

2007年 2月  
석사학위논문

# 충격진동 예측방법에 관한 연구

조선대학교 대학원

자원공학과

조 규 용

# 충격진동 예측방법에 관한 연구

- A Study on prediction method of Shock Vibration -

2007年 2 月 日

조선대학교 대학원

자원공학과

조 규 용

# 충격진동 예측방법에 관한 연구

지도교수    강    추    원

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함.

2006年 10 月 日

조선대학교 대학원

자원공학과

조    규    용

조규용의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 고진석 印

위원 조선대학교 교수 박천영 印

위원 조선대학교 교수 강추원 印

2006年 11 月 日

조선대학교 대학원

# 목 차

List of Table .....	I
List of Figure .....	II
Abstract .....	IV
1. 서론 .....	1
2. 이론적 배경 .....	3
2.1 진동 이론 .....	3
2.1.1 진동의 기본용어 .....	3
2.1.2 진동량의 표현 .....	8
2.1.3 파동의 중첩과 간섭 .....	9
2.2 파동의 전파 이론 .....	12
2.3 충격진동의 발생과 전파 .....	13
2.3.1 충격진동의 발생 .....	13
2.3.2 충격진동의 전파 .....	14
2.4 자유낙하 운동에서 역학적에너지 보존에 따른 낙하시간 .....	16
3. 발파해체 시 충격진동 예측방법 .....	20
3.1 기존의 예측식 .....	20
3.2 충격진동 예측식 제안 .....	21
3.3 실험방법 .....	25
3.3.1 낙하충격실험 개요 .....	25
3.4 발파진동 계측기 .....	26
3.4.1 발파진동 계측기의 구성 .....	26
3.4.2 계측기기 .....	27
4. 계측결과 및 분석 .....	29
4.1 실험방법별 계측결과 .....	29
4.2 계측결과 분석 .....	38

4.2.1 낙하방향, 높이 및 중량별 충격진동 추정식 .....	38
4.2.2 낙하방향 및 높이별 충격진동 추정식 .....	47
4.2.3 위치에너지와 충격량 비교 .....	53
4.2.4 $n$ (감쇠지수)의 변화에 의한 거리별 감쇠율 분석결과 .....	55
5. 충격진동의 중첩모델링 .....	57
5.1 대상 파형의 선정 .....	57
5.2 파형의 중첩 방법 .....	57
5.3 중첩모델링 결과 .....	58
5.4 중첩모델링과 충격량을 사용한 제안식 고찰 .....	62
6. 결 론 .....	63
참 고 문 헌 .....	65

## List of Tables

Table 2.1	Vibration unit .....	6
Table 2.2	Free fall time by height .....	7
Table 4.1	Length direction .....	7
Table 4.2	Width direction .....	7
Table 4.3	Measuring result of type I .....	8
Table 4.4	Measuring result of type II .....	8
Table 4.5	Measuring result of type III .....	12
Table 4.6	Measuring result of type IV .....	12
Table 4.7	Measuring result of type V .....	13
Table 4.8	Measuring result of type VI .....	19
Table 4.9	Measuring result of type VII .....	30
Table 4.10	Measuring result of type VIII .....	32
Table 4.11	Damping rate by distance by changed n value .....	33

## List of Figure

Figure 2.1 Regularity vibration and irregularity vibration .....	3
Figure 2.2 Harmonic oscillation .....	7
Figure 2.3 The size of sine wave vibration .....	7
Figure 2.4 Constructive interference .....	11
Figure 2.5 Destructive interference .....	11
Figure 2.6 Body wave and Rayleigh wave .....	12
Figure 2.7 Vertical displacement component of P wave, S wave and Rayleigh wave in a short duration period .....	13
Figure 2.8 Measuring direction of ground vibration .....	15
Figure 3.1 The position of experimental instrument and measuring instrument ·	25
Figure 3.2 Typical drawing of blast monitoring .....	27
Figure 4.1 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by Type I .....	39
Figure 4.2 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by Type II .....	40
Figure 4.3 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by Type III .....	41
Figure 4.4 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by Type IV .....	42
Figure 4.5 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by Type V .....	43
Figure 4.6 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by Type VI .....	44
Figure 4.7 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by Type VII .....	45
Figure 4.8 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by Type VIII .....	46



Figure 4.9 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by TypeIX ..... 48

Figure 4.10 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by TypeX ..... 49

Figure 4.11 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by TypeXI ..... 50

Figure 4.12 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by TypeXII ..... 51

Figure 4.13 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by TypeXIII ..... 52

Figure 5.1 T1 waveform ..... 59

Figure 5.2 Superposition modeling waveform of T1 ..... 59

Figure 5.3 T2 waveform ..... 60

Figure 5.4 Superposition modeling waveform of T2 ..... 60

Figure 5.5 T3 waveform ..... 61

Figure 5.6 Superposition modeling waveform of T3 ..... 61

# Abstract

A Study on prediction method of Shock Vibration

By Cho, kyu yong

Adv. Prof. : Kang, Choo Won

Dept. of Resource Engineering

Graduate School, Chosun University

Generally, in case that we predict the vibration by blasting, we compute it on the basis of the charge weight per delay but in case of shocking vibration breaking out by blasting demolitions, we apply the weight and falling height of the structure.

Vibration level is determined by blasting site, geometrical forms of nearly structures and both geologic features and dynamic factors of the rock mass, such conditions are similar conditions in blasting vibration.

All such conditions affect shocking vibration and preceding features and among them ;weight and height of the structure the distance of a security building(a surveying station) are the most important factors to effect.

Because blasting demolition is mostly in use for the removal of the high building in the downtown area it causes serious problems to damage safety stuff by the vibration from the falling shock.

To make up for such problems, the study about the vibration-control measure and shocking vibration by falling weight has been going on.

This study suggests new equation that use impact power for the parameter for the method of shocking vibration prediction by falling weight, and it tries to prove by falling test.

Also it suggest a method of the shocking vibration prediction to adopt vibration superposition theory according to the delay time that shocks on surface by falling weight.

# 1. 서론

화약이 산업계에 도입된 후 유용 광물 자원의 채취, 댐, 고속도로 및 지하철 건설 등 광업, 토목, 건설 분야에서 토목구조물 및 암반구조물 건설을 위한 암반 굴착 등에 널리 이용되고 있다.

최근에는 도심지 재개발사업의 증가, 노후 산업건물의 개축 및 증축을 위한 대규모 건축물의 철거에도 적용되는 등 그 범위가 다양해지고 있다. 그러나 발파에 의해 수반되는 진동, 소음, 비산, 분진과 같은 발파공해로 인하여 빈번한 민원의 대상이 되고 있다.

건축물 해체공법 또한 기존의 기계를 이용한 해체공법에서 점차 화약발파를 이용한 발파해체(또는 폭발해체, explosive demolition)공법으로 변화되고 있는 추세이다. 기계식 해체공법은 고층빌딩 또는 대형 콘크리트 구조물의 해체에는 효율적으로 적용할 수 없을 뿐만 아니라 점차 철거공정의 규모가 크고, 해체작업의 장기화에 따른 소음, 진동, 분진 등의 영향은 심각한 환경공해 및 사회문제를 야기시키는 결과를 가져왔다. 이에 반해 발파해체공법으로 불리는 화약발파를 이용한 건물의 해체방법은 기존의 방법으로 해체가 어려운 구조물에서의 적용성이 우수하며 단기간에 해체작업을 마칠 수 있어 공해문제를 감소시키고 경제성도 향상시킬 수 있는 이점을 갖고 있다.<sup>1)</sup>

그러나 발파해체공법으로 철거 시 화약력으로 인한 비석, 소음 및 낙하중량의 충격으로 인해 발생하는 진동의 영향으로 주변 보안물건에 영향을 줄 수 있다. 특히 구조물 해체 시 발생하는 진동은 폭약이 장전공 내에서 폭발할 때 발생하는 발파진동과 구조물 붕괴 시 부재가 지면과 충돌하여 발생하는 충격진동으로 구분할 수 있다. 일반적으로 발파에 의한 진동을 예측할 경우 지발당 장약량을 기준으로 산출하고 건물해체 시 발생하는 충격에 의한 예측에는 건물의 중량과 낙하높이에 따라 적용한다. 또한 진동수준은 발파부지와 인근 구조물의 기하학적 형태, 대상 암반의 지질학적 특징 및 역학적 성질 등에 의해 결정되는데 이러한 조건은 발파진동과 비슷한 조건이다.

이 요인들 모두가 충격진동의 크기와 전파특성에 영향을 미치게 되며, 이중에서

도 건물의 중량, 낙하높이와 보안물건(측정간의 거리)과의 거리가 가장 중요한 요인으로 작용한다. 건물의 발파해체공법은 주로 도심지의 고층건물의 철거에 적용되고 있기 때문에 구조물에 낙하충격에 의한 진동으로 인해 보안물건에 심각한 손상을 끼칠 수 있는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위한 방법으로 진동 감쇄와 낙하중량에 의한 충격진동에 관한 연구가 진행되고 있다.<sup>2)3)4)</sup>

이러한 흐름에 맞춰 본 연구에서도 낙하중량에 의한 충격진동을 예측하는 방법에 대한 새로운 방법을 제시하고자 한다. 기존의 발파진동추정식(예측식)에서 사용하는 환산거리 변수에서 장약량에 대해서 낙하충격진동을 예측할 때는 위치에너지를 사용하는데 본 연구에서는 충격량으로 산정하는 식을 제안하였고 낙하중량이 지면에 충격을 가하는 시차에 따른 진동 중첩의 원리를 자유낙하시차와 낙하충격량의 거리별 감쇠율을 적용하여 충격진동을 예측하는 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 진동 이론

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

#### 2.1.1 진동의 기본용어

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

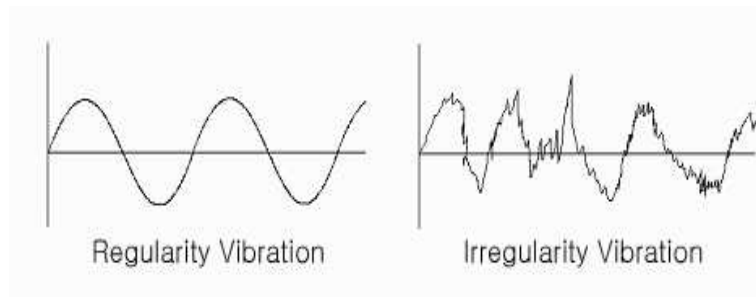


Figure 2.1 Regularity vibration and irregularity vibration

공해진동이라고 불리는 진동에는 정상진동의 것도 있지만 비정상진동인 것이 많

다. 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  $t$ 에 있어서 점 A의 위치  $X$ 가 시간적으로 정현 변화한다고 가정하면 의 관계를 다음 식(2.1)으로 표현된다.

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

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

진동의 운동은 주기적으로 반복되는데 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.

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

전술한 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.

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

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

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

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

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

$\omega X$ 는 이때의 최대치로 속도진폭이라 부른다. 또 가속도  $\alpha$ 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 2.2은 정현진동의 경우 변위, 속도 및 가속도의 파형을 나타낸다. 위상각  $\phi$ 는 0의 경우이다. Figure 2.2에서 알 수 있듯이 속도의 파형은 변위의 파형에 비해  $90^\circ$ 진행해 있다. 이것을 위상이  $90^\circ$ 나아갔다고 한다. 이것은 식(2.1)과 식(2.6)에 명확히 나타나 있다. 마찬가지로 가속도의 위상은 속도의 위상보다  $90^\circ$ 더 진행하고 있고 가속도의 위상은 변위의 위상보다  $180^\circ$ 진행하고 있음을 알 수 있



다.

이들 변위, 속도, 가속도, 상호간의 진폭 및 위상에 관한 관계는 정현진동에 대해서만 성립하므로 비조화진동에서는 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(2.8)과 같다.

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

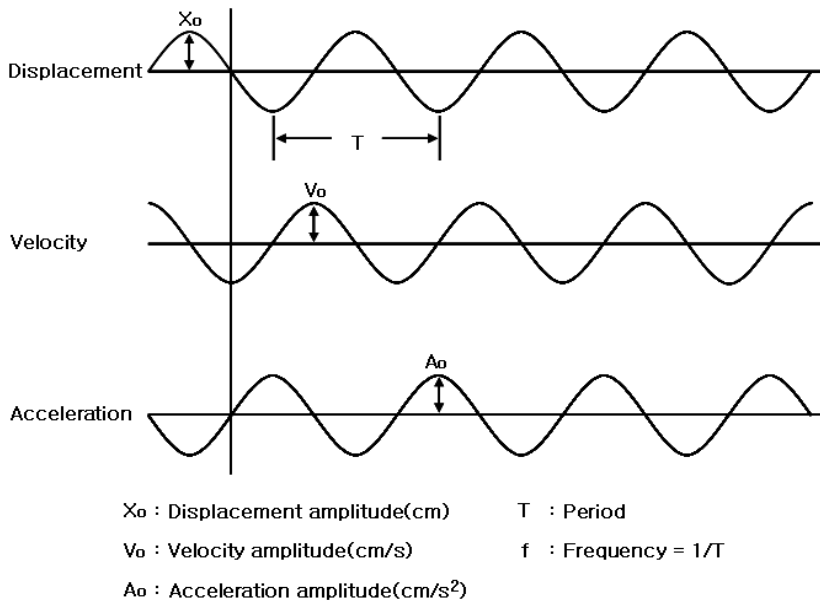


Figure 2.2 Harmonic oscillation

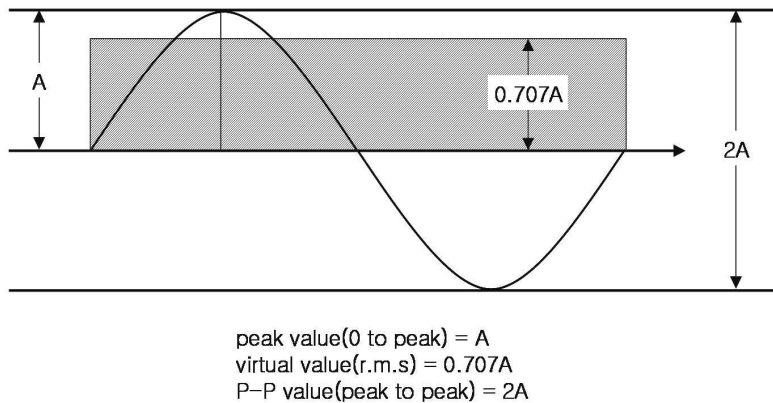


Figure 2.3 The size of sine wave vibration

주기적이 아닌 경우는 식(2.8)의  $T$  대신 적당한 시간의 길이를 취한다. 실효치의 물리적 의미는 예를 들면, 실효치 100V의 교류전압은 직류전압 100V의 효과와 같

게 되는 최대치를 갖는 전압이라는 것과 마찬가지로 변동하는 진동량을 일정하게 연속된 효과로서 나타낸 값(Figure 2.3의 사선부분)이다.

진동의 크기를 나타낼 경우 Peak치(0 to Peak)나 실효치 외에 P-P치(Peak to Peak)가 있으며 Figure 2.3에 정현진동의 경우 그들 관계를 나타낸 것이다. 이들은 변위, 속도, 가속도의 어느 것에 대해서도 같은 관계가 된다.

### 2.1.2 진동량의 표현

진동의 강도 또는 크기는 지금까지 서술한 바와 같이 변위, 속도, 가속도로 나타내고 그 단위로 변위는 cm, 속도는 cm/sec, 가속도는 cm/sec<sup>2</sup>(gal) 등이 사용되고 있으나 취급하는 진동의 크기에 따라 편의상 Table 2.1에 나타내는 각종 단위들도 사용된다.

Table 2.1 Vibration unit.

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

정현진동의 경우 식(2.1), (2.6), (2.7)에서 알 수 있는 바와 같이 변위, 속도, 가

속도 각각의 진폭과 진동수와의 사이에는 식(2.9), (2.10)과 같은 관계가 있다.

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

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

따라서 변위, 속도, 가속도의 각 진폭을 상호 환산할 수 있다.

### 2.1.3 파동의 중첩과 간섭

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

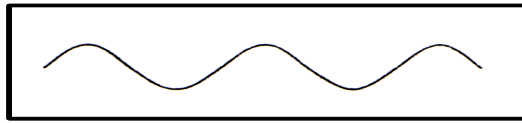
둘 또는 그 이상의 진행 파동이 매질을 통과하는 경우, 그 결과 생기는 파동은 각 지점에서 각 파동의 변위를 서로 합함으로써 얻어 지는 데 이것을 중첩의 원리라고 한다.

그러나 중첩의 원리는 각 파동의 변위의 진폭이 작을 경우에만 중첩의 원리가 타당하다. 즉, 아주 큰 변위가 발생하는 발파공 주위에서는 이 중첩의 원리가 성립되지 않는다고 할 수 있다. 중첩의 원리의 중요성은 두 진행 파동은 파괴되거나 변화 되지 않고 서로 통과 할 수 있다는 것이다. 예를 들어 돌 두개를 연못에 던질 때, 퍼져나가는 원형 파동은 서로를 파괴하지 않는다. 사실 잔물결들도 서로 통과한다. 마찬가지로 두 음원에서 나온 음파들이 공기를 통과할 때, 그들은 서로를 통과한다. 주어진 위치에서 듣는 소리는 두 음파에 의한 교란의 결과이다.

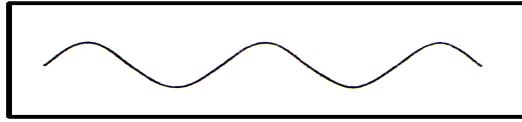
Figure 2.4(a)와 Figure 2.4(b)는 같은 진폭과 진동수를 갖는 두 파동을 보여준다. 어느 순간 이들 두 음파가 공간의 같은 영역을 통과하려 한다면, 그 순간의 결과로서 생기는 파동은 Figure 2.4(c)와 같은 형태를 갖게 될 것이다. 예를 들어 이들 파동의 진폭이 1m인 수면파라고 가정해보자. 마루가 마루를 만나고 골이 골을 만나도록 중첩하는 순간, 그 결과 생기는 파동은 2m의 진폭을 갖는다. 이와

같은 경우의 파동은 위상이 같다고 하고 보강 간섭(constructive interference)을 일으킨다라고 한다.

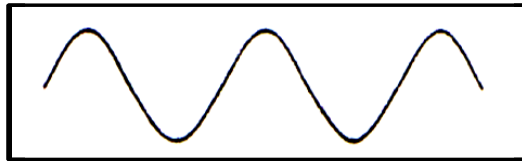
반면, Figure 2.5(a)와 Figure 2.5(b)는 두 개의 유사한 파동을 보여주지만 한 파동의 마루가 다른 파동의 골과 일치한다. 즉, 한 파동은 다른 파동과 역으로 관련되어 있으며, 그 결과 생기는 파동은 Figure 2.5(c)와 같이 완전히 상쇄된 상태를 보인다. 이들이 함께 진행하는 수면파라고 하면, 두 파동 중의 한 파동은 물방울을 위로 당기려 하며, 같은 순간 다른 파동은 아래로 당기려고 한다. 이러한 상황에서 두 파동은  $180^\circ$  위상이 어긋났다고 하며 상쇄 간섭(destructive interference)을 일으킨다라고 한다.



**(a)**

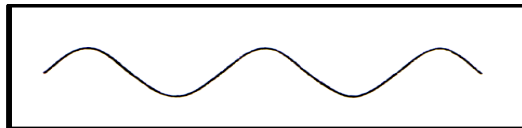


**(b)**

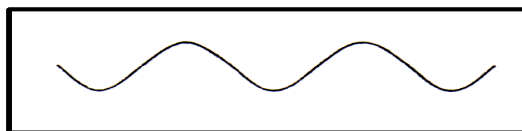


**(c)**

Figure 2.4 Constructive interference.



**(a)**



**(b)**



**(c)**

Figure 2.5 Destructive interference.

## 2.2 파동의 전파 이론

짧은 지속시간을 갖는 충격파가 탄성 공간의 표면 어느 지점에서 발생하면 입체파는 Figure 2.6과 같이 반원형의 파면을 그리면서 전파된다. 충격지점으로부터 일정한 거리에 떨어진 지점에서는 전달된 파동에 의해 수직 변위가 지표에서 발생한다. 이때 종파가 가장 빠른 전달속도를 가지므로 가장 먼저 도달하고, 다음이 횡파, Rayleigh파의 순서로 도달하게 되며, 이것을 그림으로 표현하면 Figure 2.7과 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 존재하고 각각의 성질은 다음과 같다.

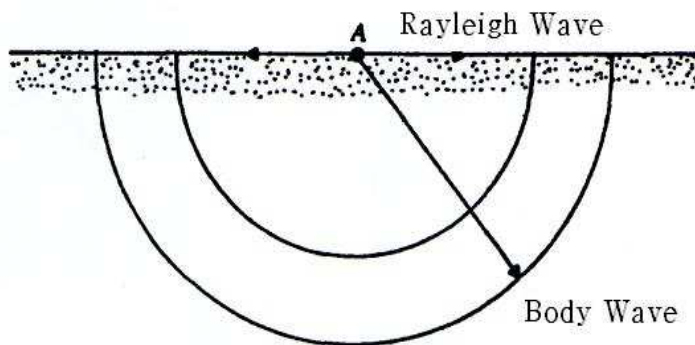


Figure 2.6 Body wave and Rayleigh wave.

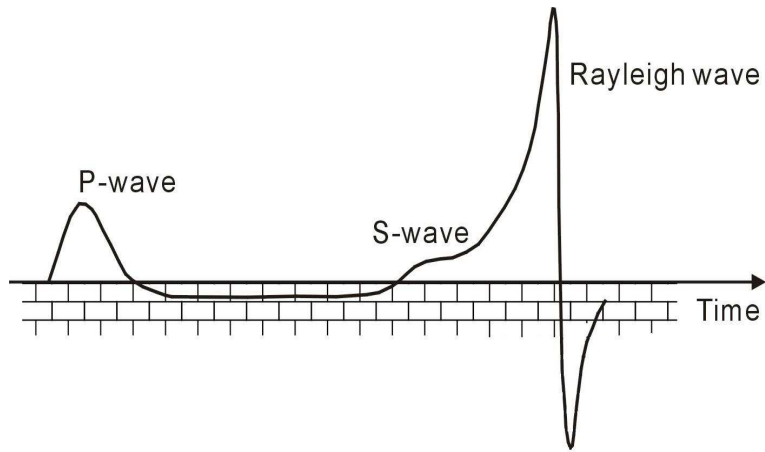


Figure 2.7 Vertical displacement component of P wave, S wave and Rayleigh wave in a short duration period.

## 2.3 충격진동의 발생과 전파

### 2.3.1 충격진동의 발생

폭약을 사용한 발파해체공법 시 발생하는 지반진동은 발파의 화약력에 의한 진동과 부재물의 낙하중량이 지반과의 충격에 의한 진동으로 나눌 수 있다. 발파해체는 암반굴착 시와는 달리 화약력의 진동보다는 낙하중량의 충격력으로 더 높은 진동값을 수반한다.

일반적인 발파에서 진동을 예측할 때는 지발당 장약량을 기준으로 하고 있으나 구조물은 블록별 중량과 낙하높이를 기준으로 한다. 이러한 진동수준은 전파경로의 물성치 및 형상 등의 지반조건에 따라 큰 영향을 받는다. 일반적으로 토사는 암반보다 진동값을 증폭시키는 성질이 있으며, 표면파는 체적파에 비해 감쇠경향이 적다. 표면파는 자연지진과 같은 성질의 저주파 진동을 발생시켜 표면상에 있는 구조물(건축물)에 큰 손상을 줄 수 있다. 동일한 폭약량과 거리에도 불구하고 암반중에서의 진동속도와 지표토사면에서의 진동속도가 큰 차이를 보이는 것은 지



반조건이 서로 다르기 때문이며 심할 경우 10배 이상 차이가 나는 경우도 있다. 그리고 건조한 암반에 비하여 물로 포화된 암반은 2.0~2.5 배, 수중에서는 약 5 배, 점토층은 3~4배로 진동 값이 커지는 경향이 있는 것으로 알려져 있다.<sup>4)</sup>

### 2.3.2 충격진동의 전파

암반 중으로 전달되는 탄성파는 입체파(물체파:body wave)인 종파(압축파, 1차 파, P파)와 횡파(전단파, 2차파, S파) 그리고 표면파(surface wave)로 나뉜다. 이러한 탄성파가 암반 중을 전파하면서 지반진동을 일으키게 되는데 한 점에서 지면의 운동은 진폭과 주기를 갖는 진동으로 나타난다. 이와 같은 지반진동은 변위(displacement), 속도(particle velocity), 가속도(acceleration)의 3종류로 표시되고 있다.<sup>1)</sup>

지반진동의 측정은 그 방향에 따라 Figure 2.8과 같이 수직성분(vertical), 진행성분(longitudinal 혹은 radial) 그리고 이 두 파의 방향과 직각을 이루는 접선방향성분(transverse)의 세 방향으로 이루어진다.<sup>5)6)7)8)9)10)11)</sup>

진동의 측정 시 주로 종파는 진행방향성분, 횡파는 접선방향성분, 표면파는 수직방향성분으로 측정된다.

이 세 가지 요소의 상대적 크기는 암반, 지형 및 충격원 등에 의하여 생성된 탄성파들의 상호 간섭에 따라 변한다.

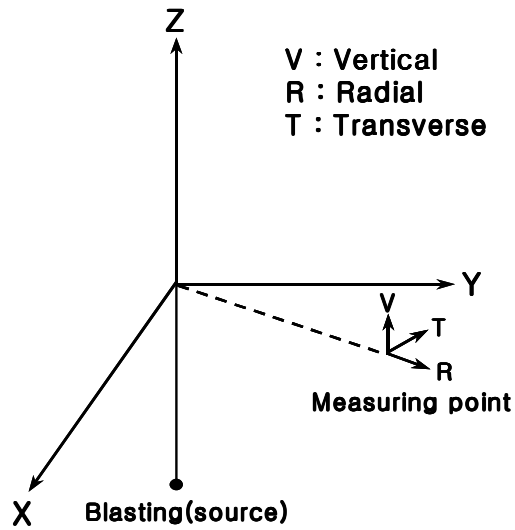


Figure 2.8 Measuring direction of ground vibration

한편 발파에 의한 지반진동을 단순조화진동(simple harmonic motion)으로 보면 변위(D), 변위속도(V), 가속도(A)의 표시법 사이에는 식(2.11)과 식(2.12)와 같은 관계가 성립한다.

$$V = 2\pi f D \quad (2.11)$$

$$A = 2\pi f V \quad (2.12)$$

여기서,  $D$  = 변위(최대진폭)

$V$  = 최대속도(peak particle velocity : 변위속도)

$A$  = 가속도

$f$  = 최대 진폭에서의 진동주파수

## 2.4 자유 낙하 운동에서 역학적에너지 보존에 따른 낙하시간<sup>12)</sup>

물체가 중력장 내에서 자유 낙하하면, 중력장이 물체에 힘을 가하여 물체에 양 (+)의 일을 해주고 결과적으로 물체의 운동에너지가 증가한다. 예를 들면 손에 들고 있는 물체를 가만히 놓아 떨어뜨릴 때와 같이 정지한 물체가 일정한 크기의 중력을 받으면 지면을 향해 등가속도 직선운동을 하는데 이러한 것을 자유 낙하 (free fall)라고 한다. 공기의 저항을 무시하고 연직방향으로 고도가 높지 않는 범위 내에서 중력가속도  $g$ 는 일정하다고 볼 수 있으므로 자유 낙하 운동은 등가속도 직선운동이 된다. 자유 낙하 운동은 처음 위치를 원점으로 하고, 그 위치에서 연직아래 방향을 (+)방향으로 하면  $v_0=0$ ,  $a=g$ 인 등가속도 직선운동이 된다.

	등가속도 직선운동		자유낙하운동
$t$ 초후의 속도	$v = v_0 + at$	→	$v = gt$
$t$ 초후의 거리	$s = v_0t + \frac{1}{2}at^2$	$v_0 = 0$	$s = \frac{1}{2}gt^2$
		$a = g$	
속도와 거리	$2as = v^2 - v_0^2$		$2gs = v^2$

위 식에서 알 수 있듯이 자유 낙하 운동에서 속도를 구하면 지면까지 도달하는 시간을 구할 수 있다.

지면에 닿는 속도를 구하기 위해서는 질량이  $m$ 인 물체가 기준면(지표면)으로부터 높이  $H$ 인 곳에서 자유 낙하하는 경우를 생각해 보면 높이  $h_1$ 에서의 속도가  $v_1$ , 높이  $h_2$ 에서의 속도가  $v_2$  라면 등가속도 운동공식인 식(2.13)에 식(2.14)를 대입하면 식(2.15)가 된다.

$$2as = v^2 - v_0^2 \quad (2.13)$$

$$a = g, \quad v = v_2, \quad v_0 = v_1, \quad s = h_1 - h_2 \quad (2.14)$$

$$2g(h_1 - h_2) = v_2^2 - v_1^2 \quad (2.15)$$

식(2.15)의 양변에 각각  $\frac{1}{2}m$  을 곱하면 식(2-16)이 된다.

$$mg(h_1 - h_2) = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \quad (2.16)$$

이것은 위치에너지 변화량과 운동에너지 변화량이 같다는 것을 나타낸다. 위 식을 정리하면 다음 식(2.17)과 같다.

$$\frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2 = \text{일정} \quad (2.17)$$

따라서 역학적에너지는 운동의 임의의 점에서 일정하게 보존됨을 알 수 있다. 물체가 높이  $H$ 에서  $h_1$ 까지 자유 낙하할 때 낙하한 거리는  $H - h_1$  이므로 속도  $v_1$ 은 식(2.13)에 식(2.18)을 대입하면 식(2.19)가 된다.

$$a = g, \quad s = (H - h_1), \quad v = v_1, \quad v_0 = 0 \quad (2.18)$$

$$v_1 = \sqrt{2g(H - h_1)} \quad (2.19)$$

이것을 높이  $h_1$ 에서의 역학적 에너지에 대입하면 다음 식(2-20)과 같다.

$$\frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 = \frac{1}{2}m(\sqrt{2g(H - h_1)})^2 + mgh_1 = mgH \quad (2.20)$$

즉, 높이  $h_1$ 에서의 역학적 에너지는 처음의 역학적 에너지와 같다. 따라서 역학적 에너지는 높이에 관계없이 항상 같음을 알 수 있다.

$$\frac{1}{2}mv^2 + mgh = \text{일정} \quad (2.21)$$

중력장 내 물체의 운동에 관한 문제는 대부분 등가속도 직선 운동 공식을 이용하여 풀거나 마찰, 저항이 무시될 때에는 역학적 에너지 보존의 법칙을 이용하면 쉽게 풀 수 있다.

$$\frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2 = mgH = \frac{1}{2}mV^2 (= \text{일정}) \quad (2.22)$$

식(2-22)는 마찰이 무시될 때 중력장 내의 모든 운동에 적용할 수 있다.

자유낙하 거리( $h$ ), 속도( $v$ ) 및 높이( $h$ ) 만큼 자유 낙하 하였을 때의 속도 ( $v$ ) 는 역학적 에너지 보존 관계 식(2.23)으로부터 식(2.24)와 같이 유도된다.

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh \quad (2.23)$$

$$v = \sqrt{2gh} \quad (2.24)$$

식(2.24)는 지면에 닿는 속도를 구할 수 있고 이로 인해 높이별 낙하시간을 구할 수 있다.

역학적에너지 보존의 법칙에서 알 수 있듯이 지면에 닿는 속도는 마찰이 없다면 높이에 따라서 일정한 속도로 닿는 것을 알 수 있다. 그러므로 같은 건물에서 발생할 수 있는 층간 붕괴시차는 동일시차를 사용할 때 자유낙하시간과 비슷한 차이를 나타낼 수 있을 것이다. 아래의 Table 2.2는 높이에 따른 자유낙하시간이다.

Table 2.2 Free fall time by height

Height	free fall velocity(m/sec)	free fall delay time(sec)	superposition delay time by height(sec)
1	4.427	0.452	0.187
2	6.261	0.639	0.144
3	7.668	0.782	0.121
4	8.854	0.904	0.107
5	9.899	1.010	0.096
6	10.844	1.107	0.089
7	11.713	1.195	0.083
8	12.522	1.278	0.078
9	13.282	1.355	0.073
10	14.000	1.429	0.070
11	14.683	1.498	0.067
12	15.336	1.565	0.064
13	15.962	1.629	0.061
14	16.565	1.690	0.059
15	17.146	1.750	0.057
16	17.709	1.807	0.056
17	18.254	1.863	0.054
18	18.783	1.917	0.053
19	19.298	1.969	0.051
20	19.799	2.020	0.050
21	20.288	2.070	0.049
22	20.765	2.119	0.048
23	21.232	2.167	0.047
24	21.689	2.213	0.046
25	22.136	2.259	0.045
26	22.574	2.304	0.044
27	23.004	2.347	0.043
28	23.426	2.390	0.042
29	23.841	2.433	0.042
30	24.249	2.474	0.041

### 3. 충격진동 예측방법

#### 3.1 기존의 예측식<sup>2)3)4)13)</sup>

발파해체 시 충격진동을 예측하는 방법은 전문회사별 그리고 국가별로 다른 경험식을 사용하고 있다. 그 중에서도 Robert Folchi가 제안한 14층 건물이 수직으로 붕괴될 때 건물의 중심으로부터 거리 D만큼 떨어진 지점에서 예상되는 지반진동을 식(3.1)과 같이 표현하였다.

$$V_{\max} = 167.3D^{-1.41} \quad \text{식(3.1)}$$

여기서,  $V_{\max}$ : 예상 지반진동(cm/sec)

$D$  : 충격질량 중심으로부터 측정지점까지의 거리(m)

그러나 식(3-1)에서 볼 수 있듯이 상기의 식은 거리만을 변수로 하고 있으며 충격량의 규모에 따른 변수가 포함되어 있지 않기 때문에 상기 식이 적용된 특정 지역 외의 일반적 적용이나 실제 여러 발파패턴에 대한 효과를 예측함에 있어서 제한을 갖고 있다.

또한 국내에서는 충격에 의한 지반진동의 전파특성을 고찰하기 위하여 추를 이용한 충격실험을 실시하여 나온 결과를 분석하여 낙하충격에 의한 지반진동의 속도는 발파에 의한 예측식의 환산거리 변수에서 장약량 대신 에너지 양을 사용하여 유도할 수 있음을 보여주었다. 낙하충격에 의한 지반진동 전파는 추의 위치에너지  $E(J)$ , 낙하지점에서의 거리  $D(m)$ 에서의 최대진동속도를  $PPV$ 라 할 때 식(3.2)로 표현하였다.

$$PPV = K \left( \frac{D}{\sqrt{E}} \right)^n \quad (3.2)$$

여기서,  $V$  : 최대 진동속도( $mm/sec$ )

$D$  : 충격지점으로부터의 거리( $m$ )

$E$  : 낙하물체의 초기 위치 에너지 ( $J$ )

$K, n$  : 입지상수

따라서 낙하충격에 의한 최대입자 진동속도는 발파진동의 속도전파식에서 표현되는 지발당 최대장약량의 변수대신에 부재의 위치에너지로 변환하면 예측이 가능한 것으로 나타나고 있으며 상기의 식에서 에너지  $E$ 는 다음과 같이 추의 위치에너지로 계산할 수 있다.<sup>2)3)</sup>

$$E = mgh \quad (3.3)$$

여기서,  $m$  : 추(부재)의 질량( $kg$ )

$g$  : 중력가속도( $9.8m/sec^2$ )

$h$  : 추(부재)의 높이( $m$ )

## 3.2 충격진동 예측식 제안

기존의 예측식(3.2)처럼 환산거리변수에서 위치에너지를 장약량 대신 사용하면 높이가 2배 증가한 경우와 하중을 2배 증가한 경우의 위치에너지는 같게 된다. 하지만 지면에 발생시키는 충격량의 차이가 발생한다. 하중을 2배 증가할 때에는 충격량도 하중만큼 2배 증가하지만 높이가 2배 증가할때는  $\sqrt{2}$ 만큼 증가한다. 그러므로 환산거리 변수를 사용하는데 있어 장약량 대신 사용하는 것은 위치에너지가 아닌 지면에 달는 충격량을 사용하여야 할 것으로 판단된다. 환산거리변수에서 장약량 대신 충격량을 사용한 다음 식(3.4)를 본 연구에서는 제안하고 사용하였다.



$$PPV = K \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^n \quad (3.4)$$

여기서,  $V$  : 최대 진동속도( $mm/sec$ )

$D$  : 충격지점으로부터의 거리( $m$ )

$I$  : 낙하물체가 지면과 충돌시 발생하는 초기충격량

$K, n$  : 입지상수

본 연구에서 사용한 충격량은 다음과 같다.<sup>12)</sup>

어떤 형태의 충돌에 대해서도 충돌 전의 총 운동량은 충돌 후의 전체 운동량과 같다. 어떤 형태의 충돌에서도 총 운동량은 보존된다고 말할 수 있다. 그러나, 물체들이 변형될 때 운동 에너지의 일부가 열에너지와 내부 탄성위치 에너지로 변환되기 때문에, 충돌에서 총 운동 에너지는 일반적으로 보존되지 않는다.

비탄성 충돌이란 운동량은 보존되지만, 운동에너지는 보존되지 않는 충돌이라고 정의한다. 단단한 표면을 가진 고무공의 충돌은 표면이 접촉하는 동안 모양이 변형되면서 운동 에너지가 손실되므로 비탄성 충돌이다. 두 물체가 충돌하여 함께 달라붙을 때, 이 충돌을 완전 비탄성 충돌(perfectly inelastic collision)이라고 한다. 예를 들면, 두 찰흙 덩어리들이 충돌한다면, 충돌 후에 함께 달라붙어서 어떤 공통 속도로 움직인다. 만일 운석이 지구에 정면 충돌하면 운석은 지구에 파묻히게 되고, 이 충돌은 완전 비탄성 충돌로 간주된다. 완전 비탄성 충돌의 경우 항상 처음 운동 에너지가 전부 손실 되는 것은 아니다.

탄성 충돌은 운동량뿐만 아니라 운동 에너지 둘 다 보존되는 것으로 정의한다. 당구공의 충돌과 상온에서의 공기 분자들과 용기의 벽과의 충돌은 매우 탄성적이다. 당구공 사이에서의 충돌과 같은 거시적인 충돌은 약간의 영구적인 변형과 운동 에너지의 손실이 발생되기 때문에 근사적으로 탄성 충돌이다. 하지만, 원자나 원자의 구성입자들 사이에는 완전 탄성 충돌이 발생한다. 완전 탄성 충돌이나 완전 비탄성 충돌은 제한적인 충돌이다. 즉, 대부분의 실제적은 충돌은 이 두 범주 사이에 속한다.

충돌의 유형을 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 탄성 충돌은 운동량과 운동 에너지가 모두 보존되는 충돌이다.
- 비탄성 충돌은 운동량은 보존되지만, 운동 에너지는 보존되지 않는 충돌이다.
- 완전 비탄성 충돌은 충돌 후에 두 물체가 함께 들어붙어 나중 속도가 같아지고, 계의 운동량은 보존된다.

완전 비탄성 충돌은 어느 직선을 따라  $v_{1i}$  와  $v_{2i}$  로 움직이는 질량이  $m_1$  과  $m_2$  인 두 물체에 대해서 생각해 보자. 물체들이 정면충돌한다고 가정하면, 이들은 충돌 후에 같은 직선상에서 운동을 한다. 만약 두 물체가 충돌 후에 함께 붙어서 같은 속도  $v_f$  로 움직인다면 오직 운동량만이 보존되며 따라서 충돌 전과 후의 총 운동량은 같다고 말할 수 있다. 식은 다음과 같다.

$$I = m_1 v_{1f} + m_2 v_{2f} = (m_1 + m_2) v_f \quad (3.5)$$

$v_{1i}$ ,  $v_{2i}$  및  $v_f$  는 벡터  $V_{1i}$ ,  $V_{2i}$  및  $V_f$  의  $x$  성분을 나타낸다.

일직선상에서 발생하는 위 식(3.5)를 자유낙하에 적용하면 자유낙하를 통해 지반에 충격을 가한후 충격 후 에너지는 지반을 통한 진동으로 나타난다. 이 경우  $v_{1i}$  은 지면에 도달할 때의 속도,  $v_{2i}$  는 지반에 충격을 가한후 소멸된 속도라고 하고  $m_1$  은 충격 전 무게,  $m_2$  는 충격 후 무게라고 한다면 충격 후 지반진동으로 발생하므로 충격 후 속도는 0으로 볼수있다.

충돌 전의 운동량인 초기충격량은 다음 식(3.6)과 같다.

$$I = mv \quad (3.6)$$

여기서,  $I$  : 낙하물체가 지면과 충돌시 발생하는 초기충격량( $kg \cdot m/sec$ )

$m$  : 부재의 질량 ( $kg$ )

$v$  : 자유낙하속도( $m/sec$ )

충돌 후 운동량은 지반진동으로 변화되면서 속도는 소멸된다고 생각할 수 있다.

그리고 자유낙하로 지반에 닿는 속도를 산정한다면 자유낙하에 의한 충격에너지를 구할수 있다. 식은 다음과 같다.

$$v = \sqrt{2gh} \quad (3.7)$$

여기서,  $v$  : 자유낙하속도 ( $m/sec$ )

$g$  : 중력가속도 ( $9.8m/sec^2$ )

$h$  : 부재의 높이 ( $m$ )

위 식(3.7)을 이용한다면 높이별 속도를 구할수 있다. 또한 식(3.7)을 식(3.6)에 대입하면 다음과 같다.

$$I = m\sqrt{2gh} \quad (3.8)$$

여기서,  $I$  : 낙하물체가 지면과 충돌시 발생하는 초기충격량

$m$  : 부재의 질량 ( $kg$ )

$g$  : 중력가속도 ( $9.8m/sec^2$ )

$h$  : 부재의 높이 ( $m$ )

위 식(3.8)에서 알 수 있듯이 충격량은 중량에 대해서는 중량의 배수만큼, 높이에 대해서는  $\sqrt{h}$ 만큼 증가함을 알수 있다.

본 연구에서는 충격량을 환산거리에서의 장약량 변수 대신 사용하였다. 하지만 위 식(3.4)는 자유낙하에 의한 충격진동을 예측한 것이므로 실제 건물발파해체에 적용한다면 파괴된 부재의 형태자체가 단순한 형상이 아닐 경우의 충격흡수 영향 문제에 대한 고려가 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 위 식(3.4)를 이용하여 충격진동 추정식을 구하였고 거리별 감쇠지수를 산출하는데 사용하였다. 그리고 한 번의 낙추실험으로 얻은 데이터 파형을 중첩시켜 중첩모델링을 통한 예측을 하였다.

### 3.3 실험방법

#### 3.3.1 낙하충격실험 개요

지반에 충격진동을 주기 위해서 본 실험에서는 조선대학교 주차장 바닥위에 실험장치를 고정시키고 중량 1.70kg ~ 5.6kg의 콘크리트 블록을 자유낙하 하도록 설계하였다. Figure 3.1은 실험장치를 나타낸 것이다. 이러한 고정틀을 만들어서 낙하도중 발생할 수 있는 회전운동을 최소화 시킴으로써 비교적 정확하게 낙하할 수 있도록 하였다.

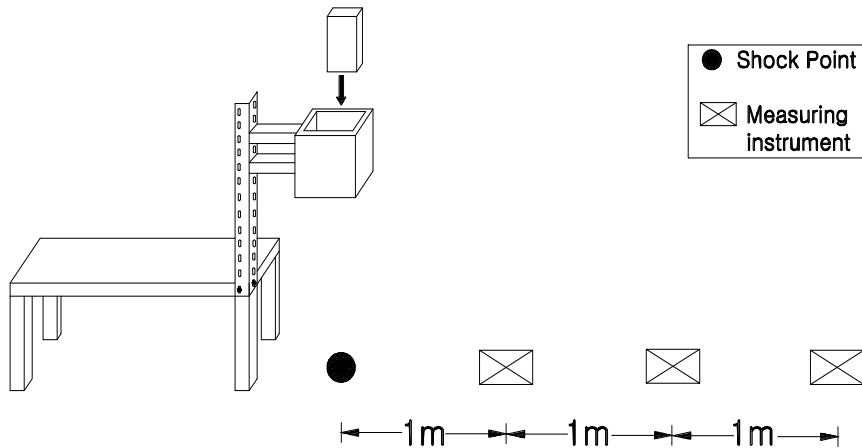


Figure 3.1 The position of experimental instrument and measuring instrument

콘크리트 블록의 낙하높이를 1m, 2m의 높이에서 실시하였고 콘크리트 블록의 중량은 1개, 2개 및 3개를 연결함으로써 중량 증가에 따른 실험을 실시하였다. 또한 지반과 접촉면적이 다른 가로방향과 세로방향으로 낙하시킴으로써 접촉면적에 따른 진동수준의 차이를 비교실험 하였고 바닥에 블록을 1단과 2단을 쌓아 블록위에 낙하 충격을 줌으로써 붕괴 부산물에 의한 진동 감소 수준을 측정하였다. 이러

한 방법으로 총 60회의 낙하실험을 실시하였으며 진동측정은 낙하지점으로부터 1m, 2m, 3m 지점에 진동측정기를 설치하여 진동을 측정하였다.

### 3.4 발파진동 계측기

#### 3.4.1 발파진동 계측기의 구성<sup>14)</sup>

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 3.2와 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)

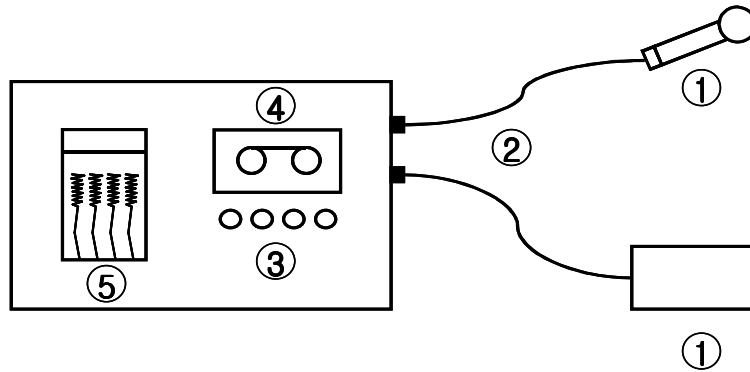


Figure 3.2 Typical drawing of blast monitoring

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.

### 3.4.2 계측기기

본 연구에 사용된 발파진동 계측기기로는 InstanTel INC.의 BlastMate Series인 BlastMateIII 3대를 사용하였다.

측정기는 낙하지점을 기준으로 하여 일직선상으로 1~3m의 거리에 1m간격을 두고 설치하였으며, 계측기의 센서는 모두 주차장 바닥에 고정하였다.

BlastMateIII는 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.<sup>14)</sup>

## 4. 계측결과 및 분석

### 4.1 실험방법별 계측결과

일반적으로 발파에 의한 진동 예측식에서 변수로 사용하는 환산거리는 거리를 사용화약량에 의하여 환산한 것이다. 장약량은 폭원에서 에너지양에 비례하며 따라서 충격진동의 경우에도 장약량에 해당하는 충격량 변수의 사용을 고려하여 볼 수 있다. 충격 시 지반에 전달되는 에너지는 블록이 지면에 닿을때의 속도와 중량에 의해 변환되므로 계측자료의 처리는 장약량 변수를 충격량 변수로 대체하였다.

본 연구에서 획득한 데이터 수는 총 126개이다. 낙하방향별 개수는 Table4.1 ~Table4.2과 같다. 또한 획득한 데이터의 회귀분석 결과를 Type I ~TypeXIII으로 표현하였다.

Table 4.1 Length direction

Falling height (m)	The number of Blocks	The number of Daters	Result Type	
1	1	27	Type I	TypeIX
	2	15	Type II	
	3	6	TypeIII	
2	1	15	TypeIV	Type X
	2	12	Type V	
sum	-	75		TypeXI

Table 4.2 Width direction

Falling height (m)	The number of Blocks	The number of Daters	Result Type	
1	1	6	TypeVI	
2	1	18	TypeVII	TypeXII
	2	27	TypeVIII	
sum	-	51		TypeXIII



계측결과는 아래와 같다.(Table 4.3~4.10)

Table 4.3 Measuring result of type I

Sample Number (SN)	Weight (Kg)	Height (m)	Impulse (Kg·m/s)	Distance (m)	Peak Particle Velocity (mm/s)			Measuring instrument
					Transverse	Vertical	Longitudinal	
SN 1	1.84	1	8.146	1	0.175	0.810	0.254	Blastmate III
				2	0.175	0.159	0.317	
				3	0.222	0.302	0.064	
SN 2	1.82		8.057	1	0.175	0.603	0.206	Blastmate III
				2	0.206	0.190	0.349	
				3	0.206	0.286	0.064	
SN 3	1.84		8.146	1	0.175	0.603	0.190	Blastmate III
				2	0.206	0.159	0.365	
				3	0.206	0.270	0.064	
SN 4	1.86	8.235	1	0.190	0.968	0.270	Blastmate III	
			2	0.206	0.206	0.381		
			3	0.254	0.333	0.095		
SN 5	1.82	8.057	1	0.175	0.762	0.238	Blastmate III	
			2	0.206	0.175	0.365		
			3	0.175	0.286	0.064		
SN 6	1.88	8.323	1	0.190	0.952	0.333	Blastmate III	
			2	0.222	0.333	0.095		
			3	0.111	0.222	0.159		
SN 7	1.88	8.323	1	0.190	1.10	0.333	Blastmate III	
			2	0.238	0.317	0.111		
			3	0.111	0.222	0.175		
SN 8	1.78	7.880	1	0.222	0.778	0.206	Blastmate III	
			2	0.206	0.333	0.095		
			3	0.111	0.190	0.159		
SN 9	1.78	7.880	1	0.206	0.762	0.254	Blastmate III	
			2	0.190	0.238	0.127		
			3	0.095	0.175	0.175		

Table 4.4 Measuring result of type II

Sample Number (SN)	Weight (Kg)	Height (m)	Impulse (Kgm/s)	Distance (m)	Peak Particle Velocity (mm/s)			Measuring instrument
					Transverse	Vertical	Longitudinal	
SN 10	3.68	1	16.292	1	0.286	1.540	0.540	Blastmate III
				2	0.349	0.571	0.190	
				3	0.206	0.381	0.286	
<b>SN 11 (T1)</b>	<b>3.66</b>		16.204	<b>1</b>	<b>0.317</b>	<b>1.620</b>	<b>0.587</b>	<b>Blastmate III</b>
				<b>2</b>	<b>0.381</b>	<b>0.619</b>	<b>0.206</b>	
				<b>3</b>	<b>0.190</b>	<b>0.365</b>	<b>0.317</b>	
SN 12	3.67		16.248	1	0.286	1.600	0.460	Blastmate III
				2	0.381	0.492	0.190	
				3	0.190	0.381	0.302	
SN 13	3.62		16.026	1	0.270	1.460	0.492	Blastmate III
				2	0.317	0.492	0.175	
				3	0.175	0.333	0.317	
SN 14	3.62	16.026	1	0.286	1.460	0.476	Blastmate III	
			2	0.349	0.413	0.206		
			3	0.190	0.397	0.333		

Table 4.5 Measuring result of type III

Sample Number (SN)	Weight (Kg)	Height (m)	Impulse (Kgm/s)	Distance (m)	Peak Particle Velocity (mm/s)			Measuring instrument	
					Transverse	Vertical	Longitudinal		
<b>SN 15 (T2)</b>	<b>5.50</b>	<b>1</b>	<b>24.350</b>	<b>1</b>	<b>0.381</b>	<b>2.030</b>	<b>0.492</b>	<b>Blastmate III</b>	
				<b>2</b>	<b>0.397</b>	<b>0.619</b>	<b>0.206</b>		
				<b>3</b>	<b>0.190</b>	<b>0.476</b>	<b>0.349</b>		
SN 16	5.54		<b>1</b>	24.527	1	0.476	2.100	0.683	Blastmate III
					2	0.476	0.857	0.270	
					3	0.222	0.603	0.397	

Table 4.6 Measuring result of type IV

Sample Number (SN)	Weight (Kg)	Height (m)	Impulse (Kgm/s)	Distance (m)	Peak Particle Velocity (mm/s)			Measuring instrument	
					Transverse	Vertical	Longitudinal		
SN 17	1.72	2	10.769	1	0.143	0.714	0.175	Blastmate III	
				2	0.159	0.222	0.111		
				3	0.079	0.206	0.175		
SN 18	1.78		11.145	11.145	1	0.190	0.984	0.270	Blastmate III
					2	0.222	0.333	0.127	
					3	0.095	0.238	0.190	
SN 19	1.72		10.769	10.769	1	0.127	0.794	0.175	Blastmate III
					2	0.190	0.254	0.111	
					3	0.095	0.190	0.143	
SN 20	1.80		11.270	11.270	1	0.159	0.762	0.206	Blastmate III
					2	0.206	0.270	0.111	
					3	0.095	0.190	0.190	
SN 21	1.82	11.395	11.395	1	0.222	1.020	0.286	Blastmate III	
				2	0.254	0.317	0.111		
				3	0.111	0.238	0.190		

Table 4.7 Measuring result of type V

Sample Number (SN)	Weight (Kg)	Height (m)	Impulse (Kgm/s)	Distance (m)	Peak Particle Velocity (mm/s)			Measuring instrument		
					Transverse	Vertical	Longitudinal			
SN 22 (T3)	3.60	2	22.540	1	0.397	2.190	0.635	Elastmate III		
				2	0.429	0.778	0.270			
				3	0.190	0.476	0.381			
SN 23	3.62		2	22.665	1	0.397	2.050	0.524	Elastmate III	
					2	0.413	0.683	0.238		
					3	0.159	0.429	0.381		
SN 24	3.62			2	22.665	1	0.492	1.980	0.524	Elastmate III
						2	0.397	0.698	0.254	
						3	0.206	0.508	0.365	
SN 25	3.60	2			22.540	1	0.444	2.160	0.714	Elastmate III
						2	0.413	0.746	0.254	
						3	0.206	0.492	0.429	

Table 4.8 Measuring result of type VI

Sample Number (SN)	Weight (Kg)	Height (m)	Impulse (Kgm/s)	Distance (m)	Peak Particle Velocity (mm/s)			Measuring instrument		
					Transverse	Vertical	Longitudinal			
SN 26	1.82	1	8.057	1	0.095	0.429	0.127	Blastmate III		
				2	0.143	0.143	0.079			
				3	-	-	-			
SN 27	1.82		1	8.057	1	0.079	0.365	0.111	Blastmate III	
					2	0.127	0.143	0.064		
					3	-	-	-		
SN 28	1.78			1	7.880	1	0.064	0.286	0.079	Blastmate III
						2	0.127	0.111	0.064	
						3	-	-	-	

Table 4.9 Measuring result of typeVII

Sample Number (SN)	Weight (Kg)	Height (m)	Impulse (Kgm/s)	Distance (m)	Peak Particle Velocity (mm/s)			Measuring instrument
					Transverse	Vertical	Longitudinal	
SN 29	1.82	2	11.395	1	0.079	0.508	0.111	Blastmate III
				2	0.159	0.190	0.095	
				3	0.048	0.143	0.095	
SN 30	1.76		11.019	1	0.159	0.460	0.127	Blastmate III
				2	0.127	0.175	0.079	
				3	0.064	0.159	0.143	
SN 31	1.82		11.395	1	0.159	0.492	0.127	Blastmate III
				2	0.127	0.159	0.079	
				3	0.079	0.159	0.127	
SN 32	1.84		11.520	1	0.095	0.540	0.127	Blastmate III
				2	0.143	0.175	0.095	
				3	0.064	0.127	0.127	
SN 33	1.74	10.894	1	0.159	0.730	0.206	Blastmate III	
			2	0.190	0.254	0.095		
			3	0.079	0.175	0.159		
SN 34	1.84	11.520	1	0.111	0.667	0.111	Blastmate III	
			2	0.175	0.222	0.095		
			3	0.079	0.206	0.143		

Table 4.10 Measuring result of typeVIII

Sample Number (SN)	Weight (Kg)	Height (m)	Impulse (Kgm/s)	Distance (m)	Peak Particle Velocity (mm/s)			Measuring instrument
					Transverse	Vertical	Longitudinal	
SN 35	3.65	2	22.853	1	0.190	0.889	0.206	Blastmate III
				2	0.222	0.333	0.159	
				3	0.127	0.317	0.238	
SN 36	3.62		22.665	1	0.127	0.524	0.159	Blastmate III
				2	0.190	0.159	0.095	
				3	0.095	0.159	0.159	
SN 37	3.64		22.790	1	0.127	0.714	0.143	Blastmate III
				2	0.206	0.222	0.095	
				3	0.095	0.206	0.127	
SN 38	3.60		22.540	1	0.111	0.524	0.143	Blastmate III
				2	0.127	0.222	0.095	
				3	0.064	0.175	0.095	
SN 39	3.64		22.790	1	0.397	1.460	0.444	Blastmate III
				2	0.333	0.556	0.270	
				3	0.175	0.492	0.349	
SN 40	3.62	22.665	1	0.159	0.476	0.127	Blastmate III	
			2	0.127	0.159	0.111		
			3	0.064	0.175	0.159		
SN 41	3.66	22.915	1	0.206	0.587	0.254	Blastmate III	
			2	0.190	0.460	0.190		
			3	0.111	0.381	0.238		
SN 42	3.68	23.040	1	0.143	0.587	0.127	Blastmate III	
			2	0.143	0.190	0.079		
			3	0.064	0.159	0.127		
SN 43	3.72	23.291	1	0.127	0.571	0.143	Blastmate III	
			2	0.159	0.206	0.111		
			3	0.095	0.175	0.111		



## 4.2 계측결과 분석

본 연구에서 낙하충격진동을 낙하방향, 높이, 중량(개수)별로 실험한 결과로 구분하여 각각의 95% 충격진동 추정식을 다음과 같이 산출하였다.

### 4.2.1 낙하방향, 높이 및 중량별 충격진동 추정식

Table 4.3~ 4.10에 계측된 값을 낙하방향, 높이 및 중량별로 회귀분석에 의해 입지상수  $K$ 와  $n$ 을 구하기 위하여 최대진동속도와 환산거리의 log-log 1차 상관관계를 이용하여 전산처리하여 도출한 95% 충격진동 추정식은 다음과 같다.

$$V = 0.346 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.09} \quad r^2 = 0.873 \quad (4.1)$$

$$V = 0.296 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.32} \quad r^2 = 0.956 \quad (4.2)$$

$$V = 0.234 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.26} \quad r^2 = 0.939 \quad (4.3)$$

$$V = 0.229 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.30} \quad r^2 = 0.926 \quad (4.4)$$

$$V = 0.282 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.37} \quad r^2 = 0.984 \quad (4.5)$$

$$V = 0.114 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.44} \quad r^2 = 0.929 \quad (4.6)$$

$$V = 0.183 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.18} \quad r^2 = 0.871 \quad (4.7)$$

$$V = 0.260 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.01} \quad r^2 = 0.565 \quad (4.8)$$

식 (4.1)~(4.8)은 95%의 신뢰도를 가지는 식으로  $K$ 값은 0.114~0.386로 나타났으며,  $n$ 값은 -1.01~-1.44로 나타났다. 그리고 결정계수는 0.565~0.984로 나타

났다. Figure 4.1~4.8은 환산거리와 진동속도와의 관계를 나타내는 그림이다.

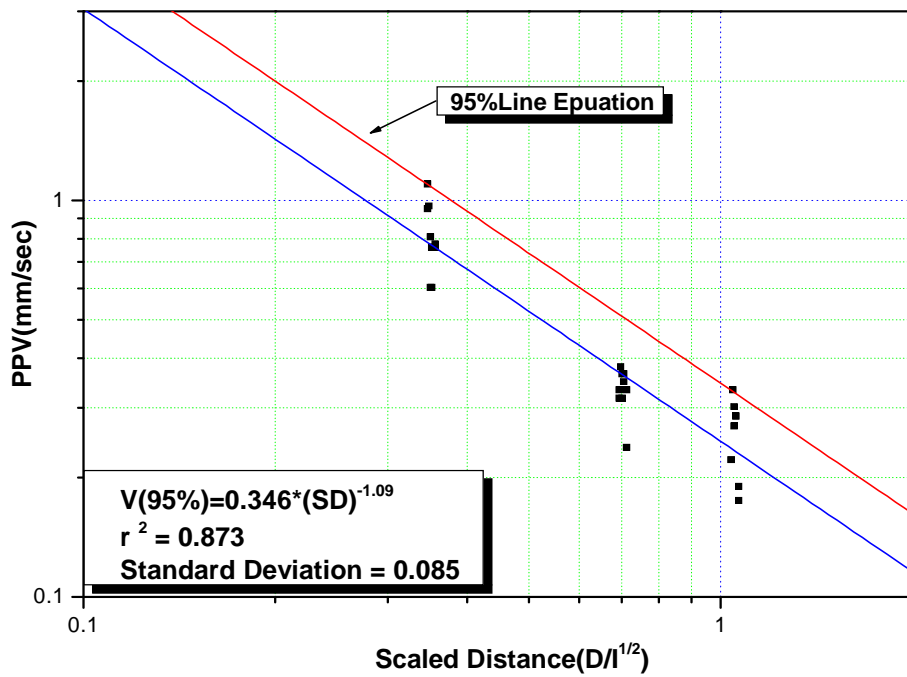


Figure 4.1 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by Type I

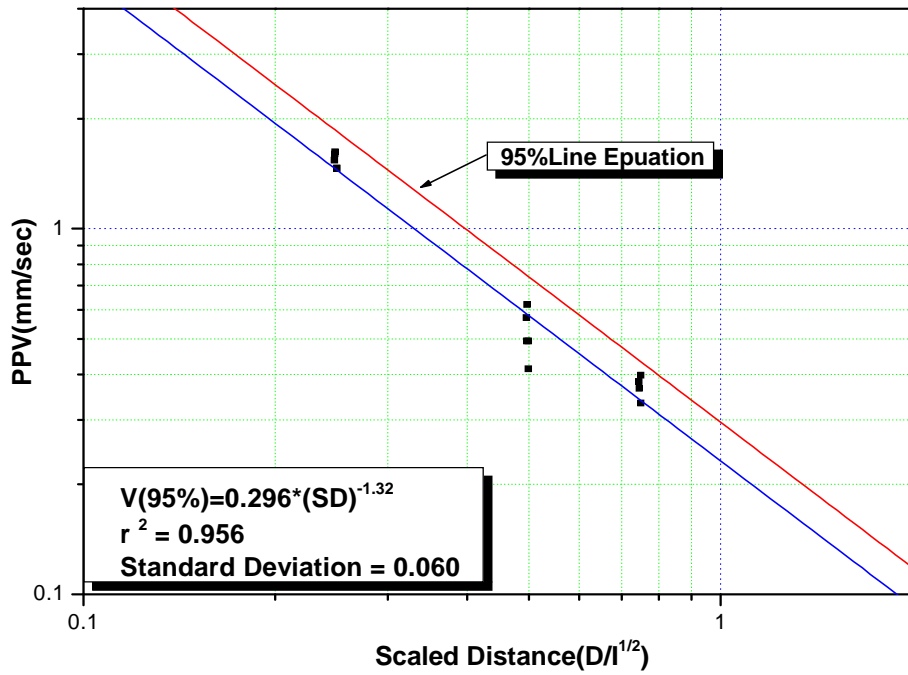


Figure 4.2 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by Type II

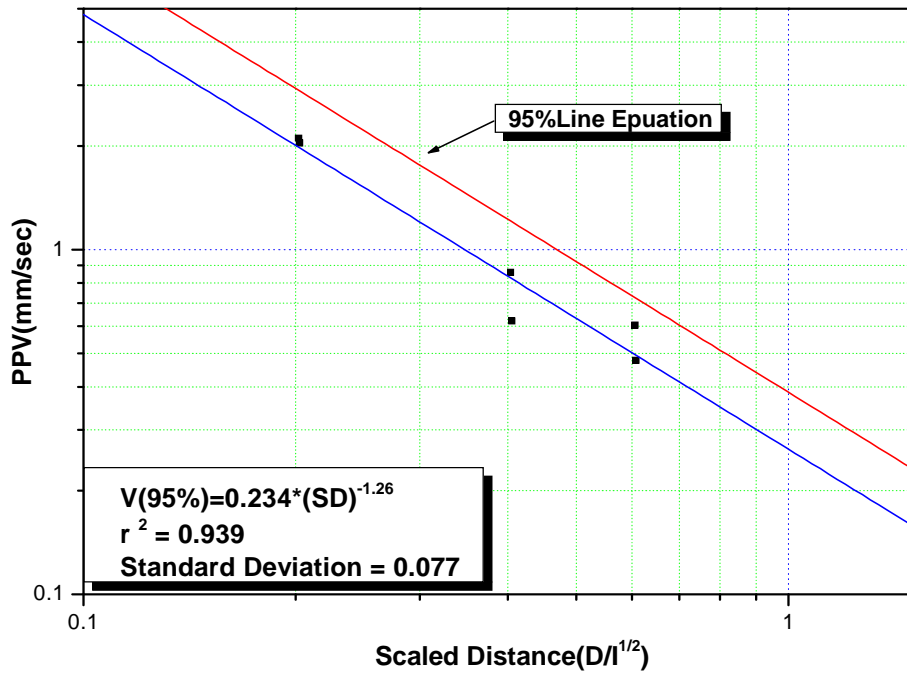


Figure 4.3 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by Typelll

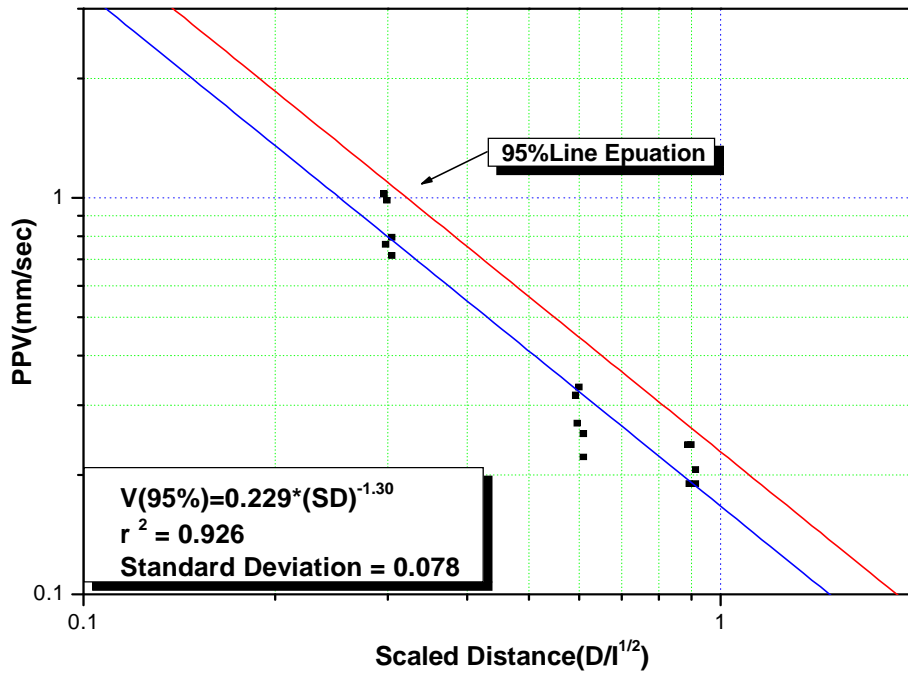


Figure 4.4 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by TypeIV

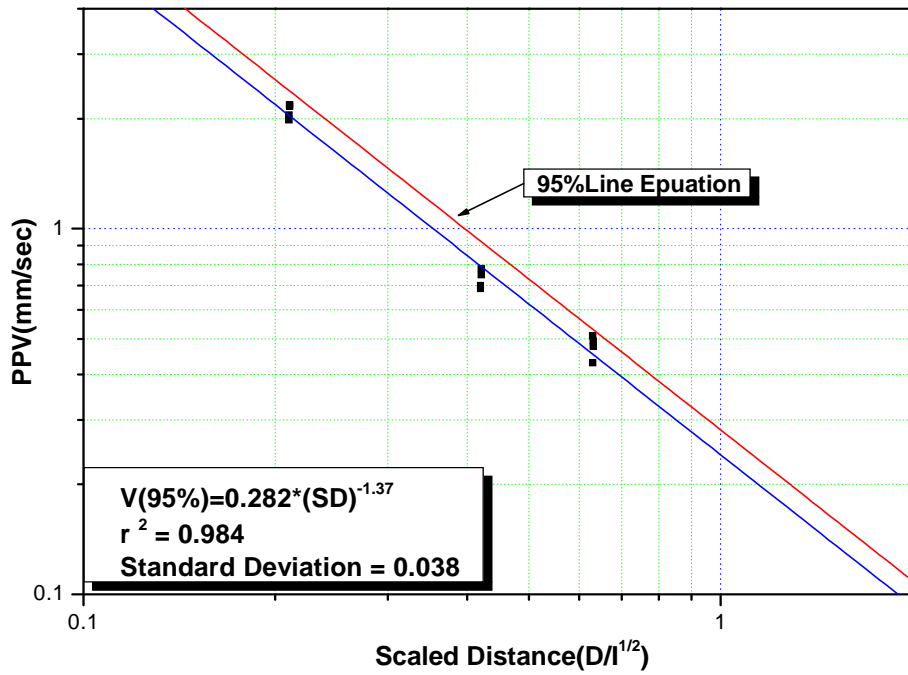


Figure 4.5 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by Type V

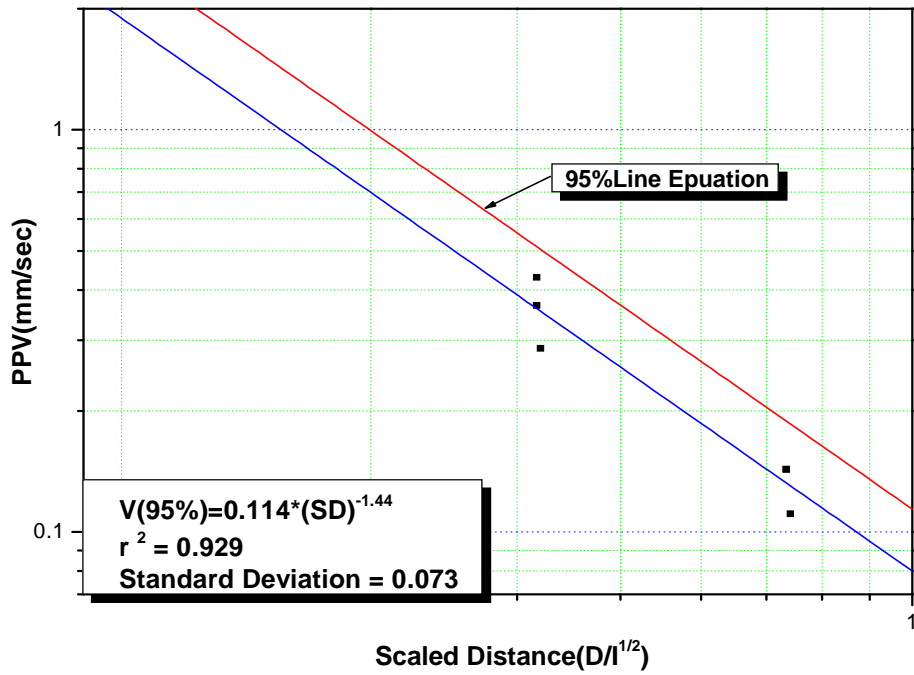


Figure 4.6 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by Type VI

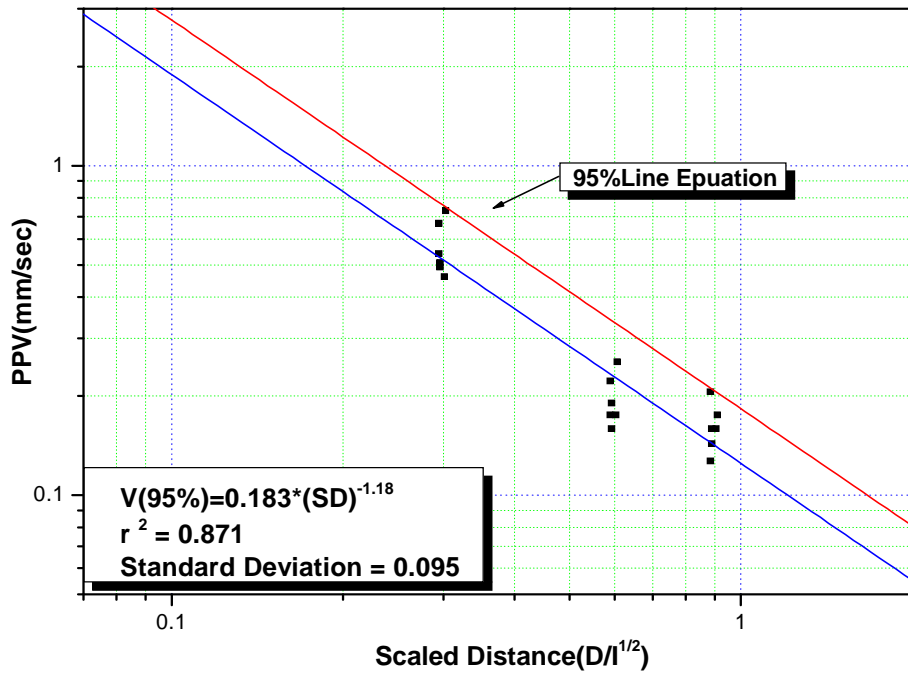


Figure 4.7 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by TypeVII



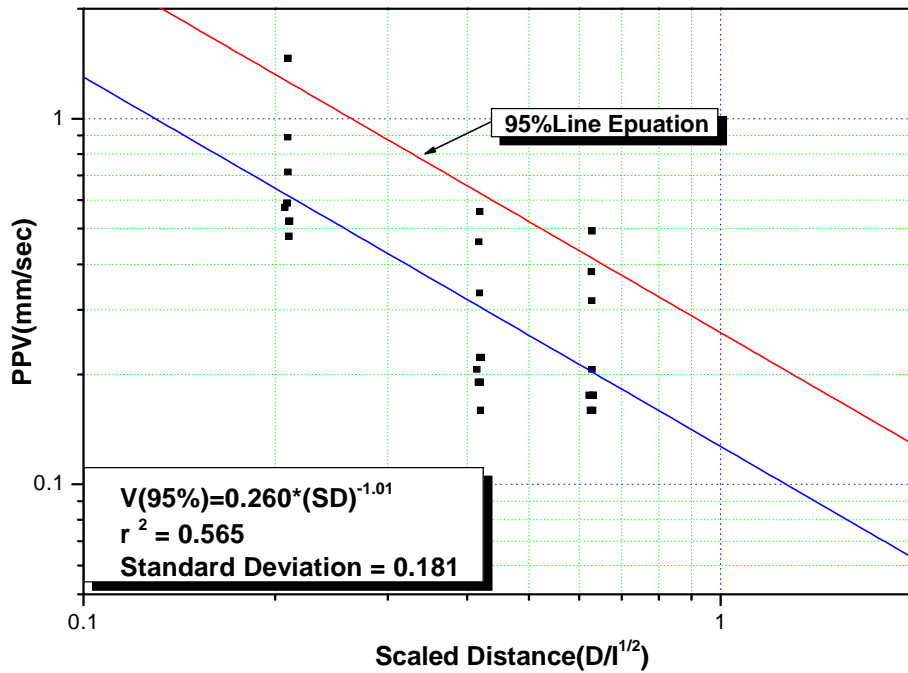


Figure 4.8 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by TypeVIII

## 4.2.2 낙하방향 및 높이별 충격진동 추정식

Table 4.3~ 4.10에 계측된 값을 낙하방향 및 높이별로 회귀분석에 의해서 입지 상수  $K$ 와  $n$ 을 구하기 위하여 최대진동속도와 환산거리의 log-log 1차 상관관계를 이용하여 전산처리하여 도출한 95% 충격진동 추정식은 다음과 같다.

$$V = 0.331 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.24} \quad r^2 = 0.919 \quad (4.9)$$

$$V = 0.267 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.49} \quad r^2 = 0.904 \quad (4.10)$$

$$V = 0.319 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.31} \quad r^2 = 0.896 \quad (4.11)$$

$$V = 0.233 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.04} \quad r^2 = 0.683 \quad (4.12)$$

$$V = 0.217 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.07} \quad r^2 = 0.691 \quad (4.13)$$

식 (4.9)~(4.13)은 95%의 신뢰도를 가지는 식으로  $K$ 값은 0.217~0.331로 나타났으며,  $n$ 값은 -1.04~-1.49로 나타났다. 그리고 결정계수는 0.683~0.919로 나타났다. Figure 4.9~4.13은 환산거리와 진동속도와의 관계를 나타내는 그림이다.

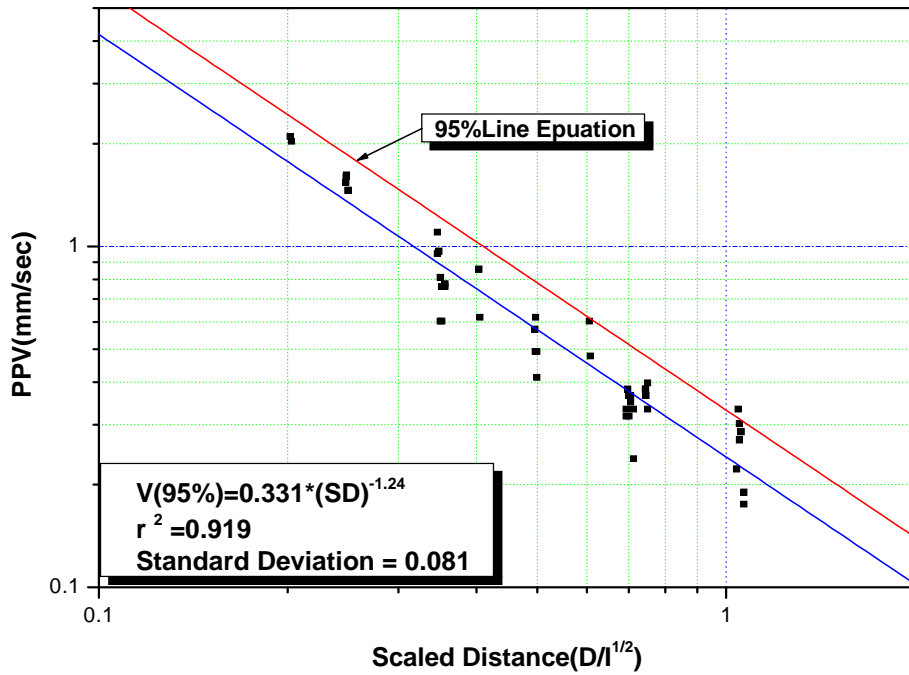


Figure 4.9 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by TypeIX

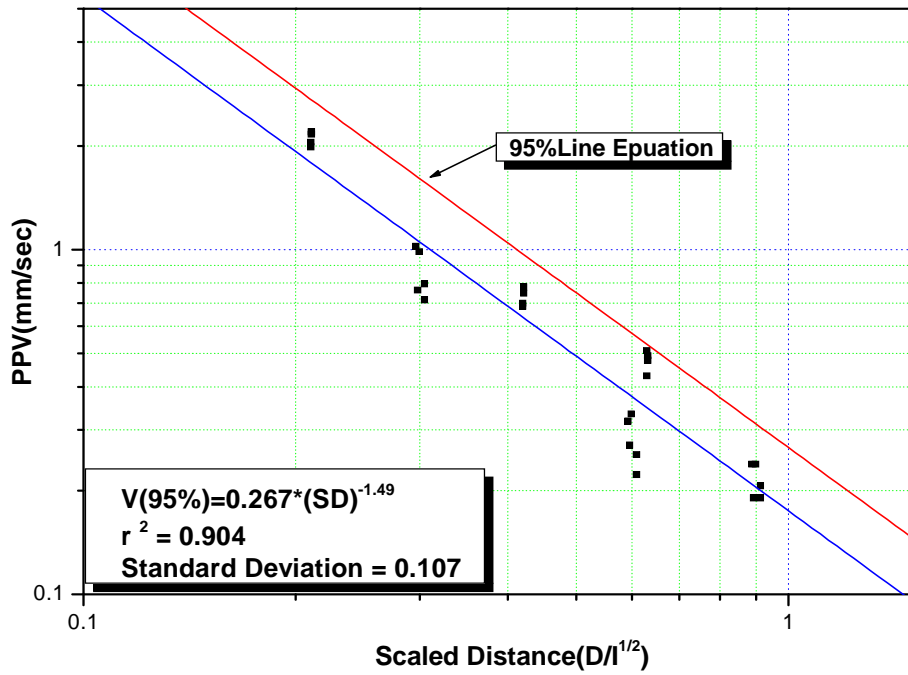


Figure 4.10 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by Type X

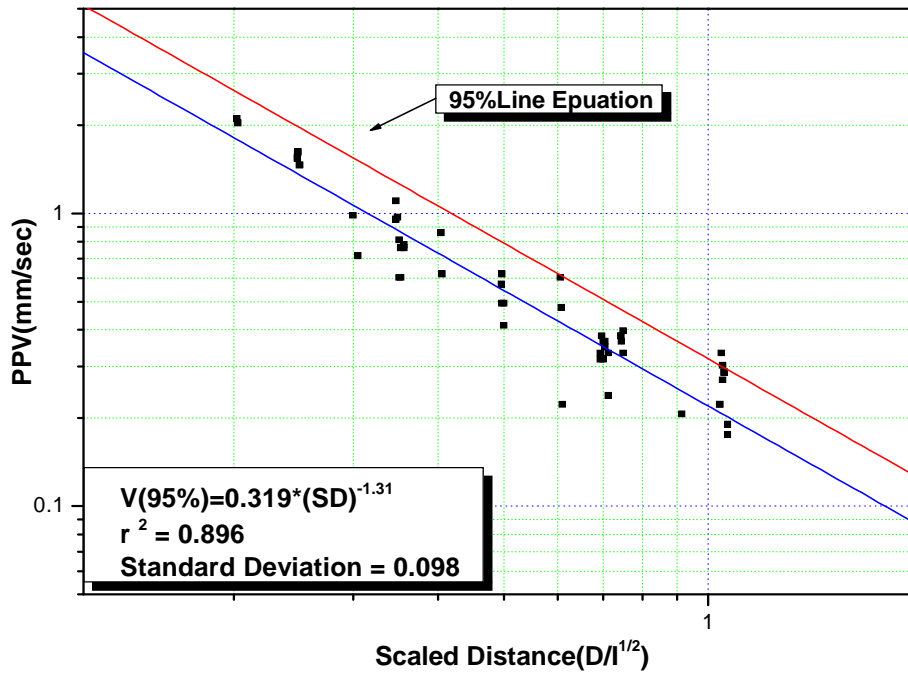


Figure 4.11 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by TypeXI

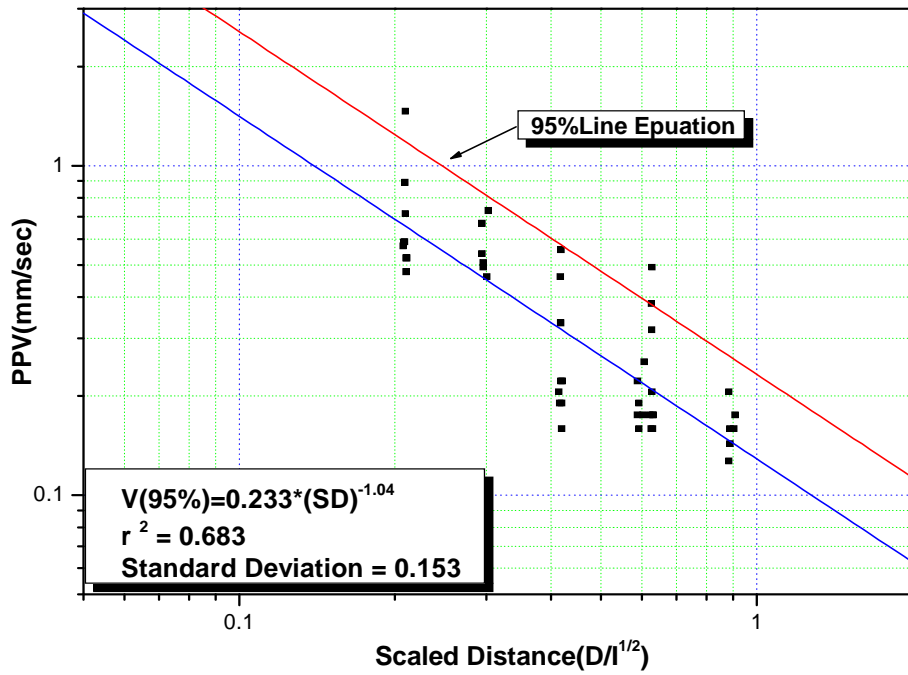


Figure 4.12 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by TypeXII

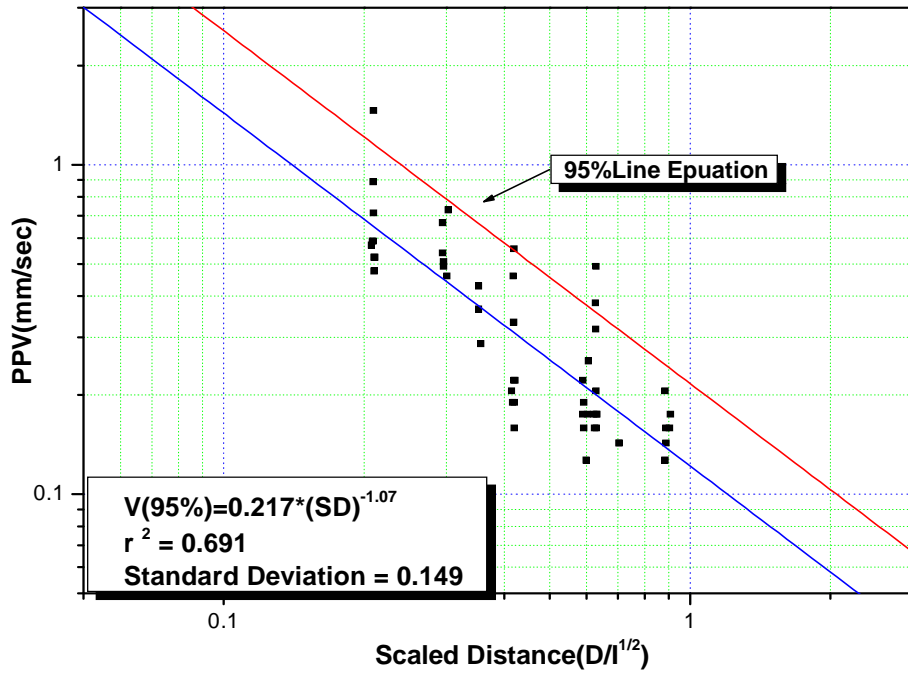


Figure 4.13 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by TypeXIII

### 4.2.3 위치에너지와 충격량 비교

본 회귀분석을 함에 있어 환산거리 변수에 위치에너지를 산정했을때와 충격량을 산정했을 때를 비교해보면 같은 높이에서의 회귀분석에서는  $K$ 값만 변했다. 하지만 높이가 서로 다른 TypeXI에서는  $K$ ,  $n$ ,  $r^2$ (결정계수)에서 차이를 보였다. 위치에너지를 산정했을때의 충격진동 추정식은 아래 식(4.14)와 같다.

$$V = 0.300 \left( \frac{D}{\sqrt{E}} \right)^{-0.96} \quad r^2 = 0.845 \quad (4.14)$$

아래는 충격량을 산정했을때의 충격진동 추정식이다.

$$V = 0.319 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.31} \quad r^2 = 0.896 \quad (4.15)$$

위 두 식(4.14), (4.15)는 동일 측정값을 이용한 회귀분석 결과이다. 두 식을 비교해보면 결정계수에서 차이가 난다. 이것은 앞절에서 언급했듯이 중량과 높이에 따른 적용방법의 차이라고 판단된다.

또한 Table 4.3~4.5는 블록시료가 동일높이(1m)에서 각각 1개, 2개, 3개로 중량을 증가시켜 낙하충격 실험을 한 데이터이다. 본 제안식에서는 중량이 2배, 3배가 되면 충격량도 2배, 3배가 된다. Table 4.3~4.5에서 볼 수 있듯이 블록을 2개, 3개 증가시키면 충격량은 배수만큼 증가함을 알 수 있다. 하지만 진동값은 2개일때 2배가 아닌 예상치의 0.945배, 3개일때는 3배가 아닌 0.84배의 진동값을 나타낸다. 이 진동값의 결과는 회귀분석에서의 충격량증가에 의한 진동 결과값과 비교해보면 일치함을 알 수 있다.

Table 4.3과 4.6, Table 4.4와 4.7은 각각 동일 중량일 때의 높이증가에 따른 진동값이다. 본 제안식에서는 높이가 증가함에 따라 충격량은  $\sqrt{h}$  배 증가한다. 다시 말해 동일중량으로 실험할 경우 낙하높이를 1m에서 2m로 증가시키면 충격량은  $\sqrt{2}$  배 증가한다는 것이다. 이 실험자료 역시 Table 4.3과 4.4를 기준값 1로



하고 Table 4.6과 4.7의 결과값을 분석해보면 높이증가에 따른 결과는 기준값보다 약 1.085배, 1.38배 증가하는 것으로 나타났다. 이 두 개의 결과는 TypeXI의 회귀분석 결과를 기준으로 중량과 높이에 대한 비교를 하였다. 회귀분석 결과와 실제 실험에서 측정한 진동값의 결과가 거의 일치함을 나타냄으로 본 연구에서 제안한 식(3.4)의 충격량을 환산거리 변수로 적용함은 신뢰할 수 있을것으로 판단된다.

#### 4.2.4 $n$ (감쇠지수)의 변화에 의한 거리별 감쇠율 분석결과

본 연구에서는 회귀분석을 통한 95% 충격진동 추정식의  $n$ (감쇠지수)값으로 중첩모델링의 거리별 감쇠율로 사용한다. 식(4.1)~(4.8)의 결과는 각각 낙하높이, 중량 및 낙하방향의 변수가 하나일 때의 결과이다. 이 경우 식(4.8)을 제외하면 결정계수가 높게 나오는 것을 알 수 있다. 식(4.9)~(4.13)까지는 동일 높이의 낙하충격 진동 값에 대한 충격진동 추정식이다. 이 경우에는 결정계수가 약간 낮아졌다. 또한 한번의 충격으로 발생하는 거리별 진동 값에 대한 결정계수는 거의 모든 값이 1에 근사한 값을 나타냈다. 하지만 60회 정도의 실험결과로 어느 지반을 대표한다고 할 수 없으므로 보다 많은 정확한 실험을 통해 지반의 감쇠지수 대표 값을 산정해야 할 것이다. 본 연구에서는 실험결과 중 결정계수가 가장 높은 값인 식(4.2), (4.3), (4.5)의 실험데이터에서 중에서 중첩모델링에 적용할 데이터를 선정하였고 위 세 개의 데이터를 모두 포함한 식(4.11) 대표값으로 하였다. 거리별 감쇠율은 회귀분석을 통한 추정식의  $n$ 값에만 영향을 받으며 초기값에 대해 일정한 비율로 감소한다. 아래 Table 4.11은  $n$ 값 변화에 의한 거리별 감쇠율이다.

Table 4.11 Damping rate by distance by changed n value

n값 거리	-0.1	-0.5	-1.0	-1.24	-1.26	-1.31	-1.32	-1.36	-1.37	-1.5
1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
5	85.1	44.7	20.0	13.6	12.9	12.1	11.9	11.2	11.0	8.9
10	79.4	31.6	10.0	5.8	5.2	4.8	4.8	4.4	4.3	3.2
15	76.3	25.8	6.7	3.5	3.0	2.8	2.8	2.5	2.4	1.7
20	74.1	22.4	5.0	2.4	2.1	1.9	1.9	1.7	1.7	1.1
25	72.5	20.0	4.0	1.8	1.6	1.4	1.4	1.3	1.2	0.8
30	71.2	18.3	3.3	1.5	1.2	1.1	1.1	1.0	0.9	0.6
35	70.1	16.9	2.9	1.2	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.5
40	69.2	15.8	2.5	1.0	0.8	0.8	0.8	0.7	0.6	0.4
45	68.3	14.9	2.2	0.9	0.7	0.7	0.7	0.6	0.5	0.3
50	67.6	14.1	2.0	0.8	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.3
55	67.0	13.5	1.8	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.2
60	66.4	12.9	1.7	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.2
65	65.9	12.4	1.5	0.6	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2
70	65.4	12.0	1.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2
75	64.9	11.5	1.3	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2
80	64.5	11.2	1.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1
85	64.1	10.8	1.2	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1
90	63.8	10.5	1.1	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1
95	63.4	10.3	1.1	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
100	63.1	10.0	1.0	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
105	62.8	9.8	1.0	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
110	62.5	9.5	0.9	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
115	62.2	9.3	0.9	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
120	62.0	9.1	0.8	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
125	61.7	8.9	0.8	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
130	61.5	8.8	0.8	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
135	61.2	8.6	0.7	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
140	61.0	8.5	0.7	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
145	60.8	8.3	0.7	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

## 5. 충격 진동의 중첩모델링

### 5.1 대상 파형의 선정

선정된 파형은 주변의 noise에 의해 교란되지 않은 비교적 양호한 파형을 보이며 동일거리에서 평균치에 근사한 수준으로 보이는 진동데이터를 선정하였다. 잔여진동이 많은 파형은 중첩모델링과정에서 부정확한 결과를 보일 가능성이 많아 선정에서 제외하였다. 신뢰성을 높이기 위해 대표값으로 선정된 진동데이터 내에서 선정하였으며 높이와 중량이 각각 다른 파형을 선택하였다. 선정된 파형은 자료처리의 편의를 위하여 T1, T2, T3의 번호를 부여하였고, 위 세 개의 데이터가 모두 포함된 TypeX를 대표값으로 사용하였다.

### 5.2 파형의 중첩 방법

선정된 파형은 총별 낙하시간차를 이용하여 시차에 따라 중첩시켜 초기파형을 만들었다. 건물의 전체하중을 지발시차별로 나누어 각 지발당 중량을 산출하였으며 이렇게 산출한 지발당 하중을 다시 1ms간격으로 세분화하여 1ms의 하중에 의한 진동데이터를 1지발 시차까지 1ms간격으로 중첩을 실시하였다. 중첩을 통해 만들어진 파형을 낙하실험에 의해 산출한 감쇠지수를 적용하여 거리별 파형으로 변환하였다.

본 연구에서는 낙하충격실험에 대해 다음과 같은 가정 하에서 중첩모델링 시험을 시행하였다.

- ① 동일한 지반에서는 모든 낙하충격실험에서 동일한 진동파형이 발생한다.
- ② 높이는 잔재물의 높이에 따른 충격흡수제 역할을 할 것으로 판단되므로 각층이 바닥에 충격을 가하는 시점에서 다음 층의 높이를 계산한다.
- ③ 주파수( $f$ )는 고려하지 않았다.

### 5.3 중첩모델링 결과

본 연구에서는 중첩모델링으로 결과를 산출하기 위해 한번의 충격으로 발생하는 진동값에 대한 중첩을 하였다. 실제 파형과 비슷한 파형과 진동값을 예측하기 위해 만들기 위해 중량과 높이를 산정해하 한다. 중량과 높이는 발파해체공법으로 철거된 조선대학교 제1공학관을 기준으로 산정하였으며 T1, T2, T3는 건물의 가장자리에서 동일거리까지(13m) 임의의 축점을 선택하여 중첩모델링을 하였다.

중첩모델링 결과는 다음 Figure 5.1~5.6과 같다.

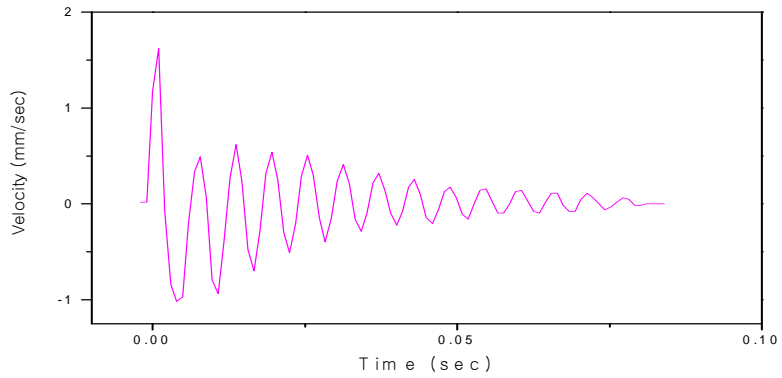


Figure 5.1 T1 waveform

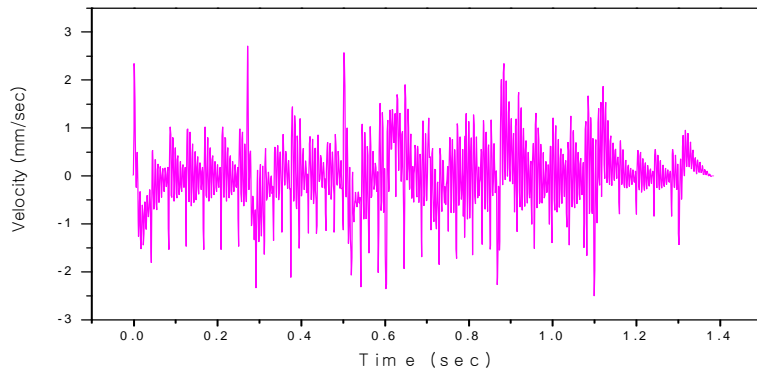


Figure 5.2 Superposition modeling waveform of T1

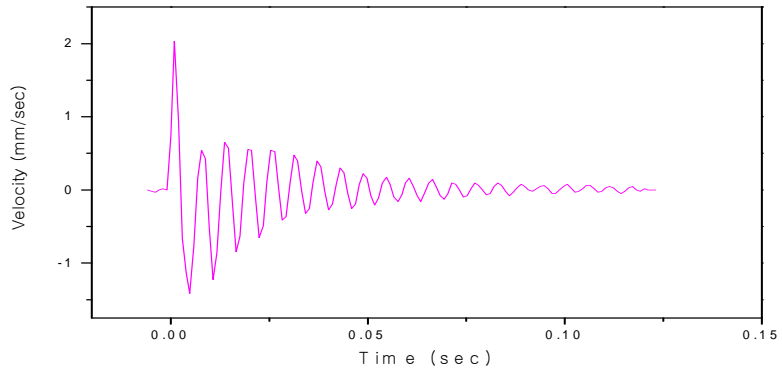


Figure 5.3 T2 waveform

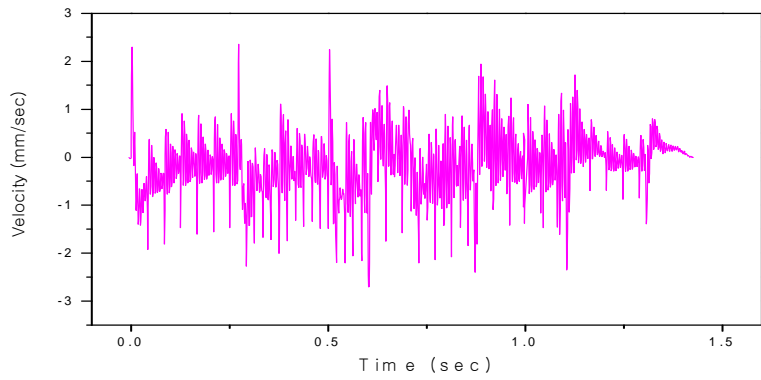


Figure 5.4 Superposition modeling waveform of T2

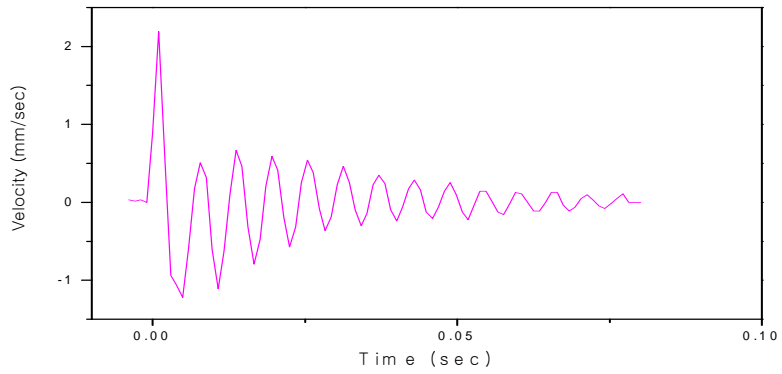


Figure 5.5 T3 waveform

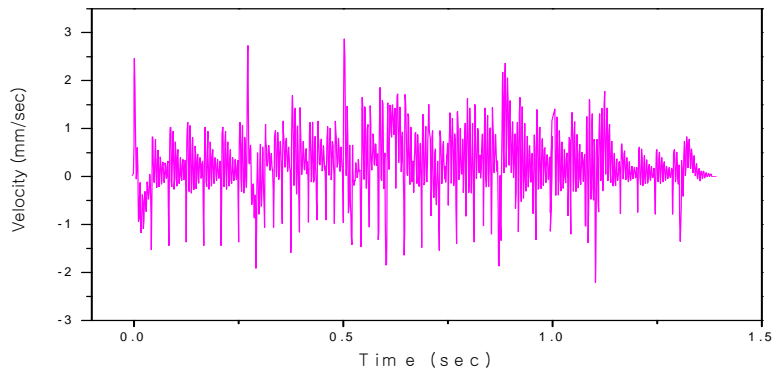


Figure 5.6 Superposition modeling waveform of T2



## 5.4 중첩모델링과 충격량을 사용한 제안식 고찰

본 연구에서 중첩모델링으로 선정된 파형은 높이 1m에서 블록2개를 연결해서 낙하시켜 진동을 측정한 T1, 1m에서 블록 3개를 낙하시킨 T2, 높이 2m에서 블록 2개를 낙하시킨 T3이다. 이 3개의 파형은 T1, T2의 경우 낙하시킨 높이는 같지만 중량이 다르고 T1, T3의 경우는 중량은 같지만 높이가 다르다. 이렇듯 각각 중량과 높이가 다른 2개의 파형을 분석함으로써 제안한 식과 중첩모델링의 타당성을 검증해 보았다.

결과를 다음과 같이 정리해 보았다.

① T1, T2는 중량에서 약 1.5배정도 차이가 있다. 하지만 제안된 식을 이용하여 중량증가에 대해 감쇠정도를 적용하였고, 또한 중첩모델링에 적용하여 비교해 본 결과 최대진동값의 차이가 1%로 거의 같은 값이 산출되었다.

② T1, T3은 높이가 2배 차이가 있다. 이 두 개의 데이터를 높이 증가에 대한 감쇠정도에 대해 적용하였고, 또한 중첩모델링에 적용해 본 결과 최대진동값의 차이가 약 6%정도로 낮게 나타났다. .

③ ①,②의 결과로, 본 연구에서 사용한 제안식과 중첩모델링을 통한 방법은 지반조건에 따른 감쇠지수를 산정하고 낙하충격실험을 한다면 충분히 충격진동을 예측할 수 있을것으로 판단된다.

④ 중첩모델링으로 예측한 최대진동값의 검증방법으로는 지반조건은 다르지만 동일 지발시차와 설계조건을 적용하여 조선대학교 공대 제 1교사에서 측정한 진동값과 비교해 본 결과 최대진동값의 차이는 10~20%정도의 차이가 발생했다.

## 6. 결론

건물해체 시 충격진동에 대한 예측은 많은 경험식을 사용하고 있다. 각기 다른 높이에 있는 슬라브는 중량이 지면에 닿는 부분의 시간은 전체 층이 같은 조건이므로 자유낙하의 높이에 따른 시간차와 비슷한 양상을 보일 것이다. 자유낙하에 의한 시간차를 각 층의 높이에 적용함으로써 각 층의 슬라브 중량이 자유낙하시차에 의해 지면에 충격을 가할 것이다. 그러므로 건물해체 시 발생하는 충격진동을 예측하기 위해서 본 연구에서는 충격량을 환산거리 변수로 사용할 것을 제안하고 낙하충격실험을 통한 진동데이터의 거리별 감쇄율, 높이별 자유낙하시차 및 1ms 간격의 중첩모델링을 이용하여 충격진동을 예측하는 방법을 연구하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 본 연구에서는 무게가 다른 블록을 낙하했을 때 발생하는 낙하충격진동을 1m, 2m, 3m에서 측정하였고, 측정결과로부터  $K$ ,  $n$  값을 구하기 위해 발파진동 예측식의 지발당장약량에 대해 기존의 위치에너지 대신 낙하중량의 충격량을 적용함으로써 거리별 감쇄율을 구할 수 있었고 중량 증가와 높이 증가를 같이 적용할 때는 위치에너지를 산정했을 때 보다 더 높은 결정계수로 나타났고 또한 실험자료에 의한 비교에서도 충격량을 적용했을 때 일치함을 나타냈으므로 환산거리 변수에는 충격량을 적용하여야 할 것으로 판단된다.

$$V = 0.300 \left( \frac{D}{\sqrt{E}} \right)^{-0.96} \quad r^2 = 0.845$$

$$V = 0.319 \left( \frac{D}{\sqrt{I}} \right)^{-1.31} \quad r^2 = 0.896$$

2. 낙하중량에 의해 지면에 충격진동이 발생할 때 충격면적에 의한 감쇠적용여부를 판단하여야 할 것이다. 블록으로 실험을 실시했을 때의 시험 결과를 보면 하중

은 같고 지면에 닿는 면적을 2~4배정도로 했을 때 지반진동은 약 60~80%의 정도의 평균적인 감쇠가 이루어졌다. 이러한 결과는 블록이 지면에 닿을 때 발생하는 충격면적에 의한 감쇠로 생각할 수 있겠다. 면적이 넓을수록 동일한 충격량이 넓은 면에 충격을 가하기 때문에 감소할 수 있을 거라 판단된다. 하지만 회귀분석을 해본결과 상관계수와 결정계수가 낮게 도출되어 대표 값으로 쓰기에는 불충분하였다. 그러므로 향후 다양한 실험을 통해 충격면적에 대한 감쇠적용여부를 판단하여야 할것이다.

3. 낙하중량의 충격량을 구하기 위한 높이는 지면에 쌓이는 부산물과 자유낙하운동에서의 증별 시차를 이용하여 높이를 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 건물 중량을 산정하는데 있어 전체중량을 지발시차와의 비율로 나눠서 시차의 최소단위 1ms에서 받을 수 있는 최대중량을 계산하여 실험데이터인 블록 한 개의 낙하충격진동 데이터와 무게를 비교하여 배수만큼 증폭시키고 1ms간격으로 1지발시차까지 중첩시킴으로써 실제 건물해체발파 시 낙하실험을 통한 거리별 감쇠율을 산정한다면 실제 해체발파 시 비슷한 진동값과 진동파형을 얻을 수 있을것으로 판단된다.

5. 이상의 연구결과로 볼때 충격량을 이용한 추정식에 의해 지반조건에 따른 낙하충격진동의 감쇠지수를 구한값을 대표값으로 하여 동일 지반에서 한번의 낙하충격진동값을 측정하여 해체대상건물에 대한 높이, 중량, 낙하시차에 대하여 중첩모델링을 적용한다면 다른 지반조건에서도 충분히 충격진동을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 1) 강추원, “발파공학 A to Z”, 『구미서관』, pp. 279 ~ 290, 444 ~ 445, 2005
- 2) 코오롱건설주식회사, 한국자원연구소, “건물발파해체를 위한 제어발파 설계기술 개발” 『건설교통부』, pp. 105 ~ 111, 173 ~ 176, 1995
- 3) 한국지질자원연구원, “제어발파기법을 이용한 구조물 발파해체기술 개발”, 『과학기술부』 pp. 222 ~ 223, 2003
- 4) 임대규, 임영기 “발파해체시 낙하충격진동 예측에 관한 연구”, 『대한화약발파학회지』, Vol. 22, pp. 43 ~ 45, 2004
- 5) 김재국, “산업화약과 발파공학”, 『서울대학교 출판부』, pp. 252, 389 ~ 390, 1997
- 6) 허진, “신 화약발파학”, 『기전연구사』, pp. 265 ~ 268
- 7) 임한욱, 강추원, 류창하, “화약 발파”, 『교육부』, pp. 252, 1997
- 8) 임한욱, 김재동, “발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구”, 『한국자원공학회지』, Vol. 29, pp. 146 ~ 157
- 9) Charles H. Dowding, “Blast vibration monitoring and control”, 『PRENTICE-HALL, INC.』, pp. 7 ~ 22, 24 ~ 40, 1984
- 10) U. Langefors & B. Kihlstrom, “The modern technique of rock blasting third edition”, pp. 258 ~ 293, 1978
- 11) Holmberg. R. & Persson. P., “Design of tunnel perimeter blasthole patterns to prevent rock damage”, 『Proc. of IMM Tunnelling '79 Conference』, pp. 3 ~ 6, 1979
- 10) 양형식, 주재성, “노천굴 발파의 진동특성과 입지상수 결정에 관한 연구”, 『한국자원공학회지』, Vol. 27, pp. 316 ~ 323, 1990
- 12) 대한물리학교재편찬위원회 “대학물리학” 『청문각』 pp. 103 ~ 114, 133 ~ 149, 2002
- 13) 고영선, 이기락, 김종우 “낙하충격에 의한 지반진동특성에 관한 연구 『産

業科學研究』』, Vol. 14, , 1996

14) 장호민, “발파진동 파형 분리분석을 통한 다단발파 특성에 관한 연구”, 『조선대학교 석사학위논문』, pp. 16, 45 ~ 48, 2004

15) 김종인, “단일공 파형 중첩 모델링 자 룽에 의한 발파진동의 예측”, 『조선대학교 박사학위논문』, 2006

16) 김건우 “통계학개론”, 『신영사』, 2004

17) 대한주택공사 주택도시연구원, “건축구조•토질기초의 A to Z 『지문당』”, 2006

## 감사의 글

어느덧 2년간의 대학원 생활을 마치려는 시점에 저에게 언제나 힘과 용기를 북돋아 주신 모든 분들께 감사드립니다.

대학원에서 생활하는 동안 항상 사랑으로 보살펴 주시고, 인성을 강조하시며 따뜻하게 이끌어주신 지도교수님 강추원 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 저의 부족한 논문을 심사해주시고 조언해 주신 고진석 교수님, 박천영 교수님, 대학원 생활에 관심과 애정을 갖고 열정적으로 지도해 주신 양해승 교수님, 서동우 교수님, 박영석 교수님, 한오형 교수님에게 감사의 말씀을 전해드리고 싶습니다.

저희 암석역학실험실에 항상 따뜻한 관심과 애정으로 많은 가르침을 주신 원우회 선배님들이신 원연호 선배님, 김영희 선배님, 추영래 선배님, 한남철 선배님, 조영동 선배님, 노영배 선배님, 박정봉 선배님, 문창일 선배님, 김재웅 선배님, 위장복 선배님, 이섭 선배님, 강석곤 선배님, 강성진 선배님, 박기동 선배님, 윤석 선배님, 황남순 선배님, 안기호 선배님, 김연수 선배님, 이창원 선배님, 이창훈 선배님, 이수연 선배님, 오현 선배님, 유기정 선배님, 박윤석 선배님, 김수로 선배님과 저의 논문실험에 많은 도움을 주신 최태홍 선배님과 강일이형에게 감사드립니다.

실험실 생활동안 늘 가족처럼 따뜻한 격려와 가르침을 주셨던 김종인 선배님, 박현식 선배님, 순오 형, 영석이 형, 호민이 형, 윤택이 형, 복현이, 승현이, 우리 실험실을 잘 이끌 지우, 청신, 동조, 태철이, 그리고 이 자리에 없지만 다른 자리에서도 열심히 나의 실험실 동기인 승민이와 대웅이, 마지막으로 함께 졸업하는 훈재에게도 고마움을 전합니다.

같은 실험실은 아니지만 항상 밝고 따뜻하게 해주신 김종균 선배님, 김성구 선배님, 현호 형, 상철이 형, 갑진이, 대우, 장준이, 영인이, 성태, 인희, 경태에게도 고마움을 전합니다.

지금까지 나와 함께하고 앞으로도 함께 할 친구 순열이, 기백이, 필, 깨굴, 찬욱

형, 병구, 희남이, 한반도OB 선후배님들과 기환, 향근, 종성, 민, 재호, 기원, 동현, 명호에게 고마움을 전합니다. 등직한 형과 내 동생 은옥이와, 격려해주고 믿고 따라주는 사랑스런 버팀목 두연이에게도 고마움을 전합니다. 또한 항상 따뜻하게 맞이해 주시는 두연이 가족들에게도 감사드립니다.

마지막으로 내가 태어나서 지금까지 내가 있게 만들어 주신 열정적인 우리 엄마, 아무런 말씀없이 묵묵히 믿어주신 우리아빠와 할머니에게 진심으로 감사드리며 이 논문을 바칩니다. 항상 건강하시길 바랍니다.

또한 저를 아끼고 사랑해주시는 모든 분들께 행복이 깃들길 바랍니다.