

2010년 2월

석사학위 논문

# 예측식에 의한 지표진동과 지중진동에 관한 비교

조선대학교 대학원

자원공학과

김도형

예측식에 의한 지표진동과  
지중진동에 관한 비교

Comparison of surface vibration and subterranean  
vibration by prediction equation

2010년 2월 25일

조선대학교 대학원

자원공학과

김도형

# 예측식에 의한 지표진동과 지중진동에 관한 비교

지도교수 강 추 원

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2009년 10월

조선대학교 대학원

자원공학과

김 도 형

# 김도형의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 고진석



위원 조선대학교 조교수 강성승



위원 조선대학교 교수 강추원



2009년 11월

조선대학교 대학원

## <목 차>

List of Tables .....	I
List of Figures .....	II
Abstract .....	III
1. 서론 .....	1
2. 연구지역 .....	3
3. 이론적 배경 .....	4
3.1 진동의 정의 .....	4
3.2 진동의 기초이론 .....	4
3.3 진동량의 표현 .....	11
3.4 발파진동의 특성 .....	12
3.5 발파진동의 회귀분석 이론 .....	15
3.6 발파진동의 회귀분석 이론 .....	18
3.6.1 발파원으로부터 진동발생을 억제하는 방법 .....	18
3.6.2 전파하는 진동을 차단하는 방법 .....	19
3.7 선형장약량 $l$ 의 선정 .....	20
3.8 변형을 손상모델 .....	20
4. 현장 실험 .....	22

4.1 실험 방법 및 결과 .....	22
4.1.1 실험 방법 .....	22
4.1.2 실험 결과 .....	26
5. 실험 결과에 따른 지표진동 및 지중진동 예측 .....	30
5.1 지표진동의 예측 .....	30
5.2 지중진동의 예측 .....	33
5.3 예측치의 비교 .....	36
6. 결론 .....	42

## <List of Tables>

Table 3.1	Vibration unit .....	11
Table 4.1	Applied design parameter .....	23
Table 4.2	Measurement result .....	26
Table 5.1	Results of expected subterranean vibration .....	35
Table 5.2	Results of expected subterranean vibration and surface vibration .....	37

## <List of Figures>

Figure 2.1 Geological map of the study area .....	3
Figure 3.1 Vibration waveform .....	5
Figure 3.2 Regularity vibration and Irregularity vibration .....	5
Figure 3.3 Harmonic oscillation .....	9
Figure 3.4 The size of sine wave vibration .....	9
Figure 3.5 General form of construction blast vibration(Dowding, 1996) .....	13
Figure 3.6 Idealized waves for two construction geometries(Dowding, 1996) .....	14
Figure 4.1 Blasting pattern(No.1) .....	23
Figure 4.2 Blasting pattern(No.2~3) .....	24
Figure 4.3 Blasting pattern(No.4~5) .....	24
Figure 4.4 Blasting pattern(No.6) .....	25
Figure 4.5 Blasting pattern(No.7~8) .....	25
Figure 4.6 Monitoring blast vibration .....	29
Figure 5.1 Relationship of PPV and Square root scaled distance .....	30
Figure 5.2 Relationship of PPV and Cube root scaled distance .....	31
Figure 5.3 Integral calculus for stemming length to calculate particle velocity on voluntary observation .....	34
Figure 5.4 Comparison result of No.1(charge per delay 6.4 kg) .....	38
Figure 5.5 Comparison result of No.2(charge per delay 7.5 kg) .....	38
Figure 5.6 Comparison result of No.3(charge per delay 5 kg) .....	39
Figure 5.7 Comparison result of No.4(charge per delay 2.8 kg) .....	39
Figure 5.8 Comparison result of No.5(charge per delay 3 kg) .....	40
Figure 5.9 Convergence distance by charge per delay .....	41



# ABSTRACT

## A comparison of surface vibration and subterranean vibration by prediction equation

Kim, Do Hyung

Advisor : Prof. Kang, Choo Won

Dept. of Resource Engineering

Graduate School of Chosun University

Although materials have been abundant with rapid industrial development, they cause a serious social problem of environmental pollution, In particular, the environmental problems like vibration and noise generated in construction area are mainly caused by blasting. As such problems became a driving force of direct and indirect development of blast technology, institutional programs including environmental impact assessments from the beginning of blasting design are being developed for organized management of fields.

There has been much concern on damage to underground utility and studies on subterranean vibration have been carried.

In this study, vibration was obtained from a blasting test, their analysis was carried out by regression. And it was to compare predicted vibration using a square root conversion formula obtained through the regression analysis and subterranean vibration obtained using a model developed by Holmberg and Persson(1979).

The results are presented as follows. For 6.4 kg of charge per delay, convergence

was made with 0.837 cm/sec at 90 m, 3.758 cm/sec at 35 m for 7.5 kg, 6.848 cm/sec at 19 m for 5 kg, 7.005 cm/sec and 7.369 cm/sec at 14 m for 2.8 kg and 3kg respectively.

It is demonstrated that there are differences when surface and subterranean vibration are near from the blasting holes. Subterranean vibration and surface vibration are similar as a distance between them is farther. As charge per delay is smaller, it converged at nearer distance. However, a model of 6.4 kg had farther distance of convergence for charge per delay because of drilling length and stemming length.

# 1. 서 론

급격한 산업사회의 발전으로 물질적인 풍요로움은 제공되었으나, 환경오염이라는 심각한 사회문제의 모태가 되었고, 특히 건설 분야에서 발생하는 진동·소음 영역의 환경문제는 대부분이 발파공사가 주원인으로 대두되어 왔다. 이러한 문제점의 대두는 발파기술의 직·간접적인 발전의 계기가 되었으며, 최근에는 발파공사 설계당시부터 환경영향 평가를 실시하여 공사 완료시까지 체계적인 현장관리가 되도록 제도적인 프로그램이 작성되어 실행 중에 있다.

이러한 제도적인 뒷받침은 여러 발파 기술자로 하여금 발파공사에서 보다 효율적인 수행을 위한 기술적인 연구가 가능하게 했으며, 국내 발파기술의 비약적인 발전이 이루어질 수 있는 동기가 되기도 하였다.

지하철 공사나 도로 공사에서는 다양한 건설장비의 사용과 발파로 인해 발생하는 지중구조물에 직·간접적으로 영향을 미치고 있다. 특히 국내 지하구조물에 대한 발파로 인한 기준 진동치가 지표진동을 이용하여 영향평가를 실시하는 실정이다.

도심지에서의 발파로 인한 지중매설물의 피해로 인해 근래에 지중진동에 관해 연구가 이루어지고 있다. 중국의 Yang et al.(1993)은 2 ~ 15 m 거리에서 0.36 ~ 6.2 m/sec의 지중진동을 측정하였고, Nie and Deng(1996)은 8 ~ 32 m 거리에서 0.1 ~ 0.8 m/sec의 지중진동을 측정한 사례가 있다.

실질적으로 표면에서 측정되는 진동은 레일리파(R)로서 2차원적이며 표면을 따라 전파한다. 레일리파(R)는 수학적으로 압축파와 전단파의 조합으로 규정할 수 있다. 전단파의 파속은 압축파의 1/2 ~ 2/3 정도이며, 같은 매질에 대하여 레일리파(R)의 파속은 전단파의 0.9 ~ 0.95 정도이다. 보통 표면파는 암석 대신에 암석위의 표토를 지나기 때문에 압축파와 전단파의 진행속도보다 더 느리다. 토양에서는 모든 파들의 파속이 감소되기 때문에 표면파가 제일 영향을 많이 받는다.

표면파의 운동은 겨우 1 ~ 2 파장 심도만 땅 속을 침투하는데 심도에 따라 진

폭이 줄어든다. 따라서 지표진동과 지중진동의 측정치는 차이를 보이게 되므로 단순히 지표진동으로 지중진동을 예측하는데 문제점이 있다고 판단된다.

근래의 발표로 인한 지중진동의 예측하는 방법은 Holmberg and Persson(1979)의 모델이 주로 사용되고 있다.

본 연구에서는 발표 실험을 8회 실시하여 64개의 데이터를 얻고 이를 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석을 통해 얻어진 자승근 환산식을 이용하여 지표진동의 거리별 예상 진동치와 Holmberg and Persson(1979) 모델을 이용하여 얻어진 지중진동치의 차이를 비교하고자 하였다.

## 2. 연구지역

본 연구지역은 한반도 서측부에 위치하여 행정구역상 전라남도 장성군 북하면일대의 지역으로서 지질은 선캠브리아기의 화강편마암을 기저로 주라기 흑운모화강섬록암, 백악기 반려암-섬록암, 반상화강암, 우백질화강암과 반암류 등의 다양한 화성암류로 이루어져 있다. 지질도폭에서 구역 동북부와 서부에 분포된 울리통과 지역동남부에 분포된 분천화강암을 기저로 하여 그 위에 부정합으로 조선계와 평안계가 광범한 홍제사화강암의 관입을 받아 구역서북부와 중앙부에 유래되어 있고 또한 분천화강편마암 및 홍제사화강암의 관입체내에는 고기암층이 포획되어 있다. 남쪽 신근리 도폭에서 연속되는 원남층과 울리통 그리고 서쪽 서벽리 도폭에서 연속되는 울리통이 모두 연구지역의 주요 구조적 방향인 NNE방향으로 좁고 길게 대상으로 분포되어 있다. 홍제사화강편마암체내에는 화강반암, 섬록반암 등이 불규칙하게 노출되어 있으며 연구지역 북부에는 신라통이 단편적으로 분포되어 있으며 지표에서부터 표토층, 봉적토층 또는 풍화산류토층, 풍화암 및 기반암인 연암 및 보통암, 경암의 순으로 분포되어 있는 것으로 나타났다. (Figure 2.1)

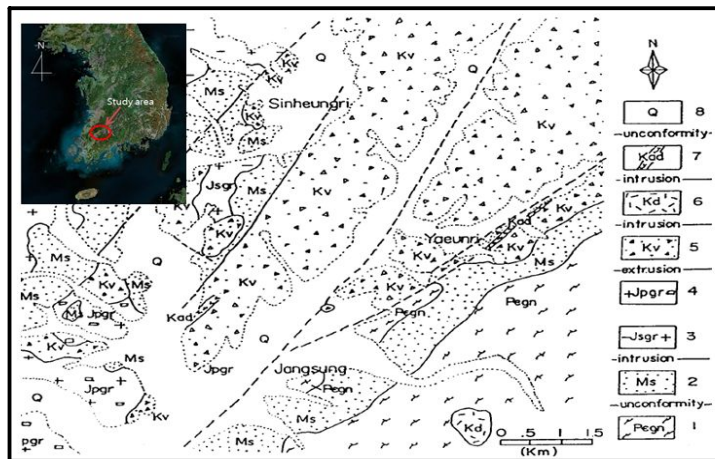


Figure 2.1 Geological map of the study area.

## 3 이론적 배경

### 3.1 진동의 정의

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

### 3.2 진동의 기초이론

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(Figure 3.1). 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.

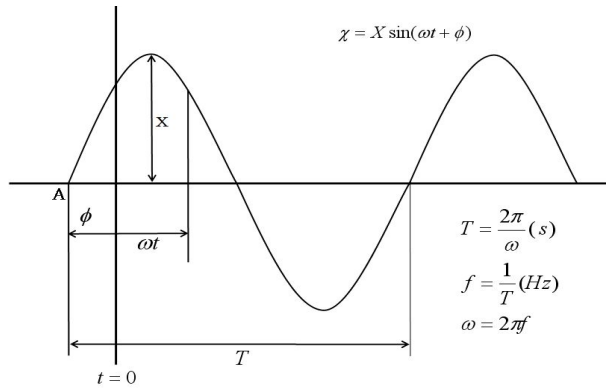


Figure 3.1 Vibration waveform.

공해진동이라고 불리는 진동에는 정상진동의 것도 있지만 비정상진동인 것이 많다. Figure 3.2는 이러한 파의 형태를 나타낸 것이다. 진동현상을 나타내는 물리량을 진동량이라 하며 변위와 속도, 가속도가 사용된다.

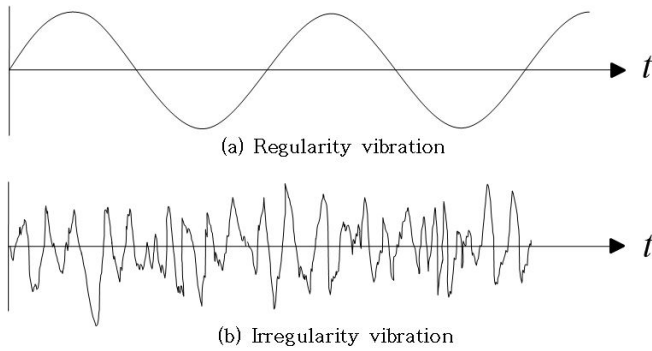


Figure 3.2 Regularity vibration and Irregularity vibration.

진동하고 있는 점 A의 위치가 시간적 위치가 시간적으로  $\pm X$ 의 사이에 서 반복 운동을 되풀이하는 경우를 고려해 보자. 어떤 시간  $t$ 에 있어서 점 A의 위치  $X$ 가 시간적으로 정현 변화한다고 가정하면  $x$ 의 관계를 다음 식(3.1)으로 표현된다.

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

여기서  $x$ 는 변위,  $X$ 는 평형위치로부터의 최대변위를 나타내며 변위진폭이라 부른다. 또한  $\omega$  (rad/sec)는 각속도이고,  $\phi$  (rad)는 위상각이라 부른다. 식(3.1)로 나타낸 진동은 정현진동 또는 조화진동이라 부르며 일정한 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(3.2)의 관계가 있다.

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

전술한 정현진동의 경우 어느 시간  $t_1$  으로부터  $2\pi/\omega$ 만 경과하면 변위  $x$ 는 식(3.3)으로 되며 시간  $t_1$  의 변위는 완전히 동일한 위치에 되돌아오기 때문에 주기( $T$ )는 식(3.4)로 되고 또 진동수( $f$ )는 식(3.5)로 된다.



$$x = X \sin\left[\omega\left(t_1 + \frac{2\pi}{\omega}\right)\right] \quad (3.3)$$

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

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

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

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

따라서  $\omega$ 는  $2\pi$ 시간 사이에  $x$ 가 몇 회 동일한 상태로 되돌아오는가를 나타내는 횟수를 나타내며 단진동수 또는 각진동수라 부른다. 시간적으로 변화하는 진동현상을 표현하는 데는 변위 외에 속도와 가속도가 있다. 속도는 변위의 시간에 대한 변화의 비율이고, 가속도는 속도의 시간적 변화의 비율이다. 따라서 속도  $v$ 는 변위  $x$ 를 시간  $t$ 로 미분해서 얻어진다. 정현진동의 경우는 식(3.1)에 의해 식(3.6)과 같이 된다.

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

$\omega X$ 는 이때의 최대치로 속도진폭이라 부른다. 또 가속도  $\alpha$ 는 속도  $v$ 를 시간  $t$ 로 미분하여 얻어지는데 식(3.6)에 의해 식(3.7)과 같이 되며  $\omega^2 X$ 는 가속도진폭이라 부른다.

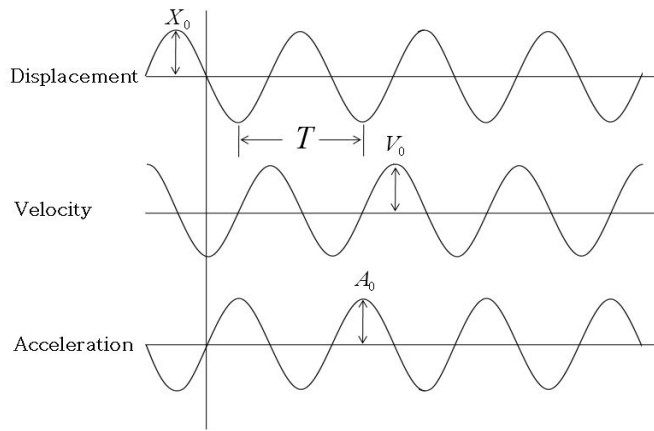
$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{dv}{dt} = -\omega^2 X \sin(\omega t + \phi) \\ &= \omega^2 X \sin(\omega t + \phi + \pi)\end{aligned}\tag{3.7}$$

Figure 3.3은 정현진동의 경우 변위, 속도 및 가속도의 파형을 나타낸다. 위상각  $\phi$ 는 0의 경우이다. Figure 3.3에서 알 수 있듯이 속도의 파형은 변위의 파형에 비해  $90^\circ$ 진행해 있다. 이것을 위상이  $90^\circ$ 나아갔다고 한다. 식(3.1)과 식(3.6)에 명확히 나타나 있다. 마찬가지로 가속도의 위상은 속도의 위상보다  $90^\circ$ 더 진행하고 있고 가속도의 위상은 변위의 위상보다  $180^\circ$ 진행하고 있음을 알 수 있다.

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

그런데 변위진폭, 속도진폭 및 가속도진폭의 값은 어느 순간에서 최대치(peak)가 되는데 진동에서는 이들을 진폭 자신으로 나타내어 실효치로 표현하는 경우가 많다. 실효치란 순간에 있어서 진동치를 자승하여 주기에 대하여 평균한 평방근이다. 상기의 정현진동의 경우 실효치  $P_e$ 는 식(3.8)과 같다.

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



$X_0$  : Displacement amplitude(cm)       $T$  : Period  
 $V_0$  : Velocity amplitude(cm/s)       $f$  : Frequency =  $1/T$   
 $A_0$  : Accelration amplitude(cm/s<sup>2</sup>)

Figure 3.3 Harmonic oscillation.

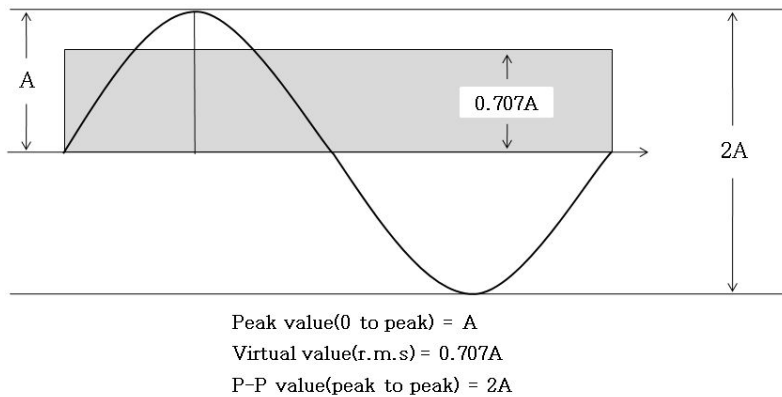


Figure 3.4 The size of sine wave vibration.

주기적이 아닌 경우는 식(3.8)의 T대신 적당한 시간의 길이를 취한다. 실효치의 물리적 의미는 예를 들면, 실효치 100V의 교류전압은 직류전압 100V의 효과와 같게 되는 최대치를 갖는 전압이라는 것과 마찬가지로 변동하는 진동량을 일정하게 연속된 효과로서 나타낸 값(Figure 3.4의 어두운 부분)이다.

진동의 크기를 나타낼 경우 Peak치(0 to Peak)나 실효치 외에 P-P치(Peak to Peak)가 있으며 Figure 3.4에 정현진동의 경우 그들 관계를 나타낸 것이다. 이들은 변위, 속도, 가속도의 어느 것에 대해서도 같은 관계가 된다.

### 3.3 진동량의 표현

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

Table 3.1 Vibration unit

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

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

$$\text{속도 진폭} \quad V = \omega X = 2\pi f X \quad (3.9)$$

$$\text{가속도 진폭} \quad A = \omega V = (2\pi f)^2 X \quad (3.10)$$

따라서 변위, 속도, 가속도의 각 진폭을 상호 환산할 수 있다.

### 3.4 발파진동의 특성

발파 시 폭원으로부터 3차원적으로 전파되어온 충격압에 의한 충격파는 거리에 따라 현저하게 감쇠되어 발파에 의한 에너지의 0.5 ~ 20% 가 탄성파의 형태로 균열대 외부의 암반으로 전파되어 간다. 이렇게 전달되는 탄성파는 지반을 진동시키는데 이것을 발파진동(blast vibration)이라한다.

Figure 3.5과 같이 발파에 의해 발생하는 파들은 압축파(P), 전단파(S), 표면파(R)의 세 가지로 크게 나눌 수 있다. 파동은 보통 수평이나 폭원으로부터 반경방향인 종방향성분(L), 반경방향에 직교하는 수직성분(V)과 횡방향성분(T) 과같이 세 방향의 직교성분으로 운동한다.

세가지 파형은 암석이나 토양 속을 진행하는 실제파와 지표를 따라 전파하는 표면파로 나뉜다. 이때 발파 시 가장 중요시되는 것은 표면파이며, 대표적인 표면파로는 레일리파(Rayleigh wave)이다. P파와 S파는 실제파 또는 물체파(body wave) 라고 한다.

PPV(peak particle velocity)는 지반진동을 입자속도로 측정하였을 때 직교하는 세 방향의 측정성분(x(t), y(t), z(t), t=시간)별 최대진폭이다. 따라서 3축 진동계를 이용하여 진동을 측정하면 진행방향에 따른 L, V, T의 3개 PPV값을 얻게 된다.

또한 이들 세 개의 PPV값들 가운데 가장 큰 값을 식 (3.11)과 같이 정의 한다. 이를 max PPV(maximum peak particle velocity)라 부르기도 한다.

$$\max PPV = \max(L, V, T) \quad (3.11)$$

탄성 매질 내에 압축파(P-wave)가 전파하는 동안 파의 에너지 감쇠는 크게 두 가지 관점에서 이루어지게 되는데, 첫 번째가 구형발산(spherical divergence) 효과에 의한 에너지 감쇠로써, 진폭의 크기는  $\frac{1}{r}$  로 감소하게 되고, 표면파의 경우는

원통형발산효과(cylindrical divergence)에 의한 감쇠로써 진폭의 크기는  $\frac{1}{\sqrt{r}}$  로 감쇠한다.

다음 두 번째는, 매질 내에서 마찰에 의한 발열 등과 같은 에너지 손실이 발생하는데, 이를 흡수(absorption)라고 하며, 흡수에 의한 에너지 감쇠는 거리의 지수함수로 식 (3.12)과 같이 근사적으로 표현된다.

$$A = A_0 \left( \frac{r_0}{r} \right) e^{-q(r-r_0)} \quad (3.12)$$

여기서,  $A$ 와  $A_0$  는 각각 진원으로부터  $r$  과  $r_0$  로 떨어진 점에서의 진폭이며  $q$  는 매질의 흡수계수(absorption coefficient)이다.

따라서 진원에서부터 가까운 거리에서는 구형발산 효과가 우세하게 나타나며, 먼 거리에서는 흡수에 의한 영향이 크게 나타나는 것으로 알려져 있다.

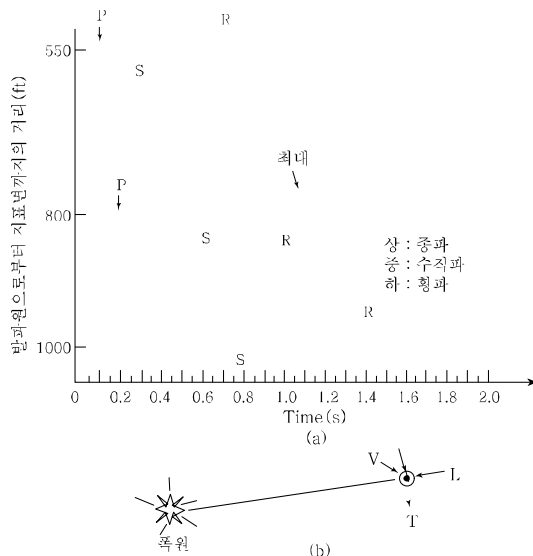
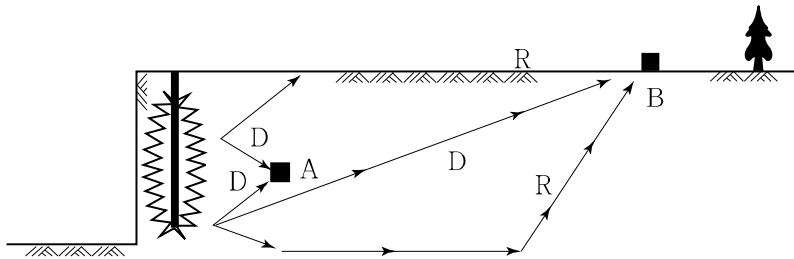


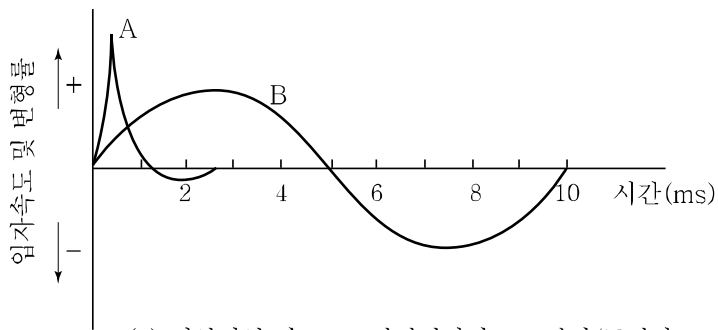
Figure 3.5 General form of construction blast vibration(Dowding, 1996).

대부분의 발파문제들은 Figure 3.6의 폭원에서 먼 위치 B지점에 해당하는 곳에 수진기를 두어 측정한 결과 직접 전달파, 반사파, 굴절파 등이 조합되어 대체로 사인파 B로 된다. 근접한 곳에서의 폭발은 A지점에 직접 전달되어 하나의 뾰족하게 1 ~ 2 ms 로 지속되는 일시적인 순간 파동 A를 만든다.

대체적으로 지금까지 주로 발파진동 평가 대상이 되었던 파는 B와 같은 영역이고, 본 연구에서 수행하고자 하는 파의 대상은 A와 같은 영역에 해당된다.



(a) 발파진동감지기 배치



(b) 이상화한 파 D : 직접전달파, R : 반사/굴절파

Figure 3.6 Idealized waves for two construction geometries(Dowding, 1996).



### 3.5 발파진동의 회귀분석 이론

발파 진동의 전파특성을 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.

$$V = K \left( \frac{D}{W^b} \right)^n \quad (3.13)$$

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 (3.13)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.

측정된 발파진동치는 최소자승법에 의한 회귀분석(regression analysis)을 실시하여 발파진동 추정식을 산출한다.

발파진동산출을 위한 회귀분석은 회귀분석과 다중회귀분석으로 나눌 수 있다. 여기서 진동 상수를 추정하기 위하여 사용된 분석법은 단순회귀분석으로 한 개의 독립 및 종속변수간의 선형관계(linear relation)에 관한 분석법을 말한다.

이는 진동 관계식  $v = K\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^n$ 을 이용하여 표본회귀식으로 변환하고, 이 때 양변에 Log를 취하면

$$\begin{aligned} \log v &= \log K + n \log\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right) \\ \log v = y, \quad \log K = a, \quad \log\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right) &= x, \quad n = b \\ y &= a + bx \end{aligned} \tag{3.14}$$

상기 식을 모회귀직선(표본회귀식)이라 하며, 모회귀 직선을 생성할 때 발생하는 오차들의 자승합을 최소로 하는 방법을 최소자승법(least square method)이라고 하며, 이 방법을 사용하여 발파진동상수를 산출한다. 최소 자승법에 의하여 구해지는 a, b를 최소 자승 추정량이라 한다.

$$\begin{aligned} a &= \frac{\sum y}{n} - b \frac{\sum x}{n} \\ b &= \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \\ n = b, \quad K &= 10^a \end{aligned} \tag{3.15}$$

안전성과 신뢰도를 높이기 위해서는 95% 신뢰도의 발파진동식을 산출하며, 위에서 구해진 회귀 직선식의 기울기  $b$ 를 동일하게 한 상태에서  $y$ 절편을 이동시켜 새로운 절편을 계산하여 구한다.

절편  $a$ 의 표준편차 (SE)는

$$SE(a) = \left( \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{x^{-2}}{\sum x^2 - (\sum x)^2}} \right) \times \delta \quad (3.16)$$

$$\delta^2 = \left( \sum X^2 - \frac{\sum Y^2}{n} - \frac{(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n} \right) \times \frac{1}{\left( \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} \right) \times (n-2)} \quad (3.17)$$

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

## 3.6 발파진동의 조절 및 경감대책

### 3.6.1 발파원으로부터 진동발생을 억제하는 방법

#### (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.

### 3.6.2 전파하는 진동을 차단하는 방법

발파원과 보호건물 사이에 line-drilling이나 pre-splitting을 실시하여 진동의 전파를 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.

### 3.7 선형장약량 $l$ 의 선정

임의의 폭약이나 기폭제에 대한 선형장약량  $l$ 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.

$$S_{ANFO} = \frac{(Q + V_g/0.85)}{5.04} \quad (3.18)$$

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

### 3.8 변형률 손상모델

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

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

$$S = \frac{V}{V_p} \quad (3.19)$$

압반의 한 요소에서 인장파괴가 발생한다면 인장강도가 인장응력보다 작을 것이고,

$$E = \frac{T_s}{S_t}, \quad S_t = \frac{T_s}{E} \quad (3.20)$$

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

$$\frac{V_d}{V_p} = \frac{T_s}{E} \quad \therefore V_d = \frac{T_s \times V_p}{E} \quad (3.21)$$

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

$$V_d = 0.1 \times UCS \times \frac{V_p}{E} \quad (3.22)$$

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

## 4. 현장 실험

### 4.1 실험 방법 및 결과

#### 4.1.1 실험 방법

본 연구의 실험지역은 전라남도 장성군 북하면 일원의 “00-00 도로건설공사”의 구간으로서 노출된 암반 제거 작업을 위한 현장으로 총 8회의 발파에 대한 실험을 실시하였다.

실험은 지표진동의 예측치와 지중진동의 예측치를 비교하기 위하여 지표진동의 예측식의 지발당 장약량을 지중진동의 예측에서는 선형장약량을 환산하였고, 다음과 같은 방법으로 실험을 진행하였다.

실험조건은 Table 4.1과 같으며 1회의 경우, 공경  $\phi 76$  mm, 공간격 2.0 m, 저항선 1.8 m, 천공장 6.0 m, 지발당 장약량 6.4 kg 으로 1회 발파를 실시하였으며, 2~3회의 경우  $\phi 76$  mm, 공간격 2.5 m, 저항선 2.0 m, 천공장 5.7 m, 지발당 장약량 7.5 kg으로 실시하였다. 4~5회의 경우 공경  $\phi 76$  mm, 공간격 2.1 m, 저항선 1.8 m, 천공장 4.5 m, 지발당 장약량 5.0 kg으로 실시하였으며, 6회의 경우 공경  $\phi 76$  mm, 공간격 1.6 m, 저항선 1.5 m, 천공장 4.1 m, 지발당 장약량 2.8 kg 으로 실시하였고, 7~8회의 경우 공경  $\phi 76$  mm, 공간격 1.9 m, 저항선 1.6 m, 천공장 3.4 m, 최대 지발당 장약량 3.0 kg으로 실시하여 총 8회 발파를 실시하였다. 이 때 사용한 폭약은 emulsion explosive로서  $\phi 50$  mm(800 g/EA, 2.1052 kg/m), 사용뇌관은 MS 지발 전기뇌관을 사용하였으며, Figure 4.1~ 4.5는 발파패턴도이다.



Table 4.1 Applied design parameter

No.	1	2~3	4~5	6	7~8
Diameter(mm)	76				
Drilling length(m)	6.0	5.7	4.5	4.1	3.4
Burden(m)	1.8	2.0	1.8	1.5	1.6
Spacing(m)	2.0	2.5	2.1	1.6	1.9
Charge per hole(kg)	6.4	7.5	5.0	2.8	3.0
Charge per delay(kg)	6.4	7.5	5.0	2.8	3.0
Explosive	Emulsion explosive $\Phi 50$				
Detonator	MS Detonator				

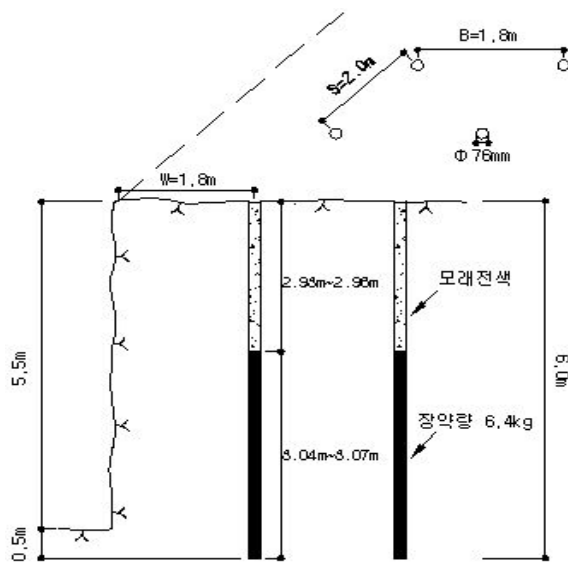


Figure 4.1 Blasting pattern(No.1).

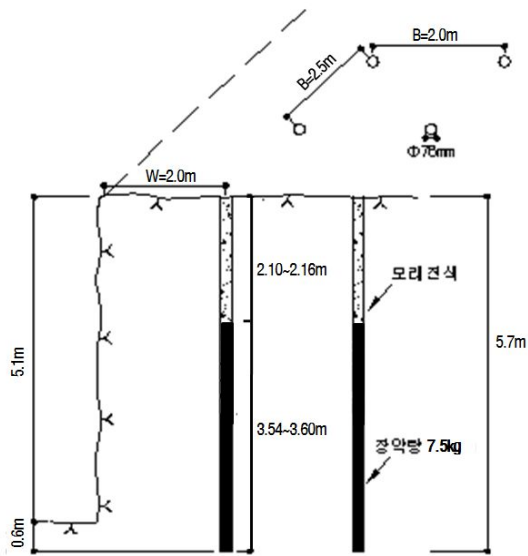


Figure 4.2 Blasting pattern(No.2~3).

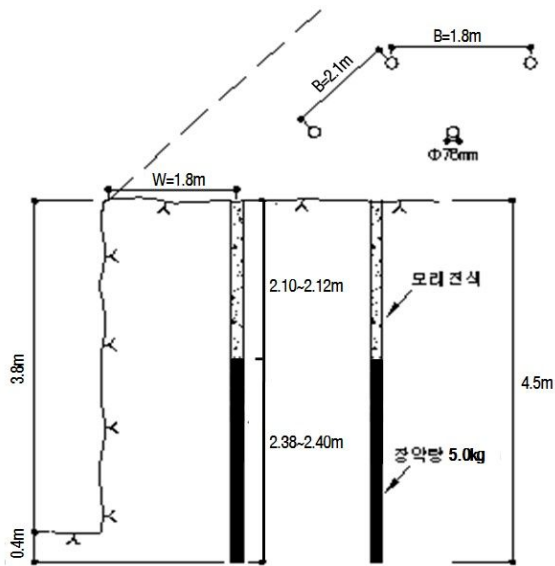


Figure 4.3 Blasting pattern(No.4~5).

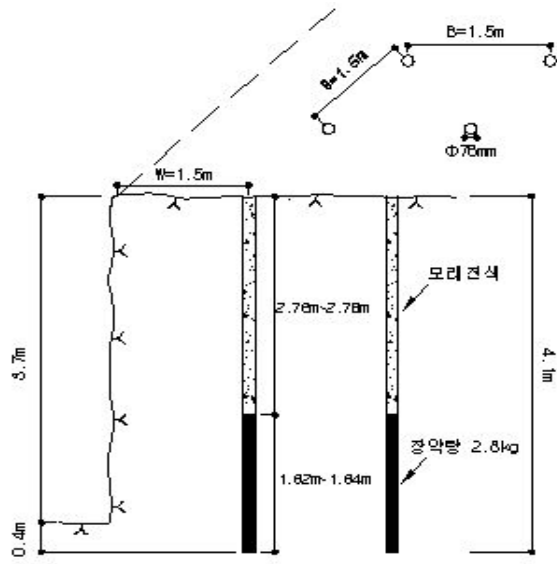


Figure 4.4 Blasting pattern(No.6).

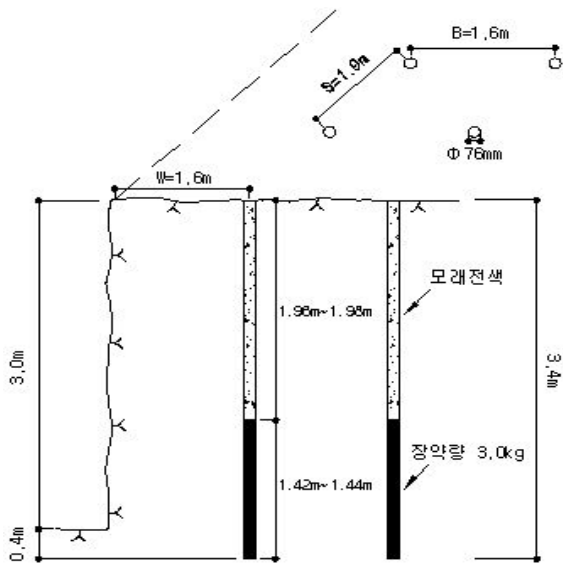


Figure 4.5 Blasting pattern(No.7~8).

### 4.1.2 실험 결과

Table 4.1의 발파 조건으로 총 8회의 발파 실험을 한 결과 64개의 데이터를 획득하였으며, 계측된 자료는 Table 4.2와 같으며, 최대입자속도(PPV)의 경우 접선방향의 경우 0.0270 ~ 0.851 cm/sec 와 같으며 수직성분의 경우 0.0286 ~ 1.080 cm/sec 와 같으며 진행성분의 경우 0.0318 ~ 1.180 cm/sec 와 같다. 또한 최대 벡터 합(PVS)는 0.0445 ~ 1.58 cm/sec 와 같으며 주파수 분석에 의한 Zero Cross Frequency는 12 ~ >100 Hz 로 나타났다.

Figure 4.6 은 발파 실험시 진동계측을 위 계측기를 설치한 모습이다.

Table 4.2 Measurement result

No.	Peak particle velocity(PPV) (cm/sec)			ZC Freq (Hz)			Peak vector sum(PVS) (cm/sec)	Distance (m)
	Tran	Vert	Long	Tran	Vert	Long		
1	0.622	1.040	0.622	30	37	47	1.08	50
2	0.851	1.080	1.180	47	34	37	1.58	50
3	0.591	0.794	0.632	39	28	17	1.05	54
4	0.503	0.502	0.535	43	43	32	0.665	53
5	0.289	0.484	0.454	43	37	34	0.556	57
6	0.224	0.384	0.254	57	34	57	0.483	57
7	0.256	0.330	0.197	30	27	23	0.379	60
8	0.270	0.243	0.167	32	28	64	0.322	62
9	0.384	0.332	0.265	22	28	32	0.422	90
10	0.589	0.471	0.408	28	27	28	0.603	90
11	0.503	0.368	0.337	20	24	24	0.635	94
12	0.316	0.206	0.349	32	43	28	0.354	93
13	0.203	0.164	0.368	32	34	32	0.387	97
14	0.114	0.192	0.178	26	34	22	0.208	97

Table. 4.2 continued

No.	Peak particle velocity(PPV) ( <i>cm/sec</i> )			ZC Freq ( <i>Hz</i> )			Peak vector sum(PVS) ( <i>cm/sec</i> )	Distance (m)
	Tran	Vert	Long	Tran	Vert	Long		
15	0.205	0.111	0.184	26	23	30	0.208	100
16	0.157	0.103	0.110	24	47	28	0.164	102
17	0.238	0.368	0.241	27	27	17	0.379	120
18	0.160	0.271	0.194	18	23	23	0.289	120
19	0.330	0.329	0.248	16	23	19	0.354	124
20	0.103	0.125	0.108	26	30	18	0.149	123
21	0.132	0.106	0.152	22	30	12	0.159	127
22	0.0460	0.132	0.0619	26	22	18	0.133	127
23	0.0826	0.0889	0.0762	18	22	22	0.105	130
24	0.0921	0.0635	0.0635	27	30	15	0.0953	132
25	0.103	0.0683	0.146	43	27	34	0.160	174
26	0.0841	0.102	0.0841	73	26	21	0.114	174
27	0.0841	0.0905	0.103	23	23	22	0.156	178
28	0.0445	0.0492	0.0460	16	57	34	0.0524	178
29	0.0349	0.0476	0.0524	51	37	20	0.0603	181
30	0.0349	0.0397	0.0318	57	26	21	0.0445	181
31	0.0270	0.0365	0.0445	21	23	24	0.0540	184
32	0.0318	0.0286	0.0365	57	57	34	0.0460	186
33	0.368	0.292	0.571	34	51	32	0.583	128
34	0.292	0.216	0.521	73	73	27	0.539	129
35	0.419	0.229	0.495	30	43	28	0.515	131
36	0.330	0.140	0.394	47	51	32	0.451	130
37	0.457	0.229	0.483	39	39	32	0.517	133
38	0.165	0.0762	0.165	34	39	32	0.177	136
39	0.152	0.0889	0.140	37	51	37	0.171	139

Table. 4.2 continued

No.	Peak particle velocity(PPV) ( <i>cm/sec</i> )			ZC Freq ( <i>Hz</i> )			Peak vector sum(PVS) ( <i>cm/sec</i> )	Distance (m)
	Tran	Vert	Long	Tran	Vert	Long		
40	0.140	0.0889	0.127	47	43	32	0.168	140
41	0.254	0.152	0.330	30	47	32	0.369	149
42	0.216	0.152	0.267	27	>100	28	0.334	148
43	0.343	0.152	0.229	27	57	32	0.401	152
44	0.127	0.0762	0.114	30	39	34	0.153	153
45	0.114	0.0635	0.230	30	85	32	0.204	156
46	0.114	0.0635	0.0889	37	57	34	0.128	156
47	0.114	0.0635	0.152	30	64	34	0.153	158
48	0.127	0.0508	0.0889	37	57	37	0.135	160
49	0.368	0.127	0.305	39	57	57	0.461	147
50	0.343	0.140	0.343	51	57	57	0.412	144
51	0.267	0.0889	0.279	28	85	51	0.380	147
52	0.167	0.0762	0.216	64	85	57	0.239	152
53	0.127	0.0762	0.114	47	57	57	0.143	151
54	0.114	0.0635	0.114	39	85	51	0.145	149
55	0.0762	0.0508	0.0889	47	>100	57	0.123	151
56	0.114	0.0381	0.0635	51	>100	37	0.118	152
57	0.140	0.0635	0.140	21	28	19	0.158	235
58	0.152	0.0889	0.140	21	23	20	0.196	234
59	0.152	0.102	0.216	24	20	18	0.223	238
60	0.0889	0.0381	0.0889	27	51	22	0.110	239
61	0.0762	0.0381	0.0762	30	39	20	0.0823	243
62	0.0508	0.0381	0.0635	28	57	27	0.0751	241
63	0.0889	0.0508	0.0508	30	30	30	0.103	244
64	0.0762	0.0381	0.0508	28	73	23	0.0833	246



(a)



(b)

Figure 4.6 Monitoring blast vibration.

(a) view of the field, (b) vibration measuring instrument

## 5. 실험 결과에 따른 지표진동 및 지중진동 예측

### 5.1 지표진동의 예측

K는 진동상수, n은 감쇄지수, SD는 환산거리, r은 상관계수이다. 여기서 상관계수란 Data를 회귀분석 할 때 Data가 회귀선에 적합한 정도를 나타내며 상관계수가 클수록 적합성이 높다.

본 연구에서 측정된 진동치의 회귀분석을 통해 입지상수 K, n을 구하기 위하여 최대진동속도와 환산거리의 log-log 1차 상관관계를 이용하여 전산처리한 결과 자승근 환산거리 및 삼승근 환산거리에 따른 발파진동속도를 Figure 5.1과 Figure 5.2에 나타내었다.

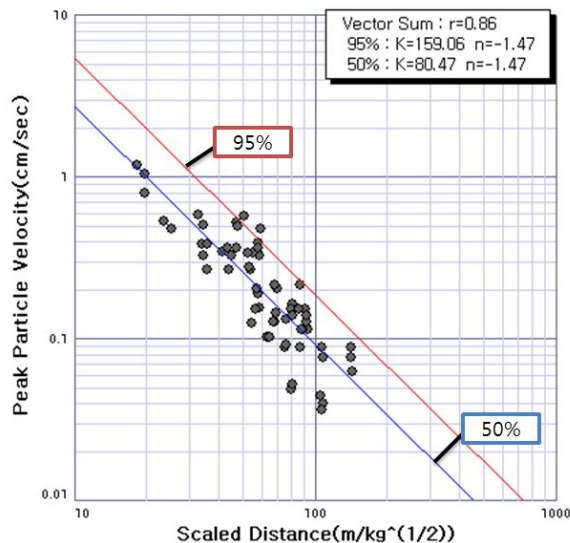


Figure 5.1 Relationship of PPV and Square root scaled distance.



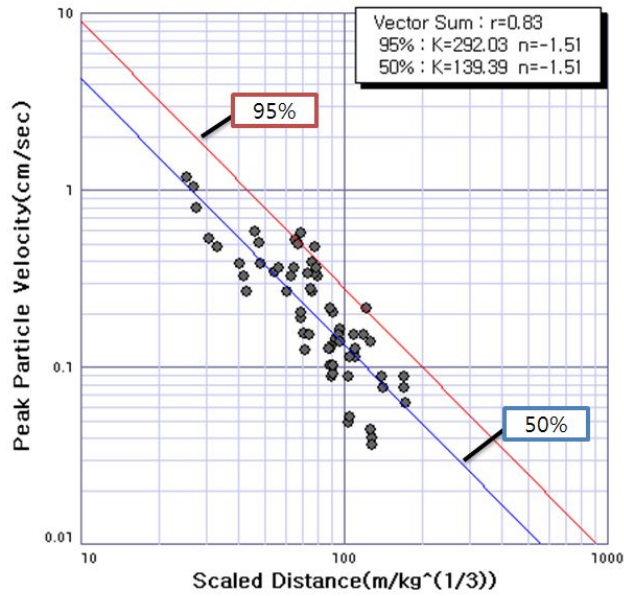


Figure 5.2 Relationship of PPV and Cube root scaled distance.

본 연구에서의 발파진동 예상 식의 회귀분석 결과는 다음과 같다.

$$V = 159.06 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.47} \quad r = 0.86 \quad (5.1)$$

$$V = 292.03 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.51} \quad r = 0.83 \quad (5.2)$$

식 (5.1) 은 95%의 신뢰도를 갖는 공식으로 자승근, 삼승근일 때 K값은 각각 159.06, 292.03으로 나타났으며, n값은 -1.47, -1.51로, 그리고 이들 data들의 상관계

수( $r$ )는 0.86, 0.83으로 나타났으며, 본 연구에서는 이 중 상관계수가 더 높은 자승근 환산거리를 이용한 발파진동 예상 식을 적용하였다.

## 5.2 지중진동의 예측

발파공으로부터 지중진동을 측정하기 위해 Holmberg and Persson(1979)의 모델이 주로 이용되고 있다. 이 모델에서 최대입자속도는 다음과 같은 경험식의 형태로 나타낼 수 있다.

$$V = KW^\alpha / R^\beta = K \left( \frac{R}{W^b} \right)^n \quad (5.3)$$

여기서,  $V$ 는 최대입자속도(cm/sec),  $W$ 는 지발당 장약량(kg),  $R$ 은 폭원으로부터 거리(m)이다. 상수  $K$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $n$ 은 암반의 구조적 특성 및 발파조건에 따라 달라지며  $b$ 는 1/2 또는 1/3이다.

식 (5.4)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 Figure 5.3에 나타내었다.

$$R_i^2 = R_0^2 + (R_0 \tan \theta - x_i)^2 \quad (5.4)$$

여기서  $R_0$ 는 장약공과 측점과의 수직거리를 의미하고  $\theta$ 는 장약공의 하부에서 측점을 바라보았을 때의 각도이며,  $x_i$ 는 장약공의 하부에서 미소장약  $W_i$ 까지의 거리를 나타낸다.

$$W_i = l dx \tag{5.5}$$

여기서  $l$ 은 선형장약량이다.

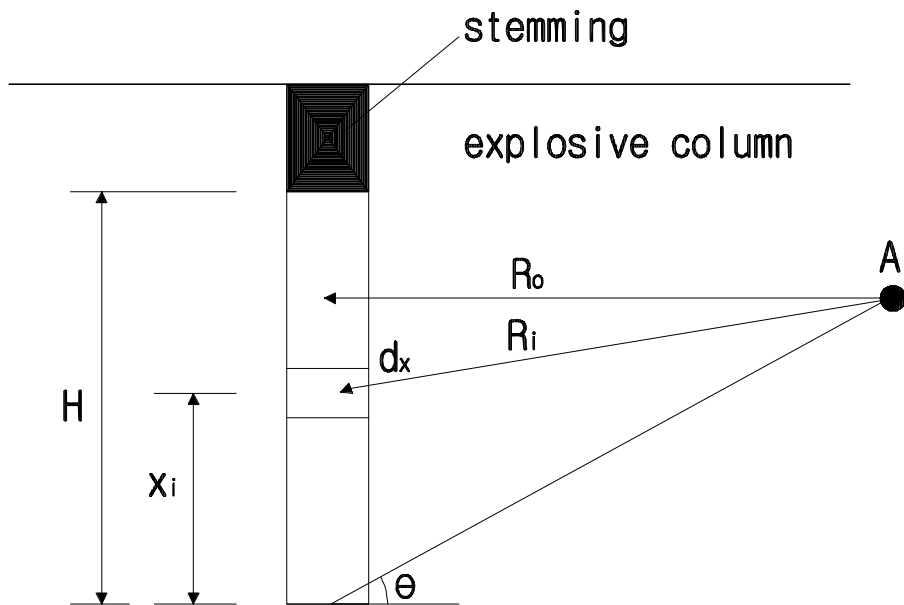


Figure 5.3 Integral calculus for stemming length to calculate particle velocity on voluntary observation.

식 (5.5)을 이용하여 장약길이  $H$ 까지 적분하면 최대진동속도는 다음과 같이 계산된다.

$$W = \int W_i = \int_0^H l dx$$

$$R = (R_0^2 + (R_0 \tan \theta - x)^2)^{1/2}$$

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

$$V = K \left( \frac{l}{R_0} \right)^\alpha \left[ \arctan \left( \frac{H + x_s - x_i}{R_0} \right) + \arctan \frac{(x_i - x_s)}{R_0} \right]^\alpha \quad (5.6)$$

변환된 식 (5.6)을 이용하여 Figure 5.3의 관측점인 A의 지중진동을 예측하였다. 예측된 지중진동치는 Table 5.1에 수록하였다.

Table 5.1 Results of expected subterranean vibration

Charge per delay (kg)	Peak particle velocity(PPV) (cm/sec)				
	Distance (m)				
	5	10	20	30	40
6.4	57.17	20.97	7.60	4.19	2.75
7.5	63.74	23.52	8.54	4.71	3.09
5	48.08	17.53	6.35	3.50	2.29
2.8	31.69	11.47	4.15	2.28	1.49
3	33.31	12.07	4.36	2.40	1.57

### 5.3 예측치의 비교

Holmberg and Persson(1979)의 모델을 이용하여 거리별 지중진동치를 얻고자 자승근 환산식을 구하기 위한 실험패턴 조건을 이용하였다. 각각의 조건은 Table 4.1에서 주어졌으며 식 (5.1) 과 식 (5.6)에 따른 거리별 결과치는 Table 5.2에 수록하였다.

예측식을 이용한 거리별 지중진동치의 결과와 자승근 환산식을 이용한 거리별 지표 진동치를 비교한 결과 지발당 장약량 6.4 kg 의 경우는 90 m 에서 진동속도 0.837 cm/sec, 7.5 kg 의 경우는 35 m 에서 3.758 cm/sec, 5 kg 의 경우 19 m 에서 6.848 cm/sec, 2.8 kg 와 3kg 의 경우는 각각 14 m 에서 7.005 cm/sec, 7.369 cm/sec 로 수렴하는 것을 보였다. 다음의 Figure 5.9에 이를 나타내었다.

두 가지의 식을 이용하여 거리별 지중진동치와 지표진동치를 비교한 결과 근접거리에서 차이를 보였다.

또한 대체적으로 비슷한 양상을 보였고 지발당 장약량이 작을수록 좀 더 근접한 거리에서 수렴하는 것을 보였다. 6.4 kg 의 경우 지발당 장약량에 비해 수렴거리가 크게 나온 원인으로 장약량에 비해 긴 천공장과 전색장의 차이로 인해 발생 되었다고 사료된다.

자승근 환산식과 예측식을 이용하여 거리별 지표진동치와 지중진동치 비교한 결과를 Figure 5.4 ~ 5.8에 나타내었고 대체적으로 거리가 멀어질수록 비슷한 결과를 나타내는 것을 볼 수 있다.

Table 5.2 Results of expected subterranean vibration and surface vibration

No	Charge per delay (kg)	Vibration	Peak particle velocity(PPV) (cm/sec)					Convergence distance (m)	Convergence PPV (cm/sec)
			Distance (m)						
			5	10	20	30	40		
1	6.4	Subterranean	57.17	20.97	7.60	4.19	2.75	90	0.837
		Surface	58.63	21.16	7.64	4.21	2.76		
2	7.5	Subterranean	63.74	23.52	8.54	4.71	3.09	35	3.758
		Surface	65.65	23.70	8.55	4.71	3.09		
3	5	Subterranean	48.08	17.53	6.35	3.50	2.29	19	6.848
		Surface	48.73	17.59	6.35	3.50	2.29		
4	2.8	Subterranean	31.69	11.47	4.15	2.28	1.49	14	7.005
		Surface	31.82	11.49	4.15	2.28	1.49		
5	3	Subterranean	33.31	12.07	4.36	2.40	1.57	14	7.369
		Surface	33.48	12.08	4.36	2.40	1.57		

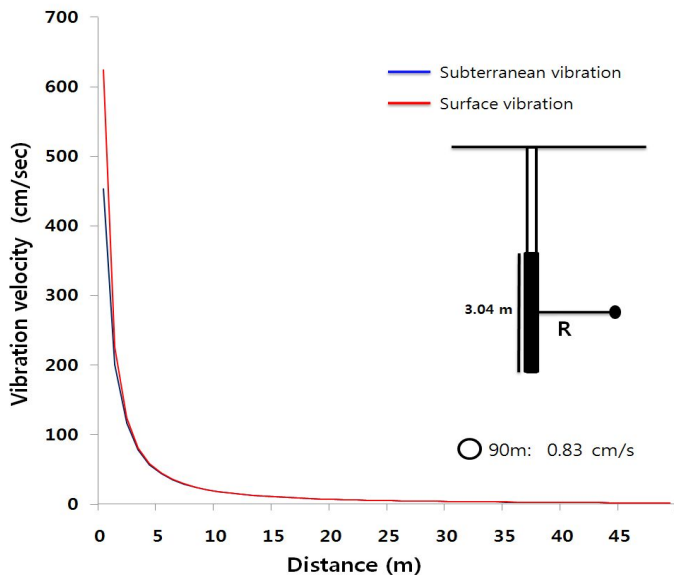


Figure 5.4 Comparison result of No.1(charge per delay 6.4 kg).

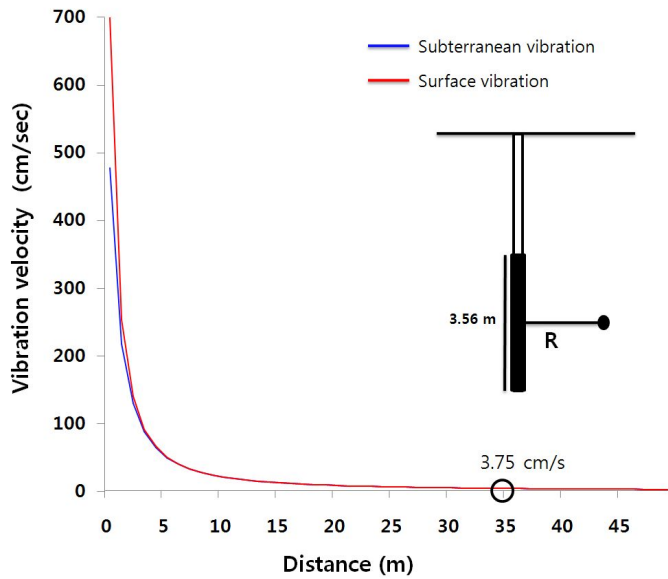


Figure 5.5 Comparison result of No.2(charge per delay 7.5 kg).



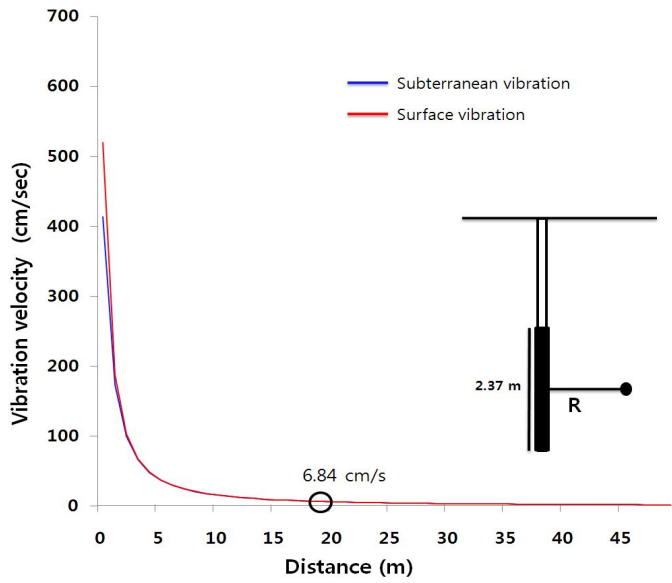


Figure 5.6 Comparison result of No.3(charge per delay 5 kg).

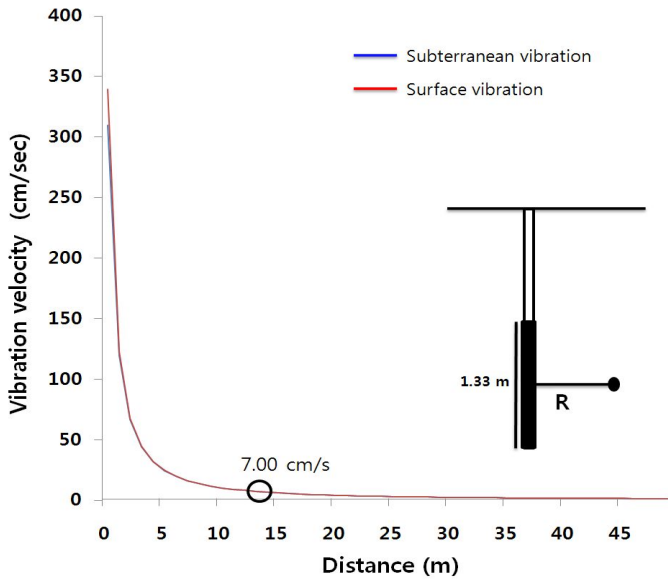


Figure 5.7 Comparison result of No.4(charge per delay 2.8 kg).

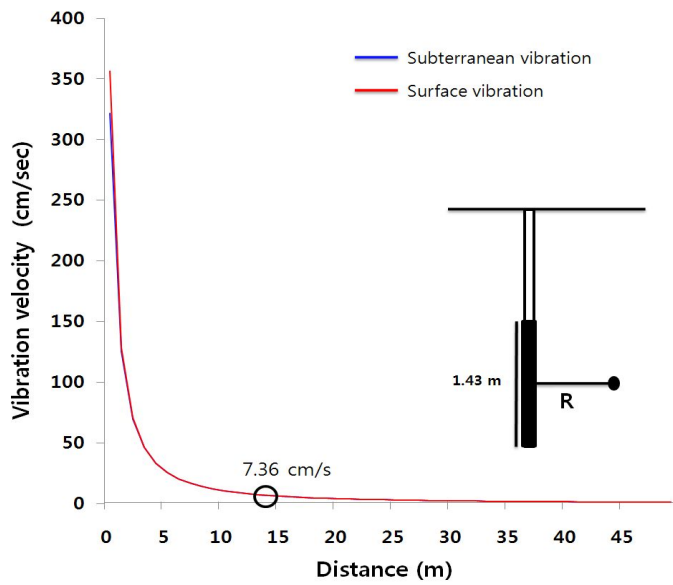


Figure 5.8 Comparison result of No.5(charge per delay 3 kg).

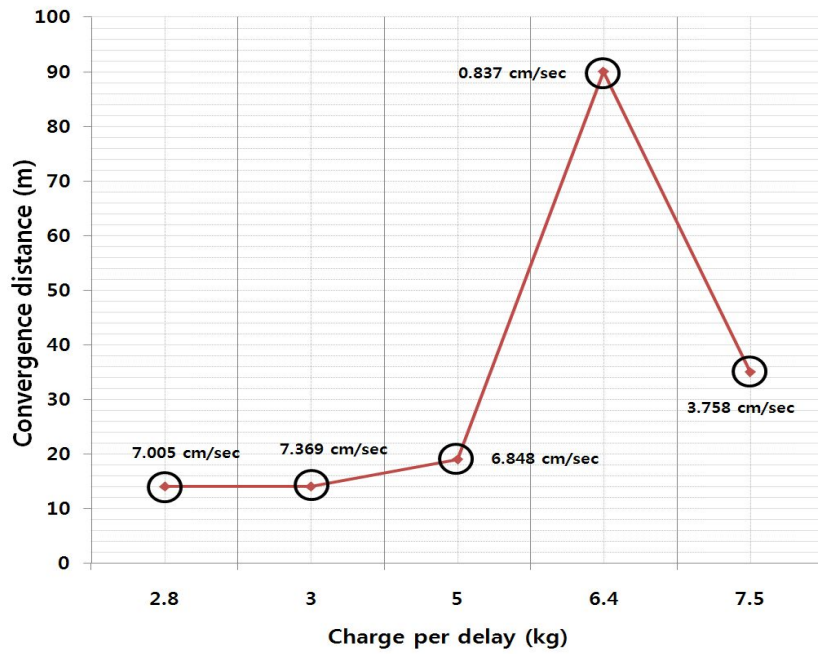


Figure 5.9 Convergence distance by charge per delay.

## 6. 결론

본 연구에서는 발파 실험을 실시하여 진동 측정치를 얻고 이를 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석을 통해 얻어진 자승근 환산식을 이용하여 지표진동의 거리별 예상 진동치과 Holmberg and Persson(1979)의 모델을 이용하여 얻어진 지중진동치의 차이를 비교 하였다.

1. 회귀분석을 실시하기 위해 8회의 발파 실험을 실시하였고 64개의 데이터를 획득하였다. 이에 대한 결과로 최대입자속도(PPV)의 접선방향의 경우 0.0270 ~ 0.851 cm/sec 와 같으며 수직성분의 경우 0.0286 ~ 1.080 cm/sec 와 같으며 진행성분의 경우 0.0318 ~ 1.180 cm/sec 와 같다. 또한 최대 벡터 합(PVS)는 0.0445 ~ 1.58 cm/sec 와 같으며 주파수 분석에 의한 ZC Frequency는 12 ~ >100 Hz 로 나타났다.

2. 회귀분석을 통해 얻어진 95%의 신뢰도를 갖는 공식으로 자승근, 삼승근일 때 K값은 각각 159.06, 292.03으로 나타났으며, n값은 -1.47, -1.51로, 그리고 이들 data 들의 상관계수(r)는 0.86, 0.83으로 나타났으며, 본 연구에서는 이 중 상관계수가 더 높은 자승근 환산거리를 이용한 거리별 지표진동 예측식을 이용하였다.

$$V = 159.06 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.47} \quad r = 0.86$$

$$V = 292.03 \left( \frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.51} \quad r = 0.83$$

3. Holmberg and Persson(1979)의 모델을 이용한 거리별 지중진동치의 결과와 자승근 환산식을 이용한 거리별 지표진동치를 비교한 결과 지발당 장약량 6.4 kg 의 경우는 90 m 에서 진동속도 0.837 cm/sec, 7.5 kg 의 경우는 35 m 에서 3.758 cm/sec, 5 kg 의 경우 19 m 에서 6.848 cm/sec, 2.8 kg 와 3kg 의 경우는 각각 14 m 에서 7.005 cm/sec, 7.369 cm/sec 로 수렴하는 것을 보였다.

4. 두 가지의 식을 이용하여 거리별 지중진동치와 지표진동치를 비교한 결과 지표와 지중 진동치가 발파공으로부터 근접한 거리에서는 차이가 나타났다. 지중진동치와 지표진동치는 거리가 멀어질수록 대체적으로 비슷한 양상을 보였고 지발당 장약량이 작을수록 좀 더 근접한 거리에서 수렴하는 것을 보였다. 그러나 지발당 장약량에 비해 수렴거리가 크게 나온 6.4 kg 경우의 원인으로는 장약량에 비해 긴 천공장과 전색장의 차이로 인해 발생 되었다고 사료된다.

전술한 바와 같이 결과를 토대로 예측식에 의한 결과로 발파공에서 근접한 곳에서는 지표진동이 지중진동보다 크게 나타났다. 하지만 실제 지중진동과 지표진동을 측정하여 비교해 볼 수 있는 많은 연구가 이루어져 한다고 사료된다. 따라서 정확한 예측을 위해서는 새로운 예측기법의 개발과 이를 위한 이론적 확립과 적절한 방법을 위해 지속적인 진동계측 실험 및 분석에 대해 많은 연구가 필요하다고 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. 강추원, 2005, 제2판 발파공학 A to Z, 구미서관, pp. 441~452.
2. 건설교통부, 2006.12, 암파쇄굴착공법 설계 및 시험발파 지침안.
3. 김종인, 2006, 단일공 파형 중첩 모델링 자료에 의한 발파진도의 예측, 조선대학교 박사학위논문.
4. 김대상, 이정인, 이희근, 발파진동의 속도 및 주파수를 고려한 허용 진동치 결정에 관한 연구, 한국자원공학회지, Vol. 28, pp. 444~455.
5. 원연호 외, 발파공 주변의 인접거리 진동계측 사례연구, 대한화약발파공학회, 제 24권 제2호, pp. 83~91.
6. 이정인 외, 1999~02, 터널발파 설계 자동화 프로그램의 개발에 관한 연구, 건설교통부.
7. 임한욱, 김재동, 발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구, 한국자원공학회지, Vol.29, pp. 146~157.
8. 조병구 외, 1996, 지중 발파에 의한 건물의 진동 거동에 관한 연구, 한국암반공학회지, vol. 6, pp.157~165.
9. 미광무국(USBM) 고시 제 656호(Nichols, Johnson and Duvall, Office of Surface Mining(1977), Surface Mining Reclamation and Enforcement Provisions, Public Law 95~87, Federal Register, Vol. 42, No.289).
10. Charles. H. Dowding., 1996, Construction vibrations, Prentice Hall, pp.19~24, pp.43~44.
11. Holmberg R., Persson PA, 1979, Design of tunnel perimeter blasthole patterns to prevent rock damage. Proc. of IMM Tunnelling '79 Conference.
12. Holmberg R. et al., 1993, Rock blasting and explosives engineering, CRC press, pp.244~245.

13. S.Nie et al., 1996, Monitoring of large open cut rounds by VOD, PPV and pressure measurements, Proc. 5th Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, pp.167~176.
14. Yang et al., 1993, Blast damage study by measurement of blast vibration and damage in the areas adjacent to blast hole, Proc. 4th Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, pp.137~144.

## 감사의 글

어느덧 2년이라는 시간이 흘러 대학원 생활을 마치게 되어 기쁘게 생각하고 저에게 힘을 되어 주신 모든 분들께 감사드립니다.

먼저 학부시절부터 대학원까지 많은 가르침과 사랑으로 보살펴주시고, 바른 성품을 갖게 해주신 강추원 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 부족하지만 저의 논문을 심사하시며 고생하여주신 고진석 교수님과 강성승 교수님께 감사의 말씀드립니다. 학부생부터 열정적인 강의와 저에게 많은 관심을 갖어주신 박영석 교수님, 한오형 교수님, 이제는 은퇴하셔서 아쉬움이 남지만 늘 저의 맘에 계시는 이창신 교수님, 양해승 교수님, 서동우 교수님께도 감사의 뜻을 전해드리고 싶습니다.

암석역학실험실이라는 곳에서 2년이라는 시간은 가족과 같은 선·후배님들과의 만남을 주었습니다. 항상 저의 실험실을 뒤에서 지켜주신 원연호 선배님, 김영희 선배님, 노영배 선배님, 이효 선배님, 한남철 선배님, 박정봉 선배님, 문창일 선배님, 최태홍 선배님, 김재웅 선배님, 위장복 선배님, 황남순 선배님, 이섭 선배님, 이창원 선배님, 박윤석 선배님, 김수로 선배님, 김영석 선배님, 조규영 선배님, 김승현 선배님, 양훈재 선배님, 박지우 선배님, 문태철 선배님께 감사드립니다.

실험실에서 동고동락을 함께 했던 그 무엇과도 바꿀 수 없는 선·후배에게 감사의 뜻을 전하고 싶습니다. 먼저 실험실에서 같이 생활하지는 않았지만 많은 가르침을 주신 김종인 선배님과 박현식 선배님, 실험실의 맏형으로써 고생하신 호민이 형님, 후배의 질문에 웃음으로 최선을 다해 알려주시는 큰매형 친구이자 아빠가 된 복현이 형님, 대학원 일년 선배로써 실험실 일들을 잘 알려주신 동조형, 학번은 같지만 대학원선배인 청신이, 학부선배지만 대학원동기로써 나와 함께 고생한 홍표형, 친형 같지만 60일 차이밖에 나지 않은 상곤이형, 의견차이도 많고 다툼도 많았지만 동기이자 고마운 친구 두성이, 친구지만 대학원 후배로 들어와 눈치보는 장원이, 잡일로 나를 이긴 고맙고 웃음 많은 동생 하림이, 여자지만 실험실에서 잘 적응해 나가고 있는 승은이에게 감사드립니다.



같은 실험실은 아니지만 대학원 큰형님 현오형, 학부때부터 대학원 생활까지 함께 헤쳐 나갔던 태진이형, 친구 영의, 계민이, 그리고 앞으로 자원공학과를 이끌어갈 후배님들에게도 감사의 뜻을 전합니다.

나에게 목숨보다 소중하며 어렸을때부터 서로의 버팀목이 되어준 누나들, 매번 싸우지만 하나밖에 없는 남동생, 나의 인생 모델이 된 새식구 큰매형, 10년동안 가족이 된 강아지 막둥이, 못난 아들이지만 이때까지 낳아주시고 키워주신 존경하는 아버지, 어머니께 감사의 뜻과 사랑을 전하고 싶습니다.

마지막으로 저를 아끼고 사랑해주신 모든분들께 감사드립니다.

## 저작물 이용 허락서

학 과	자원공학과	학 번	20087097	과 정	석사
성 명	한글: 김 도 형    한문: 金 度 亨    영문: Kim Do Hyung				
주 소	광주광역시 동구 운림동 라인2차 203동 1802호				
연락처	E-MAIL : kdhome1@naver.com				
논문제목	한글 : 예측식에 의한 지표진동과 지중진동에 관한 비교 영어 : <b>Comparison of surface vibration and subterranean vibration by prediction equation</b>				

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(  )

2009년 12월

저작자:    김 도 형



**조선대학교 총장 귀하**