

2006年 2月
碩士學位論文

지하채굴공동에서 굴착방법에 따른
발파진동의 특성에 관한 연구

朝鮮大學校 大學院

資源工學科

柳 福 鉉

지하채굴공동에서 굴착방법에 따른 발파진동의 특성에 관한 연구

- A Study on the Characteristics of Blasting Vibration according
to Excavation Method of Underground Mining Cavity -

2006年 2 月 日

朝鮮大學校 大學院

資源工學科

柳 福 鉉

지하채굴공동에서 굴착방법에 따른
발파진동의 특성에 관한 연구

指導教授 姜 秋 遠

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함.

2005年 11 月 日

朝鮮大學校 大學院

資源工學科

柳 福 鉉

柳福鉉의 碩士學位 論文을 認准함.

委員長 朝鮮大學校 教授 梁 海 承 印

委 員 朝鮮大學校 教授 高 進 碩 印

委 員 朝鮮大學校 教授 姜 秋 遠 印

2005年 11 月 日

朝鮮大學校 大學院

목 차

List of Tables	i
List of Figures	ii
Abstract	iv
1. 서론	1
2. 연구지역의 지질개요	3
2.1 연구지역의 지형	3
2.2 지질 및 광상	3
3. 발파진동 및 암반손상권 이론	7
3.1 발파진동의 특성	7
3.2 발파진동의 전파특성	12
3.3 발파진동의 조절 및 경감대책	14
3.3.1 발파원으로부터 진동발생을 억제하는 방법	14
3.3.2 전파하는 진동을 차단하는 방법	14
3.4 발파진동식의 예측	16
3.5 암반손상권 이론	17
3.5.1 개요	17
3.5.2 암반손상영역의 예측방법	18
3.5.3 발파진동속도에 의한 예측	18
4. 굴착방법 및 발파진동의 계측	23
4.1 발파패턴	23
4.2 굴착방법	24
4.2.1 Excavation Method- I	24
4.2.2 Excavation Method- II	26

4.2.3 Excavation Method-Ⅲ	27
4.3 발파진동 계측기	29
4.3.1 발파진동 계측기의 구성	29
4.3.2 계측기기	30
4.3.3 굴착방법별 계측거리	31
5. 계측결과 및 분석	33
5.1 굴착방법별 계측결과	33
5.2 굴착방법별 분석결과	34
5.2.1 Excavation Method-Ⅰ의 발파진동예상식	34
5.2.2 Excavation Method-Ⅱ의 발파진동예상식	37
5.2.3 Excavation Method-Ⅲ의 발파진동예상식	40
5.3 노모그램을 이용한 분석결과	43
5.4 굴착방법별 암반손상권 분석	46
5.4.1 암반손상권 분석결과	46
6. 결론	50
참 고 문 헌	52

List of Tables

Table 2.1 Geology genealogy of study area	6
Table 3.1 Unit of vibration	11
Table 3.2 Comparison of blasting vibration and earthquake	11
Table 3.3 The effect of blasting vibration variable	13
Table 4.1 Working condition and summary of EM- I	24
Table 4.2 Working condition and summary of EM- II	26
Table 4.3 Working condition and summary of EM-III	27
Table 4.4 Measuring distance	32
Table 5.1 Result of vibration monitoring	33

List of Figures

Figure 2.1 Location map of study area	4
Figure 2.2 Mine map of study area	5
Figure 3.1 Schematic of the fracturing and deformation around an explosion in rock	7
Figure 3.2 Three components of blasting vibration measured in surface	8
Figure 3.3 Displacement, particle velocity, acceleration waveform	10
Figure 3.4 Property and range of disturbed rock zone around cavity	18
Figure 3.5 Integral calculus for stemming length to calculate particle velocity on voluntary observation	20
Figure 4.1 Blasting pattern in study area	23
Figure 4.2 Typical drawing of blast monitoring	29
Figure 5.1 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by EM- I	35
Figure 5.2 Relationship between peak particle velocity and cube root scaled distance by EM- I	36
Figure 5.3 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by EM- II	38
Figure 5.4 Relationship between peak particle velocity and cube root scaled distance by EM- II	39
Figure 5.5 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by EM- III	41
Figure 5.6 Relationship between peak particle velocity and cube root scaled distance by EM- III	42

Figure 5.7 Relationship between peak velocity sum and square root scaled distance by EM- I , II , III of waveform	44
Figure 5.8 Relationship between peak velocity sum and cube root scaled distance by EM- I , II , III of waveform	45
Figure 5.9 Disturbed rock zone of EM- I	47
Figure 5.10 Disturbed rock zone of EM- II	48
Figure 5.11 Disturbed rock zone of EM-III	49

Abstract

A Study on the Characteristic of Blasting Vibration according to
Excavation Method of Underground Mining Cavity

By Ryu, Pog Hyun

Adv. Prof. : Kang, Choo Won

Dept. of Resource Engineering

Graduate School, Chosun University

The domestic limestone mine has been changed from open mining to underground excavation due to environmental pollution. Levels became a large size to maintain mass-production like open mining. Accordingly, levels, the scale of pillars and excavation methods generated many problems as well as most mining levels and the design of pillar size are experimentally decided.

It is difficult situations that the pillars decided without grasping the specific of rock mass guarantee pillar stability in case excavations are carried out experimental methods.

On this study, when blasting to excavate the same time A level and B level, the same time left transport and inclined shaft (EM-I), sequentially A level and B level (EM-II), separatively A level and B level (EM-III), each vibrations measure and blasting vibration formula calculate. Nomogram analysis and damage zone of rock mass are carried into effect by formula. When blasting to excavate separatively A level and B level (EM-III), levels and pillars analyzed the most stable blasting vibration characteristics.

1. 서론

국내 석회석 광산은 환경문제 등으로 인하여 노천채광에서 지하채굴로 전환되면서, 노천채광과 같은 대량 생산을 유지하기 위하여 갱도가 대형화 되고 있고, 이에 따라 갱도 및 광주의 규모 그리고 채굴방법 등에서 많은 문제가 발생하고 있다. 또한 대부분 채광갱도와 광주 크기의 설계는 경험적으로 결정하고 있는 상황이다. 이러한 경험적인 방법으로 채굴을 수행할 경우 정확한 암반의 특성과약 없이 결정된 갱도는 광주의 안정성을 보장하기 어려운 상황이다.¹⁾

채광을 위한 발파작업시 발파진동으로 인한 갱도와 광주의 피로현상에 의해 채광갱도 주변에 위치한 갱도와 광주는 변형 및 파괴가 발생되며, 이로 인해 채굴공동의 붕락현상이 발생되기도 한다. 이런 발파진동의 특성을 분석하여 이를 발파방법에 반영하므로써 안정적인 갱도와 광주설계를 수행하여 안전한 채광작업과 효율적인 광산개발과 채광실수율을 증가시키기 위함이며, 또한 광주의 2차적 채굴을 포기하여 영구히 남겨두는 영구광주법을 채택한 채광장이라면 채수율을 크게 할 필요가 있어 설계된 광주의 크기를 최소로 제한하고 채굴폭을 증가시켜 광산실수율을 더욱 향상시키기 위함이다. 그리고 광산은 터널과 마찬가지로 안정된 초기응력상태의 암반을 인위적으로 굴착하여 만드는 것으로 채굴로 인한 주변 암반의 이완 및 지지력의 저하상태를 정확히 평가하고 파악하는 것이 갱도와 광주의 안정성을 평가하는 매우 중요한 요소이다. 따라서 갱도 발파시 채굴단면 주변 암반의 손상상태를 측정하여 평가할 필요가 있다.

이에 본 연구는 A갱도와 B갱도를 동시 발파하여 굴착했을 때와 B갱도 내에서 좌운반 갱도와 사갱을 동시 발파하여 굴착했을 때(이후로부터 EM-I), A갱도와 B갱도를 다단 발파하여 굴착했을 때(이후로부터 EM-II) 그리고 A갱도와 B갱도를 단독 발파하여 굴착했을 때(이후로부터 EM-III)의 발파진동을 계측하여 각각의 굴

착방법에 따라 발파진동식을 산출하여 노모그램 분석과 암반손상권 분석을 실시하여 지하채굴공동에서 굴착방법에 따른 발파진동의 특성을 규명하고자 함에 있다.

2. 연구지역의 지질개요

2.1 연구지역의 지형

본 연구지역은 충북 제천시 두학동 일대에 속하는 석회석 광산으로써 광체 양상은 가창산 향사, 두학동 복향사 및 기동리 향사 구조로 대분되며 현재 가창산 향사 구역에 410갱을 개설하여 1·2·3 중단과 하 1·2·3단에서 채광중이다.³⁾ (Figure 2.1, 2.2)

2.2 지질 및 광상

본 연구지역 광산 일대의 지질은 고생대 오오도비스기(조선누층군)의 영흥층을 부정합으로 피복한 석탄기(평안누층군)의 갑산층, 중생대 쥐라기 및 백악기에 관입한 제천화강암 및 맥암류로 구성된다. 갑산층은 N25°~35°W방향의 축을 가지고 발달하는데 수 회 변성작용을 받아 복잡한 양상으로 분포된다. 갑산층은 하부사질대-중부석회암대-상부호층대로 대분되고, 개발 가능한 석회암은 중부석회암대에 발달되는 석회암으로 25~35m의 층후, 연장 약 2km정도를 가지고 담회-회색, 미정-세립질 괴상석회암이 발달하나, 수 cm의 암회색 세일이 일부구간 협재되며, 방해석 세맥, 석영맥 및 실리카 등이 여러 매 협재되어 고품위 석회석(소성용)으로 개발 가능한 구간은 6~10m로 CaO 54%이상 SiO₂ 0.6%이하의 품위를 가지며, 분화율은 20%(평균 2.54%)미만으로 소성용으로 적합한 광체를 나타낸다.³⁴⁾

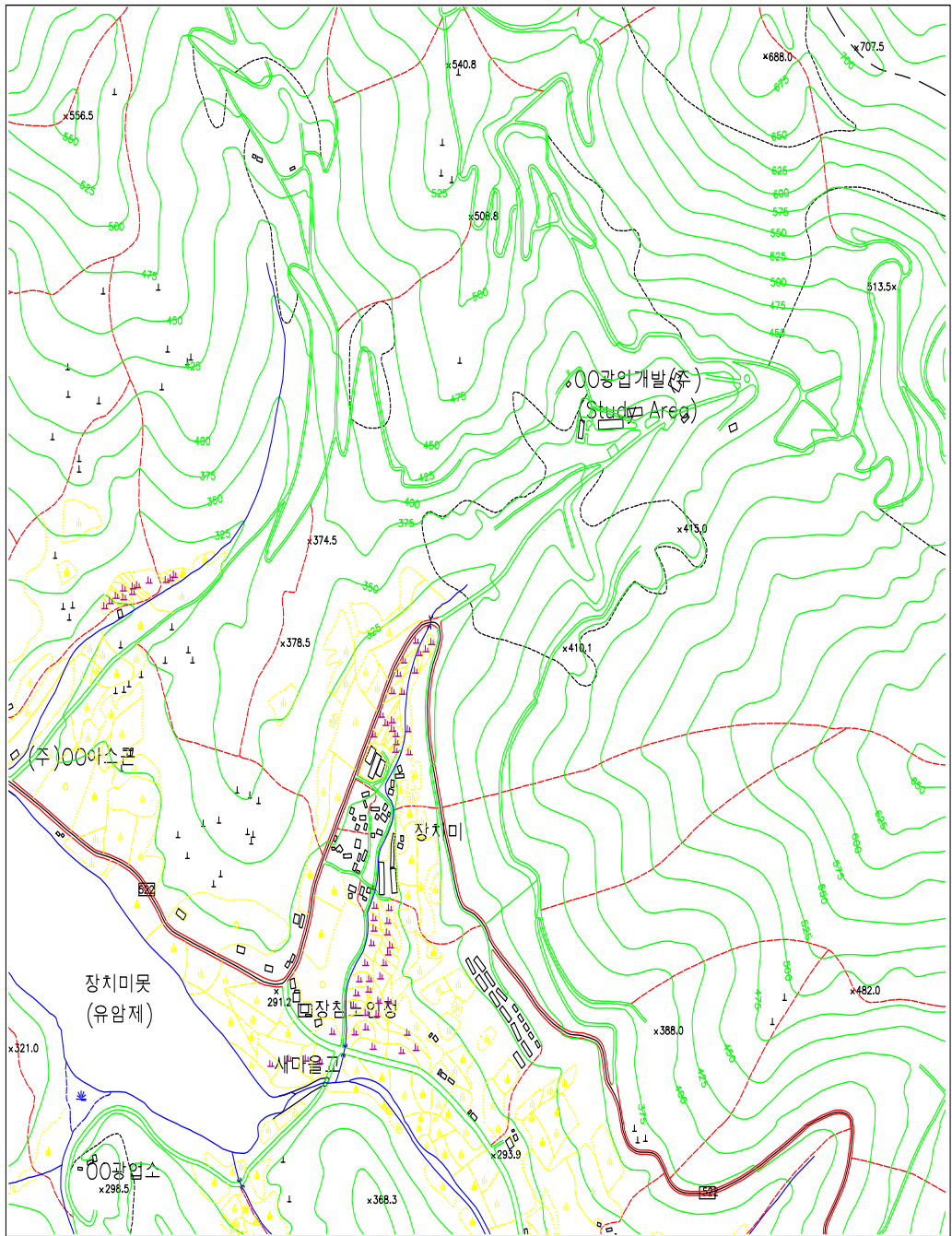


Figure 2.1 Location map of study area

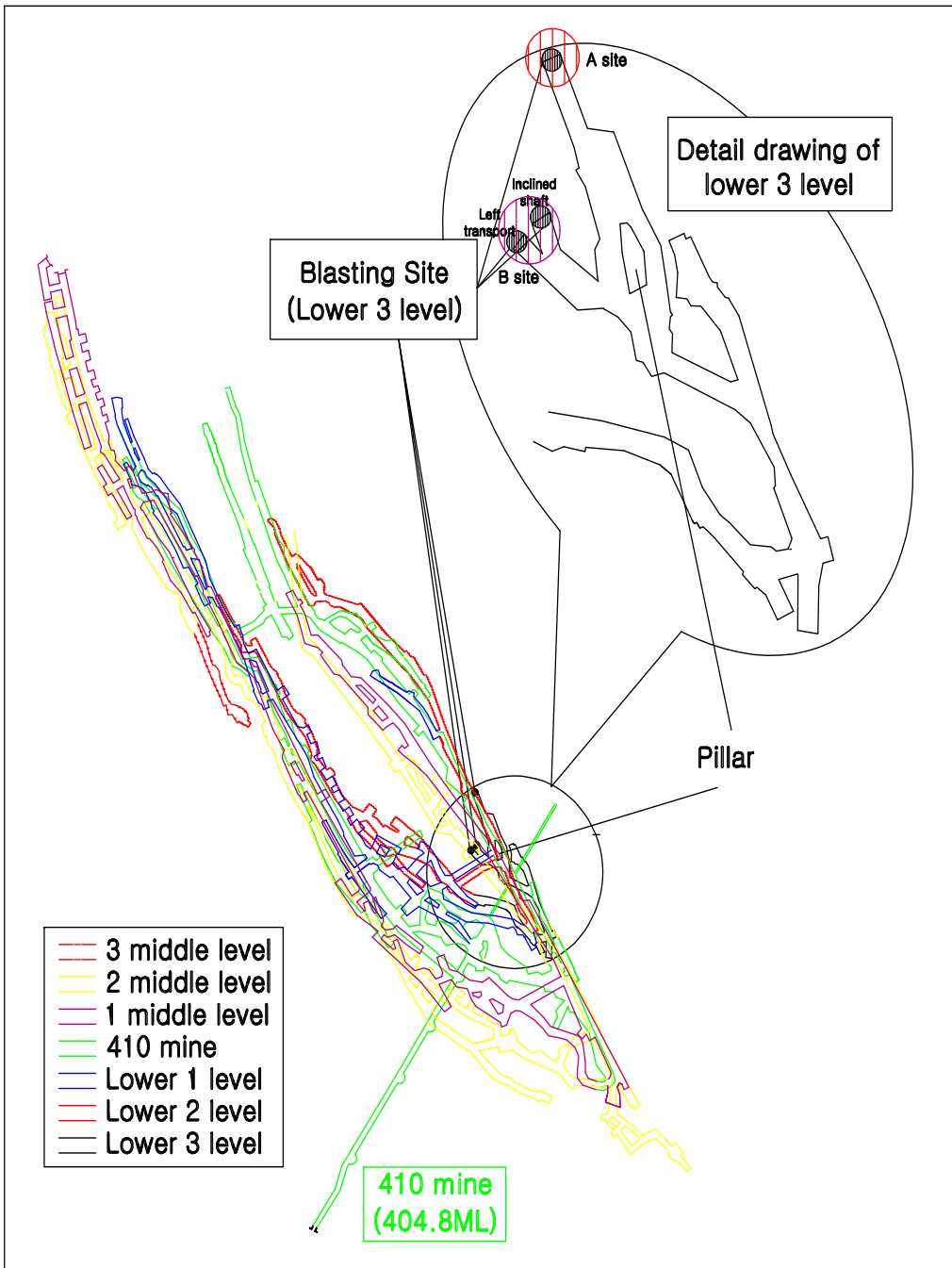
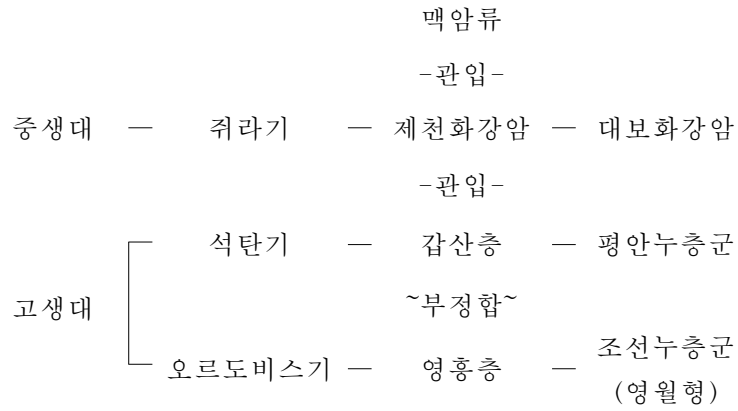


Figure 2.2 Mine map of study area

Table 2.1 Geology genealogy of study area



3. 발파진동 및 암반손상권 이론

3.1 발파진동의 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 3.1과 같이 충격압과 고온에 의해 발파공에서 수 mm~수십 mm 이내에 인접한 암반은 녹아내리거나 잘게 파쇄되어 파쇄대를 형성하고, 연속되는 가스압과 충격파의 전달로 인해 파쇄대 외부의 암반에는 균열이 발생, 전파되어 균열대를 형성하게 된다.⁵⁾

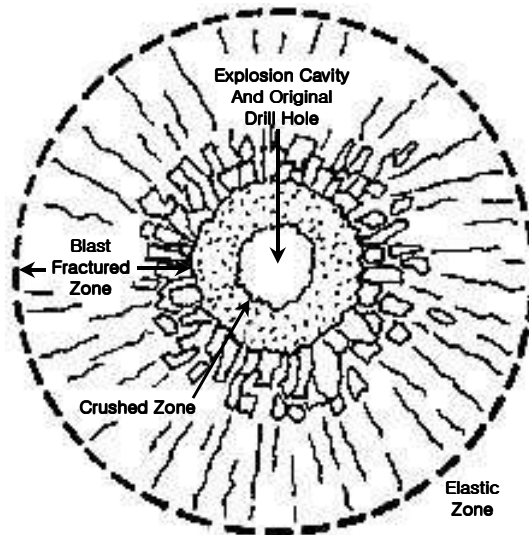


Figure 3.1 Schematic of the fracturing and deformation around an explosion in rock

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 발파진동(blast vibration)이라 한다.

암반 중으로 전달되는 탄성파는 입체파(물체파 : body wave)는 종파와 횡파 표면파로 나뉜다. 이러한 탄성파가 암반 중을 전파하면서 지반진동을 일으키게 되는데 한 점에서의 지면의 운동은 진폭과 주기를 갖는 진동으로 나타난다. 이와 같은 발파에 의한 지반진동은 변위(displacement), 속도(particle velocity), 가속도(acceleration)의 3종류로 표시되고 있다.

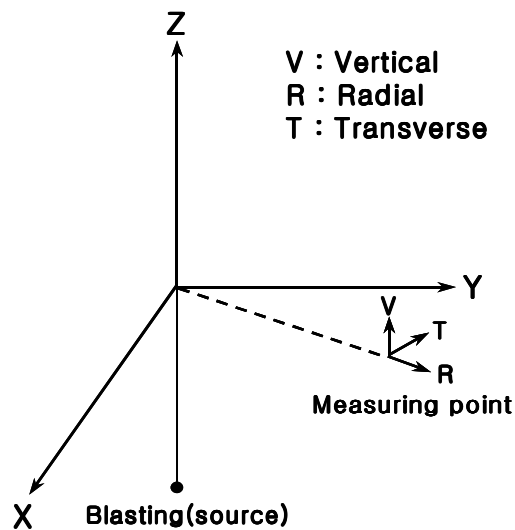


Figure 3.2 Three components of blasting vibration measured in surface

지반진동의 측정은 그 방향에 따라 Figure 3.2와 같이 폭원으로부터 측정점을 향하는 평면상파의 진행방향성분(Longitudinal 혹은 Radial), 진행방향에 직교하는 수직

방향성분(Vertical), 이들 두 방향과 직각을 이루는 접선방향성분(Transverse)의 세 방향으로 이루어진다.⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾

이들 3 성분의 상대적 크기는 대상 암반이나 지형 및 발파에 의해 생성된 탄성파 즉, P파(압축파, 종파, Primary waves), S파(전단파, 횡파, Secondary waves) 및 표면파(Rayleigh waves) 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 변위(D), 변위속도(V), 가속도(A)의 표시법 사이에는 식 (3.1)과 식 (3.2)와 같은 관계가 성립한다.¹⁶⁾

$$V=2\pi f \cdot D \tag{3.1}$$

$$A=2\pi f \cdot V \tag{3.2}$$

여기서, D = 변위(최대진폭)

V = 최대속도(peak particle velocity : 변위속도)

A = 가속도

f = 최대 진폭에서의 진동주파수

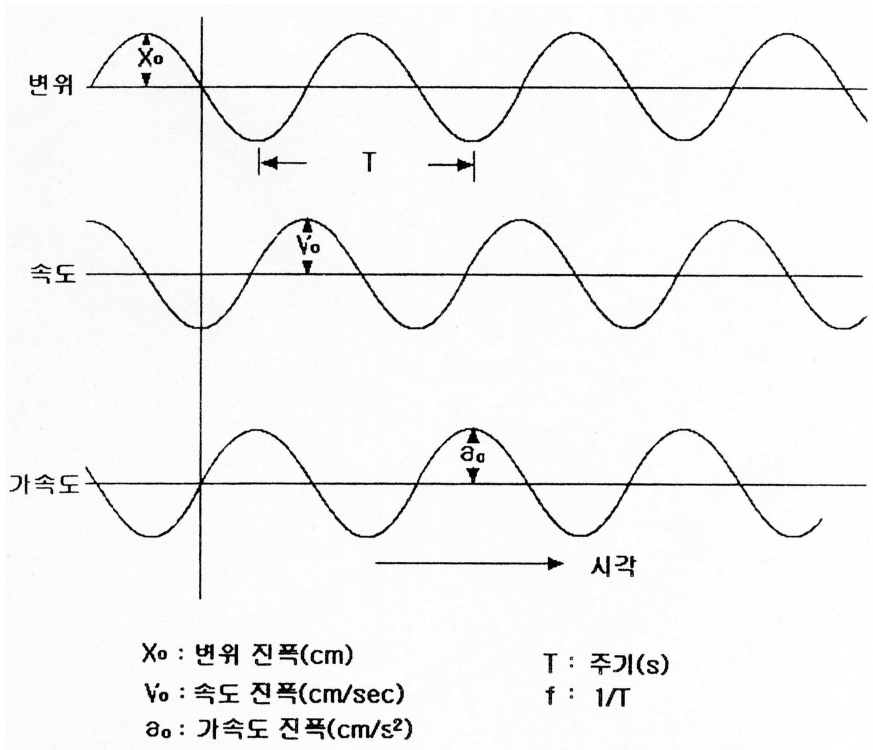


Figure 3.3 Displacement, particle velocity, acceleration waveform

지반진동의 크기를 표시하거나 허용수준을 설정하려면 지반진동 크기를 비교할 수 있는 척도가 필요하며, 그 크기정도를 변위·진동속도·진동가속도의 3가지 형태로 표시할 수 있다.

Table 3.1은 진동의 표시단위를 나타내고 있으며 발파진동의 특성은 Table 3.2에서 자연지진진동과 비교하여 설명할 수 있다.¹⁰⁾

Table 3.2와 같이 자연지진진동은 발파진동에 비해 그 주파수가 작고 지속시간이 길며 진원이 깊은 지층이어서 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 구조물의 피해 정도는 진동변위속도에 비례한다. 따라서 그 규제기준을 진동속도로 삼고 있다.

Table 3.1 Unit of vibration

	base unit	unit of others
displacement	cm, mm, u	$u=10^{-3}mm=10^{-4}cm$, $mm=10^{-1}cm$, $m=10^2cm$
velocity	mm/sec, inch/sec, cm/sec(kine)	$mm/sec=10^{-1}cm/sec$, kine=1cm/sec, $m/sec=10^2cm/sec$
acceleration	cm/sec^2 , gal, G(1G=1,000gal)	$gal=1cm/sec^2$, $g=980cm/sec^2 \approx 1,000gal$, $m/sec^2=10^2cm/sec^2$

Table 3.2 Comparison of blasting vibration and earthquake

	blasting vibration	earthquake
focal depth	ground or inside of close ground	over underground 10km
vibration frequency	several 10 to several 100Hz	1Hz of below
vibration duration	within 0.1sec	over 10sec, minute unit(a big earthquake)
vibration waveform	simple	complex

3.2 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.¹⁰⁾¹¹⁾

Table 3.3은 발파진동 변수에 대한 영향을 나타내었다.

Table 3.3 The effect of blasting vibration variable

variable	item	the degree of effect			remark
		serious	normal	weak	
control possible variable	a. delay time	○			
	b. charge weight per delay	○			
	c. sort of explosives	○			
	d. minimum burden and drilling interval		○		
	e. drilling diameter angle		○		
	f. tamping condition			○	
	g. initiation direction			○	
	h. charge weight per blasting			○	
control impossible variable	a. distance of blast site and structure	○			
	b. geography		○		
	c. soil thickness and pattern		○		
	d. rock condition		○		
	e. atmospheric condition			○	

3.3 발파진동의 조절 및 경감대책

3.3.1 발파원으로부터 진동발생을 억제하는 방법⁷⁾¹²⁾

(1) 장약량의 제한

발파진동에 있어서 지발당 장약량은 가장 중요한 변수이다.

터널 발파의 경우에 먼저 지발너관을 사용하여 제발약량을 감소시키고, 진동을 더 감소시킬 필요가 있을 때는 발파당 굴진장을 감소시키거나, 단면을 분할해서 발파하는 것이 효과적이다.

(2) 점화방법의 분할

발파를 몇 개의 블록으로 분할하여 별도로 점화하는 방법과 지발너관을 사용하는 방법이 있다. 지발너관을 사용한 지발발파의 경우 발파진동은 각 발파 단계에서 발생하는 진동으로 분리되고, 장약량도 각 단계에서의 지발당 장약량으로 분할된다.

(3) 저폭속 폭약의 사용

발파진동은 폭약에너지의 충격파에 의한 동적 파괴의 경우에 더욱 커지게 되므로 발파진동을 경감시키기 위해서는 동적 파괴효과의 비율이 적은 저폭속 폭약을 사용하는 것이 효과적이다.

(4) MS너관의 사용

지발당 장약량을 다시 MS너관을 사용하여 점화하면 제발발파에 비해 진동의 상호 간섭에 의한 진동을 경감시키고, 발파효과는 제발발파와 같은 효과를 거둘 수 있다. 벤치 발파에 주로 이용한다.

3.3.2 전파하는 진동을 차단하는 방법

발파원과 보호건물 사이에 line-drilling이나 pre-splitting을 실시하여 진동의 전

파를 차단하는 파쇄대나 불연속면을 만들면 진동을 경감시키는데 유효하다. 따라서 인공적으로 line-drilling이나 pre-splitting을 실시하면 그 부분에서 많은 진동이 반사되고, 통과하는 부분은 작아져 진동의 차단효과를 가져온다.

한편, 표면파의 경우에는 지표면을 따라 전파되므로, 전파되는 경로상의 지표면에 일정 깊이의 방진구를 파면 상당한 양의 진동이 더 이상 전파되지 못하고 감소된다.

3.4 발파진동식의 예측⁷⁾⁸⁾¹¹⁾¹⁵⁾

발파 진동의 진파특성을 이론적으로 파악하려는 여러 학자들에 의해서 발파현상에 관련된 변수의 차원해석과 발파진동의 측정 경험을 토대로 발파진동식을 제안하고 있으며 현재 국내외로 가장 많이 적용하고 있는 경험식은 다음과 같다.

$$V = K \left(\frac{D}{W^b} \right)^n \quad (3.3)$$

여기서, V : 진동속도(cm/sec)

D : 폭원으로부터 측정 지점까지의 거리(m)

W : 지발당 최대 장약량(kg)

K : 자유면의 상태, 폭약의 종류, 암질 등에 따른 상수

n : 감쇠지수

b : 장약지수

USBM(United States Bureau of Mines)의 Devine(1966)은 식 (3.3)의 장약지수 b 의 값이 1/2이면 이를 square root scaling이라 한다. 그리고 b 의 값이 1/3이면 이를 cube root scaling이라 하며, 일반적으로 근거리에서는 cube root scaling, 그리고 원거리에서는 square root scaling이 지발당 장약량이 훨씬 작게 결정되어 안전율이 높게 나타나는 것으로 알려져 있다.

지금까지 연구된 바에 의하면 발파진동은 주로 지발당장약량(kg)과 거리(m)에 의해 결정되고, 기타의 요인들은 지반의 성질이나 발파조건에 의해 결정된다. 따라서 발파설계를 위해서는 대상 지역에서의 시험발파를 통한 K n 상수 값을 정의하는 것이 매우 중요하며 K n 값이 결정되고, 허용진동속도가 주어지면 발파진동식에서 폭원으로부터의 거리가 지발당 장약량과의 관계를 나타내는 노모그램을 작성할 수 있다.

3.5 암반손상권 이론

3.5.1 개요

굴착에 의해 영향을 받는 영역인 암반손상·교란영역(Disturbed Rock Zone, DRZ 또는 Excavation Disturbed Zone, EDZ)은 터널주변의 암반이 모암과 다른 특성을 나타내는 영역으로 파괴영역(failure zone), 손상영역(damage zone) 및 교란영역(disturbed zone)을 모두 포함하는 영역을 의미하는데 굴착방법, 현지응력, 암반상태, 터널의 형상 및 위치 등에 따라서 그 특성과 범위가 다르게 나타난다. Figure 3.4는 터널주변 암반손상·교란영역의 특징과 범위를 나타내는 모식도이다. 여기서 파괴영역은 암반블록이 암반으로부터 완전히 분리된 영역이고, 손상영역은 미소파괴가 발생하여 변형계수의 감소, 투수계수의 증가 등과 같은 암반특성의 영구적인 변화가 발생하는 영역이며 교란영역은 굴착에 의한 응력재분배 등으로 인하여 응력 또는 수리적 특성과 같은 상태변화가 발생하는 영역으로 손상영역과는 달리 암반특성의 변화는 크지 않거나 회복될 수 있는 영역으로 정의된다.²⁾

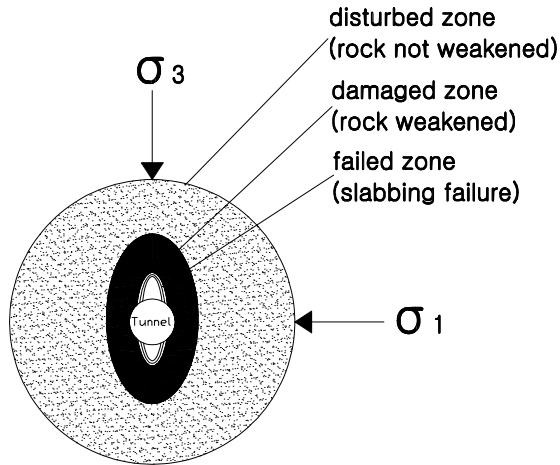


Figure 3.4 Property and range of disturbed rock zone around cavity

3.5.2 암반손상영역의 예측방법

현재까지 발파작업에 의한 암반 손상영역의 예측과 측정은 대부분 발파진동속도 또는 입자속도(particle velocity)를 이용한 방법으로 이루어지고 있다. 발파진동속도 이외에 암석코어(core)시추, 탄성과 굴절법 탐사, 물리검층, 보어홀 카메라(borehole camera), 투수시험, 미소파괴음(Acoustic Emission, AE) 측정 등을 이용하는 방법들이 제시되어 있으나 아직까지 각 방법의 우수성과 타당성이 검증되지 못한 상태이다. 따라서 어느 한 방법에만 의존하지 않고 가능한 모든 방법들을 적용하여 굴착에 의한 손상영역을 예측하는 것이 유용하다고 논의되고 있다.²⁾

3.5.3 발파진동속도에 의한 예측

일반적으로 발파공 부근의 발파진동을 직접 측정하기 어렵기 때문에, 대부분의 경우 원거리(far-field) 진동측정을 통하여 근거리(near-field)의 진동을 추정하는 모델을 적용한다.¹⁸⁾

여기서 최대입자속도는 다음과 같은 경험식의 형태로 나타낼 수 있다.

$$V = KW^\alpha / R^\beta = K \left(\frac{R}{W^\beta} \right)^\alpha \quad (3.4)$$

여기서, V 는 최대입자속도(mm/sec), W 는 지발당 장약량(kg), R 은 폭원으로 부터 거리(m)이다. 상수 K , α , β , n 은 암반의 구조적 특성 및 발파조건에 따라 달라 지며 β 는 1/2 또는 1/3이다.

식 (3.4)은 장약의 길이에 비해서 거리가 매우 긴 경우에만 유효하며 이런 경우 장약은 집중장약으로 간주될 수 있다. 이 식을 변형하면 봉상장약의 경우를 살펴보면 봉 모양의 선형장약량이 l (장약길이(m))당 장약량(kg))인 경우, 미소장약에 대해서 위 식을 적분하여 진동속도 V 의 1차 근사치를 얻을 수 있다. 미소장약에 의한 진동파가 관측점에 거의 동시에 도착한다고 가정하면 장약의 다른 부분에 의한 미소장약의 도착시간의 차이는 무시될 수 있다.

관측점에서 장약공까지의 거리는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Figure 3.5).

$$R_i^2 = R_o^2 + (R_o \tan \theta - x_i)^2 \quad (3.5)$$

여기서 R_o 는 장약공과 측점과의 수직거리를 의미하고 θ 는 장약공의 하부에서 측점을 바라보았을 때의 각도이며, x_i 는 장약공의 하부에서 미소장약 W_i 까지의 거리를 나타낸다.

$$W_i = l dx \quad (3.6)$$

여기서 l 은 선형장약량이다.

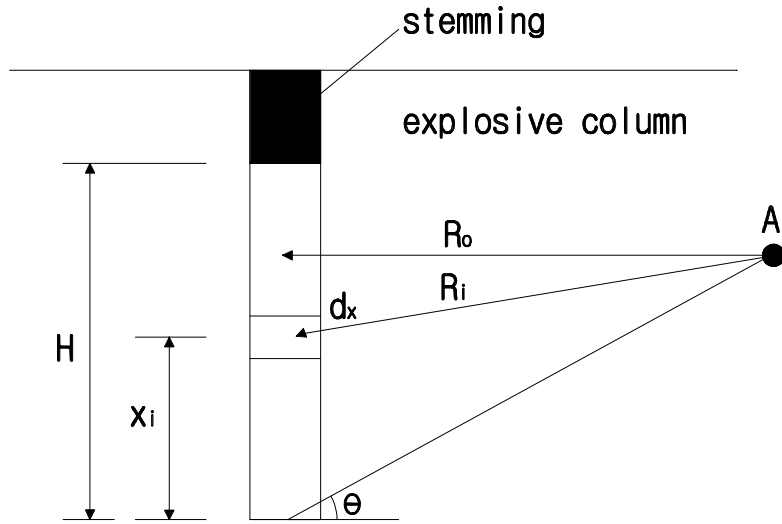


Figure 3.5 Integral calculus for stemming length to calculate particle velocity on voluntary observation

식 (3.6)을 이용하여 장약길이 H 까지 적분하면 최대진동속도는 다음과 같이 계산된다.

$$W = \int W_i = \int_0^H l dx \quad R = (R_0^2 + (R_0 \tan \Theta - x)^2)^{1/2}$$

$$\therefore V = KZ \left[\int_0^H \frac{dx}{[R_0^2 + (R_0 \tan \Theta - x)^2]^{\beta/2\alpha}} \right]^\alpha \quad (3.7)$$

임의의 폭약이나 폭제에 대한 선형장약량 λ 은 weight strength(blasting gelatine dynamite의 폭력을 100%로 하고 이것과 동일 약량의 공시폭약과 폭력 비교치)가 1.02인 ANFO로 정규화시켜야 한다. ANFO에 대한 상대적인 weight strength는 다음과 같이 주어진다.

$$S_{ANFO} = \frac{(Q + V_g/0.85)}{5.04} \quad (3.8)$$

여기서 Q 는 폭발열 (MJ/kg)을 나타내고 V_g 는 표준상태에서의 방출가스 체적 (m^3/kg)을 나타낸다.

이 모델은 발파공에서부터 에너지가 탄성매질을 따라서 감쇄함을 가정하고 암질이 우수한 경우에 잘 적용될 수 있다. 이를 통해서 구한 일정거리에서의 진동치를 다음의 변형을 손상모델(strain damage model)에 의한 최대입자속도와 비교하여 발파손상 범위를 예측할 수 있다.¹⁹⁾ 이때 변형을 손상모델에 의한 최대입자속도는 암반의 손상한계에 대한 임계속도이다.

발파에 의한 암반의 손상은 발파로 인해 생성된 동적변형을 S 의 결과로 탄성매질의 경우에 있어서 S 는 입자속도(V)와 종파전파속도(V_p)의 비율로서 계산된다.

$$\text{즉, } S = \frac{V}{V_p} \quad (3.9)$$

암반의 한 요소에서 인장파괴가 발생한다면 인장응력과 인장강도는 같을 것이고

$$E = \frac{T_s}{S_f}, \quad S_f = \frac{T_s}{E} \quad (3.10)$$

여기서 E 는 탄성계수, T_s 는 인장강도, S_f 는 인장균열이 개시되기 전의 인장변형률이다. 만일 V_d 가 손상이 발생할 때의 임계진동속도라고 한다면,

$$\frac{V_d}{V_p} = \frac{T_s}{E} \quad \therefore V_d = \frac{T_s \times V_p}{E} \quad (3.11)$$

인장강도를 단축압축강도의 1/10이라 고려하면, 새로운 균열이 발생할 것이라고 기대되는 진동수준은 다음과 같이 주어진다.

$$V_d = 0.1 \times UCS \times \frac{V_p}{E} \quad (3.12)$$

여기서 UCS 는 일축압축강도이고 거의 탄성에 가까운 매질에 대해서는 상당히 적절한 값을 나타낸다.

위와 같이 입자속도로부터 암반 손상영역의 범위를 예측하는 방법이 널리 적용되고 있으나 이러한 결과들은 원거리 입자속도로부터 예측된 것으로 최근에 들어서 근거리 입자속도를 이용하는 연구들이 더욱 활발히 진행 중이다.²⁰⁾²¹⁾

4. 굴착방법 및 발파진동의 계측

4.1 발파패턴

본 연구지역인 석회석 광산의 410갱 하3단의 A갱도와 B갱도는 6~10m(B)×6m(H) 규격의 막장을 JUMBO DRILL로 천공한다. 천공경은 $\phi 45\text{mm}$, 공 간격은 0.8~1.8m, 최소저항선은 0.8~1.6m이다. 그리고 괴광회수율을 높이기 위한 V-CUT방식을 채택하고, 심발각도는 60~70°, 천공장은 3.8m, 굴진장은 3.5m이다. 공당 장약량은 전 폭약 New Emulite 150($\phi 25$) 1ea(0.1kg)과 ANFO 3.00~3.33kg/hole을 사용한다. 그리고 ANFO CHARGER로 화약을 장전 발파를 한다.¹³⁾ (Figure 4.1)

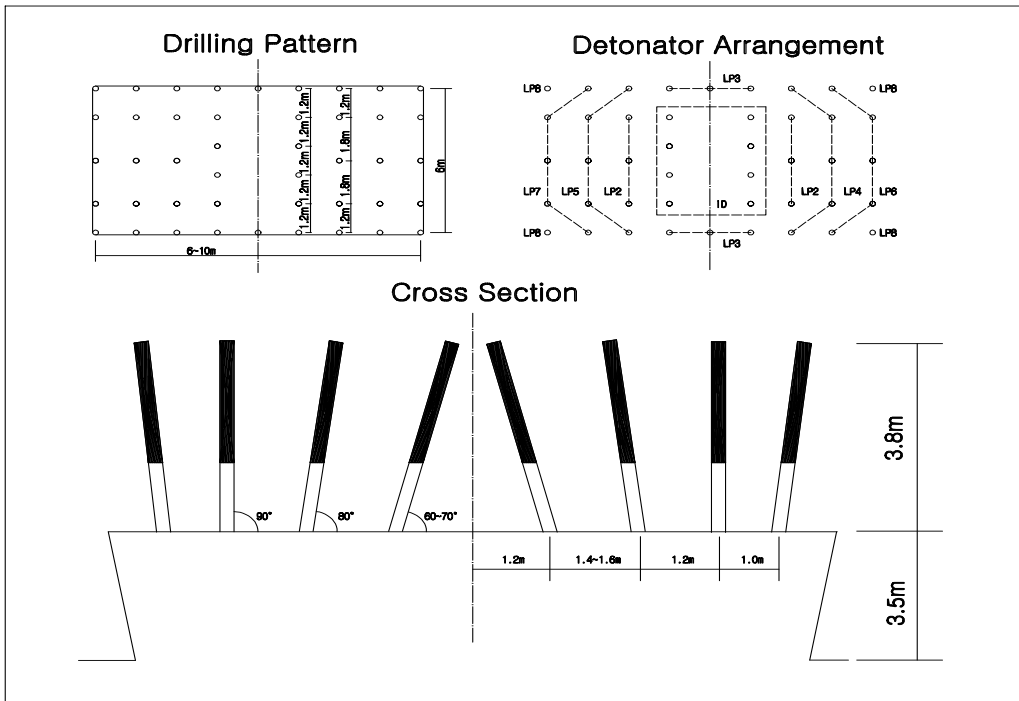


Figure 4.1 Blasting pattern in study area

4.2 굴착방법

4.2.1 Excavation Method- I

A경도와 B경도를 동시에 발파하여 굴착했을 경우와 B경도 내에서 좌우반 경도와 사경을 동시에 발파하여 굴착했을 경우로써(이후로 EM- I 이라 함) Table 4.1과 같이 천공, 장약을 하였다.

Table 4.1 Working condition and summary of EM- I

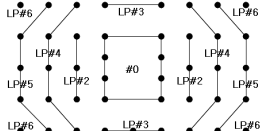
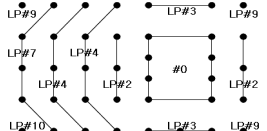
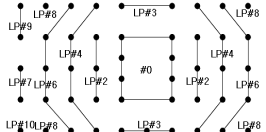
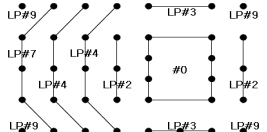
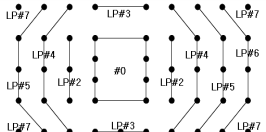
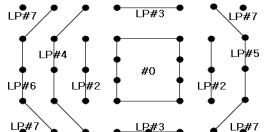
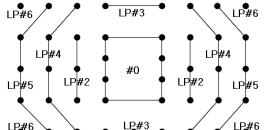
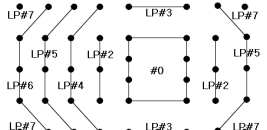
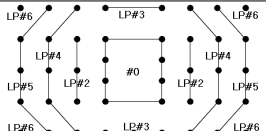
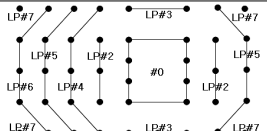
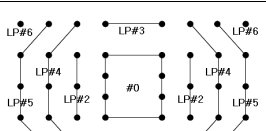
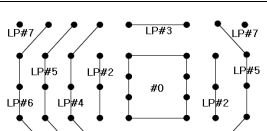
date	EM- I		summary
	A site	B site	
6.10			<ul style="list-style-type: none"> - explosive : Emulite 150(φ25), ANFO - detonator : Konel instantaneous, LP - burden : 1.0~1.6m - hole spacing : 1.2~1.8m - charge per hole : 3.43kg/hole
6.13			
6.15			
6.17			
6.20			
6.22			

Table 4.1 Continued

date	EM- I	summary
	B site	
10.29 (2)	<p>left transport + inclined shaft</p>	<ul style="list-style-type: none"> - explosive :Emulite 150(φ25), ANFO - detonator
11.1	<p>left transport + inclined shaft</p>	<ul style="list-style-type: none"> : Konel instantaneous, LP - burden : 0.8~1.6m - hole spacing : 0.8~1.8m - charge per hole : 3.43kg/hole
11.5	<p>left transport + inclined shaft</p>	<ul style="list-style-type: none"> : 0.8~1.8m - charge per hole : 3.43kg/hole

4.2.2 Excavation Method- II

A경도와 B경도를 다단발파로 굴착했을 경우로써(이후로 EM-II라 함) Table 4.2와 같이 천공, 장약을 하였다.

Table 4.2 Working condition and summary of EM-II

date	EM-II		summary
	A site	B site	
6.27			explosive:Emulite 150(φ25), ANFO detonator : Konel instantaneous, LP burden : 1.0~1.6m hole spacing : 1.2~1.8m charge per hole : 3.43kg/hole circuit time : 500ms
6.29			explosive:Emulite 150(φ25), ANFO detonator : Konel instantaneous, LP burden : 1.0~1.6m hole spacing : 1.2~1.8m charge per hole : 3.43kg/hole circuit time : 700ms

4.2.3 Excavation Method-Ⅲ

A궡도 혹은 B궡도를 단일 발파하여 굴착했을 경우로써(이후로 EM-Ⅲ라 함)
Table 4.3과 같이 천공, 장약을 하였다.

Table 4.3 Working condition and summary of EM-Ⅲ

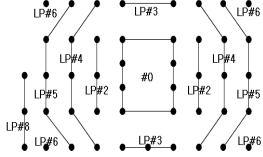
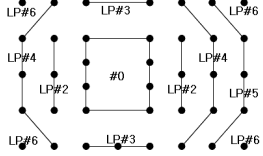
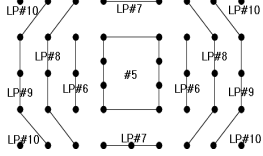
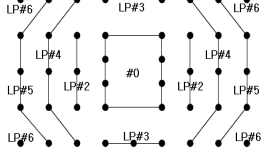
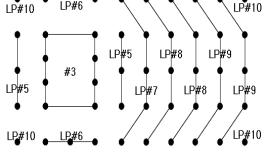
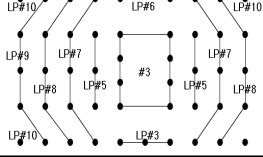
date	EM-Ⅲ	summary
6.24		explosive : Emulite 150(ϕ 25), ANFO detonator : Konel instantaneous, LP burden : 1.0~1.6m hole spacing : 1.2~1.8m charge per hole : 3.43kg/hole location : B site
6.27 (1)		explosive : Emulite 150(ϕ 25), ANFO detonator : Konel instantaneous, LP burden : 1.0~1.6m hole spacing : 1.2~1.8m charge per hole : 3.43kg/hole location : A site
6.27 (2)		explosive : Emulite 150(ϕ 25), ANFO detonator : Konel instantaneous, LP burden : 1.0~1.6m hole spacing : 1.2~1.8m charge per hole : 3.43kg/hole location : B site
6.29 (1)		explosive : Emulite 150(ϕ 25), ANFO detonator : Konel instantaneous, LP burden : 1.0~1.6m hole spacing : 1.2~1.8m charge per hole : 3.43kg/hole location : A site
6.29 (2)		explosive : Emulite 150(ϕ 25), ANFO detonator : Konel instantaneous, LP burden : 1.0~1.6m hole spacing : 1.2~1.8m charge per hole : 3.43kg/hole location : B site
7.25		explosive : Emulite 150(ϕ 25), ANFO detonator : Konel instantaneous, LP burden : 1.0~1.6m hole spacing : 1.2~1.8m charge per hole : 3.43kg/hole location : B site

Table 4.3 Continued

date	EM-III	summary
10.25 (1)		explosive : Emulite 150(ϕ 25), ANFO detonator : Konel instantaneous, LP burden : 1.0~1.6m hole spacing : 1.2~1.8m charge per hole : 3.43kg/hole location : A site
10.25 (2)		explosive : Emulite 150(ϕ 25), ANFO detonator : Konel instantaneous, LP burden : 1.0~1.6m hole spacing : 1.2~1.8m charge per hole : 3.43kg/hole location : B site
10.27 (1)		explosive : Emulite 150(ϕ 25), ANFO detonator : Konel instantaneous, LP burden : 1.0~1.6m hole spacing : 1.2~1.8m charge per hole : 3.43kg/hole location : A site
10.27 (2)		explosive : Emulite 150(ϕ 25), ANFO detonator : Konel instantaneous, LP burden : 0.8~1.6m hole spacing : 0.8~1.8m charge per hole : 3.43kg/hole location : B site
10.29 (1)		explosive : Emulite 150(ϕ 25), ANFO detonator : Konel instantaneous, LP burden : 1.0~1.6m hole spacing : 1.2~1.8m charge per hole : 3.43kg/hole location : A site
11.3 (1)		explosive : Emulite 150(ϕ 25), ANFO detonator : Konel instantaneous, LP burden : 1.0~1.6m hole spacing : 1.2~1.8m charge per hole : 3.43kg/hole location : A site
11.3 (2)		explosive : Emulite 150(ϕ 25), ANFO detonator : Konel instantaneous, LP burden : 0.8~1.6m hole spacing : 0.8~1.8m charge per hole : 3.43kg/hole location : B site

4.3 발파진동 계측기

4.3.1 발파진동 계측기의 구성¹⁴⁾

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

발파진동의 계측을 위해서는 발파진동 계측기를 사용하여야 한다. 국내에 도입되어 사용되고 있는 발파진동 계측기는 VMS Series(Thomas Instruments INC.), BlastMate Series(Instantel INC.), NS5400(Nomis Seismographs)등이 있다.

이들 기종들은 Figure 4.2와 같이 휴대용 발파진동 계측기의 전형적인 모습과 구성요소를 가지고 있다.

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

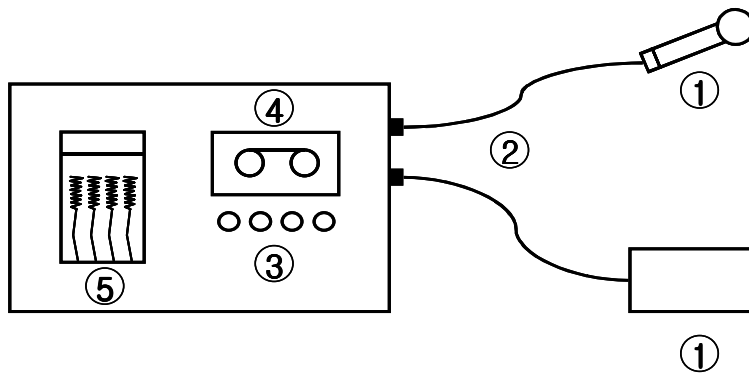


Figure 4.2 Typical drawing of blast monitoring

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

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

4.3.2 계측기기

본 연구에 사용된 발파진동 계측기기로는 Instantel INC.의 BlastMate Series인 DS-477과 Minimate plus(077) 그리고 Thomas Instruments사의 VMS200(C-1, C-2)을 사용하였다.

측정기는 광주를 기준으로 하여 일직선상으로 10~20m의 일정한 간격을 두고 설치하였으며, 계측기의 센서는 모두 광산 바닥 암반에 고정하였다.

DS-477 및 Minimate plus(077)는 현장의 발파 및 건설장비 등을 이용한 작업 시 발생하는 소음, 진동 등을 계측하여 진행, 접선, 수직 및 주파수 등을 현장에서 print하여 진동 계측 값을 손쉽게 확인할 수 있으며, Scaled Distance 등을 수동 입력하면 이를 자동으로 계산하는 기능뿐만 아니라, 진동측정의 주파수 및 시간이력 등을 상세히 보여주는 국내에서 가장 널리 사용되고 있는 진동측정기기라 할 수 있다.¹⁴⁾

VMS 200은 건설현장에서 발생하는 진동의 측정과 분석분야에 있어 탁월한 우수성을 보이는 제품이며, 완벽한 현장 분석과 최상승점 입자속도, 최상승점 음압수준,

최상승점 벡터총합, 최상승점 가속력, 실제 진동을 좌표로 나타낸 파장형태들, 그 파장형태 데이터에 대해 OMS 표준 분석과 센서작동에 대한 확증을 프린터화된 기록으로 제공해 주는 기기이다.

4.3.3 굴착방법별 계측거리

본 연구지역의 굴착방법별 계측거리는 EM-I, II의 경우 가장 근접한 거리를 측정하였고, EM-III의 경우는 발파구역과 계측기의 이격거리를 측정하였다. (Table 4.4)

Table 4.4 Measuring distance

(unit : m)

EM	date	measuring distance
I	6.10	18, 41(Blastmate Series)
	6.13	22, 45(Blastmate Series)
	6.15	26, 49(Blastmate Series)
	6.17	30, 53(Blastmate Series)
	6.20	33, 56(Blastmate Series)
	6.22	37, 59(Blastmate Series)
	10.29(2)	119(Blastmate Series) 79, 99(VMS Series)
	11.1	122(Blastmate Series) 82, 102(VMS Series)
11.5	125(Blastmate Series) 85, 105(VMS Series)	
II	6.27(1)	87, 124, 153(Blastmate Series)
	6.27(2)	44, 66, 95(Blastmate Series)
	6.29(1)	91, 128, 157(Blastmate Series)
	6.29(2)	48, 70, 99(Blastmate Series)
III	6.24	40, 62, 72, 82, 92, 102(Blastmate Series)
	6.27(1)	87, 124, 153(Blastmate Series)
	6.27(2)	44, 66, 95(Blastmate Series)
	6.29(1)	91, 128, 157(Blastmate Series)
	6.29(2)	48, 70, 99(Blastmate Series)
	7.25	50, 75, 85, 95(Blastmate Series)
	10.25(1)	265, 245(VMS Series)
	10.25(2)	155(Blastmate Series) 115, 135(VMS Series)
	10.27(1)	239(Blastmate Series) 269, 249(VMS Series)
	10.27(2)	119, 139(VMS Series)
	10.29(1)	242(Blastmate Series) 272, 252(VMS Series)
	11.3(1)	245(Blastmate Series) 275, 255(VMS Series)
11.3(2)	169(Blastmate Series) 129, 149(VMS Series)	

5. 계측결과 및 분석

5.1 굴착방법별 계측결과

본 연구지역에서 굴착방법별 획득한 데이터 수로는 EM-I 은 총 21개, EM-II 는 총 12개 그리고 EM-III는 총 41개를 획득하였다. (Table 5.1)

Table 5.1 Result of vibration monitoring

(단위 : mm/sec)

EM	date	instrument
I	6.10	52.8, 21.2(Blastmate Series)
	6.13	66.0, 25.0(Blastmate Series)
	6.15	85.9, 25.0(Blastmate Series)
	6.17	70.6, 43.8(Blastmate Series)
	6.20	45.5, 44.8(Blastmate Series)
	6.22	76.3, 33.7(Blastmate Series)
	10.29(2)	10.5(Blastmate Series) 19.1, 7.2
	11.1	4.83(Blastmate Series) 10.3, 6.5
II	11.5	7.84(Blastmate Series) 14.5, 4.9
	6.27(1)	12.3, 12.6, 4.35(Blastmate Series)
	6.27(2)	28.6, 15.7, 6.43(Blastmate Series)
	6.29(1)	45.7, 61.1, 4.63(Blastmate Series)
III	6.29(2)	94.7, 70.6, 6.08(Blastmate Series)
	6.24	56.7, 21.1, 14.7, 13.1, 11.6, 9.84(Blastmate Series)
	6.27(1)	12.3, 12.6, 4.35(Blastmate Series)
	6.27(2)	28.6, 15.7, 6.43(Blastmate Series)
	6.29(1)	45.7, 61.1, 4.63(Blastmate Series)
	6.29(2)	94.7, 70.6, 6.08(Blastmate Series)
	7.25	15.0, 11.2, 6.45, 5.22(Blastmate Series)
	10.25(1)	3.4, 2.7(VMS Series)
	10.25(2)	4.39(Blastmate Series) 10.1, 4.3(VMS Series)
	10.27(1)	2.87(Blastmate Series) 2.7, 2.6(VMS Series)
	10.27(2)	14.1, 6.7(VMS Series)
	10.29(1)	5.70(Blastmate Series) 2.9, 2.7(VMS Series)
	11.3(1)	4.33(Blastmate Series) 3.4, 2.8(VMS Series)
11.3(2)	6.87(Blastmate Series) 15.7, 5.9(VMS Series)	

5.2 굴착방법별 분석결과

본 연구지역인 석회석 광산에서 EM-I, II, III 별로 시행했을 경우를 구분하여 각각의 발파진동예상식을 다음과 같이 산출하였다.

5.2.1 Excavation Method-I 의 발파진동예상식

Table 4.1~4.4, 5.1에 제시된 값을 회귀분석에 의해서 입지상수 K 와 n 을 구하기 위하여 최대진동속도와 환산거리의 log-log 1차 상관관계를 이용하여 전산처리하여 도출한 발파진동예상식은 다음과 같다.

$$V=2159.268\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.549} \quad r^2=0.853 \quad (5.1)$$

$$V=4770.012\left(\frac{D}{\sqrt{3ofW}}\right)^{-1.527} \quad r^2=0.859 \quad (5.2)$$

식 (5.1)과 (5.2)는 95%의 신뢰도를 가지는 식으로 K 값은 자승근이 2159.268, 삼승근은 4770.012로 나타났으며, n 값은 각각 -1.549, -1.527로 나타났다. 그리고 결정계수는 자승근은 0.853, 삼승근은 0.859로 비교적 높은 상관성을 보여주고 있다. Figure 5.1과 5.2는 각각 자승근과 삼승근 환산거리와 진동속도와의 관계를 나타내는 그림이다.

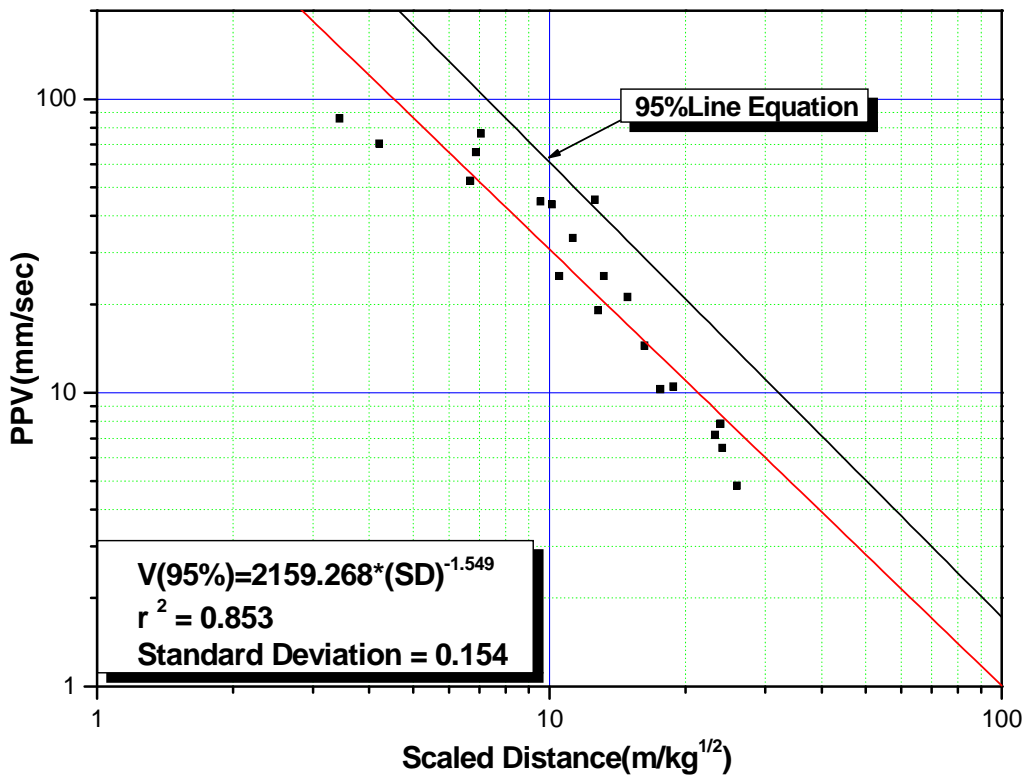


Figure 5.1 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by EM- I

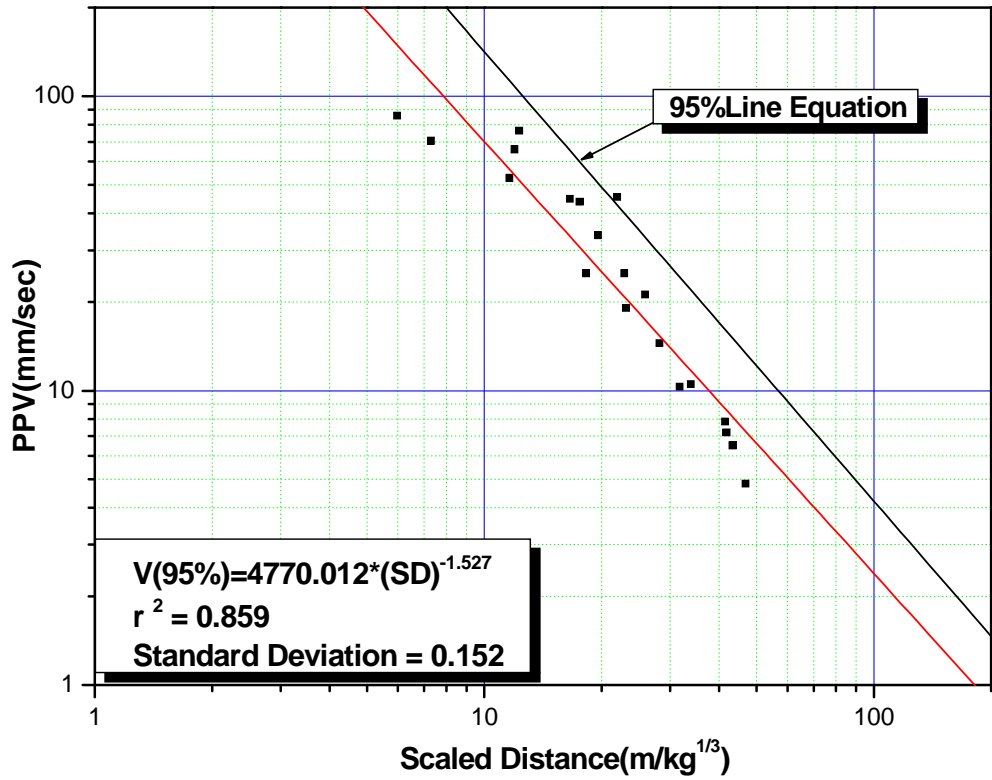


Figure 5.2 Relationship between peak particle velocity and cube root scaled distance by EM- I

5.2.2 Excavation Method-II 의 발파진동예상식

Table 4.1~4.4, 5.1에 제시된 값을 회귀분석에 의해서 입지상수 K 와 n 을 구하기 위하여 최대진동속도와 환산거리의 log-log 1차 상관관계를 이용하여 전산처리하여 도출한 발파진동예상식은 다음과 같다.

$$V=2049.548\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.469} \quad r^2=0.895 \quad (5.3)$$

$$V=4611.301\left(\frac{D}{\sqrt{3\sigma W}}\right)^{-1.499} \quad r^2=0.895 \quad (5.4)$$

식 (5.3)과 (5.4)는 95%의 신뢰도를 가지는 식으로 K 값은 자승근이 2049.548, 삼승근은 4611.301로 나타났으며, n 값은 각각 -1.469, -1.499로 나타났다. 그리고 결정계수는 자승근, 삼승근 모두 0.895로 비교적 높은 상관성을 보여주고 있다. Figure 5.3과 5.4는 각각 자승근과 삼승근 환산거리와 진동속도와의 관계를 나타내는 그림이다.

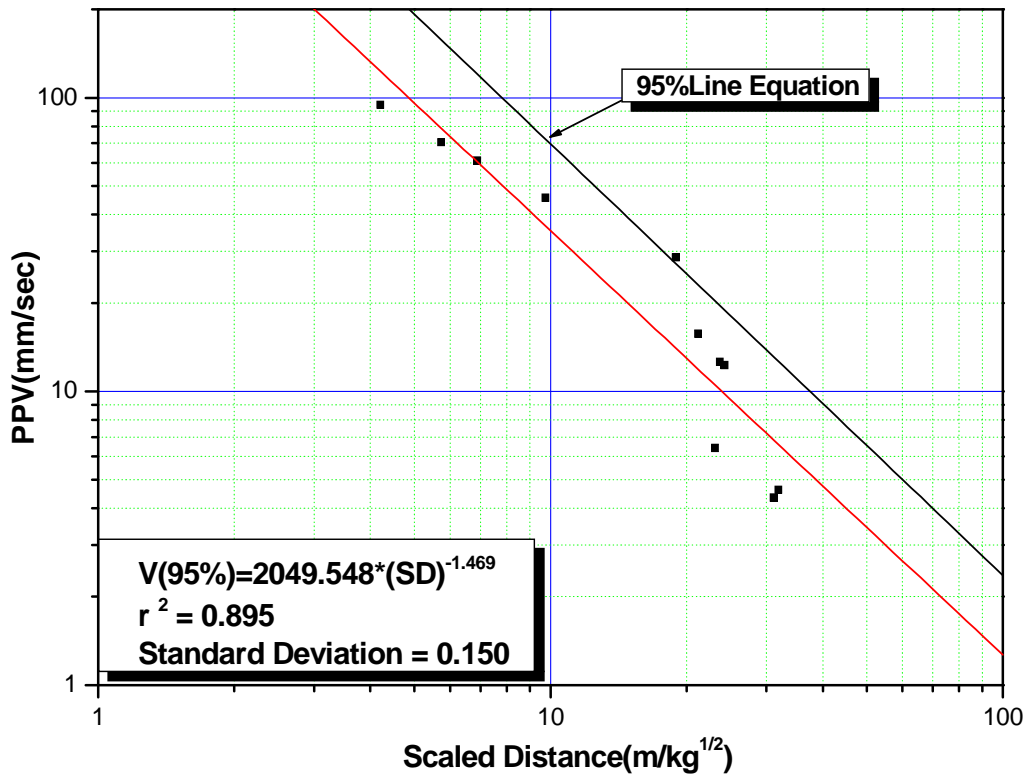


Figure 5.3 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by EM- II

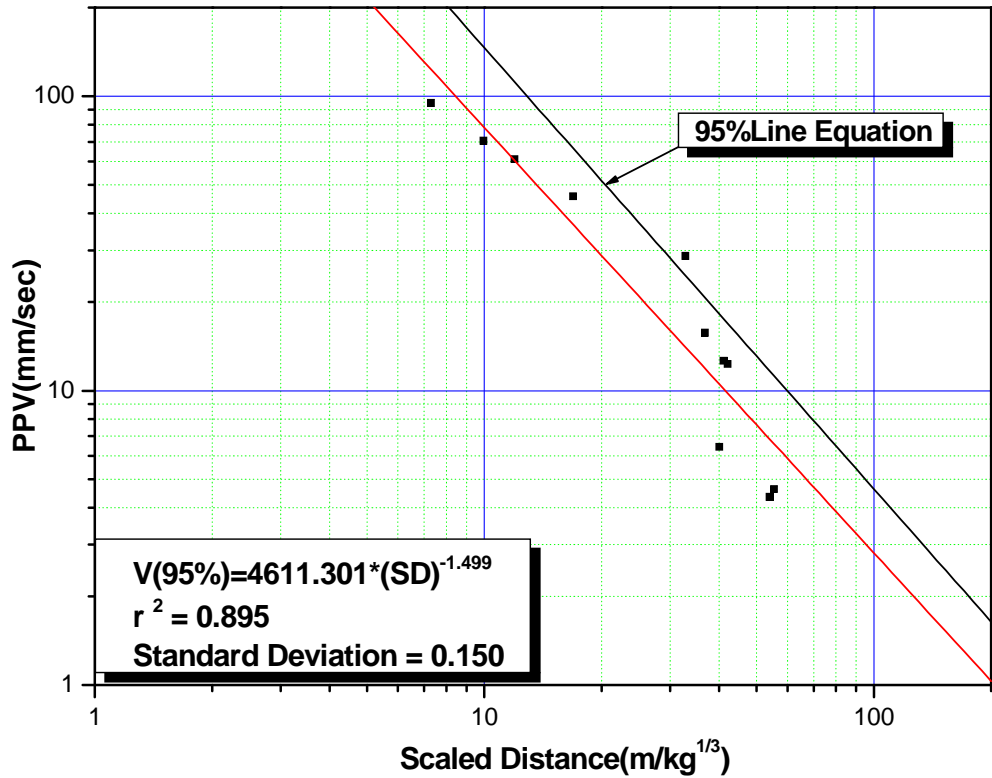


Figure 5.4 Relationship between peak particle velocity and cube root scaled distance by EM- II

5.2.3 Excavation Method-Ⅲ의 발파진동예상식

Table 4.1~4.4, 5.1에 제시된 값을 회귀분석에 의해서 입지상수 K 와 n 을 구하기 위하여 최대진동속도와 환산거리의 log-log 1차 상관관계를 이용하여 전산처리하여 도출한 발파진동예상식은 다음과 같다.

$$V=1747.381\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.513} \quad r^2=0.905 \quad (5.5)$$

$$V=4074.745\left(\frac{D}{\sqrt{3\sigma W}}\right)^{-1.516} \quad r^2=0.907 \quad (5.6)$$

식 (5.5)과 (5.6)은 95%의 신뢰도를 가지는 식으로 K 값은 자승근이 1747.381, 삼승근은 4074.745로 나타났으며, n 값은 각각 -1.513, -1.516으로 나타났다. 그리고 결정계수는 자승근은 0.905, 삼승근은 0.907로 비교적 높은 상관성을 보여주고 있다. Figure 5.5와 5.6은 각각 자승근과 삼승근 환산거리와 진동속도와의 관계를 나타내는 그림이다.

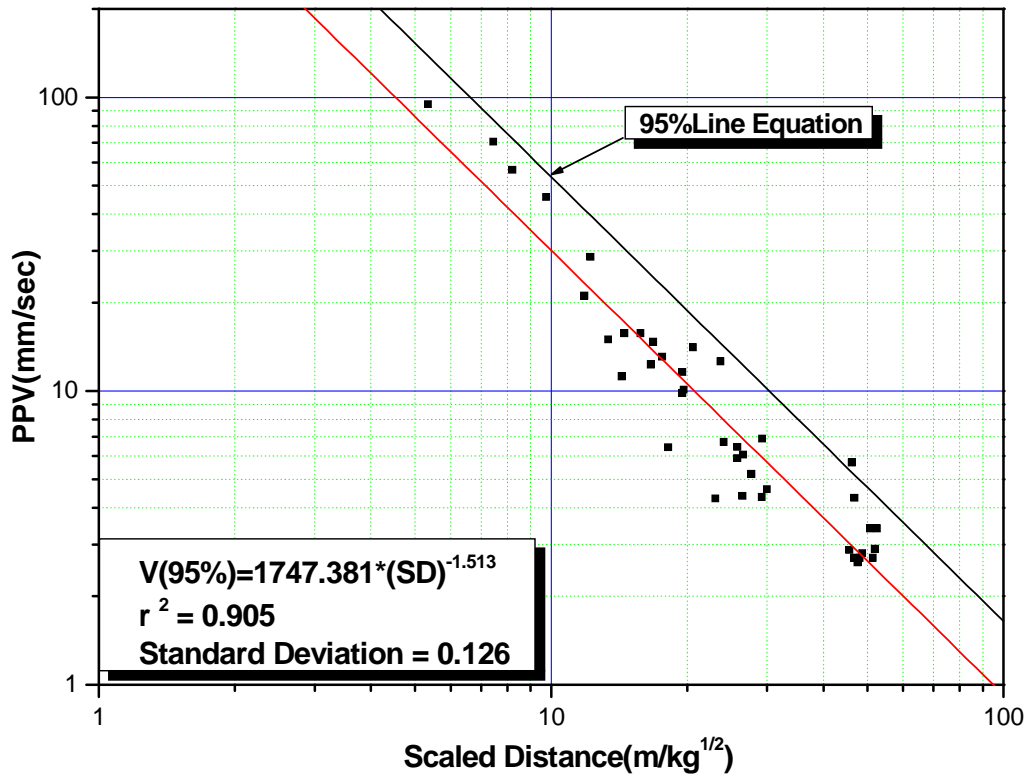


Figure 5.5 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by EM-III

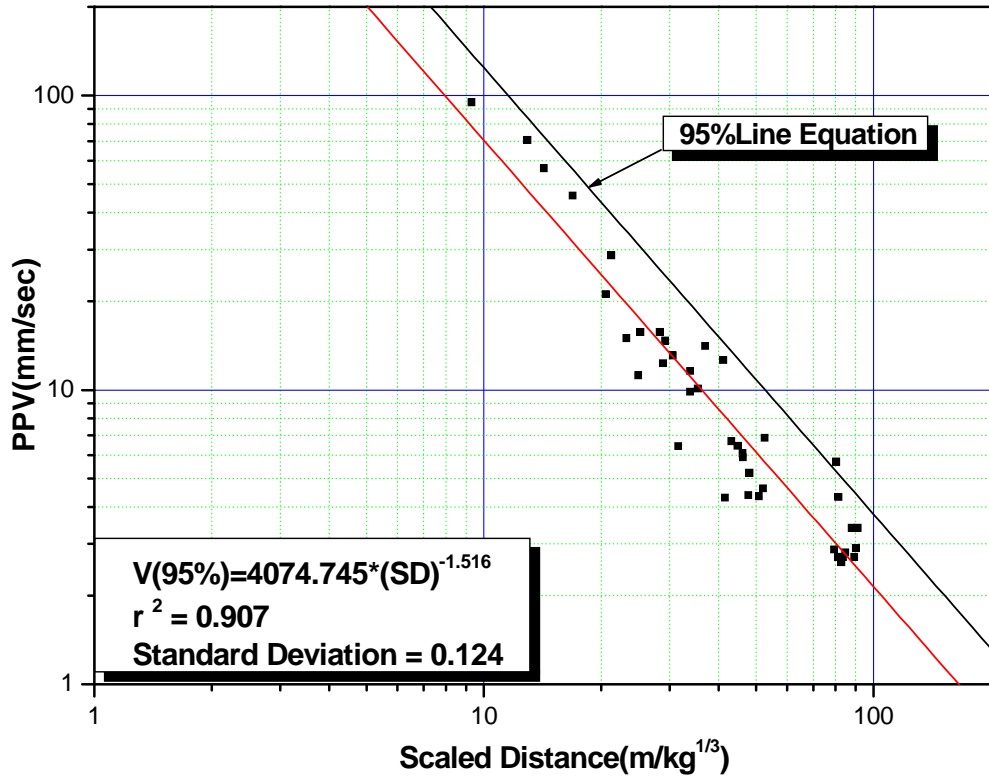


Figure 5.6 Relationship between peak particle velocity and cube root scaled distance by EM-III

5.3 노모그램을 이용한 결과분석¹⁴⁾

본 연구에서는 측정과의 거리 및 작업조건을 고려하여 자승근과 삼승근 환산거리를 이용하여 PVS(Peak Vector Sum)와 SD와의 관계를 나타내는 노모그램을 log-log 좌표 상에 나타내었다.

발과진동속도는 지발당 최대장약량과 폭원으로부터 거리를 변수로 하는 환산거리의 함수로 표시될 수 있는데, 그 관계식은 식 (5.7)과 같다. 이 식에서 진동속도와 환산거리는 비선형적 관계이나 양변에 로그를 취하면 다음과 같은 선형의 식으로 변환할 수 있다.

$$\log V = \log K + n \log(SD) \quad (5.7)$$

Figure 5.7과 Figure 5.8은 EM-I, EM-II, EM-III 경우의 자승근과 삼승근의 PVS와 SD의 관계를 나타내었다. 이 그래프 모두 A궤도 혹은 B궤도의 단독 발과할 때의 굴착방법인 EM-III의 Line이 가장 낮게 나타났다.

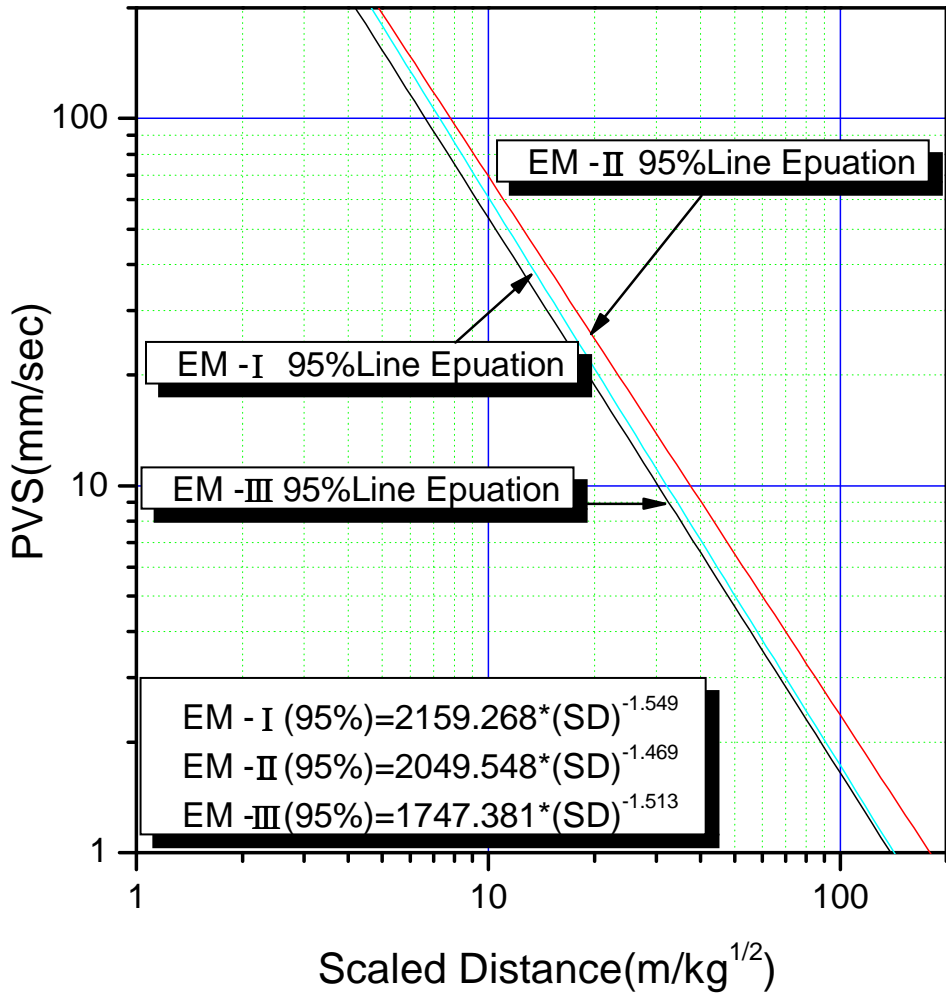


Figure 5.7 Relationship between peak velocity sum and square root scaled distance by EM- I , II , III of waveform

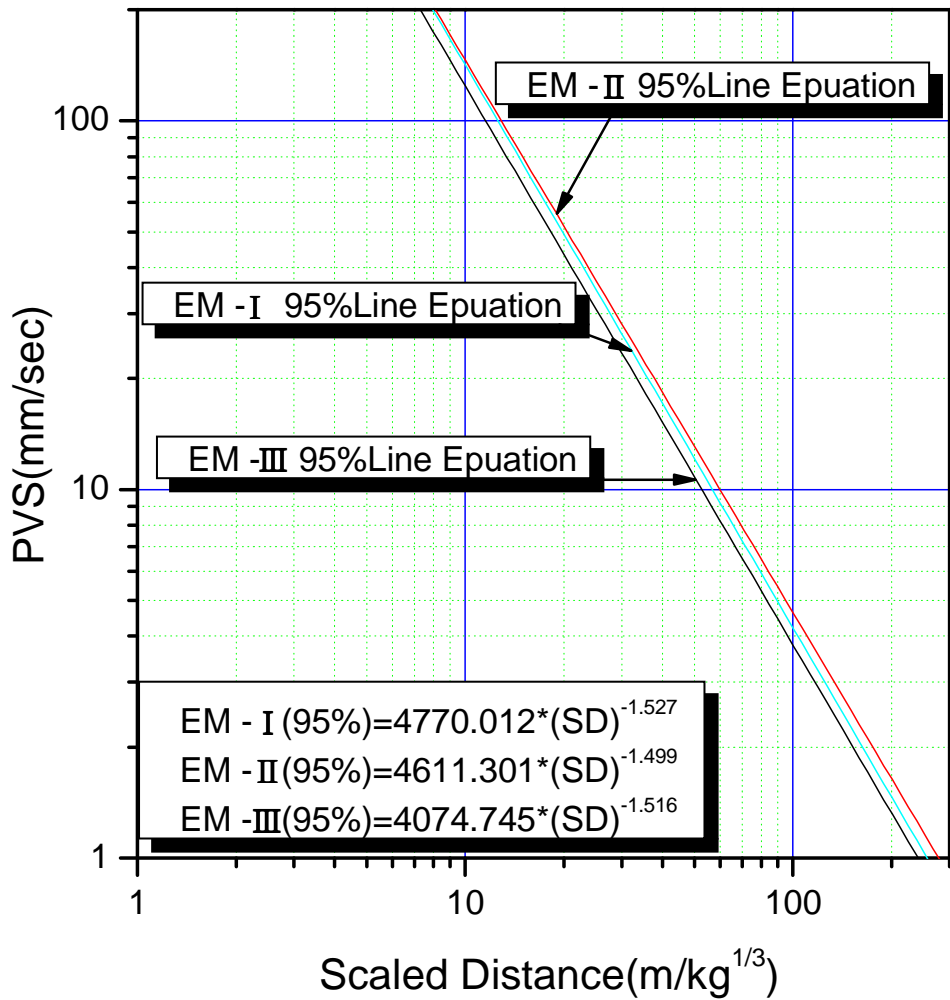


Figure 5.8 Relationship between peak velocity sum and cube root scaled distance by EM- I , II , III of waveform

5.4 굴착방법별 암반손상권 분석

식 (3.7)과 식 (3.12)에 의거해 손상이 발생할 때의 임계진동속도와 같게 되는 거리인 R_0 가 암반손상권 범위이다.²⁾

본 연구에서는 TunDesign Ver 3.0을 사용하여 암반손상권 분석을 실시하였다.

5.4.1 암반손상권 분석결과

- 본 계산에 적용된 최대발파진동속도식은 다음과 같다.

$$\Rightarrow V=4770.012\left(\frac{D}{\sqrt{3ofW}}\right)^{-1.527} \quad \text{EM-I}$$

$$\Rightarrow V=4611.301\left(\frac{D}{\sqrt{3ofW}}\right)^{-1.499} \quad \text{EM-II}$$

$$\Rightarrow V=4074.745\left(\frac{D}{\sqrt{3ofW}}\right)^{-1.516} \quad \text{EM-III}$$

Figure 5.9~Figure 5.11과 같이 손상이 발생할 때의 임계진동속도(V_d)는 143.95cm/sec 이고 EM-I의 암반 손상영역권은 13.35m, EM-II의 암반 손상영역권은 13.67m, EM-III의 암반 손상영역권은 12.22m 이내에 발생하게 될 것으로 예측 할 수 있다.

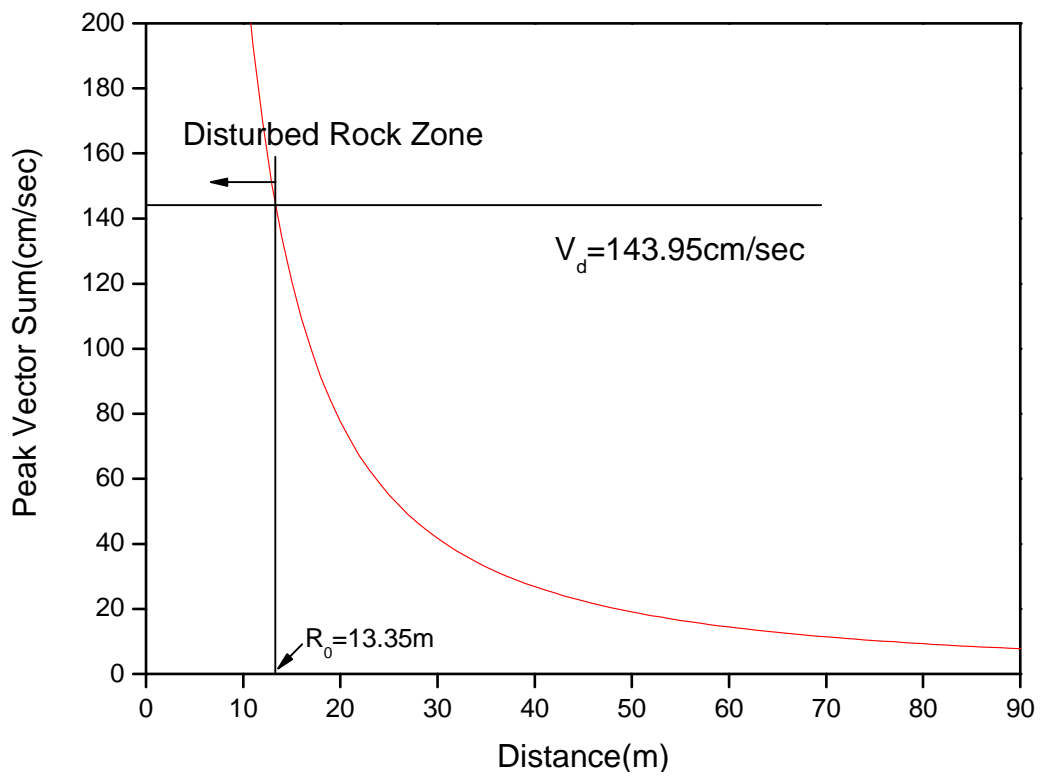


Figure 5.9 Disturbed rock zone of EM- I

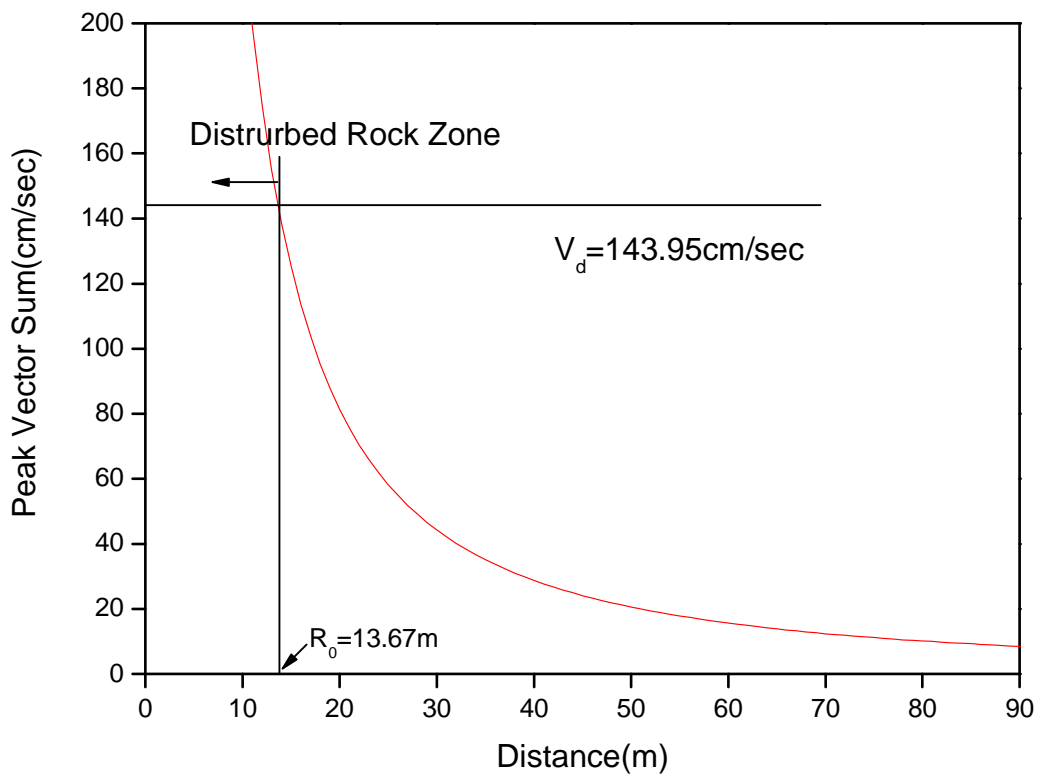


Figure 5.10 Disturbed rock zone of EM-II

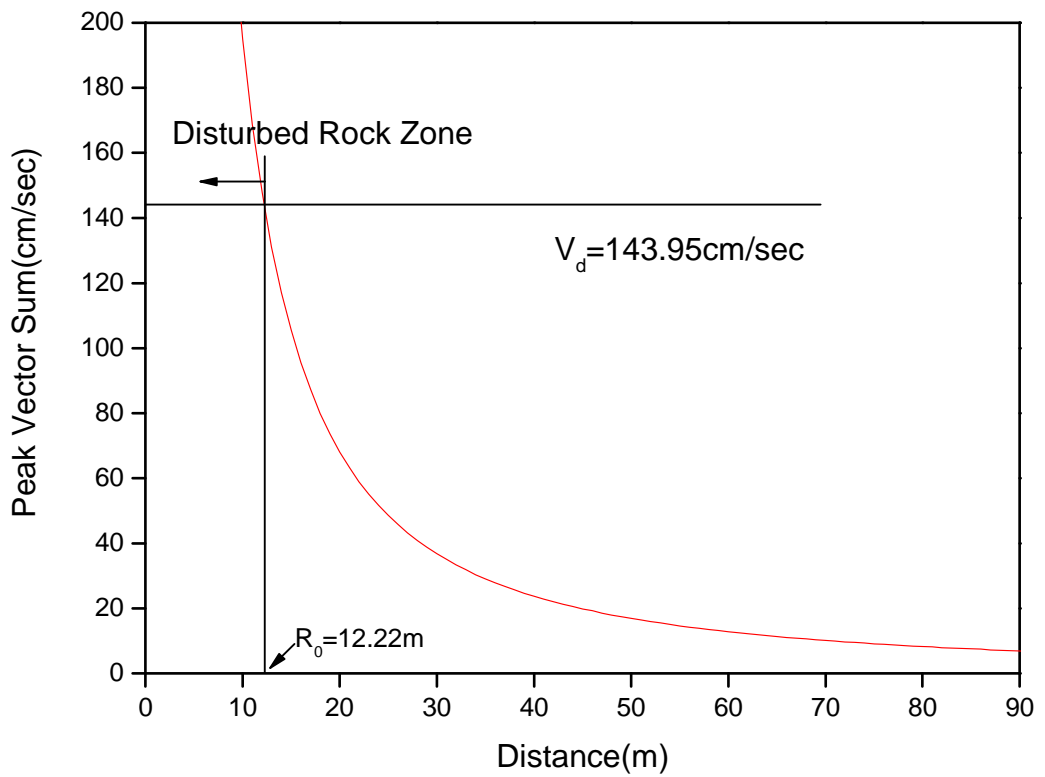


Figure 5.11 Disturbed rock zone of EM-III

6. 결 론

본 연구는 지하채굴공동에서 굴착방법에 따른 발파진동의 특성에 관한 연구로써 각 굴착방법별로 측정된 발파진동데이터를 바탕으로 발파진동식을 산출하고 그에 따라 노모그램분석을 실시하고 발파진동속도로 예측한 암반손상권 영역을 분석하였다. 그리하여 지하채굴공동의 굴착방법에 따른 발파진동의 특성을 파악하여 비교 분석한 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구에서 95%의 신뢰수준을 갖는 진동 예상식은 다음과 같다.

1) A갱도와 B갱도 혹은 B갱도 내에서 좌운반갱도와 사갱을 동시에 발파하여 굴착했을 경우 (EM-I)

$$V=2159.268\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.549} \quad r^2=0.853$$

$$V=4770.012\left(\frac{D}{\sqrt{3ofW}}\right)^{-1.527} \quad r^2=0.859$$

2) A갱도와 B갱도를 다단 발파하여 굴착했을 경우 (EM-II)

$$V=2049.548\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.469} \quad r^2=0.895$$

$$V=4611.301\left(\frac{D}{\sqrt{3ofW}}\right)^{-1.499} \quad r^2=0.895$$

3) A궤도 혹은 B궤도(좌운반궤도, 사궤)를 단일 발파하여 굴착했을 경우 (EM-III)

$$V=1747.381\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.513} \quad r^2=0.905$$

$$V=4074.745\left(\frac{D}{\sqrt{3ofW}}\right)^{-1.516} \quad r^2=0.907$$

2. 본 연구에서 노모그램을 이용한 분석결과 자승근과 삼승근 모두 A궤도와 B궤도를 단일 발파하여 굴착했을 경우인 EM-III의 Line이 가장 낮게 나타나는 것으로 보아 EM-III의 굴착방법이 궤도와 광주에 가장 안정한 굴착방법으로 판단된다.

3. 본 연구에서 굴착순서별 암반손상권 분석 결과 손상이 발생할 때의 임계진동속도(V_d)는 143.95cm/sec 이고 EM-I의 암반 손상영역권은 13.35m, EM-II의 암반 손상영역권은 13.67m 그리고 EM-III의 암반 손상영역권은 12.22m 이내에 발생하게 될 것으로 예측 할 수 있다.

4. 지금까지 본 연구에서 지하채굴공동에서 굴착방법에 따른 발파진동의 특성에 관한 연구를 하였다. 그 결과 발파진동식에 의한 노모그램 분석과 암반손상권 분석에서 굴착순서별 발파진동의 특성에 큰 차이는 나타나지 않았으나 EM-III와 같은 단일 발파하여 굴착할 때가 가장 안정되게 분석되었다. 앞으로는 채굴광석 종류에 따른 다수 궤도의 굴착시 발파진동의 특성에 관한 연구도 이루어져야 할 것이고, 굴착방법과 발파진동의 관계를 명확히 규명해야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) 선우춘, 정용복, 전양수, “광주배열과 굴착순서에 따른 지하채광장의 안정성에 대한 수치해석적 연구”, 『KIGMA Bulletin』, Vol. 9, No. 3, pp. 47~59, 2005
- 2) OO광업개발(주), “OO석회석광업소 현황”, pp. 1~2, 2005
- 3) 대한광업진흥공사, “정밀조사보고서(석회석, 영월-토교·제천-두학지구)”, pp. 9~22, 2002
- 4) 김대상, 이정인, 이희근, “발파진동의 속도 및 주파수를 고려한 허용 진동치 결정에 관한 연구”, 『한국자원공학회지』, Vol. 28, pp. 444~
- 5) 이정인, “발파진동·발파풍압 및 비석의 조절을 통한 안전발파”, 『대한토목학회지』, Vol. 41, pp. 99~116, 1993
- 6) 김재국, “산업화약과 발파공학”, 『서울대학교 출판부』, pp. 252, 389~390, 1997
- 7) 허진, “신 화약발파학”, 『기전연구사』, pp. 265~268
- 8) 임한욱, 강추원, 류창하, “화약 발파”, 『교육부』, pp. 252, 1997
- 9) 임한욱, 김재동, “발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구”, 『한국자원공학회지』, Vol. 29, pp. 146~157
- 10) 양형식, 주재성, “노천굴 발파의 진동특성과 입지상수 결정에 관한 연구”, 『한국자원공학회지』, Vol. 27, pp. 316~323, 1990
- 11) 기경철, 김일중, “산·학인을 위한 발파공학”, 『동화기술』, pp. 244~248, 2002
- 12) 장수호 등, “발파에 의한 터널 주변 암반의 손상영역 평가에 관한 연구”, 『한국지반공학회논문집』, Vol. 16, pp. 129~140, 2000
- 13) OO광업개발(주), “발파 Pattern도”
- 14) 장호민, “발파진동 파형 분리분석을 통한 다단발파 특성에 관한 연구”, 『조선대학교 석사학위논문』, pp. 16, 45~48, 2004

- 15) 강추원, “발파공학 A to Z”, 『구미서관』, pp. 412~415, 444~445, 2005
- 16) Charles H. Dowding, “Blast vibration monitoring and control”, 『PRENTICE-HALL, INC.』, pp. 7~22, 24~40, 1984
- 17) U. Langefors & B. Kihlstrom, “The modern technique of rock blasting third edition”, pp. 258~293, 1978
- 18) Holmberg. R. & Persson. P., “Design of tunnel perimeter blasthole patterns to prevent rock damage”, 『Proc. of IMM Tunnelling '79 Conference』, pp. 3~6, 1979
- 19) Forsyth. W.W., “A discussion of blast-induced overbreak around underground excavation”, 『Proc. of 4th Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting』, pp. 161~166, 1993
- 20) Yang. R.L., Rocque. P., Katsabanis. P. & Bawden. W.F., “Blast damage study by measurement of blast vibration and damage in the area adjacent to blast hole”, 『Proc. of 4th Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting』, pp. 137~144, 1993
- 21) Bogdanoff Ingvar, “Vibration measurements in the damage zone in tunnel blasting”, 『Proc. of 5th Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting』, pp. 177~185, 1996