creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:24011-200000241420

2011년 2월

석사학위 논문

폭약의 기폭위치에 따른 발파진동 예측

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

김 승 은

폭약의 기폭 위치에 따른 발파진동 예측

(Prediction of blasting vibration according to priming location of explosion)

2011년 2월 25일

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

김 승 은

폭약의 기폭 위치에 따른
발파진동 예측

지도교수 강 추 원

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2010년 10월

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

김 승 은

김승은의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 고 진 석 ㊞

위 원 조선대학교 교수 박 천 영 ㊞

위 원 조선대학교 교수 강 추 원 ㊞

2010년 11

조선대학교 대학원

<목　차>

List of Tables ········· ⅳ
List of Figures ········· ⅴ
Abstract ········· ⅷ

1. 서론 ········· 1

2. 이론적배경 ········· 4
2.1 발파진동 이론 ········· 4
2.1.1 진동의 정의 ········· 4
2.1.2 진동의 물리적인 크기 ········· 9
2.1.3 지반진동의 특징 ········· 12
2.1.4 진동량의 표현 ········· 13
2.2 발파에 의한 암석파쇄이론 ········· 13
2.2.1 Crater ········· 14
2.2.2 기체팽창 ········· 14
2.2.3 반사파 ········· 15
2.2.4 충격파와 가스압 ········· 16
2.3 발파 진동의 발생과 전파 ········· 17
2.3.1 발파 진동의 발생 ········· 17
2.3.2 발파 진동의 일반적 특성 ········· 21
2.4 발파 진동의 예측 방법 ········· 25
2.4.1 환산거리의 유도 ········· 25

2.4.2 95% 신뢰식의 설정 ···· 28
2.5 기폭위치 ···· 29
2.5.1 정기폭 ···· 29
2.5.2 역기폭 ···· 30
2.5.3 중간기폭 ···· 31

3. 현장 실험 ···· 32
3.1 연구지역의 지질개요 ···· 32
3.1.1 지형 ···· 32
3.1.2 지질 ···· 33
3.2 물성시험 ···· 34
3.2.1 물성시험의 종류 ···· 34
3.2.2 물성시험의 결과 ···· 34
3.3 현장개요 ···· 37
3.4 현장실험 방법 및 결과 ···· 38
3.4.1 실험 방법 ···· 38
3.4.2 현장 실험의 계측 ···· 41
3.4.3 현장 실험 계측 결과 ···· 43

4. 분석 ···· 50
4.1 발파진동 회귀분석 및 예측 ···· 50
4.1.1 Case 1의 발파진동예측식 ···· 50
4.1.2 Case 2의 발파진동예측식 ···· 53
4.1.3 Case 3의 발파진동예측식 ···· 55
4.1.4 Case 4의 발파진동예측식 ···· 57

4.1.5 Case 5의 발파진동예측식 ··· 59
4.1.6 Case 6의 발파진동예측식 ··· 61

5. 고찰 ··· 63
5.1 폭약의 종류에 따른 상관관계 고찰 ··· 63
5.2 기폭위치에 따른 상관관계 고찰 ··· 71

6. 결론 ··· 79

참 고 문 헌 ··· 84

<List of Tables>

Table 2.1 Vibration unit ······ 13
Table 2.2 The shock wave value of total energy ······ 16
Table 2.3 Variable considered in a dimensional analysis of explosion phenomena(Ambraseys and Hendron, 1968) ······ 26
Table 3.1 Result of rock property test ······ 37
Table 3.2 Experimental conditions ······ 38
Table 3.3 Main performance of explosives ······ 40
Table 3.4 Case for test blasting ······ 40
Table 3.5 Measurement results of Case 1 ······ 44
Table 3.6 Measurement results of Case 2 ······ 45
Table 3.7 Measurement results of Case 3 ······ 46
Table 3.8 Measurement results of Case 4 ······ 47
Table 3.9 Measurement results of Case 5 ······ 48
Table 3.10 Measurement results of Case 6 ······ 49
Table 5.1 Prediction equation of blasting vibration by explosive type ······ 65
Table 5.2 Predicted vibration velocity by explosive type according to weight per delay ······ 67
Table 5.3 Prediction equation of blasting vibration by priming location ··· 73
Table 5.4 Predicted vibration velocity by priming location according to weight per delay ······ 75

<List of Figures>

Figure 2.1 Harmonic oscillation ······ 8

Figure 2.2 The size of sine wave vibration ······ 9

Figure 2.3 Advancing detonation in blast hole produces shot period detonation pressure and long period explosion pressure(Dick, 1968) ······ 19

Figure 2.4 Schematic of the fracturing and deformation around an explosion in rock ······ 20

Figure 2.5 The form of Blasting Vibration wave ······ 22

Figure 2.6 Elastic wave motion ······ 23

Figure 2.7 Two representative for blasting an array of idealized waveforms ······ 24

Figure 2.8 Position of primer ······ 31

Figure 3.1 Site map of study area ······ 32

Figure 3.2 Geology genealogy of study area ······ 33

Figure 3.3 AG Balance ······ 35

Figure 3.4 Sonic viewer (OYO Inc) ······ 35

Figure 3.5 Uniaxial compressive strength test ······ 36

Figure 3.6 Strain gauge and portable strain indicator ······ 36

Figure 3.7 Blasting pattern; (a)~(d) ······ 39

Figure 3.8 Measurement view of Study area ······ 42

Figure 4.1 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance of Case 1 ······ 52

Figure 4.2 Relationship between peak particle velocity and cube root scaled

distance of Case 1 ··· 52
Figure 4.3 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance of Case 2 ··· 54
Figure 4.4 Relationship between peak particle velocity and cube root scaled distance of Case 2 ··· 54
Figure 4.5 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance of Case 3 ··· 56
Figure 4.6 Relationship between peak particle velocity and cube root scaled distance of Case 3 ··· 56
Figure 4.7 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance of Case 4 ··· 58
Figure 4.8 Relationship between peak particle velocity and cube root scaled distance of Case 4 ··· 58
Figure 4.9 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance of Case 5 ··· 60
Figure 4.10 Relationship between peak particle velocity and cube root scaled distance of Case 5 ··· 60
Figure 4.11 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance of Case 6 ··· 62
Figure 4.12 Relationship between peak particle velocity and cube root scaled distance of Case 6 ··· 62
Figure 5.1 Relationship between peak particle velocity and scaled distance by explosive type ··· 66
Figure 5.2 Relationship between predicted ground vibration velocity and distance by explosive type ··· 70

Figure 5.3 Relationship between peak particle velocity and scaled distance by priming location ··· 74
Figure 5.4 Relationship between predicted ground vibration velocity and distance by priming location ··· 78

ABSTRACT

Prediction of blasting vibration according to priming location of explosion

By Kim, Seung eun
Adv. Prof. : Prof. Kang, Choo won, Ph.d,
Dept. of Energy & Resources Engineering,
Graduate School of Chosun University

Recently civil appeals about the rock excavation work in densely populated urban areas had been increased. So blasting engineers has been tried to control effectively the vibration. Therefore, when the blasting was designed they considered a top priority to safety in the efficiency, reliability and safety of design variables.

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

This study was carried out to identify the characteristics of the rock in laboratory experiments. For the experiment, the samples were collected

quartz porphyry, schist, gneiss in the study area. In order to identify the characteristics of blasting vibration of type of explosives (NewMITE, MegaMEX) and location of priming (top priming, middle priming, bottom priming), this study was carried out 6 cases single hole test blasting and was derived the formula to predict blast vibration.

The ground vibration of the type of rocks and priming location was analyzed by nomogram analysis and estimated value of vibration were compared weight per delay's were 0.5, 1.6, 5.0, 15kg.

The result of this study can be summarized as follows

(1) According to data which is measured and collected by the type of explosives through field experiments by regression analysis, the vibration of NewMITE was larger than MegaMEX under the same blast conditions. However, the decrease was many and the vibration was not far propagated.

(2) According to data which is measured and collected by priming location through field experiments by regression analysis, the vibration of middle priming was larger than the other priming location under the same blast conditions and the decrease was many and the vibration was not far propagated. The vibration of bottom priming was not larger than the middle priming under the same blasting conditions, however, the vibration was propagated far and the decrease was little.

1. 서론

전 국토의 2/3 이상이 산지로 이루어진 우리나라는 산업의 발달과 경제 성장 등으로 인한 빈번한 국토 개발에서 굴착작업은 간과할 수 없는 부분이다. 화약발파를 이용한 굴착방법을 통해 굴착작업이 주로 이루어지고 있으며, 이는 우리나라 뿐만 아니라 전 세계적인 추세이기도 하다. 화약발파를 통한 굴착작업은 유용광물자원의 채취, 고속도로 및 지하철 건설 등 광업, 토목, 건설 분야 등 각종 작업에서 널리 이용되고 있다. 또한, 근래에는 지하철 건설 공사, 도시재개발 사업, 각종 터널 공사 등에 따라 인구가 밀집한 지역에서 또한 발파를 이용한 굴착 작업이 증가하고 있다.

이로 인한 발파 재해에 대한 민원문제가 경제성장과 사회의식구조의 변화로 급증하고 있다. 그래서 발파 작업은 더욱 규제를 받게 되고, 발파기술자들은 종래의 발파방법보다 효과적으로 진동제어를 하려는 관점에서 발파설계 시 효율성, 안정성 및 안전성 등의 설계변수들 중에서도 안전성이 가장 우선적인 기준으로 고려하고 있다.

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

발파지점에서 발생하는 발파진동의 크기에는 지발당 장약량 이외에도 암

반 상태, 사용화약, 천공패턴, 발파공 직경과 화약 직경과의 비, 기폭위치, 전색상태 등 많은 변수들이 영향을 미치게 된다.

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

발파진동의 전파 특성을 결정짓는 인자로서 발파조건에 대한 연구 중 妹澤克推金井淸(1936)의 연구에 의하면 발파압력이 최고치가 되는 시간이 짧은 화약류를 사용하면 진동이 크고 주파수가 높게 되는 경향이 있고, 발파압력이 최고치가 되는 시간이 긴 화약류를 사용하면 진동이 감소되고 주파수도 낮아지는 것으로 나타난다. 한편, 발파압력의 시동시간은 폭속과 밀접한 관계가 있으며, 일반적으로 폭속이 빠른 화약류일수록 발파압력이 최고치가 되는 시간이 짧게 되므로 발파에 의한 지반진동의 크기나 주파수도 사용하는 화약류의 폭속과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 藤井喬, 谷本親伯(1970)는 폭속이 다른 3종류의 폭약을 커트발파를 실시할 때의 진동을 측정하여 폭속이 낮으면 발파에 의한 지반진동이 어느 정도 감소되는가에 대한 연구를 하였다. 강대우, 안봉도(2007)는 폭속이 서로 다른 에멀젼 폭약을 시험발파하여 진동의 특성을 분석한 결과, 발파원으로부터 어느 정도의 거리에서는 폭속이 감소함에 따라 진동이 감소하는 에멀젼 폭약의 폭속 변화에 따른 진동특성을 연구했다.

기폭의 방법으로서 기폭약(Primer)의 적절한 위치는 안정성과 효율성 둘다의 관점에서 중요하다. Du Pont의 암석역학적 연구들에서 기폭약(Primer)의 위치는 암석의 응력파의 크기나 형태에 직접적인 효과가 있다는 것을 보여주었다. 강추원, 양해승, 문창일(2000)은 장공발파에서 정기폭, 역

기폭으로의 기폭위치를 설정하여 시험한 결과 발파 효율면에서는 역기폭을 이용하는 것이 좋으나, 지반진동으로 전달되는 진동속도를 제어하기위한 목적일 때는 정기폭의 이용이 더 효율적이라는 결과는 얻음으로써 계단 발파에서 기폭약(Primer)의 위치가 발파 진동에 미치는 영향에 대해 연구한 바 있다.

본 연구에서는 기폭위치, 폭약의 종류에 따른 발파에 의한 진동의 전파 특성을 파악하고 이들 간의 상관관계를 알아보기 위하여 노천 현장에서 폭속이 다른 두 종류의 폭약 에멀젼 폭약에 기폭의 위치를 정기폭, 중간기폭, 역기폭으로 분류하여 발파진동을 계측 한 후 회귀분석을 통해 비교 분석하였다.

또한 평균 발파진동 예측식을 통하여 폭약종류와 기폭위치에 따른 지반진동을 노모그램 분석, 각각의 지발당 장약량에 대한 예상진동치를 비교분석을 함으로써, 폭약의 기폭위치가 발파 진동의 저감요소로써 바탕이 될 수 있도록 제안하였다.

2. 이론적배경

2.1 발파진동 이론

발파에 의한 지반진동은 암반 중에 밀폐된 상태로 놓인 폭약이 폭굉하면 그 폭약의 폭굉압은 기폭 후 수 μsec에서 최고치에 달하고 그 압력은 5~20만 기압으로 추정되며, 이 값은 주위의 암반 강도보다 훨씬 높다.

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

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

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

2.1.1 진동의 정의

진동에서 가장 단순한 것은 시간의 경과와 함께 동일한 형상이 반복되는

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

공해진동이라고 불리는 진동에는 정상진동의 것도 있지만 비정상진동인 것이 많다. 진동현상을 나타내는 물리량을 진동량이라 하며 변위, 속도, 가속도가 사용된다. 진동하고 있는 점 A의 위치가 시간적으로 ±X의 사이에서 반복운동을 되풀이하는 경우를 고려해 보자. 어떤 시간 t에 있어서 점 A의 위치 X가 시간적으로 정현 변화한다고 가정하면 x의 관계를 다음 식(2.1)으로 표현된다.

$$x = X\sin(\omega t + \phi) \tag{2.1}$$

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

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

$$f = \frac{1}{T} \tag{2.2}$$

전술의 정현진동의 경우 어느 시간 t_1 으로부터 $2\pi/\omega$만 경과하면 변위 x는 식(2.3)으로 되며 시간 t_1의 변위는 완전히 동일한 위치에 되돌아오기 때문에 주기(T)는 식(2.4)로 되고 또 진동수(f)는 식(2.5)로 된다.

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

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

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

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \tag{2.4}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \tag{2.5}$$

따라서 ω는 2π시간 사이에 x가 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 v는 변위 x를 시간 t로 미분해서 얻어진다. 정현진동의 경우는 식(2.1)에 의해 식(2.6)과 같이 된다.

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

ωX는 이때의 최대치로 속도 진폭이라 부른다. 또 가속도 α는 속도 v를 시간 t로 미분하여 얻어지는데 식(2.6)에 의해 식(2.7)과 같이 되며 ω^2X는 가속도진폭이라 부른다.

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

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

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

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

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

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T [X\sin(\omega t+\phi)]^2 dt} \tag{2.8}$$

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

$$= \frac{X}{\sqrt{2}} \fallingdotseq 0.707X$$

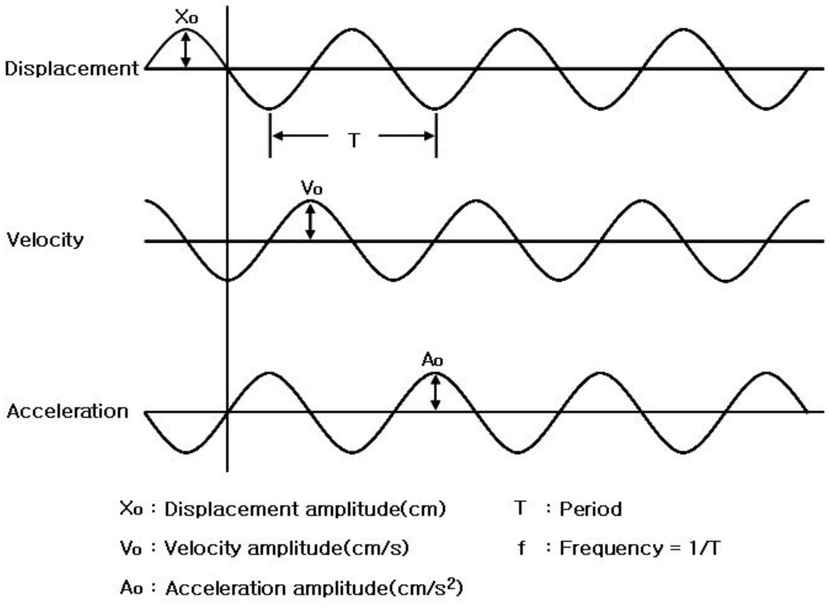


Figure 2.1 Harmonic oscillation

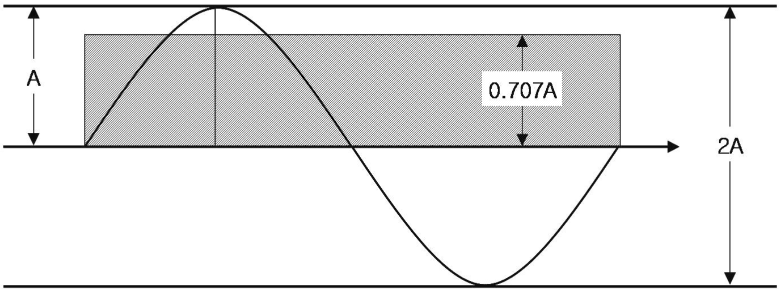


Figure 2.2 The size of sine wave vibration

주기적이 아닌 경우는 식(2.8)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 2.2의 사선부분)이다.

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

2.1.2 진동의 물리적인 크기

진동변위(displacement)는 정지상태로부터 움직인 폭을 표시하며, 전체진폭(peak to peak치)과 편진폭(0to peak치)이 있다. 일반적으로 진폭은 편진폭을 의미한다. 단위는 m이지만, 실제의 진폭은 매우 작아 μm(1/1,000mm)

를 사용한다. 공해진동에 있어서는 대부분 500μm 이하의 변위를 대상으로 한다. 지반진동을 정현파 진동으로 가정하면 지표면에서의 변위는 식(2.9)와 같다.

$$X = A_0 \sin(\omega t) \tag{2.9}$$

여기서, X는 변위진폭, A_0는 변위진폭의 최대치, ω는 각진동수, t는 시간을 나타낸다.

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

$$v = A_0 \omega \cos(\omega t) \tag{2.10}$$

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

$$a = -\omega^2 A_0 \sin(\omega t) \tag{2.11}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

또, 진동레벨(Vibration level, VL)이란 진동가속도레벨은 단순한 물리량이므로 진동평가시 이 값에 인체진동감각에 따른 주파수보정을 하여 평가

(합산)한 것을 진동레벨이라 하며, 식 (2.13)과 같다.

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

여기서, Wn은 인체감각에 따른 주파수 보정치이다.

2.1.3 지반진동의 특징

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

지반을 따라 전파되는 발파진동은 진동파가 구조물과 인체에 대하여 미치는 영향이 문제로 되고 있으며, 발파공해의 반 정도는 발파진동이 차지하고 있다.

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

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

2.1.4 진동량의 표현

진동의 강도 또는 크기는 지금까지 서술한 바와 같이 변위, 속도, 가속도로 나타내고 그 단위로 변위는 cm, 속도는 cm/sec, 가속도는 cm/sec^2(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	$\mu = 10^{-3}mm = 10^{-4}cm$ $mm = 10^{-1}cm$ $m = 10^2cm$
Velocity	cm/sec	$mm/sec = 10^{-1}cm/sec$ $Kine = 1cm/sec$ $m/sec = 10^2cm/sec$
Acceleration	cm/sec^2(gal)	$gal = 1cm/sec^2$ $g = 980cm/sec^2 ≒ 1,000gal$ $m/sec^2 = 10^2cm/sec^2$

2.2 발파에 의한 암석파쇄이론

발파에 의한 암반 파쇄 현상의 이론적 규명은 발파 기구의 복잡성에 기인하여 아직까지 완전히 규명되지 못했다. 그러나 다음과 같은 이론들이 일반

적으로 받아들여지고 있으며 이러한 기존의 이론들에 새로운 해석들이 추가, 수정되고 있다.

2.2.1 Crater

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

2.2.2 기체 팽창

발파에 의해 발파공에 작용하는 압력은 기체 팽창에 의한 가스압의 절반 정도의 크기이며, 충격파의 형태로 주변 암반에 전달된다. 충격파에 의한 분쇄대는 발파공 반경의 약 2배 거리까지 형성되고, 그 이후 방향성이 나타나는 몇 개의 방사상 균열이 형성된다. 충격파가 자유면에 도달하면 균열들에 가스압이 작용하여 균열이 성장하며, 이러한 균열의 성장이 자유면에 이르면 암석은 그때까지 남아 있는 가스압에 의한 변위가 발생한다.

화약의 폭발에 의해 발생한 에너지는 폭굉압과 가스압의 두 가지 형태로 암반에 역학적인 일을 수행한다. 폭굉압은 발파공에 인접한 좁은 지역에 국부적이고 한정적으로 작용하며 짧은 시간 동안 작용하기 때문에 주된 파쇄는

가스압에 의해 이루어진다. 압축응력을 받은 후, 인장응력에 의해서 공의 주위에서 부터 균열이 형성되며, 균열 첨단에 변형에너지(strain energy)가 가해지는 동안 계속해서 균열은 성장하게 된다. 이 때, 자유면에서의 변형에너지 반사에 의한 파쇄는 고려하지 않는다. 그리고 가스압에 의해 압열 파쇄(flexural rupture)가 일어나고 이것에 의해 저항선(burden)의 휨변형(bending)이 나타난다(Persson, et al., 1970; Ash, 1973; Johansson, et al., 1970).

2.2.3 반사파

반사 응력파에 의한 암석 파쇄의 용이성은 인장강도와 압축강도를 사용하여 나타내는데, 그 비를 파쇄용이 계수(blastability coefficient)라 한다. 암석은 인장력에 약하므로 파쇄용이 계수가 클수록 파쇄가 쉽게 된다. 파쇄용이 계수는 10에서 100사이의 값을 지닌다. 반사파 이론은 암반이 인장 파쇄에 약하기에 주된 에너지원을 자유면에서 반사된 인장파로 보고 암반의 응력 상태와 파괴조건식을 비교하여 설명하는 이론이다. 발파공에 인접한 지역에서는 압축응력파에 의한 파쇄가, 바깥 지역은 인장응력파에 의한 파쇄가 주로 이루어진다. 이 이론에 의하면, 폭굉파가 자유면이나 물리적인 성질이 다른 매질 경계에 도달하면 암반에 강한 충격을 주고 그 결과 새로운 응력파가 발생하여 내부로 전달되어 암석이 판의 형태로 파쇄(spalling, scabbing or slabbing)되고 또다시 새로운 자유면이 형성되는 과정이 반복하여 일어난다고 파쇄 기구를 정의한다(Obert, et al., 1949, 1950; Hino, 1956; Duvall, et al., 1957).

2.2.4 충격파와 가스압

Kutter and Fairhurst(1971)는 충격파와 가스압 중 하나를 파쇄기구의 주된 에너지원으로 설명하는 기존의 이론에 대해 파쇄는 두 가지 에너지원의 복합적인 작용으로 이루어진다고 실험에 의해 밝혔다. 이 이론에 의하면 짧은 시간에 막대한 크기로 생성된 폭굉파는 주변 매질로 전달되나, 그 지속 시간이 비교적 긴 가스압이 준정적거동 상태를 유지하며 이미 형성된 균열을 확장, 전진시킨다는 것이다.

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

Table 2.2 The shock wave value of total energy

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

2.3 발파 진동의 발생과 전파

2.3.1 발파 진동의 발생

폭약을 사용한 발파는 물리, 화학, 열역학, 충격파 상호작용 및 암석역학 등의 이론이 복합적으로 작용하여 이루어진다. 폭발에 의해서 발생된 압력파는 암반 중의 모든 방향으로 전파되면서 감소되는데 표면에서는 굴절 및 반사가 일어난다. 이때 폭발에 의한 초기 충격 폭굉압과 지연 폭발 가스압을 정확하게 구별하기는 힘들다. 화약이 폭발 할 때 열과 에너지를 발생하는데 Figure 2.3에서 보듯이 발파공을 따라서 연소면이 앞으로 진행하면 폭굉압 P_d의 뒤에는 이보다 낮지만 일정하게 지속되는 폭발압 P_e가 따르게 된다. 폭발압은 폭굉압 보다 좀 서서히 사라지지만 암석을 이동시키는데 필요한 많은 양의 에너지로 작용한다.

폭굉압은 초기에 발파공벽에 바로 인접한 암석을 파쇄시키고 지속되는 폭발로 인해 발파 파쇄대가 밖으로 확장되며(Figure 2.4) 퇴적암의 경우 발파공 직경의 40배에 이르게 된다. 발파에 의해 발생되는 최고압 즉 폭굉압은 10~140kbar(145,000~2,000,000 psi)에 달하며 속도는 2700~8400m/sec의 폭굉파로서 전파한다.

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

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

여기서 P_d는 폭굉압(kbar)이며 ρ는 폭약밀도(g/cm^3), VOD는 폭발속도(m/sec), pv는 폭약의 입자속도(cm/sec)를 나타낸다. 폭약밀도와 폭굉압은 알 수 있으나 진동속도는 공기 중에서 발파로 인하여 팽창하는 가스 때문에 입자운동을 사진으로 찍기 불가능하므로 측정될 수 없고, 투명한 플라스틱 용기에 물을 넣고 그 안에서 폭발시키면 사진 촬영이 가능하여 충격파 속도와 입자속도와의 관계로부터 계산할 수 있다. 폭굉속도, VOD와 폭약밀도, ρ의 관계식을 표현하면 식(2.15)와 같다(Du Pont Co., 1977).

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

또 다른 식으로서 다음 식(2.16)와 같이 나타낼 수 있다(Dick, 1996).

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

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

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

여기서 ρ(g/cm^3)는 암반의 밀도이며 ρ_E는 폭약의 비중을 나타내며 D_E는 폭약의 폭굉 속도를 의미한다.

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

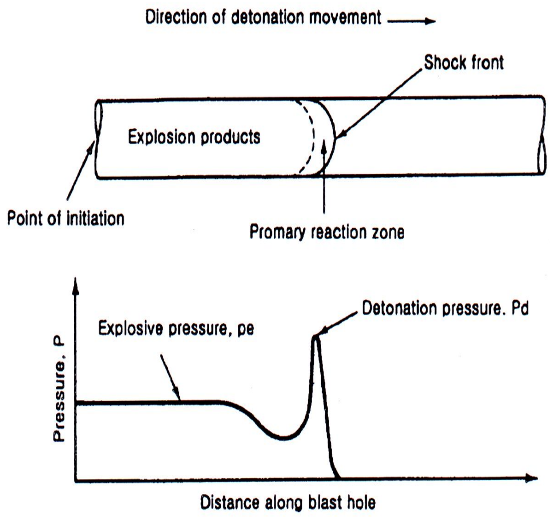


Figure 2.3 Advancing detonation in blast hole produces shot period detonation pressure and long period explosion pressure(Dick, 1968)

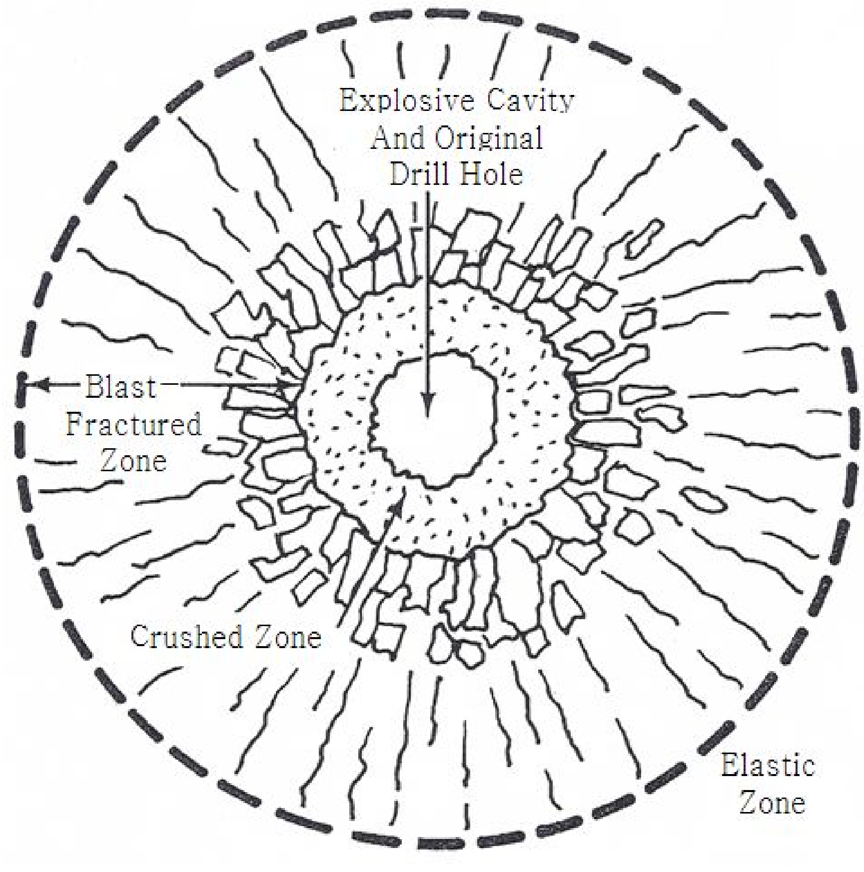


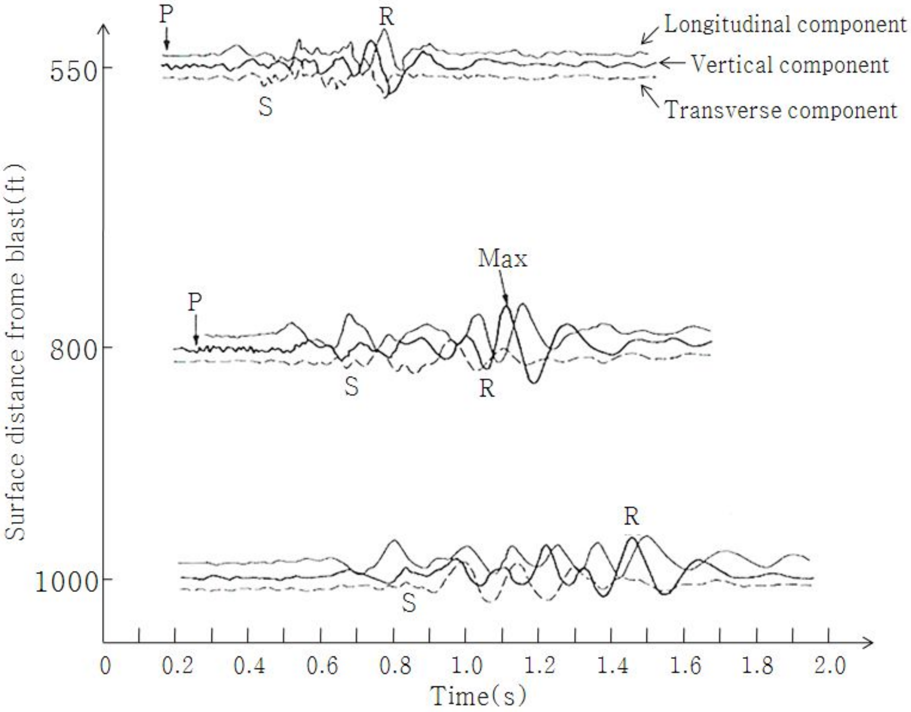
Figure 2.4 Schematic of the fracturing and deformation around an explosion in rock

2.3.2 발파 진동의 일반적 특성

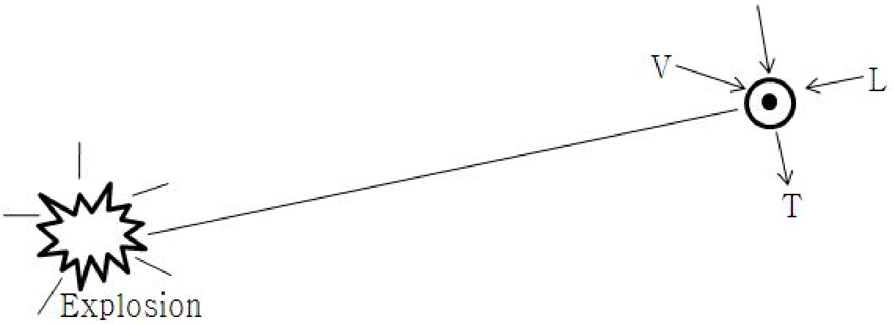
발파에 의해 발생하는 파들은 발파진동의 일반적인형태(Figure 2.5(a))와 같이 압축파, 전단파, 표면파의 세가지 범주로 크게 나눌 수 있다. 파동을 완전하게 설명하기 위해서는 Figure 2.5(b)처럼 운동의 세 방향 직교성분을 측정하여야 한다. 종방향 성분 L은 보통 수평이고 폭원으로부터 반경 방향이다. 그리고 나머지 두 직교 성분은 반경 방향에 대해 직교하는 수직성분 V와 횡방향 성분 T이다.

세 개의 중요 파형은 암석이나 토양 속을 진행하는 물체파와 표면(보통 상부지표)를 따라 전파하는 표면파의 두 종류로 나눈다. 가장 중요한 표면파는 Figure 2.5(a)에서 R로 표시된 레일리 파이다. 물체파들은 P로 표시하는 압축파(압축/인장) 즉 음파같은 파와, S로 표시하는 비틀림파 즉 전단파로 세분된다. 짧은 거리에서의 발파는 주로 물체파를 만든다. 이러한 물체파들은 다른 암석, 토양 층이나 지표면과 같은 경계를 만날 때까지 외부를 향해 구상으로 전파한다. 이 경계면에서 전단 및 표면파가 생성된다. 전달거리가 멀어질 때는 레일리 표면파가 중요하게 된다.

짧은 거리에서는 세 개의 파가 모두 함께 도달하여 파의 형태를 구별하기가 대단히 복잡하다. 반면 먼 거리에서는 느리게 움직이는 전단파와 표면파가 압축파로부터 분리되기 시작하여 구별이 된다. 불행하게도 대부분의 발파는 밀리세컨드로 지발되는 일련의 작은 장약의 직렬기폭으로 이루어지고 진행경로와 지발시간의 차에 따라 전파면과 파형이 겹쳐지게 된다. 도착순서가 이렇게 복잡하기 때문에 발파진동학의 상세한 연구가 제약되었다. 그러나 하나의 폭발파동에 대한 연구(예를 들면 Reinhard, 1975)들의 결과로 발파진동의 영향 한계를 평가하는데 유용한 관계들이 구해졌다.



(a) Blast vibration waveform by time history



(b) Three dowing by measured direction

Figure 2.5 The form of Blasting Vibration wave

이 세 파의 형태는 그들이 통과하는 토양이나 암석입자들의 운동형태를 아주 다르게 만든다. 그 결과 토양 및 암석 중이나 위에 건축한 구조물들은 각 파에 따라 다르게 변형될 것이다. 각각의 주요 파형에 따라 달라지는 입자운동과 지각(또 그에 따른 구조물)의 변형을 Figure 2.6에 비교하였다. 각 경우에 있어서 파는 터널이나 파이프에 평행하게 오른쪽으로 진행한다. 종파(압축파)는 그것이 진행하는 것과 같은 방향으로 입자운동을 한다. 반면 전단파는 파의 진행방향에 직각으로 움직이는 데 그림에서 보인 것처럼 수평일 수도 수직일 수도 있다. 레일리 파는 가장 복잡한데 파의 진행방향에 대하여 평행하면서도 수직인 방향으로 움직인다.

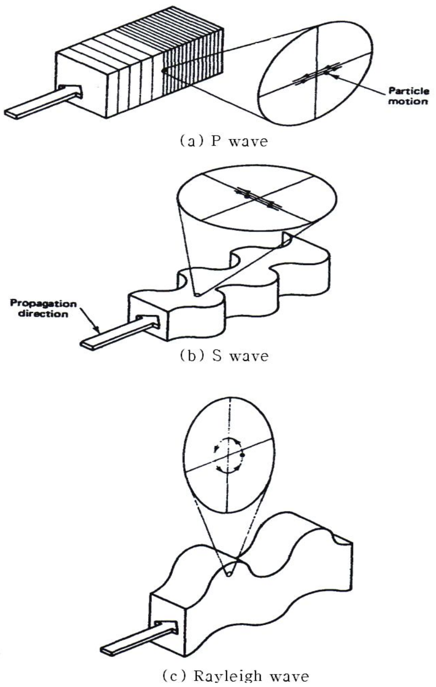
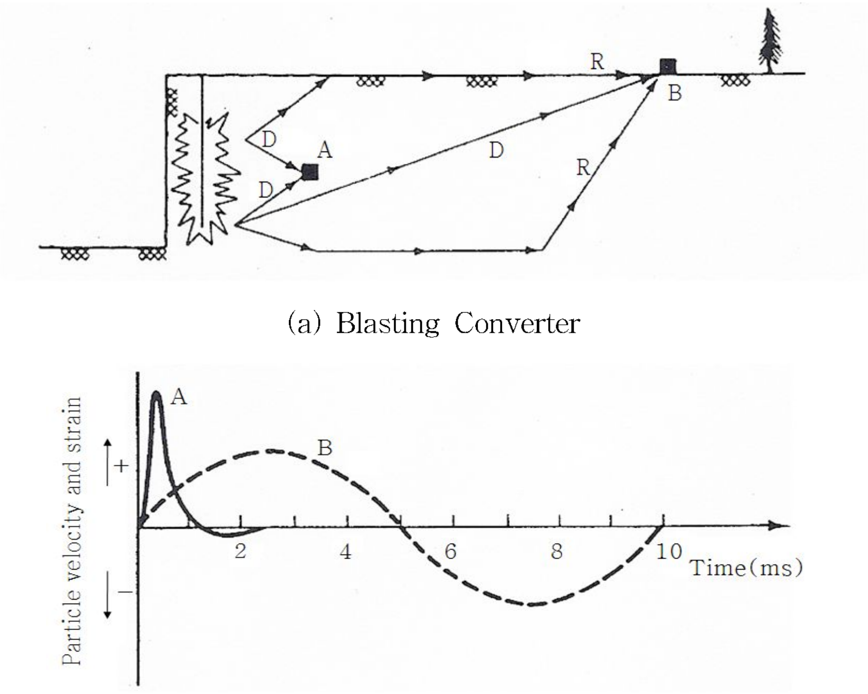


Figure 2.6 Elastic wave motion

대부분의 발파문제들에서 Figure 2.7(a)의 B지점에 해당하는 곳에 수진기를 두어 측정하며 그 결과는 대체로 사인파 B로 된다. 근접한 곳에서의 폭발은 A지점에 직접 전달되어 하나의 뾰족한 파동 A를 만든다. 폭원에서 먼 위치 B에서는 직접 전달파, 반사파, 굴절파 등이 조합되어 대체로 사인파인 B를 만든다. Figure 2.7(b)에 보인 이상화된 파들은 대표적인 파로서, 근접 발파는 1000~2000μs 즉 1~2ms 지속되는 일시적인 순간파동을 만든다. 한편, 비교적 먼 거리에서 사인파는 10~100ms의 지속시간을 갖는다. 이 파동들을 조합하면 Figure 2.5(a)와 같이 보통 관측되는 사인파들이 된다.



(a) Blasting Converter

(b) Idealized wave

Figure 2.7 Two representative for blasting an array of idealized waveforms

2.4 발파 진동의 예측 방법

발파 진동을 예측하는 대표적인 두 가지 방법은 환산거리 방식(Duvall, et al., 1963; Devine, 1966; Ash, 1973; Bicholls, et al., 1971; Bollinger, 1971; Archibald, 1976; Calvin, et al., 1975; Dupont, 1980)과 장약레벨 방식(Langefors, 1978)을 들 수 있다. 환산거리 방식은 거리와 장약량의 자승근 혹은 삼승근 관계인 환산거리(scaled distance) 개념에 의한 발파 진동의 예측 방법이며 Langefors의 장약레벨 방식은 각각의 장약레벨과 거리와의 관계인 장약 레벨(charge levels) 개념에 의해 진동속도를 예측한다. 국내에서는 이들 방법 중 환산거리 개념에 의한 발파 진동의 예측이 일반화 되어 있으며 본 연구에서는 발파 진동의 예측방법으로 실 계측 자료에 의한 환산거리 식에 의한 예측 방법을 이용하였다.

2.4.1 환산거리의 유도

환산거리는 지발당 장약량(W)과 거리(D)가 변화할 때 최대 입자속도를 예측하는데 필요한 것이다. 가장 보편적인 두 가지 환산거리는 자승근 환산거리($D/W^{1/2}$)와 삼승근 환산거리($D/W^{1/3}$)이다. Hendron(1969)은 발파 진동을 조절하는데 Table 2.3의 변수들이 중요한 의미를 갖는 것으로 생각하였다.

발파에 의한 진동과 이것이 구조물에 미치는 영향으로는 Buckingham Pi 무차원 해석이론(Langhaar, 1951)에 의하면, u/D, $\dot{u}/c$, $\ddot{u}D/c^2$, ft, tc/D 및 $W/\rho c^2 D^3$등 여섯 개의 변수가 있음이 알려져 있다.

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

의미를 가진다.

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

Table 2.3 Variable considered in a dimensional analysis of explosion phenomena(Ambraseys and Hendron, 1968)

Variable	Symbol	Dimension*
Independent		
Energy (per delay)	W	FL
Distance	D	L
Seismic velocity	c	LT^{-1}
Density of rock mass	ρ	Ft^2L^{-4}
Time	t	t
Dependent		
Ground displacement	u	L
Ground particle velocity	$\dot{u}$	Lt^{-1}
Ground acceleration	$\ddot{u}$	Lt^{-2}
Frequency	f	t^{-1}

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

발파에 의해 발생한 지반진동의 크기는 폭원으로부터 계측지점까지의 거리에 반비례하고, 1회 발파 당 동시에 폭발하는 장약량에 비례하므로(Devine, 1966) 거리와 장약량의 함수관계를 환산거리(Scaled Distance)로 표기하며, 이것은 지발당장약량과 거리가 변화할 때 최대진동속도를 예측하는 데 필요한 것이다.

환산거리에 의한 발파 진동 예측식은 식(2.18)과 같다.

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

여기서 V는 진동속도, K는 입지상수, n은 감쇠상수이며 SD는 환산거리로서 발파원과 수진점과의 거리(D)와 지발당 장약량(W)은 식(2.19), (2.20)의 각각 자승근 및 삼승근으로 표시된다.

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

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

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

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

$$V = KW^a D^b \tag{2.21}$$

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

식(2.18)나 (2.21)으로 구해지는 진동수준은 평균 진동 수준이므로 발파설계에 직접 이용할 수 없다. 따라서 로그 정규분포의 특성을 이용하여 신뢰수준

95% 발파 진동 예측식을 구하고 현장여건에 맞는 허용 진동수준으로부터 허용 환산거리를 산출하게 된다.

2.4.2 95% 신뢰식의 설정

발파설계를 위해서는 대상 지역에서의 시험발파를 통한 K, n 상수 값을 정의하는 것이 중요하며, K, n 값이 결정되고, 허용 진동 속도가 주어지면 발파진동식에서 폭원으로 부터의 거리와 지발당 장약량과의 관계를 나타내는 노모그램을 작성할 수 있다.

입지상수의 결정방법은 측정 자료처리는 log-log scale상에서 최소자승법에 의해 최적 적합식(best fit line)을 구하며 이를 50% 신뢰식이라고 한다.

입지상수 K의 50%값을 K_0라 하고 95%, 99%의 K값을 각각 K_1, K_2라 하면 K_0, K_1, K_2 값은 로그 정규분포의 특성을 이용하여 식(2.22), (2.23), (2.24)과 같이 구할 수 있다.

$$K_0 = \exp A_0 \tag{2.22}$$

$$K_1 = \exp(A_0 + 1.645\sigma) \tag{2.23}$$

$$K_2 = \exp(A_0 + 2.326\sigma) \tag{2.24}$$

여기서, σ는 표준 편차이다. 또한 신뢰식의 기울기 n은 동일하다.

2.5 기폭위치

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

기폭약(Primer)은 높은 폭속과 높은 폭발력을 가진 뇌관으로 기폭이 가능하도록 만들어져야 한다. 기폭약(Primer)은 장전된 폭약의 폭발파가 이동될 방향을 향하는 위치에 설치될 때 더욱 효과적이다. 이것을 directional Priming이라한다. 따라서 전장약을 향하는 기폭약(Primer)에 기폭장치를 설치하는 것이 가장 좋다. 먼저 공구를 향하는 뇌관을 가진 기폭약(Primer)를 공에 설치한다. 기폭약(Primer)의 적절한 위치는 안정성과 효율성 둘 다의 관점에서 중요하다.

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

Figure 2.8는 기폭약(Primer)의 장전위치에 따른 기폭위치를 나타낸 그림이다.

2.5.1 정기폭(Top priming)

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

정기폭은 대구경의 시추공에서는 넓은 공간으로 인해 별 문제가 없지만

좁은 간격의 소구경 시추공에서는 공의 윗부분에서 지반운동으로 인해 Cut off가 발생될지도 모른다. 때문에 정기폭은 역기폭을 사용하기에 안전에 부적절한 고려사항이 있을 때 사용한다.

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

2.5.2 역기폭(Bottom priming)

뇌관을 포함한 기폭약(Primer)이 공구와 전체 장약을 향하는 공저에 설치될 때 이것을 역기폭(Bottom priming)이라고 한다(Figure 2.8(b)).

비교적 둔감한 초유폭약을 이용하여 긴 장약을 기폭 할 경우에는 끝부분에 전폭약을 설치할 수도 있다.

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

관점에 따라 여러 견해와 주장이 엇갈리고 있으나, 시추공의 Cut off 감소, 공저에서 약포의 불폭 감소, 많은 암반변위 발생, 막힌 공으로부터 전폭약을 재장약의 가능 등의 이유로 역기폭이 널리 이용된다.

일반적으로 역기폭은 각선의 길이가 비경제적이며 폭약을 다져 넣는데도

주의해야 하지만 정기폭일 경우에는 폭약을 다져 넣는데 비교적 안전하다. 단발발파로부터 장약의 Cut off에 장약분리의 위험이 있을 때나 지연뇌관을 사용하는 근접공에서 유리하다. 기폭점이 안쪽에 있으므로 발파위력이 내부에 더욱 크게 작용하여 잔류공을 남기는 일은 없다. 일반적으로 장공을 발파할 때에는 역기폭으로 장전하는 것이 효과적이다.

2.5.3 중간기폭(Middle priming)

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

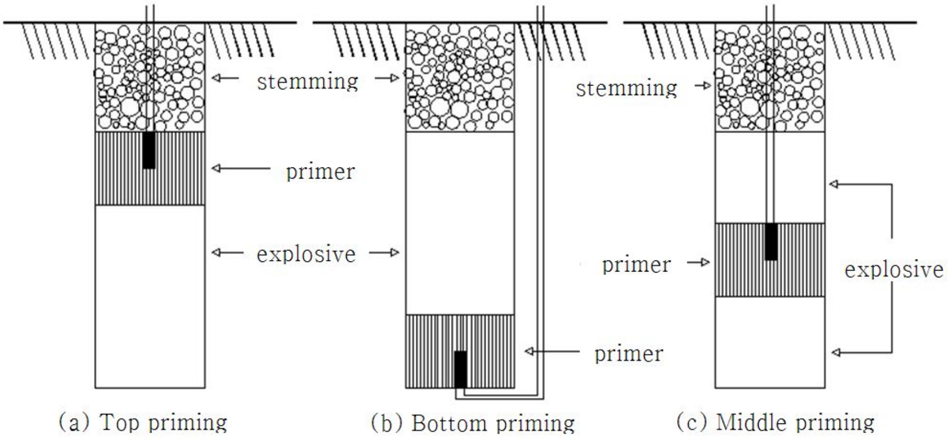


Figure 2.8 Position of primer

3. 현장 실험

3.1 연구지역의 지질개요

3.1.1 지형

군산시의 산지는 북동부의 취성산지, 중앙부의 금성산지, 서부의 영병산지의 3구역으로 나눌 수 있다. 취성산지는 옥구반도의 골격을 이루는 지대로 함라산(241m)에서 태초산 까지이다. 이 산지의 분포지대는 군산시의 북동부인 나포, 서수, 성산, 임피, 개정면이며, 구성암석은 선 캠브리아기의 화강암질 편마암이다. 본 연구지역은 군산시 나포면 서포리 산 21-8번지로 군산시의 북동부이고 취성산지의 서측 단부에 위치하고 있다(Figure 3.1).

Figure 3.1 Site map of study area

3.1.2 지질

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

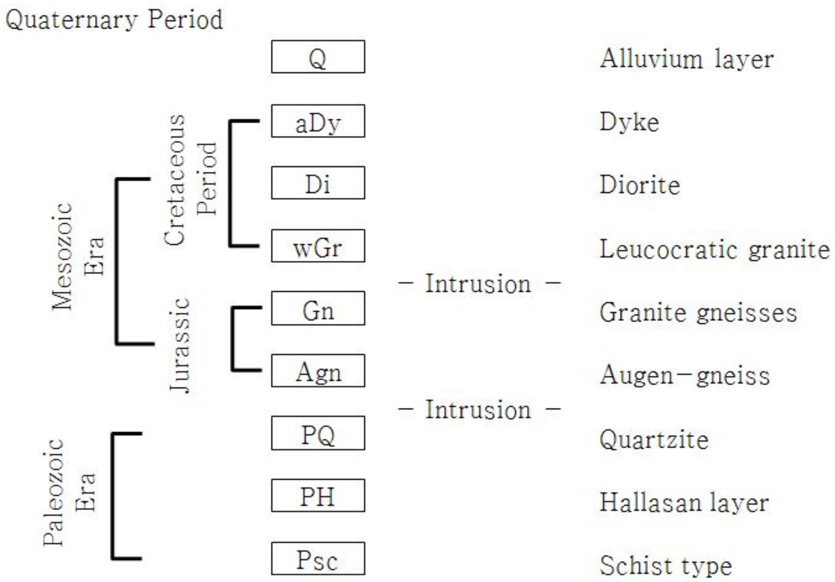


Figure 3.2 Geology genealogy of study area

3.2 물성시험

3.2.1 물성시험의 종류

암석 시료는 연구지역인 군산시의 북동부인 나포, 서수, 성산, 임피, 개정면의 선 캠브리아기의 화강암질 편마암 지역에서 블록 시험편을 채취하여 코어 천공기를 사용하여 NX 크기의 코어 시험편을 시추하였다. 다양한 실내실험을 위해 ISRM 규정에 맞도록 시험편을 성형·제작하였다.

시험 종류는 비중, 흡수율, 공극률, 탄성파 전파속도, 일축압축강도로, 각각 3회씩 실시하였다.

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

3.2.2 물성시험의 결과

(1) 비중, 공극률

비중, 공극률은 METTLER TOLEDO사의 AG Balance(Figure 3.3), desiccator 및 건조오븐을 사용하여 구하였다. 그 결과 비중은 2.635~2.646 g/cm^3 범위로 분포하며 평균 2.641g/cm^{3}이고, 공극률은 0.571~0.939% 범위로 분포하며 평균 0.778%로 측정되었다.

Figure 3.3 AG Balance

(2) 탄성파 전파속도 (P파속도)

탄성파 전파속도(P파속도)는 OYO사의 New Sonicviewer(Figure 3.4)로 P파의 전파속도를 구하였다. 그 결과 P파 전파속도는 4940~5510m/s 범위로 분포하며 평균 5363m/s로 측정되었다.

Figure 3.4 Sonic viewer (OYO Inc)

(3) 일축압축강도

일축압축강도는 만능재료시험기(Universal Testing Machine, UTM, Model No. KPUT-100)(Figure 3.5)를 사용하여 구하였다. 그 결과일축압축강도는 1136~1435kgf/cm^2 범위로 분포하며 평균 1321kgf/cm^{2}로 측정되었다.

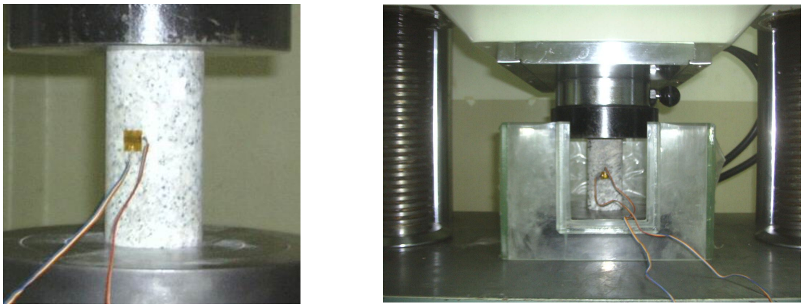


Figure 3.5 Uniaxial compressive strength test

(4) 탄성계수

탄성계수는 일축압축시험 시 구한 강도와 일축시험편에 부착한 CAS사의 스트레인 게이지를 통해 VISHAY사의 Portable Strain Indicator(Figure 3.6)에서 읽은 축 방향 변형률을 나누어 구하였다. 그 결과 탄성계수는 3.91~ 4.67×10^5kgf/cm^2 범위로 분포하며 평균 4.43×10^5kgf/cm^{2}로 측정되었다.

Figure 3.6 Strain gauge and portable strain indicator

다음 Table 3.1은 조사지역의 주요 실내실험 결과를 나타내었다.

Table 3.1 Result of rock property test

	range	average
Specific gravity (g/cm^3)	2.635~2.646	2.64
Porosity (%)	0.571~0.939	0.778
Uniaxial compressive strength (kgf/cm^2)	1136~1435	1321
P Wave velocity (m/s)	4940~5510	5363
Young's modulus ($\times 10^5$ kgf/cm^2)	3.91~4.67	4.43

3.3 현장개요

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

3.4 현장실험 방법 및 결과

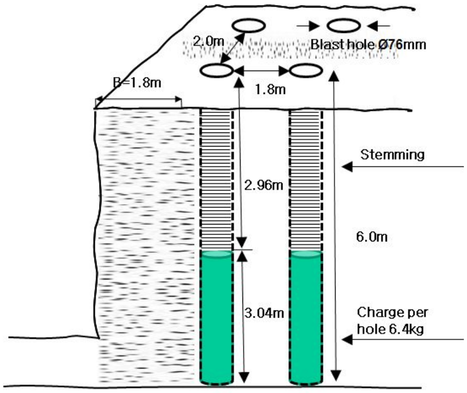
3.4.1 실험 방법

본 연구의 현장 실험지역은 군산시 나포면 서포리 산 21-8번지에 위치한 편마암지역에서 총 24회 발파에 대한 현장 실험을 실시하였다.

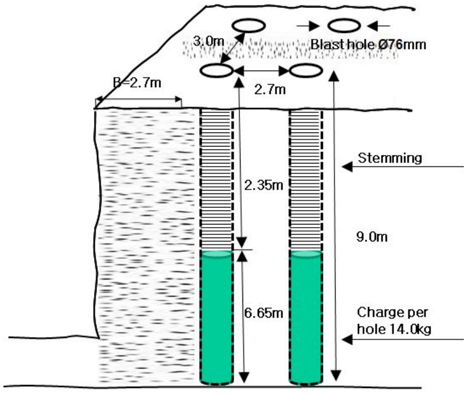
실험 조건은 Table 3.2와 같고, 1~12회 현장실험의 경우 NewMite(Φ50mm, 800g/ea) 폭약을 사용하였고, 13~24회는 MegaMEX(Φ50mm, 1000g/ea) 폭약을 사용하였으며 발파 패턴은 Figure 3.7과 같다.

Table 3.2 Experimental conditions

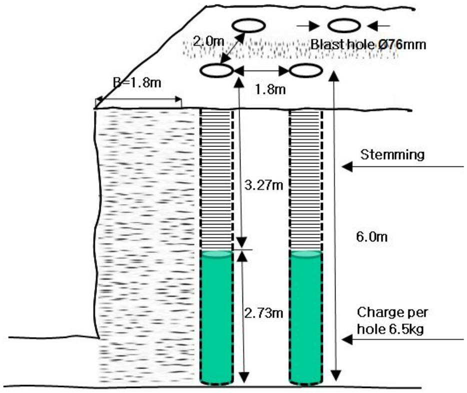
No.	1~6	7~12	13~18	19~24
Explosive	New MITE		Mega MEX	
Explosive diameter(mm)	Φ50			
Detonator	MS Detonator			
Diameter (mm)	76			
Drilling Length(m)	6.0	9.0	6.0	9.0
Spacing (m)	2.0	3.0	2.0	3.0
Burden (m)	1.8	2.7	1.8	2.7
Charge per hole(kg)	6.4	14	6.5	14
Charge per delay(kg)	6.4	14	6.5	14
Number of hole(ea)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



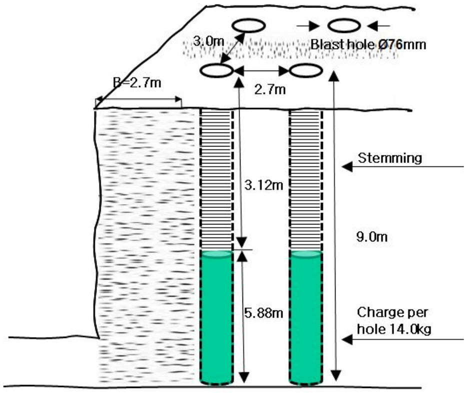
(a) Blasting pattern for holes of #1~#6



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



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



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

Figure 3.7 Blasting pattern; (a)~(d)

Table 3.3은 실험에 사용된 폭약의 주요 성능을 나타낸 표이며, Table 3.4는 각각의 변수에 따른 Case를 분류한 표이다.

Table 3.3 Main performance of explosives

Products	Average detonation Velocity (m/sec)	RWS (%)	Bulk Density (g/cc)	Heat Energy (kcal/kg)	Gas Volume (ℓ/kg)
NewMite Plus I	5,700	120	1.1 ~1.2	880	950
MegaMEX	6,000	160	1.2 ~1.3	1,300	865

Table 3.4 Case for test blasting

Case	Priming method	Drilling Length(m)	Explosive	Rock type
1	Top priming	6, 9	NewMITE	Gneiss
2	Middle priming	6, 9	NewMITE	
3	Bottom priming	6, 9	NewMITE	
4	Top priming	6, 9	MegaMEX	
5	Middle priming	6, 9	MegaMEX	
6	Bottom priming	6, 9	MegaMEX	

3.4.2 현장 실험의 계측

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

Blastmate Ⅱ, Ⅲ의 측정범위는 0.013~25.4cm/sec, eXAD-8의 측정범위는 0.051~25.4cm/sec이며, wave on은 0~25cm/sec이다. 주파수 분석을 수행하고자 할 때 모두 ZC(Zero Cross Frequency)와 고속 푸리에 변환(FFT, Fast Fourier Transform)이 가능하며 USBM/OSMRE와 DIN4150 주파수 분석이 가능하다.

Figure 3.8은 실험 현장의 사진 및 계측 장면이다.

Figure 3.8 Measurement view of study area

3.4.3 현장 실험 계측 결과

Table 3.2의 발파조건과 Figure 3.7의 발파패턴으로 총 24회에 걸쳐 실시된 발파 진동 계측 결과 총 461개의 자료를 획득하였으며 계측된 자료는 Table 3.5~3.10과 같다. 그리고 발파 진동의 계측은 Figure 3.8과 같이 11~20대의 계측기를 사용하여 발파 지점과 7~109m의 거리에서 행해 졌다.

Table 3.5~3.10의 현장 실험 계측결과에 따르면 최대 입자 속도(PPV, Peak Particle Velocity)의 경우 0.031~19.8cm/sec로 계측되었다.

Table 3.5 Measurement results of Case 1

No.	Distance (m)	PPV_{max} (cm/sec)	No.	Distance (m)	PPV_{max} (cm/sec)
1	16	4.080	40	33	0.444
2	13	4.720	41	37	0.330
3	9	19.200	42	40	0.289
4	7	19.800	43	43	0.229
5	13	8.310	44	48	0.221
6	16	5.190	45	51	0.330
7	22	5.970	46	54	0.224
8	25	1.490	47	57	0.165
9	29	0.787	48	59	0.216
10	33	0.940	49	62	0.190
11	36	0.864	50	65	0.141
12	40	0.695	51	69	0.210
13	45	0.541	52	72	0.188
14	49	0.534	53	78	0.266
15	53	0.532	54	83	0.073
16	62	1.030	55	88	0.056
17	67	0.242	56	89	0.065
18	72	0.210	57	93	0.042
19	16	4.600	58	28	1.680
20	13	5.610	59	32	1.600
21	10	11.400	60	38	1.300
22	10	14.400	61	39	1.130
23	13	3.130	62	43	0.843
24	16	3.870	63	46	0.787
25	19	2.350	64	50	0.508
26	24	3.280	65	52	0.838
27	27	0.864	66	56	0.397
28	31	0.673	67	58	0.419
29	35	0.610	68	60	0.406
30	38	0.851	69	62	0.406
31	42	0.581	70	66	0.286
32	46	0.497	71	69	0.307
33	51	0.412	72	72	0.222
34	55	0.398	73	78	0.605
35	64	0.795	74	82	0.144
36	69	0.200	75	86	0.144
37	73	0.149	76	90	0.226
38	25	0.559	77	94	0.125
39	27	0.552			

Table 3.6 Measurement results of Case 2

No.	Distance (m)	PPV_{max} (cm/sec)	No.	Distance (m)	PPV_{max} (cm/sec)
1	16	4.910	39	29	1.510
2	14	4.930	40	32	1.560
3	13	9.320	41	38	1.370
4	14	7.650	42	42	1.100
5	17	2.080	43	45	0.870
6	20	1.880	44	48	0.864
7	23	1.280	45	53	0.662
8	28	1.690	46	55	0.775
9	31	0.554	47	59	0.400
10	35	0.660	48	62	0.419
11	38	0.432	49	63	0.318
12	41	0.571	50	66	0.495
13	44	0.449	51	73	0.298
14	48	0.324	52	76	0.244
15	53	0.266	53	82	0.571
16	57	0.239	54	86	0.142
17	64	0.578	55	90	0.124
18	69	0.144	56	93	0.246
19	73	0.100	57	97	0.137
20	16	4.530	58	31	1.130
21	15	4.910	59	35	1.400
22	16	7.200	60	41	1.210
23	16	5.930	61	45	0.902
24	19	1.570	62	47	0.813
25	22	1.330	63	52	0.571
26	25	0.775	64	57	0.464
27	30	1.320	65	59	0.724
28	33	0.638	66	63	0.332
29	37	0.698	67	66	0.394
30	40	0.318	68	68	0.203
31	42	0.381	69	70	0.292
32	46	0.370	70	77	0.188
33	50	0.302	71	80	0.210
34	54	0.193	72	86	0.517
35	58	0.220	73	91	0.127
36	65	0.578	74	94	0.095
37	70	0.154	75	97	0.193
38	74	0.112	76	101	0.106

Table 3.7 Measurement results of Case 3

No.	Distance (m)	PPV_{max} (cm/sec)	No.	Distance (m)	PPV_{max} (cm/sec)
1	16	2.360	37	78	0.122
2	16	2.500	38	34	0.965
3	16	3.430	39	38	0.773
4	18	3.070	40	45	0.787
5	21	1.250	41	49	0.635
6	24	1.240	42	52	0.594
7	27	0.560	43	56	0.457
8	32	1.890	44	63	0.660
9	35	0.579	45	70	0.317
10	38	0.635	46	71	0.216
11	42	0.305	47	74	0.241
12	44	0.406	48	81	0.190
13	48	0.332	49	84	0.190
14	52	0.340	50	90	0.456
15	56	0.215	51	94	0.095
16	59	0.222	52	98	0.078
17	67	0.578	53	100	0.164
18	72	0.183	54	104	0.077
19	77	0.110	55	36	0.584
20	16	1.880	56	41	0.773
21	18	2.730	57	48	0.546
22	19	3.860	58	52	0.508
23	21	2.770	59	56	0.403
24	28	1.020	60	59	0.305
25	31	0.519	61	66	0.368
26	36	1.980	62	73	0.216
27	38	0.579	63	75	0.191
28	42	0.686	64	77	0.165
29	45	0.267	65	84	0.164
30	48	0.483	66	87	0.178
31	51	0.340	67	93	0.325
32	54	0.418	68	97	0.088
33	59	0.281	69	101	0.085
34	62	0.312	70	103	0.099
35	69	0.617	71	107	0.039
36	74	0.237			

Table 3.8 Measurement results of Case 4

No.	Distance (m)	PPV_{max} (cm/sec)	No.	Distance (m)	PPV_{max} (cm/sec)
1	26	0.432	41	24	1.510
2	27	0.492	42	29	1.420
3	30	0.381	43	35	1.130
4	33	0.330	44	39	0.978
5	36	0.297	45	43	0.883
6	38	0.216	46	46	0.673
7	43	0.187	47	51	0.425
8	45	0.394	48	54	1.120
9	48	0.256	49	58	0.522
10	50	0.190	50	61	0.584
11	52	0.267	51	63	0.343
12	54	0.229	52	66	0.368
13	58	0.100	53	70	0.367
14	61	0.251	54	73	0.249
15	64	0.168	55	77	0.283
16	70	0.288	56	83	0.734
17	75	0.095	57	88	0.168
18	79	0.068	58	92	0.124
19	80	0.129	59	94	0.253
20	86	0.062	60	98	0.142
21	29	0.495	61	25	1.230
22	30	0.411	62	29	0.953
23	33	0.406	63	34	0.914
24	36	0.317	64	38	0.711
25	39	0.348	65	42	0.711
26	41	0.279	66	45	0.597
27	45	0.257	67	50	0.403
28	47	0.597	68	52	0.876
29	50	0.305	69	56	0.473
30	53	0.241	70	59	0.444
31	54	0.241	71	61	0.330
32	56	0.229	72	63	0.356
33	59	0.179	73	67	0.321
34	63	0.242	74	71	0.278
35	66	0.210	75	74	0.286
36	72	0.344	76	80	0.691
37	76	0.105	77	84	0.151
38	80	0.076	78	88	0.137
39	83	0.135	79	91	0.242
40	87	0.062	80	95	0.118

Table 3.9 Measurement results of Case 5

No.	Distance (m)	PPV_{max} (cm/sec)	No.	Distance (m)	PPV_{max} (cm/sec)
1	27	0.495	40	88	0.031
2	30	0.505	41	31	1.490
3	34	0.571	42	35	1.500
4	37	0.508	43	41	1.180
5	40	0.381	44	45	0.991
6	43	0.229	45	48	0.972
7	47	0.184	46	52	0.775
8	49	0.394	47	57	0.508
9	53	0.268	48	59	1.320
10	55	0.203	49	63	0.606
11	56	0.254	50	66	0.660
12	59	0.190	51	68	0.406
13	62	0.132	52	70	0.457
14	66	0.220	53	74	0.487
15	69	0.178	54	77	0.303
16	74	0.237	55	80	0.349
17	78	0.122	56	86	0.803
18	83	0.083	57	91	0.220
19	85	0.122	58	94	0.181
20	89	0.065	59	98	0.280
21	25	0.571	60	102	0.125
22	27	0.460	61	22	2.320
23	31	0.444	62	26	2.160
24	34	0.330	63	33	1.890
25	37	0.235	64	37	1.330
26	40	0.216	65	41	0.994
27	44	0.179	66	44	1.000
28	46	0.229	67	52	0.991
29	50	0.173	68	59	0.508
30	52	0.190	69	61	0.445
31	54	0.178	70	64	0.483
32	56	0.127	71	72	0.322
33	60	0.113	72	75	0.234
34	63	0.124	73	83	0.652
35	65	0.132	74	86	0.168
36	72	0.227	75	90	0.154
37	76	0.073	76	94	0.239
38	81	0.056	77	98	0.105
39	84	0.071			

Table 3.10 Measurement results of Case 6

No.	Distance (m)	PPV_{max} (cm/sec)	No.	Distance (m)	PPV_{max} (cm/sec)
1	24	0.597	41	34	0.914
2	25	0.481	42	39	0.914
3	28	0.444	43	46	0.711
4	31	0.356	44	50	0.508
5	34	0.303	45	54	0.500
6	37	0.279	46	57	0.432
7	41	0.243	47	62	0.321
8	43	0.343	48	65	0.838
9	46	0.181	49	69	0.429
10	49	0.241	50	71	0.432
11	50	0.165	51	73	0.254
12	53	0.140	52	76	0.292
13	56	0.095	53	79	0.310
14	60	0.142	54	83	0.249
15	65	0.129	55	86	0.256
16	69	0.298	56	92	0.488
17	74	0.068	57	96	0.159
18	79	0.088	58	100	0.151
19	81	0.101	59	102	0.147
20	85	0.039	60	106	0.078
21	23	0.876	61	36	1.450
22	26	0.735	62	41	1.160
23	30	0.648	63	48	1.130
24	33	0.622	64	52	0.749
25	36	0.464	65	56	0.797
26	39	0.343	66	60	0.673
27	44	0.365	67	65	0.486
28	46	0.521	68	68	1.080
29	50	0.229	69	71	0.659
30	53	0.330	70	74	0.660
31	54	0.254	71	76	0.381
32	57	0.165	72	79	0.444
33	61	0.138	73	82	0.491
34	64	0.195	74	86	0.344
35	68	0.161	75	89	0.356
36	74	0.383	76	95	0.688
37	79	0.098	77	99	0.173
38	82	0.076	78	103	0.203
39	85	0.120	79	105	0.266
40	89	0.049	80	109	0.113

4. 분석

4.1 발파진동 회귀분석 및 예측

Table 3.5와 3.10에 제시된 값을 통하여 회귀분석에 의해서 입지상수 K와 n을 구하기 위하여 최대진동속도와 환산거리의 로그-로그 그래프 상에서 1차 상관관계를 보이는 특성을 이용해 통계 처리를 통하여 발파진동 자료의 전산처리는 TunDesign^{TM}4의 TDTestBlast를 이용하여 도출한 발파진동 예측식을 구하였다.

4.1.1 Case 1의 발파진동예측식

(1) 자승근

50 % 신뢰수준 $V = 147.27\left(\dfrac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-2.13}$

95 % 신뢰수준 $V = 392.19\left(\dfrac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-2.13}$ $r = 0.86$ (4.1)

(2) 삼승근

50 % 신뢰수준 $V = 329.53\left(\dfrac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-2.13}$

95 % 신뢰수준 $V = 986.99\left(\dfrac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-2.13}$ $r = 0.89$ (4.2)

식 (4.1)은 자승근의 50%와 95%의 신뢰수준의 식으로 K 값은 50%가

147.27, 95%가 392.19, n 값은 모두 -2.13 그리고 상관계수(r)는 0.86으로 나타났다.

식 (4.2)는 삼승근의 50%와 95%의 신뢰수준의 식으로 K 값은 50%가 329.53, 95%가 986.99, n 값은 모두 -2.13 그리고 상관계수(r)는 0.89로 나타났다.

Figure 4.1과 4.2는 각각 자승근과 삼승근 환산거리와 진동속도와의 관계를 나타내는 그림이다.

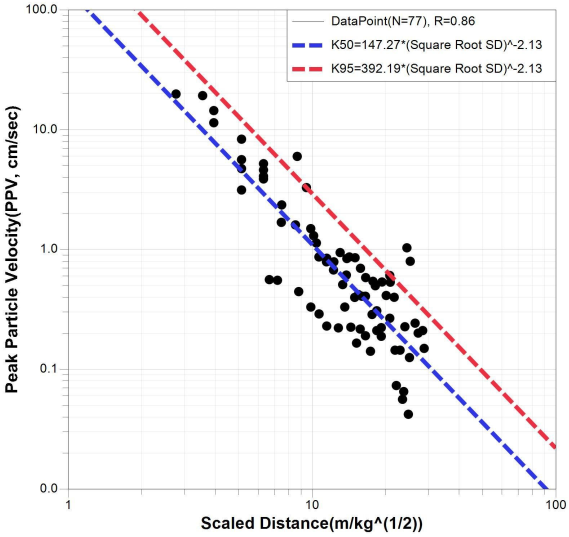


Figure 4.1 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance of Case 1

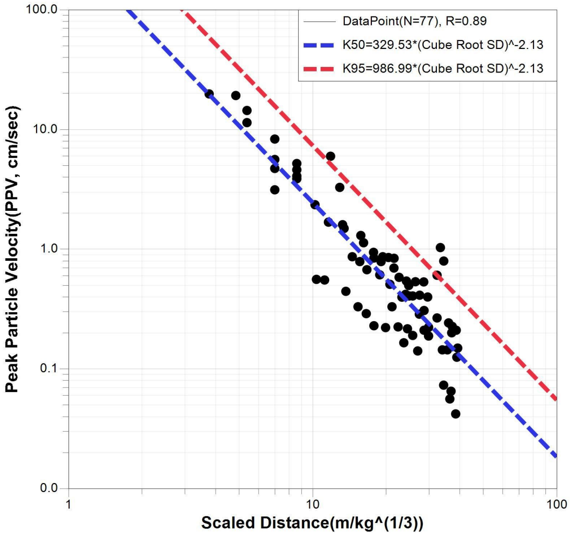


Figure 4.2 Relationship between peak particle velocity and cube root scaled distance of Case 1

4.1.2 Case 2의 발파진동예측식

(1) 자승근

50 % 신뢰수준 $V = 219.68\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-2.21}$

95 % 신뢰수준 $V = 531.42\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-2.21}$ $r = 0.94$ (4.3)

(2) 삼승근

50 % 신뢰수준 $V = 382.33\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-2.12}$

95 % 신뢰수준 $V = 1023.18\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-2.12}$ $r = 0.94$ (4.4)

식 (4.3)은 자승근의 50%와 95%의 신뢰수준의 식으로 K 값은 50%가 219.68, 95%가 531.42, n 값은 모두 -2.21 그리고 상관계수(r)는 0.94로 나타났다.

식 (4.4)는 삼승근의 50%와 95%의 신뢰수준의 식으로 K 값은 50%가 382.33, 95%가 1023.18, n 값은 모두 -2.12 그리고 상관계수(r)는 0.94로 나타났다.

Figure 4.3과 4.4는 각각 자승근과 삼승근 환산거리와 진동속도와의 관계를 나타내는 그림이다.

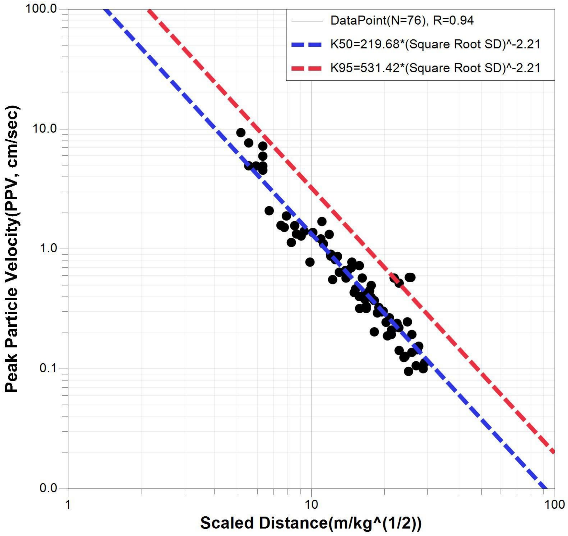


Figure 4.3 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance of Case 2

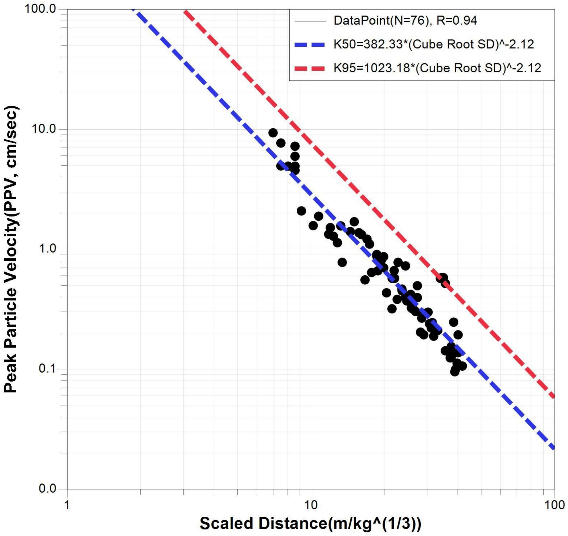


Figure 4.4 Relationship between peak particle velocity and cube root scaled distance of Case 2

4.1.3 Case 3의 발파진동예측식

(1) 자승근

50 % 신뢰수준 $V = 111.14\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.99}$

95 % 신뢰수준 $V = 297.67\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.99}$ $r = 0.88$ (4.5)

(2) 삼승근

50 % 신뢰수준 $V = 209.17\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-1.96}$

95 % 신뢰수준 $V = 548.85\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-1.96}$ $r = 0.90$ (4.6)

식 (4.5)는 자승근의 50%와 95%의 신뢰수준의 식으로 K 값은 50%가 111.14, 95%가 297.67, n 값은 모두 -1.99 그리고 상관계수(r)는 0.88로 나타났다.

식 (4.6)은 삼승근의 50%와 95%의 신뢰수준의 식으로 K 값은 50%가 209.17, 95%가 548.85, n 값은 모두 -1.96 그리고 상관계수(r)는 0.90으로 나타났다.

Figure 4.5와 4.6은 각각 자승근과 삼승근 환산거리와 진동속도와의 관계를 나타내는 그림이다.

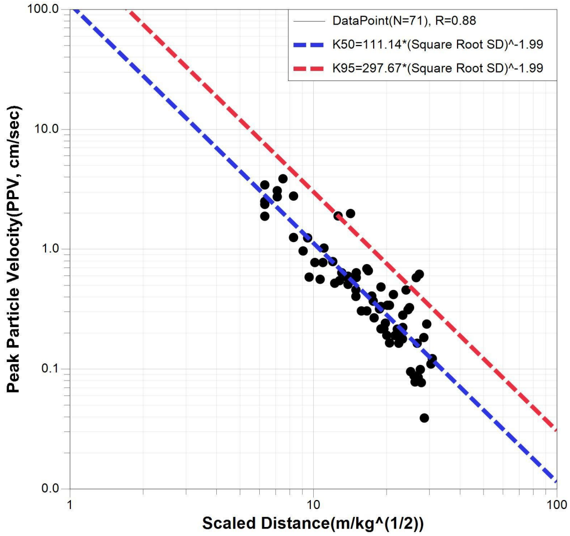


Figure 4.5 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance of Case 3

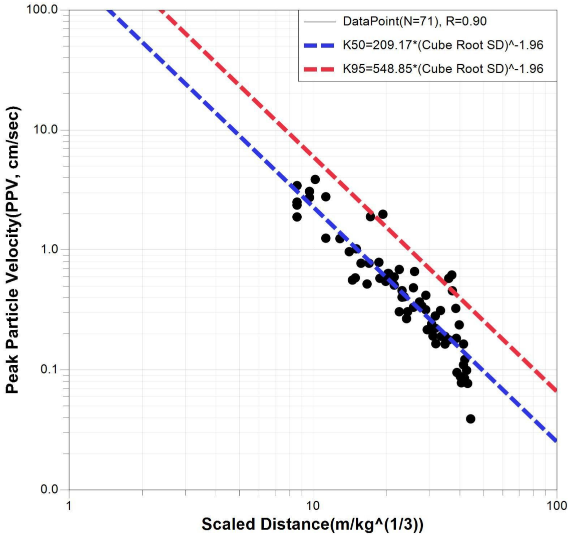


Figure 4.6 Relationship between peak particle velocity and cube root scaled distance of Case 3

4.1.4 Case 4의 발파진동예측식

(1) 자승근

50 % 신뢰수준 $V=30.35\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.60}$

95 % 신뢰수준 $V=71.34\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.60}$ $r=0.85$ (4.7)

(2) 삼승근

50 % 신뢰수준 $V=53.11\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-1.58}$

95 % 신뢰수준 $V=113.71\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-1.58}$ $r=0.80$ (4.8)

식 (4.7)은 자승근의 50%와 95%의 신뢰수준의 식으로 K 값은 50%가 30.35, 95%가 71.34, n 값은 모두 -1.60 그리고 상관계수(r)는 0.85로 나타났다.

식 (4.8)은 삼승근의 50%와 95%의 신뢰수준의 식으로 K 값은 50%가 53.11, 95%가 113.71, n 값은 모두 -1.58 그리고 상관계수(r)는 0.80으로 나타났다.

Figure 4.7과 4.8은 각각 자승근과 삼승근 환산거리와 진동속도와의 관계를 나타내는 그림이다.

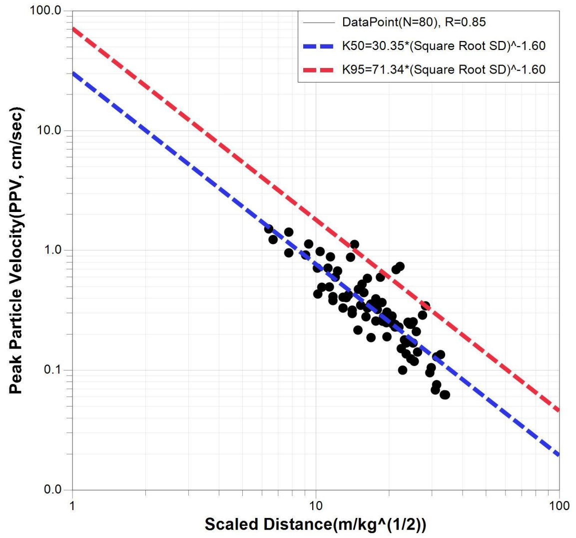


Figure 4.7 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance of Case 4

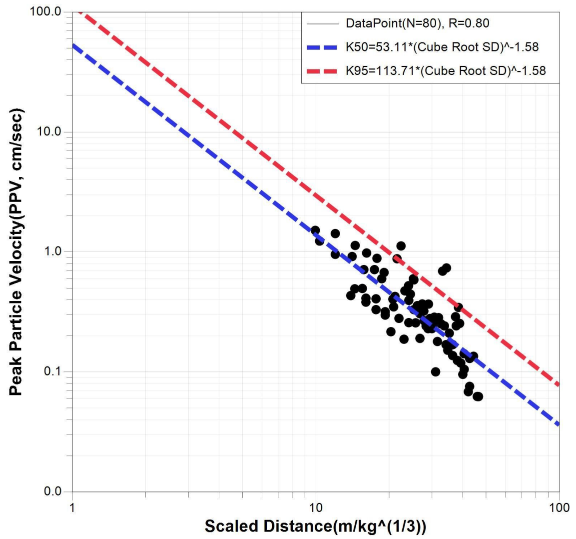


Figure 4.8 Relationship between peak particle velocity and cube root scaled distance of Case 4

4.1.5 Case 5의 발파진동예측식

(1) 자승근

50 % 신뢰수준 $V = 100.89\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.98}$

95 % 신뢰수준 $V = 196.36\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.98}$ $r = 0.86$ (4.9)

(2) 삼승근

50 % 신뢰수준 $V = 169.21\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-1.92}$

95 % 신뢰수준 $V = 374.81\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-1.92}$ $r = 0.80$ (4.10)

식 (4.9)는 자승근의 50%와 95%의 신뢰수준의 식으로 K 값은 50%가 100.89, 95%가 196.36, n 값은 모두 -1.98 그리고 상관계수(r)는 0.86으로 나타났다.

식 (4.10)은 삼승근의 50%와 95%의 신뢰수준의 식으로 K 값은 50%가 169.21, 95%가 374.81, n 값은 모두 -1.92 그리고 상관계수(r)는 0.80으로 나타났다.

Figure 4.9와 4.10은 각각 자승근과 삼승근 환산거리와 진동속도와의 관계를 나타내는 그림이다.

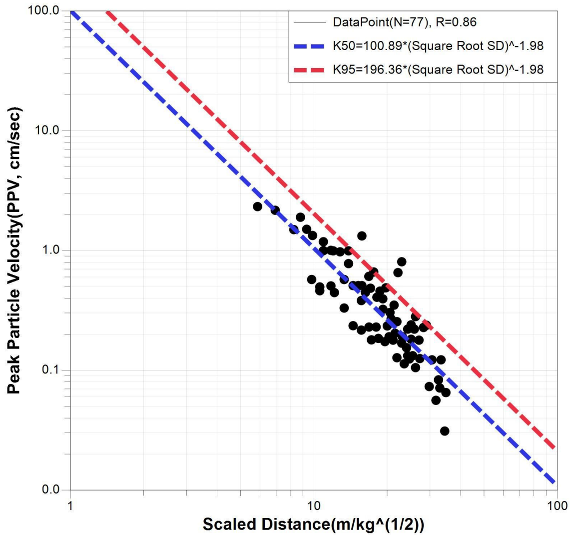


Figure 4.9 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance of Case 5

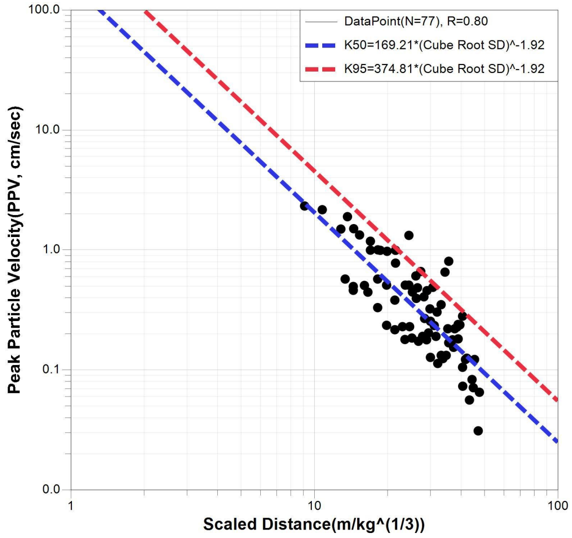


Figure 4.10 Relationship between peak particle velocity and cube root scaled distance of Case 5

4.1.6 Case 6의 발파진동예측식

(1) 자승근

50 % 신뢰수준 $V = 48.39\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.72}$

95 % 신뢰수준 $V = 120.02\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.72}$ $r = 0.77$ (4.11)

(2) 삼승근

50 % 신뢰수준 $V = 49.71\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-1.53}$

95 % 신뢰수준 $V = 129.67\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-1.53}$ $r = 0.70$ (4.12)

식 (4.11)은 자승근의 50%와 95%의 신뢰수준의 식으로 K 값은 50%가 48.39, 95%가 120.02, n 값은 모두 -1.72 그리고 상관계수(r)는 0.77로 나타났다.

식 (4.12)는 삼승근의 50%와 95%의 신뢰수준의 식으로 K 값은 50%가 49.71, 95%가 129.67, n 값은 모두 -1.53 그리고 상관계수(r)는 0.70으로 나타났다.

Figure 4.11과 4.12는 각각 자승근과 삼승근 환산거리와 진동속도와의 관계를 나타내는 그림이다.

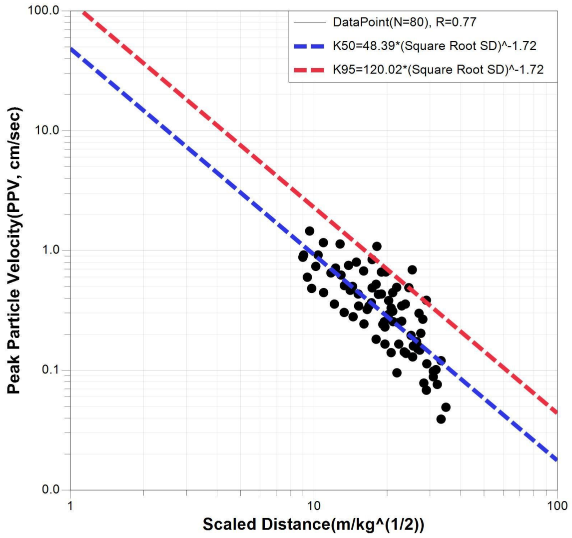


Figure 4.11 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance of Case 6

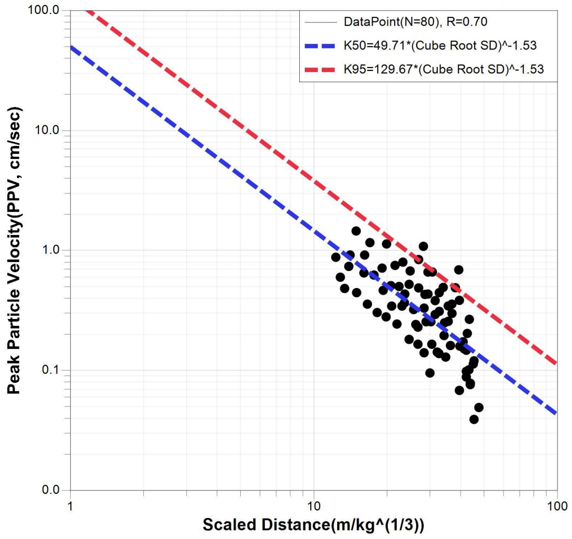


Figure 4.12 Relationship between peak particle velocity and cube root scaled distance of Case 6

5. 고찰

5.1 폭약의 종류에 따른 상관관계 고찰

현장 실험을 통해 계측된 지반진동 데이터를 폭약별로 수집하여 회귀분석을 실시한 결과 지반진동 예측식은 Table 5.1과 같다.

동일한 발파에서 입지상수(K) 값이 클수록 진동이 크게 나타나고 n 값은 작을수록 진동이 멀리 전파되고 감쇠가 적다. Table 5.1을 보면 NewMite의 경우 입지상수(K_{50}) 값이 자승근의 경우 151.65, 삼승근의 경우 301.86, n 값은 자승근의 경우 -2.11, 삼승근의 경우 -2.07로 분석되었고, MegaMEX는 입지상수(K_{50}) 값이 자승근의 경우 51.40, 삼승근의 경우 74.73, n 값은 자승근의 경우 -1.76, 삼승근의 경우 -1.67로 분석되었다. 이와 같은 분석결과를 보면 NewMite의 경우 동일한 발파 조건에서 지반진동이 MegaMEX보다 더 크게 나타나지만 감쇠가 커서 진동이 멀리 전파되지 않은 특징이 나타났다(Figure 5.1).

Figure 5.2는 폭약의 종류에 따른 자승근 평균 지반진동 예측식을 이용하여 0.5, 1.6, 5.0, 15.0kg 장약량으로 거리별 예측 지반 진동치를 도시하였다.

장약량이 0.5kg이면 거리가 15m 이내는 PPVnew(NewMite의 최대 지반진동치)가 PPVmega(MegaMEX의 최대 지반진동치)보다 더 크게 예측되었고, 15m 이상에서는 PPVmega가 더 크게 예측되었다.

장약량이 1.6kg이면 거리가 27m 이내는 PPVnew(NewMite의 최대 지반진동치)가 PPVmega(MegaMEX의 최대 지반진동치)보다 더 크게 예측되었고, 27m 이상에서는 PPVmega가 더 크게 예측되었다.

장약량이 5.0kg이면 거리가 49m 이내는 PPVnew(NewMite의 최대 지반진

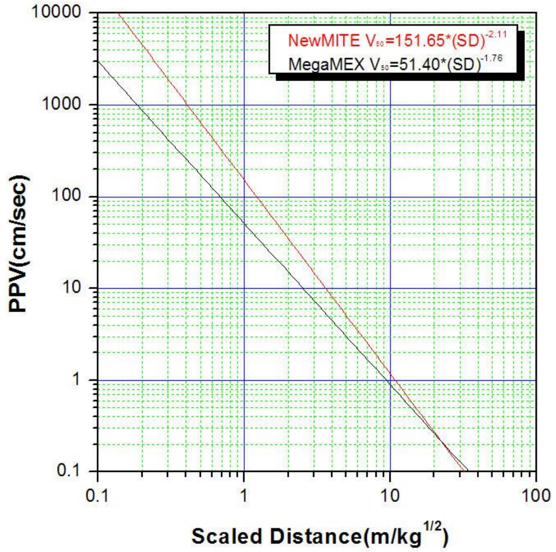
동치)가 PPVmega(MegaMEX의 최대 지반진동치)보다 더 크게 예측되었고, 49m 이상에서는 PPVmega가 더 크게 예측되었다.

장약량이 15.0kg이면 거리가 85m 이내는 PPVnew(NewMite의 최대 지반진동치)가 PPVmega(MegaMEX의 최대 지반진동치)보다 더 크게 예측되었고, 85m 이상에서는 PPVmega가 더 크게 예측되었다.

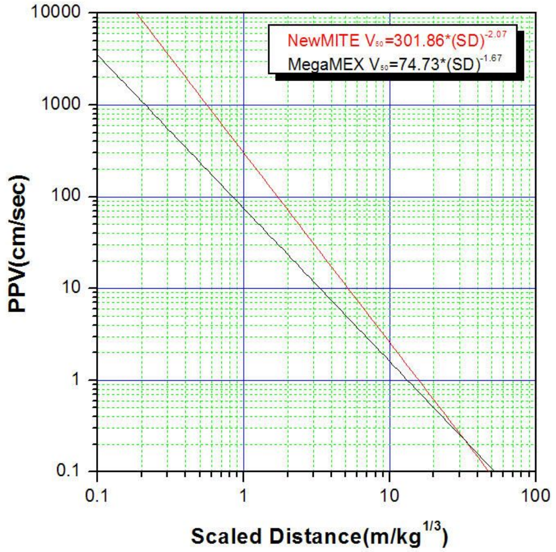
이상의 결과를 보면 근거리에서는 MegaMEX, 원거리에서는 NewMite 진동제어 측면에서 더 유리하게 분석되었다.

Table 5.1 Prediction equation of blasting vibration by explosive type

Explosive type	Square root method			Cube root method			N	Remarks
	Prediction equation		R	Prediction equation		R		
NewMITE	50%	$K_{50} = 151.65\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-2.11}$	0.89	50%	$K_{50} = 301.86\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-2.07}$	0.91	224	Case 1~3
	95%	$K_{50} = 374.54\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-2.11}$		95%	$K_{50} = 816.24\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-2.07}$			
MegaMEX	50%	$K_{50} = 51.40\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.76}$	0.82	50%	$K_{50} = 74.73\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-1.67}$	0.76	237	Case 4~6
	95%	$K_{50} = 122.07\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.76}$		95%	$K_{50} = 187.57\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-1.67}$			



(a) Square root method



(b) Cube root method

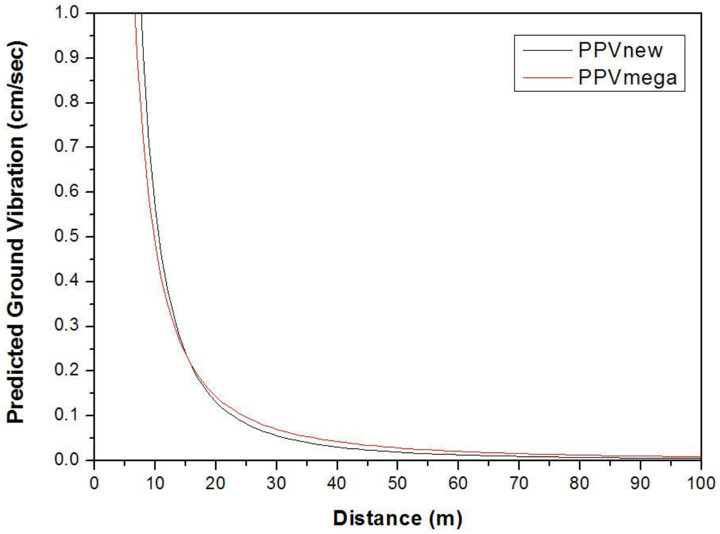
Figure 5.1 Relationship between peak particle velocity and scaled distance by explosive type

gTable 5.2 Predicted vibration velocity by explosive type according to weight per delay

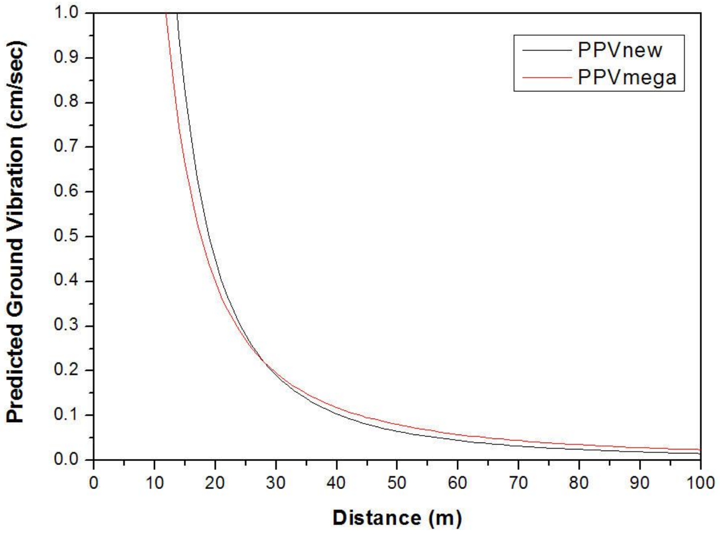
Weight per delay / Distance	0.5kg		1.6kg	
	PPVnew (cm/sec)	PPVmega (cm/sec)	PPVnew (cm/sec)	PPVmega (cm/sec)
1	72.99	27.93	248.99	77.73
2	16.91	8.25	57.68	22.95
3	7.19	4.04	24.52	11.24
4	3.92	2.43	13.36	6.78
5	2.45	1.64	8.34	4.58
10	0.57	0.49	1.93	1.35
15	0.24	0.24	0.82	0.66
20	0.13	0.14	0.45	0.40
25	0.08	0.10	0.28	0.27
30	0.06	0.07	0.19	0.20
35	0.04	0.05	0.14	0.15
40	0.03	0.04	0.10	0.12
45	0.02	0.03	0.08	0.10
50	0.02	0.03	0.06	0.08
55	0.02	0.02	0.05	0.07
60	0.01	0.02	0.04	0.06
65	0.01	0.02	0.04	0.05
70	0.01	0.02	0.03	0.04
75	0.01	0.01	0.03	0.04
80	0.01	0.01	0.02	0.03
85	0.01	0.01	0.02	0.03
90	0.01	0.01	0.02	0.03
95	0.00	0.01	0.02	0.03
100	0.00	0.01	0.02	0.02

Table 5.2 Continued

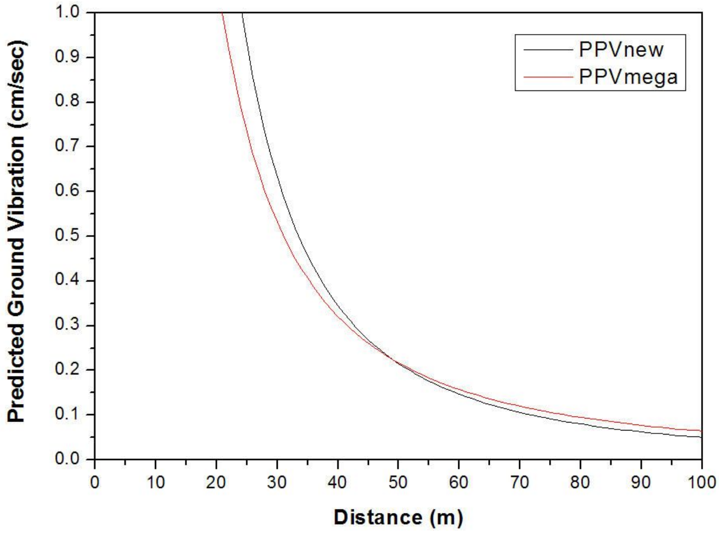
Distance \ Weight per delay	5.0kg		15kg	
	PPVnew (cm/sec)	PPVmega (cm/sec)	PPVnew (cm/sec)	PPVmega (cm/sec)
1	828.43	211.86	2640.09	557.09
2	191.90	62.55	611.57	164.48
3	81.57	30.64	259.95	80.57
4	44.45	18.47	141.67	48.56
5	27.76	12.47	88.47	32.79
10	6.43	3.68	20.49	9.68
15	2.73	1.80	8.71	4.74
20	1.49	1.09	4.75	2.86
25	0.93	0.73	2.96	1.93
30	0.63	0.53	2.02	1.40
35	0.46	0.41	1.46	1.07
40	0.35	0.32	1.10	0.84
45	0.27	0.26	0.86	0.69
50	0.22	0.22	0.69	0.57
55	0.18	0.18	0.56	0.48
60	0.15	0.16	0.47	0.41
65	0.12	0.14	0.39	0.36
70	0.11	0.12	0.34	0.32
75	0.09	0.11	0.29	0.28
80	0.08	0.09	0.25	0.25
85	0.07	0.09	0.22	0.22
90	0.06	0.08	0.20	0.20
95	0.06	0.07	0.18	0.18
100	0.05	0.06	0.16	0.17



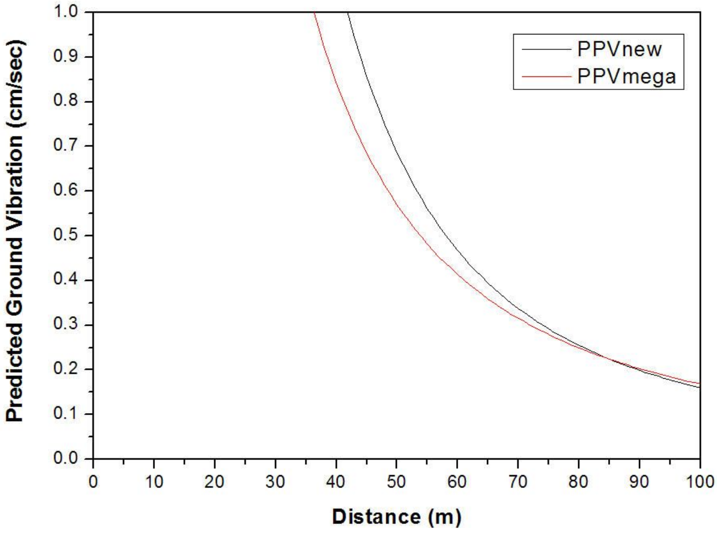
(a) weight = 0.5kg



(b) weight = 1.6kg



(c) weight = 5.0kg



(d) weight = 15kg

Figure 5.2 Relationship between predicted ground vibration velocity and distance by explosive type

5.2 기폭위치에 따른 상관관계 고찰

동일한 발파에서 입지상수(K) 값이 클수록 진동이 크게 나타나고 n 값은 작을수록 진동이 멀리 전파되고 감쇠가 적다.

현장 실험을 통해 계측된 지반진동 데이터를 기폭위치별로 수집하여 회귀분석을 실시한 결과 지반진동 예측식은 Table 5.3과 같다.

Table 5.3을 보면 정기폭의 경우 입지상수(K_{50}) 값이 자승근의 경우 96.48, 삼승근의 경우 212.85, n 값은 자승근의 경우 -1.98, 삼승근의 경우 -2.00, 중간기폭은 입지상수(K_{50}) 값이 자승근의 경우 176.86, 삼승근의 경우 318.71, n 값은 자승근의 경우 -2.16, 삼승근의 경우 -2.09, 역기폭은 입지상수(K_{50}) 값이 자승근의 경우 81.36, 삼승근의 경우 123.74, n 값은 자승근의 경우 -1.89, 삼승근의 경우 -1.80으로 분석되었다. 이와 같은 분석결과를 보면 입지상수와 n값이 가장 큰 중간기폭이 진동 값이 가장 크게 나타나고 감쇠가 커서 진동이 멀리 전파되지 않고 역기폭은 다른 기폭위치보다 진동 값이 크지 않으나 감쇠가 크지 않아서 진동이 멀리 전파하는 특징을 알 수 있다(Figure 5.3).

기폭위치에 따른 자승근 평균 지반진동 예측식을 이용하여 0.5, 1.6, 5.0, 15.0kg 장약량으로 거리별 예측 지반 진동치를 Table 5.4에 나타내고, Figure 5.4에 도시하였다.

장약량이 0.5kg이면 거리가 4m 이내는 PPVm.p(중간기폭의 최대 지반진동치) > PPVt.p(정기폭의 최대 지반진동치) > PPVb.p(역기폭의 최대 지반진동치), 5~12m는 PPVm.p > PPVb.p > PPVt.p, 13~20m는 PPVb.p > PPVm.p > PPVt.p, 21m 이상은 PPVb.p > PPVt.p > PPVm.p의 순으로 지반 진동치가 예측되었다.

장약량이 1.6kg이면 거리가 8m 이내는 PPVm.p > PPVt.p > PPVb.p,

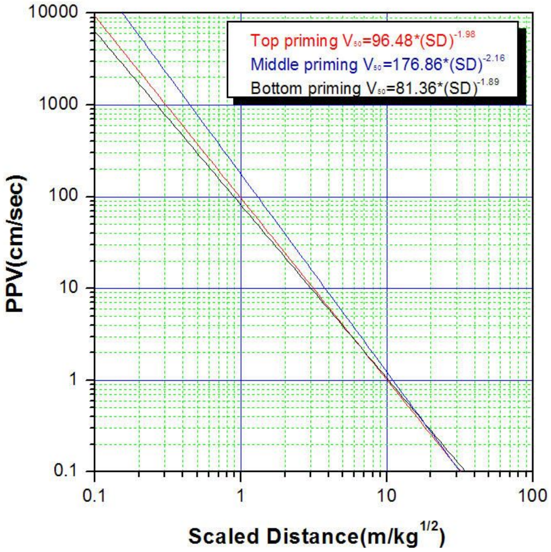
9~22m는 PPVm.p > PPVb.p > PPVt.p, 23~36m는 PPVb.p > PPVm.p > PPVt.p, 37m 이상은 PPVb.p > PPVt.p > PPVm.p의 순으로 지반 진동치가 예측되었다.

장약량이 5.0kg이면 거리가 14m 이내는 PPVm.p > PPVt.p > PPVb.p, 15~39m는 PPVm.p > PPVb.p > PPVt.p, 40~64m는 PPVb.p > PPVm.p > PPVt.p, 65m 이상은 PPVb.p > PPVt.p > PPVm.p의 순으로 지반 진동치가 예측되었다.

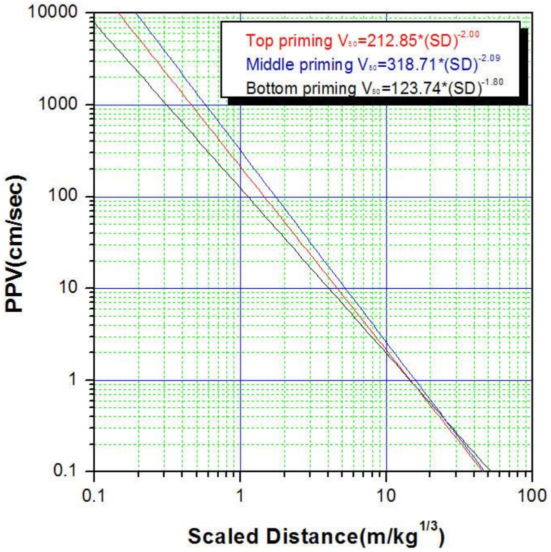
장약량이 15.0kg이면 거리가 25m 이내는 PPVm.p > PPVt.p > PPVb.p, 26~68m는 PPVm.p > PPVb.p > PPVt.p, 69~112m는 PPVb.p > PPVm.p > PPVt.p, 113m 이상은 PPVb.p > PPVt.p > PPVm.p의 순으로 지반 진동치가 예측되었다.

Table 5.3 Prediction equation of blasting vibration by priming location

Priming location	Square root method			Cube root method			N	Remarks
	Prediction equation		R	Prediction equation		R		
Top priming	50%	$K_{50} = 96.48\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.98}$	0.86	50%	$K_{50} = 212.85\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-2.00}$	0.88	157	Case 1, 4
	95%	$K_{95} = 249.39\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.98}$		95%	$K_{95} = 544.02\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-2.00}$			
Middle priming	50%	$K_{50} = 176.86\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-2.16}$	0.92	50%	$K_{50} = 318.71\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-2.09}$	0.89	153	Case 2, 5
	95%	$K_{95} = 384.43\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-2.16}$		95%	$K_{50} = 661.70\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-2.09}$			
Bottom priming	50%	$K_{50} = 81.36\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.89}$	0.84	50%	$K_{50} = 123.74\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-1.80}$	0.83	151	Case 3, 6
	95%	$K_{50} = 207.02\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.89}$		95%	$K_{50} = 316.33\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-1.80}$			



(a) Square root method



(b) Cube root method

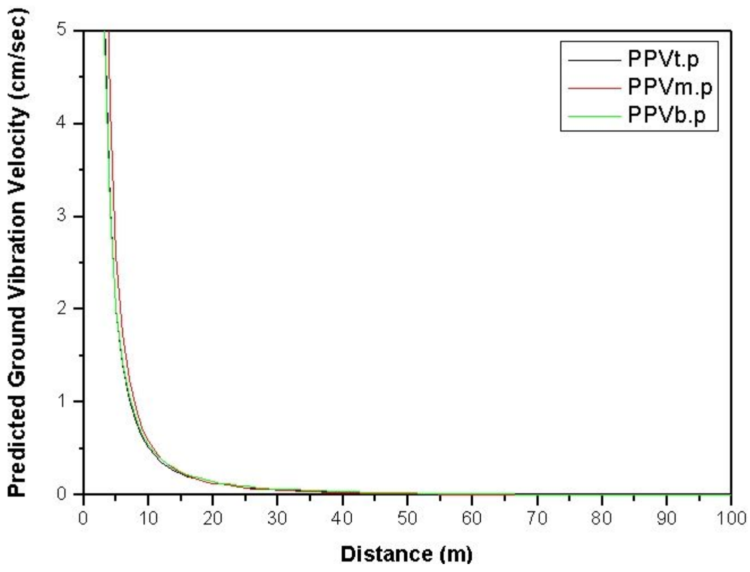
Figure 5.3 Relationship between peak particle velocity and scaled distance by priming location

Table 5.4 Predicted vibration velocity by priming location according to weight per delay

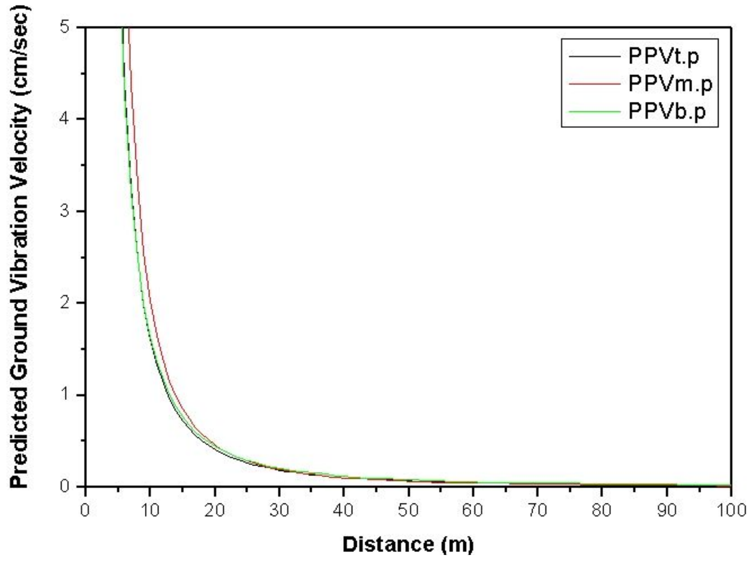
Distance \ Weight per delay	0.5kg			1.6kg		
	$PPV_{t.p}$ (cm/sec)	$PPV_{m.p}$ (cm/sec)	$PPV_{b.p}$ (cm/sec)	$PPV_{t.p}$ (cm/sec)	$PPV_{m.p}$ (cm/sec)	$PPV_{b.p}$ (cm/sec)
1	48.58	83.66	42.26	153.64	293.82	126.85
2	12.31	18.72	11.40	38.95	65.74	34.23
3	5.52	7.80	5.30	17.45	27.38	15.91
4	3.12	4.19	3.08	9.87	14.71	9.23
5	2.01	2.59	2.02	6.35	9.08	6.06
10	0.51	0.58	0.54	1.61	2.03	1.63
15	0.23	0.24	0.25	0.72	0.85	0.76
20	0.13	0.13	0.15	0.41	0.45	0.44
25	0.08	0.08	0.10	0.26	0.28	0.29
30	0.06	0.05	0.07	0.18	0.19	0.20
35	0.04	0.04	0.05	0.13	0.14	0.15
40	0.03	0.03	0.04	0.10	0.10	0.12
45	0.03	0.02	0.03	0.08	0.08	0.10
50	0.02	0.02	0.03	0.07	0.06	0.08
55	0.02	0.01	0.02	0.06	0.05	0.07
60	0.01	0.01	0.02	0.05	0.04	0.06
65	0.01	0.01	0.02	0.04	0.04	0.05
70	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.04
75	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.04
80	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03
85	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03
90	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03
95	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02
100	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02

Table 5.4 Continued

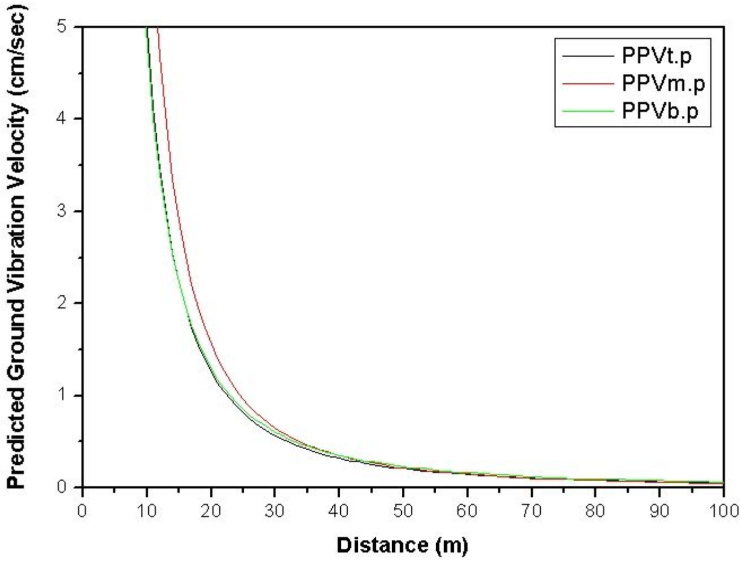
Weight per delay / Distance	5.0kg			15kg		
	$PPV_{t.p}$ (cm/sec)	$PPV_{m.p}$ (cm/sec)	$PPV_{b.p}$ (cm/sec)	$PPV_{t.p}$ (cm/sec)	$PPV_{m.p}$ (cm/sec)	$PPV_{b.p}$ (cm/sec)
1	474.70	1005.81	372.34	1408.53	3294.64	1051.52
2	120.33	225.06	100.46	357.05	737.20	283.71
3	53.92	93.74	46.69	159.98	307.06	131.84
4	30.50	50.36	27.10	90.51	164.95	76.55
5	19.61	31.10	17.78	58.18	101.87	50.21
10	4.97	6.96	4.80	14.75	22.79	13.55
15	2.23	2.90	2.23	6.61	9.49	6.30
20	1.26	1.56	1.29	3.74	5.10	3.65
25	0.81	0.96	0.85	2.40	3.15	2.40
30	0.56	0.65	0.60	1.68	2.12	1.70
35	0.42	0.46	0.45	1.23	1.52	1.27
40	0.32	0.35	0.35	0.95	1.14	0.99
45	0.25	0.27	0.28	0.75	0.88	0.79
50	0.21	0.22	0.23	0.61	0.70	0.65
55	0.17	0.18	0.19	0.50	0.57	0.54
60	0.14	0.15	0.16	0.42	0.48	0.46
65	0.12	0.12	0.14	0.36	0.40	0.39
70	0.11	0.10	0.12	0.31	0.34	0.34
75	0.09	0.09	0.11	0.27	0.29	0.30
80	0.08	0.08	0.09	0.24	0.26	0.27
85	0.07	0.07	0.08	0.21	0.22	0.24
90	0.06	0.06	0.08	0.19	0.20	0.21
95	0.06	0.05	0.07	0.17	0.18	0.19
100	0.05	0.05	0.06	0.15	0.16	0.17



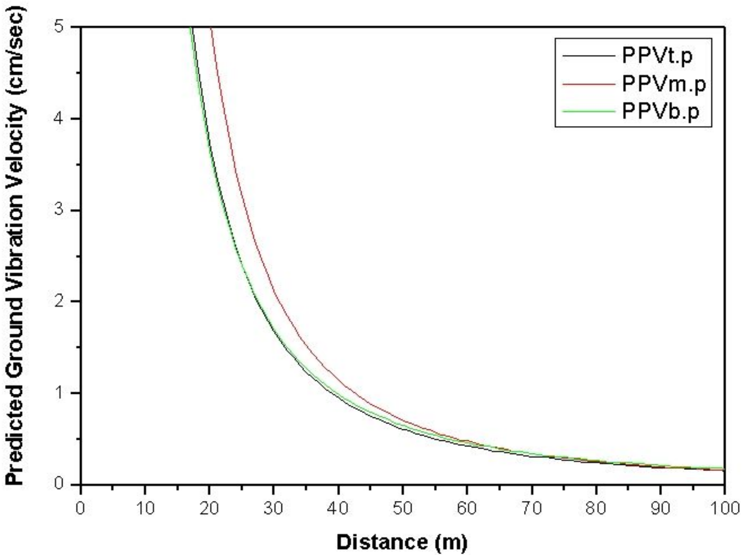
(a) weight = 0.5kg



(b) weight = 1.6kg



(c) weight = 5.0kg



(d) weight = 15kg

Figure 5.4 Relationship between predicted ground vibration velocity and distance by priming location

6. 결론

본 연구는 폭약의 종류와 기폭위치에 따른 지반진동의 비교연구이다. 이를 위하여 NewMite, MegaMEX 폭약을 사용하여 정기폭, 중간기폭, 역기폭으로 시험발파를 실시하여 회귀분석 및 노모그램 분석을 실시하였다. 이를 토대로 폭약의 종류와 기폭위치에 따른 평균 지반진동 예측식을 이용하여 상호비교 연구를 실시하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 폭약의 종류에 따른 계측자료를 이용하여 회귀분석을 실시한 지반진동 예측식은 다음과 같다.

(1) NewMite (Case 1~3)

① 자승근 50% 신뢰수준 $K_{50} = 151.65\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-2.11}$

95% 신뢰수준 $K_{50} = 374.54\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-2.11}$ $r = 0.89$

② 삼승근 50% 신뢰수준 $K_{50} = 301.86\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-2.07}$

95% 신뢰수준 $K_{50} = 816.24\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-2.07}$ $r = 0.91$

(2) NewMite (Case 4~6)

① 자승근 50% 신뢰수준 $K_{50} = 51.40\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.76}$

95% 신뢰수준 $K_{50} = 122.07\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.76}$ $r = 0.82$

② 삼승근 50% 신뢰수준 $K_{50} = 74.73\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-1.67}$

95% 신뢰수준 $K_{50} = 187.57\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-1.67}$ $r = 0.76$

2. 동일한 발파에서 입지상수(K) 값이 클수록 진동이 크게 나타나고 n 값은 작을수록 진동이 멀리 전파되고 감쇠가 적다. NewMite의 경우 동일한 발파 조건에서 지반진동이 MegaMEX보다 더 크게 나타나지만 감쇠가 커서 진동이 멀리 전파되지 않은 특징이 나타났다.

3. 폭약의 종류에 따른 자승근 평균 지반진동 예측식을 이용하여 0.5, 1.6, 5.0, 15.0kg 장약량으로 거리별 예측 지반 진동치를 구하였다.

(1) 장약량 0.5kg이면 거리가 15m 이내는 PPVnew(NewMite의 최대 지반진동치)가 PPVmega(MegaMEX의 최대 지반진동치)보다 더 크게 예측되었고, 15m 이상에서는 PPVmega가 더 크게 예측되었다.

(2) 장약량이 1.6kg이면 거리가 27m 이내는 PPVnew(NewMite의 최대 지반진동치)가 PPVmega(MegaMEX의 최대 지반진동치)보다 더 크게 예측되었고, 27m 이상에서는 PPVmega가 더 크게 예측되었다.

(3) 장약량이 5.0kg이면 거리가 49m 이내는 PPVnew(NewMite의 최대 지반진동치)가 PPVmega(MegaMEX의 최대 지반진동치)보다 더 크게 예측되었고, 49m 이상에서는 PPVmega가 더 크게 예측되었다.

(4) 장약량이 15.0kg이면 거리가 85m 이내는 PPVnew(NewMite의 최대 지반진동치)가 PPVmega(MegaMEX의 최대 지반진동치)보다 더 크게 예측되었고, 85m 이상에서는 PPVmega가 더 크게 예측되었다.

이상의 결과를 보면 근거리에서는 MegaMEX, 원거리에서는 NewMite 진

동제어 측면에서 더 유리하게 분석되었다.

4. 기폭위치에 따른 계측자료를 이용하여 회귀분석을 실시한 지반진동예측식은 다음과 같다.

(1) 정기폭 (Case 1, 4)

① 자승근 50% 신뢰수준 $K_{50} = 96.48\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.98}$

95% 신뢰수준 $K_{95} = 249.39\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.98}$ $r = 0.86$

② 삼승근 50% 신뢰수준 $K_{50} = 212.85\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-2.00}$

95% 신뢰수준 $K_{95} = 544.02\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-2.00}$ $r = 0.88$

(2) 중간기폭 (Case 2, 5)

① 자승근 50% 신뢰수준 $K_{50} = 176.86\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-2.16}$

95% 신뢰수준 $K_{95} = 384.43\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-2.16}$ $r = 0.92$

② 삼승근 50% 신뢰수준 $K_{50} = 318.71\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-2.09}$

95% 신뢰수준 $K_{50} = 661.70\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-2.09}$ $r = 0.89$

(3) 역기폭 (Case 3, 6)

① 자승근 50% 신뢰수준 $K_{50} = 81.36\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.89}$

95% 신뢰수준 $K_{50} = 207.02\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.89}$ $r = 0.84$

② 삼승근 50% 신뢰수준 $K_{50} = 123.74\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-1.80}$

95% 신뢰수준 $K_{50} = 316.33\left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}}\right)^{-1.80}$ $r = 0.83$

5. 입지상수와 n값이 가장 큰 중간기폭이 진동값이 가장 크게 나타나고 감쇠가 커서 진동이 멀리 전파되지 않고 역기폭은 중간기폭보다 진동 값이 크지 않으나 감쇠가 크지 않아서 진동이 멀리 전파하는 특징이 나타났다.

6. 기폭위치에 따른 자승근 평균 지반진동 예측식을 이용하여 0.5, 1.6, 5.0, 15.0kg 장약량으로 거리별 예측 지반 진동치를 구하였다.

(1) 장약량이 0.5kg이면 거리가 4m 이내는 PPVm.p(중간기폭의 최대 지반진동치) > PPVt.p(정기폭의 최대 지반진동치) > PPVb.p(역기폭의 최대 지반진동치), 5~12m는 PPVm.p > PPVb.p > PPVt.p, 13~20m는 PPVb.p > PPVm.p > PPVt.p, 21m 이상은 PPVb.p > PPVt.p > PPVm.p의 순으로 지반 진동치가 예측되었다.

(2) 장약량이 1.6kg이면 거리가 8m 이내는 PPVm.p > PPVt.p > PPVb.p, 9~22m는 PPVm.p > PPVb.p > PPVt.p, 23~36m는 PPVb.p > PPVm.p > PPVt.p, 37m 이상은 PPVb.p > PPVt.p > PPVm.p의 순으로 지반 진동치가 예측되었다.

(3) 장약량이 5.0kg이면 거리가 14m 이내는 PPVm.p > PPVt.p > PPVb.p, 15~39m는 PPVm.p > PPVb.p > PPVt.p, 40~64m는 PPVb.p > PPVm.p > PPVt.p, 65m 이상은 PPVb.p > PPVt.p > PPVm.p의 순으로 지반 진동치가 예측되었다.

(4) 장약량이 15.0kg이면 거리가 25m 이내는 PPVm.p > PPVt.p >

PPVb.p, 26~68m는 PPVm.p > PPVb.p > PPVt.p, 69~112m는 PPVb.p > PPVm.p > PPVt.p, 113m 이상은 PPVb.p > PPVt.p > PPVm.p의 순으로 지반 진동치가 예측되었다.

7. 발파지점에서 발생하는 발파진동의 조절을 위해 발파방법과 거리, 폭약의 종류를 고려하는 발파설계로써 발파 지점에서 발생하는 발파 진동의 저감을 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 추후 더 다양한 폭약의 특성에 따른 진동의 저감효과와 본 연구에서 시행한 천공장보다 더 장공에서의 기폭위치에 따른 진동제어의 효과에 대한 연구가 진행되면 효과적인 진동제어로 발파재해를 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 강대우, 안봉도, 에멀전 폭약의 폭속변화에 따른 진동특성연구, 2007 한국암반공학회 춘계학술발표회, 2007.3.22, pp.351~357

2. 강추원, 양해승, 문창일(2000), 장공계단발파에서 Primer의 위치가 발파진동에 미치는 영향 pp. 181~200

3. 강추원, 제 2판 발파공학 A to Z, 구미서관, pp. 57~60

4. 金河根, 尹世喆, 徐東烈, 발파.진동.소음, 서우, pp. 2-180~2-184

5. 민형동, 이윤재, 박윤석, 최경열, 고성능 Emulsion폭약(Megamex)의 개발 및 경암 터널에서의 적용사례, 화약발파, 대한화약약발파공학회 vol. 23, No. 1, pp. 55~64

6. 신일재, 이정인, 백종현, 최소저항선이 발파진동의 크기에 미치는 영향에 관한 실험연구, 대한화약기술학회지, 제 19권, 제 1호, pp. 53~61

7. 양형식, 발파진동학, 구미서관, pp. 6~10

8. 원기술 편집부역, 신발파핸드북, 원기술, pp. 466~467

9. 이천식, 김형섭,2001, 국내산 주요 폭약의 위력계수 산정에 관한 연구, 화약발파, 대한화약발파 공학회, vol. 19, No.1, pp. 97~100

10. Adams, T. F., Demuth, R. B., Margolin, L. G., and Nichols, B. D., 1983, Simulation of Rock Blasting with the Shale Code. Proceedings of the First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, pp. 361-373

11. Altas Power Company, 1987, Explosives and Rock Blasting, pp.157-201, 321-406

12. Bollinger G. A., 1971, Blasting Vibration Analysis, pp.58-88

13. Brian Schweitzer, Governor, Montana department of state lands, Chapter2, pp.71~75

14. Chiappetta, R. F., Bauer, A., and Burchell, S. L., 1983, The Use of High Speed Motion Picture Photography in Blast Evaluation and Design, Proceedings of the 9th Annual Conference on Explosives and Blasting Techniques, Society of Explosives Engineers

15. Charles H. Dowing(1984), Blast vibration monitoring and control, pp. 17~22

16. Devine, J. R., 1966, Avoiding Damage to Residences from Blasting Vibrations, Highway Research Record 135, pp. 35-44.

17. Fourney, W. L., and Barker, D, B., 1983, Effect of Time Delay on Fragmentation in Explosives, Proceedings of the First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, pp. 225-249

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

19. K.-G. Hinzen(1988), Modeling of blast vibration monitoring and control, pp. 17~21

20. Pit Slope Manual, 1977, Perimeter Blasting(Canmet, Report 77-44), Canada Center for Mineral and Energy Technology, Canada

21. Richard A. Dick. Larry R. Fletcher, and Michael A. Peltier, Blasters Training Mannual for meter, Nonmetal Miners, Chapter2, pp. 113~116

22. Robert Hopler, Blasters' Handbook 16th Edition, E.I. Du Pont de Nemours & CO. (Inc.), pp. 209~426

23. 藤井喬, 谷本親伯, 土木建設, 19-12, (昭和45年)33

24. 妹澤克推金井清, 東京市國大學地究所彙報, 14-1, (昭和11性)10

저작물 이용 허락서

학 과	에너지 자원공학과	학 번	20097074	과 정	석 사
성 명	한글: 김 승 은 한문 : 金 承 恩 영문 : Kim Seung Eun				
주 소	광주광역시 동구 서석동 424-9 304호				
연락처	E-MAIL : happyday1030@hanmail.net				
논문제목	한글 : 폭약의 기폭위치에 따른 발파진동 예측 영어 : Prediction of blasting vibration according to priming location of explosion				

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 경우에는1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송・출력을 허락함.

동의여부 : 동의(✓) 반대( )

2011년 2월

저작자: 김 승 은 (인)

조선대학교 총장 귀하