

2012년 2월
석사학위 논문

기폭위치에 따른 주파수 분석

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

손 석 범

기폭위치에 따른 주파수 분석

Frequency analysis according to priming location

2012년 2월 24일

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

손 석 범

기폭위치에 따른 주파수 분석

지도교수 강 추 원

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2011년 10월

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

손 석 범

손석범의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 고 진 석



위 원 조선대학교 교수 박 천 영



위 원 조선대학교 교수 강 추 원



2011년 11월

조선대학교 대학원

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	v
1. 서론	1
2. 이론적 배경	4
2.1 진동의 기초 이론	4
2.1.1 진동의 정의	4
2.1.2 진동의 물리적 크기	9
2.1.3 진동량의 표현	11
2.2 파동의 전파 이론	12
2.3 발파진동의 발생과 전파	15
2.3.1 발파진동의 발생	15
2.3.2 발파진동의 전파 특성	18
2.4 기폭방법	22
3. 현장실험	26
3.1 대상현장의 지질 및 지형	26
3.2 실내물성실험	29
3.3 현장실험 개요	31

3.4 현장실험 방법 및 계측	31
3.4.1 현장실험 방법	31
3.4.2 현장실험 계측	34
4. 실험 계측 결과 및 분석	36
4.1 실험 계측 결과	36
4.1.1 정기폭에서의 계측 결과	37
4.1.2 중간기폭에서의 계측 결과	39
4.1.3 역기폭에서의 계측 결과	41
4.2 계측 결과 분석	43
4.2.1 Case 1의 분석	43
4.2.2 Case 2의 분석	45
5. 결론	47
참 고 문 헌	49

List of Tables

Table 2.1 Vibration unit	12
Table 2.2 Comparison of blasting vibration and earthquake	21
Table 2.3 Parameters which influence ground motion	22
Table 3.1 Results of rock property test	30
Table 3.2 Experimental conditions	32
Table 3.3 Case for test blasting	34
Table 4.1 The measurement results of Top priming (Drilling Length: 6m)	37
Table 4.2 The measurement results of Top priming (Drilling Length: 9m)	38
Table 4.3 The measurement results of Middle priming (Drilling Length: 6m)	39
Table 4.4 The measurement results of Middle priming (Drilling Length: 9m)	40
Table 4.5 The measurement results of Bottom priming (Drilling Length: 6m)	41
Table 4.6 The measurement results of Bottom priming (Drilling Length: 9m)	42

List of Figures

Figure 2.1 Harmonic oscillation	8
Figure 2.2 The size of sine wave vibration	8
Figure 2.3 Body wave and Rayleigh wave	14
Figure 2.4 Vertical displacement component of P wave, S wave and Rayleigh wave in a short duration period	14
Figure 2.5 Advancing detonation in blast hole produces shot period detonation pressure and long period explosion pressure	17
Figure 2.6 Schematic of the fracturing and deformation around an explosion in rock	18
Figure 2.7 Measuring direction of ground vibration	19
Figure 2.8 Position of primer	24
Figure 3.1 Site map of study area	27
Figure 3.2 Geology genealogy of study area	28
Figure 3.3 Blasting pattern	33
Figure 3.4 Measurements of study area	35
Figure 4.1 Relationship between Dominant frequency and distance of Case 1	44
Figure 4.2 Relationship between Dominant frequency and distance of Case 2	45

ABSTRACT

Frequency analysis according to priming location

By Son, Seok Bum

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

Dept. of Energy & Resource Engineering,

Graduate School of Chosun University

Since explosives were introduced to industry, blasting has been widely used for rock excavation in mining, civil engineering and construction of dams, highways and subway systems. In particular, as two thirds of our country is made of mountains and frequent constructions have occurred due to industrial development and economic growth, excavation operation should be seriously considered. Explosives are mainly used for blasting in other countries as well as our country. Also, as social consciousness structure changed, rock excavation operation in downtown areas have caused many complaints in respect to blasting pollution. So, blasting operation has have stricter restriction than ever, and blasting experts are considering safety as the primary standard to effectively control vibration in comparison with efficiency and stability in blasting design.

Blasting vibration as one of the blasting pollutions can be decreased by decreasing charge per delay. Blocking the vibration in the vibration radio wave with uses of smooth blasting such as line drilling or pre-splitting

has been widely applied. However, in considering operation and economic efficiency, the effect of controlling blasting vibration through decreasing charge per delay is limited and for blocking the vibration in the process of vibration radio wave, there have been few research results to present vibration decrease effect.

Research on prediction of blasting vibration was performed by Langefors(1978). He introduced the concept of charge levels, which are scaled distance of USBM in prediction of blasting vibration and used the concept of cooperating charges which correspond to charge per delay in the type of scaled distance. The concept of charge per delay and that of cooperating charges can be differentiated according to consideration of frequency of the ground. Thus, frequency is a factor which has a significant influence on blasting.

In identifying the effect of blasting vibration on structures, as characteristics of frequency which show changes of vibration in time has been considered important, it is usual that frequency is presented as an effect variable in addition to maximum amplitude.

Frequency is a very important factor in discussing the effect on facilities such as precision instruments and therefore, in evaluating the effect of blasting vibration, it is necessary to identify information on frequency in addition to maximum amplitude of vibration.

This study collected rock samples in gneiss area to perform an indoor rock test and to identify frequency of blasting vibration according to priming location, performed a total of 24 times of single hole test blasting with different spacing, burden, drilling length and charge per delay. Then

the study decided dominant frequency through FFT and analysed changes according to priming locations.

1. 서론

화약이 산업계에 도입된 후 화약발파는 유용 광물 자원의 채취, 댐, 고속도로 및 지하철 건설 등 광업, 토목, 건설 분야의 각종 작업에서 암반 굴착을 위한 방법으로 널리 이용되고 있다. 특히 전 국토의 2/3 이상이 산지로 이루어진 우리나라는 산업의 발달과 경제성장 등으로 인한 빈번한 국토 개발에서 굴착작업은 간과할 수 없는 부분이다. 화약발파를 이용한 굴착방법을 이용한 굴착작업이 주를 이루고 있으며, 이는 우리나라뿐만 아니라 전 세계적인 추세이기도 하다. 또한, 근래에는 사회의식구조의 변화로 인구가 밀집한 도심지 부근에서의 암반 굴착작업은 발파재해와 관련된 많은 민원을 낳고 있다. 그래서 발파 작업은 더욱 엄격한 규제를 받게 되었으며, 발파기술자들은 종래의 발파방법보다 효과적으로 진동제어를 하려는 관점에서 발파 설계 시 효율성, 안정성 및 안전성 등의 설계변수들 중에서도 안전성을 가장 우선적인 기준으로 고려하고 있다.

발파로 인해 발생하는 발파재해들 중 발파진동의 저감을 위한 방법으로 동시에 기폭되는 화약량인 지발당 장약량을 줄임으로써 발파지점에서 발생하는 발파진동을 저감시키는 방법과 라인드릴링이나 프리스플리팅 등의 조절 발파법을 이용하여 발파진동을 진동 전파 경로상에서 차단하는 방법이 널리 적용되고 있다. 그러나 발파작업의 시공성과 경제성을 고려할 때 지발당 장약량을 줄임으로써 발파진동을 제어하는 데는 한계가 있고, 진동 전파 경로상에서 발파진동을 차단하는 방법은 정량적인 진동저감 효과를 제시할 수 있을 만큼의 충분한 연구결과가 제시되어있지 못한 실정이다.

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

색상대 등 많은 변수들이 영향을 미치게 된다.

발파진동의 전파 특성을 결정짓는 인자는 크게 입지조건과 발파조건으로 나눌 수 있다. 입지조건은 발파부지와 인근 구조물의 기하학적 형태, 대상암반의 지질학적 특징 및 역학적 성질 등을 예로 들 수 있으며, 발파조건은 사용하는 폭약의 종류, 지발당 장약량, 기폭방법, 전색상태, 자유면의 수, 발파 유형, 폭원과 측정간의 거리 등을 가리킨다. 이 중 지발당 장약량과 측정간의 거리가 중요한 요인으로 작용하고 특히 지발당 장약량이 조절 가능한 변수이다. 한편 발파진동을 예측하는 또 다른 연구는 Langefors(1978)에 의해 이루어졌으며 발파진동의 예측에 있어서 USBM의 환산거리개념에 해당하는 장약레벨개념을 도입하였으며 환산거리 방식의 지발당 장약량 개념에 해당되는 협동장약의 개념을 사용하였다. 여기에서 지발당 장약량과 협동장약의 개념의 차이는 지반의 주파수 고려 여부로 구분 될 수 있다. 이렇듯 이제 주파수는 발파를 함에 있어서 상당한 영향을 미치는 요인이 되었다.

국내에서의 발파진동에 대한 연구 중 주파수와 관련된 발파진동의 연구 결과를 살펴보면 임한욱(1992)등은 발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구를 시행하였으며 류창하(1995)는 발파에 의한 지반 진동의 수준 및 주파수 특성에 관한 연구를 시행하였다. 다른 한편으로는 강추원(2005)등에 의한 주주파수를 고려한 협동장약의 특성에 관한 연구에 의하면 발파진동은 거리와 주파수 정도에 따라 파의 간섭 정도가 상이하며 이 간섭의 정도는 발파진동의 크기에 영향을 주는 것으로 보고되고 있다. 또한 김종인(2006)은 단일공파형 중첩모델링 자료에 의한 발파진동의 예측을 통해 지연 시차에 따른 발파진동의 주파수 변화를 연구하였다.

발파진동이 구조물에 미치는 영향에 있어서 진동의 시간적 변화특성을 나타내는 주파수특성의 중요성이 인식되면서 최근 발파진동 영향평가에 있어서 최대진폭 외에도 진동에 수반되는 주파수 성분을 영향변수로 표현하는 방

법이 점차 보편화 되어가고 있다. 주파수 특성은 정밀기기류와 같은 시설물에 대한 영향문제를 논의할 때 매우 중요한 요소이며 따라서 발파진동의 영향평가에 있어서도 진동의 최대크기 외에 주파수 특성에 관한 정보를 파악하 소 평가하는 것이 필요하다. 본 연구는 편마암 지역의 암석샘플을 채취하여 실내암석실험을 실시하였고, 기폭위치에 따라 발파진동의 주파수 특성을 파악하기 위해서 공간격, 저항선, 천공장 그리고 장약량 등을 달리하여 총 24회의 단일공 시험발파를 실시하여 고속 푸리에 변환(FFT, Fast Fourier Transform)을 통해 주주파수(Dominant frequency)를 결정하고 기폭위치에 따라 어떤 변화가 있는지 분석하여 서로 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1 진동의 기초 이론

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

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

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

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

2.1.1 진동의 정의

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ωX 는 이때의 최대치로 속도 진폭이라 부른다. 또 가속도 a 는 속도 v 를 시간 t 로 미분하여 얻어지는데 식 (2.6)에 의해 식 (2.7)과 같이 되며 $\omega^2 X$ 는 가속도진폭이라 부른다.

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

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

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

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

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

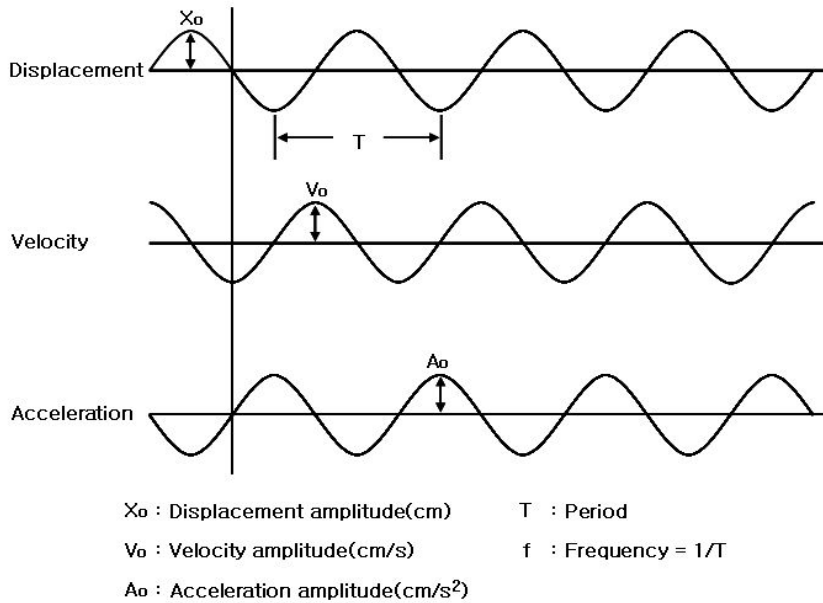
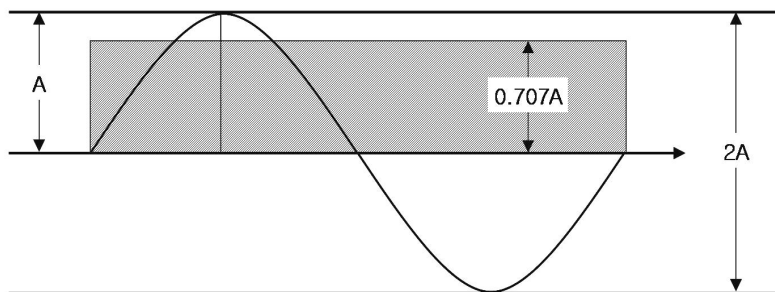


Figure 2.1 Harmonic oscillation.



peak value(0 to peak) = A
 virtual value(r.m.s) = $0.707A$
 P-P value(peak to peak) = $2A$

Figure 2.2 The size of sine wave vibration.

주기적이 아닌 경우는 식 (2.8)의 T 대신 적당한 시간의 길이를 취한다. 실효치의 물리적 의미는 예를 들면, 실효치 100V의 교류전압은 직류전압 100V의 효과와 같게 되는 최대치를 갖는 전압이라는 것과 마찬가지로 변동하는 진동량을 일정하게 연속된 효과로서 나타낸 값(Figure 2.2의 사선부분)이다.

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

2.1.2 진동의 물리적인 크기

진동변위(displacement)는 정지상태로부터 움직인 폭을 표시하며, 전체진폭(peak to peak치)과 편진폭(0 to peak치)이 있다. 일반적으로 진폭은 편진폭을 의미한다. 단위는 m이지만, 실제의 진폭은 매우 작아 $\mu\text{m}(1/1,000\text{mm})$ 를 사용한다. 공해진동에 있어서는 대부분 $500\mu\text{m}$ 이하의 변위를 대상으로 한다. 지반진동을 정현파 진동으로 가정하면 지표면에서의 변위는 식 (2.9)와 같다.

$$X = A_0 \sin(\omega t) \quad (2.9)$$

여기서, X 는 변위진폭, A_0 는 변위진폭의 최대치, ω 는 각진동수, t 는 시간을 나타낸다.

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

$$v = A_0 \omega \cos(\omega t) \quad (2.10)$$

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

$$a = -\omega^2 A_0 \sin(\omega t) \quad (2.11)$$

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

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

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

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

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

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

속도 실효치를 $A_r(m/s^2)$, 기준진동의 가속도 실효치를 $A_0(10^{-5}m/s^2)$ 라 하면, 진동가속도 레벨 $L_a(dB)$ 은 식 (2.12)로 표시된다.

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

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

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

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

여기서, W_n 은 인체감각에 따른 주파수 보정치이다.

2.1.3 진동량의 표현

진동의 강도 또는 크기는 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)	$gal = 1cm/sec^2$ $g = 980cm/sec^2 \approx 1,000gal$ $m/sec^2 = 10^2cm/sec^2$

2.2 파동의 전파 이론

짧은 지속시간을 갖는 충격파가 탄성 공간의 표면 어느 지점에서 발생하면 입체파는 Figure 2.3과 같이 반원형의 파면을 그리면서 전파된다. 충격지점으로 부터 일정한 거리에 떨어진 지점에서는 전달된 파동에 의해 수직 변위가 지표에서 발생한다. 이때 종파가 가장 빠른 전달속도를 가지므로 가장 먼저 도달하고, 다음이 횡파, Rayleigh파의 순서로 도달하게 되며, 이것을 그림으로 표현하면 Figure 2.4와 같다.

지반운동에 관한 문제는 지반을 전파하는 파동문제에 귀착되며 자연의 지반은 정적인 큰 힘에 대해서 소성체로써의 성질을 나타내지만 변화하는 속도가 빠른 동적인 미소변위에 대해서는 탄성체의 성질을 나타낸다. 그러므로 지반을 반무한 탄성체로 간주할 경우 종파, 횡파, Rayleigh파 등의 파가 존재한다.

R파에 의한 입자운동은 회귀성타원의 경로를 따르고, 전단방향의 변위가 없으므로 종파와 유사한 성질을 갖는다. P파, S파, R파의 운동모양은 폭발위치가 깊지 않거나 암반이 대단히 균질한 경우가 아니면 입체파는 보통 방출 에너지의 절반 이하로 작게 나타나고 나머지는 암석의 표면이나 내부의 자유면을 따라 이동하는 표면파가 된다. 그러므로 지표 부근에서 실시한 발파작업에 의한 진동에는 입체파보다 표면파에 더 많은 에너지가 작용한다. 반면 진동을 측정하는 지점이 발파 지점에서 가까우면 이러한 모든 파는 구분되지 않고 합성되어 함께 복합파 형태로 나타난다. 특히 지하철 건설을 위한 터널 굴착과 같은 도심지에서의 발파는 발파진동 문제를 야기하는 지점이 수십 미터 이내이며 여러 가지 파들이 도달하는 시간이 동시에 이루어지기 때문에 기록상으로 분별하기 어려운 단점이 있다.

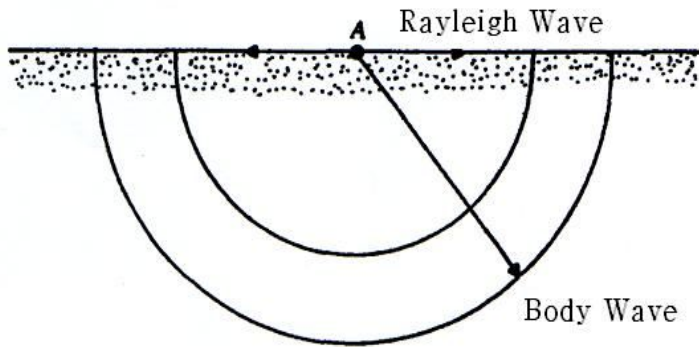


Figure 2.3 Body wave and Rayleigh wave.

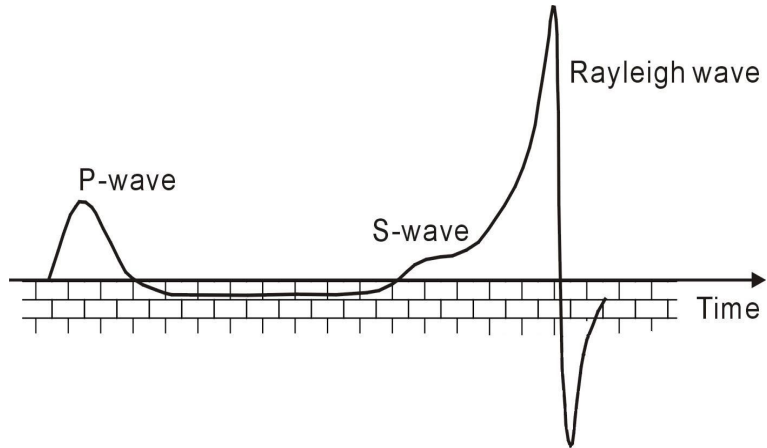


Figure 2.4 Vertical displacement component of P wave, S wave and Rayleigh wave in a short duration period.

2.3 발파진동의 발생과 전파

2.3.1 발파진동의 발생

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

폭약의 폭굉속도를 의미한다.

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

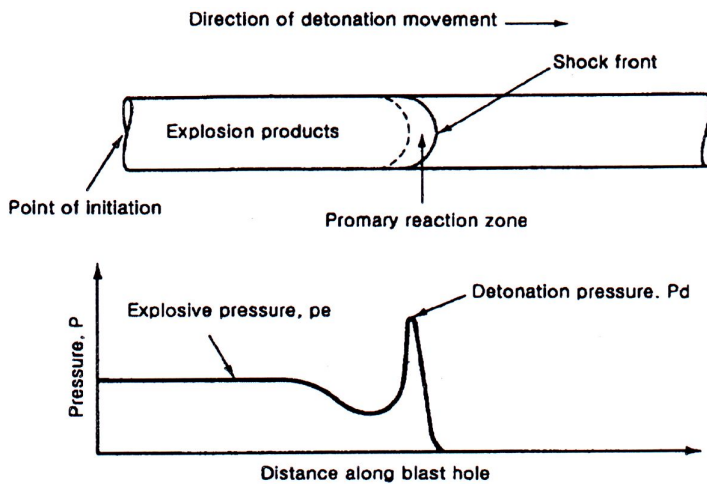


Figure 2.5 Advancing detonation in blast hole produces short period detonation pressure and long period explosion pressure

2.3.2 발파진동의 전파 특성

진동이란 구조물이나 지반 등이 동적인 외력의 영향을 받아 운동적 평형위치로부터 시간의 경과와 함께 반복 위치가 변화하는 운동현상을 말한다. 구조물의 대부분은 탄성체이기 때문에 어떤 작용에 의하여 크고 작은 진동을 받는 것은 말할 필요도 없다.

폭약이 장약공 내에서 폭발하면 수만에서 수십만 기압에 달하는 강력한 충격압과 가스압, 그리고 대단히 높은 고온이 발생한다. 이 때 Figure 2.6과 같이 충격압과 고온에 의해 발파공에서 수~수십 mm 이내에 인접한 암반은 녹아내리거나 잘게 파쇄되어 파쇄대를 형성하고, 연속되는 가스압과 충격파의 전달로 인해 파쇄대 외부의 암반에는 균열이 발생, 전파되어 균열대를 형성하게 된다.

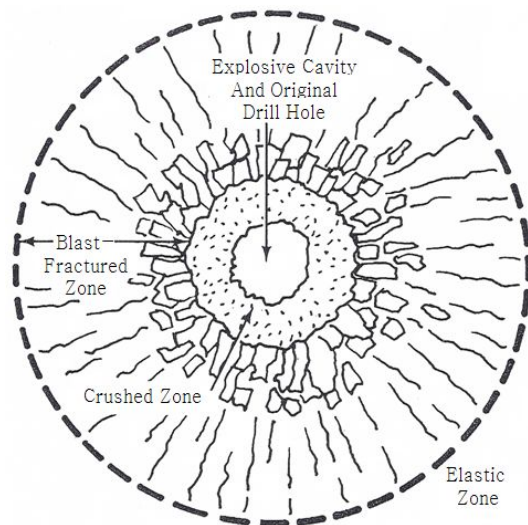


Figure 2.6 Schematic of the fracturing and deformation around an explosion in rock (Dupont, 1980).

폭원으로부터 3차원적으로 전파된 충격압에 의한 충격파는 거리에 따라 현저히 감쇠되어 발파에 의한 에너지의 일부가 탄성파의 형태로 균열대 외부의 암반 중에 전파되어 간다. 이러한 탄성파는 암반 중에 전파되어 가면서 지반의 진동을 발생시키게 되는데, 이를 지반진동(ground vibration)이라 한다.

암반 중으로 전달되는 탄성파는 암반내부로 전달되는 입체파(P파, S파)와 물체의 표면을 따라 이동하는 표면파(Rayleigh파, Love파)로 나뉜다. 이러한 탄성파가 암반 중을 전파하면서 지반진동을 일으키게 되는데 한 점에서의 지면의 운동은 진폭과 주기를 갖는 진동으로 나타난다. 이와 같은 발파에 의한 지반진동은 입자변위(particle displacement), 입자속도(particle velocity), 입자가속도(particle acceleration)의 3종류로 표시되고 있다.

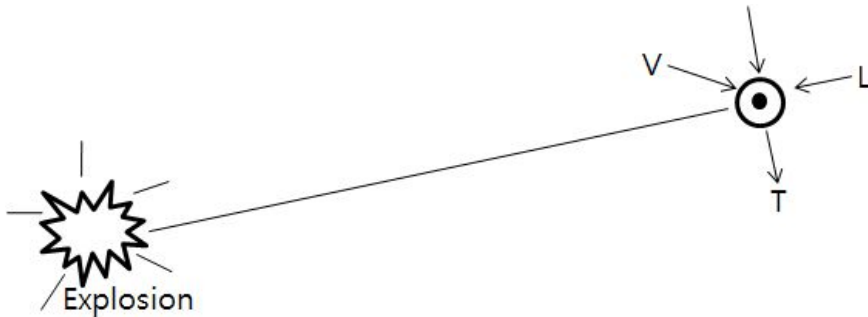


Figure 2.7 Measuring direction of ground vibration.

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

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

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

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

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

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

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

여기서, f 는 최대 진폭에서의 진동주파수이다.

지반진동의 크기를 표시하거나 허용수준을 설정하려면 지반진동 크기를 비교할 수 있는 척도가 필요하며, 그 크기정도를 입자변위·입자속도·입자가속도의 3가지 형태로 표시할 수 있다.

Table 2.2과 같이 지진동(earthquake vibration)은 발파진동에 비해 그 주파수가 작고 지속시간이 길며 진원이 깊은 지중이어서 종파, 횡파, 표면파가 분리되어 지표 중에 도달하나, 발파진동은 발파원이 측점에 가까워 이들 각각의 파가 측점에 동시에 도달하고, 또 고주파인 관계로 쉽게 감쇠가 일어나며 지진에 비하여 파형이 비교적 단순하다.

현재까지 세계적으로 연구된 결과에 의하면 주파수가 수십에서 수백 Hz

범위인 발파진동에서 주로 주거 구조물의 피해 정도는 진동변위속도에 비례한다. 따라서 그 규제기준을 진동속도로 삼고 있다.

Table 2.2 Comparison of blasting vibration and earthquake

Sort	Blasting vibration	Earthquake
Focal depth	Ground or inside of close ground	Over underground 10km
Vibration frequency	Several 10 to several 100Hz	1 Hz of below
Vibration duration	Within 0.1s	Over 10s, minute unit(a big earthquake)
Vibration waveform	Simple	Complex

폭약이 폭발할 때 발파에 필요한 최대의 효과를 얻기 위해서는 충분한 에너지가 전달이 되어야 한다. 폭약의 종류와 특성, 자유면의 수와 크기, 암반의 구조(절리, 층리, 박리 및 균열), 천공경과 천공간격, 장약량과 장약공법, 전색의 정도, 발파공의 배치, 기폭시차 배열 등에 따라 발파효과가 좌우된다.

이 때 암석의 강도에 비하여 폭력이 약하고 전색이 불완전하면 기대한 발파효과를 얻기 어려우며 이때는 대상 암반의 발파에 대한 저항선과 여러 가지 폭약이 가지는 발파 영향 요소 등에 대해서도 충분한 검토를 하여야 한다.

발파진동의 전파특성을 결정하는 조건은 크게 입지조건과 발파조건으로 나눌 수 있다.

입지조건은 발파부지와 인근 구조물의 기하학적 형태, 대상암반의 지질학적 특성 및 역학적 성질 등을 말하며, 발파조건은 사용하는 폭약, 장약량, 기

폭방법, 폭원과의 거리 등을 말한다.

이 중에서 발파조건은 조절 가능한 변수로, 입지조건은 조절 불가능한 변수로 구분 가능하며, 발파진동의 영향을 최소한으로 하기 위해서는 조절 가능한 변수들을 잘 파악하여 이를 적극 활용하여야 한다.

Table 2.3는 발파진동 변수에 대한 영향을 나타내었다.

Table 2.3 Parameters which influence ground motion

Parameter	Items	Influence on ground motion		
		Significant	Moderately signif.	Insignif.
Controllable parameters	A. Delay interval	○		
	B. Charge weight per delay	○		
	C. Explosives type	○		
	D. Burden and spacing		○	
	E. Hole diameter and drilling angle		○	
	F. Stemming			○
	G. Direction of initiation			○
	H. Charge weight per blasting			○
Uncontrollable parameters	A. Distance of blast site and structure	○		
	B. Geography		○	
	C. Soil type and layer depth		○	
	D. Rock condition		○	
	E. Atmospheric condition			○

2.4 기폭방법

MAHA(The Mine Safety Health Administration of U.S.A)는 기폭약

(Primer)을 다른 폭약이나 발파제를 기폭시키는 데 이용되는 뇌관으로 기폭 가능한 폭약장치로 정의한다. 기폭약(primer)에는 뇌관이나 다른 기폭장치, 즉 도폭선이 포함된다.

기폭약(primer)은 높은 폭속과 높은 폭발력을 가진 뇌관으로 기폭이 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. 뇌관을 포함한 기폭약(primer)이 공구와 전장약을 향하는 공저에 설치될 때 이것이 역기폭방법(bottom priming)으로 알려져 있다. 반면에 뇌관을 포함한 기폭약(primer)이 공저를 향하며, 공구나 공구부근에 설치될 때 이것은 정기폭(top priming)으로 알려져 있다. 기폭약(primer)의 적절한 위치는 안정성과 효율성 둘 다의 관점에서 중요하다.

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

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

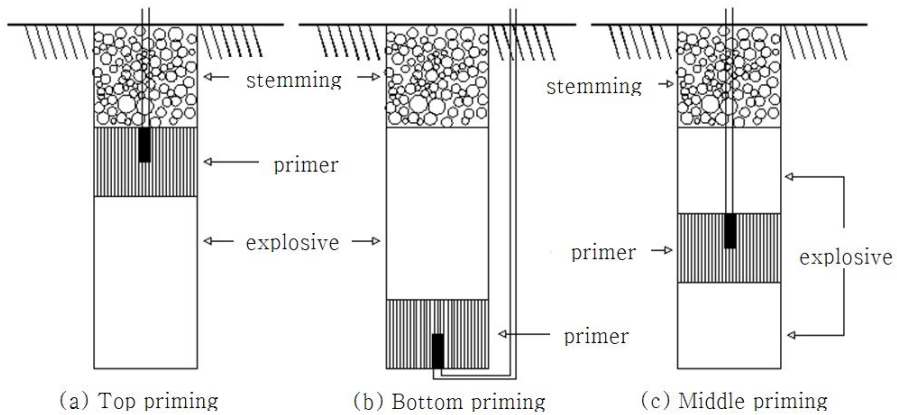


Figure 2.8 Position of primer

첫째, 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 발생될 지도 모른다. 때문에 정기폭은 역기폭을 사용하기에는 안전에 부적절한 고려 사항이 있을 때 사용한다.

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

둘째, 뇌관을 포함한 기폭약(primer)이 공구와 전체 장약을 향하는 공저에 설치될 때 이것이 역기폭방법(bottom priming)이라고 한다(Figure 2.8(b)). 역기폭은 팽창가스가 더 오래 지속되고 그 결과 밀거나 작용하는 힘이 더 오

래 지속된다. 역기폭은 암반변위가 중요한 요소인 지반굴착, 절하발파, 고속도로 굴착 등 다중열 발파에서 적용될 수 있다. 관점에 따라 여러 견해와 주장이 엇갈리고 있으나, 시추공의 cut off 감소, 공저에서 약포의 불폭 감소, 많은 암반변위 발생, 막힌 공으로부터 전폭약을 재장약의 가능 등의 이유로 역기폭이 널리 이용된다.

일반적으로 역기폭은 각선의 길이가 비경제적이며 폭약을 다져 넣는 데도 주의해야 하지만 정기폭일 경우에는 폭약을 다져 넣는 데 비교적 안전하다. 단발발파로부터 장약의 cut off에 장약분리의 위험이 있을 때나 지연너관을 사용하는 근접공에서 유리하다. 기폭점이 안쪽에 있으므로 발파위력이 내부에 더욱 크게 작용하여 잔류공을 남기는 일은 없다. 일반적으로 장공을 발파할 때에는 역기폭으로 장전하는 것이 효과적이다.

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

3. 현장실험

3.1 대상현장의 지질 및 지형

군산시의 산지는 북동부의 취성산지, 중앙부의 금성산지, 서부의 영병산지의 3구역으로 나눌 수 있다. 취성산지는 옥구반도의 골격을 이루는 지대로 함라산(241m)에서 태초산까지이다. 이 산지의 분포지대는 군산시의 북동부인 나포, 서수, 성산, 임피, 개정면이며, 구성암석은 선캠브리아기의 화강암질 편마암이다. 본 연구지역은 군산시 나포면 서포리로 군산시의 북동부이고 취성산지의 서측 단부에 위치하고 있다(Figure 3.1).

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



Figure 3.1 Site map of study area.

Quaternary Period

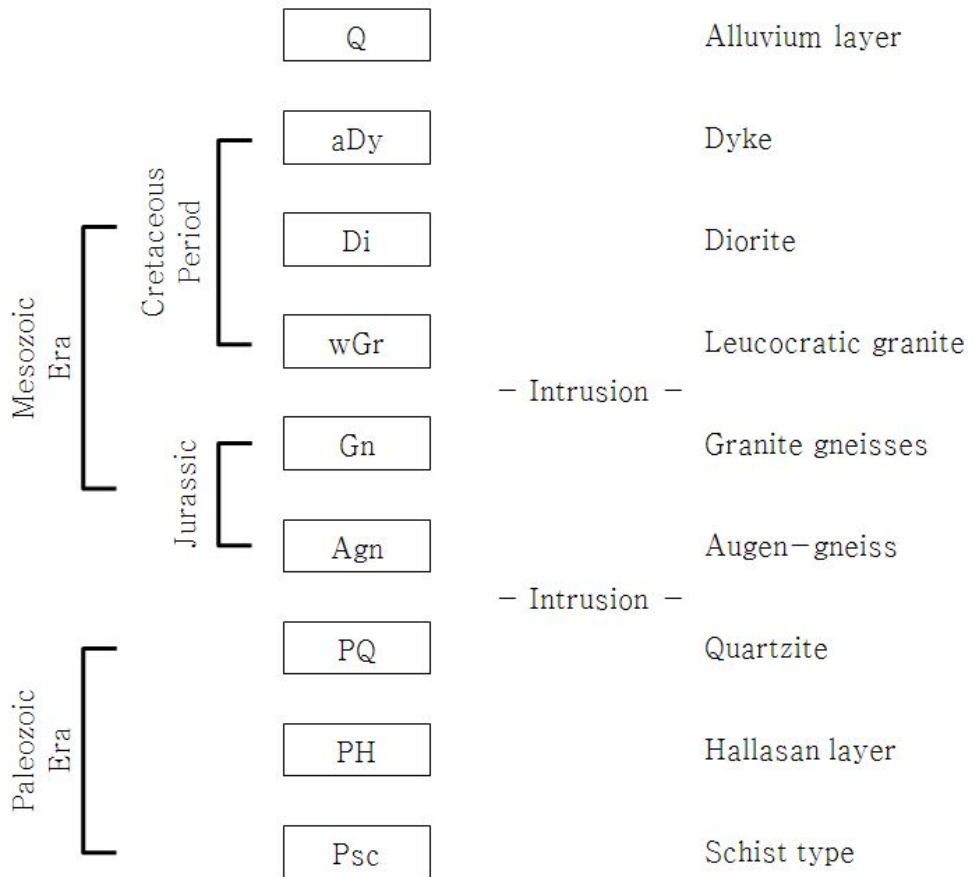


Figure 3.2 Geology genealogy of study area.

3.2 실내물성실험

편마암 지역에서 블록 시험편을 채취하여 코어 천공기를 사용하여 NX 크기의 코어 시험편을 시추하였다. 다양한 실내물성실험을 위해 ISRM 규정에 맞도록 시험편을 성형·제작하였다.

실내물성실험의 종류는 비중, 공극률, 탄성과 전파속도, 일축압축강도이며, 3회씩 실시하였다. 각 시험은 ISRM(International Society for Rock Mechanics)의 제안방법과 ASTM(American Society for Testing Materials)의 표준시험법에 의거하여 실시하였다.

먼저 비중, 공극률은 METTLER TOLEDO사의 AG Balance, desiccator 및 건조오븐을 사용하여 구하였다. 편마암 지역의 비중은 $2.635 \sim 2.646 \text{g/cm}^3$ 범위로 분포하며 평균 2.641g/cm^3 이고, 공극률은 $0.571 \sim 0.939\%$ 범위로 분포하며 평균 0.778% 로 측정되었다.

탄성과 전파속도(P파속도)는 OYO사의 New Sonicviewer로 P파의 전파속도를 구하였다. P파 전파속도는 $4940 \sim 5510 \text{m/s}$ 범위로 분포하며 평균 5363m/s 로 측정되었다.

일축압축강도는 만능재료시험기(Universal Testing Machine, UTM, Model No. KPUT-100)를 사용하여 구하였다. 그 결과 일축압축강도는 $1136 \sim 1435 \text{kgf/cm}^2$ 범위로 분포하며 평균 1321kgf/cm^2 로 측정되었다.

마지막으로 탄성계수는 일축압축시험 시 구한 강도와 일축시험편에 부착한 CAS사의 스트레인 게이지를 통해 VISHAY사의 Portable Strain Indicator에서 읽은 축 방향 변형률을 나누어 구하였다. 탄성계수는 $3.91 \sim 4.67 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ 범위로 분포하며 평균 $4.43 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ 로 측정되었다.

다음 Table 3.1은 조사지역의 주요 실내실험 결과를 나타내었다.

Table 3.1 Results of rock property test

Rock type	Gneiss
Specific gravity	2.635~2.646 (2.64)
Porosity (%)	0.571~0.939 (0.778)
P wave velocity (m/sec)	4940~5510 (5363)
Young's modulus ($\times 10^5 \text{kgf/cm}^2$)	3.91~4.67 (4.43)
Uni. comp. strength (kgf/cm^2)	1136~1435 (1321)

3.3 현장실험개요

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

3.4 현장실험 방법 및 계측

3.4.1 현장실험 방법

본 연구의 현장실험지역은 전라북도 군산시 나포면 서포리에 위치한 연구 지역(편마암 지역)에서 총 24회 발파에 대한 현장실험을 실시하였다.

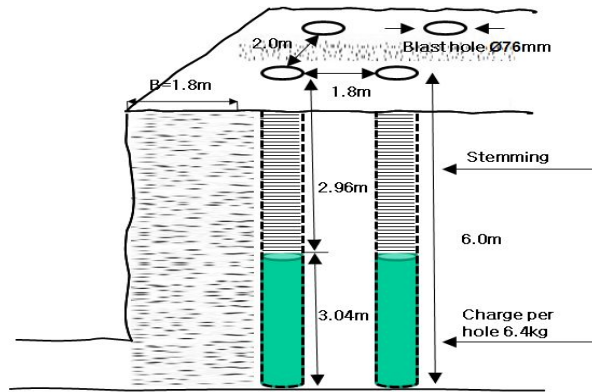
실험 조건은 Table 3.2와 같다. 연구지역 별로 1~12회는 공경 $\phi 76\text{mm}$, 공간격 2.0m, 저항선 1.8m, 천공장 6.0m, 그리고 지발당 장약량 6.4kg, 13~24회는 공경 $\phi 76\text{mm}$, 공간격 3.0m, 저항선 2.7m, 천공장 9.0m, 그리고 지발당 장약량 14kg을 사용하여 단일공 시험발파를 실시하였다.

이상과 같이 현장실험은 총 24회 발파를 실시하였고 폭약은 에멀전 폭약을 사용하였다.(Table 3.2).

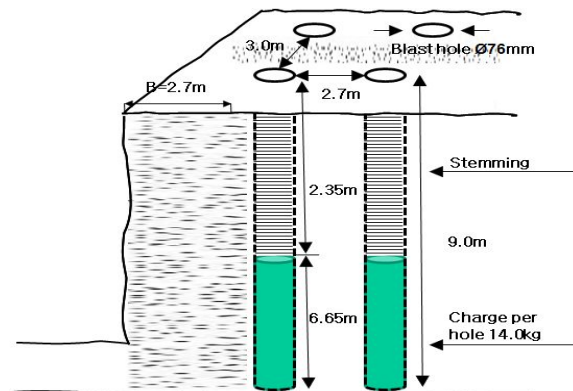
너관은 MS 지발 전기너관이 사용되었으며 발파패턴은 Figure 3.3과 같다.

Table 3.2 Experimental conditions

No.	1~12	13~24
Explosive	Emulsion	
Explosive diameter(mm)	Φ50	
Detonator	MS Detonator	
Diameter (mm)	76	
Drilling Length(m)	6.0	9.0
Spacing (m)	2.0	3.0
Burden (m)	1.8	2.7
Charge per hole(kg)	6.4	14.0
Charge per delay(kg)	6.4	14.0
Number of hole(ea)	1	



(a) Blasting pattern for holes of #1~#12



(b) Blasting pattern for holes of #13~#24

Figure 3.3 Blasting pattern (a)~(b)

Table 3.3은 실험조건을 고려하여 1~12회, 13~24회 발파를 각각 Case별로 분류한 표이다.

Table 3.3 Case for test blasting

Case	Drilling Length(m)	Explosive	Rock type
1	6	Emulsion	Gneiss
2	9	Emulsion	

3.4.2 현장실험 계측

현장실험의 계측은 InstanTel사의 Blastmate II, III 14대를 사용하여 실시하였다. 실험 계측에 사용된 Blastmate II, III 는 현장의 발파 및 건설장비 등을 이용한 작업 시 발생하는 소음, 진동 등을 계측하여 진행, 접선, 수직 및 주파수 등을 현장에서 인쇄하여 진동 계측값을 손쉽게 확인할 수 있다. 그리고 지발당 장약량(charge weight per delay)과 거리(distance)를 수동으로 입력하면 이를 환산거리(Scaled distance)로 자동으로 계산하는 기능뿐만 아니라, 진동측정의 주파수 및 시간이력 등을 상세히 보여주는 국내에서 가장 널리 사용되고 있는 진동 측정기기라 할 수 있다.

Blastmate II, III의 측정범위는 0.013~25.4cm/sec이고 주파수 분석을 수행하고자 할 때 모두 ZC(Zero Cross Frequency)와 고속 푸리에 변환(FFT, Fast Fourier Transform)이 가능하며 USBM/OSMRE와 DIN4150 주파수 분

석이 가능하다.

Figure 3.4는 실험 현장의 사진 및 계측 장면이다.



Figure 3.4 Measurements of study area.

4. 실험 계측 결과 및 분석

4.1 실험 계측 결과

현장실험을 통해 계측된 주파수 데이터를 수집하였다. 24회 발파시 계측기의 위치는 그대로 두었고 발파거리는 20~60m로 제한을 두었다. 그리하여 정기폭 61개, 중간기폭 55개, 역기폭 42개, 총 158개의 계측데이터가 수집되었다. 최대입자속도(PPV, Peak Particle Velocity)의 경우 접선방향성분(T), 수직방향성분(V), 진행방향성분(L)이 계측되고 이 세 성분 중 진동치가 가장 큰 성분을 기준파형으로 선정하여 주파수 분석을 실시하였다. 이에 대하여 고속 푸리에 변환(FFT, Fast Fourier Transform)을 통해 주주파수(Dominant frequency)가 결정 되었다.

Table 4.1~4.3에 첨부된 현장실험 계측결과표에 따르면 최대입자속도(PPV, Peak Particle Velocity)는 접선방향성분(T)의 경우 0.714~15.5mm/sec, 수직방향성분(V)의 경우 0.603~23.2mm/sec, 진행방향성분(L)의 경우 0.953~16.9mm/sec로 계측되었다. 주주파수(Dominant frequency)는 접선방향성분(T)의 경우 17.5~63.5Hz, 수직방향성분(V)의 경우 17.5~51.0Hz, 진행방향성분(L)의 경우 10.0~67.5Hz로 계측되었다.

4.1.1 정기폭에서의 계측 결과

Table 4.1 The measurement results of Top priming (Drilling Length: 6m)

No.	Distance (m)	PPV(mm/s)			Dominant frequency(Hz)			Drilling Length(m)
		Tran	Vert	Long	Tran	Vert	Long	
1	25	14.9	9.65	11.0	24.5	38.5	19.0	6m
2	27	8.64	7.75	6.35	25.0	25.5	30.0	
3	29	7.87	6.98	7.11	29.5	34.5	20.5	
4	31	6.48	3.81	6.73	30.5	30.0	21.0	
5	33	5.21	9.40	4.06	22.0	29.5	20.5	
6	35	2.67	6.10	2.92	22.5	30.0	21.0	
7	45	3.02	5.41	5.19	20.0	28.5	18.5	
8	26	4.32	3.43	3.05	22.0	25.0	17.5	
9	27	4.92	3.03	4.05	22.5	25.0	45.5	
10	29	3.68	4.95	2.92	22.0	25.0	46.0	
11	30	3.81	2.67	3.81	22.5	25.0	25.0	
12	30	4.11	4.10	4.02	22.5	25.0	46.5	
13	33	2.79	1.90	3.30	23.0	24.0	24.5	
14	33	4.06	3.81	3.30	23.0	25.0	43.0	
15	36	2.97	2.38	2.76	23.5	24.0	24.5	
16	36	2.79	2.79	3.17	25.0	24.5	24.5	
17	38	1.02	2.16	2.16	19.5	24.0	24.5	
18	39	2.54	2.54	3.48	25.5	24.5	24.5	
19	41	1.40	2.29	2.79	27.5	24.0	24.5	
20	43	1.21	1.32	1.87	30.0	26.0	24.0	
21	45	1.40	2.29	3.94	27.0	51.0	24.0	
22	45	1.10	1.46	2.57	25.5	23.0	24.5	
23	47	1.90	2.29	5.97	22.0	46.5	24.0	
24	48	1.29	0.921	2.56	25.0	27.5	20.5	
25	50	1.90	1.02	1.90	24.0	27.5	21.0	
26	50	1.29	1.57	3.05	53.5	28.5	24.0	
27	52	1.78	1.40	2.67	22.5	34.0	21.5	
28	53	1.90	1.14	2.41	29.5	28.5	21.0	
29	54	1.14	1.78	2.29	22.5	39.0	21.0	
30	54	1.52	1.78	2.41	22.5	20.5	21.5	
31	56	1.14	1.40	2.29	27.5	40.5	21.0	
32	58	0.714	0.857	1.00	17.5	47.0	20.5	

Table 4.2 The measurement results of Top priming (Drilling Length: 9m)

No.	Distance (m)	PPV(mm/s)			Dominant frequency(Hz)			Drilling Length(m)
		Tran	Vert	Long	Tran	Vert	Long	
1	25	3.56	5.59	3.43	22.5	24.5	45.0	9m
2	28	5.33	16.8	10.8	33.0	32.0	17.5	
3	33	4.44	2.92	3.68	30.0	25.0	42.5	
4	37	2.67	2.03	3.30	28.5	25.0	24.5	
5	39	11.3	5.46	8.00	31.5	24.0	37.5	
6	40	2.54	2.29	2.89	28.5	24.5	24.5	
7	43	1.90	1.65	2.29	27.0	24.0	24.5	
8	48	1.64	1.21	2.21	28.0	31.0	24.5	
9	50	5.08	4.97	4.02	25.5	23.5	37.5	
10	51	1.14	1.90	3.30	28.0	29.5	24.0	
11	54	1.11	1.00	2.24	25.0	28.5	20.5	
12	56	3.19	3.59	3.97	25.5	28.0	29.5	
13	57	1.14	0.635	1.65	23.5	28.5	21.0	
14	58	4.19	2.92	4.06	21.5	28.0	21.5	
15	59	1.65	1.14	2.16	22.5	20.5	21.5	
16	60	2.41	4.06	2.41	23.0	30.5	21.5	
17	24	7.49	15.1	8.89	35.0	32.5	22.0	
18	25	5.21	12.3	6.73	22.0	32.0	10.0	
19	34	9.14	8.00	7.87	27.0	24.5	43.0	
20	35	11.3	7.37	10.0	32.5	25.0	41.5	
21	38	7.11	4.57	6.10	26.0	24.0	38.0	
22	39	9.78	5.84	8.13	26.0	24.0	37.5	
23	42	5.73	6.49	7.11	27.0	24.0	26.0	
24	43	6.97	7.24	8.83	26.0	44.5	28.5	
25	45	3.68	5.97	5.59	25.5	23.5	25.5	
26	52	4.19	5.71	8.76	25.5	46.5	26.0	
27	56	3.64	2.84	4.73	21.5	28.0	21.0	
28	58	4.37	3.52	5.22	21.5	28.0	23.5	
29	59	4.19	2.16	4.44	31.0	31.5	21.0	

4.1.2 중간기폭에서의 계측 결과

Table 4.3 The measurement results of Middle priming (Drilling Length: 6m)

No.	Distance (m)	PPV(mm/s)			Dominant frequency(Hz)			Drilling Length(m)
		Tran	Vert	Long	Tran	Vert	Long	
1	22	9.14	12.3	13.3	23.5	36.0	23.0	6m
2	23	12.8	8.76	11.6	24.5	29.0	22.0	
3	25	6.65	5.84	7.75	24.0	27.0	23.5	
4	28	11.2	13.1	16.9	24.5	46.5	33.5	
5	31	5.54	4.22	5.08	21.5	23.0	28.5	
6	33	6.38	2.92	5.65	21.5	33.5	21.0	
7	35	6.22	2.54	6.60	21.5	35.0	21.0	
8	37	5.33	1.78	6.98	21.5	28.5	20.5	
9	38	2.41	4.32	2.67	22.5	30.5	21.0	
10	41	2.03	5.71	3.17	28.0	34.0	20.5	
11	27	2.92	4.95	2.29	22.0	24.0	12.0	
12	27	2.37	4.60	3.18	28.0	29.0	28.0	
13	31	2.92	4.44	2.67	28.0	24.5	42.5	
14	34	5.71	4.19	3.30	25.5	24.5	104	
15	34	3.30	2.41	1.90	27.0	24.0	38.5	
16	37	5.08	2.54	2.92	26.0	24.5	24.5	
17	37	2.35	2.02	2.19	28.0	24.0	29.0	
18	40	3.81	2.49	2.94	27.0	24.5	24.5	
19	40	2.16	2.03	1.90	28.0	23.5	38.5	
20	43	2.29	1.78	2.29	28.0	23.5	24.5	
21	44	1.79	1.68	1.64	28.0	23.5	31.0	
22	46	1.78	2.16	2.29	26.0	30.0	28.5	
23	47	1.64	1.27	1.84	25.0	17.5	24.5	
24	49	2.54	1.27	3.94	21.5	29.0	24.0	
25	50	1.19	1.44	1.73	22.0	28.5	24.0	
26	53	1.25	1.44	2.68	21.5	28.5	23.5	
27	54	1.14	1.40	1.78	23.5	32.5	22.0	
28	56	1.27	1.14	2.54	21.0	20.5	21.5	
29	59	0.889	1.14	1.90	27.5	46.0	21.5	

Table 4.4 The measurement results of Middle priming (Drilling Length: 9m)

No.	Distance (m)	PPV(mm/s)			Dominant frequency(Hz)			Drilling Length(m)
		Tran	Vert	Long	Tran	Vert	Long	
1	29	8.76	15.1	8.89	22.0	41.0	33.0	9m
2	31	3.13	3.46	4.00	26.0	27.5	30.0	
3	32	15.5	9.14	15.6	47.0	41.0	44.0	
4	35	13.7	7.87	14.0	49.5	30.5	46.0	
5	38	13.7	10.5	13.5	46.0	24.0	42.5	
6	41	12.1	6.60	11.4	46.5	24.5	43.5	
7	42	11.0	5.71	8.76	33.0	24.0	39.5	
8	45	8.64	5.21	9.02	26.0	24.5	39.5	
9	47	6.75	5.06	8.13	26.0	45.0	38.0	
10	48	6.86	8.64	6.22	27.0	42.0	38.0	
11	52	4.83	5.71	5.21	25.5	43.0	38.5	
12	53	6.62	4.32	4.13	27.0	41.0	38.0	
13	55	5.71	7.49	7.75	26.0	46.5	39.0	
14	57	4.64	2.76	4.08	25.5	38.0	39.5	
15	59	3.13	3.46	4.00	26.0	27.5	30.0	
16	59	4.83	5.46	7.24	25.5	47.0	41.0	
17	22	8.38	23.2	13.6	32.0	30.5	16.5	
18	31	7.87	14.9	8.76	35.0	33.0	10.0	
19	37	13.1	6.22	9.52	31.0	23.5	38.0	
20	44	6.35	10.0	6.98	25.5	40.5	37.0	
21	48	5.87	6.97	9.72	26.5	24.0	28.5	
22	52	4.19	6.35	7.75	25.5	37.0	29.5	
23	52	4.44	9.91	8.64	25.0	28.0	38.0	
24	57	3.68	5.08	4.91	25.5	37.0	39.0	
25	59	4.83	8.13	13.2	25.5	46.0	39.5	
26	59	5.08	3.68	3.68	30.0	27.5	21.0	

4.1.3 역기폭에서의 계측 결과

Table 4.5 The measurement results of Bottom priming (Drilling Length: 6m)

No.	Distance (m)	PPV(mm/s)			Dominant frequency(Hz)			Drilling Length(m)
		Tran	Vert	Long	Tran	Vert	Long	
1	21	9.91	10.3	12.5	24.5	26.5	24.0	6m
2	24	5.84	7.49	12.4	23.5	27.0	25.0	
3	27	4.52	3.71	5.60	24.0	27.0	38.0	
4	28	4.70	7.11	10.2	24.0	26.5	29.0	
5	31	3.86	4.67	5.19	24.5	39.0	42.0	
6	38	4.56	2.79	5.79	55.5	33.5	34.5	
7	44	2.29	4.06	3.05	22.0	36.5	20.5	
8	48	1.92	3.08	3.32	63.5	108	40.5	
9	48	2.79	4.83	3.43	23.5	37.5	20.5	
10	23	4.70	8.76	4.32	22.0	31.0	16.5	
11	24	2.03	5.97	2.29	22.0	38.5	17.0	
12	25	3.00	4.81	3.97	60.0	25.5	46.0	
13	28	4.06	4.44	4.06	44.0	25.0	43.0	
14	30	6.48	5.46	6.10	27.0	24.5	42.5	
15	31	3.56	2.67	2.29	27.0	25.0	39.5	
16	33	6.22	3.81	3.68	26.0	24.0	38.5	
17	34	2.54	2.27	3.03	27.0	24.0	28.5	
18	36	4.64	3.16	3.81	27.0	23.5	28.5	
19	37	2.29	2.29	2.79	25.5	24.0	39.0	
20	39	3.43	3.30	3.17	27.0	23.0	30.5	
21	41	1.87	1.84	2.43	26.0	23.5	38.0	
22	43	2.41	2.54	3.43	25.0	47.5	41.5	
23	44	3.65	2.21	3.37	26.0	23.5	38.5	
24	46	3.17	4.32	5.21	26.0	47.5	40.5	
25	50	1.52	1.65	1.27	23.0	32.5	22.0	
26	53	1.14	1.40	1.02	27.0	43.0	21.5	
27	56	0.826	0.603	0.953	20.5	26.5	43.5	
28	57	1.27	1.65	1.65	27.0	37.0	21.5	

Table 4.6 The measurement results of Bottom priming (Drilling Length: 9m)

No.	Distance (m)	PPV(mm/s)			Dominant frequency(Hz)			Drilling Length(m)
		Tran	Vert	Long	Tran	Vert	Long	
1	34	5.71	9.65	6.10	36.0	33.0	51.5	9m
2	36	4.19	5.84	4.83	36.0	34.5	67.5	
3	45	7.87	4.95	7.37	34.0	25.0	43.0	
4	48	5.46	3.17	4.44	34.5	25.0	46.5	
5	49	6.35	3.43	4.95	33.0	24.5	40.0	
6	52	4.35	4.22	5.94	27.0	24.0	38.0	
7	56	2.92	4.44	4.57	26.5	37.5	39.5	
8	34	6.10	9.14	6.10	35.5	34.0	50.5	
9	36	8.13	14.5	8.38	25.5	31.0	41.5	
10	39	9.14	5.98	7.75	37.5	30.5	46.0	
11	41	11.6	10.5	8.64	37.5	29.5	41.0	
12	46	7.11	3.81	6.10	34.0	25.0	41.0	
13	50	4.83	2.92	5.08	25.5	24.5	38.0	
14	60	3.81	6.73	6.35	26.0	41.0	25.5	

4.2 계측 결과 분석

Table 3.3에 제시한 Case에 따라, 즉 천공장이 6m 일 때와 9m 일 때, 각각의 정기폭과 중간기폭 그리고 역기폭을 비교, 분석하였다. 기폭위치에 따른 주파수 분석 결과를 전체적으로 보았을 때 정기폭일 때는 낮은 주파수 경향을 보였고, 중간기폭일 때는 골고루 분포하는 경향을, 역기폭 일 때는 대체로 높은 주파수 경향을 보였다. 한편 거리에 따라 주파수가 어떤 값을 가질 지 예측이 가능 하도록 Fit Linear로 분석을 실시하였다. 각각의 경우를 상세히 표현하면 다음과 같다.

4.2.1 Case 1의 분석

천공장이 6m일 때 정기폭에서는 두가지 특성이 나타났다. 하나는 대체로 낮은 주파수 대역에 분포되었다는 것이다, 주파수는 최저 20.5Hz에서 최대 30.0Hz까지 측정되었고, 주로 22.0~23.0Hz 사이에 집중적으로 분포되었다. 다른 하나는 거리가 증가될수록 주주파수가 점점 감소되는 경향을 보였다는 것이다. 이를 좀 더 상세히 직선의 방정식 $y=ax+b$ 꼴로 나타내기 위하여 Fit Linear로 분석 해 보았을 시 a는 -0.12, b는 28.73으로 나타났고 이때의 상관 계수 R은 0.54이었다.

반면 역기폭에서도 두가지 특성이 나타났고, 그 결과는 정기폭과 정반대였다. 먼저, 역기폭에서는 상대적으로 높은 주파수 대역에 분포되었다. 주파수는 최저 23.0Hz에서 최대 43.5Hz까지 측정되었고, 주로 35.0~42.0Hz사이에 분포되었다. 또한 역기폭에서는 거리가 증가될수록 주주파수가 점점 증가되는 경향을 보였다. 이것도 역시 Fit Linear로 분석 해 보았을 시 a는 0.36, b는

19.76이고, 이때의 상관계수 R은 0.58이었다.

마지막으로 중간기폭에서는 주주파수가 골고루 분포되었다. 그래서 전체적인 Fit Linear 분석은 어렵지만 45m이상만 국한해서 보면, 거리가 증가할수록 주주파수는 감소되는 현상을 볼 수 있었고 Fit Linear로 분석해 보았을시 a는 -0.43, b는 46.09이고, 이때의 상관계수 R은 0.86으로 높게 나타났다.

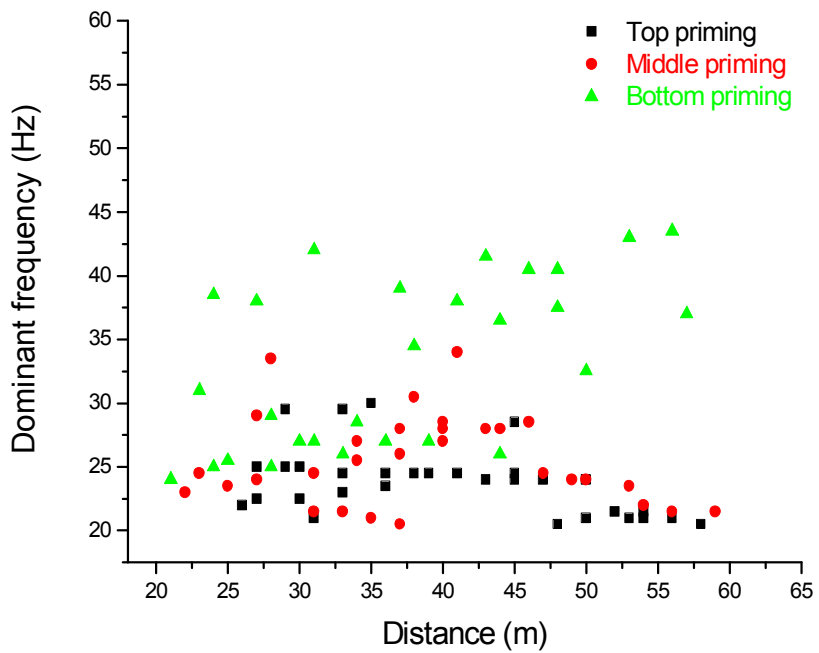


Figure 4.1 Relationship between Dominant frequency and distance of Case 1

4.2.2 Case 2의 분석

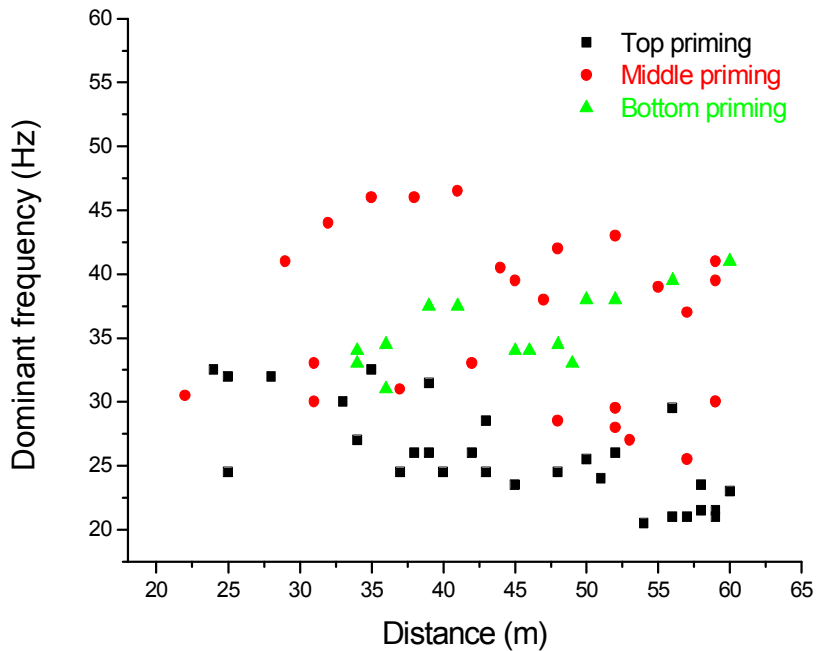


Figure 4.2 Relationship between Dominant frequency and distance of Case 2

천공장이 9m일 때 정기폭은 다음과 같은 특성이 나타났다. 첫째, 대체로 낮은 주파수 대역에 분포되었다, 주파수는 최저 20.5Hz에서 최대 32.5Hz까지 측정되었다. 둘째, 거리가 증가될수록 주주파수가 점점 감소되는 경향을 보였다. 이는 Fit Linear로 분석 해 보았을 시 a는 -0.24, b는 36.56으로 나타

났고 이때의 상관계수 R은 0.73이었다.

천공장이 6m 일 때와 마찬가지로 역기폭에서는 정기폭과는 다른 결과가 나타났다. 역기폭에서는 대체적으로 높은 주파수 대역에 분포되었다. 주파수는 최저 31.0Hz에서 최대 41.0Hz까지 측정되었다, 또한 역기폭에서는 거리가 증가될수록 주주파수가 점점 증가되는 경향을 보였다. 이것도 역시 Fit Linear로 분석 해 보았을 시 a는 0.24, b는 24.95이고, 이때의 상관계수 R은 0.69이었다.

마지막으로 중간기폭에서는 역시 주주파수가 골고루 분포되었다. 여기서 는 Fit Linear 분석이 어려웠다.

천공장이 9m일 때 주목 할 점은 정기폭에서의 거리가 증가될수록 주주파수가 점점 감소되는 경향과 역기폭에서의 거리가 증가될수록 주주파수가 점점 증가되는 경향이 천공장이 6m 일 때 보다 더 뚜렷해진다는 점이다. 천공장이 6m 일때 상관계수 R이 정기폭에서 0.54, 역기폭에서 0.58인 것에 비해 천공장이 9m 일때 상관계수 R이 정기폭에서 0.73, 역기폭에서 0.69인 것을 보면 알 수 있다.

5. 결론

발파진동이 구조물에 미치는 영향에 있어서 진동의 시간적 변화특성을 나타내는 주파수특성의 중요성이 인식되면서 최근 발파진동 영향평가에 있어서 최대진폭 외에도 진동에 수반되는 주파수 성분을 영향변수로 표현하는 방법이 점차 보편화 되어가고 있다. 따라서 발파진동의 영향평가에 있어서도 주파수 특성에 관한 정보를 파악하고 평가하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 기폭위치에 따라 발파진동의 주파수 특성을 파악하기 위해서 단일공 시험 발파를 실시하여 고속 푸리에 변환(FFT, Fast Fourier Transform)을 통해 주주파수(Dominant frequency)를 결정하고 기폭위치에 따라 어떤 변화가 있는지 분석하여 서로 비교하였다.

1. 기폭위치에 따른 주파수의 비교를 위하여 거리를 20~60m로 제한하였고 단일공 발파는 동일한 패턴으로 설계, 실시함으로써 본 연구에 대한 타당성을 확보하였다.

2. 실험지역에서의 계측위치와 계측기기에 따른 변수를 최소화 하기 위해서 모든 단일공 발파는 편마암에서 계측을 하였고 동일한 계측기기로 처음부터 끝까지 동일한 배열로 유지시켰다.

3. 기폭위치에 따른 주파수 대역을 분석 해 본 결과 천공장이 6m일때와 9m일때 모두 정기폭은 낮은 주파수 대역, 역기폭은 높은 주파수 대역, 중간 기폭은 대체로 골고루 분포됨을 알 수 있었다.

4. 천공장이 6m일때와 9m일때를 Fit Linear로 분석으로 비교해 보았을 시 정기폭에서는 6m일때의 상관계수 R이 0.54인 반면에 9m일때의 상관계수 R은 0.73이었다. 이를 보아 천공장이 깊어질수록 거리 증가에 따른 정기폭의 주파수 값 감소에 대한 경향성이 커진다는 걸 알 수 있다. 또한 역기폭에서는 천공장이 6m일때의 상관계수 R이 0.58인 반면에 9m일때의 상관계수 R은 0.69이었다. 이를 보아 천공장이 깊어질수록 거리 증가에 따른 역기폭의 주파수 값 증가에 대한 경향성이 커질 것으로 판단된다.

5. 기폭위치에 따른 주파수 경향을 분석 해 본 결과 정기폭은 거리가 증가함에 따라서 주파수 값이 감소하였으며, 역기폭은 거리가 증가함에 따라 주파수 값이 증가하는 경향성을 보였다. 이처럼 기폭위치 뿐만 아니라 다른 요인에 의해 영향을 받는 주파수 특성에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 강대우, 2006, 토목기술자를 위한 알기 쉬운 발파공학, 구미서관.
- 강추원, 2009, 제2판 발파공학 A to Z, 구미서관.
- 기경철, 김일중, 2002, 산학인을 위한 발파공학, 동화기술.
- 김종인, 2006, 단일공 파형 중첩 모델링 자료에 의한 발파진동의 예측, 조선대학교 박사학위논문.
- 오이환, 원연호, 임한욱, 2006, 터널굴진에서 장약 및 기폭방법 개선에 관한 연구, 화약·발파, Vol. 24, No. 2, pp. 1-8.
- 이연삼, 1995, 터널 발파의 진동특성과 주파수특성에 관한 연구, 청주대학교 석사학위논문.
- 이종립, 류창하, 주광호, 최준성, 1995, 발파진동의 주파수특성 예측, 대한토목학회 학술발표회 논문집, Vol. 1995, No. 1, pp. 119-122
- 이형주, 1997, 지표발파시 주파수 특성에 관한 연구, 조선대학교 석사학위논문.
- 임한욱, 1992, 발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구, 자원개발연구, Vol. 8, No. 1, pp. 87-98.
- 정두성, 2010, 지연시차에 따른 발파진동의 주파수 특성 예측, 조선대학교 석사학위논문.
- 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.
- Bicholls, H., Johnson, c., Duvall, W., 1971, Blasting Vibrations and Their

- Effects on Structures, Bulletin 656.
- Bollinger G. A., 1971, Blasting Vibration Analysis, pp.58-88.
- Devine, J. R., 1966, Avoiding Damage to Residences from Blasting Vibrations, Highway Research Record 135, pp. 35-44.
- Dupont Co., 1980, Blaster's Hand Book, 16th Edition, pp.423-446.
- Hino, U., 1956, Fragmentation of Rock through Blasting, Quarterly of the Colorado School of Mines, pp. 51, 189.
- Mark Leidig, Jessie L. Bonner, Tim Rath, Donald Murray, 2010, Quantification of ground vibration differences from well-confined single-hole explosions with variable velocity of detonation, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 47, pp. 42-49
- McHugh, S., 1983, Computational Simulations of Dynamically Induced Fracture and Fragmentation, Proceedings of the First International Symposium on Rock by Blasting, pp. 407-418.
- Persson, P. A., Lundborg, N., and Johansson, C. H., 1970, The Basic Mechanism in Rock Blasting. Proceedings of the 2nd Congress of the International Society for Rock Mechanics, Belgrade.
- Winzer, S. R., Furth, W., and Ritter, A., 1979, Initiator Firing Times and Their Relationship to Blasting Performance, Proceedings of the 20th Symposium on Rock Mechanics, pp. 461-470.
- 175th Anniversary Edition of the Blasters' Handbook, 1980, Blasters' Handbook, Dupont.

감사의 글

저작물 이용 허용서

학과	에너지자원공학과	학번	20107312	과정	석사
성명	한글 : 손 석 범 한문 : 孫 碩 杙 영문 : Son, Seok bum				
주소	광주광역시 서구 풍암동 모아아파트 103동 1105호				
연락처	E-MAIL : seokpooh@hanmail.net				
논문제목	한글 : 기폭위치에 따른 주파수 분석 영어 : Frequency analysis according to priming location				

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

- 다 음 -

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

동의여부 : 동의() 반대()

2011년 2월

저작자 : 손 석 범 (인)

조선대학교 총장 귀하