

자유면의 수가 발파진동의 크기에 미치는 영향

The Effects of the Number of Free Faces on the Level of Blasting Vibration

이 호* 임 한 옥**
Lee, Hyo Lim, Han-Uk

Abstract

Blast-vibration tests were carried out to determine the effects of the number of free face on the level of blast vibration. Frequency characteristics were also examined by using FFT analysis.

To check the effects of the number of free face, charge weight per delay, drilling length, burden and space were applied uniformly and the number of free face was only changed from one to four. The results from tests were checked by regression analysis and K-value.

키워드 : 자유면의 수, 주파수 특성, 지발당 장약량, 탁월 주파수.

Keywords : number of free face, frequency characteristics, charge weight per delay, predominant frequency

1. 서론

오늘날 우리사회는 산업화 과정을 통하여 고도 성장을 지속해오는 동안에 등한시되었던 환경문제, 특히, 건설분야에서는 소음·진동 문제가 최근에는 급속히 부상되고 있는 등 이제 양적인 성장에서 질적인 성장으로 변화를 추구하고 있는 상황이다. 또한, 정부차원에서도 이와 같은 현실을 고려하여 환경피해의 규제를 위한 수단으로 환경분쟁조정위원회를 상설기구로 발족시켜 운영하고 있는 실정이다.

포괄적 의미의 건설 소음·진동이라 하면, 항타기, 브레이크 등의 대형장비에 의한 것과 암반굴착을 위한 발파 소음·진동을 포함하게 되는데, 지금까지는 일반적으로 발파에 의한 소음·진동은 별개로 취급되어 왔다.

그러나, 최근에 위에서 언급한 바와 같이 환경 문제가 극심한 사회문제로 대두되기 시작하자, 발파작업에 의한 소음·진동의 경우도 일반 소음·진동 규제법에 의하여 준용되고 있는 경우가 많다. 이러한 상황에서 발파에 의한 작업은 더욱 규제를 받게 되고, 발파기술자들은 종래의 발파방법보다 효과적으로 진동제어를 하려는 관점에서 많은 노력을 기울이고 있는 상황이다.

이러한 상황에 부응하듯 최근에 발파관련 신 공법들이 건설교통부로부터 신기술로 지정을 받아 많은 현장에서 적용되고 있다[1].

지금까지 진동제어 발파의 대부분은 진동 추정식을 이용하여 지발당 폭약량을 감소시키는 가장 원초적인 문제에서부터 조절발파, 예를들면, 라인 드릴링, 프리스프리티팅, 쿨선블라스팅 등의 병용, 디커플링 효과를 이용한 방법, 인공 도랑(Trench)을 형성하여 진동파의 전파를 감소시키는 방법 등이 이용되어 왔다.

그러나, 발파 소음·진동을 제어하는 방법을 크게 두 가지로 구분하면 첫째는, 장약방법, 기폭방법 등을 이용한 방법으로 영향을 받는 쪽(지장물) 보다는 영향을 주는 쪽(폭원)에서 조절하는 방법이다. 둘째로, 전자와는 반대로 영향을 주는 쪽보다는 영향을 받는 쪽에서 소음·진동을 제어하는 방법이다. 현재 국내에서 주로 사용되고 있는 방법으로 지장물 근처에 사전에 파단면(破斷面)을 조정하는 방법 등이 여기에 해당된다.

발파의 파괴 메카니즘상 가장 중요한 역할을 하는 것이 자유면(Free face)이다. 지금까지의 대부분의 발파기초이론은 누두공 시험 등을 이용한 1 자유면 발파와 벤치형태의 2자유면 발파를 기본으로 하고 있다. 또한 이 부분의 기초이론을 근간으로 하는 관련 문헌을 참고하면[2], 동일 장약량에서 자유면 수가 늘어날수록 파쇄 체적은 증가하게 되고, 자유면 수가 감소할수록 파쇄에 사용되는 장약

* S.K 건설(주), 공학석사

** 강원대 지구시스템공학과 교수, 공학박사

량은 증가하게 된다. 결과적으로 자유면 수는 발파의 파쇄 효과에 많은 영향을 미치게 된다. 이와 같은 맥락에서 본 연구에서는 동일 조건하에서 자유면 수가 발파진동에 영향을 미치는 정도를 검토하게 되었다.

본 연구의 수행을 위해 가장 중요한 점은 연구의 목적을 위하여 정확한 친공을 실시하는 것이었다. 당초에는 1~6 자유면까지의 상황을 검토할 예정이었으나, 암반에 정확한 자유면을 형성하기는 사실상 많은 어려운 점이 있다. 따라서, 현장 여건을 고려하여 4자유면까지만 국한하기로 하였다.

2. 발파진동의 이론적 고찰

2.1 발파진동 일반특성

암석이 외계(공기 또는 물)와 접하는 면을 자유면이라 하고, 1~6자유면이 존재하며 자유면의 수가 많으면 동종의 폭약을 같은량 사용하여 발파할 경우 파쇄되는 암석의 용적은 자유면의 수가 적은 경우에 비해 크다.

폭약이 장약공 내에서 폭발하면 주위 암반은 강력한 폭굉 충격을 받으며 폭약과 접촉한 주변의 상태는 고온, 고압하에서 용융되며 유체역학적으로 거동하는 현상을 나타낸다. 장약공의 외부는 충격압에 의하여 파쇄대가 발생함과 동시에 에너지가 전달되면서 원주방향으로 균열의 생성 및 전파 등 여러 형태의 암반파괴를 일으킨다. 이 범위를 지나면 에너지는 암반을 파괴시키지 못할 정도로 급격히 저하되고 응력파(stress wave)의 형태로써 전파된다. 즉 힘을 받은 질량은 변형을 계속하고 암반이 갖고 있는 강성은 변형을 원래상태로 되돌리려고 하면서 변형과 회복을 반복하는 파동의 형태로써 응력파가 전달되며 이 응력파의 도달에 따라 지반의 반응은 진폭과 주기를 갖는 진동의 형태로 나타난다. 이를 발파진동(Blast vibration)이라 부른다.

이와 같은 진동의 크기는 진동하는 매질의 물리적인 변위(particle displacement, u), 속도(particle velocity, v) 및 가속도(particle acceleration, a)로 표시할 수 있다. 진동이 전달되는 어느 한 지점을 생각하면 대상 점은 시간 경과와 함께 진동량이 변화하고 있으며 변위는 기준위치로부터 이동거리를 나타내고, 진동속도는 진동변위의 시간에 대한 변화율이며, 진동가속도는 진동속도에 대한 시간의 변화율을 나타낸다.

2.2 발파진동의 예측

발파에 의한 지반진동의 세기에 영향을 주는 변수들을 대변하면 1) 화약의 종류와 장약량, 2) 발파원으로부터 측정지점까지의 거리, 3) 암반의 역학적·구조적 특성, 4)친공패턴, 장약방법, 점화순서 등의 발파방법이다. 지역적 특성과 발파조건에

따른 발파진동특성을 통하여 전파특성을 도출하여야 한다.

지반진동의 세기를 나타내는 진동의 진폭은 변위, 속도, 가속도 등으로 나타낼 수 있으나 구조물에 대한 영향평가와 관련해서는 진동속도에 의한 척도를 사용하는 것이 가장 합리적인 것으로 알려져 있다. 발파진동을 예측할 수 있는 전파식은 진동의 속도성분으로 표시할 때 일반적으로 장약량 및 발파원으로부터의 거리를 주요변수로 하여 다음 식과 같은 유형으로 표현할 수 있다.

$$PPV = K D^a W^c \dots\dots\dots(1)$$

여기서,
 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

위의 식을 거리와 장약량으로 환산한 형태로서 표시하면 다음과 같다.

$$PPV = K \left(\frac{D}{W^b} \right)^n \dots\dots\dots(2)$$

2.3 주파수분석

주파수 분석은 진동의 감각적 평가뿐만 아니라 진동원의 진동특성을 파악하여 방지대책에 이용하기 위해 사용된다. 우리가 일상적으로 경험하는 진동은 단일 주파수의 단순조화진동이 아니라 여러개의 단순조화진동이 혼합된 복합파로 존재하기 때문에 이 복합파를 성분 주파수별로 분석하는 것을 주파수분석이라 한다.

가. 기록의 디지털화

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

예를들면 Fig.1 (a)곡선을 광전관을 이용한 장치를 이용하여 연속적으로 매끄러운 전압으로 바꾸고 그 전압을 전기회로에 넣어 전기적으로 해석하여 전기적으로 움직이는 펜으로 매끄러운 연속곡선으로 종이에 그리는 방법이 이에 속한다. 이에 비해 또 하나의 방법은 Fig.1 (b)와 같이 어느 일정간격마다 파형을 수치로 읽고, 읽어들이 수치에 대해 수치해석을 하는 방법이 있다. 이와같은 방법을 디지털 (Digital)해석이라 한다. 읽어들이 수치는 연속량이 아닌 이산화 된 값이다. 이러한 량을 연속량에 비교하여 이산량이라하며, 원래의 연속량을 이산량의 수열로 고치는 것을 디지털화라고 한다.

보통 $\Delta t = 0.01\text{sec}$ 로 하므로, 예를들면 지속시간 $T=10\text{sec}$ 의 파형의 경우 읽는 갯수는 $T/\Delta t = 1,000$ 개가 된다. 연속된 아날로그량을 이산적인 디지털량으로 바꾸는 장치를 아나로그와 디지털의 각각의 머리문자를 따서 A-D변환장치라 한다[3].

나. 푸리에 스펙트럼

어떤 시간함수를 시간영역에서 주파수영역으로 변환시키는 과정을 푸리에 변환(Fourier transform) 또는 푸리에 분석이라 한다.

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 복합파 형태의 신호파형은 기본 주파수 f 의 정수배의 합성으로 나타낼 수가 있다. 즉, 기본파 f 의 정수배의 선스펙트럼이 된다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cos(n2\pi ft + \phi_n) \dots \dots \dots (3)$$

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[5].

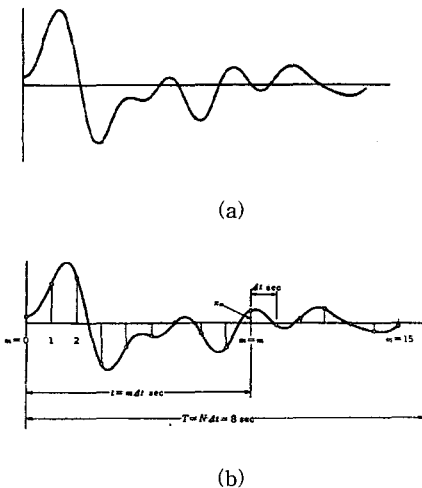


Fig.1 The conversion of example wave[3]

3. 시험대상지역의 지질조건 및 실험방법

3.1 시험발파대상지역의 암석의 역학적 성질

시험발파 대상지역 암반의 물성 내지는 지질적 특성 등에 관해서는 세밀한 조사가 이루어져야 하지만, 시험발파 이전에 시험발파 현장 또는 현장지

역 부근을 대상으로 실시된 기존의 물성 시험자료 및 지질조사 보고서를 참고하였다[6].

본 현장에 분포하는 기반암은 중생대 류라기말에 속하는 서울화강암으로 이는 저반의 형태로 서울중심부에 넓게 분포하고 있다. 본 암의 주 구성 광물로는 장석, 석영 및 흑운모로서 중립질내지 조립질의 등립상조직을 보이며 안정질인 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 조사되었다. 시험발파지역 암반의 역학적 성질을 살펴보면 Table 1과 같다.

Table 1 The physical properties of rock masses at test site

No.	Specific gravity	Absorption (%)	Compressive strength (kgf/cm ²)
1	2.596	0.38	486
2	2.634	0.27	594
3	2.561	0.81	73
4	2.608	0.52	240
5	2.602	0.38	572
6	2.649	0.24	607
7	2.591	0.66	270
8	2.682	0.19	622
9	2.569	0.89	125
10	2.624	0.36	413
11	2.674	0.15	660
12	2.536	1.36	63
13	2.652	0.39	826
14	2.571	1.04	217
15	2.634	0.52	466
16	2.602	0.47	484
17	2.628	0.31	499

Table 2 Test blasting pattern

Description	Unit
Burden & Space	1 - 1.2m
Drilling length	2.7m
Charge weight per hole	1.5kg
Charge weight per delay	1.5kg/delay
Bench height	2.5m
Diameter of drilled hole	75mm

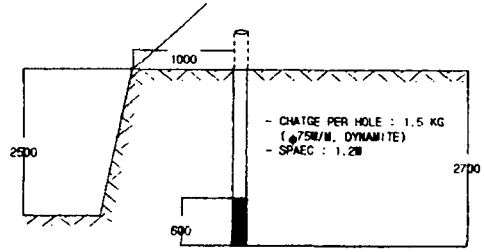
3.2 실험방법

자유면수에 따른 발파진동의 크기를 비교하기 위해서는 발파조건에 수반되는 변화요소 중에서 지발당 폭약량, 천공장, 공당 장약량, 단위 체적당 장약량(비장약량)이 일정해야 하고, 계측지점도 동

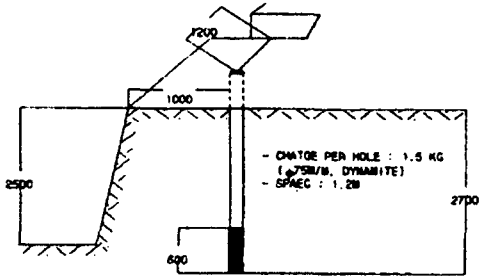
일장소에서 이루어져야 한다. 즉, 발파조건 변화 요소 중에서 오로지 자유면 수의 변화만이 이루어지고 나머지 요소에 대해서는 동일해야 한다. 이상과 같은 상황에서 각 자유면수에 따른 진동을 계측하고 지반진동 예측 식을 유도하여 비교·검토하는데 있으므로 측정된 계측치를 이용하여 회귀 분석을 실시한 다음 그래프를 작성하기로 한다. 발파진동의 계측은 1~4 자유면 발파시의 진동치를 4대의 계측기를 이용하여 각 자유면수에 따라 2회씩 계측을 실시하였다. 1~4 자유면의 경우는 계측장비가 설치된 암반과 일부는 결합되어 있으나 5 자유면은 바닥면에 기반암에 연결된 상황으로 조성되어야 하고, 6 자유면인 경우는 계측지점의 암반과는 완전히 분리되어 있는 상황이므로 동일체적의 소할(小割)발파가 이루어지도록 함이 바람직하나, 연구의 목적에 부합되는 실험조건을 조성하는 것이 상당히 어렵기 때문에 실제 계측은 실시하지 못하였다. 이후 6 자유면 발파시 발생하는 진동치에 대해서는 1~4 자유면 발파시의 계측자료를 이용하여 분석한 결과치로 추정하기로 한다.

본 연구에서 사용한 계측장비는 캐나다 인스탄텔(Canada InstanTel)사의 제품인 BLASTMATE II 및 MINIMATE를 사용하였다.

발파진동은 보통 현장에서 흔히 이루어지는 1 자유면발파, 2 자유면 발파, 3 자유면 발파 및 4 자유면 발파의 진동치를 4대의 계측기를 이용하여 각 자유면수에 따라 2회의 계측을 실시하였다. 시험발파시의 발파 제원 및 발파패턴은 Table 2 및 Fig.2와 같고, 이 때 계측기의 설치현황은 Fig.3에 도시하였다. 발파진동의 계측결과 Table 3과 같다.

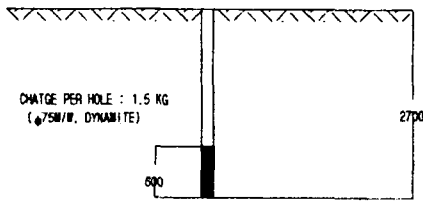


(c) Number of free faces = 3

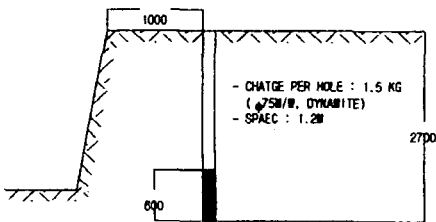


(d) Number of free faces = 4

Fig.2 Design of test blasting



(a) Number of free faces = 1



(b) Number of free faces = 2

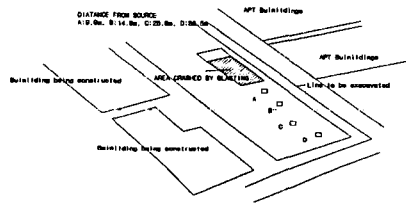


Fig.3 The site of blasting & vibration monitor installed in test blasting

4. 실험결과 및 해석

4.1 자유면수에 따른 진동크기의 변화

시험발파 결과 얻어진 자료를 해석하는 방법은 크게 두가지로 나눌수 있다. 먼저 미국이나 유럽등에서 널리 사용되는 환산거리를 이용한 단순회귀 분석방법으로 식(2)로 표시되는데 이 식은 미국 광무국에서 오랫동안 연구결과 제의된 것이다. 그리고, 또 다른 하나는 일본에서 널리 쓰이는 방법으로 식(4)로 표기된 방식이다. 이 두식은 표기방법

은 똑같으나 전자는 지발당 장약량과 수진점과의 거리를 변수로 표기하는데 비하여 후자는 일본의 연구결과를 바탕으로 이들 변수를 상수로 표기하는데 차이가 있다.

Table 3 Velocity of blasting vibration in terms of the number of free faces at different measuring sites

No. of blast	Nu. of free face	Distance (m)	Velocity(mm/sec)			
			Tran.	Vert.	Long.	PVS
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	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
		28.8	2.67	11.4	4.83	11.9
4	2	9.90	38.9	44.3	12.4	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
5	3	9.90	21.5	37.5	5.84	37.7
		14.8	15.5	40.9	49.0	49.3
		36.5	1.21	6.73	2.16	6.81
		28.8	2.16	9.14	4.57	9.78
6	3	9.90	46.4	42.7	13.7	48.4
		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
7	4	9.90	32.6	31.4	7.49	34.9
		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
8	4	9.90	21.6	33.9	10.7	34.4
		14.8	19.2	24.6	30.7	36.0
		36.5	1.33	6.29	1.59	6.35
		28.8	-	-	-	-

* PVS : Peak Vector Sum

국내에서는 전자의 방법을 주로 사용하고 있으나, 본 연구에서는 자유면 수의 증가에 따른 진동의 변화양상을 검토하는 의미에서 이 두가지 표기식을 다 같이 채택하였다.

가. 미국 및 유럽에서 일반적으로 쓰이는 방법
Fig. 4은 Table 3에서 제시한 바와 같이 각 자

유면 수에 따른 발파진동 계측치를 회귀분석한 결과를 보여주고 있으며, 이들을 종합하여 Fig.5에 도시하였다. Fig.5를 살펴보면 동일지발당 폭약량을 사용하여 발파가 이루어졌다 할 지라도 자유면 수에 따라 진동의 증감정도가 큰 폭으로 변화되고 있음을 알 수 있다. Table 4는 각 자유면수에 따른 발파진동의 증감정도를 보여주고 있다.

나. 일본에서 널리 쓰이는 진동상수의 표기

일반적으로 발파법의 종류, 적정장약의 정도, 수진점 지반의 상황, 폭약의 종류, 발파구역의 수진점의 방향차이 등의 변화요소는 식(2)에서 발파상수 K값에 반영되어 나타나는 것으로 알려져 있다. 지금까지는 회귀분석에 의한 진동의 증감정도를 검토하였으나 이번에는 자유면수에 따른 진동의 증감정도를 보다 명확히 하기 위해서 전술한 바와 같이 자유면수의 변화요소는 발파상수 K값에 나타나는 것으로 하여 기타의 상수는 고정시키고 발파상수 K값의 변화만을 살펴보기로 한다.

장약량·거리·진동치의 관계식으로서는 보통, 다음과 같은 형이 사용되기도 한다[2].

$$v = K \cdot \frac{W^n}{D^m} \dots\dots\dots(4)$$

여기서, v : 진동속도치(kine)
W : 지발당 최대 장약량(kg)
D : 수진점과의 거리(m)

전술한 식 (4)에서 m은 2내외, n은 0.5~1의 값을 취하는 것으로 되어있으나, 실제 측정의 결과 m=2, n=0.75(=3/4)의 경우가 비교적 빈도가 높은 것으로 알려져 있다.

그러므로, 식(4)은 식(5)로 변환할 수 있다.

$$K = v \cdot \frac{D^2}{W^{0.75}} \dots\dots\dots(5)$$

우선 일반적으로 사용되고 있는 발파진동 추정식에서 발파상수 K값에 반영되어 나타나는 변화요소는 여러가지가 있겠으나, 발파법의 종류(K₁, 터널, 벤치 등), 적정장약의 정도(K₂, 표준장약, 과장약, 약장약 등), 수진점 지반의 상황(K₃), 폭약의 종류(K₄), 발파구역의 수진점의 방향차이(K₅)의 5가지 요소의 상승으로 보는 견해가 있는데 이를 식으로 표현하면 식(6)과 같다[2].

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \dots\dots\dots(6)$$

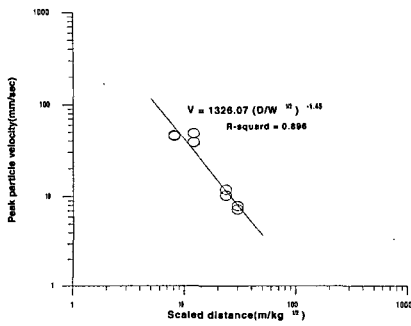
여기서, K : 발파상수
K₁ : 발파법의 종류에 따른 변화요소로 K값을 구성하는 요소 중 가장 기본이 되는 요소(터널발파, 벤치발파 등)
K₂ : 적정장약의 정도에 따른 변화요소(표준

장약 $K_2 = 1$, 과장약 $K_2 < 1$, 약장약 $K_2 > 1$)

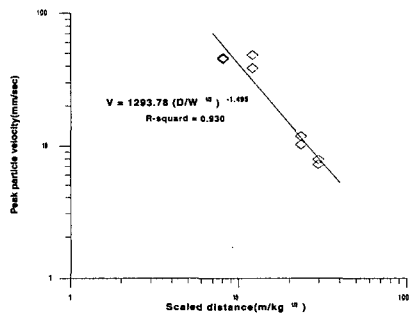
K_3 : 수진점 지반의 상황에 따른 변화요소 (견고한 암반 $K_3 = 1$, 암반 위에 표층이 실려있는 경우 $K_3 > 1$, 표면이 없는 지중 진동치 $K_3 < 1$)

K_4 : 폭약의 종류에 따른 변화요소(통상적인 폭약 $K_4 = 1$, 저폭속 폭약 $K_4 < 1$)

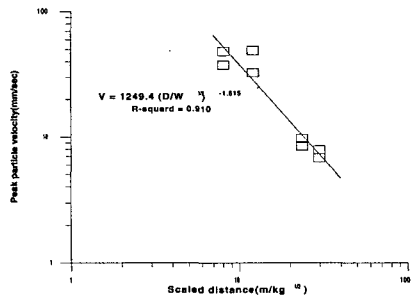
K_5 : 발파구역의 수진점의 방향차이에 따른 변화요소(발파구역 후면인 경우 $K_5 = 1$, 발파구역 앞면인 경우 $K_5 < 1$)



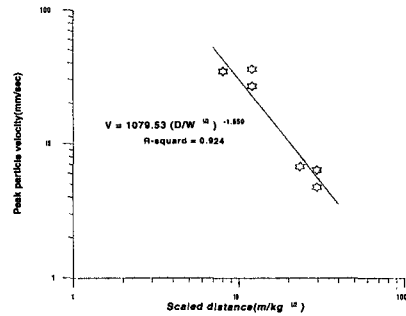
(a) Number of free faces = 1



(b) Number of free faces = 2



(c) Number of free faces = 3



(d) Number of free faces = 4

Fig.4 Results of regression analysis in blasting vibration according to number of free faces

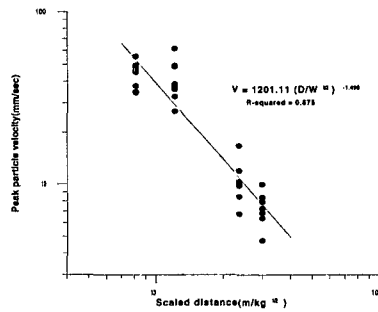


Fig.5 Results of regression analysis in blasting vibration (total)

터널발파에서 발파진동의 최대치는 대부분 심발공의 발파시에 나타나므로 발파진동을 분석하는 목적에서 심발발파를 고려하는 경우가 대부분이다.

터널의 심발발파와 벤치발파의 가장 큰 차이점은 자유면수의 변화를 들 수가 있는데, 즉, 터널은 1자유면 발파이고, 벤치발파는 2자유면 발파라는 점이다. 이러한 차이를 해석하면 상기의 5가지 요소 중에서 자유면의 변화는 발파법의 종류에 해당되는 값으로 반영시키는 것이 바람직할 것으로 판단되므로 본 연구에서 자유면의 변화요소를 K_1 값으로 해석하도록 한다.

당일 시험발파는 수진점이 견고한 암반상에 위치해 있고($K_3 = 1$), 통상의 폭약으로 발파를 실시하였으며($K_4 = 1$), 또한, 계측지점은 발파구역의 후면에 위치하므로($K_5 = 1$), 식(6)은 식(7)로 요약된다.

$$K = K_1 \cdot K_2 \dots \dots \dots (7)$$

또한, 공당장약량 및 비장약량은 모두 동일하게

Table 4 Variation of vibration level according to the number of free faces

Number of free face	Propagation equation	Relative reduction ratio(%)
1	$V = 1326.07 (D/\sqrt{W})^{-1.45}$	-
2	$V = 1293.78 (D/\sqrt{W})^{-1.495}$	▼ 11.2~16.3 %
3	$V = 1249.40 (D/\sqrt{W})^{-1.515}$	▼ 17.7~24.5 %
4	$V = 1079.53 (D/\sqrt{W})^{-1.550}$	▼ 33.9~42.1 %

적용하고 파쇄에 큰 무리가 없는 점을 감안하면 $K_2 = 1$ 로 보아도 무리는 없다. 결과적으로 $K = K_1$ 이 되어 측정결과인 K값으로 각 자유면수에 따른 발파마다의 계수치를 구할 수 있다. K값을 구하는 과정에서 식 (5)에서 적용되는 발파진동 계측값 v 는 PVS(Peak Vector Sum)를 기준으로 하도록 한다. Table 5에 K값의 변화와 자유면수에 따른 증감의 정도를 수록하였다. Fig.6은 자유면수에 따른 K값의 변화를 보여주고 있고, Table 6에서는 자유면수의 증가에 따른 진동의 증감정도를 확인할 수 있다.

지금까지 자유면 수에 따른 발파진동의 변화정도를 회귀분석에 의한 방법과 K-value의 비교에 의한 방법으로 검토하였는데 각 검토 방법에 따라서 변화의 폭이 다소 차이가 나타나고 있으며, 이들을 종합하여 Table 7에 나타내었다. 일본에서 터널발파를 대상으로하여 심발부분에 보조심베기를 넣어 실험한 결과치로서 30%정도의 감소효과가 있는 것으로 검토되었는데, 이는 1자유면에서 2자유면으로 변화되는 상황에서의 진동치의 감소효과로 판단된다[2].

본 연구에서의 벤치발파를 대상으로 하여 검토한 결과 2자유면에서의 진동치는 1자유면에 비하여 회귀분석의 결과로는 11.2~16.3%, K값의 변화는 검토한 결과로는 15.3%정도의 감소효과가 있는 것으로 검토되었는데, 일본에서 터널을 대상으로 한 경우에 비하여 감소효과가 다소 떨어지게 나타나는 것은 실험을 위한 대상 발파방법에 따른 진동파의 전파양상이 다르게 작용되어 나타난 것으로 판단된다.

또한, Fig. 6에서 회귀분석의 결과를 가지고 5자유면의 진동치의 변화를 살펴보면 K값이 350이 예측되므로 1자유면인 경우에 비하여 각각 51.8%의 진동감소가 기대된다.

4.2 주파수 분석

암반 내를 탄성파의 형태로 전파하는 발파진동의 주파수는 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용한 주파수 분석의 결과로 푸리에 스펙트럼으로 표시된다. 이 스펙트럼 표시의 중요한 의미는 다음 두 가지 이다. 하나는 시간이력에 포함되는 진동수 성분의 검출이고 또 하나는 시간영역에서 주파수

영역으로의 변환이다.

Table 5 Variation of K value according to number of free faces

No. of free faces	Distance (m)	Charge per delay (kg)	PVS (mm /sec)	K-value	Ave.of K-value
1	9.90	1.5	55.7	403	726
	14.8	1.5	61.7	997	
	36.5	1.5	9.95	1016	
	28.8	1.5	16.6	978	
	9.90	1.5	49.7	359	
	14.8	1.5	37.4	604	
2	36.5	1.5	8.40	624	615
	28.8	1.5	10.2	826	
	9.90	1.5	45.2	327	
	14.8	1.5	38.7	625	
	36.5	1.5	7.91	630	
	28.8	1.5	10.3	777	
3	9.90	1.5	46.2	334	564
	14.8	1.5	48.6	785	
	36.5	1.5	7.25	728	
	28.8	1.5	11.9	713	
	9.90	1.5	37.7	273	
	14.8	1.5	49.3	797	
4	36.5	1.5	6.81	598	431
	28.8	1.5	9.78	669	
	9.90	1.5	48.4	350	
	14.8	1.5	32.7	528	
	36.5	1.5	7.92	520	
	28.8	1.5	8.49	778	
5	9.90	1.5	34.9	252	431
	14.8	1.5	26.8	433	
	36.5	1.5	4.73	413	
	28.8	1.5	6.75	465	
	9.90	1.5	34.4	249	
	14.8	1.5	36.0	582	
6	36.5	1.5	6.35	624	431
	28.8	1.5	-	-	

※ PVS : Peak Vector Sum

푸리에 스펙트럼은 원파가 어떠한 진동수의 성분을 포함하고 있으며, 어떠한 성분의 진폭이 큰 것인가를 표시하는 것으로 이에 의해 그 진동파가 구조물에 주는 영향을 추측할 수 있다.

특히, 진폭이 큰 성분이 있을 때 그 성분을 탁월하다고 하고 이와같은 성분파의 진동수 혹은 주기를 각각 탁월진동수 혹은 탁월주기라고 한다. 또한, 진동의 탁월 진동수는 구조물 등의 진동수와 비교하여 동일한 경우에는 공진현상으로 인하여 심각한 영향을 미치게 되므로 진동해석에 있어서는 중요한 요소가 아닐 수 없다. 따라서 본 연구에서도 계측된 발파진동의 주파수 검출을 통하여 각 자유면수에 따른 발파진동의 주파수 특성을 비교 검토하였다.

Table 6 Variation of K-value according to number of free faces

Number of free faces	Average of K-value	Relative reduction ratio(%)
1	726	-
2	615	▼ 15.3 %
3	564	▼ 22.3 %
4	431	▼ 40.7 %

Table 7 Variation of vibration level according to number of free faces

Number of free faces	Analysis methods	
	Regression analysis	K-value
1	-	-
2	▼ 11.2~16.3 %	▼ 15.3 %
3	▼ 17.7~24.5 %	▼ 22.3 %
4	▼ 33.9~42.1 %	▼ 40.7 %

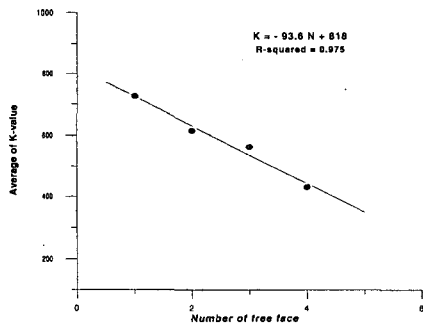
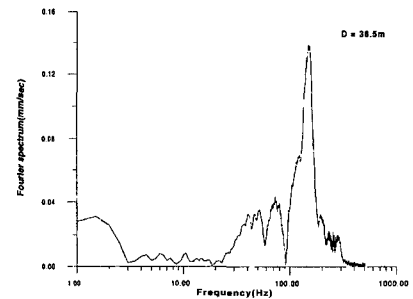
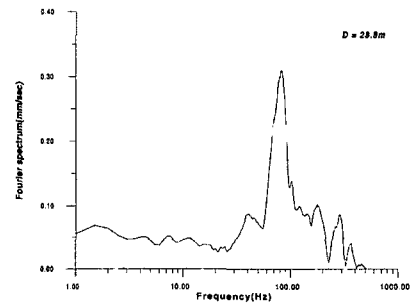
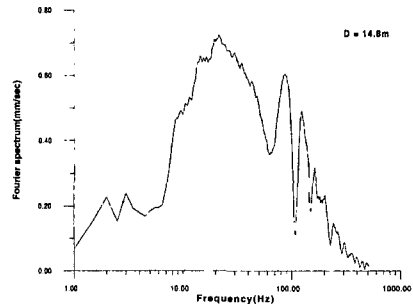
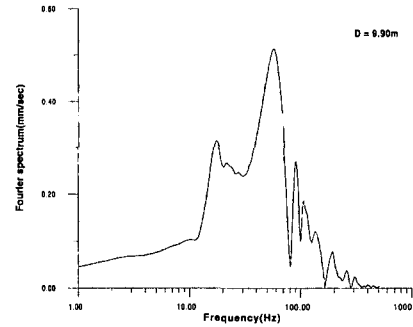


Fig.6 The variation graph of K value according to number of free faces



Number of Free faces = 1
Fig.7 Frequency characteristics of blasting vibration

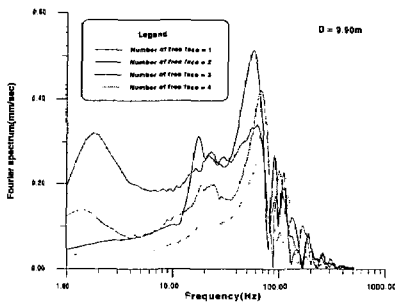


Fig.8 Overlapped frequency characteristics of blasting vibration

진동에 의한 구조물에 미치는 영향을 평가하는 경우에는 진동의 최고치가 의미를 갖게 되므로 본 연구에서 주파수 특성의 비교시 각 거리별, 각 성분(방향)별 최고치를 선택하였다.

또한, 본 연구에서 주파수 분석은 캐나다 인스탄텔사에서 제작한 BLASTWARE III(Ver 4.0) 프로그램을 사용하여 고속 푸리에 변환(FFT)에 의하여 구하여진 결과치를 이용하였다. 이 프로그램은 약 500Hz까지 주파수 분석이 가능하다.

Fig.7은 이상과 같은 방법으로 구하여진 각 자유면수에 따른 발파진동의 푸리에 스펙트럼중 자유면이 1인 경우의 예를 보여주고 있다. 1~4 자유면까지 대부분의 탁월 주파수 영역은 10~100Hz, 50~200Hz, 100~200Hz 범위에서 나타나고 있음을 확인할 수 있고, 3 자유면인 경우에는 폭원과 근접한 거리에서 탁월 주파수 영역이 10Hz이하의 범위에서도 검출되고 있음을 알 수 있다. Fig.8에 각 자유면수에 따른 주파수 특성을 비교하기 쉽게 도시하였다.

5. 결론

본 연구에서는 암반굴착시 발생하는 발파진동을 자유면수에 따라 특성을 비교하기 위해 크게 두 가지 면에서 실험이 이루어졌다. 첫째는, 각 자유면수에 따른 주파수 특성을 비교·실험하였으며, 둘째는, 회귀분석 및 K값의 변화양상을 검토, 분석하였다.

연구결과 얻어진 주요내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 각 자유면 수의 변화, 즉 1~4자유면 발파시의 진동계측을 실시하였으며, 각각의 회귀분석(신뢰도구간 50%)한 결과는 다음과 같다.

· 1자유면

$$V = 1326.07 (D/\sqrt{W})^{-1.45} \quad R^2 = 0.896$$

· 2자유면

$$V = 1293.78 (D/\sqrt{W})^{-1.495} \quad R^2 = 0.930$$

· 3자유면

$$V = 1249.40 (D/\sqrt{W})^{-1.515} \quad R^2 = 0.910$$

· 4자유면

$$V = 1079.53 (D/\sqrt{W})^{-1.550} \quad R^2 = 0.924$$

· 1~4자유면

$$V = 1201.11 (D/\sqrt{W})^{-1.49} \quad R^2 = 0.875$$

2. 자유면수에 따른 진동의 증감 정도를 보다 명확히 하기 위해서 자유면수의 변화요소는 발파상수 K값에 나타나는 것으로 하여 기타의 상수는 고정시켜 구하였다. 1자유면인 경우 K=726, 2자유면인 경우 K=615, 3자유면인 경우 K=564, 4자유면인 경우 K=431로 구해졌다.

3. 자유면 수에 따른 발파진동의 변화정도를 회귀분석에 의한 방법과 K-value의 비교에 의한 방법으로 하였다. 즉 회귀분석에 의한 방법의 경우 자유면 수의 변화에 따라 11.2~42.1%의 범위에서 진동 값의 변화가 있는 것으로 나타났으며, K-value의 비교에 의한 방법에서는 15.3~40.7%의 범위에서 진동 값의 변화가 나타났다.

4. Fig.6과 같이 K값과 자유면수에 대한 회귀분석을 실시한 결과는 다음과 같다.

$$K = -93.6 N + 818 \quad R^2 = 0.975$$

단, K : K-value, N : 자유면의 수

5. 전술한 4항의 회귀분석 결과를 인용하여 5자유면의 진동치의 변화를 살펴보면 K값이 350으로 예측된다. 따라서 1자유면인 경우에 비하여 약 51.8%의 진동감소가 기대된다.

6. 자유면수에 따른 주파수 특성을 검토한 결과 1자유면인 경우 탁월 주파수 대역이 약 10~200Hz의 범위에 이르고, 2자유면인 경우 약 40~200Hz, 3자유면인 경우 근접지역에서는 10~100Hz, 먼 거리에는 40~200Hz 대역으로서 근접지역에서 저주파 양상을 보이고 있으며, 4자유면인 경우 50~200Hz범위에서 탁월 주파수 대역을 이루고 있다.

발파진동의 경우 자유면 수의 변화에 따른 탁월 주파수의 변화는 그다지 많은 차이를 보이지 않은 것으로 확인되었다.

참고문헌

- [1] 건설교통부 건설기술 연구원, "건설 신기술 소개", pp4~10, 1999.
- [2] 원기술 역, "발파진동의 주변에의 영향과 대책", pp31~217, 1994.
- [3] 이희연, 채원규, 남순성 역, "지진파의 스펙트럼 해석입문", 도서출판 골드, pp12~103, 1996.
- [4] Dupont, "Blaster's Handbook", pp.435~436, 1980.
- [6] 김광식, 김찬목, 오재웅, 안찬우 공저, "기계진동·소음공학", 교학사, pp243~245, 1994.
- [7] 금호엔지니어링, "전농동 재개발지구 토질조사 보고서", pp22~23, 1996.
- [8] Blast Mate III Manual, InstanTel, pp.15~16, 1998.