

## 노천발파에서 비전기식뇌관의 시간차가 진동의 크기에 미치는 영향

강 추 원<sup>1)</sup>

### The effect of delay time of nonelectric detonator on the level of vibration in surface blasting

Chu-Won kang

**ABSTRACT** The types of electric detonators manufactured in Korea include instantaneous, decisecond and millisecond delays but number of delay intervals are only limited from No. 1 to No. 20 respectively. It is not sufficient to control accurately millisecond time with these detonators in large surface blasting. But nonelectric system detonators with an unlimited delay time are recently obtained. In this paper the effect of delay time of nonelectric detonator on the level of vibration in surface blasting was studied. A total of 169 data were recorded in the studied area. Blast point-to-measuring point distances ranged from 25 to 100 meter, where charge weight was 1.26 kg per delay.

## 1. 서 론

노천발파에서 지반진동, 충격파 및 비석은 때때로 재산과 생명등 안전을 저해하는 원인이 된다. 따라서 이 위험요소들을 충분히 제어하여 피해를 방지해야 한다. 일반적으로 발파로 인한 진동을 감소시키기 위해서는 크게 발파원으로 부터 진동발생을 억제하는 방법과 전파하는 진동을 차단하는 방법등 두 가지가 있는데 전자의 경우 폭약의 선택, 장약량 조절, 분할 발파, Decoupling 효과, MSD뇌관에 의한 진동의 상호간섭, 인공자유면의 활용, 특수화약류의 이용 등이 있으며 후자의 경우는 일정한 깊이의 방진구나 지표면에 인공균열을 형성하여 진동의 전파를 차단하는 방법 등이 있다.

현재 우리나라에서는 지발뇌관으로 밀리세컨드 뇌관(MS 뇌관)과 데시세컨드 뇌관(DS 뇌관)이 생산, 판매되고 있으나 그 단차가 각각 20여개에 불과하기 때문에 한 발파장소에 천공수가 40공을 초과하는 경우 지발당 뇌관수의 증가로 인해 진동이 크게 된다. 반대로 지발당 뇌관수를 감소시키고자 하는 경우 분할발파가

불가피하므로 이로 인한 작업의 지연, 위험도의 증가 등으로 현장에서 분할발파의 채택을 기피하는 실정이다. 위와 같은 문제점을 해결하기 위해서 비전기식 뇌관에 의한 기폭방법이 개발되어 국외에서는 이미 오래 전에 사용되고 있으며 국내에서도 이들의 수요가 점점 증가될 전망이다.

본 연구에서는 비전기식뇌관을 사용한 MS지발 발파에서 진동의 상호 간섭의 효과를 규명하고 이들 시간차가 진동의 크기에 미치는 영향을 분석하기 위하여 부산 양정동 현대 아파트 신축 공사장에서 시험을 실시하였다.

## 2. 비 전기식 뇌관의 원리와 측정지역의 압상태

전기뇌관은 발파모선과 각선을 통해 전기에너지가 전달되어 이를 열에너지로 전환시켜 뇌관을 기폭시키는 것이지만, 비전기식 뇌관은 단발 전기뇌관과 도폭선

1) 조선대학교 자원공학과, 부교수

시스템의 장점을 취하여 조합한 형식으로, 전기뇌관의 각선 대신에 약 2,000 m/sec의 속도로 충격파를 전파할수 있는 화약 분말을 내부에 코팅한 프라스틱 튜브와 뇌관으로 구성되어 있다.

튜브 내부의 화약 분말에 의한 충격파의 전파현상은 튜브 내에서만 일어나므로 발파 효과는 없고 단순한 신호 전도체로서 작용을 한다.

비전기식 뇌관의 구성은 뇌관에 기폭 신호를 전달하는 튜브(tube)와 기폭매체인 뇌관 그리고 표면에서의 연결구조로 구성되어 있다.

각 뇌관은 전기뇌관 처럼 지연시차를 갖고 있으며 뇌관의 길이와 지연시차와는 무관하다. 그리고 뇌관은 8호뇌관에 해당되는 위력을 가지고 있다. 이들 뇌관의 연결고리를 이용하여 비전기식 뇌관의 장점중의 하나인 거의 무한대에 달하는 여러가지 단차가 생성된다. 한방향에서 온 충격파를 분리 전달시키는 기구는 여러 종류가 있으며 연결구는 발파의 종류, 방법에 따라 적절히 선택되어야 한다.<sup>1)</sup>

본 조사지역의 지층은 상부에 매립층이 분포하고 있으며, 이들 층의 하부는 풍화토층, 풍화암층, 연암층의 순서로 지층을 이루고 있다. 본 지역의 기반암은 화성암중의 반심성암으로 안산암이 주종을 이루고 있으며 부분적으로 현무암이 존재하고 있다. 현장 시료에 대한 일축 압축시험 결과 압축강도는 991.76~1021.76 kg/cm<sup>2</sup>이며 시료의 비중은 2.68~2.93으로 나타났다.

### 3. 진동 측정 결과 및 해석

#### 3.1 발파진동의 특성

지표상에 도달하는 복합파는 측정하는 방향에 따라 수직방향(Vertical), 진행방향(Radial), 진행방향에 대한 접선방향(Transverse)의 성분<sup>2)</sup>의 3방향 성분인데 이것은 Figure 1과 같다.

진행성분에는 P파(종파), 접선성분에는 S파(횡파)와 L파(Love waves), 수직성분에는 R파(Rayleigh waves)가 우세하다. 그래서 이 3성분은 크기 및 진동 주파수가 각각 다르며 복합파이기 때문에 모양이 대단히 불규칙하고 복잡하다. 발파 진동에서 그 피해를 주는 규모를 생각할 때, 이 3성분을 합성하여 Vector합(실 벡터합<sup>3)</sup>)을 구하는게 이상적이므로 본 연구에서는 이 값을 연구대상의 기준으로 하였다.

발파에 의한 지반 운동은 보통 변위(displacement),

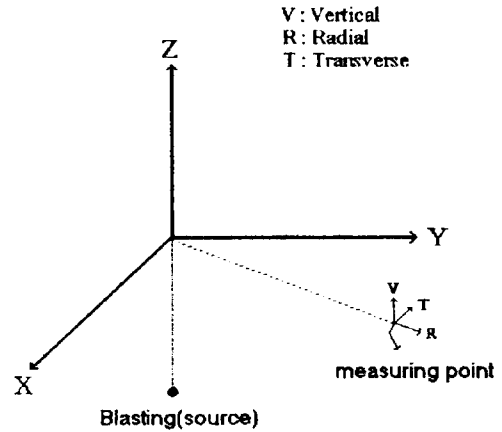


Fig. 1. Measuring direction of ground vibration.

속도(particle velocity), 가속도(acceleration)의 3종류로 표시되고 있다.

이들 변위(D), 속도(V), 가속도(A)사이에는 수학적 관계가 있어 서로 변환이 가능하며 이들의 수학적 관계는 다음과 같다.

$$D = \int V \cdot dt, \quad V = dD/dt \tag{1}$$

$$V = \int A \cdot dt, \quad A = dv/dt \tag{2}$$

여기서, t: 시간

한편, 이러한 지반진동은 여러가지 주파수를 갖는 파형이 중첩된 것이지만 이것을 단순조화진동(Simple sinusoidal harmonic motion)으로 볼 경우 다음과 같은 식의 관계가 성립한다.

$$D = V/(2\pi f), \quad V = 2\pi f D \tag{3}$$

$$V = A/(2\pi f), \quad A = 2\pi f V \tag{4}$$

$$f = 1/T \tag{5}$$

여기서, D: 최대 변위

V: 최대 진동속도

f: 최대 변위에서의 진동 주파수

T: 최대 변위에서의 진동주기

따라서 위와 같은 식으로부터 속도, 변위, 가속도, 진동수 중에 2가지 성분만 알면 나머지 성분은 (3)·(4) 식에 의하여 계산될 수 있는 것이다.

발파진동의 단위는 cm/sec(Kine), mm/sec, inch/sec 로 표시하고 있으나 본 연구에서는 허용한계가 낮아지는 추세에 따라 mm/sec로 표시 하였다.

3.2 측정 장비

본 연구에서 사용된 발파진동 측정기는 InstanTel Co. 제품인 Blastmate II 677 기종 1대, 그리고 Thomas사 제품인 VMS-500 기종 1대등 총 2대로 측정하였다.

Blastmate 677은 진행방향, 횡방향, 및 수직방향의 측정과 이들 속도 성분에 대한 벡터합으로도 나타낼수 있으며 기기내부에 FFT(fast fourier transform) 분석 모듈이 내장되어 있어 주 주파수 대역을 단시간내에 자동적으로 산정할 수 있도록 되어 있다. 또 VMS-500 Vibration Monitor는 최상승점의 입자속도, 음압수준, 벡터 총합 및 가속력과 각 채널의 주파수, 실제 진동을 좌표로 나타낸 파장형태들을 볼 수 있으며 주파수 해석도 할 수 있다.

3.3 계속 방법과 발파 조건

비전기식 뇌관의 시간차가 진동속도의 크기에 미치는 영향을 분석하기 위하여 동일한 공당 장약량 즉 동

일한 지발당 장약량으로 시험하였으며 0, 17, 25, 42, 67, 109 ms의 각 시간차로서 거리만을 변화시켜 각 지발시차에 대한 진동속도의 거리별 변화를 측정하였다. 그러나 0 ms의 경우는 공사를 진행해야 하는 현장사정으로 인해 단일공(1공) 발파가 어려워 동일 공수(4공)로 시험을 행하였다. 즉 0ms의 지발당 장약량은 기타 시차의 4배의 지발당 장약량으로 시험하였다. 각 표면뇌관의 시차에 따라 25, 30, 50, 100 m의 거리로 변화시키면서 Table 1과 같은 발파 조건으로 총 169개의 data를 얻었다.

Table 1과 같이 공경  $\phi$  45 mm, 공간거리 1.3 m, 공당 1.26 kg의 에멀전 폭약을 장약하여 4공을 각 시간차의 표면뇌관을 연결하여 기폭하였다. 기폭은 비전기식 Starter를 수동식 발파기를 사용하여 기폭하였다. 발파 조건은 가능한 일률적인 측정 자료를 입수하기 위하여

Table 1. Conditions of nonelectric detonator blasting

Surface detonator	UB0	UB17	UB25	UB42	UB67	UB109
Hole detonator	U500	U500	U500	U500	U500	U500
Drilling Depth(m)	3 m	3 m	3 m	3 m	3 m	3 m
Number of Hole	4	4	4	4	4	4
Diameter of Hole (mm)	45	45	45	45	45	45
Charge per Hole(Kg)	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26
Hole spacing(m)	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
Length of Charge(m)	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
Cartridge Diameter(mm)	32	32	32	32	32	32
Explosive	Emul-sion	Emul-sion	Emul-sion	Emul-sion	Emul-sion	Emul-sion
Maximun Charge Weight Per Delay (kg)	5.04	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26
Total Charge (kg)	5.04	5.04	5.04	5.04	5.04	5.04

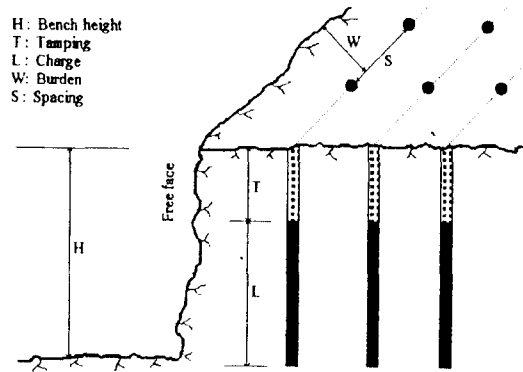


Fig. 2. Drilling pattern.

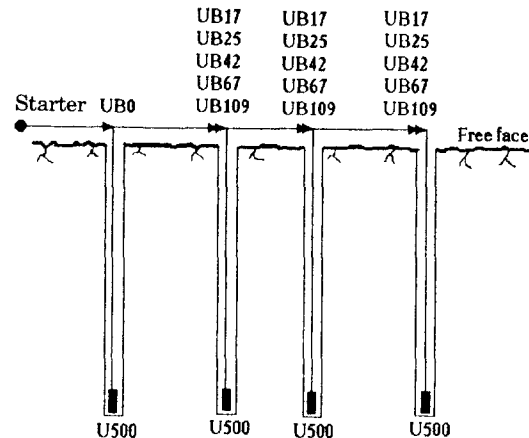


Fig. 3. Firing pattern.

시험기간 동안 별도의 시험 구간을 확보하여 실시하였으나 현장 여건상 여의치 못한 경우도 있어 이들 자료는 분석에 사용하지 않았다.

Figure 2와 Figure 3은 시험발파 구간의 비전기식뇌관의 천공 배치도와 점화 패턴도이다.

#### 4. 측정 결과

현장에서 측정한 결과 표면뇌관 UB0의 측정 결과는 30 m 거리에서 벡터합은 12.92~7.00 mm/sec를 기록하였으며 50 m 거리에서 5.9~2.02 mm/sec를 그리고 100 m 거리에서는 1.30~0.43 mm/sec를 기록하였다. 표면뇌관 UB17에 대한 시험은 4공을 UB17의 표면뇌관을 각공에 연결하여 이들 공이 17 ms의 시간차를 두고 기록되도록 하였으며 이 시험에 의한 측정결과는 30 m 거리에서 8.30~12.14 mm/sec의 진동속도를 50 m 거리에서 3.4~10.3 mm/sec, 그리고 100 m거리에서 0.51~2.44 mm/sec로 비교적 높은 폭의 변화를 보였다. 또 표면뇌관 UB25에 대한 측정결과는 30 m 거리에서 2.1~5.6 mm/sec의 진동속도를 50 m거리에서 0.87~2.29 mm/sec, 그리고 100 m거리에서 0.64~0.71 mm/sec로 변화하였다. 그리고 표면뇌관 UB42에 의한 측정결과는 30 m거리에서 4.37~12.11 mm/sec의 진동속도를 그리고 100 m거리에서 1.21~2.94 mm/sec로 변화 하였다. 그리고 표면뇌관 UB67의 측정결과 30 m 거리에서 1.60~2.3 mm/sec, 100 m 거리에서 0.30~1.49 mm/sec로 변화하였고 표면뇌관 UB109의 측정결과 25 m 거리에서 3.56~4.83 mm/sec, 30 m거리에서 1.90~4.2 mm/sec, 50 m거리에서 1.27 mm/sec의 진동속도를 그리고 100 m거리에서 0.29~1.46 mm/sec로 변화하였다.

이들 측정을 회귀분석에 의해 입지상수인 K, n을 구하기 위하여 최대진동속도와 환산거리의 log-log 1차 상관관계를 이용하여 전산처리 하였으며 최대진동속도는 접선, 진행 및 수직방향의 성분을 합성한 실벡터값을 적용하였다.

#### 5. 비전기식 뇌관의 진동 특성 고찰

##### 5.1 추정식에 의한 고찰

전산 해석을 통해 얻은 결과식의 신뢰도를 검증하기 위해 상관계수를 구하였다. UB0의 경우 자승근 및 삼

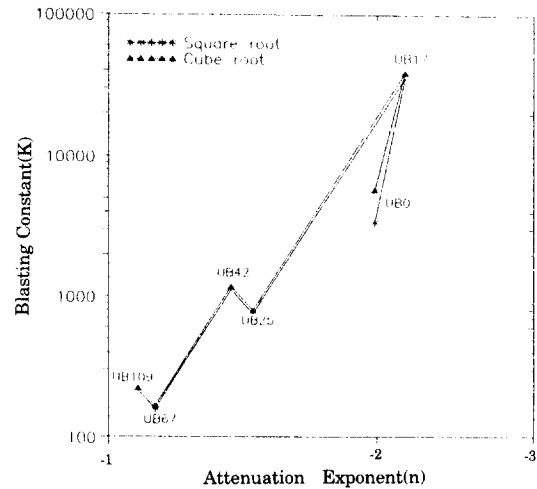


Fig. 4. Relationship between K vs n.

승근 환산식에서 모두 91.6%로 나타났으며 UB17의 경우 80.8%, UB25는 73.6%, UB42는 81.3%, UB67은 76.2%로 그리고 UB109는 74.1%의 값을 보였다. 시간차를 두지 않은 UB0의 경우는 상당히 높은 신뢰도를 보였으며 나머지의 시간차를 둔 경우에는 이에 미치지 못하였다. 이것은 각 시간차를 둔 뇌관들의 시차가 정확하지 않아 산포하기 때문으로 생각된다.

또한 지반조건 및 발파조건에 따른 발파진동상수 K 값은 UB0에서 자승근 및 삼승근 환산식에서 각각 3398.18과 5809.23으로 나타났고, UB17에서 35943.77과 39048.78, UB25에서 749.78과 792.90, UB42에서 1116.25와 1176.88, UB67에서 159.25와 166.32, 그리고 UB109에서 213.98과 223.06으로 나타났다. 이들의 차이는 표면뇌관 시차 차이에서 파생되었을 것으로 보여지며 지발 시차가 커질수록 K값이 감소하는 경향을 보인다.

그리고 감쇠지수 n은 UB0의 경우 자승근 및 삼승근에서 동일하게 -1.989로 나타났으며 UB17에서 -2.151, UB25에서 -1.452, UB42에서 -1.373, UB67에서 -1.128, 그리고 UB109에서 -1.079로 나타났다. Figure 4에서와 같이 지발 시차가 길어 질수록 K값과 n값은 감소되며 K값은 증가와 감소를 반복하지만 대체로 감소되는 경향을 보인다. Figure 5와 Figure 6은 각 시간차의 진동속도와 자승근 및 삼승근 환산거리의 관계를 보인 것이며, Table 2는 각 시간차별 발파상수 (K), 감쇠지수(n), 상관계수(r)를 나타내었다.

Figure 5와 Figure 6에서 가장 특징적인 사항은

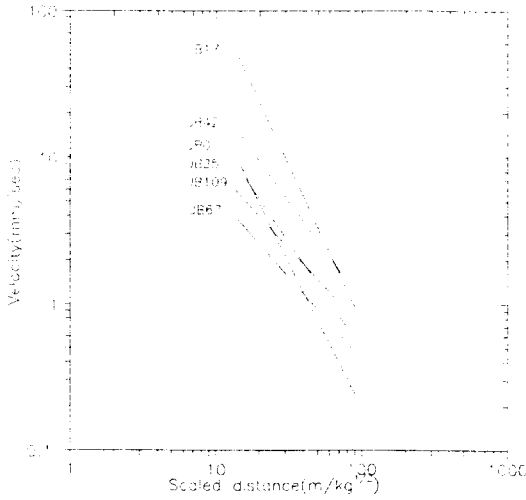


Fig. 5. Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by the total data.

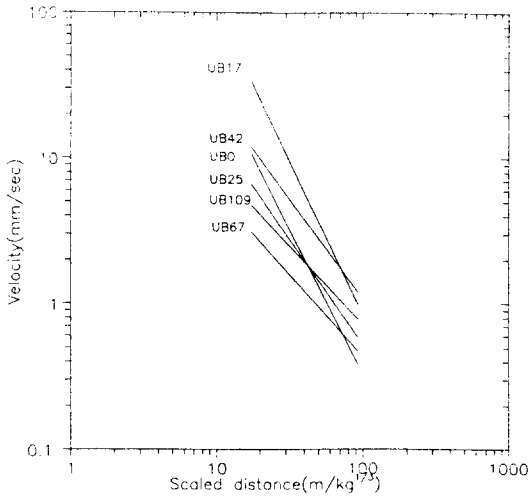


Fig. 6. Relationship between peak particle velocity and cube root scaled distance by the total data.

UB0의 직선식으로, 이론적으로 동일 조건에서 지발당 장약량이 많은 UB0의 직선이 UB17의 후반에 위치해야 하나 Figure 5 및 6과 같이 일부 구간에서 UB0의 환산거리(scaled distance)가 작게 나타나고 있다.

이론적으로 지반의 최대 입자속도는 지발당 최대 장약량(W), 즉 정해진 시간 간격내에 폭발하는 폭약의 양과 밀접한 관계가 있다

Table 2. Comparison of constants by nonelectric detonator

Types	K		n		r	
	square root	cube root	square root	cube root	square root	cube root
UB0	3398.18	5809.23	-1.989	-1.989	0.916	0.916
UB17	35943.77	39048.78	-2.151	-2.151	0.808	0.808
UB25	749.78	792.90	-1.452	-1.452	0.736	0.736
UB42	1116.25	1176.88	-1.373	-1.373	0.813	0.813
UB67	159.25	166.32	-1.128	-1.128	0.762	0.762
UB109	213.98	223.06	-1.079	-1.079	0.741	0.741

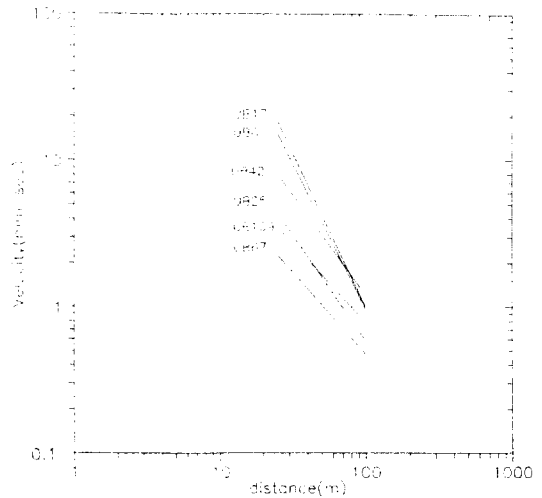


Fig. 7. Relationship between peak particle velocity and distance by UB0, UB17, UB25, UB42, UB67, UB109.

그러나 환산관계는  $D/W^{1/2}$ 의 비가 비슷한 때가 아니라 W와 D값 들이 비슷한 경우로 부터 얻어졌을때 가장 정확한 것이다.<sup>3)</sup> 예를 들면  $W=2500$  kg,  $D=500$  일 때와  $W=25$  kg,  $D=50$ 을 보면 모두  $D/W^{1/2}=10$ 의 값을 가진다. 그러나 표면파는 D가 500일때 우세할 것이고 물체파는 D가 50일때 우세할 것이다.

이와 같이 본 연구에서 UB0에 대한 시험은 시차를 둔 경우에 비해 W가 4배이고 1회 발파시 총장약량이 5.04 kg인 소규모 발파인 경우이므로 이들의 비교에서 UB0가 시차를 둔 경우에 비해 약 SD=20 이상에서 더 낮은 진동치를 보인 것으로 생각된다.

이를 확인하기 위하여 초점을 지발당 장약량에서 총 장약량에 맞추고 거리에 대해 비교하였으며 Figure 7과 같다. 그림의 직선은 각 시간차에서 측정 자료의 평균선을 log-log 그래프 상에 도시한 것이다.

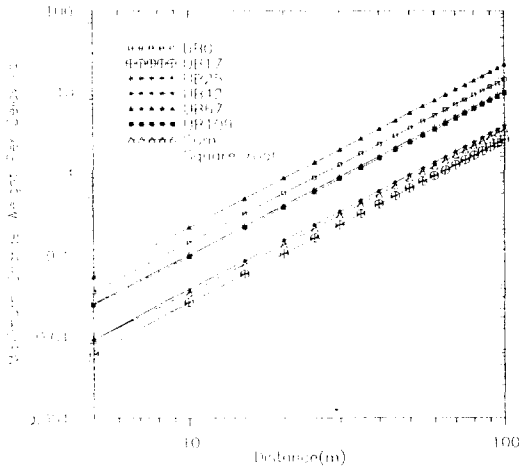


Fig. 8. Maximum charge per delay vs distance from blast point to sensor by square root scaled distance (using 95% vibration equation).

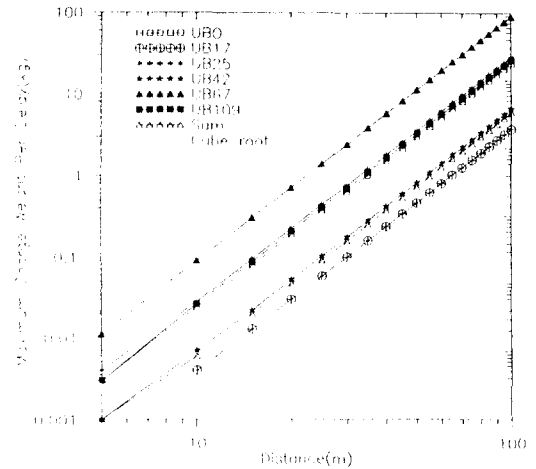


Fig. 9. maximum charge per delay vs distance from blast point to sensor by cube root scaled distance (using 95% vibration equation).

Figure 7에서와 같이 50 m이내의 거리에서 UB67, UB109, UB25, UB42, UB0, UB17의 순으로 나타났다. 즉 실제 발파의 진동 감쇠 효과는 UB67이 가장 우수하게 그리고 UB17이 가장 저조하게 나타났다.

UB0가 UB17보다 진동치가 적은것은 계속시 발생될 수 있는 미소한 오차이거나 17 ms부근에서 진동이 0 ms이상의 수준으로 증폭된 결과라고 생각된다. 그리고 UB67, UB109, UB25, UB42순의 배열은 지발시차가 길어질수록 진동감쇠효과가 상승되나 42 ms 시차보다는 25 ms가, 109 ms보다 67 ms의 지발시차가 진동의 상호 간섭효과가 큰 것으로 생각된다.

종합하면 본 연구와 같은 도심지의 소규모 노천발파의 설계시 지발당 장약량에 근거한 허용장약량과 1발파당 소요 총 폭약량을 동시에 고려해 주어야 할 것이다.

### 5.2 환산거리에 의한 고찰

구조물 피해에 영향을 주는 것은 입자의 변위, 속도, 가속도 및 주파수 등의 종속변수인데 여러 계측 결과에 의하면 구조물 피해와 입자속도는 밀접한 관계가 있다. 이론적으로 입자 속도는 지발당 장약량과 비례하고 폭원과의 거리에 역비례 관계가 있다. 이들을 지발당 장약량(W)과 거리(R)의 관계로서 자승근 환산거리( $D/W^{1/2}$ ) 또는 삼승근 환산거리( $D/W^{1/3}$ )로 나타내고 있으며 입자속도는 이들과 역비례 관계에 있다.

Table 3. Comparison of scaled distance in nonelectric detonator

Types	Square root scaled distance ( $m/kg^{1/2}$ )	Cube root scaled distance ( $m/kg^{1/3}$ )
UB0	26.54	34.75
UB17	62.08	64.51
UB25	31.56	32.80
UB42	51.34	53.36
UB67	21.49	22.33
UB109	32.50	33.78
by total data	53.05	54.32

Figure 8과 Figure 9는 각 시간차별 자승근과 삼승근의 노모 그래프이며 공통적으로 UB67이 동일 거리에서 가장 높은 지발당 장약량을 보이며 UB17이 가장 낮은 지발당 장약량을 보였다. 즉 UB67이 진동경감에 가장 우수하였으며 UB17이 가장 저조하였다.

Table 3은 각 시간차 별 환산거리이다. 환산거리의 비교에서 허용진동 속도를 5mm/sec로 했을 때 삼승근보다 자승근 환산거리가 더 낮은 수치를 보였고 이들의 차이는 큰 차이를 보이지 않았다.

또 이들의 환산거리는 자승근에서 UB17, UB42, UB109, UB25, UB0, UB67순으로 나타났으며 삼승근에서는 UB17, UB42, UB0, UB109, UB25, UB67순으로 나타났는데 공통적으로 UB17이 가장 높게, 그리고 UB67이 가장 낮게 나타났다. 그러나 이들의 원인에 대해서는 앞으로 연구가 요망된다.

이것은 Figure 8과 Figure 9에서 보이는 바와 같이 환산거리의 비교에서 나타난 것과 동일한 배열을 보이고 있다.

## 6. 결 론

현장에서 가능한 동일한 발파 조건으로 유지하면서 지반 진동의 크기를 측정하고 표면뇌관과 측정거리를 변화시켜 계측하였다. 노천 발파에서 주로 사용되고 있는 표면 뇌관 UB17, UB25, UB42, UB67, 그리고 UB109를 측정거리 25 m, 30 m, 50 m, 100 m로 변화시키면서 진동의 크기를 조사하여 회귀분석을 통해 비교 검토한 결과는 다음과 같다.

1. 노천 발파에서 비전기식 뇌관의 지발 시차는 시험 시차가 길어 질수록 K값은 감소되며 이것은 증가와 감소를 반복하지만 전체적으로 감소되는 경향을 보인다.

2. 도심지 소규모 발파에서 허용장약량 설계시 지발당 장약량과 함께 총 폭약량을 고려해 주어야 할 것으로 생각된다.

3. 허용진동속도를 5 mm/sec로 할때 95%의 신뢰구간에 대한 지발당 장약량 및 환산거리는 상승군에서 UB17, UB42, UB109, UB25, UB0, UB67 순으로 나타났으며 삼승군에서는 UB17, UB42, UB0, UB109, UB25, UB67순으로 나타났다. 공통적으로 UB17이 가장 높게 그리고 UB67이 가장 낮게 나타났다. 그러나 UB0, UB25, UB109사이의 관계에 대해서는 앞으로 좀더 연구가 요망된다.

## 사 사

이 연구는 1994년 조선대학교 학술연구비로 실시되었다.

## 참 고 문 헌

1. 심찬섭, 1994, 비전기식 점화시스템을 이용한 굴착법, 광업 진흥 Vol. 48
2. 허진, 1982, 신 화약발파학, 기전연구소
3. 양형식, 발파 진동학, 구미서관
4. 김대상, 이정인, 이희근, 발파진동의 속도 및 주파수를 고려한 허용 진동치 결정에 관한 연구, 한국자원공학회지, Vol. 28, pp. 444~455
5. 류창하, 1992, 암반굴착에 의한 발파진동 소음 및 비석의 조절, 한국암반역학회지, Vol. 2, pp. 102~115
6. 류창하, 이정인, 1979, 발파작업에 의한 지반진동이 지상구조물에 미치는 영향에 관한 연구, 대한광산학회지, Vol. 16, pp. 41~50
7. 양형식, 주재성, 1990, 노천굴발파의 진동특성과 입지상수 결정에 관한 연구, 한국자원공학회지, Vol. 27, pp. 316~323
8. 이경운, 김문규, 1987, 석회석 채석장의 대규모 발파에 대한 발파진동, 대한광산학회지, Vol. 24, pp. 320~327
9. 임한옥, 김재동, 1992, 발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구, 한국자원공학회지, Vol. 29, pp. 146~157
10. 양형식, 1992, 지표발파의 진동특성에 관한 기초연구, 한국암반역학회지, Vol. 2, pp. 199~211
11. 김일중, 김영석, 1995, 발파진동 예측식을 이용한 안전장약량 산정문제에 관하여, 한국암반공학회지, Vol. 11, pp. 89~94
12. Kopp, J. W., Siskind, D. E., 1986, Effects of Millisecond-Delay Intervals on Vibration and Airblast From Surface Coal Mine Blasting, USBM RI 9026, pp44
13. Lagefors, U., Kihlstrom, B., 1978, The Modern Technique of Rock Blasting, 3rded., John Wiley & Sons, pp 258~293
14. Siskind, D. E., Stachura, V. J., Nutting, M. J., 1987, Low-Frequency Vibrations Produced by Surface Mine Blasting Over Abandoned Underground Mines, USBM RI 9028, pp58
15. Siskind, D. E., Stagg, M. S., Kopp, J. W. & Dowding C. H., 1980, "Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration From Surface Mine Blasting," USBM RI 8507, pp74
1. 심찬섭, 1994, 비전기식 점화시스템을 이용한 굴착