

발파조건이 지반진동에 미치는 영향에 관한 사례 연구

고영선¹⁾ · 김종우²⁾

A Case Study on the Effect of Blasting Conditions on Ground Vibration

Young-Sun Ko and Jong-Woo Kim

ABSTRACT In this study, ground vibrations of a surface blasting for golf links and a tunnel blasting for highway construction were measured to investigate the effect of blasting conditions such as total charge and distance from blasting point. In surface blasting, site factor K and n were 74.1 and -1.37, respectively, which were analyzed by means of cube root scaled distance. The more were measuring distance, the higher were absolute value of K and n. Principal frequency was in range of 5~60 Hz in surface blasting, where that of 80 percent was in range of 10~30 Hz. On the other hand it was in range of 25~98 Hz in tunnel blasting, which showed higher than that of surface blasting.

Key words : blasting, vibrations, field instrumentation.

초 록 이 연구에서는 장약량, 측정거리 등과 같은 발파조건들이 지반진동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 골프장 조성공사를 위한 지표발파와 고속도로 건설공사를 위한 터널발파에서 지반진동을 측정하였다. 지표발파에서 삼승근 환산거리 방법으로 구한 입지상수 K와 n은 각각 74.1, -1.37로 나타났다. 측정거리가 멀어질수록 K와 n의 절대값은 증가하였다. 지표발파에서 주파수 대역은 5~60 Hz 이었으며, 그 중에 80% 정도는 10~30 Hz의 범위에 분포하였다. 반면에 터널발파의 주파수 대역은 25~98 Hz로서 지표발파보다 크게 나타났다.

핵심어 : 발파, 발파진동, 현장계측

1. 서 론

발파에 의한 지반진동은 인근 구조물에 치명적인 피해를 줄 수 있으며, 인체의 반응은 구조물보다 훨씬 민감하므로 최근 건설작업에 있어서 민원 발생의 주요 원인이 되고 있다.

발파진동에 영향을 미치는 요인으로는 먼저 발파지점의 지형, 지질, 암반내 불연속면의 상태 등과 같은 입지조건과 폭약의 종류, 장약량, 기폭방법, 발파유형, 전색상태, 발파지점으로부터의 거리 등과 같은 발파조건으로 나눌 수 있다.¹⁾ 이러한 조건들의 변화는 발파진동의 전파특성과 주파수 대역을 결정하는 중요한 요소가 되므로 효율적이고도 안정적인 발파설계를 위해서는 이들 조건이 지반진동에 미치는 영향에 대한 다각적인 분석이 필요하다. 국내에서도 발파진동에 관한 활발한 연구가 수행되고 있으나,^{2,3,4,5,6)} 발파조건과 관련한 진동특성에 대한 연구는 양형식(1992)에 의해 일부 시도된 이래

계속적인 연구가 미흡한 실정이다.

한편, 최근에는 주파수를 고려한 진동속도를 발파진동의 규제기준으로 설정하는 경향이 많기 때문에 발파조건의 변화가 주파수 대역에 어떤 영향을 미치는지에 대한 연구도 필요하다. Siskind(1980)는 노천석탄광산 및 채석장과 같은 대규모 발파에서는 저주파수 대역이 우세하고, 건설발파와 같은 소규모 발파에서는 고주파수 대역이 우세하다고 보고하였다.⁷⁾ 또한, 국내에서도 대규모 발파에서 저주파수 대역이 우세하고 측정거리가 가까울수록 고주파수 대역이 우세하다고 보고된 바 있다.^{4,5)}

이 연구에서는 주로 대규모 지표발파가 실시되고 있는 충청지역 ○○ 골프장 조성지역과 소규모 발파가 실시되는 충남지역 ○○ 터널발파 지역을 대상으로 하여,

1) 운양건설주식회사 공사부

2) 정희원, 청주대학교 지구환경시스템공학과 조교수

원고 접수일 : 1998년 2월 10일

원고 심사 완료일 : 1998년 12월 14일

발파로 인해 발생하는 지반진동을 측정하여 각 지역의 발파진동특성을 규명하였다. 또한 골프장 조성지역의 지표발파에 대하여 장약량, 측정거리 등과 같은 몇 가지 발파조건이 지반진동에 미치는 영향을 조사하였으며, 지표발파와 터널발파에서의 주파수 대역의 범위를 비교하였다.

2. 발파진동의 특성

일반적으로 발파에 의해 발생하는 에너지중의 0.5~20%는 탄성파의 형태로 균열대 외부의 암반중에 전파되어 가면서 지반진동을 발생시킨다.⁸⁾ 이러한 탄성파는 진폭과 주기를 갖는 정현파적인 운동을 하며, 이는 변위(displacement), 진동속도(particle velocity), 진동가속도(particle acceleration), 주파수(frequency) 등으로 표시된다.

발파진동은 일반적으로 진행방향(longitudinal), 수직방향(vertical), 접선방향(transverse) 등의 세 가지 성분으로 측정되며, 이들의 상대적 크기는 대상암반의 지질구조 및 발파에 의하여 생성된 탄성파들의 상호간섭에 따라 변하는 것으로 알려져 있다.¹⁾ 따라서 본 연구에서는 세 성분의 크기를 통합적으로 고려할 수 있는 벡터합(실벡터합)을 연구대상의 기준으로 설정하였다. 이 때, 세 성분의 벡터합은 (1)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_p = \sqrt{(V_v^2 + V_l^2 + V_t^2)} \quad (1)$$

여기서, V_p 는 세 성분의 벡터합, V_v 는 수직성분의 진동속도, V_l 는 진행성분의 진동속도, V_t 는 접선성분의 진동속도이다.

한편, 여러 연구자들은 발파진동의 수준을 예측하기 위하여 발파와 관련된 주요 변수들의 관계를 아래와 같은 경험적인 발파진동식의 형태로 제시하고 있다.

$$V = K \left(\frac{R}{W^b} \right)^n = K (SD)^n \quad (2)$$

여기서, V : 최대진동속도(cm/sec)

R : 폭원과 측정간의 거리(m)

W : 지발당 장약량(kg)

K : 발파진동상수

n : 감쇠지수

b : 장약지수

(2)식에서 거리와 지발당 장약량의 비(R/W^b)를 환산거리(scaled distance, SD)라고 하며, b 값이 1/2이면 자승근 환산거리(square root scaled distance, $m/kg^{1/2}$), 1/3이면 삼승근 환산거리(cube root scaled distance, $m/kg^{1/3}$)라고 한다. 한편, 진동속도와 환산거리는 (2)식과 같이 비선형적인 관계를 보이며, 여기에 대수를 이용하면 다음과 같은 선형적인 관계로 나타낼 수 있다.

$$\log V = \log K + n \log SD \quad (3)$$

여기서 대상지역의 발파진동상수(K)와 감쇠지수(n)는 양대수 좌표상에서 환산거리에 대하여 측정된 진동속도를 도시하고, 최소 자승법에 의한 회귀분석을 실시함으로써 구해진다. 회귀 직선의 기울기로부터 n 값이 구해지며, K 값은 환산거리가 1일 때의 진동속도에 해당된다.

한편, 효율적이고도 안전한 발파설계를 하기 위해서는 대상지역에 대한 시험발파를 통해 K , n 값을 구해야 한다. 이 때 허용진동속도가 주어지면 발파진동식으로부터 발파지점으로부터의 거리와 지발당 장약량의 관계를 나타내는 노모그램을 작성할 수 있다.

3. 실험현장의 지질 및 암석의 물성

3.1 실험현장의 지질

이 연구에서는 주로 대규모 발파가 실시되고 있는 지표발파 현장과 소규모 발파가 실시되는 터널발파 현장을 대상으로 각각 발파진동을 측정하였다. 골프장 조성공사 지역인 지표발파 현장의 기반암은 선캄브리아기에 형성된 호상 흑운모 편마암으로 이루어져 있다. 또한, 경부 고속도로 확장공사 지역인 터널발파 현장의 지질은 옥천 누층군의 황강리층에 해당되고 석회질 편암과 석회암이 분포하고 있으며, 부분적으로 백운암이 협재되어 있다.

3.2 암석의 물성

두 지역에서 발파작업에 의해 얻어진 피상의 암석기록을 채취하여 실험실에서 기본적인 물성시험과 일축, 삼축압축시험 및 간접인장시험을 실시하였다.

지표발파 지역에서 암석의 단위중량은 2.68~3.11 g/cm³ 이었으며, 일축압축강도는 1390~3073 kg/cm², 인장강도는 160~190 kg/cm² 이었다. 탄성계수는 4.92~10.4×10⁵ kg/cm², 포아송비는 0.22~0.28, 탄성파 속도

는 P 파가 3690~4020 m/sec, S 파가 1510~2420 m/sec 로 나타났다. 또한 점착력은 310~370 kg/cm², 내부마찰각은 49°~57° 이었다.

터널발파 지역에서 암석의 단위중량은 2.78~2.80 g/cm³ 이었으며, 일축압축강도는 1780~1950 kg/cm², 인장강도는 110~130 kg/cm² 이었다. 탄성계수는 4.78~6.38×10⁵ kg/cm², 포아송비는 0.21~0.25, 탄성과 속도는 P 파가 3340~3580 m/sec, S 파는 1540~1580 m/sec 로 나타났다. 점착력은 260 kg/cm²이며, 내부마찰각은 54° 이었다.

4. 측정장치 및 실험방법

4.1 측정장치

이 연구에서 사용된 발파진동 측정기는 TOMAS Instruments Inc.의 VMS-700과 InstanTel Co.의 Blast-Mate II DS-477이며, 이들은 충전식으로 운반이 용이하고 진행정분, 수직성분, 접선성분 및 세 성분의 벡터합의 측정이 가능하다. VMS-700은 기억장치에 100회의 측정자료를 저장할 수 있고, 3.5" 디스크 드라이브가 장착되어 있어 동시 저장이 가능하다. DS-477은 기억장치에 40회의 측정자료를 저장할 수 있다. 측정된 발파진동 자료들은 각각 VMS-200과 BlastWare III 소프트웨어를 이용하여 분석되었다.

4.2 실험방법

이 연구의 지표발파 현장에 대해서는 Fig. 1과 같이 수직천공 또는 수평천공에 의한 계단식 발파를 실시하였다. 천공장은 3~12 m, 사용된 폭약은 직경이 50 mm 인 에물라이트(EMULITE 150)이고, 각 발파에 대하여 장약량, 천공수, 단수, 측정거리 등을 변화시키면서 발파

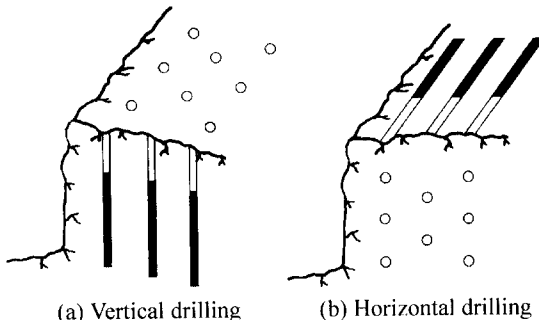


Fig. 1. Two types of drilling patterns in surface blasting

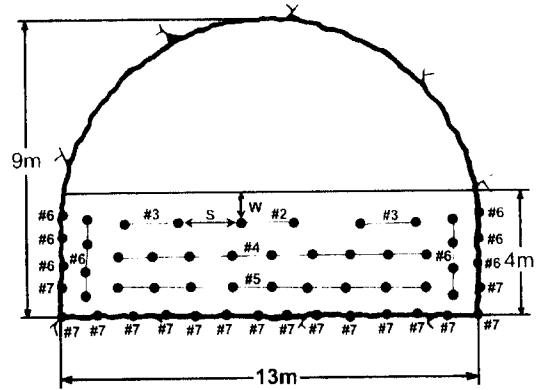


Fig. 2. A typical blasting pattern of tunnel blasting in this study. ·# : Period number LP detonator, ·W : 90~110 cm, ·S : 64~90 cm

Table 1. Comparison between surface blasting and tunnel blasting executed in this study.

Items	Surface blasting	Tunnel blasting
Drilling depth	3~12 m	4.5~5 m
Number of holes	12~214	44~55
Diameter of hole	75 mm	45 mm
Hole spacing	200~300 cm	64~90 cm
Charge per hole	2.5~27.5 kg	1.875~3.75 kg
Length of charge	80~880 cm	200~400 cm
Length of stemming	220~320 cm	100~200 cm
Explosive	EMULITE 150	HiMITE 5000
Detonator	MS #1~#20	LP #2~#7
Cartridge diameter	50 mm	32 mm
Charge per delay	25~880 kg	42~70.125 kg
Total charge	125~2250 kg	107.75~164.5 kg

지점의 측면에서 총 42회의 측정을 실시하였다.

또한, 이 연구의 터널발파 현장은 경부고속도로 확장 공사 구간으로서 폭 13 m, 높이 9 m 인 아치형 단면을 상하단면으로 분할 굴착하는 공법을 적용한 곳이다. 굴착공정은 먼저, 상단이 500 m 선행된 상태에서 하단의 발파작업이 순차적으로 실시되었다. 이 연구에서는 하단 굴착시의 발파작업에 대해 터널의 입구부분에서 총 15회의 측정을 실시하였다. Fig. 2는 하부단면 굴착에 대한 발파패턴도를 나타낸 것이다. 한편, Table 1은 이 연구의 지표발파와 터널발파를 간략하게 비교하여 나타낸 것이다.

5. 측정결과 및 해석

5.1 지표발파와 터널발파의 측정결과

Table 2. Results of surface blasting vibration measurement

Total charge (kg)	Max. charge per delay (kg)	Measuring distance (m)	PPV* (cm/sec)	Total charge (kg)	Max. charge per delay (kg)	Measuring distance (m)	PPV* (cm/sec)
125	25	130	0.494	425	212.5	400	0.201
125	25	100	0.516	896	224.1	700	0.078
55	37.5	350	0.079	418	224.1	130	2.005
660	48.75	100	1.02	585	225	300	0.233
637	67.5	90	1.798	270	225	350	0.225
637	67.5	110	0.943	270	225	400	0.18
1060	87.5	300	0.36	1400	250	315	0.384
1060	87.5	170	1.251	1400	250	252	0.405
270	98.75	110	0.656	950	250	100	1.608
270	98.75	64	1.172	950	250	100	1.43
520	140	300	0.418	2000	262.5	600	0.09
375	187.5	50	2.027	2000	262.5	450	0.21
375	187.5	50	2.31	2000	275	133	1.353
562	200	400	0.281	2000	275	200	0.575
1700	200	275	0.467	2000	440	480	0.235
750	200	90	4.05	2000	440	300	0.661
1700	200	400	0.294	2000	550	275	0.614
937	200	526	0.075	1500	630	350	0.511
382	212.5	100	1.492	1400	700	450	0.559
382	212.5	125	1.17	2250	880	300	0.935
425	212.5	120	0.695	2250	880	200	0.88

*PPV : Peak Particle Velocity (vector sum)

지표발파의 진동측정자료 중에서 진행성분, 수직성분, 접선성분 그리고 세 성분의 벡터합을 이용하여 회귀분석을 통해 발파진동의 경향을 파악하였다. 여기서, 측정자료들의 회귀분석 과정에는 삼승근 및 자승근 환산방법을 각각 적용하였으나, 해석결과에서 큰 차이는 없었으며, 이 연구에서는 상관관계가 약간 더 높은 삼승근 환산방법을 사용하였다.

Table 2는 지표발파에서 측정된 발파진동의 측정자료를 지발당 장약량과 거리와 함께 나타내었으며, Fig. 3(a)는 지표발파와 터널발파에 대한 환산거리와 진동속도의 관계를 나타낸 것이다. 또한, 그림에서 세 성분의 벡터합에 대하여 측정자료의 50%를 회귀직선 아래에 포함하는 50% 신뢰선과 발파작업의 안전을 고려한 95% 신뢰선을 함께 나타내었다. 한편, 안전을 고려하여 적용할 수 있는 발파진동식은 다음과 같다.

· 지표발파 지역

$$V = 74.1 (SD)^{-1.37} \text{ (50\% 신뢰선)} \quad (4)$$

$$V = 142.2 (SD)^{-1.37} \text{ (95\% 신뢰선)} \quad (5)$$

또한, 터널발파의 진동측정자료를 지표발파와 같이 삼승근 환산방법을 사용하여 해석하였으며, Table 3은 터널발파에서 측정된 발파진동의 측정자료를 지발당

장약량과 거리와 함께 나타낸 것이다.

Fig. 3(b)는 터널발파에 대한 환산거리와 진동속도의 관계를 나타낸 것이며, 안전을 고려하여 적용할 수 있는 발파진동식은 다음과 같다.

· 터널발파 지역

$$V = 88.55 (SD)^{-1.48} \text{ (50\% 신뢰선)} \quad (6)$$

$$V = 125.8 (SD)^{-1.48} \text{ (95\% 신뢰선)} \quad (7)$$

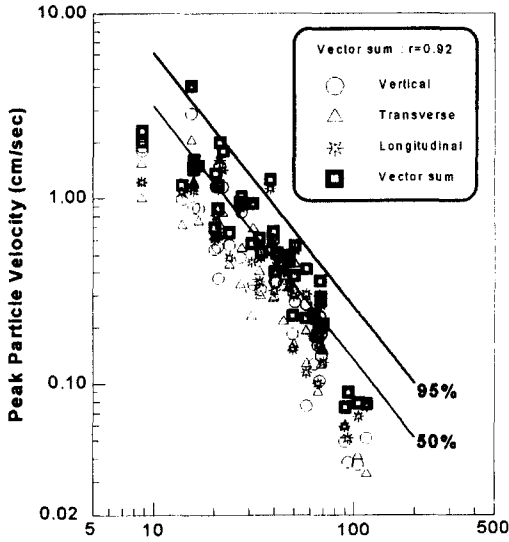
5.2 발파조건의 변화에 따른 지반진동의 특성

5.2.1 장약량의 변화

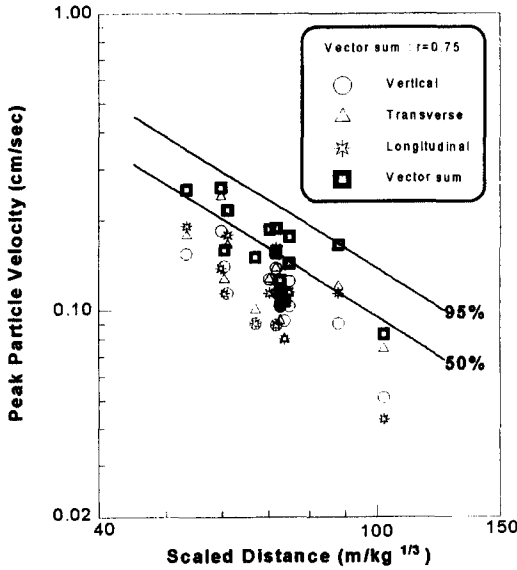
총 장약량의 변화에 따른 지반진동의 특성을 파악하기 위하여, 이 연구에서는 지표발파의 경우에 대하여 총 장약량의 범위를 300 kg 이하, 300~500 kg, 500~1000 kg, 1000 kg 이상 등의 네 부분으로 구분하여 환산거리와 진동속도의 관계를 조사하였다.

여기서 Table 4는 장약량의 변화에 따른 발파진동상수(K), 감쇠지수(n), 상관계수(r)를 요약하여 나타낸 것이다. 표에서 전체 측정자료에 대한 발파진동상수는 74.1, 감쇠지수는 -1.37 인데 비하여, 네 부분으로 구분하여 구한 발파진동상수는 29.81~261.07, 감쇠지수는 -1.12~-1.70의 범위를 나타내고 있다.

Fig. 4는 이를 그림으로 나타낸 것이며, 총 장약량의



(a) Surface blasting site



(b) Tunnel blasting site

Fig. 3. Relationship between peak particle velocity and scaled distance

변화에 따라 진동속도의 크기에 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 또한, 환산거리 30 m/kg^{1/3} 이하에서는 총 장약량이 많아질수록 평균보다 높은 진동속도가 예상되며, 30~60 m/kg^{1/3}의 범위에서는 큰 차이가 나타나지 않음을 알 수 있다.

5.2.2 측정거리의 변화

Table 3. Results of tunnel blasting vibration measurement

Total charge (kg)	Max. charge per delay (kg)	Measuring distance (m)	PPV* (cm/sec)
113	42	185.5	0.225
108	45	255	0.188
108	45	255	0.157
126	50.63	277	0.143
126	50.63	277	0.176
145	53.63	274	0.126
145	53.63	274	0.114
162	54	265	0.186
162	54	278.5	0.107
162	54	228.5	0.159
138	57.3	235.5	0.216
138	57.3	230.5	0.259
160	60	400	0.083
165	63.75	351.5	0.165
179	67.5	273	0.13

*PPV : Peak Particle velocity (vector sum)

Table 4. Site factors according to variation of total charge

Total charge	K	n	r	Number of measured data
~300 kg	44.14	-1.30	0.96	7
300~500 kg	29.81	-1.12	0.89	7
500~1000 kg	261.07	-1.70	0.96	11
1000 kg~	96.76	-1.41	0.87	17
Total	74.1	-1.37	0.92	42

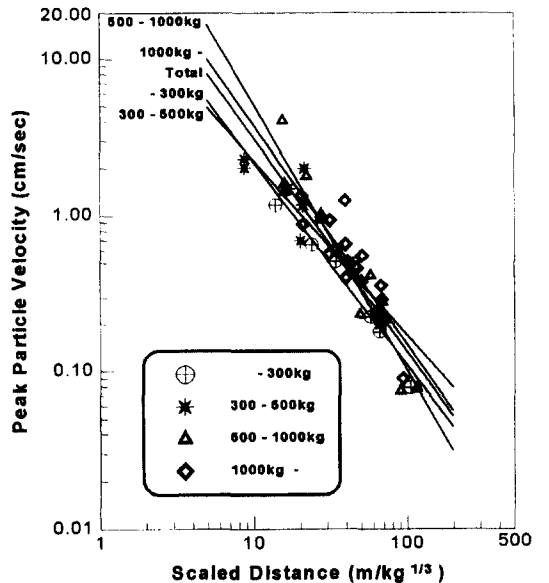


Fig. 4. Distribution of peak particle velocity according to variation of total charge

발파지점에서 보안전물까지의 거리는 발파작업에 있어서 매우 중요한 요소라고 할 수 있다. 이 연구에서는 발파지점과 측정지점 사이의 거리를 100 m 이하, 100~200 m, 200~400 m, 400 m 이상 등의 네 부분으로 구분하여 환산거리와 진동속도와의 관계를 조사하였다. Table 5는 그 결과를 나타낸 것으로, 전체 측정자료에 대한 발파진동상수는 74.1, 감쇠지수는 -1.37 인데 비하여, 네 부분으로 구분하여 구한 발파진동상수는 17.35~10504, 감쇠지수는 -0.89~-2.55의 범위를 나타내었다.

Fig. 5는 이를 그림으로 나타낸 것이며, 여기서 측정거리가 멀어질수록 진동속도가 급격히 감소하는 현상을 나타내고 있다. 특히, 측정거리가 200 m 이상인 경우 전체에 대한 평균 회귀직선보다 급격하게 감쇠하는 현상을 보인다. 이러한 현상은 이동거리에 따른 진동에너지 자체의 감쇠에 그 근본적인 원인이 있으나, 본 실

Table 5. Site factors according to variation of measuring distance.

Measuring distance	K	n	r	Number of measured data
~100 m	17.35	-0.89	0.66	11
100~200 m	40.22	-1.16	0.75	9
200~400 m	427.2	-1.79	0.86	16
400 m~	10504	-2.55	0.95	6
Total	74.1	-1.37	0.92	42

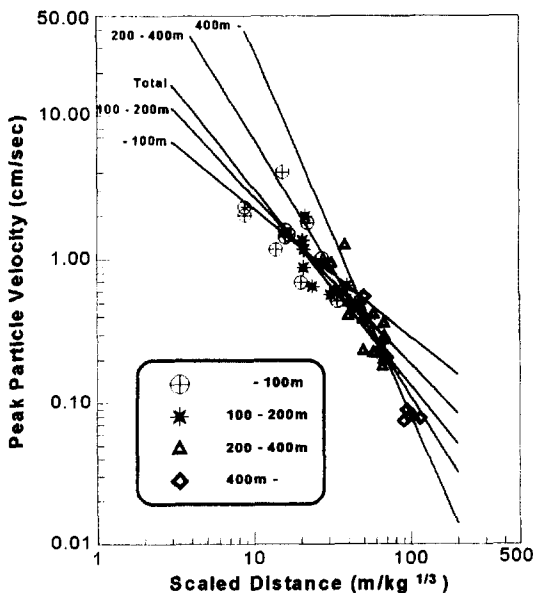


Fig. 5. Distribution of peak particle velocity according to variation of measuring distance

험현상이 골프장 조성지역인 관계로 대부분의 진동측정이 성토층 위에서 이루어 졌으며, 이 때 발파진동은 밀도가 상대적으로 작은 성토층을 길게 통과하기 때문인 것으로 생각된다.

5.3 발파진동의 주파수 특성 분석

발파진동의 주파수는 대개 0.5~200 Hz의 범위에 존재하며, 주주파수를 최대 진동속도가 나타날 때 진동파의 주파수라고 정의할 경우 주주파수는 Fig. 6과 같이 발파작업이 적용되는 산업에 따라 다르게 나타난다. 또한, 노천석탄광산, 채석장 발파와 같은 대규모 발파에서는 저주파수 대역이 우세하고 건설발파와 같은 소규모 발파에서는 고주파수 대역이 우세하다고 알려져 있다.⁷⁾ 이 연구에서는 비교적 대규모 발파인 골프장 조성 지역의 지표발파와 소규모 터널발파 지역의 측정자료를 퓨리에 분석을 통해 주주파수 대역을 분석하였다.

Fig. 7은 상기 두 지역에서의 주주파수 대역별 빈도를 나타낸 것이다. 지표발파의 주주파수 대역은 5~60

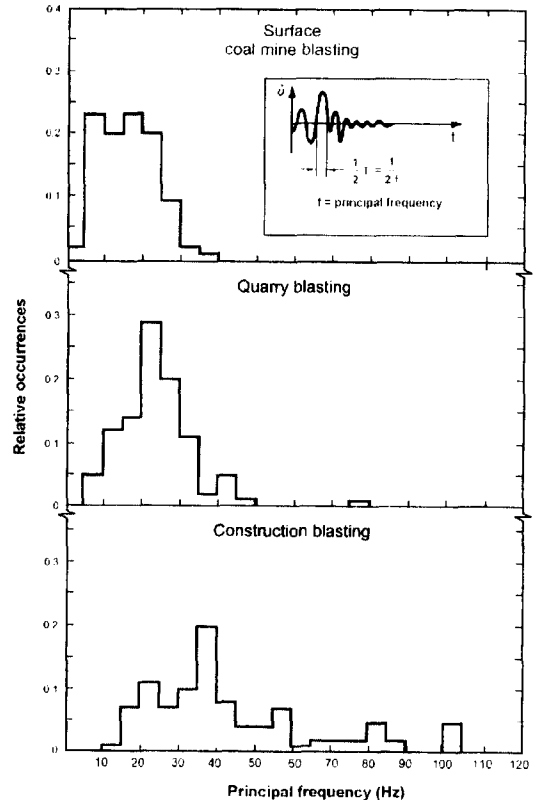
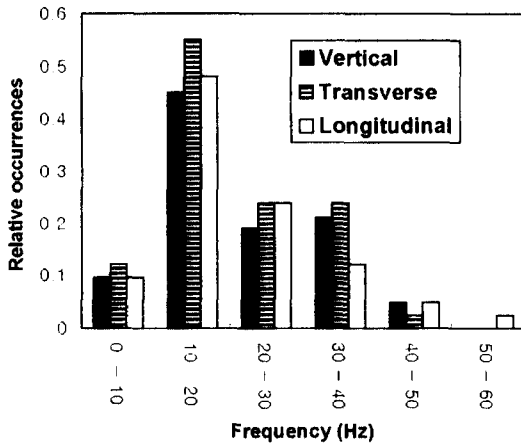
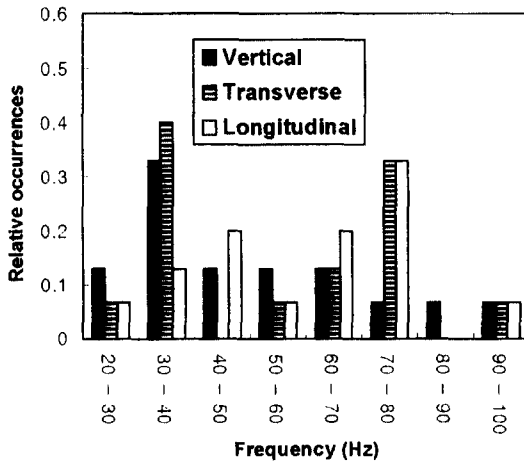


Fig. 6. Principal frequency histogram of coalmine, quarry and construction blasting (Siskind, 1980)



(a) Surface blasting site



(b) Tunnel blasting site

Fig. 7. Distribution of frequencies measured in this study. (a) Surface blasting site, (b) Tunnel blasting site

Hz이며, 분석자료의 80%가 10~30 Hz에 분포하고 있다. 또한, 터널발파의 주파수 대역은 25~98 Hz이며, 분석자료의 93%가 30 Hz 이상에 분포하고 있다. 이러한 현상의 주된 원인은 지표발파의 경우 비교적 대규모 발파이며, 측정거리가 멀어짐에 따라 고주파수가 감쇠되었다고 생각된다. 부가적으로 측정지점이 두꺼운 성토층으로 덮여 있어 고주파 진동수의 감쇠현상이 크게 나타난 것으로 생각되는데 Dowding(1985)은 진동 전달 경로가 길어질수록, 또 전달매질이 토양층일수록 고주파 진동수가 감쇠되어 저주파 진동수가 우세해진다고 하였다.⁹⁾ 또한, 터널발파의 경우는 비교적 소규모 발파이며 측정거리가 가까웠고, 측정지점이 기반암 직상

부이기 때문에 주파수 대역이 높게 나타난 것으로 생각된다.

한편, 일반적인 건물에서 벽의 고유진동수는 12~20 Hz이며, 상부구조는 5~10 Hz 이므로 저주파수의 발파 진동에 의해 기존건물이 공명을 일으킬 가능성이 많으므로 저주파수의 진동이 상대적으로 위험한 것으로 알려져 있다(Dowding, 1996).⁷⁾ 따라서, 이 연구의 대상 지역 중에서 골프장 조성을 위한 지표발파가 이루어지는 곳에는 주로 30 Hz 이하의 저주파수 대역이 형성되므로 발파현장 부근에 보안건물이 있을 경우 안전한 발파작업을 위해서는 허용진동속도를 작게 설정해야 할 것으로 판단된다. 한편, 이 연구의 주파수 해석결과인 Fig. 7은 외국의 연구결과인 Fig. 6과 잘 부합하는 것으로 나타났다.

6. 결 론

이 연구에서는 골프장 조성지역의 지표발파와 경부고속도로 확장공사중 터널발파에 대하여 발파진동을 측정하였으며, 몇 가지 발파조건의 변화에 따른 지반진동의 특성과 주파수 특성을 분석하였다. 여기서 얻어진 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 흑운모 편마암 지역인 지표발파 현장과 석회질 편암 지역인 터널발파 현장의 안전을 고려한 발파 진동식(95% 신뢰선)은 각각 $V = 142.2 (SD)^{-1.37}$, $V = 125.8 (SD)^{-1.48}$ 이었다.

2) 지표발파에 있어서 총 장약량의 변화는 진동속도의 크기에 큰 영향을 미치지 못하는 못하였으며, 측정거리가 멀어짐에 따라 감쇠가 빠르게 일어났다. 특히 본 현장의 경우 측정거리가 200 m 이상에서 진동속도의 감쇠가 빨라짐을 알 수 있었다.

3) 지표발파의 주파수 대역은 5~60 Hz 이었고, 분석자료의 80%가 10~30 Hz 사이에 분포하였으며, 터널발파의 경우는 25~98 Hz 이었고, 분석자료의 93%가 30 Hz 이상에 분포하고 있었다. 비교적 대규모 발파인 지표발파에서는 30 Hz 이하의 저주파수 대역이 우세하였으며, 소규모 발파인 터널발파에서는 30 Hz 이상의 주파수 대역을 형성하고 있었다.

참 고 문 헌

1. 한국토지개발공사, 1993, 암발파 설계 기법에 관한

- 연구, pp. 245-304.
2. 양형식, 1992, 지표발파의 진동특성에 관한 기초연구, 터널과 지하공간, Vol. 2, No. 2, pp. 199-211.
 3. 김대상, 이정인, 이희근, 1991, 발파진동의 속도 및 주파수를 고려한 허용진동치 결정에 관한 연구, 한국자원공학회지, Vol. 28, No. 6, pp. 444-455.
 4. 이경운, 김민규, 1987, 석회석 채석장의 대규모 발파에 대한 발파진동, 대한광산학회지 Vol. 24, No. 5, pp. 320-327.
 5. 임한옥, 김재동, 1992, 발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한연구, 한국자원공학회지, Vol. 29, No. 3, pp. 146-157.
 6. 박지홍, 이정인, 1997, 지발당 장약량 산정을 위한 시차결정 및 터널발파 진동특성에 관한 연구, 한국자원공학회 제 69회 학술발표회, pp. 320-326.
 7. Dowding, C.H., 1996, Construction Vibrations, Prentice Hall, pp. 19-35.
 8. 김재극, 1988, 산업화약과 발파공학, 서울대학교 출판부, p. 371.
 9. Dowding, C.H., 1985, Blast Vibration Monitoring and Control, Prentice Hall, p. 297.