

암반굴착에 따른 발파진동과 브레이커진동의 특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Blasting Vibration and Breaker Vibration by Rock Excavation

임 한 옥* 박 현 성**
Lim, Han-Uk Park, Hyeon-Seong

Abstract

The blast works for open cuts and underground constructions near urban areas have recently increased complaint of ground vibration, air blast and fly rock. In order to reduce these problems, it is necessary to develop more cautious blasting, or non-blast excavation methods by mechanical power. For these breaker workings instead of blast are sometimes adopted.

To compare the characteristics of blast vibration with breaker vibration, the level, range of frequency and spectrum amplifications of each vibration were studied.

키워드 : 지반진동, 폭풍압, 정밀발파, 스펙트럼 배율

Keywords : ground vibration, air blast, cautious blasting, spectrum amplification

1. 서론

발파 또는 브레이커(breaker), 향타기 등의 대형 건설장비에 의해 유발되는 진동은 때때로 주변 구조물에 피해를 주거나 정밀기기 등과 같이 진동에 민감한 기계류 및 장비에 영향을 미칠 뿐만 아니라 불안감으로 인한 인근주민의 민원이 야기될 경우 공기지연과 손해배상 등의 경제적 손실을 초래할 수 있으며, 때로는 시공중인 구조물의 굳지 않은 콘크리트에 영향을 끼쳐 품질관리상의 문제를 유발시킬 수도 있다

지하굴착이나 암반을 파쇄하는 방법에는 전단면 굴착기 및 브레이커 등을 이용하는 기계적인

방법과 천공 후 화약발파에 의한 방법이 있는데, 일반적으로 화약에 의한 방법이 많이 사용된다. 건설진동 중에서 가장 문제가 되어왔던 분야는 발파진동이다. 이 분야와 관련하여 최근에 민원발생의 건수가 날로 증가 추세에 있고, 심지어는 현장에서 발파작업을 수행할 수 없을 만큼 심각한 수준에 이르는 경우도 있다. 이러한 발파진동의 문제점 때문에 발파작업 대신 기계식 굴착공법이 부분적으로 채택되고 있는데 이러한 공법의 예로는 브레이커를 이용한 방법을 들 수 있다. 브레이커 공법의 경우 발파를 이용한 굴착방법보다 작업공기가 길고, 굴착비용이 고가이기 때문에 실제 현장에서는 그 적용성 여부를 놓고 많은 문제점이 제기되고 있는 실정이다. 또는 진동문제를 완전히 해소할 수 있는지의 여부, 전체공사 구간 중에서 발파작업과 브레이커 공법을 동시에 적용하는 경우에 가장 경제적인 작업구간의 설정방법 등이 그 대표적인

* 강원대학교 지구시스템공학과 교수, 공학박사

* 강원대학교 대학원 지구시스템공학과 석사

에다.

이상과 같은 상황에서 적절한 대응방안을 강구하기 위해서는 발파진동 및 브레이커 진동의 특성에 관한 기초 연구가 필요하다고 판단된다.

지금까지 발파에 의한 지반진동에 관한 사항은 환경 규제치와 더불어 국내외적으로 다양한 연구가 이루어져 왔고, [1,2] 우리나라의 경우 도심지 기초공사, 채석장, 석회석광산, 터널발파 등에서 많은 연구가 수행되었다. [3,4]

발파진동을 제외한 일반적인 건설진동에는 말뚝이나 시트파일(sheet pile)의 항타 등에 따른 진동, 철구 등을 이용한 구조물 파괴시 발생하는 진동 등이 있으며, 국내외적으로 이들에 대한 연구가 이루어져 왔다. [5,6] 그러나, 실제 발파진동과 브레이커 진동과의 특성비교에 관한 연구는 부족한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 브레이커 진동의 특성을 검토하고 발파진동과 비교함으로써 민원발생 예상 지역에서 그 특성에 맞게 가장 경제적으로 혼용하여 적용할 수 있도록 기초자료를 제시하고자 한다.

본 연구에서 수행한 내용을 요약하면, 첫째, 브레이커 진동 및 발파진동의 진동추정식을 구하여 비교하였고, 둘째, 고속 푸리에변환(FFT) 및 구조물에 대한 응답스펙트럼을 작성하여 주파수 특성을 확인한 후 발파진동과 비교 검토하였으며 셋째, 구조물의 응답스펙트럼을 이용하여 스펙트럼 배율을 구하여 비교함으로써 양자의 진동특성을 비교하였다.

2. 이론적 배경

브레이커, 발파진동 및 이들의 주파수 분석에 관한 기본이론을 요약하면 다음과 같다.

2.1 브레이커작업의 진동

건설공사시 발생하는 대표적인 지반진동으로는 말뚝기초공사시 기성말뚝 타입에 의해 발생한다. 기성말뚝의 종류에는 RC말뚝, PC말뚝, 강말뚝 등이 있고, 또 이들을 타입 하는 항타기도 낙추해머(drop hammer), 디젤해머(diesel hammer), 진동해머(vibro hammer)등 여러 종류가 있다. 더욱이 말뚝의 형상, 크기나 항타기의 모양은 여러 가지가 있고 타입된 지반도 다양하기 때문에 항타에 의해 발생하는 진동의 특성을 간략히 표현할 수는 없으나 건설공사에 대한 불만 및 진정 등 민원의 대부분은 이 항타에 의한 것이다.

일반적으로 항타에 의한 지반의 상하진동은 N차와 관련시켜 다음 식과 같이 제안되고 있다. [6]

$$y = 5,000 \cdot \frac{1}{N} \cdot \sqrt{\frac{E}{x}} \cdot e^{-0.03x} \quad (1)$$

여기에서, y : 지반의 상하진폭 (mm/sec)

N : 표준관입시험치

E : 항타기의 에너지

(kN · m 또는 kgf · m)

x : 거리 (m)

또한, 최근 구조물의 해체공사시에는 석조, 벽돌조, 무근콘크리트 및 철근콘크리트조 등의 중량구조물을 부수는 공법과 종래 콘크리트 브레이커나 강구 등에 의해 직접 구조물을 부수는 방법과, 진동에 의한 방법이 행해지고 있는데, 강구에 의한 진동은 해체구조물의 종류, 지반, 강구의 중량 등에 따라 다르다. 특히 지반에 접하고 있는 기초, 지붕보, 토중 콘크리트 등을 강구의 수직낙하에 의해 파괴할 경우 충격이 지반에 직접 전달됨으로써 주변에 대한 영향은 크다. [8]

류창하 등은 낙하충격에 의한 지반진동의 크기 및 주파수특성에 관한 연구를 수행한 결과 충격에너지에 대한 지반진동의 예측을 식(2)와 같이 설정하였다.

$$V = K \left(\frac{D}{\sqrt{E}} \right)^n \quad (2)$$

여기에서, V : 최대진동속도

(Peak particle velocity) (mm/sec)

D : 충격지점으로부터의 거리 (m)

E : 충격에너지 (J)

K, n : 경험상수

충격진동에 관한 속도 전파식은 발파진동의 속도 전파식에서 나타나는 지발당 최대장약량의 변수대신에 부재의 위치에너지로 변환하여 충격지점으로부터 거리와의 관계를 나타내는 환산거리의 함수로 나타낼 수 있는데, 충격에너지 E는 식(3)으로 정의된다. [6]

$$E = mgh \quad (Joule) \quad (3)$$

2.2 발파진동

발파진동은 진폭과 주기를 갖는 진동이며, 발파진동의 크기는 진동을 전달하는 매질, 즉 암반의 변위 (또는 진동입자변위), 진동속도(또는 진동변위속도, 진동입자속도), 진동가속도(진동변위가속도, 진동입자가속도)로 표시할 수 있다.

진동의 형태를 일정 주기의 단순조화진동(simple harmonic motion)으로 가정할 경우 진동변위, 속도 및 가속도 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$u = U \sin(\omega t + \theta_1) \quad (4)$$

$$v = \frac{du}{dt} = U\omega \cos(\omega t + \theta_2) \quad (5)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = -\frac{d^2u}{dt^2} = U\omega^2 \sin(\omega t + \theta_3) \quad (6)$$

$$\omega = 2\pi\left(\frac{1}{T}\right) = 2\pi f \quad (7)$$

여기서 f 는 진동주파수, T 는 진동주기, ω 는 진동수와 관련된 각속도, θ 는 위상차, u 는 변위, v 는 속도, a 는 가속도를 의미한다.

발파진동의 측정은, 그 방향에 따라 수직성분(vertical), 진행성분(longitudinal), 그리고 이 두 파의 방향과 직각을 이루는 접선성분(transverse)의 세 성분에 대해 실시된다. 일반적으로 진행성분에는 탄성파의 P파(종파, primary wave)가, 접선성분에는 S파(횡파, secondary wave)와 L파(혼합파, Love wave)가 수직성분에는 표면파인 R파(Rayleigh wave)가 우세한 것으로 알려져 있다. 이 세 가지 성분의 상대적 크기는 암반, 지형 및 발파에 의하여 생성된 탄성파들의 상호간섭에 따라 변하나 일반적으로 가장 큰 값을 나타내는 것이 수직 성분이며, 때로는 진행 성분이 수직성분과 같거나 큰 경우가 있고, 접선성분은 대부분 세 성분 중에서 가장 작은 값을 나타내는 것으로 알려지고 있다.[4,7,8]

발파진동을 예측할 수 있는 진파식은 진동의 속도성분으로 표시할 때 일반적으로 장약량 및 발파원으로부터의 거리를 주요변수로 하여 다음 식과 같은 유형으로 표현할 수 있다.

$$PPV = K D^a W^c \quad (8)$$

여기에서,

PPV : 최대진동속도(Peak particle velocity), cm/sec

D : 폭원으로부터의 거리, m

W : 지발당 최대장약량, kg

K, a, c : 자유면 상태, 화약의 성질, 암질 등에 따라 결정되는 상수

위 식(8)을 거리를 장약량으로 환산한 형태로서 표시하면 다음과 같다.

$$PPV = K \left(\frac{D}{W^b}\right)^n \quad (9)$$

2.3 주파수분석

주파수 분석은 진동의 감각적 평가뿐만 아니라 진동원의 진동특성을 파악하여 방지대책을 수립하

기 위해 사용된다. 우리가 일상적으로 경험하는 진동은 단일 주파수의 단순조화진동이 아니라 여러 개의 단순조화진동이 혼합된 복합파로 존재하기 때문에 이 복합파를 성분 주파수별로 분석하는 것을 주파수분석이라 한다.

(1) 기록의 디지털화

Fig. 1(a)에 간단한 예제파를 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 이 기록은 연속된 매끄러운 곡선이다. 이러한 파를 스펙트럼 해석할 때 매끄러운 곡선 그대로 취급하는 방법을 아날로그(analog) 해석이라 한다.

이에 비하여 또 하나의 방법은 Fig. 1(b)와 같이 어느 일정간격마다 파형을 수치로 읽고, 읽어들이는 수치에 대해 수치해석을 하는 방법이 있다. 이와 같은 방법을 디지털(digital)해석이라 한다. 읽어들이는 수치는 연속량이 아닌 이산화(離散化)된 값이다. 이러한 량을 연속량과 비교하여 이산량이라 하며, 원래의 연속량을 이산량의 수열로 고치는 것을 디지털화라고 한다.

보통 $\Delta t = 0.01$ sec로 하므로, 예를 들면 지속시간 $T=10$ sec의 파형의 경우 읽는 개수는 $T/\Delta t = 1,000$ 개가 된다. 연속된 아날로그량을 이산적인 디지털량으로 바꾸는 장치를 Analog와 Digital 각각의 머리문자를 따서 A-D변환장치(A-D converter)라 한다.[9]

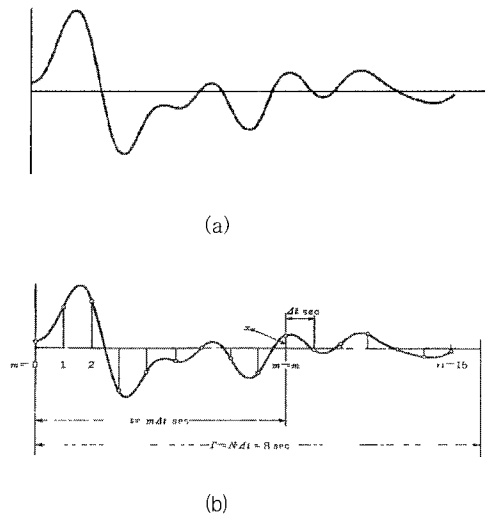


Fig. 1 The conversion of example wave

(2) Fourier spectrum

어떤 시간함수를 시간영역에서 주파수영역으로 변환시키는 과정을 푸리에 변환(Fourier transform)

또는 푸리에 분석이라고 하며, 반대로 주파수영역에서 시간영역으로의 변환을 역푸리에 변환(Inverse fourier transform) 또는 푸리에 합성이라고 한다. 주어진 함수에 대하여 푸리에 변환과 역변환을 순차적으로 행하면, 변환과정 중에 아무런 정보의 유실도 없이 본래의 함수를 재생할 수 있다.

일반적으로 어떤 복잡파 형태의 신호 파형은 기본 주파수 f 의 정수 배의 합성으로 나타낼 수가 있는데 즉, 기본파 f 의 정수 배의 선스펙트럼이 된다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\chi(t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cos(n2\pi ft + \Phi_n) \quad (10)$$

C_n 은 진동수 f_n 의 성분과 진폭을 나타낸 것으로, 일반적으로 스펙트럼 밀도라고 하며, C_n 을 세로축으로, 진동수를 가로축으로 표시한 것을 푸리에 스펙트럼이라고 한다.[9,10]

3. 현장조건 및 실험방법

실험대상 지역의 지질특성, 실험방법은 다음과 같다.

3.1 실험 대상지역의 지질 및 암반특성

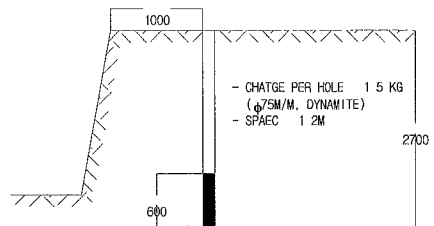
실험대상지역에 분포하는 기반암은 중생대 유라기말에 속하는 서울화강암으로 이는 저반의 형태로 서울중심부에 넓게 분포하고 있다. 본 암의 주요 구성광물로는 장석, 석영 및 흑운모로서 중립질 내지 조립질의 등립상조직을 보이며 완정질인 암석으로 담홍색을 띠고 있다. 기반암의 상부는 장기간에 걸쳐 기계적 풍화로 형성된 풍화대가 분포하며 그 상부는 매립층이 피복하고 있다.

본 구역의 시추조사 결과 매립층, 풍화토층, 풍화암층, 연암층, 경암층 등 모두 5개 층으로 구성되어 있는 것으로 확인되었다. 시험발파지역 암반의 평균 단위 비중량, 흡수율(%) 및 단축압축강도 (kgf/cm^2)는 각각 2.613, 0.53 및 725이다.

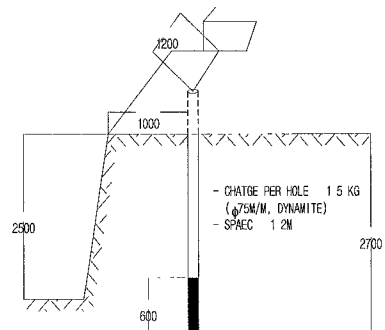
3.2 실험방법

본 연구의 목적은 브레이커 진동 및 발파진동의 주파수 특성을 검토하고, 각 진동원별 지반진동 예측식을 유도하여 비교 검토하는데 있으므로, 몇 차례의 브레이커 진동 및 발파진동을 계측하여 주파수 분석 및 회귀분석을 실시한 다음 그래프를 작성하여 비교검토 하도록 한다. 본 연구에서 사용한 계측장비는 캐나다 INSTANTEL 사의 제품인 BLASTMATE II 및 MINIMATE를 사용하였다.

브레이커에 의한 진동계측은 4대의 진동계측기를 이용하여 수회의 계측을 실시하였고, 발파진동은 보통 현장에서 흔히 이루어지는 1 자유면 발파, 2 자유면 발파, 3 자유면 발파 및 4 자유면 발파의 진동치를 4대의 계측기를 이용하여 각 자유면 수에 따라 2회씩 계측을 실시하였다. 시험발파시의 발파 재원 및 발파패턴도의 예를 들면 Fig. 2와 같으며 발파진동 및 브레이커 진동의 계측결과는 각각 Table 1 및 Table 2와 같다.



(a) Number of free face : 2



(b) Number of free face : 4

Fig. 2 The design of test blast

4. 실험결과 및 해석

브레이커 및 발파진동의 계측치를 주파수 분석 및 탁월주파수의 계산 회귀분석을 통한 진동경험식, 그리고 스펙트럼 배열의 산정을 하였는데 그 내용은 다음과 같다.

4.1 주파수 분석 및 탁월주파수의 계산

암반 내를 탄성파의 형태로 전파하는 발파진동의 주파수는 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용한 주파수 분석의 결과로 푸리에 스펙트럼으로 표시

Table 1 Results of breaker vibration

Distance (m)	Velocity(mm/sec)			
	Tran.	Vert.	Long.	PPV
6.3	1.43	0.48	1.14	1.78
	1.38	0.89	1.21	1.67
	1.37	0.60	1.06	1.57
	1.91	0.968	1.75	2.25
	1.64	1.05	1.14	1.92
	1.59	1.00	1.33	2.08
	1.76	0.91	1.25	1.87
9.1	0.45	1.19	0.71	1.30
	0.45	1.10	0.70	1.21
	0.48	1.17	0.75	1.30
	0.56	1.24	0.75	1.38
	0.54	1.27	0.79	1.43
	0.49	1.25	0.76	1.41
	0.51	1.29	0.76	1.41
14	0.56	1.19	0.97	1.52
	0.27	0.16	0.30	0.33
	0.24	0.13	0.27	0.35
	0.24	0.11	0.22	0.29
	0.22	0.13	0.22	0.27
18.2	0.29	0.13	0.24	0.33
	0.19	0.25	0.25	0.32
	0.19	0.25	0.25	0.32
	0.25	0.25	0.25	0.41
	0.25	0.19	0.25	0.35
	0.19	0.25	0.25	0.32

※ Number of free face = 1,
 ※ PPV : Peak Vector Sum

Table 2 Results of blasting vibration

No. of blast	Number of free face	Distan ce(m)	Velocity(mm/sec)			
			Tran.	Vert.	Long.	PPV
1	1	9.90	29.2	53.6	11.3	55.7
		14.8	21.2	54.5	42.2	61.7
		36.5	1.78	9.91	3.30	9.95
		28.8	11.4	16.5	9.91	16.6
2	1	9.90	19.1	49.3	7.62	49.7
		14.8	16.6	27.7	33.8	37.4
		36.5	1.65	8.38	2.16	8.40
		28.8	2.54	9.40	4.70	10.2
3	2	9.90	38.9	44.3	12.5	45.2
		14.8	15.0	32.3	35.3	38.7
		36.5	1.78	7.87	2.16	7.91
		28.8	2.03	9.65	4.32	10.3
4	2	9.90	23.4	44.6	12.1	46.2
		14.8	9.40	44.7	43.8	48.6
		36.5	1.27	7.18	2.41	7.25
5	3	28.8	2.67	11.4	4.83	11.9
		9.90	21.5	37.5	5.84	37.7
		14.8	15.5	40.9	49.0	49.3
6	3	36.5	1.21	6.73	2.16	6.81
		28.8	2.16	9.14	4.57	9.78
		9.90	46.4	42.7	13.7	48.4
7	4	14.8	13.1	25.5	26.4	32.7
		36.5	2.03	7.87	1.78	7.92
		28.8	1.52	7.87	4.06	8.49
		9.90	32.6	31.4	7.49	34.9
8	4	14.8	11.4	22.9	25.8	26.8
		36.5	0.953	4.64	1.08	4.73
		28.8	1.52	6.22	3.37	6.75
		9.90	21.6	33.9	10.7	34.4
8	4	14.8	19.2	24.6	30.7	36.0
		36.5	1.33	6.29	1.59	6.35
		28.8	-	-	-	-

※ Number of free face : 1
 ※ PPV : Peak Vector Sum

되는데, 이 스펙트럼 표시의 중요한 의의로써 다음 두 가지 사실을 들 수 있다. 하나는 시간이력에 포함되는 주파수 성분의 집출이고 또 하나는 시간영역에서 주파수 영역으로의 변환이다. 푸리에 스펙트럼은 원파가 어떠한 주파수의 성분을 포함하고 있으며, 어떤 성분의 진폭이 큰 것인가를 표시하는 것으로 이에 따라 그 진동파가 구조물에 미치는 영향을 추측할 수 있다.

특히, 진폭이 큰 성분이 있을 때 그 성분을 탁월하다고 하고 이와 같은 성분파의 진동수 혹은 주기를 각각 탁월주파수 혹은 탁월주기라고 한다. 또한, 진동의 탁월주파수는 구조물 등의 고유주파수와 비교하여 동일한 경우에는 공진 현상으로 인하여 심각한 영향을 미치게 되므로 진동해석에 있어서는 중요한 요소가 아닐 수 없다.[9]

이런점에서 브레이크 진동의 주파수 검출을 통하여 발파진동의 주파수 특성과 비교분석을 실시하였다. 탁월주파수는 측정된 결과치의 속도, 가속도, 변위 성분을 삼분지(Four-Way Logarithmic Plot)에 작성하여 구할 수 있다. 탁월주파수는 최대변위와 최대 가속도선의 사이에 있는 속도경계에 해당되는 영역의 주파수이다.

진동에 대한 구조물 등의 영향을 평가하는 경우에 진동의 최고치가 의미를 갖게 되므로 본 연구에서 주파수 분석시 예제파는 각 거리별, 각 성분(방향)별 최고치를 선택하였고, 탁월주파수를 계산하는데는 몇 개를 선별하여 사용하였다. 본 연구에서 주파수 분석은 캐나다 INSTANTEL 사(社)에서 제작한 BLASTWARE III(Ver 4.0)프로그램을 사용하여 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)에 의하여 구하였다. 이 프로그램은 약 500Hz까지 주파수 분석이 가능하다.

브레이크 진동의 푸리에 스펙트럼의 거리가 각각 63, 91, 14, 및 18.2m 인 경우 그리고 발파진동의 경우는 자유면의 수가 1에서 4까지 4가지 경우별로 거리를 브레이크 진동의 경우와 같이 4가지로 구분하여 계측하였으나 여기서는 그 대표적인 예만 Fig. 3과 Fig. 4에 제시 하였다. 한편 구하여진 탁월주파수를 각각 Table 3과 Table 4에 수록하였다.

Table 3과 Table 4에서 보여주는 마와 같이 브레이크 진동의 경우 탁월주파수는 30~180 Hz 대역이고, 발파진동의 경우는 35~170 Hz대역에서 탁월주파수 성분이 검출되고 있으나, 양자 모두 30 Hz이하의 다소 저주파 성분도 포함되어 있음을 알 수 있다. 이는 브레이크 진동이 발파진동과 마찬가지로 큰 의미의 충격진동(Impulse vibration)에 포함되며 고주파 영역에 해당되므로 발파진동과는 큰 차이는 없으나, 저주파 영역의 지진파 등과는 구별하여야 할 것으로 판단된다. 단, 진동원의 에너지량은 발파진동 쪽이 더 크게 발생되므로 거리

에 따른 감쇠정도는 브레이크 쪽이 클 것으로 판단된다

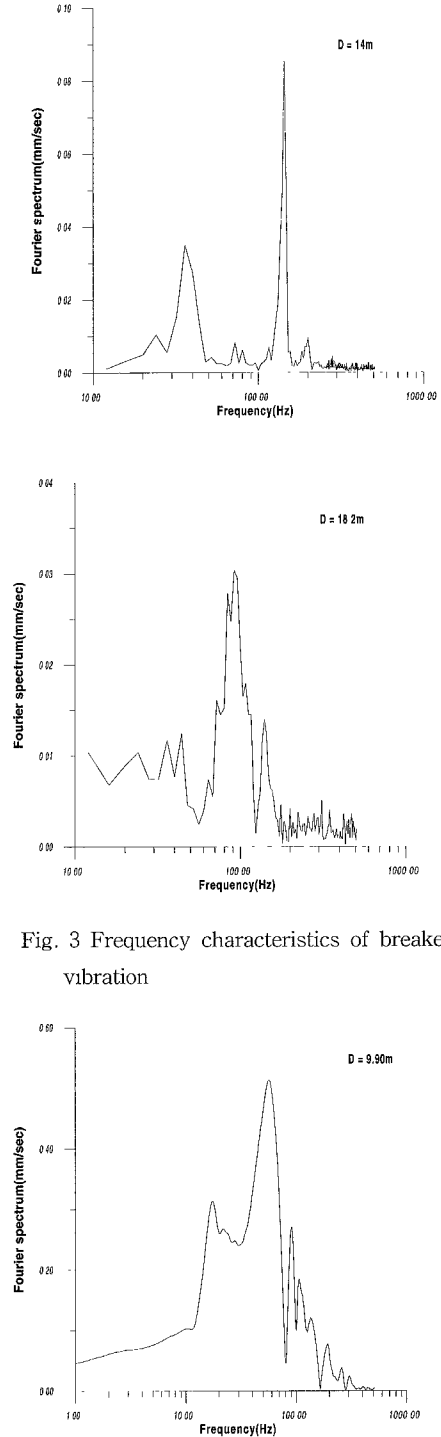
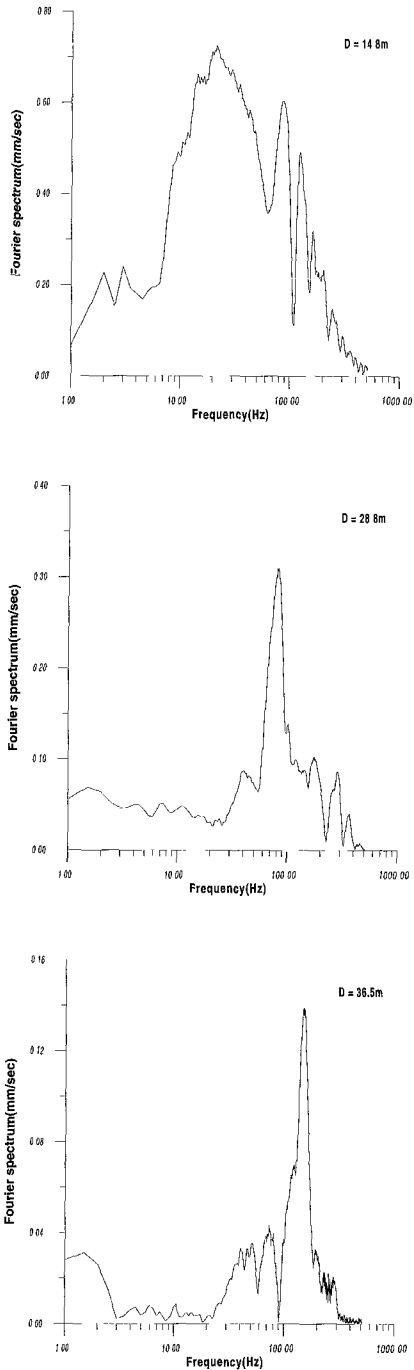
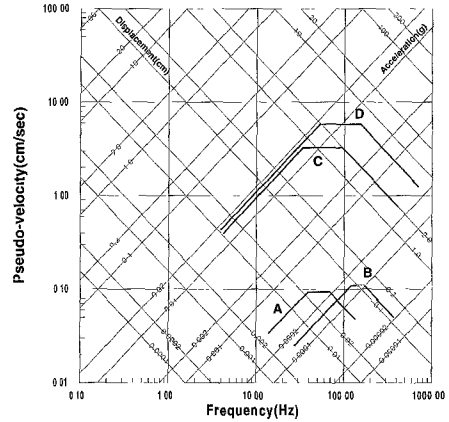


Fig. 3 Frequency characteristics of breaker vibration



(a) Number of Free face : 1
Fig. 4 Frequency characteristics of blasting vibration



A, B : breaker, C, D : blasting
Fig. 5 Calculation of main frequency at this study ($\beta=3\%$)

Table 3 Main frequency of blasting vibration

No. of blast	Distance (m)	Frequency(Hz)			PPV (mm/sec)
		Tran.	Vert.	Long.	
1	9.90	35-100	60-102	5-90	55.7
	14.8	17-102	53-170	45-150	61.7
	36.5	63-150	150-160	80-150	9.95
	28.8	25-160	100-130	16-63	16.6

※ PPV : Peak Vector Sum

Table 4 Main frequency of breaker vibration

Distance (m)	Frequency(Hz)			PPV (mm/sec)
	Tran.	Vert.	Long.	
6.3	28-46	30-68	8-13	2.25
9.1	150-160	120-180	150-180	1.41
14	160-180	-	75-80	0.333

※ Number of free face : 1

※ PPV : Peak Vector Sum

4.2 회귀분석에 의한 진동추정식

먼저 브레이커 진동의 경우 식(2) 및 식(3)을 이용하여 Table 2에 제시된 결과치를 회귀분석한 결과는 Fig. 6과 같다. 회귀분석에 대한 적합도(R)는 0.87로서 비교적 양호하게 나타났다. 실제 현장에

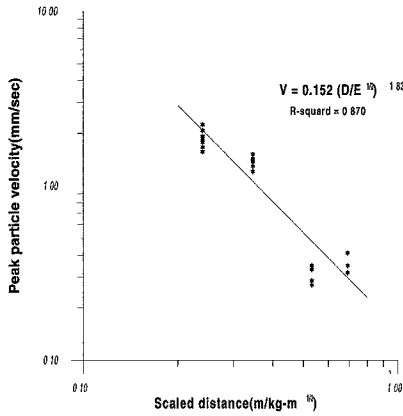
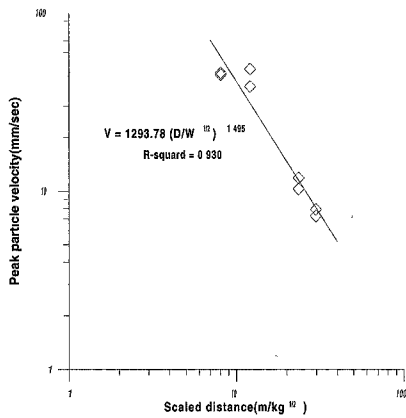
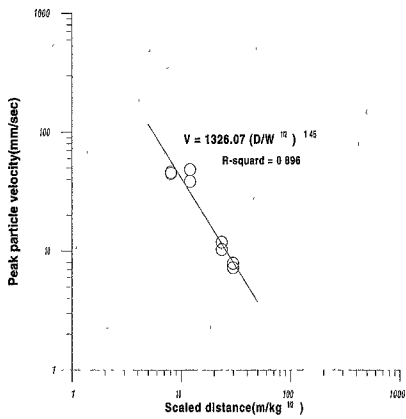


Fig. 6 Results of regression analysis in breaker vibration



Number of free face : 2

Fig. 7 Results of regression analysis in blasting vibration according number of free face

서 브레이커 작업을 시행하는 경우에는 발파작업을 수행하는 경우처럼 완전한 벤치면(자유면)을 형성시켜 작업하는 경우가 드물고, 대부분 불완전한 1~4자유면, 또는 소할작업(굳이 자유면 수를 표시한다면 6자유면 정도)의 형태로 이루어지기 때문에 본 연구에서의 진동계측은 소할작업을 제외한 나머지 작업형태의 진동치를 계측하였으므로, 1~4자유면 형태의 작업시 브레이커 진동치를 모두 포함하는 것으로 고려하기로 한다.

이상과 같이 브레이커 진동의 계측은 자유면 수의 구분 없이 모두 통합하여 계측을 실시하였다. 그러나 Fig. 7은 1~4자유면 따른 발파진동 계측치를 구한 값 즉 Table 2의 자료를 회귀분석한 것 중에서 자유면의 수가 1, 2 인 경우의 예이다. 한편 Fig. 8의 결과를 종합하면 Fig. 9와 같이 표시할 수 있다.

그리고 Table 5는 환산거리(scaled distance) 8~22의 범위내에서 각 자유면 수에 따른 발파진동의 증감정도를 보여준 것이다.

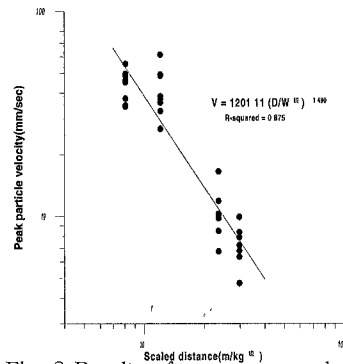


Fig. 8 Results of regression analysis in blasting vibration (total)

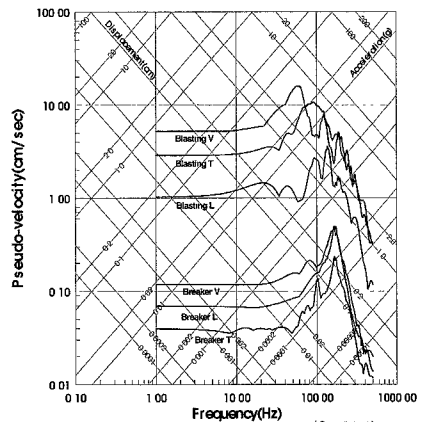


Fig. 9 Response spectrum($\beta=3\%$)

Table 5 The variation of vibration level according to number of free face

Number of free face	Propagation equation	Relative reduction ratio(%)
1	$V=1326.07 (D/\sqrt{W})^{-1.450}$	▲ 12.5~17.8
2	$V=1293.78 (D/\sqrt{W})^{-1.495}$	-
3	$V=1249.40 (D/\sqrt{W})^{-1.515}$	▼ 7.4~10.1
4	$V=1079.53 (D/\sqrt{W})^{-1.550}$	▼ 25.6~29.6

4.3 스펙트럼 배율의 계산

(1) 응답 스펙트럼

구조물에 대한 응답스펙트럼은 특정한 지반가속도, 고유진동수 및 감쇠비에 대한 단자유도계(Single degree of freedom)의 시간 이력 중에서 최대반응(상대변위, 상대속도, 절대가속도)으로부터 이론적으로 계산할 수 있다.

물론 구조물로부터 직접 계측하는 것이 가장 정확하나 시간과 비용 등의 제한이 따르기 때문에 몇 가지 가정 하에 단순화한 이론식으로 구할 수 있다.

이론적 계산과정에는 변위 스펙트럼, 속도 스펙트럼, 가속도 스펙트럼과 위 세 성분에 대한 의사(pseudo-)성분이 있는데, 이들 중 속도 스펙트럼(S_v)과 의사속도 스펙트럼(PS_v)을 표시하면 다음과 같다

$$S_v(\zeta, \omega) = |\dot{u}(t)|_{\max} = \left| \frac{\omega}{\omega_d} \int_0^t x_b(\tau) \exp[-\zeta\omega(t-\tau)] \sin[\omega_d(t-\tau) - \theta] d\tau \right|_{\max} \quad (11)$$

$$PS_v(\zeta, \omega) = \left| \int_0^t x_b(\tau) \exp[-\zeta\omega(t-\tau)] \sin \omega(t-\tau) d\tau \right|_{\max} \quad (12)$$

일반적으로 지반 중을 전달하는 탄성파는 자연파인 지진파와 인공진동에 의한 발파진동, 충격진동 등을 들 수 있는데 본 연구에서는 편의상 위 식을 이용하여 지진파의 응답스펙트럼을 구하는 방법을 채택하였다.

즉, 지진의 진동기록자료에서 지반가속도 및 속도 등은 방대한 양이므로 효과적인 수치해석법과 이를 이용한 프로그램작성이 필요하다. 지진하중을 받는 단자유도계의 수치해석법에는 Duhamel 적분을 이용한 방법, 선형보간법을 이용하여 Duhamel

적분의 수치해를 구하는 방법, Taylor 급수를 이용한 선형가속도법, 유한차분법 등이 알려지고 있는데 본 연구에서는 계산시간이 비교적 짧고 선형계(linear system)에 대하여 정확한 값을 제공할 수 있는 선형보간법을 이용하여 순환공식을 유도한 후 이를 기초로 진동하중을 받는 단자유도계의 수치해석을 실시하였다.[10] 현재 국내에서는 지진파의 해석프로그램으로 THASS, RETHIASS 등이 사용되고 있으며, 본 연구에서는 상용화된 EXCEL에서 VISUAL BASIC을 계산에 이용하였다.

EXCEL을 이용하여 각각의 측정값을 입력하면 상대변위, 상대속도 및 절대 가속도 및 입력지반진동의 샘플파가 구해지는데 이의 구체적인 도시는 생략하고 이들을 종합하면 Fig. 10과 같다.

구조물에 대한 응답스펙트럼 작성 시에 사용되는 감쇠율(β)은 대개 5% 이하이다. 일반적으로 3%를 적용하여 해석하는 경우가 많으므로 본 연구에서도 3%를 선정하였다.[10,11]

최근 지반진동에 대한 감쇠율의 연구결과 구조물과는 달리 지반 중에 전달되는 탄성파의 감쇠율은 발파에 의한 지반진동의 경우 8~17%, 낙하충격 시험의 경우 2~11%인 것으로 보고된 바 있다.[16]

(2) 스펙트럼 배율의 계산

스펙트럼 배율이란 응답스펙트럼에서 구한 값과 실제 지반진동치로부터 구한 값과의 비로써 즉 속도스펙트럼 배율은 응답 스펙트럼의 최대의 속도(pseudo-velocity)값과 지반진동의 최대입자속도(peak particle velocity)와의 비이며, 가속도 스펙트럼 배율이란 응답스펙트럼의 평균 의사속도(pseudo-acceleration)와 최대지반가속도의 비이다.

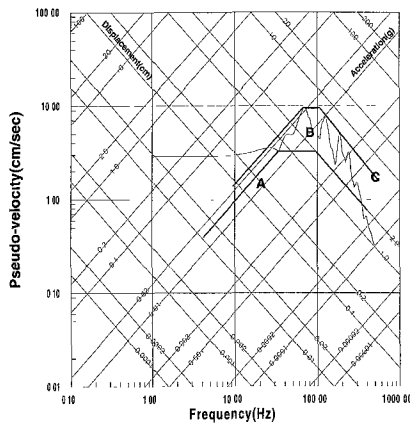
스펙트럼 배율을 계산하기 위해서 Fig. 11에서 B곡선은 Fig. 10에서 발파진동의 점선성분을 재현한 예이다. 그리고 그림에서 곡선A와 곡선C는 각각 실제 진동치와 Fig. 10에 제시된 값을 의속도 정점 진동수의 두 배 이상 진동수만을 고려한 것이며, 변위 스펙트럼 배율은 응답스펙트럼의 평균 상대변위와 지반진동의 최대변위와의 비를 나타낸다. 이 경우 평균상대변위는 의속도 정점 진동수의 1/4이하인 진동수에 관한 것이다.[14] 따라서 곡선C는 곡선B의 최대 값을 기준으로 단순화한 곡선이다.

본 연구에서는 브레이커와 발파에 대한 각각의 응답스펙트럼을 구하고, 스펙트럼 배율은 평균치가 아닌 최대치를 기준 하여 비교, 검토하였다.

Table 6을 살펴보면 발파진동에서 각 방향별 스펙트럼 배율은 점선방향(Transverse)의 경우 가속도 성분 3.0, 속도 성분 3.36, 변위 성분 1.31, 진행방향(Longitudinal)의 경우 가속도 성분 4.27, 속도

성분 2.92, 변위 성분 1.0, 수직방향(Vertical)의 경우 가속도 성분 2.63, 속도 성분 2.01, 변위 성분 3.80으로 분석되었다. 브레이커 진동의 경우 접선 방향의 경우 가속도 성분 5.03, 속도 성분 4.53, 변위 성분 5.26, 진행방향의 경우 가속도 성분 7.28, 속도 성분 6.56, 변위 성분 7.41, 수직방향의 경우 가속도 성분 5.88, 속도 성분 3.88, 변위 성분 4.0으로 확인되었다. 전체적으로 볼 때 브레이커 진동의 경우가 발파진동의 경우보다 약 2.23~3.52정도 크게 나타나는 경향을 보이고 있다.

지진에 의한 지반진동의 경우 구조물의 감쇠율(β)을 2%로 적용할 때 가속도는 4.3배, 속도는 2.8배, 변위는 1.8배의 스펙트럼 배율을 보이는 것으로 보고된 바 있다.[10]



A : ground motion B : response spectrum
C : spectrum amplification

Fig. 10 Calculation of spectrum amplification($\beta=3\%$)

Table 6 The results of calculation of spectrum amplification

division		spectrum amplification		
		acceleration	velocity	displacement
breaker (①)	transverse	5.03	4.53	5.26
	vertical	5.88	3.88	4.00
	longitudinal	7.28	6.56	7.41
	average	6.07	4.99	5.56
blasting (②)	transverse	3.00	3.36	1.31
	vertical	2.63	2.01	3.80
	longitudinal	4.27	2.92	1.00
	average	3.30	2.76	2.04
average (①-②)		2.77	2.23	3.52

5. 결론

본 연구에서는 암반굴착시 발생하는 브레이커 진동 및 발파진동의 특성을 비교하기 위하여 크게 두 가지 점에서 실험을 실시하였다 첫째는, 각 공법별 주파수 특성을 비교·검토하였으며, 둘째는, 브레이커 진동 및 발파진동의 구조물에 대한 응답 특성을 검토하였다.

본 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 실제 현장에서 이루어지고 있는 브레이커 작업의 대부분은 완전한 자유면을 형성하여 작업하는 경우보다는 불완전한 자유면 형태(1~4자유면, 소할작업의 경우 6자유면으로 간주)로 이루어지고 있으므로, 본 연구에서 계측된 진동치도 이점을 감안하여 소할작업을 제외한 나머지 작업형태의 진동치를 계측하였다. 즉, 1~4자유면 형태의 브레이커 작업시의 진동치를 모두 포함하여 해석하였다.

그 결과 얻어진 진동식은 다음과 같다

$$V = 0.152 (D/\sqrt{E})^{-1.83} \quad R\text{-squared} = 0.870$$

2. 발파진동은 1~4자유면별로 구분하여 각각 진동계측을 계측하고 분석하였는데 그 결과는 다음과 같다.

-1자유면

$$V = 1326.07 (D/\sqrt{W})^{-1.450} \quad R\text{-squared} = 0.896$$

-2자유면

$$V = 1293.78 (D/\sqrt{W})^{-1.495} \quad R\text{-squared} = 0.930$$

-3자유면

$$V = 1249.40 (D/\sqrt{W})^{-1.515} \quad R\text{-squared} = 0.910$$

-4자유면

$$V = 1079.53 (D/\sqrt{W})^{-1.550} \quad R\text{-squared} = 0.924$$

-1~4자유면

$$V = 1201.11 (D/\sqrt{W})^{-1.460} \quad R\text{-squared} = 0.875$$

즉, 자유면이 증가함에 따라 진동상수 K값이 감소된다.

3. 발파진동과 브레이커 진동의 주파수를 푸리에분석을 한 결과는 각각 Table 4 및 5와 같다

한편 구조물의 응답스펙트럼을 작성하여 구한 탁월주파수는 브레이커 진동의 경우 30~180 Hz 대역이고, 발파진동의 경우는 35~170 Hz대역에서 검출되고 있으나, 양자 모두 30 Hz이하의 다소 저주파 성분도 포함되어 있음을 알 수 있다

브레이커 진동과 발파진동을 충격진동(Impulse vibration)의 동일 영역에 포함시키면 주파수 특성

에서는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 검토되었다.

4. 발파진동과 브레이커 진동의 평균 스펙트럼 배율은 Table 7과 같다 즉, 브레이커 진동이 발파진동보다 약 2.77~3.52배 크게 나타나는 경향을 보인다

참고문헌

- [1] 임한욱, 김재동, “발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구”, *한국자원공학회지*, Vol 29, pp.146-157, 1992
- [2] 류창하, “발파에 의한 지반진동의 수준 및 주파수 특성 예측”, *한국자원공학회 최신엔지니어링 발파 특별 심포지엄 논문집*, pp.326-335, 1995
- [3] 양형식, 범진삼, 주재성, “진주 나동터널 지중 발파의 진동특성에 관한 연구”, *한국자원공학회 최신엔지니어링 발파 특별 심포지엄 논문집*, pp.59-63, 1995
- [4] 임한욱, “암발파 설계 기법에 관한 연구”, *한국토지개발공사 기술연구*, 1993
- [5] 대우건설 기술연구소, “건설진동의 영향평가 및 대책에 관한 연구”, 1998
- [6] 류창하, “낙하충격에 의한 지반진동의 크기 및 주파수 특성에 관한 연구”, *한국자원공학회 최신엔지니어링 발파 특별 심포지엄 논문집*, pp.86-91, 1995
- [7] 김계극, “산업 화약과 발파공학”, *서울대학교출판부*, 1990
- [8] 원기술 역, “발파진동의 주변에의 영향과 대책”, 1994
- [9] 이희연, 채원규, 남순성 역, “지진파의 스펙트럼 해석입문”, *도서출판 골드*, 1996
- [10] 김상대, 김명환 공저, “내진구조설계를 위한 스펙트럼의 이해”, *도서출판 세론*, 2000
- [11] 양형식 역, “발파진동학”, *구미서관*, 1992
- [12] 김종훈, “발파와 낙하충격에 의한 지반진동의 주파수 특성 및 점성감쇠율에 관한 연구”, *강원대학교 석사논문*, 1997