

## 기폭위치에 따른 주파수 분석

손석범<sup>1)</sup>, 강추원<sup>2)</sup>, 노영배<sup>3)</sup>, 고진석<sup>2)\*</sup>

### Frequency Analysis According to Priming Location

Seok-Bum Son, Choo-Won Kang, Young-Bae Noh and Chin-Surk Go

**Abstract** 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 of single hole test blasting. Then the study decided dominant frequency through FFT and analysed changes according to priming locations. Consequently frequency range according to priming location is indicated top priming is distributed high range, bottom priming is distributed high range, middle priming is distributed evenly range. Frequency trend according to priming location is indicated distance increase with frequency decrease in top priming, distance increase with frequency increase in bottom priming.

**Key words** Dominant frequency, Priming location, Fast Fourier Transform

**초 록** 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. 이에 본 연구에서는 편마암 지역의 암석샘플을 채취하여 실내암석 실험을 실시하였고, 기폭위치에 따라 발파진동의 주파수 특성을 파악하기 위해서 단일공 시험발파를 실시하여 고속 푸리에 변환(FFT)을 통해 주주파수를 결정하고 기폭위치에 따라 어떤 변화가 있는지 분석하였다. 그 결과 기폭위치에 따른 주파수 대역에서는 정기폭은 낮은 주파수 대역, 역기폭은 높은 주파수 대역, 중간기폭은 대체로 골고루 분포됨을 알 수 있었다. 기폭위치에 따른 주파수 경향을 분석해 본 결과에서는 정기폭은 거리가 증가함에 따라서 주파수 값이 감소하였으며, 역기폭은 거리가 증가함에 따라 주파수 값이 증가함을 보였다.

**핵심어** 주주파수, 기폭위치, 고속 푸리에 변환

## 1. 서 론

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 있

며, 발파조건은 사용하는 폭약의 종류, 지발당 장약량, 기폭방법, 전색상태, 자유면의 수, 발파유형, 폭원과 측점간의 거리 등을 가리킨다. 이 중 지발당 장약량과 측점간의 거리가 중요한 요인으로 작용하고 특히 지발당 장약량이 조절 가능한 변수이다. 한편 발파진동을 예측하는 또 다른 연구는 Langefors & Kihlstrom (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 지

<sup>1)</sup> 조선대학교 에너지자원공학과 석사과정

<sup>2)</sup> 조선대학교 에너지자원공학과 교수

<sup>3)</sup> 대동발파기술사사무소 대표

\* 교신저자 : jsgo@chosun.ac.kr

접수일 : 2011년 12월 7일

심사 완료일 : 2011년 12월 21일

게재 승인일 : 2011년 12월 23일

반의 주파수 고려 여부로 구분 될 수 있다. 이렇듯 이제 주파수는 발파를 함에 있어서 상당한 영향을 미치는 요인이 되었다.

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. 주파수 특성은 정밀기기류와 같은 시설물에 대한 영향문제를 논의할 때 매우 중요한 요소이며 따라서 발파진동의 영향평가에 있어서도 진동의 최대크기 외에 주파수 특성에 관한 정보를 파악하여 평가하는 것이 필요하다(이종립 외, 1995).

국내에서의 발파진동에 대한 연구 중 주파수와 관련된 발파진동의 연구 결과를 살펴보면 김대상(1991)은 발파진동의 속도 및 주파수를 고려한 허용진동치 결정에 관한 연구를 수행하였고, 임한옥과 김재동(1992)은 발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구를 시행하였다. 또한 류창하(1995)는 발파에 의한 지반진동의 수준 및 주파수 특성 예측에 관한 연구를 발표하였다. 이러한 연구들은 주파수에 관한 연구이지만 기폭위치에 대한 언급은 없었다.

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. 기폭방법

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

기폭약은 높은 폭속과 높은 폭발력을 가진 뇌관으로 기폭이 가능하도록 만들어져야 한다. 기폭약은 장전된 폭약의 폭발파가 이동될 방향을 향하는 위치에 설치될 때 더욱 효과적이다. 이것을 directional priming 이라한다. 따라서 전장약을 향하는 기폭약에 기폭장치를 설치하는 것이 가장 좋다. 먼저 공구를 향하는 뇌관을 가진 기폭약을 공에 설치한다. 뇌관을 포함한 기폭약이 공구와 전장약을 향하는 공저에 설치될 때 이것이 역기폭(bottom priming)으로 알려져 있다. 반면에 뇌관을 포함한 기폭약이 공저를 향하며, 공구나 공구부근에 설치될 때 이것은 정기폭(top priming)으로 알려져 있다. 기폭약의 적절한 위치는 안정성과 효율성 둘 다의 관점에서 중요하다.

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

Fig. 1은 기폭약의 장전위치에 따른 기폭방법을 나

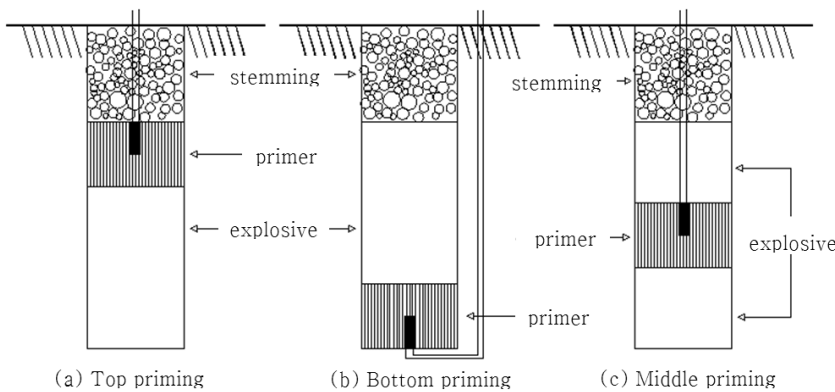


Fig. 1. Position of primer.

타낸 그림이다.

첫째, 뇌관을 포함한 기폭약이 공저를 향하며, 공구나 공구부근에 설치될 때 이것은 정기폭이라고 한다 (Fig. 1(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 사용하기에는 안전에 부적절한 고려사항이 있을 때 사용한다.

발파공의 입구 쪽에 기폭점을 두는 것이 안쪽에 두는 것보다 충격파가 자유면에도 도달하는 시간이 빠르기 때문에 자유면에서 반사하는 반사파의 세기가 크다는 점으로부터 정기폭이 역기폭보다 발파위력이 크다고 주장되고 있으며, 순폭성에 있어서도 정기폭이 우수하다고 보고되고 있다.

둘째, 뇌관을 포함한 기폭약이 공구와 전체 장약을 향하는 공저에 설치될 때 이것이 역기폭이라고 한다 (Fig. 1(b)). 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.

마지막으로 중간기폭이란, 기폭점을 공입구와 공저의 중간부분에 두는 것(Fig. 1(c))으로 장약의 길이가 길 경우에 많이 사용된다. 비교적 둔감한 초유폭약을 이용하여 긴 장약을 기폭 할 경우에는 끝부분에 전폭약을 설치할 수도 있다.

### 3. 대상현장의 지질 및 물성실험

#### 3.1 대상현장의 지질

본 연구지역은 군산시 나포면 서포리(Fig. 2)로 군산시의 북동부이고 취성산지의 서측 단부에 위치하고 있다. 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, 개정



Fig. 2. Site map of the study area.

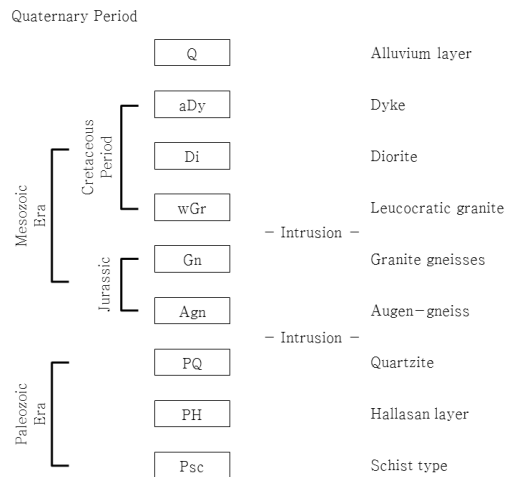


Fig. 3. Geological formation of the study area.

면이며, 구성암석은 선캄브리아기의 화강암질 편마암이다.

군산지역의 지질도를 살펴보면 비교적 단순한 암상 분포로 구성되어 있다. 기반암으로 생각할 수 있는 경기편마암 복합체인 서산층군을 비롯하여 화강암질 편마암, 안구상 편마암 이들을 부정합으로 덮는 평안누층군이 소규모로 옥구읍 남쪽으로 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 선캄브리아기의 서산층군, 화강암질 편마암, 안구상 편마암이 달리고 저 멀리 바다로 건너 섬들을 이루고 있다. 본 연구지역인 나포면 서포리가 이 지역에 속하는 암석지대이다(Fig. 3).

### 3.2 현장 암석의 물성실험

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 2.63~2.65 범위로 분포

하며 평균 2.64이고, 공극률은 0.57~0.94% 범위로 분포하며 평균 0.78%로 측정되었다.

탄성과 전파속도(P파속도)는 OYO사의 New Sonicviewer로 P파의 전파속도를 구하였다. P파 전파속도는 4,940~5,510m/s 범위로 분포하며 평균 5,363m/s로 측정되었다.

일축압축강도는 만능재료시험기(Universal Testing Machine, UTM, Model No. KPUT-100)를 사용하여 구하였다. 그 결과 일축압축강도는 1,136~1,435kgf/cm<sup>2</sup> 범위로 분포하며 평균 1,321kgf/cm<sup>2</sup>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 3.91~4.67×10<sup>5</sup>kgf/cm<sup>2</sup> 범위로 분포하며 평균 4.43×10<sup>5</sup>kgf/cm<sup>2</sup>로 측정되었다.

다음 Table 1은 조사지역의 주요 실내실험 결과를 나타낸 것이다.

## 4. 현장실험 방법 및 계측

### 4.1 실험방법

본 연구의 현장실험은 전라북도 군산시 나포면 서포리에 위치한 연구지역(편마암 지역)에서 총 24회 발파를 실시하였다.

실험 조건은 Table 2와 같다. 연구지역 별로 1~12회는 공경  $\phi$ 76mm, 공간격 2.0m, 저항선 1.8m, 천공장 6.0m, 그리고 지발당 장약량 6.4kg, 13~24회는 공경  $\phi$ 76mm, 공간격 3.0m, 저항선 2.7m, 천공장 9.0m,

Table 1. Results of rock property test

Specific gravity	Porosity (%)	P wave velocity (m/sec)	Young's modulus ( $\times 10^5$ kgf/cm <sup>2</sup> )	Uni. comp. strength (kgf/cm <sup>2</sup> )
2.63~2.65 (2.64)	0.57~0.94 (0.78)	4,940~5,510 (5,363)	3.91~4.67 (4.43)	1,136~1,435 (1,321)

Table 2. Experimental conditions

No.	Explosive	Explosive diameter (mm)	Detonator	Diameter (mm)	Drilling length (m)	Spacing (m)	Burden (m)	Charge per hole (kg)	Charge per delay (kg)	Number of hole (ea)
1~12	Emulsion	$\phi$ 50	MS Detonator	76	6.0	2.0	1.8	6.4	6.4	1
13~24					9.0	3.0	2.7	14.0	14.0	

그리고 지발당 장약량 14kg을 사용하여 단일공 시험 발파를 실시하였다. 이상과 같이 현장실험은 총 24회 발파를 실시하였고 폭약은 에멀전 폭약을 사용하였다 (Table 2). 뇌관은 MS 지발 전기뇌관이 사용되었으며 발파패턴은 Fig. 4과 같다.

4.2 계측결과

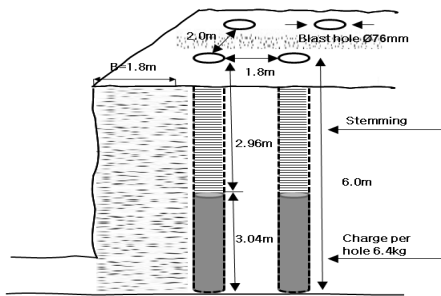
현장실험을 통해 계측된 주파수 데이터를 수집하였다. 24회 발파시 계측기의 위치는 그대로 두었고 발파

거리는 20~60m로 제한을 두었다. 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 변환을 통해 주주파수가 결정 되었다. Fig. 5는 발파 측정 장소를 나타낸 것이다.

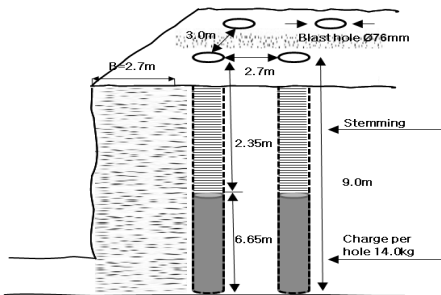
현장실험 계측결과에 따르면 최대입자속도는 접선 방향성분의 경우 0.714~15.5mm/sec, 수직방향성분의 경우 0.603~23.2mm/sec, 진행방향성분의 경우 0.953~16.9mm/sec로 계측되었다. 주주파수(Dominant frequency)는 접선방향성분의 경우 17.5~63.5Hz, 수직방향성분의 경우 17.5~51.0Hz, 진행방향성분의 경우 10.0~67.5Hz로 계측되었다.

5. 계측결과 분석

천공장이 6m일 때와 9m일 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, 역기폭일 때는 대체로 높은 주파수 경향을 보였다. 한편 거리에 따라 주파수가 어떤 값을 가질 지 예측이 가능하도록 선형회귀분석을 실시하였다. Fig. 6는 천공장이 6m일 때 거리에



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



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

Fig. 4. Blasting pattern.



Fig. 5. Frequency measurement setting at the study area.

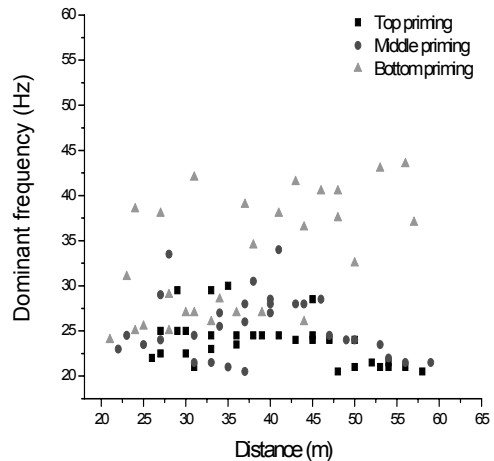


Fig. 6. Relationship between dominant frequency and measurement distance in case of 6m - length drilled holes.

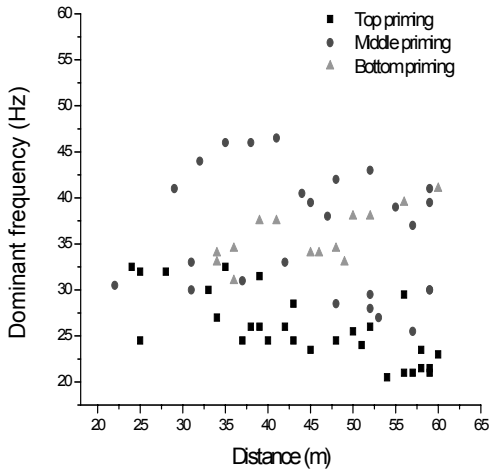


Fig. 7. Relationship between dominant frequency and measurement distance in case of 9m - length drilled holes.

다른 주파수 분포를 나타낸 그래프이고, Fig. 7은 천공장이 9m일 때 거리에 따른 주파수 분포를 나타낸 그래프이다.

5.1 천공장이 6m인 경우

천공장이 6m일 때 정기폭은 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 좀더 상세히 직선의 방정식  $y=ax+b$  꼴로 나타내기 위하여 선형회귀분석을 실시해 보았을 시  $a$ 는 -0.12,  $b$ 는 28.73으로 나타났고 이때의 상관계수  $R$ 은 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 35.0Hz~42.0Hz 사이에 분포되었다. 또한 역기폭에서는 거리가 증가될수록 주주파수가 점점 증가되는 경향을 보였다. 이것도 역시 선형회귀분석을 해 보았을 시  $a$ 는 0.36,  $b$ 는 19.76이고, 이때의 상관계수  $R$ 은 0.58이었다.

마지막으로 중간기폭에서는 주주파수가 골고루 분포되었다. 그래서 전체적인 선형회귀분석은 어렵지만

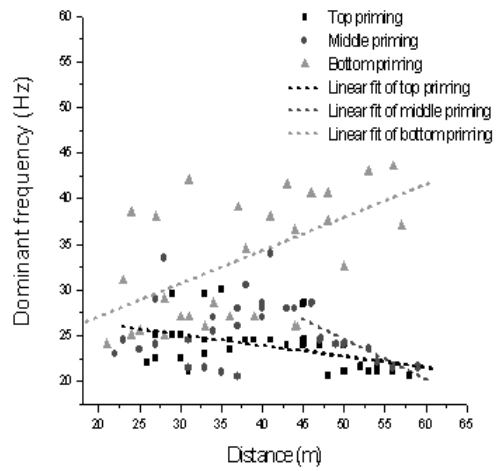


Fig. 8. Fit linear analysis in case of 6m - length drilled holes.

45m이상만 국한해서 보면, 거리가 증가할수록 주주파수는 감소되는 현상을 볼 수 있었고 선형회귀분석을 해 보았을 시  $a$ 는 -0.43,  $b$ 는 46.09이고, 이때의 상관계수  $R$ 은 0.86로 높게 나타났다. Fig. 8은 천공장이 6m 일 때 선형회귀분석 그래프를 나타낸 것이다. Fig. 8에서 중간기폭은 45m 이상에서만 분석을 하였다.

5.2 천공장이 9m 인 경우

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 보였다는 것이다. 선형회귀분석을 실시해 보았을 시  $a$ 는 -0.24,  $b$ 는 36.56으로 나타났고 이때의 상관계수  $R$ 은 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 선형회귀분석을 해 보았을 시  $a$ 는 0.24,  $b$ 는 24.95이고, 이때의 상관계수  $R$ 은 0.69이었다.

마지막으로 중간기폭에서는 역시 주주파수가 골고루 분포되었다. 여기서는 선형회귀분석이 어려웠다.

천공장이 9m일 때 주목 할 점은 정기폭에서의 거리

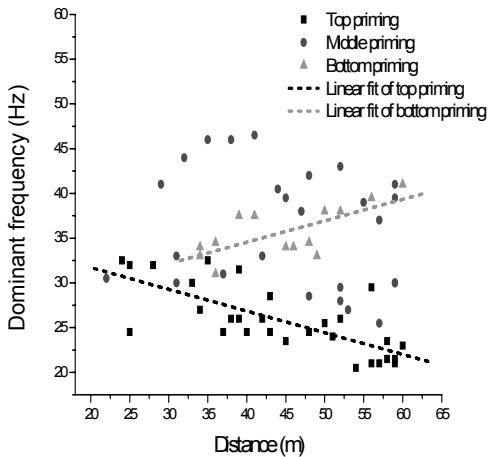


Fig. 9. Fit linear analysis in case of 9m - length drilled holes.

가 증가될수록 주파수가 점점 감소되는 경향과 역기폭에서의 거리가 증가될수록 주파수가 점점 증가되는 경향이 천공장이 6m 일 때 보다 더 뚜렷해진다. 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. Fig. 9는 천공장이 9m 일 때 선형회귀분석 그래프를 나타낸 것이다. 중간기폭의 계측결과는 선형적인 상관관계가 불분명하여 선형회귀분석에서 제외하였다

## 6. 결론

본 연구에서는 기폭위치에 따라 발파진동의 주파수 특성을 파악하기 위해서 단일공 시험발파를 실시하여 고속 푸리에 변환(FFT, Fast Fourier Transform)을 통해 주파수(Dominant frequency)를 결정하고 기폭 위치에 따라 어떤 변화가 있는지 분석하여 서로 비교하였다. 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 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 편마

암에서 계측을 하였고 동일한 계측기기로 처음부터 끝까지 동일한 배열로 유지 시켰다.

- 3) 기폭위치에 따른 주파수 대역을 분석 해 본 결과 정기폭은 낮은 주파수 대역, 역기폭은 높은 주파수 대역, 중간기폭은 대체로 골고루 분포됨을 알 수 있었다.
- 4) 천공장이 6m일 때와 9m일 때를 선형회귀분석으로 비교해 보았을 시 정기폭에서는 6m일 때의 상관계수 R이 0.54인 반면에 9m일 때의 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 6m일 때의 상관계수 R이 0.58인 반면에 9m일 때의 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 증가함을 알 수 있었다.
- 6) 위에서 서술된 기폭위치에 따른 주파수 분석이 발파시 보안물건 등에 어떤 영향을 주고, 어떤 관계에 있는지 알아 볼 필요성이 있다. 또한 기폭위치 뿐만 아니라 다른 요인에 의해 영향을 받는 주파수 특성에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 사 사

이 논문 또는 저서는 지식경제부 자원개발특성화대학사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 이종립, 류창하, 주광호, 최준성, 1995, 발파진동의 주파수특성 예측, 대한토목학회 학술발표회 논문집, Vol. 1995, No. 1, pp. 119-122.
2. 김대상, 1991, 발파진동의 속도 및 주파수를 고려한 허용진동치 결정에 관한 연구, 석사, 서울대학교, 대한민국, pp. 1-63.

3. 류창하, 1995, 발파에 의한 지반진동의 수준 및 주파수 특성 예측, 한국자원공학회 최신엔지니어링 발파 특별 심포지엄 논문집, pp. 444-454.
4. 임한욱, 김재동, 1992, 발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구, 자원개발연구지, Vol. 8, pp. 87-98.
5. Langefors U. and B. Kihlstrom, 1978, The modern technique of Rock Blasting, Third edition, pp. 258-293.

**손 석 범**

조선대학교 에너지자원공학과  
석사과정

Tel: 062)230-7876  
E-mail: seokpooh@hanmail.net

**강 추 원**

조선대학교 에너지자원공학과 교수

Tel: 062)230-7117  
E-mail: cwkang@mail.chosun.ac.kr

**노 영 배**

대동발파 기술사 사무소 대표

Tel: 062)230-7876  
E-mail: bayo21@hanmail.net

**고 진 석**

조선대학교 에너지자원공학과 교수

Tel : 062)230-7118  
E-mail: jsgo@chosun.ac.kr