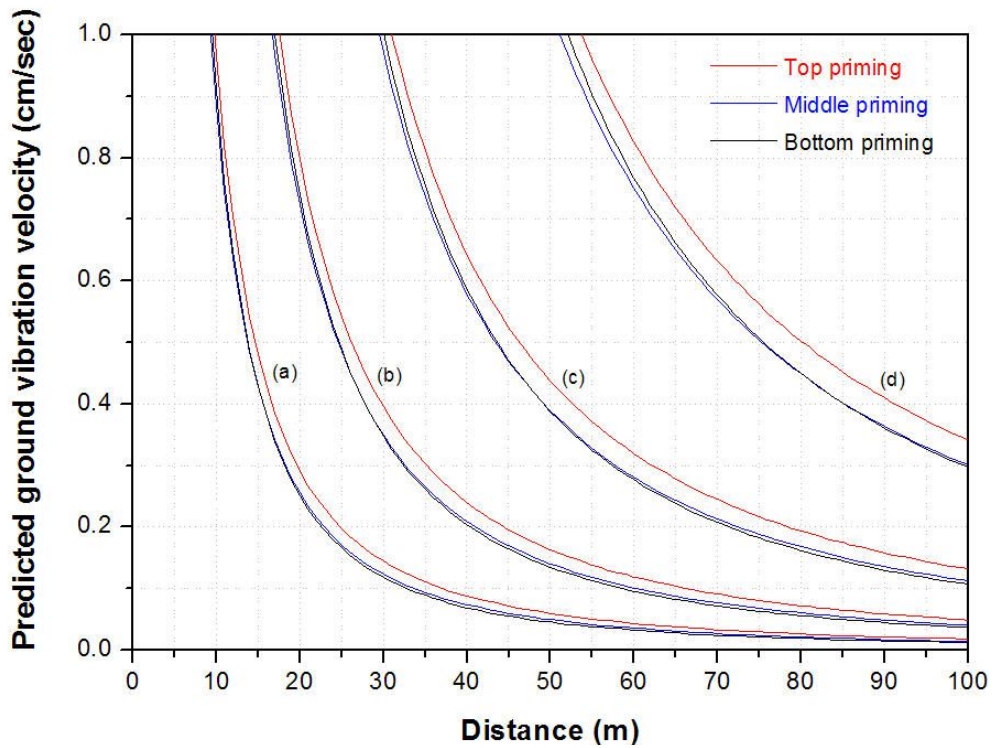


Figure 5.9 Relationship between predicted ground vibration velocity and distance for different priming locations(PVS): (a) charge per delay=0.5kg, (b) charge per delay=1.6kg, (c) charge per delay=5kg, (d) charge per delay=15kg.

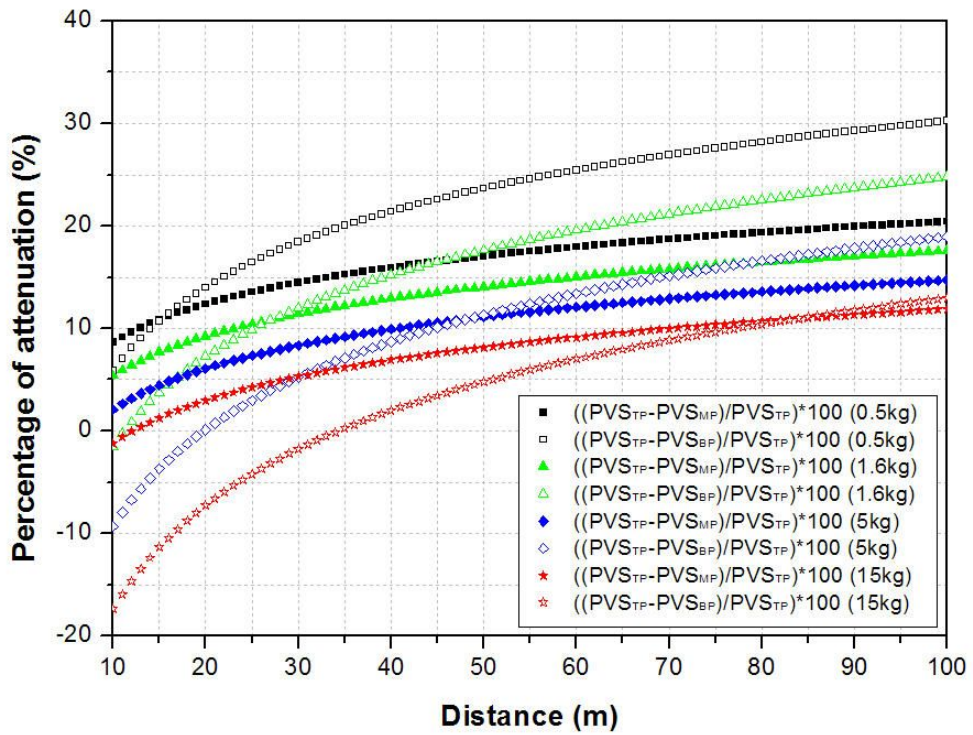


Figure 5.10 Relationship between percentage of attenuation and distance for different priming locations(PVS).

5.3 표준발파공법에서 기폭위치 적용

5.1절과 5.2절에서는 성분별(T, V, L) 입자속도, 최대입자속도(PPV) 및 최대 벡터합(PVS)의 지반진동 특성을 알아보았다.

실제 국토해양부에서 제정한 “도로공사 노천발파 설계시공 지침”에서는 최대입자속도(PPV)에 의한 회귀분석을 통해 거리별 허용장약량을 결정하고 있다. 그러나 본 논문과 같이 기폭위치에 따른 지반진동의 변화가 많이 나타나고 있으므로 지발당 장약량에 따른 거리별 기폭방법을 달리하여 지반진동을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 거리에 따른 기폭방법을 설정하기 위해 Table 4.7의 최대입자속도(PPV) 평균 지반진동 예측식으로 장약량에 따라 지반진동 수준이 낮은 기폭방법을 Figure 5.11과 같이 도시하였다.

Figure 5.11에 도시된 식을 중간기폭과 역기폭의 진동수준이 역전되는 교차점으로써 예를 들어 장약량이 0.5kg일 때 약 15m 이내에서는 중간기폭의 지반진동이 15m 이상에서는 역기폭 지반진동이 낮은 것으로 나타난다.

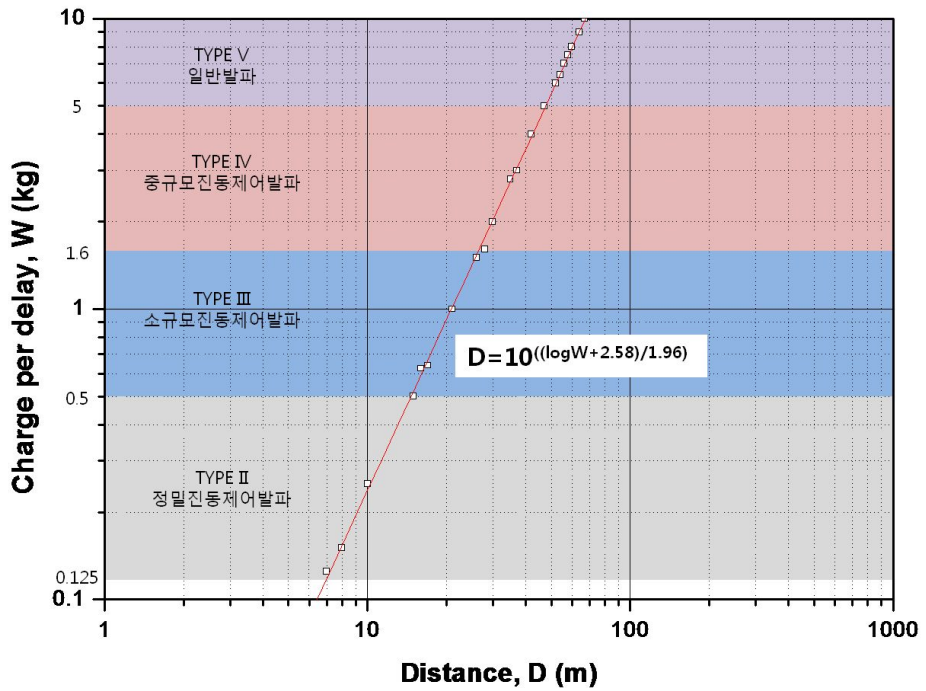


Figure 5.11 Relationship between charge per delay and monitoring distance where the two levels of particle velocity from middle and top priming blasting are reversed.

6. 결론

본 연구는 연구지역의 암반 특성을 파악하기 위해 연구지역 I(석영반암 지역), II(편암 지역), III(편마암 지역)의 암석샘플을 채취하여 실내암석실험을 실시하였고, 기폭위치에 따라 발파진동의 전파 특성을 파악하기 위해서 공간 격, 저항선, 천공장 그리고 장약량 등을 달리하여 총 72회의 단일공 시험발파를 실시하여 발파진동 예측식을 도출하였다. 그리고 도출된 평균 발파진동 예측식을 통해 기폭위치에 따른 성분별(transverse, vertical, longitudinal component) 입자속도, 최대입자속도(PPV) 및 최대벡터합(PVS)의 노모그램 분석을 통해 진동특성을 규명하였고, 국토해양부의 “도로공사 노천발파 설계 시공 지침”에 제시된 표준발파공법의 공법별 경계 기준 장약량인 0.5, 1.6, 5, 15kg을 적용하여 기폭위치별 진동 감쇠경향을 비교분석하여 발파설계의 인자로 사용할 수 있도록 제안하였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구지역에서 총 72회에의 시험발파를 통해 이격거리 5~109m지점에서 총 1044개의 자료를 획득하였다. 계측결과는 접선성분 입자속도의 경우 0.020~21.5cm/sec, 수직성분 입자속도의 경우 0.027~24.9cm/sec, 진행성분 입자속도의 경우 0.031~25.3cm/sec, 최대입자속도의 경우 0.031~25.3cm/sec, 최대벡터합 입자속도의 경우 0.023~30.0cm/sec이다.

2. 정기폭에서 성분별(T, V, L) 입자속도의 평균 지반진동 예측식을 통한 10~100m의 이격거리에서 진동속도를 예측한 결과 장약량이 3.8kg 이내에서는 진행성분의 진동수준이 높게 예측되었고, 3.8kg 이상에서는 근거리에서는 수직성분이 원거리에서는 진행성분이 높게 예측되었다. 접선성분과 수직성분

의 경우 장약량에 따라 두 성분의 역전되는 경향이 다르지만 대부분 근거리에서는 접선성분이 원거리에서는 수직성분의 진동수준이 낮게 예측되었다.

3. 중간기폭에서 성분별(T, V, L) 입자속도의 평균 지반진동 예측식을 통한 10~100m의 이격거리에서 진동속도를 예측한 결과 대부분의 장약량에서 진행성분의 진동수준이 높게 예측되었다. 접선성분과 수직성분의 경우 장약량에 따라 두 성분의 역전되는 경향이 다르지만 대부분 근거리에서는 접선성분이 원거리에서는 수직성분의 진동수준이 낮게 예측되었다.

4. 역기폭에서 성분별(T, V, L) 입자속도의 평균 지반진동 예측식을 통한 10~100m의 이격거리에서 진동속도를 예측한 결과 장약량이 8.1kg 이내에서는 진행성분의 진동수준이 높게 예측되었고, 8.1kg 이상에서는 근거리에서는 수직성분이 원거리에서는 진행성분이 높게 예측되었다. 접선성분과 수직성분의 경우 장약량이 8.7kg 이내에서는 두 성분의 역전되는 경향이 다르지만 대부분 근거리에서는 접선성분이 원거리에서는 수직성분의 진동수준이 낮게 예측되었고, 8.7kg 이상에서는 진행성분의 진동수준이 낮게 예측되었다.

5. 기폭위치에 따른 최대입자속도(PPV)의 평균 지반진동 예측식을 통한 10~100m의 이격거리에서 진동속도를 예측한 결과 장약량이 1.1kg이내에서는 정기폭의 진동수준이 높게 예측되었고, 1.1kg 이상에서는 근거리에서는 역기폭이 원거리에서는 정기폭이 높게 예측되었다. 중간기폭과 역기폭의 경우 장약량에 따라 두 성분의 역전되는 경향이 다르지만 대부분 근거리에서는 중간기폭이 원거리에서는 역기폭의 진동수준이 낮게 예측되었다.

6. 기폭위치에 따른 최대벡터합(PVS)의 평균 지반진동 예측식을 통한 10~

100m의 이격거리에서 진동속도를 예측한 결과 장약량이 1.3kg이내에서는 정기폭의 진동수준이 높게 예측되었고, 1.3kg 이상에서는 근거리에서는 역기폭이 원거리에서는 정기폭이 높게 예측되었다. 중간기폭과 역기폭의 경우 장약량에 따라 두 성분의 역전되는 경향이 다르지만 대부분 근거리에서는 중간기폭이 원거리에서는 역기폭의 진동수준이 낮게 예측되었다.

7. 본 연구수행 결과 기폭위치별로 접선성분, 수직성분, 진행성분 입자속도, 최대입자속도, 최대벡터합의 진동특성을 분석하였고, 표준발파공법의 종류에 따른 기준 장약량으로 기폭위치 별로 예측진동속도를 구하여 발파지점으로부터 보안물건의 거리에 따른 적용 발파공법에서 진동제어가 유리한 기폭방법을 결정할 수 있을 것으로 판단된다. 지반진동의 전파특성은 광물학적 암반의 분류보다는 암반의 역학적 및 구조적(불연속면 분포 등) 특성에 의해 좌우되므로 향후 대상 암반의 역학적, 구조적 특성의 차이에 따른 지반진동에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 강대우, 2006, 토목기술자를 위한 알기 쉬운 발파공학, 구미서관.
- 강추원, 2009, 제2판 발파공학 A to Z, 구미서관.
- 기경철, 김일중, 2002, 산학인을 위한 발파공학, 동화기술.
- 김상윤 외, 2002, 대학물리학, 정문각.
- 김재극, 1992, 산업화약과 발파공학 개정판, 서울대학교 출판부.
- 문창일, 2000, 장공계단발파에서 Primer의 위치가 발파진동에 미치는 영향, 조선대학교 석사학위논문.
- 심동수, 강대우, 2004, 안산암, 화강암, 화강편마암에서의 NPS 발파법의 진동 감쇠효과에 관한 연구, 화약·발파, Vol. 22, No. 2, pp. 13-20.
- 안명석, 2000, 건설현장에서 안정성 향상을 위한 지반진동·소음·비산먼지 측정자료의 분석에 관한 연구(영남지역의 퇴적암·화성암층에서 발파 및 향 타작업을 중심으로), 동아대학교 박사학위논문.
- 안명석, 박종남, 1999, 대구 규장암 지역의 발파진동 측정자료에 의한 K 및 n의 변화 추이에 대한 고찰, 한국자원공학회지, Vol 36, pp. 313-318.
- 양형식, 1992, 발파진동학, 구미서관.
- 양형식, 김남수, 장형두, 정희석, 고영훈, 김정균, 2010, 스코리아층을 포함한 암반 발파 특성 연구, 대한화약발파공학회 추계학술발표회, pp. 159-165.
- 윤대진, 1992, 암질에 따른 발파진동의 특성 및 발파진동이 건축물에 미치는 영향과 관한 연구, 한양대학교 석사학위논문.
- 윤성현, 안명석, 이광열, 2003, 화성암반에서 터널발파 진동측정치의 분석에 관한 사례 연구, 화약·발파, Vol. 21, No. 1, pp. 69-76.
- 오이환, 원연호, 임한욱, 2006, 터널굴진에서 장약 및 기폭방법 개선에 관한

- 연구, 화약·발파, Vol. 24, No. 2, pp. 1-8.
- 천병식, 오민열, 1995, R.Q.D에 의한 발파진동 추정에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 제 15권, 제 4호, pp. 983~990.
- 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.
- Barker, D. B., Fournery, W. L, and Dally, J. W., 1978, Photoelastic Investigation of Fragmentation Mechanics, Part I -Borehole Crack Network, University of Maryland., March.
- Barker, D. B., Fournery, W. L, and Dally, J. W., 1978, Photoelastic Investigation of Fragmentation Mechanics, Part II -Flaw Initiated Network, University of Maryland., August.
- 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.

- Chiappetta, R. F., Bauer, A., and Burchell, S. L., 1983, The Use of High Speed Motion Picture Photography in Blast Evaluation and Design, Proceedings of the 9th Annual Conference on Explosives and Blasting Techniques, Society of Explosives Engineers.
- Devine, J. R., 1966, Avoiding Damage to Residences from Blasting Vibrations, Highway Research Record 135, pp. 35-44.
- Dick, R. A., 1968, Factors in Selecting and Applying Commercial Explosives and Blasting Agents, Information Circular 8405, U.S. Bureau of Mines.
- 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. ., and Fogelson, D. E., Review of Criteria for Estimating Damage to Residences from Blasting Vibrations, USBM, 1962.
- Duvall, W., Johnson, C., Meyer, A., and Devine, J., 1963, Vibrations from Instantaneous and Millisecond Delayed Blasts, RI 6151.
- Fourney, W. L., and Barker, D. B., 1983, Effect of Time Delay on Fragmentation in Explosives, Proceedings of the First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, pp. 225-249.
- Hino, U., 1956, Fragmentation of Rock through Blasting, Quarterly of the Colorado School of Mines, pp. 51, 189.
- Johansson, C. H., and Persson, P. A., 1970, Detonics of High Explosives, New York, Academic Press.
- Kutter, H. K., and Fairhurst, C., 1971, On the Fracture Process in

- Blasting, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci., B*, pp. 181-202.
- Mark Leidig, Jessie L. Bonner, Tim Rath, Donald Murray, 2010, Quantification of ground vibration differences from well-confined single-hole explosions with variable velocity of detonation, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 47, pp. 42-49
- 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., 1949, A Gague and recording Equipment for Measuring Dynamic Strain in Rock, USBM, RI 4581.
- 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.
- Pit Slope Manual, 1977, *Perimeter Blasting*(Canmet, Report 77-44), Canada Center for Mineral and Energy Technology, Canada.
- Winzer, S. R., Furth, W., and Ritter, A., 1979, Initiator Firing Times and Their Relationship to Blasting Performance, *Proceedings of the 20th Symposium on Rock Mechanics*, pp. 461-470.
- 175th Anniversary Edition of the Blasters' Handbook, 1980, *Blasters' Handbook*, Dupont.

Appendix

(Measurement results)

Measurement results of study area I (1)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition
			T	V	L	PPV	PVS	
1	8	6.4	15.600	22.000	17.700	22.000	22.100	Study area I Top priming
2	22	6.4	1.530	2.340	2.540	2.540	2.720	
3	28	6.4	1.160	0.979	1.400	1.400	1.630	
4	35	6.4	1.420	1.170	1.100	1.420	1.800	
5	41	6.4	0.789	0.597	0.991	0.991	1.210	
6	45	6.4	0.572	0.376	0.303	0.572	0.605	
7	51	6.4	0.748	0.270	0.551	0.748	0.927	
8	47	6.4	0.813	0.559	0.387	0.813	0.973	
9	53	6.4	0.435	0.649	0.602	0.649	0.819	
10	59	6.4	0.297	0.186	0.368	0.368	0.389	
11	70	6.4	0.298	0.151	0.210	0.298	0.351	
12	74	6.4	0.451	0.159	0.322	0.451	0.512	
13	77	6.4	0.320	0.225	0.212	0.320	0.373	
14	81	6.4	0.181	0.183	0.322	0.322	0.375	
15	91	6.4	0.554	0.124	0.334	0.554	0.580	
16	6	6.4	21.500	23.600	25.000	25.000	30.000	
17	11	6.4	6.810	4.930	10.900	10.900	12.200	
18	20	6.4	2.450	1.860	0.846	2.450	2.670	
19	25	6.4	1.130	1.720	2.240	2.240	2.650	
20	31	6.4	0.886	1.160	0.935	1.160	1.490	
21	38	6.4	1.540	0.927	0.889	1.540	1.840	
22	44	6.4	1.210	0.699	1.140	1.210	1.660	
23	48	6.4	0.549	0.397	0.570	0.570	0.802	
24	54	6.4	0.643	0.362	0.571	0.643	0.866	
25	50	6.4	0.657	0.683	0.562	0.683	0.881	
26	56	6.4	0.406	0.927	0.464	0.927	0.973	
27	62	6.4	0.271	0.193	0.408	0.408	0.432	
28	73	6.4	0.259	0.264	0.293	0.293	0.325	
29	77	6.4	0.561	0.185	0.444	0.561	0.639	
30	80	6.4	0.271	0.371	0.312	0.371	0.390	
31	84	6.4	0.168	0.217	0.307	0.307	0.327	
32	33	14	3.310	2.600	4.250	4.250	5.210	
33	38	14	1.000	1.840	3.150	3.150	3.400	
34	43	14	1.250	2.520	2.440	2.520	3.440	
35	50	14	1.040	1.210	1.660	1.660	1.880	
36	53	14	1.740	1.930	2.770	2.770	3.120	
37	58	14	1.020	2.480	2.130	2.480	3.180	
38	64	14	0.381	1.140	0.889	1.140	1.220	
39	68	14	0.366	0.800	0.649	0.800	0.880	
40	73	14	0.500	0.647	0.642	0.647	0.769	

Measurement results of study area I (2)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition
			T	V	L	PPV	PVS	
41	76	14	0.622	0.783	0.500	0.783	0.991	Study area I Top priming
42	83	14	0.678	0.264	0.839	0.839	0.882	
43	91	14	0.551	0.303	0.581	0.581	0.648	
44	7	14	2.980	5.500	5.190	5.500	6.890	
45	15	14	2.160	2.950	3.120	3.120	3.800	
46	20	14	2.670	3.030	2.050	3.030	4.190	
47	29	14	1.850	2.180	1.570	2.180	2.680	
48	33	14	1.480	1.490	1.050	1.490	1.920	
49	38	14	1.080	0.851	1.510	1.510	1.870	
50	44	14	0.965	1.000	1.410	1.410	1.480	
51	50	14	0.613	1.140	1.150	1.150	1.630	
52	52	14	0.660	0.513	0.681	0.681	0.802	
53	57	14	1.050	0.775	1.240	1.240	1.470	
54	63	14	0.688	0.659	1.527	1.527	1.706	
55	73	14	0.276	0.359	0.278	0.359	0.412	
56	76	14	0.493	0.310	0.351	0.493	0.520	
57	87	14	0.268	0.181	0.505	0.505	0.525	
58	6	6.5	9.960	22.700	15.700	22.700	24.800	
59	8	6.5	8.230	24.100	12.700	24.100	24.300	
60	7	6.5	6.500	22.700	8.840	22.700	23.000	
61	10	6.5	3.330	3.870	4.340	4.340	5.840	
62	14	6.5	4.220	3.710	2.500	4.220	4.790	
63	17	6.5	1.170	2.910	1.840	2.910	3.270	
64	29	6.5	1.570	2.100	1.570	2.100	2.670	
65	33	6.5	0.951	1.030	0.756	1.030	1.240	
66	39	6.5	0.725	0.976	0.427	0.976	1.100	
67	44	6.5	0.406	1.200	1.160	1.200	1.660	
68	50	6.5	0.405	0.397	0.619	0.619	0.696	
69	57	6.5	0.549	0.488	0.981	0.981	1.196	
70	63	6.5	0.588	0.556	0.598	0.598	0.820	
71	67	6.5	0.283	0.276	0.429	0.429	0.535	
72	73	6.5	0.347	0.205	0.327	0.347	0.439	
73	69	6.5	0.412	0.534	0.427	0.534	0.686	
74	5	6.5	16.000	24.900	18.500	24.900	26.000	
75	7	6.5	9.500	7.370	4.830	9.500	9.700	
76	8	6.5	2.950	6.260	4.980	6.260	6.820	
77	12	6.5	2.080	1.920	3.230	3.230	3.360	
78	16	6.5	2.110	3.260	1.990	3.260	3.560	
79	19	6.5	1.030	1.560	1.990	1.990	2.050	
80	31	6.5	1.260	1.080	1.630	1.630	1.680	

Measurement results of study area I (3)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition
			T	V	L	PPV	PVS	
81	35	6.5	0.838	0.441	0.757	0.838	0.953	Study area I Top priming
82	41	6.5	0.730	0.459	0.327	0.730	0.735	
83	46	6.5	0.364	0.483	0.833	0.833	1.000	
84	59	6.5	0.586	0.437	0.615	0.615	0.834	
85	65	6.5	0.473	0.556	0.542	0.556	0.784	
86	69	6.5	0.268	0.305	0.244	0.305	0.407	
87	75	6.5	0.332	0.300	0.234	0.332	0.356	
88	71	6.5	0.361	0.500	0.273	0.500	0.616	
89	10	14	8.130	15.400	17.100	17.100	20.000	
90	15	14	2.710	5.330	4.580	5.330	6.580	
91	17	14	3.390	4.080	4.650	4.650	5.330	
92	23	14	2.590	1.940	3.190	3.190	3.760	
93	33	14	1.020	1.690	1.260	1.690	1.840	
94	38	14	1.260	1.510	2.160	2.160	2.640	
95	47	14	1.460	1.800	1.440	1.800	1.950	
96	51	14	1.330	1.480	1.040	1.480	1.820	
97	55	14	0.564	1.996	0.920	1.996	2.002	
98	61	14	0.527	0.981	0.537	0.981	0.988	
99	67	14	0.671	0.713	0.642	0.713	0.819	
100	70	14	1.008	1.142	1.281	1.281	1.698	
101	75	14	1.093	0.676	1.418	1.418	1.549	
102	7	6.4	9.860	11.000	15.300	15.300	17.700	
103	6	6.4	3.620	3.960	8.890	8.890	9.560	
104	14	6.4	2.220	4.010	2.110	4.010	4.780	
105	18	6.4	2.810	1.460	1.830	2.810	3.430	
106	24	6.4	2.770	1.270	0.741	2.770	2.920	
107	28	6.4	1.320	1.540	1.480	1.540	1.940	
108	35	6.4	0.779	0.721	0.794	0.794	0.957	
109	41	6.4	1.400	0.737	0.652	1.400	1.580	
110	47	6.4	1.100	0.597	1.080	1.100	1.430	
111	52	6.4	0.438	0.341	0.313	0.438	0.508	
112	57	6.4	0.686	0.259	0.549	0.686	0.868	
113	54	6.4	0.735	0.597	0.379	0.735	0.879	
114	66	6.4	0.300	0.168	0.293	0.300	0.347	
115	77	6.4	0.286	0.168	0.237	0.286	0.345	
116	81	6.4	0.469	0.215	0.344	0.469	0.526	
117	83	6.4	0.251	0.264	0.210	0.264	0.312	
118	88	6.4	0.144	0.173	0.271	0.271	0.308	
119	10	6.4	6.400	8.940	9.960	9.960	13.400	
120	10	6.4	2.210	3.890	3.890	3.890	4.250	

Measurement results of study area I (4)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition
			T	V	L	PPV	PVS	
121	10	6.4	1.040	2.100	0.953	2.100	2.270	Study area I Middle priming
122	19	6.4	0.940	0.889	0.546	0.940	1.220	
123	23	6.4	0.535	0.757	0.476	0.757	0.969	
124	29	6.4	0.821	0.584	0.300	0.821	0.849	
125	34	6.4	0.164	0.511	0.645	0.645	0.719	
126	40	6.4	0.140	0.233	0.487	0.487	0.515	
127	47	6.4	0.213	0.251	0.514	0.514	0.527	
128	53	6.4	0.310	0.149	0.473	0.473	0.475	
129	57	6.4	0.159	0.071	0.195	0.195	0.198	
130	62	6.4	0.102	0.083	0.154	0.154	0.157	
131	59	6.4	0.168	0.207	0.246	0.246	0.275	
132	71	6.4	0.146	0.088	0.188	0.188	0.205	
133	82	6.4	0.139	0.090	0.115	0.139	0.151	
134	86	6.4	0.142	0.093	0.183	0.183	0.185	
135	88	6.4	0.107	0.098	0.105	0.107	0.136	
136	7	14	2.400	5.420	4.910	5.420	5.520	
137	12	14	2.360	1.460	2.120	2.360	2.910	
138	17	14	2.440	0.799	1.240	2.440	2.460	
139	22	14	1.100	1.190	1.030	1.190	1.370	
140	27	14	1.130	0.960	1.000	1.130	1.610	
141	35	14	0.943	1.000	0.545	1.000	1.100	
142	39	14	0.533	0.595	0.340	0.595	0.683	
143	45	14	0.337	0.257	0.489	0.489	0.606	
144	49	14	0.411	0.421	0.578	0.578	0.622	
145	56	14	0.225	0.383	0.370	0.383	0.531	
146	59	14	0.168	0.167	0.184	0.184	0.252	
147	63	14	0.361	0.464	0.517	0.517	0.593	
148	70	14	0.488	0.490	0.517	0.517	0.600	
149	78	14	0.195	0.325	0.156	0.325	0.373	
150	82	14	0.173	0.261	0.276	0.276	0.338	
151	8	6.5	12.400	11.100	6.650	12.400	12.700	
152	8	6.5	3.440	2.110	3.100	3.440	4.660	
153	12	6.5	1.440	3.810	3.040	3.810	4.030	
154	12	6.5	1.640	3.170	2.930	3.170	3.380	
155	17	6.5	2.040	1.770	2.130	2.130	2.520	
156	21	6.5	1.990	2.340	1.800	2.340	2.980	
157	24	6.5	0.749	1.160	1.230	1.230	1.330	
158	35	6.5	0.914	0.737	1.190	1.190	1.270	
159	39	6.5	0.583	0.378	0.398	0.583	0.702	
160	45	6.5	0.473	0.314	0.330	0.473	0.488	

Measurement results of study area I (5)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition
			T	V	L	PPV	PVS	
161	50	6.5	0.447	0.444	0.817	0.817	0.879	Study area I
162	63	6.5	0.420	0.305	0.534	0.534	0.638	
163	69	6.5	0.451	0.361	0.351	0.451	0.562	
164	74	6.5	0.151	0.227	0.242	0.242	0.286	
165	80	6.5	0.195	0.178	0.176	0.195	0.254	
166	11	14	0.870	1.200	1.150	1.200	1.400	
167	15	14	4.370	8.590	8.030	8.590	11.700	
168	19	14	1.910	3.850	2.790	3.850	4.070	
169	25	14	1.700	2.060	3.390	3.390	4.090	
170	36	14	1.170	1.560	1.560	1.560	1.990	
171	41	14	1.350	1.460	2.070	2.070	2.300	
172	49	14	1.040	1.780	1.530	1.780	1.900	
173	53	14	1.086	0.688	1.454	1.454	1.594	
174	59	14	0.920	0.947	1.298	1.298	1.485	
175	63	14	0.522	1.452	1.025	1.452	1.532	
176	70	14	0.405	0.961	0.532	0.961	0.966	
177	18	14	0.322	0.665	1.220	1.220	1.260	
178	21	14	2.290	2.420	1.500	2.420	3.040	
179	26	14	1.000	1.890	2.200	2.200	2.920	
180	32	14	1.260	1.660	2.030	2.030	2.170	
181	38	14	2.320	1.280	1.460	2.320	2.690	
182	42	14	1.030	0.940	1.070	1.070	1.400	
183	47	14	0.697	0.703	1.260	1.260	1.320	
184	56	14	0.738	0.945	0.846	0.945	1.070	
185	60	14	0.917	0.500	0.932	0.932	1.073	
186	65	14	0.356	0.437	0.920	0.920	0.949	
187	70	14	0.222	0.866	0.971	0.971	1.011	
188	76	14	0.220	0.617	0.451	0.617	0.672	
189	79	14	0.283	0.332	0.554	0.554	0.573	
190	9	6.4	5.180	9.800	13.200	13.200	15.900	
191	11	6.4	2.240	2.320	4.080	4.080	4.960	
192	13	6.4	1.140	1.850	1.370	1.850	2.070	
193	23	6.4	1.160	1.310	0.724	1.310	1.810	
194	28	6.4	0.611	0.832	0.267	0.832	0.965	
195	33	6.4	0.411	0.664	0.200	0.664	0.728	
196	38	6.4	0.230	0.545	0.586	0.586	0.749	
197	44	6.4	0.151	0.313	0.367	0.367	0.395	
198	51	6.4	0.298	0.352	0.357	0.357	0.519	
199	57	6.4	0.292	0.225	0.427	0.427	0.537	
200	61	6.4	0.138	0.094	0.133	0.133	0.208	

Measurement results of study area I (6)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition
			T	V	L	PPV	PVS	
201	67	6.4	0.195	0.127	0.244	0.244	0.261	Study area I
202	63	6.4	0.144	0.168	0.271	0.271	0.305	
203	75	6.4	0.122	0.100	0.161	0.161	0.175	
204	86	6.4	0.088	0.083	0.100	0.100	0.124	
205	90	6.4	0.156	0.088	0.105	0.156	0.182	
206	9	6.4	10.500	9.300	25.300	25.300	26.000	
207	12	6.4	2.690	2.350	2.900	2.900	3.890	
208	13	6.4	2.120	2.390	1.170	2.390	2.660	
209	15	6.4	0.756	1.450	0.787	1.450	1.650	
210	26	6.4	0.965	0.927	1.030	1.030	1.320	
211	31	6.4	0.540	0.630	0.437	0.630	0.809	
212	37	6.4	0.800	0.614	0.233	0.800	0.802	
213	41	6.4	0.203	0.556	0.735	0.735	0.909	
214	48	6.4	0.211	0.244	0.391	0.391	0.416	
215	54	6.4	0.341	0.354	0.457	0.457	0.630	
216	60	6.4	0.271	0.224	0.476	0.476	0.524	
217	65	6.4	0.183	0.132	0.207	0.207	0.248	
218	71	6.4	0.176	0.107	0.229	0.229	0.268	
219	67	6.4	0.149	0.210	0.266	0.266	0.298	
220	79	6.4	0.120	0.117	0.171	0.171	0.194	
221	89	6.4	0.103	0.117	0.112	0.117	0.129	
222	7	14	5.380	7.670	12.100	12.100	12.300	
223	9	14	5.080	3.910	7.770	7.770	8.380	
224	15	14	2.430	1.640	3.530	3.530	4.200	
225	19	14	2.530	1.300	1.690	2.530	2.730	
226	24	14	0.648	0.765	1.100	1.100	1.320	
227	29	14	0.767	0.624	0.856	0.856	1.120	
228	37	14	0.952	0.940	0.594	0.952	1.210	
229	41	14	0.630	0.568	0.444	0.630	0.853	
230	47	14	0.427	0.330	0.530	0.530	0.572	
231	51	14	0.622	0.749	0.640	0.749	0.945	
232	58	14	0.325	0.375	0.440	0.440	0.529	
233	61	14	0.327	0.317	0.254	0.327	0.415	
234	66	14	0.447	0.547	0.508	0.547	0.774	
235	71	14	0.600	0.312	0.481	0.600	0.705	
236	76	14	0.271	0.310	0.288	0.310	0.390	
237	81	14	0.176	0.190	0.210	0.210	0.281	
238	9	14	2.500	3.900	5.260	5.260	5.480	
239	11	14	2.960	3.060	3.610	3.610	4.280	
240	17	14	2.320	1.330	2.390	2.390	3.350	

Measurement results of study area I (7)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition
			T	V	L	PPV	PVS	
241	22	14	2.880	2.270	1.940	2.880	2.980	Study area I Bottom priming
242	27	14	1.020	1.610	1.300	1.610	1.680	
243	32	14	1.190	1.610	1.080	1.610	1.920	
244	40	14	1.200	1.730	1.010	1.730	1.740	
245	44	14	0.916	0.949	0.698	0.949	1.180	
246	50	14	0.635	0.610	1.020	1.020	1.070	
247	54	14	0.800	1.280	1.070	1.280	1.490	
248	61	14	0.425	0.612	0.410	0.612	0.727	
249	64	14	0.427	0.547	0.447	0.547	0.694	
250	68	14	0.747	0.964	0.866	0.964	1.347	
251	74	14	0.771	0.580	0.908	0.908	1.016	
252	78	14	0.368	0.578	0.351	0.578	0.649	
253	7	6.5	5.330	23.300	13.800	23.300	24.500	
254	10	6.5	4.110	5.350	5.820	5.820	8.580	
255	14	6.5	4.460	4.520	2.600	4.520	5.170	
256	16	6.5	1.520	3.020	2.060	3.020	3.420	
257	28	6.5	1.960	2.770	1.730	2.770	3.480	
258	38	6.5	1.400	1.240	0.922	1.400	1.840	
259	43	6.5	0.851	1.350	0.554	1.350	1.570	
260	32	6.5	0.687	1.500	1.610	1.610	2.170	
261	49	6.5	0.505	0.616	0.852	0.852	0.976	
262	62	6.5	0.791	0.681	0.896	0.896	1.078	
263	66	6.5	0.386	0.305	0.573	0.573	0.704	
264	72	6.5	0.442	0.264	0.488	0.488	0.615	
265	68	6.5	0.442	0.632	0.612	0.632	0.768	
266	80	6.5	0.205	0.227	0.332	0.332	0.382	
267	25	14	1.550	2.440	2.710	2.710	3.690	
268	30	14	1.260	1.990	2.260	2.260	2.450	
269	33	14	2.120	1.850	2.140	2.140	2.760	
270	46	14	0.711	1.190	0.975	1.190	1.190	
271	51	14	0.940	1.320	1.240	1.320	1.510	
272	56	14	0.738	0.851	1.410	1.410	1.500	
273	64	14	1.588	1.398	1.435	1.588	2.090	
274	68	14	0.439	0.520	1.066	1.066	1.129	
275	74	14	0.393	1.215	1.086	1.215	1.416	
276	78	14	0.273	0.688	0.498	0.688	0.695	
277	85	14	0.376	0.364	0.581	0.581	0.595	
278	26	14	1.710	2.770	1.920	2.770	3.270	
279	35	14	1.500	1.590	1.880	1.880	2.030	
280	40	14	1.730	1.740	1.710	1.740	2.540	

Measurement results of study area I (8)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition
			T	V	L	PPV	PVS	
281	45	14	0.876	1.610	1.510	1.610	1.820	Study area I
282	50	14	0.902	1.050	0.813	1.050	1.190	
283	55	14	0.435	0.546	0.967	0.967	0.973	
284	70	14	0.322	0.410	0.678	0.678	0.735	
285	76	14	0.361	1.105	1.018	1.105	1.243	
286	80	14	0.242	0.473	0.415	0.473	0.481	Bottom priming
287	87	14	1.096	1.086	0.874	1.096	1.482	

Measurement results of study area II(1)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition
			T	V	L	PPV	PVS	
1	17	6.4	1.520	3.250	1.080	3.250	3.370	Study area II
2	19	6.4	1.170	1.320	1.770	1.770	2.120	
3	20	6.4	1.830	1.870	3.770	3.770	3.850	
4	26	6.4	1.590	0.495	3.440	3.440	3.550	
5	28	6.4	0.724	0.787	0.914	0.914	1.220	
6	31	6.4	1.040	0.559	1.550	1.550	1.580	
7	34	6.4	0.827	0.260	0.787	0.827	0.834	
8	37	6.4	1.170	0.978	1.570	1.570	1.790	
9	39	6.4	0.178	0.406	0.470	0.470	0.476	
10	41	6.4	0.597	0.554	0.965	0.965	1.000	
11	44	6.4	0.800	0.381	0.572	0.800	0.818	
12	35	6.4	0.614	0.965	2.340	2.340	2.480	
13	42	6.4	0.278	0.549	0.132	0.549	0.576	
14	40	6.4	0.293	0.549	0.286	0.549	0.605	
15	36	6.4	1.179	0.888	0.854	1.179	1.408	
16	38	6.4	0.822	0.966	0.612	0.966	1.072	
17	35	6.4	1.337	0.454	0.517	1.337	1.423	
18	40	6.4	0.797	0.426	0.781	0.797	0.994	
19	41	6.4	0.293	0.230	0.762	0.762	0.779	
20	22	14	3.520	4.340	3.620	4.340	5.650	Top priming
21	23	14	7.150	4.780	6.830	7.150	7.590	
22	25	14	3.640	7.330	4.390	7.330	8.030	
23	29	14	3.820	3.490	1.800	3.820	4.100	
24	31	14	3.850	2.630	1.640	3.850	4.320	
25	34	14	2.480	1.900	1.460	2.480	2.750	
26	38	14	4.170	2.030	1.370	4.170	4.270	
27	40	14	2.310	1.420	1.750	2.310	3.060	
28	43	14	1.870	1.330	1.170	1.870	1.930	
29	46	14	2.760	1.660	1.690	2.760	3.190	
30	50	14	1.140	0.699	1.610	1.610	1.640	
31	53	14	2.260	1.490	1.640	2.260	2.390	
32	56	14	0.927	1.000	1.980	1.980	2.040	
33	61	14	1.118	0.698	0.878	1.118	1.246	
34	64	14	1.657	1.039	0.878	1.657	1.953	
35	67	14	0.615	0.822	1.037	1.037	1.073	
36	69	14	1.259	1.013	0.935	1.259	1.261	
37	71	14	1.120	0.744	0.725	1.120	1.282	
38	79	14	0.246	0.508	0.483	0.508	0.575	
39	80	14	0.685	0.609	0.655	0.685	0.914	
40	85	14	0.348	0.348	0.324	0.348	0.522	

Measurement results of study area II (2)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition
			T	V	L	PPV	PVS	
41	16	14	1.850	4.790	2.670	4.790	5.280	Study area II Top priming
42	19	14	5.850	5.960	7.820	7.820	8.350	
43	20	14	3.110	9.220	5.250	9.220	9.960	
44	24	14	3.510	4.810	4.560	4.810	5.840	
45	26	14	3.260	3.470	2.370	3.470	4.090	
46	29	14	2.450	2.180	2.680	2.680	3.100	
47	33	14	4.230	2.600	2.200	4.230	4.360	
48	36	14	2.710	2.680	1.700	2.710	3.460	
49	38	14	2.250	2.640	1.330	2.640	2.700	
50	41	14	2.970	2.310	1.770	2.970	3.940	
51	46	14	1.170	1.000	1.880	1.880	1.960	
52	48	14	3.010	1.490	2.030	3.010	3.030	
53	51	14	1.300	1.140	2.060	2.060	2.450	
54	56	14	1.064	0.795	1.120	1.120	1.423	
55	59	14	1.728	1.274	0.839	1.728	2.044	
56	62	14	0.734	0.932	1.093	1.093	1.161	
57	65	14	1.327	1.164	1.125	1.327	1.397	
58	67	14	1.059	0.871	0.642	1.059	1.196	
59	74	14	0.249	0.581	0.449	0.581	0.593	
60	75	14	0.689	0.678	0.671	0.689	0.961	
61	80	14	0.348	0.411	0.355	0.411	0.533	
62	32	6.5	1.700	1.800	1.320	1.800	2.560	
63	34	6.5	1.400	1.970	2.810	2.810	3.050	
64	34	6.5	0.813	0.711	1.930	1.930	2.050	
65	41	6.5	0.495	0.292	1.600	1.600	1.680	
66	43	6.5	0.519	0.484	0.794	0.794	0.806	
67	46	6.5	1.180	0.381	1.160	1.180	1.330	
68	49	6.5	0.364	0.275	0.557	0.557	0.623	
69	51	6.5	0.965	0.775	1.180	1.180	1.230	
70	54	6.5	0.533	0.292	0.330	0.533	0.583	
71	57	6.5	0.749	0.452	0.914	0.914	1.190	
72	60	6.5	0.356	0.356	0.648	0.648	0.724	
73	50	6.5	0.686	0.660	1.660	1.660	1.770	
74	56	6.5	0.225	0.466	0.203	0.466	0.527	
75	54	6.5	0.315	0.347	0.432	0.432	0.530	
76	51	6.5	0.654	0.378	0.747	0.747	0.921	
77	52	6.5	1.179	0.866	0.434	1.179	1.237	
78	48	6.5	1.225	0.339	0.991	1.225	1.513	
79	55	6.5	0.676	0.540	0.900	0.900	1.036	
80	56	6.5	0.268	0.277	0.903	0.903	0.933	

Measurement results of study area II (3)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition
			T	V	L	PPV	PVS	
81	42	14	2.220	2.570	1.330	2.570	3.320	Study area II Top priming
82	43	14	2.790	2.770	1.930	2.790	3.080	
83	45	14	1.650	2.180	1.070	2.180	2.410	
84	49	14	1.400	1.450	0.991	1.450	1.840	
85	51	14	1.270	1.090	1.160	1.270	1.680	
86	54	14	0.914	0.965	0.851	0.965	1.360	
87	57	14	1.560	1.230	0.876	1.560	1.930	
88	60	14	0.953	0.876	0.940	0.953	1.340	
89	63	14	0.603	0.794	0.630	0.794	0.911	
90	66	14	0.937	0.886	0.813	0.937	1.340	
91	71	14	0.500	0.489	0.794	0.794	0.875	
92	73	14	0.775	0.597	0.965	0.965	1.140	
93	76	14	0.478	0.454	0.756	0.756	0.814	
94	81	14	0.481	0.303	0.573	0.573	0.660	
95	84	14	0.498	0.710	0.622	0.710	1.008	
96	87	14	0.769	0.478	0.957	0.957	1.005	
97	89	14	0.307	0.508	0.637	0.637	0.720	
98	91	14	0.349	0.317	0.347	0.349	0.532	
99	99	14	0.239	0.325	0.332	0.332	0.422	
100	100	14	0.366	0.344	0.409	0.409	0.540	
101	105	14	0.172	0.197	0.277	0.277	0.371	
102	14	6.4	1.230	6.580	4.370	6.580	6.920	Study area II Middle priming
103	16	6.4	2.770	3.610	4.290	4.290	5.920	
104	16	6.4	1.660	2.500	2.870	2.870	3.490	
105	23	6.4	1.680	2.340	5.960	5.960	6.200	
106	25	6.4	1.270	1.500	1.490	1.500	1.830	
107	28	6.4	1.350	1.410	2.370	2.370	2.430	
108	31	6.4	1.570	0.502	1.430	1.570	1.580	
109	34	6.4	1.500	1.900	2.830	2.830	3.450	
110	36	6.4	0.279	0.800	0.978	0.978	0.979	
111	40	6.4	0.737	1.070	1.300	1.300	1.340	
112	42	6.4	0.813	0.724	0.622	0.813	0.857	
113	32	6.4	1.020	1.210	3.420	3.420	3.540	
114	39	6.4	0.315	0.886	0.217	0.886	0.907	
115	35	6.4	0.383	1.008	0.471	1.008	1.113	
116	33	6.4	1.518	1.308	1.647	1.647	1.993	
117	35	6.4	0.959	1.554	0.442	1.554	1.662	
118	32	6.4	1.630	1.198	0.720	1.630	1.772	
119	38	6.4	0.903	0.701	1.018	1.018	1.277	
120	39	6.4	0.521	0.752	1.005	1.005	1.008	

Measurement results of study area II (4)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition	
			T	V	L	PPV	PVS		
121	14	14	3.060	5.260	1.830	5.260	5.660	Study area II	
122	15	14	6.740	5.110	16.100	16.100	16.500		
123	17	14	5.190	8.130	7.900	8.130	11.500		
124	20	14	2.710	5.680	4.650	5.680	7.040		
125	22	14	2.030	3.630	4.190	4.190	5.430		
126	26	14	1.560	2.550	3.580	3.580	4.220		
127	29	14	1.820	2.540	3.120	3.120	4.000		
128	32	14	1.540	2.960	1.830	2.960	3.650		
129	35	14	1.300	3.020	1.170	3.020	3.200		
130	38	14	2.500	2.070	1.560	2.500	3.010		
131	42	14	1.000	1.030	1.730	1.730	1.960		
132	45	14	2.600	0.991	1.920	2.600	2.620		
133	48	14	1.370	0.724	1.260	1.370	1.850		
134	53	14	0.642	0.554	1.083	1.083	1.110		
135	56	14	1.357	1.191	0.771	1.357	1.708		
136	59	14	0.637	0.537	0.805	0.805	0.940		
137	61	14	0.539	0.673	0.715	0.715	0.851		
138	63	14	0.354	0.490	0.530	0.530	0.606		
139	70	14	0.229	0.417	0.366	0.417	0.459		
140	72	14	0.474	0.505	0.576	0.576	0.739		
141	77	14	0.194	0.264	0.273	0.273	0.414		
142	7	14	4.690	24.100	7.260	24.100	25.500		Middle priming
143	9	14	5.520	19.900	17.600	19.900	25.100		
144	13	14	11.200	12.500	20.600	20.600	23.400		
145	15	14	6.300	9.390	18.300	18.300	19.600		
146	18	14	6.970	6.790	13.800	13.800	15.600		
147	21	14	5.030	2.930	10.700	10.700	11.700		
148	23	14	6.030	4.470	7.210	7.210	8.730		
149	27	14	4.050	2.920	5.280	5.280	5.980		
150	34	14	2.180	0.991	3.840	3.840	4.410		
151	37	14	4.470	2.910	2.820	4.470	5.110		
152	39	14	2.570	1.830	2.240	2.570	2.870		
153	45	14	1.837	1.127	1.984	1.984	2.299		
154	47	14	1.330	1.754	1.137	1.754	1.988		
155	51	14	1.293	1.235	1.220	1.293	1.664		
156	53	14	1.081	1.510	1.330	1.510	1.751		
157	55	14	0.805	1.132	0.896	1.132	1.339		
158	58	14	0.227	0.793	0.398	0.793	0.823		
159	63	14	0.225	0.484	0.382	0.484	0.509		
160	26	6.5	1.730	3.300	1.270	3.300	3.650		

Measurement results of study area II (5)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition	
			T	V	L	PPV	PVS		
161	28	6.5	1.020	1.140	1.980	1.980	2.060	Study area II	
162	29	6.5	1.270	2.270	2.980	2.980	3.240		
163	35	6.5	0.686	0.419	2.010	2.010	2.120		
164	35	6.5	0.419	0.635	1.140	1.140	1.150		
165	40	6.5	1.020	0.813	1.550	1.550	1.640		
166	43	6.5	0.343	0.410	0.698	0.698	0.815		
167	46	6.5	0.991	0.876	1.540	1.540	1.670		
168	48	6.5	0.673	0.394	0.483	0.673	0.738		
169	52	6.5	0.711	0.551	1.450	1.450	1.610		
170	53	6.5	0.406	0.406	0.876	0.876	0.976		
171	44	6.5	0.762	0.864	2.270	2.270	2.340		
172	51	6.5	0.337	0.630	0.303	0.630	0.684		
173	46	6.5	0.298	0.551	0.544	0.551	0.650		
174	45	6.5	0.749	0.551	1.032	1.032	1.312		
175	47	6.5	1.081	1.113	0.600	1.113	1.311		
176	43	6.5	1.244	0.593	1.225	1.244	1.692		
177	49	6.5	1.023	0.625	1.078	1.078	1.356		
178	51	6.5	0.293	0.340	1.186	1.186	1.230		
179	36	14	3.800	4.670	1.750	4.670	5.440		Middle priming
180	37	14	4.760	4.060	3.340	4.760	5.580		
181	39	14	2.760	3.590	2.080	3.590	4.640		
182	43	14	1.730	2.060	1.350	2.060	2.600		
183	45	14	2.010	1.770	1.570	2.010	2.500		
184	48	14	1.240	1.310	1.520	1.520	1.920		
185	51	14	2.100	1.640	1.590	2.100	2.600		
186	54	14	1.370	1.030	1.260	1.370	1.920		
187	57	14	1.000	1.020	1.140	1.140	1.260		
188	60	14	1.410	1.000	1.130	1.410	1.700		
189	64	14	0.864	0.584	1.380	1.380	1.440		
190	67	14	1.030	0.864	1.310	1.310	1.620		
191	70	14	1.000	0.686	1.140	1.140	1.230		
192	75	14	0.947	0.473	0.813	0.947	1.144		
193	78	14	1.064	0.971	0.991	1.064	1.619		
194	81	14	0.793	0.576	1.347	1.347	1.365		
195	83	14	0.752	0.720	0.961	0.961	1.053		
196	85	14	0.769	0.454	0.539	0.769	0.921		
197	93	14	0.366	0.412	0.573	0.573	0.755		
198	94	14	0.593	0.488	0.752	0.752	0.945		
199	99	14	0.256	0.224	0.457	0.457	0.567		
200	11	6.4	3.780	11.800	7.120	11.800	12.300		

Measurement results of study area II (6)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition	
			T	V	L	PPV	PVS		
201	15	6.4	4.480	5.540	5.300	5.540	6.400	Study area II	
202	15	6.4	3.070	3.160	3.810	3.810	4.410		
203	22	6.4	5.890	4.150	7.320	7.320	8.260		
204	23	6.4	1.820	2.310	2.110	2.310	2.470		
205	25	6.4	1.440	2.630	2.650	2.650	3.100		
206	29	6.4	1.160	1.160	2.070	2.070	2.220		
207	32	6.4	1.930	2.100	3.010	3.010	3.510		
208	35	6.4	0.991	1.240	1.260	1.260	1.590		
209	38	6.4	1.850	1.450	1.050	1.850	1.980		
210	41	6.4	0.775	0.991	0.622	0.991	0.991		
211	31	6.4	2.510	2.670	4.230	4.230	4.790		
212	37	6.4	0.434	2.042	0.322	2.042	2.055		
213	35	6.4	0.813	1.523	0.974	1.523	1.727		
214	32	6.4	2.772	2.040	2.311	2.772	3.384		
215	35	6.4	1.349	2.950	0.681	2.950	3.242		
216	30	6.4	1.764	1.288	1.205	1.764	2.173		
217	36	6.4	1.798	1.723	2.367	2.367	2.985		
218	37	6.4	0.839	1.046	1.374	1.374	1.444		
219	11	14	3.520	16.200	5.840	16.200	17.000		Bottom priming
220	13	14	5.000	11.900	17.100	17.100	17.500		
221	17	14	6.290	6.310	9.180	9.180	10.700		
222	19	14	3.400	5.740	6.730	6.730	8.330		
223	22	14	3.620	4.690	6.680	6.680	6.860		
224	26	14	4.010	3.230	5.910	5.910	7.420		
225	29	14	4.140	4.090	4.980	4.980	6.610		
226	31	14	2.780	3.430	2.960	3.430	4.230		
227	37	14	1.560	1.020	2.980	2.980	3.310		
228	41	14	4.150	2.350	2.490	4.150	4.240		
229	44	14	2.210	1.560	2.060	2.210	2.470		
230	49	14	1.137	0.961	1.464	1.464	1.590		
231	52	14	1.481	1.698	0.713	1.698	1.892		
232	55	14	0.754	1.115	0.944	1.115	1.314		
233	57	14	0.769	1.379	0.944	1.379	1.558		
234	59	14	0.576	0.996	0.832	0.996	1.217		
235	67	14	0.256	0.654	0.427	0.654	0.684		
236	68	14	0.520	0.824	0.710	0.824	0.944		
237	73	14	0.286	0.414	0.350	0.414	0.506		
238	9	14	7.000	18.800	8.860	18.800	20.700		
239	11	14	5.460	12.400	19.300	19.300	19.700		
240	15	14	8.660	5.940	11.800	11.800	13.800		

Measurement results of study area II (7)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition
			T	V	L	PPV	PVS	
241	17	14	3.540	4.790	9.930	9.930	11.200	Study area II Bottom priming
242	20	14	3.450	4.430	6.950	6.950	8.240	
243	23	14	4.850	2.510	7.350	7.350	8.420	
244	26	14	3.760	2.970	4.560	4.560	5.620	
245	29	14	2.730	2.790	2.970	2.970	4.070	
246	36	14	1.640	1.030	2.870	2.870	3.290	
247	39	14	4.060	1.830	2.320	4.060	4.260	
248	42	14	2.150	1.160	1.630	2.150	2.360	
249	47	14	1.210	0.759	1.549	1.549	1.678	
250	52	14	1.105	1.398	0.825	1.398	1.675	
251	53	14	1.018	0.793	0.783	1.018	1.122	
252	55	14	0.903	0.966	0.839	0.966	1.137	
253	57	14	0.522	0.708	0.676	0.708	0.869	
254	64	14	0.232	0.583	0.373	0.583	0.612	
255	65	14	0.408	0.680	0.589	0.680	0.804	
256	71	14	0.144	0.349	0.298	0.349	0.435	
257	22	6.5	1.660	3.640	1.520	3.640	4.150	
258	24	6.5	1.640	3.190	4.340	4.340	4.360	
259	24	6.5	1.660	1.360	2.650	2.650	3.180	
260	31	6.5	1.160	0.762	2.310	2.310	2.370	
261	33	6.5	0.787	0.606	1.190	1.190	1.260	
262	34	6.5	1.270	0.749	1.550	1.550	1.600	
263	39	6.5	0.884	0.383	0.724	0.884	0.908	
264	41	6.5	1.380	1.090	1.700	1.700	1.920	
265	44	6.5	0.381	0.356	0.432	0.432	0.586	
266	47	6.5	0.813	0.505	1.520	1.520	1.640	
267	50	6.5	0.775	0.394	0.826	0.826	0.916	
268	40	6.5	0.610	1.330	2.450	2.450	2.640	
269	46	6.5	0.393	0.617	0.215	0.617	0.662	
270	43	6.5	0.364	0.578	0.447	0.578	0.610	
271	41	6.5	1.323	0.971	0.917	1.323	1.619	
272	44	6.5	1.076	1.066	0.378	1.076	1.320	
273	39	6.5	1.730	0.632	1.027	1.730	2.065	
274	45	6.5	1.097	0.736	1.220	1.220	1.701	
275	46	6.5	0.213	0.309	1.324	1.324	1.334	
276	30	14	4.660	5.440	2.970	5.440	6.970	
277	32	14	7.370	5.370	5.540	7.370	7.670	
278	33	14	4.240	6.340	3.000	6.340	7.250	
279	37	14	3.160	2.690	1.590	3.160	3.500	
280	39	14	3.120	2.350	1.680	3.120	3.520	

Measurement results of study area II (8)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition
			T	V	L	PPV	PVS	
281	42	14	2.060	1.750	1.570	2.060	2.490	Study area II Bottom priming
282	46	14	3.240	1.830	1.640	3.240	3.620	
283	49	14	1.770	1.260	1.490	1.770	2.350	
284	51	14	1.640	1.410	1.210	1.640	1.670	
285	54	14	1.980	1.130	1.500	1.980	2.350	
286	59	14	1.190	0.610	1.510	1.510	1.570	
287	61	14	1.560	1.190	1.700	1.700	2.150	
288	64	14	1.320	0.889	1.440	1.440	1.580	
289	69	14	1.266	0.620	0.969	1.266	1.554	
290	72	14	1.584	1.130	1.157	1.584	2.100	
291	74	14	0.637	0.774	1.664	1.664	1.675	
292	78	14	1.271	0.961	1.147	1.271	1.292	
293	80	14	1.230	0.669	0.922	1.230	1.324	
294	87	14	0.305	0.500	0.620	0.620	0.777	
295	88	14	0.706	0.638	0.907	0.907	1.100	
296	93	14	0.328	0.335	0.501	0.501	0.619	

Measurement results of study area III(1)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition
			T	V	L	PPV	PVS	
1	16	6.4	3.310	1.890	4.080	4.080	4.640	Study area III Top priming
2	13	6.4	3.620	4.560	4.720	4.720	6.180	
3	9	6.4	4.340	8.760	19.200	19.200	19.300	
4	7	6.4	11.200	14.100	19.800	19.800	21.600	
5	13	6.4	3.720	4.580	8.310	8.310	8.520	
6	16	6.4	3.380	2.450	5.190	5.190	5.290	
7	22	6.4	2.340	4.330	5.970	5.970	6.520	
8	25	6.4	1.490	0.965	1.100	1.490	1.660	
9	29	6.4	0.787	0.698	0.711	0.787	0.897	
10	33	6.4	0.521	0.940	0.406	0.940	1.030	
11	36	6.4	0.470	0.864	0.432	0.864	0.944	
12	40	6.4	0.283	0.421	0.695	0.695	0.803	
13	45	6.4	0.302	0.541	0.519	0.541	0.667	
14	49	6.4	0.234	0.534	0.295	0.534	0.596	
15	53	6.4	0.185	0.532	0.307	0.532	0.590	
16	62	6.4	0.471	0.259	1.030	1.030	1.117	
17	67	6.4	0.242	0.142	0.222	0.242	0.306	
18	72	6.4	0.095	0.210	0.142	0.210	0.262	
19	16	6.4	1.520	1.710	4.600	4.600	4.730	
20	13	6.4	1.970	2.310	5.610	5.610	5.930	
21	10	6.4	4.030	5.250	11.400	11.400	12.100	
22	10	6.4	10.100	4.840	14.400	14.400	16.900	
23	13	6.4	3.060	2.100	3.130	3.130	3.450	
24	16	6.4	2.770	3.170	3.870	3.870	3.930	
25	19	6.4	2.340	1.570	2.350	2.350	2.480	
26	24	6.4	2.100	2.860	3.280	3.280	4.120	
27	27	6.4	0.864	0.775	0.635	0.864	1.160	
28	31	6.4	0.648	0.381	0.673	0.673	0.815	
29	35	6.4	0.267	0.610	0.292	0.610	0.686	
30	38	6.4	0.292	0.851	0.432	0.851	0.947	
31	42	6.4	0.240	0.559	0.581	0.581	0.687	
32	46	6.4	0.248	0.295	0.497	0.497	0.591	
33	51	6.4	0.146	0.412	0.271	0.412	0.463	
34	55	6.4	0.142	0.398	0.259	0.398	0.432	
35	64	6.4	0.512	0.242	0.795	0.795	0.890	
36	69	6.4	0.166	0.120	0.200	0.200	0.221	
37	73	6.4	0.073	0.149	0.107	0.149	0.183	
38	25	14	0.356	0.559	0.343	0.559	0.658	
39	27	14	0.464	0.362	0.552	0.552	0.711	
40	33	14	0.444	0.292	0.368	0.444	0.577	

Measurement results of study area III(2)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition
			T	V	L	PPV	PVS	
41	37	14	0.267	0.203	0.330	0.330	0.422	Study area III Top priming
42	40	14	0.254	0.229	0.289	0.289	0.332	
43	43	14	0.190	0.165	0.229	0.229	0.296	
44	48	14	0.164	0.121	0.221	0.221	0.276	
45	51	14	0.114	0.190	0.330	0.330	0.350	
46	54	14	0.111	0.100	0.224	0.224	0.232	
47	57	14	0.114	0.064	0.165	0.165	0.186	
48	59	14	0.165	0.114	0.216	0.216	0.235	
49	62	14	0.064	0.089	0.190	0.190	0.204	
50	65	14	0.062	0.056	0.141	0.141	0.146	
51	69	14	0.129	0.078	0.210	0.210	0.214	
52	72	14	0.098	0.068	0.188	0.188	0.192	
53	78	14	0.266	0.063	0.229	0.266	0.290	
54	83	14	0.042	0.073	0.051	0.073	0.076	
55	88	14	0.037	0.056	0.046	0.056	0.058	
56	89	14	0.061	0.044	0.065	0.065	0.083	
57	93	14	0.030	0.042	0.038	0.042	0.043	
58	28	14	0.533	1.680	1.080	1.680	1.750	
59	32	14	1.040	1.140	1.600	1.600	1.730	
60	38	14	1.240	0.914	1.300	1.300	1.910	
61	39	14	1.130	0.546	0.800	1.130	1.180	
62	43	14	0.673	0.757	0.843	0.843	1.080	
63	46	14	0.483	0.787	0.660	0.787	0.843	
64	50	14	0.508	0.497	0.402	0.508	0.714	
65	52	14	0.457	0.787	0.838	0.838	0.949	
66	56	14	0.319	0.359	0.397	0.397	0.518	
67	58	14	0.419	0.292	0.406	0.419	0.499	
68	60	14	0.241	0.406	0.241	0.406	0.435	
69	62	14	0.241	0.406	0.203	0.406	0.431	
70	66	14	0.211	0.198	0.286	0.286	0.310	
71	69	14	0.205	0.307	0.181	0.307	0.345	
72	72	14	0.168	0.190	0.222	0.222	0.274	
73	78	14	0.232	0.198	0.605	0.605	0.613	
74	82	14	0.127	0.107	0.144	0.144	0.192	
75	86	14	0.068	0.144	0.122	0.144	0.164	
76	90	14	0.095	0.131	0.226	0.226	0.252	
77	94	14	0.044	0.063	0.125	0.125	0.130	
78	26	6.5	0.432	0.343	0.305	0.432	0.494	
79	27	6.5	0.492	0.303	0.405	0.492	0.530	
80	30	6.5	0.281	0.267	0.381	0.381	0.399	

Measurement results of study area III(3)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition
			T	V	L	PPV	PVS	
81	33	6.5	0.279	0.190	0.330	0.330	0.381	Study area III Top priming
82	36	6.5	0.297	0.238	0.276	0.297	0.286	
83	38	6.5	0.102	0.216	0.216	0.216	0.281	
84	43	6.5	0.121	0.132	0.187	0.187	0.233	
85	45	6.5	0.140	0.229	0.394	0.394	0.407	
86	48	6.5	0.129	0.092	0.256	0.256	0.287	
87	50	6.5	0.190	0.102	0.190	0.190	0.224	
88	52	6.5	0.178	0.140	0.267	0.267	0.283	
89	54	6.5	0.114	0.178	0.229	0.229	0.263	
90	58	6.5	0.071	0.086	0.100	0.100	0.122	
91	61	6.5	0.164	0.120	0.251	0.251	0.256	
92	64	6.5	0.110	0.098	0.168	0.168	0.190	
93	70	6.5	0.156	0.120	0.288	0.288	0.315	
94	75	6.5	0.051	0.095	0.068	0.095	0.108	
95	79	6.5	0.039	0.068	0.051	0.068	0.070	
96	80	6.5	0.129	0.081	0.116	0.129	0.154	
97	86	6.5	0.042	0.027	0.062	0.062	0.070	
98	29	6.5	0.368	0.495	0.292	0.495	0.640	
99	30	6.5	0.411	0.410	0.402	0.411	0.567	
100	33	6.5	0.406	0.381	0.330	0.406	0.536	
101	36	6.5	0.279	0.279	0.317	0.317	0.365	
102	39	6.5	0.254	0.254	0.348	0.348	0.376	
103	41	6.5	0.14	0.229	0.279	0.279	0.335	
104	45	6.5	0.11	0.146	0.257	0.257	0.303	
105	47	6.5	0.19	0.229	0.597	0.597	0.626	
106	50	6.5	0.129	0.157	0.305	0.305	0.364	
107	53	6.5	0.19	0.114	0.241	0.241	0.292	
108	54	6.5	0.152	0.178	0.241	0.241	0.273	
109	56	6.5	0.114	0.14	0.229	0.229	0.241	
110	59	6.5	0.068	0.068	0.179	0.179	0.181	
111	63	6.5	0.134	0.83	0.242	0.830	0.245	
112	66	6.5	0.115	0.073	0.21	0.210	0.215	
113	72	6.5	0.256	0.093	0.344	0.344	0.375	
114	76	6.5	0.073	0.105	0.066	0.105	0.107	
115	80	6.5	0.034	0.076	0.054	0.076	0.078	
116	83	6.5	0.123	0.088	0.135	0.135	0.162	
117	87	6.5	0.036	0.044	0.062	0.062	0.08	
118	24	14	0.749	1.51	0.889	1.510	1.72	
119	29	14	1.42	0.953	0.787	1.420	1.74	
120	35	14	1.13	0.737	1	1.130	1.63	

Measurement results of study area III(4)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition
			T	V	L	PPV	PVS	
121	39	14	0.978	0.584	0.813	0.978	1.03	Study area III Top priming
122	43	14	0.697	0.724	0.883	0.883	1.03	
123	46	14	0.432	0.673	0.635	0.673	0.789	
124	51	14	0.391	0.375	0.425	0.425	0.581	
125	54	14	0.559	0.698	1.12	1.120	1.19	
126	58	14	0.437	0.352	0.522	0.522	0.641	
127	61	14	0.47	0.229	0.584	0.584	0.666	
128	63	14	0.267	0.343	0.292	0.343	0.381	
129	66	14	0.152	0.368	0.305	0.368	0.393	
130	70	14	0.164	0.23	0.367	0.367	0.368	
131	73	14	0.151	0.212	0.249	0.249	0.294	
132	77	14	0.144	0.217	0.283	0.283	0.305	
133	83	14	0.212	0.161	0.734	0.734	0.738	
134	88	14	0.168	0.115	0.146	0.168	0.214	
135	92	14	0.071	0.124	0.115	0.124	0.133	
136	94	14	0.104	0.139	0.253	0.253	0.298	
137	98	14	0.05	0.064	0.142	0.142	0.159	
138	25	14	0.521	1.23	0.673	1.230	1.38	
139	29	14	0.095	0.787	0.773	0.787	1.29	
140	34	14	0.091	0.8	0.787	0.800	1.32	
141	38	14	0.711	0.457	0.61	0.711	0.785	
142	42	14	0.573	0.649	0.711	0.711	0.892	
143	45	14	0.368	0.597	0.559	0.597	0.676	
144	50	14	0.316	0.379	0.403	0.403	0.489	
145	52	14	0.419	0.571	0.876	0.876	0.968	
146	56	14	0.364	0.284	0.473	0.473	0.567	
147	59	14	0.419	0.216	0.444	0.444	0.488	
148	61	14	0.318	0.33	0.33	0.330	0.376	
149	63	14	0.229	0.356	0.317	0.356	0.39	
150	67	14	0.137	0.144	0.321	0.321	0.322	
151	71	14	0.127	0.171	0.278	0.278	0.288	
152	74	14	0.132	0.144	0.286	0.286	0.293	
153	80	14	0.342	0.105	0.691	0.691	0.71	
154	84	14	0.129	0.151	0.115	0.151	0.169	
155	88	14	0.056	0.137	0.098	0.137	0.138	
156	91	14	0.149	0.136	0.242	0.242	0.279	
157	95	14	0.046	0.066	0.118	0.118	0.139	
158	16	6.4	1.360	1.470	4.910	4.910	5.150	
159	14	6.4	1.100	2.220	4.930	4.930	5.180	
160	13	6.4	5.740	3.670	9.320	9.320	9.860	

Measurement results of study area III(5)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition
			T	V	L	PPV	PVS	
161	14	6.4	7.650	2.340	5.220	7.650	9.280	Study area III
162	17	6.4	1.900	1.520	2.080	2.080	2.520	
163	20	6.4	1.360	1.450	1.880	1.880	2.060	
164	23	6.4	1.280	0.876	1.160	1.280	1.500	
165	28	6.4	1.120	1.310	1.690	1.690	1.800	
166	31	6.4	0.554	0.422	0.508	0.554	0.667	
167	35	6.4	0.622	0.254	0.660	0.660	0.870	
168	38	6.4	0.241	0.432	0.267	0.432	0.541	
169	41	6.4	0.203	0.571	0.317	0.571	0.652	
170	44	6.4	0.213	0.397	0.449	0.449	0.527	
171	48	6.4	0.249	0.189	0.324	0.324	0.413	
172	53	6.4	0.110	0.266	0.190	0.266	0.316	
173	57	6.4	0.137	0.239	0.229	0.239	0.288	
174	64	6.4	0.522	0.220	0.578	0.578	0.726	
175	69	6.4	0.120	0.129	0.144	0.144	0.164	
176	73	6.4	0.051	0.100	0.073	0.100	0.111	
177	16	6.4	0.673	1.450	4.530	4.530	4.620	
178	15	6.4	0.940	1.880	4.910	4.910	4.970	
179	16	6.4	5.990	3.900	7.200	7.200	7.690	
180	16	6.4	5.930	2.780	5.630	5.930	8.210	
181	19	6.4	1.040	1.110	1.570	1.570	1.930	
182	22	6.4	0.914	1.230	1.330	1.330	1.460	
183	25	6.4	0.665	0.584	0.775	0.775	0.976	
184	30	6.4	0.864	0.864	1.320	1.320	1.440	
185	33	6.4	0.638	0.292	0.565	0.638	0.702	
186	37	6.4	0.533	0.178	0.698	0.698	0.831	
187	40	6.4	0.229	0.318	0.318	0.318	0.449	
188	42	6.4	0.229	0.381	0.279	0.381	0.442	
189	46	6.4	0.171	0.219	0.370	0.370	0.406	
190	50	6.4	0.249	0.171	0.302	0.302	0.371	
191	54	6.4	0.129	0.193	0.176	0.193	0.253	
192	58	6.4	0.144	0.164	0.220	0.220	0.246	
193	65	6.4	0.464	0.173	0.578	0.578	0.663	
194	70	6.4	0.154	0.110	0.129	0.154	0.161	
195	74	6.4	0.054	0.112	0.068	0.112	0.119	
196	29	14	0.876	1.510	0.889	1.510	1.620	
197	32	14	1.550	0.914	1.560	1.560	1.980	
198	38	14	1.370	1.050	1.350	1.370	1.790	
199	42	14	1.100	0.571	0.876	1.100	1.230	
200	45	14	0.870	0.770	0.865	0.870	1.050	

Measurement results of study area III(6)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition
			T	V	L	PPV	PVS	
201	48	14	0.686	0.864	0.622	0.864	0.888	Study area III
202	53	14	0.662	0.432	0.413	0.662	0.778	
203	55	14	0.571	0.749	0.775	0.775	1.020	
204	59	14	0.313	0.346	0.400	0.400	0.502	
205	62	14	0.419	0.254	0.419	0.419	0.443	
206	63	14	0.165	0.318	0.292	0.318	0.364	
207	66	14	0.190	0.495	0.241	0.495	0.525	
208	73	14	0.207	0.298	0.227	0.298	0.338	
209	76	14	0.168	0.244	0.181	0.244	0.282	
210	82	14	0.305	0.215	0.571	0.571	0.593	
211	86	14	0.132	0.120	0.142	0.142	0.196	
212	90	14	0.071	0.117	0.124	0.124	0.162	
213	93	14	0.142	0.138	0.146	0.146	0.280	
214	97	14	0.043	0.061	0.137	0.137	0.144	
215	31	14	0.787	1.130	0.902	1.130	1.350	
216	35	14	1.370	0.787	1.400	1.400	1.780	
217	41	14	1.210	0.660	1.140	1.210	1.630	
218	45	14	0.864	0.521	0.902	0.902	1.080	
219	47	14	0.675	0.506	0.813	0.813	0.919	
220	52	14	0.483	0.571	0.521	0.571	0.612	
221	57	14	0.464	0.276	0.408	0.464	0.608	
222	59	14	0.483	0.546	0.724	0.724	0.825	
223	63	14	0.203	0.281	0.332	0.332	0.392	
224	66	14	0.356	0.165	0.394	0.394	0.419	
225	68	14	0.191	0.178	0.203	0.203	0.303	
226	70	14	0.102	0.292	0.216	0.292	0.326	
227	77	14	0.137	0.188	0.171	0.188	0.221	
228	80	14	0.124	0.173	0.210	0.210	0.252	
229	86	14	0.171	0.146	0.517	0.517	0.537	
230	91	14	0.127	0.076	0.115	0.127	0.172	
231	94	14	0.056	0.190	0.095	0.190	0.116	
232	97	14	0.107	0.098	0.193	0.193	0.023	
233	101	14	0.032	0.048	0.106	0.106	0.115	
234	27	6.5	0.292	0.495	0.229	0.495	0.576	
235	30	6.5	0.352	0.432	0.505	0.505	0.598	
236	34	6.5	0.571	0.419	0.330	0.571	0.691	
237	37	6.5	0.508	0.254	0.292	0.508	0.557	
238	40	6.5	0.381	0.249	0.294	0.381	0.392	
239	43	6.5	0.229	0.178	0.229	0.229	0.315	
240	47	6.5	0.164	0.127	0.184	0.184	0.246	

Measurement results of study area III(7)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition
			T	V	L	PPV	PVS	
241	49	6.5	0.254	0.127	0.394	0.394	0.429	Study area III Middle priming
242	53	6.5	0.125	0.144	0.268	0.268	0.295	
243	55	6.5	0.203	0.102	0.203	0.203	0.209	
244	56	6.5	0.127	0.114	0.254	0.254	0.267	
245	59	6.5	0.089	0.114	0.190	0.190	0.198	
246	62	6.5	0.060	0.071	0.132	0.132	0.137	
247	66	6.5	0.115	0.107	0.220	0.220	0.237	
248	69	6.5	0.076	0.127	0.178	0.178	0.202	
249	74	6.5	0.132	0.083	0.237	0.237	0.240	
250	78	6.5	0.068	0.122	0.083	0.122	0.138	
251	83	6.5	0.034	0.083	0.049	0.083	0.085	
252	85	6.5	0.122	0.073	0.111	0.122	0.150	
253	89	6.5	0.020	0.065	0.057	0.065	0.082	
254	25	6.5	0.178	0.571	0.178	0.571	0.596	
255	27	6.5	0.237	0.460	0.318	0.460	0.529	
256	31	6.5	0.292	0.444	0.267	0.444	0.513	
257	34	6.5	0.330	0.241	0.190	0.330	0.412	
258	37	6.5	0.235	0.202	0.219	0.235	0.258	
259	40	6.5	0.216	0.203	0.19	0.216	0.294	
260	44	6.5	0.179	0.168	0.164	0.179	0.252	
261	46	6.5	0.178	0.216	0.229	0.229	0.292	
262	50	6.5	0.119	0.144	0.173	0.173	0.211	
263	52	6.5	0.19	0.114	0.127	0.190	0.228	
264	54	6.5	0.114	0.14	0.178	0.178	0.179	
265	56	6.5	0.089	0.127	0.114	0.127	0.147	
266	60	6.5	0.037	0.057	0.113	0.113	0.125	
267	63	6.5	0.124	0.103	0.124	0.124	0.193	
268	65	6.5	0.054	0.059	0.132	0.132	0.144	
269	72	6.5	0.09	0.054	0.227	0.227	0.227	
270	76	6.5	0.034	0.066	0.073	0.073	0.084	
271	81	6.5	0.037	0.056	0.049	0.056	0.07	
272	84	6.5	0.042	0.036	0.071	0.071	0.081	
273	88	6.5	0.02	0.03	0.031	0.031	0.038	
274	31	14	0.787	1.49	0.876	1.490	1.62	
275	35	14	1.5	1.05	1.32	1.500	1.65	
276	41	14	1.09	0.825	1.18	1.180	1.65	
277	45	14	0.991	0.61	0.889	0.991	1.13	
278	48	14	0.587	0.697	0.972	0.972	1.09	
279	52	14	0.419	0.635	0.775	0.775	0.842	
280	57	14	0.368	0.508	0.491	0.508	0.649	

Measurement results of study area III(8)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition
			T	V	L	PPV	PVS	
281	59	14	0.483	0.813	1.32	1.320	1.42	Study area III Middle priming
282	63	14	0.424	0.506	0.606	0.606	0.778	
283	66	14	0.444	0.292	0.66	0.660	0.789	
284	68	14	0.279	0.406	0.356	0.406	0.467	
285	70	14	0.19	0.457	0.343	0.457	0.498	
286	74	14	0.14	0.217	0.487	0.487	0.5	
287	77	14	0.134	0.298	0.303	0.303	0.423	
288	80	14	0.173	0.205	0.349	0.349	0.408	
289	86	14	0.415	0.266	0.803	0.803	0.826	
290	91	14	0.166	0.22	0.19	0.220	0.227	
291	94	14	0.071	0.181	0.139	0.181	0.183	
292	98	14	0.129	0.132	0.28	0.280	0.292	
293	102	14	0.059	0.09	0.125	0.125	0.161	
294	22	14	0.838	2.32	1.36	2.320	2.38	
295	26	14	1.57	1.82	2.16	2.160	2.37	
296	33	14	1.64	1.49	1.89	1.890	2.64	
297	37	14	1.31	0.622	0.952	1.310	1.44	
298	41	14	0.887	0.994	0.956	0.994	1.24	
299	44	14	0.635	1	0.698	1.000	1.02	
300	52	14	0.444	0.991	0.864	0.991	1.2	
301	59	14	0.508	0.368	0.368	0.508	0.585	
302	61	14	0.191	0.445	0.292	0.445	0.449	
303	64	14	0.19	0.483	0.279	0.483	0.5	
304	72	14	0.171	0.322	0.261	0.322	0.345	
305	75	14	0.144	0.234	0.222	0.234	0.265	
306	83	14	0.271	0.183	0.652	0.652	0.658	
307	86	14	0.107	0.107	0.168	0.168	0.211	
308	90	14	0.083	0.154	0.124	0.154	0.16	
309	94	14	0.16	0.146	0.239	0.239	0.265	
310	98	14	0.044	0.105	0.078	0.105	0.127	
311	16	6.4	0.648	1.450	2.360	2.360	2.370	
312	16	6.4	1.020	1.550	2.500	2.500	2.870	
313	16	6.4	3.390	2.340	3.430	3.430	4.170	
314	18	6.4	3.070	2.010	1.870	3.070	3.580	
315	21	6.4	0.991	1.030	1.250	1.250	1.540	
316	24	6.4	0.584	0.749	1.240	1.240	1.310	
317	27	6.4	0.452	0.371	0.560	0.560	0.629	
318	32	6.4	1.100	0.698	1.890	1.890	2.070	
319	35	6.4	0.424	0.240	0.579	0.579	0.656	
320	38	6.4	0.610	0.216	0.635	0.635	0.875	

Measurement results of study area III(9)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition
			T	V	L	PPV	PVS	
321	42	6.4	0.216	0.229	0.305	0.305	0.389	Study area III Bottom priming
322	44	6.4	0.229	0.406	0.305	0.406	0.445	
323	48	6.4	0.192	0.308	0.332	0.332	0.383	
324	52	6.4	0.270	0.143	0.340	0.340	0.351	
325	56	6.4	0.168	0.215	0.202	0.215	0.246	
326	59	6.4	0.156	0.222	0.220	0.222	0.273	
327	67	6.4	0.429	0.168	0.578	0.578	0.657	
328	72	6.4	0.183	0.110	0.156	0.183	0.184	
329	77	6.4	0.068	0.110	0.078	0.110	0.117	
330	16	6.4	0.749	1.330	1.880	1.880	2.120	
331	18	6.4	0.876	1.030	2.730	2.730	2.790	
332	19	6.4	2.170	1.700	3.860	3.860	4.200	
333	21	6.4	2.130	1.770	2.770	2.770	3.420	
334	28	6.4	0.470	0.711	1.020	1.020	1.080	
335	31	6.4	0.386	0.467	0.519	0.519	0.537	
336	36	6.4	1.300	0.724	1.980	1.980	2.330	
337	38	6.4	0.456	0.279	0.579	0.579	0.729	
338	42	6.4	0.686	0.317	0.584	0.686	0.902	
339	45	6.4	0.241	0.241	0.267	0.267	0.306	
340	48	6.4	0.279	0.483	0.343	0.483	0.540	
341	51	6.4	0.237	0.340	0.275	0.340	0.392	
342	54	6.4	0.268	0.189	0.418	0.418	0.422	
343	59	6.4	0.176	0.281	0.268	0.281	0.301	
344	62	6.4	0.185	0.312	0.217	0.312	0.331	
345	69	6.4	0.361	0.166	0.617	0.617	0.666	
346	74	6.4	0.237	0.166	0.215	0.237	0.248	
347	78	6.4	0.085	0.122	0.098	0.122	0.156	
348	34	14	0.571	0.965	0.610	0.965	1.040	
349	38	14	0.772	0.598	0.773	0.773	1.120	
350	45	14	0.787	0.495	0.737	0.787	1.080	
351	49	14	0.635	0.343	0.495	0.635	0.739	
352	52	14	0.435	0.422	0.594	0.594	0.669	
353	56	14	0.292	0.444	0.457	0.457	0.514	
354	63	14	0.317	0.432	0.660	0.660	0.709	
355	70	14	0.279	0.165	0.317	0.317	0.367	
356	71	14	0.191	0.216	0.178	0.216	0.251	
357	74	14	0.114	0.241	0.165	0.241	0.290	
358	81	14	0.093	0.190	0.161	0.190	0.222	
359	84	14	0.100	0.137	0.190	0.190	0.202	
360	90	14	0.239	0.161	0.456	0.456	0.518	

Measurement results of study area III(10)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition	
			T	V	L	PPV	PVS		
361	94	14	0.095	0.068	0.093	0.095	0.132	Study area III	
362	98	14	0.042	0.071	0.078	0.078	0.088		
363	100	14	0.088	0.090	0.164	0.164	0.190		
364	104	14	0.029	0.032	0.077	0.077	0.082		
365	36	14	0.419	0.584	0.483	0.584	0.734		
366	41	14	0.768	0.371	0.773	0.773	0.903		
367	48	14	0.546	0.317	0.444	0.546	0.716		
368	52	14	0.216	0.508	0.483	0.508	0.544		
369	56	14	0.262	0.260	0.403	0.403	0.447		
370	59	14	0.165	0.241	0.305	0.305	0.327		
371	66	14	0.178	0.229	0.368	0.368	0.376		
372	73	14	0.152	0.102	0.216	0.216	0.238		
373	75	14	0.191	0.114	0.127	0.191	0.192		
374	77	14	0.127	0.127	0.165	0.165	0.194		
375	84	14	0.061	0.073	0.164	0.164	0.164		
376	87	14	0.088	0.068	0.178	0.178	0.181		
377	93	14	0.083	0.063	0.325	0.325	0.404		
378	97	14	0.046	0.088	0.059	0.088	0.099		
379	101	14	0.029	0.085	0.049	0.085	0.090		
380	103	14	0.078	0.057	0.099	0.099	0.125		
381	107	14	0.026	0.059	0.039	0.059	0.041		
382	24	6.5	0.203	0.597	0.229	0.597	0.633		Bottom priming
383	25	6.5	0.300	0.481	0.397	0.481	0.603		
384	28	6.5	0.406	0.444	0.406	0.444	0.531		
385	31	6.5	0.356	0.267	0.229	0.356	0.423		
386	34	6.5	0.254	0.227	0.303	0.303	0.366		
387	37	6.5	0.229	0.229	0.279	0.279	0.325		
388	41	6.5	0.187	0.184	0.243	0.243	0.298		
389	43	6.5	0.241	0.254	0.343	0.343	0.377		
390	46	6.5	0.181	0.175	0.167	0.181	0.243		
391	49	6.5	0.241	0.140	0.152	0.241	0.280		
392	50	6.5	0.152	0.165	0.127	0.165	0.192		
393	53	6.5	0.114	0.140	0.102	0.140	0.159		
394	56	6.5	0.083	0.060	0.095	0.095	0.102		
395	60	6.5	0.142	0.120	0.107	0.142	0.189		
396	65	6.5	0.071	0.073	0.129	0.129	0.142		
397	69	6.5	0.120	0.042	0.298	0.298	0.298		
398	74	6.5	0.049	0.068	0.066	0.068	0.075		
399	79	6.5	0.032	0.088	0.056	0.088	0.088		
400	81	6.5	0.035	0.051	0.101	0.101	0.103		

Measurement results of study area III(11)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition
			T	V	L	PPV	PVS	
401	85	6.5	0.020	0.030	0.039	0.039	0.044	Study area III
402	23	6.5	0.470	0.876	0.432	0.876	0.995	
403	26	6.5	0.735	0.646	0.699	0.735	1.070	
404	30	6.5	0.648	0.546	0.610	0.648	0.848	
405	33	6.5	0.622	0.381	0.368	0.622	0.727	
406	36	6.5	0.464	0.316	0.381	0.464	0.473	
407	39	6.5	0.343	0.330	0.317	0.343	0.488	
408	44	6.5	0.365	0.221	0.337	0.365	0.498	
409	46	6.5	0.317	0.432	0.521	0.521	0.596	
410	50	6.5	0.229	0.194	0.224	0.229	0.321	
411	53	6.5	0.330	0.152	0.178	0.330	0.373	
412	54	6.5	0.14	0.178	0.254	0.254	0.276	
413	57	6.5	0.127	0.165	0.165	0.165	0.22	
414	61	6.5	0.067	0.076	0.138	0.138	0.144	
415	64	6.5	0.195	0.129	0.195	0.195	0.262	
416	68	6.5	0.098	0.659	0.161	0.659	0.188	
417	74	6.5	0.137	0.054	0.383	0.383	0.405	
418	79	6.5	0.044	0.049	0.098	0.098	0.101	
419	82	6.5	0.046	0.076	0.068	0.076	0.099	
420	85	6.5	0.044	0.055	0.12	0.120	0.12	
421	89	6.5	0.023	0.04	0.049	0.049	0.052	
422	34	14	0.61	0.914	0.61	0.914	1.06	
423	39	14	0.914	0.598	0.775	0.914	1.13	
424	46	14	0.711	0.381	0.61	0.711	0.853	
425	50	14	0.483	0.292	0.508	0.508	0.635	
426	54	14	0.476	0.341	0.5	0.500	0.532	
427	57	14	0.267	0.33	0.432	0.432	0.442	
428	62	14	0.241	0.249	0.321	0.321	0.397	
429	65	14	0.394	0.33	0.838	0.838	0.897	
430	69	14	0.24	0.267	0.429	0.429	0.5	
431	71	14	0.229	0.14	0.432	0.432	0.484	
432	73	14	0.152	0.191	0.254	0.254	0.291	
433	76	14	0.14	0.216	0.292	0.292	0.341	
434	79	14	0.108	0.121	0.31	0.310	0.324	
435	83	14	0.09	0.12	0.249	0.249	0.252	
436	86	14	0.12	0.134	0.256	0.256	0.282	
437	92	14	0.378	0.139	0.488	0.488	0.555	
438	96	14	0.107	0.159	0.124	0.159	0.168	
439	100	14	0.068	0.151	0.073	0.151	0.167	
440	102	14	0.135	0.079	0.147	0.147	0.169	

Measurement results of study area III(12)

No.	Distance (m)	Weight (kg)	Ground vibration velocity (cm/sec)					Blasting condition
			T	V	L	PPV	PVS	
441	106	14	0.058	0.065	0.078	0.078	0.096	Study area III Bottom priming
442	36	14	0.813	1.45	0.838	1.450	1.53	
443	41	14	1.16	1.05	0.864	1.160	1.53	
444	48	14	1.13	0.66	0.851	1.130	1.23	
445	52	14	0.749	0.394	0.686	0.749	0.934	
446	56	14	0.797	0.597	0.713	0.797	0.932	
447	60	14	0.381	0.673	0.635	0.673	0.779	
448	65	14	0.338	0.424	0.486	0.486	0.602	
449	68	14	0.559	0.61	1.08	1.080	1.21	
450	71	14	0.511	0.437	0.659	0.659	0.779	
451	74	14	0.419	0.241	0.66	0.660	0.706	
452	76	14	0.33	0.33	0.381	0.381	0.495	
453	79	14	0.241	0.444	0.394	0.444	0.502	
454	82	14	0.217	0.205	0.491	0.491	0.529	
455	86	14	0.168	0.239	0.344	0.344	0.398	
456	89	14	0.234	0.229	0.356	0.356	0.394	
457	95	14	0.527	0.254	0.688	0.688	0.754	
458	99	14	0.156	0.173	0.171	0.173	0.203	
459	103	14	0.085	0.203	0.132	0.203	0.219	
460	105	14	0.139	0.142	0.266	0.266	0.283	
461	109	14	0.074	0.073	0.113	0.113	0.138	

저작물 이용 허용서

학과	에너지 자원공학과	학번	10341071	과정	박사
성명	한글 : 김 재 응 한문 : 金 載 雄 영문 : Kim, Jae Woong				
주소	전라북도 전주시 완산구 효자동 3가 호반베르디움 102동 306호				
연락처	E-MAIL : novoct1@hanmail.net				
논문제목	한글 : 발파공내 기폭위치가 지반진동에 미치는 영향 영어 : Influence of priming location on the ground vibration				

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

- 다 음 -

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

동의여부 : 동의() 반대()

2011년 2월

저작자 : 김 재 응 (인)

조선대학교 총장 귀하