

## 터널굴착에서 다단식 발파기에 의한 전단면 발파의 적용성 연구

조영동<sup>1)</sup> · 이상은<sup>1)</sup> · 임한옥<sup>2)</sup>

### Application of Full-Face Round by Sequential Blasting Machine in Tunnel Excavation

Young-Dong Cho, Sang-Eun Lee and Han-Uk Lim

#### ABSTRACT

Many methods and techniques to reduce ground vibrations are well known. Some of them are to adopt electric millisecond detonators with a sequential blasting machine or an initiating system with an adequate number of delay intervals. The types of electric detonators manufactured in Korea include instantaneous, decisecond and millisecond delays but numbers 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 tunnel excavation. Sequential fire time refers to adding an external time delay to a detonators nominal firing time to obtain sequential initiation and it is determined by sequential timer setting. To reduce the vibration level, sequential blasting machine (S.B.M) with decisecond detonators was adopted. A total of 134 blasts was recorded at various sites. Blast-to-structure distances ranged from 20.3 to 42.0 meter, where charge weight varied from 0.25 to 0.75 kg per delay. The results can be summarized as follow: 1. The effects of sequential blasting machine on the vibration level are discussed. The vibration level by S.B.M are decreased approximately 14.38~18.05% compare to level of conventional blasting and cycle time per round can be saved. 2. The empirical equations of particle velocity were obtained in S.B.M and conventional blasting.  $V=K(D/W^{1/3})^{-n}$ , where the values for n and k are estimated to be 1.665 to 1.710 and 93.59 to 137 respectively. 3. The growth of cracks due to vibrations are found but the level fall to within allowable value.

#### 1. 서 론

현재 국내에서는 지하철 공사, 각종 에너지의 지하 저장 시설, 통신구 및 전력구, 교통용 터널의 설치 등 수 많은 터널을 굴착하기 위하여 발파작업을 수행하고 있다. 특히 이들 터널 중 상당부분이 도심지에서 시공되고 있기 때문에 발파로 인한 지반진동은 민원발생의 요인이 되고 있어 때때로 굴착공법의 변경 등을

초래하기도 한다.

일반적으로 발파로 인한 진동을 감소시키기 위해서는 크게 두가지를 들 수 있다. 즉 발파원에서 진동을 억제하는 방법과 전파하는 진동을 차단하는 방법이 있는데 전자의 경우 폭약의 선택, 장약량 조정, 분할 발파, Decoupling 효과, MSD 뇌관에 의한 진동의 상호간섭, 인공 자유면의 활용, 특수화약류의 이용 등이 있으며 후자의 경우는 일정한 길이의 방진구

\* 1994년 8월 17일 접수

- 1) 정회원, 강원대학교 공과대학 자원공학과 대학원
- 2) 정회원, 강원대학교 공과대학 자원공학과 교수

(防振溝)나 지표면에 인공균열을 형성하여 진동의 전파를 차단하는 방법 등이 있다.<sup>1,4)</sup>

본 연구에서는 발파진동을 감소시킬 수 있는 전단면 발파법의 하나로 뇌관의 기폭시차에 의한 진동 감소법을 채택하므로써 외국의 노천채굴에서만 적용되고 있는 것으로 알려진 다단식 발파기(sequential blasting machine)<sup>5)</sup>를 이용하여 부산 지하철 2호선 221공구의 터널 막장에서 시험을 실시하고 그 결과를 분석하였다.

즉 다단식 발파기란 폭약을 기폭시키는 시간차를 발파기로 조정하므로써 지발발파의 효과를 얻는 것이다. 현재 우리나라에서는 지발뇌관으로 밀리세컨드 뇌관(MS 뇌관)과 데시세컨드 뇌관(DS 뇌관)이 생산, 판매되고 있으나 그 단차가 각각 20여개에 불과하기 때문에 한 막장의 천공수가 40공을 초과하는 경우 지발당 뇌관수의 증가가 불가피하고 이에 따라 지발당 장약량이 커지므로 진동이 크게 된다. 반대로 지발당 뇌관수를 감소시키고자 하는 경우 분할발파(分割發破)가 불가피하므로 이로 인한 작업의 지연, 위험도의 증가 등으로 현장에서 분할발파의 채택을 기피하는 실정이다.

위와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 비전기식 뇌관(NONEL)에 의한 시간차 조정의 방안이 있으나 국내에서는 아직껏 터널 굴착법에서 그 효과가 명확히 입증되지 못하고 있는 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 다단식 발파기의 기계적 작동에 의해 시간차를 조정함으로써 현재 국내에서 생산되는 MS 및 DS 뇌관만으로도 발파진동을 감소시킬 수 있음을 입증하였다.

즉 재래식 분할발파와 다단식 발파 시스템에 의한 발파진동의 크기를 계측하고 아울러 발파 작업장 인근에 있는 건물내 기존 균열의 성장을 게이지로 측정하여 상호비교를 통한 효과를 입증하는데 본 연구의 목적이 있다.

## 2. 측정지역의 지질 및 암반의 특성

본 연구의 대상지역은 부산시 부산진구 범천동에 위치하고 있으며 부산지하철 2호선 221 공구로서 본 지역에 분포하는 지질은 백악기 경상계의 유천층군과 불국사 관입암류로 대별된다. 본 측정지역은 유천층군에 속하며 하부로부터 다대포층, 안산암질 화산각

력암, 안산암류 암회색 응회질 퇴적암, 유문석력 안산암질 화산각력암, 유문질암으로 구분되고 특히 여기에서는 안산암질 화산각력암과 화강반암등이 혼재하고 있다.

이 지역의 대표적인 암석에 대한 실험실 시험결과 총 20개 자료의 평균치로 보면 비중이 2.678~2.779이며 일축압축강도와 인장강도는 각각 630~1600 kgf/cm<sup>2</sup>, 90~175 kgf/cm<sup>2</sup>이고 탄성계수와 포와송비는 각각(2.72~7.34)×10<sup>5</sup> kgf/cm<sup>2</sup> 및 0.19~0.27이다. 한편 시험편의 탄성과 전파속도는 P파가 4280~6030 m/sec이고, S파가 2330~3550 m/sec로서 1979년 국제암반역학회(ISRM)에서 제시한 암반분류법에 의하면 보통암 내지 경암에 속한다.<sup>6)</sup> 그리고 막장면의 육안 관찰 결과로는 절리 발달이 비교적 적은 양호한 암반이다.

## 3. 실험장치 및 조건

### 3.1 다단식 발파 시스템의 장치

본 연구에 사용한 다단식 발파기는 미국의 Research Energy of Ohio Co. 제품의 BM175-10PT 규격이다. 1회로당 최소 9 Joule의 에너지를 방출하는 10회로(回路) 콘덴서식 연속 발파기로 9개의 3자리 스위치가 있어 1 ms에서 999 ms까지 지연시차(delay time)를 임의로 조정할 수 있다.

이 기계의 주요 구성요소 및 용도를 간단히 설명하면 다음과 같다.

로드 플러그(AD5) : 다단발파기의 연속성 점검

에너지 테스터(ET175-10) : 10개 회로에 대한 에너지 출력 점검

연결케이블(EC15-2) : 각종 Test나 발파시의 연결 코드

오옴미터(BO1999-10) : 전기뇌관회로의 단락 여부 및 저항 점검

연장케이블(EC15-500) : 원거리 발파시 연장 모선으로 사용

단자판(TB15) : 분로된 각선을 연결함(10개의 회로로 된 terminal board)

케이블 릴(CR50) : 연장 케이블을 감아 편리하게 이동함

Fig. 1은 다단식 발파기의 외형을 보여주고 있다. 본 연구에서는 터널발파시 보조모선을 단자판에 직접

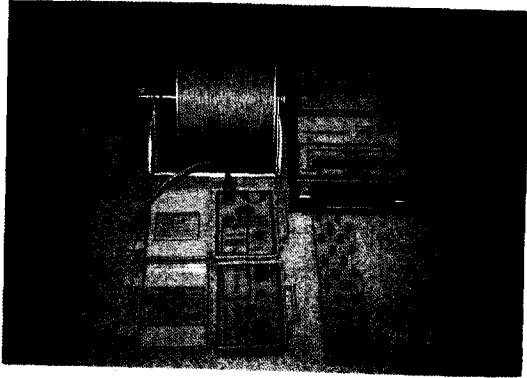


Fig. 1. Sequential blasting machine (BM175-10PT)

연결하여 이용하였기 때문에 케이블 릴은 사용하지 않았다.

### 3.2 발파패턴 및 장약조건

다단식 발파시스템에 의한 진동 효과를 계측, 비교하기 위하여 다음과 같은 발파패턴 및 장약조건을 설정하였다. Fig. 2와 3은 각각 재래식 발파 및 다단식 발파의 천공배치를 나타내고 있다.

#### 3.2.1 재래식 분할 발파

재래식 발파의 경우 전기뇌관의 지연시차 한계성으로 인하여 발파효과가 제한을 받음으로써 전단면

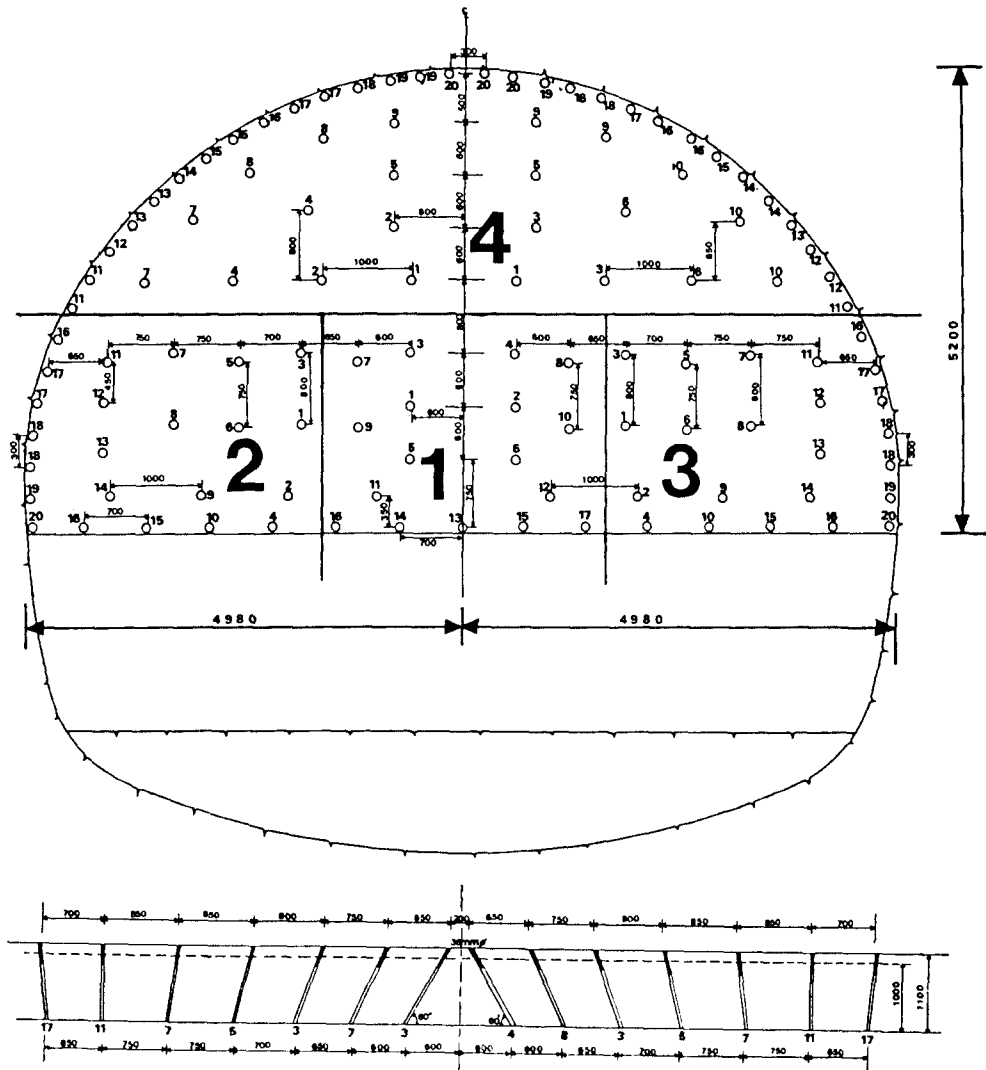


Fig. 2. Blasting and charge pattern by traditional blasting

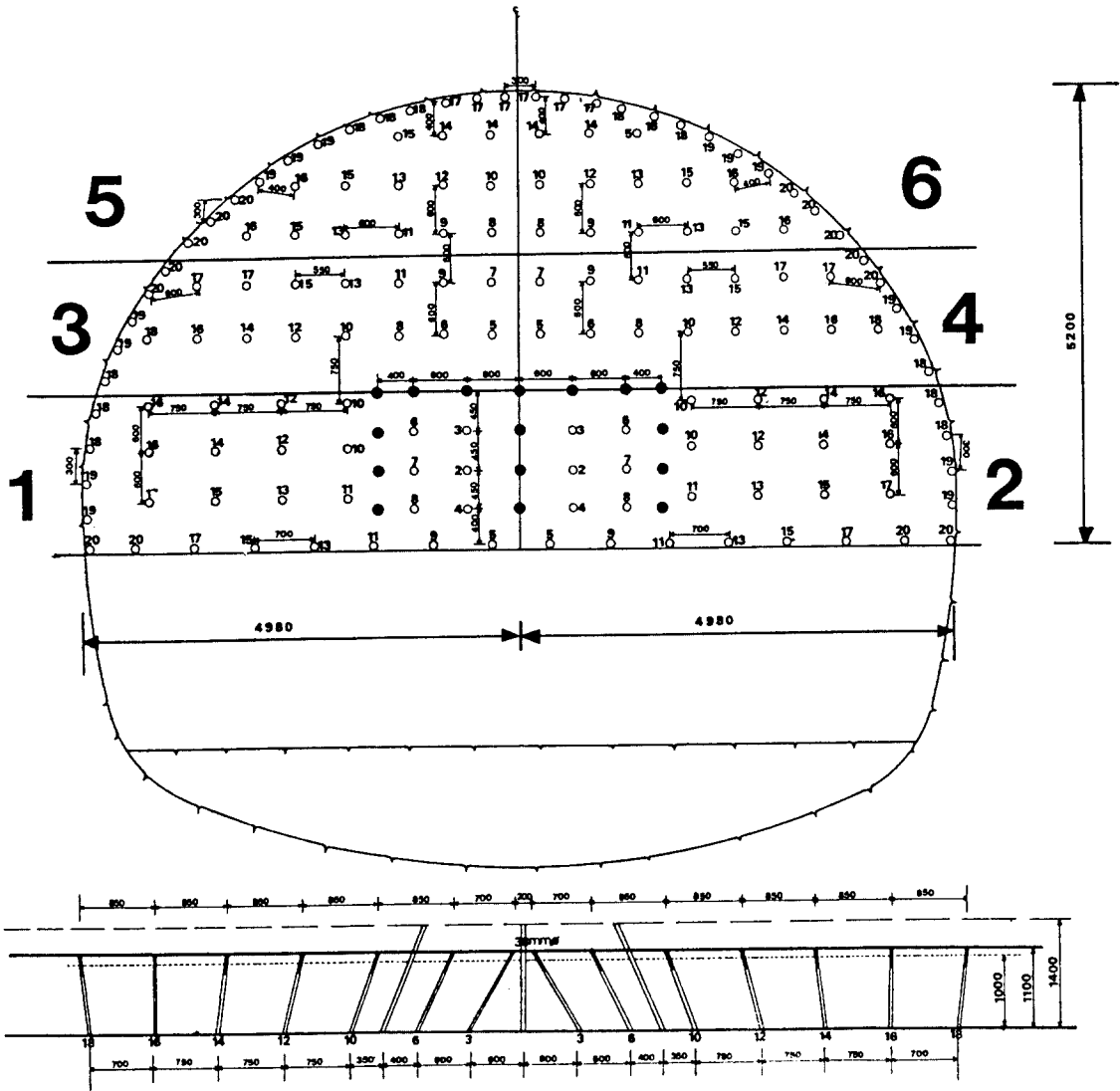


Fig. 3. Blasting and charge pattern by sequential blasting

발파를 실시할 경우에는 허용 진동치를 초과하여 인접구조물이나 시설물에 피해를 줄 뿐만 아니라 민원의 대상이 되고 있다. 따라서 지발당 장약량을 조절하는데 제한을 받게 됨에 따라 분할발파를 불가피하게 실시하여야 하는데 세부적인 내용은 Table 1과 같다.

### 3.2.2 다단식 발파 System

다단식 발파는 재래식 발파에서 한정되어 있는 지발뇌관 시차의 문제점을 보완하고 분할발파시 따르는 각종 문제점을 극복함으로써 안전하고 효율적인 발파를 수행할 목적으로 고안된 하나의 발파법이다.

Table 2는 다단식 발파의 방법을 설명하고 있다.

다단식 발파 시스템에서는 Fig. 3과 같이 6회로 시간차(42 ms)를 조정하여 기폭시켰다.

또한 6개의 회로를 사용하여 다단식 발파를 하였을 때의 뇌관의 지연시차는 Table 3과 같다.

## 4. 진동 측정 결과 및 해석

### 4.1 발파진동의 특성

폭약의 폭발시 발생하는 에너지의 0.5~20% 정도가

Table 1. Method of traditional blasting

Arrangrment of Divisions	1st Div.	2nd Div.	3rd Div.	4th Div.
Drilling Depth(m)	1.1	1.1	1.1	1.1
Advance(m)	1.0	1.0	1.0	1.0
Number of Holes	17	23	23	52
Diameter of Hole(mm)	38	38	38	38
Hole Spacing(mm)	500-750	300-750	300-750	300-750
Charge per Hole(g)	125-500	125-500	125-500	125-500
Length of Charge(mm)	216-866	216-866	216-866	216-866
Length of Stemming(mm)	234-884	234-884	234-884	234-884
Detonator	MS # 1-20	MS # 1-20	MS # 1-20	MS # 1-20
Cartridge Diameter(mm)	25	25	25	17, 25
Explosive	G.D	G.D	G.D	G.D Finex-1
Total Charge(kg)	6.375	6.502	6.502	11.02

Table 2. Method of sequential blasting

Circuit Array	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
Circuit Time(ms)	42	42	42	42	42	42
Drilling Depth(m)	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Advance(m)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Number of Holes	30	30	20	20	26	26
Diameter of Hole(mm)	38	38	38	38	38	38
Hole Spacing(mm)	600-750	600-750	600-750	600-750	300-600	300-600
Charge per Hole(g)	125-375	125-375	125-375	125-375	125-375	125-375
Length of Charge(mm)	218-654	218-654	218-654	218-654	218-654	218-654
Length of Stemming(mm)	446-882	446-882	446-882	446-882	446-882	446-882
Detonator	MS # 2-20	MS # 2-20	MS # 5-20	MS # 5-20	MS # 8-20	MS # 8-20
Cartridge Diameter(mm)	25	25	25	25	17, 25	17, 25
Explosive	G.D	G.D	G.D	G.D	G.D Finex	G.D Finex
Total Charge(kg)	7	7	4.125	4.125	5.2625	5.2625

탄성파의 형태로 주위 매질로 전파되어 발파진동으로 소비되는 것으로 알려져 있으며 발파에 의해 발생하는 이러한 탄성파가 진폭과 주기를 갖는 진동으로 매질을 전파하므로써 지반 구조물이나 시설물에 상당한 피해를 입히게 된다.

이와같이 지반진동은 일반적으로 변위(displacement), 입자속도(particle velocity), 가속도(acceleration)의 3성분과 주파수(frequency)로 표시된다.

발파진동은 변위, 속도, 가속도의 형태로 나타낼 수 있으나 지상 구조물이나 시설물에 대한 영향을 평가할 때 직접적으로 관련을 갖는 것은 진동속도(particle velocity)이며 따라서 본 연구에서는 진동속도를 토

대로 결과를 정리하였다. 또한 발파에 의한 지반진동의 측정은 측정방향에 따라 수직방향(vertical), 진행방향(radial or longitudinal), 접선방향(transverse)의 3성분으로 이루어진다. 이러한 3성분의 크기는 대상암반, 지형 및 발파에 의하여 발생된 탄성파, 즉 P파(compressional wave, 압축파, 1차파 또는 종파), S파(shear wave, 전단파, 2차파 또는 횡파) 및 표면파들의 상호간섭작용에 따라 변화하게 된다.<sup>1,4)</sup>

발파진동의 전파특성을 이론적으로 파악하려는 여러 학자들에 의해서 발파현상에 관련된 변수의 차원 해석과 발파진동의 측정경험을 토대로 발파진동식을 제안하고 있으며 현재 국내외로 가장 많이 적용하고

Table 3. Setting time of deci-second detonator

Detonator	Circuit					
	1 (0 ms)	2 (42 ms)	3 (84 ms)	4 (126 ms)	5 (168 ms)	6 (210 ms)
DSD 2 (sec)	0.250	0.292	0.334	0.376	0.418	0.460
3	0.500	0.542	0.584	0.626	0.668	0.710
4	0.750	0.792	0.834	0.876	0.918	0.960
5	1.000	1.042	1.084	1.126	1.168	1.120
6	1.250	1.292	1.334	1.376	1.418	1.460
7	1.500	1.542	1.584	1.626	1.668	1.710
8	1.750	1.792	1.834	1.876	1.918	1.960
9	2.000	2.042	2.084	2.126	2.168	2.120
10	2.300	2.342	2.384	2.426	2.468	2.510
11	2.700	2.742	2.784	2.826	2.868	2.910
12	3.100	3.142	3.184	3.226	3.268	3.310
13	3.500	3.542	3.584	3.626	3.668	3.710
14	4.000	4.042	4.084	4.126	4.168	4.210
15	4.500	4.542	4.584	4.626	4.668	4.710
16	5.100	5.142	5.184	5.226	5.268	5.310
17	5.700	5.742	5.784	5.826	5.868	5.910
18	6.300	6.342	6.384	6.426	6.428	6.510
19	6.900	6.942	6.984	7.026	7.026	7.110
20	7.500	7.542	7.584	7.626	7.668	7.710

있는 경험식은 다음과 같다.<sup>1,4,7-9)</sup>

$$V = K \left( \frac{D}{W^b} \right)^{-n} \quad (1)$$

V : 발파진동속도(cm/sec)

D : 폭원으로부터의 거리(m)

W : 지발당 장약량(kg)

K : 발파진동상수

n : 감쇠지수

b : 장약지수

(1)식에서 거리와 지발당 장약량의 관계로부터  $D/W^b$ 를 환산거리(scaled distance, SD)라고 하며, b의 값이 1/2이면 자승근 환산거리(square root scaled distance), 1/3이면 삼승근 환산거리(cube root scaled distance)라고 한다.

지금까지 연구된 바에 의하면 발파진동은 주로 지발당 장약량(kg)과 거리(m)에 의해 결정되고 기타의 요인들은 지반의 성질이나 발파조건에 의해 결정된다. 따라서 발파설계를 위해서는 대상지역에서의 시험발파를 통한 K, n 상수값을 정의하는 것이 매우 중요

하며 K, n 값이 결정되고, 허용진동속도가 주어지면 발파진동식으로부터 폭원으로부터의 거리와 지발당 장약량과의 관계를 나타내는 노모그램을 작성할 수 있다.

한편 입지상수의 결정법은 식(1)을 이용하여 log-log scale로 좌표상에 도시하였을 때 기울기(n)와 절편(log K)으로부터 결정한다.

$$\log V = \log K - n \log \left[ \frac{D}{W^b} \right] \quad (2)$$

#### 4.2 발파진동의 크기 측정

본 연구에서 사용된 발파진동 측정기는 Slope Indicator Co.(SINCO) 제품인 S-6 Peak Vibration Monitor(Model No. 4251) 1대, Instantel Co.(Canada) 제품인 Blastmate II의 677 및 477 각 1대 등 모두 3대로 측정하였다.

S-6 Peak Vibration Monitor는 디지털 및 아날로그 형태로 나타낼 수 있으며, 진행방향, 횡방향, 수직방향 및 이들 속도성분에 대한 벡터합의 측정이 가능하다.

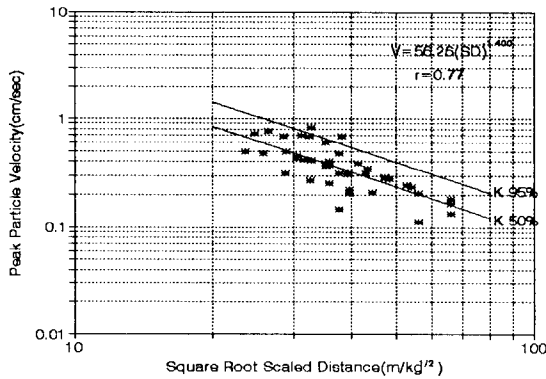


Fig. 4. Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by traditional blasting

두개의 진동 변환기를 설치하여 동시에 두 지점에서 측정이 가능하며 진동변환기와 모니터 사이의 간격을 30 m 정도 둘 수 있는 케이블이 있어서 폭원에서 가까운 지점의 측정이 용이하며 주파수 해석도 가능하다. 그리고 Blastmate 477과 677은 S-6과 마찬가지로 진행방향, 횡방향 및 수직방향의 측정과 이들 속도성분에 대한 벡터합으로도 나타낼 수 있다.

자료처리에는 이들 모든 자료를 이용하였으나 재래식 분할발파의 경우는 Blastmate 477과 677 자료를 주로 이용하였고, 다단식 발파 System에서는 S-6, Blastmate 477 및 677 자료 모두를 사용하였다.

### 4.3 측정결과의 검토

#### 4.3.1 재래식 터널 발파의 측정 결과

재래식 터널발파 패턴에 의한 1단면 4분할 발파순서는 첫번째로 심빼기 부분을 먼저 발파하고 좌측부, 우측부 및 상단부 순으로 발파를 시행한 결과 심빼기 부분의 발파에서 가장 큰 진동치를 나타내고 있다. 이것은 첫번째 부분발파인 심빼기는 1자유면인데 비하여 그 다음 시행되는 2, 3, 4 부분의 부분발파는 선행발파로 인해 형성된 자유면을 이용한 2자유면 발파이기 때문에 발파진동의 크기가 감소하는 현상으로 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 심빼기 부분의 진동 측정치만을 Fig. 4 및 5에 제시하였으며, 이를 전산처리하여 그 결과를 구하였다.

Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 총 측정회수는 45회이고 폭원과 측정점간의 거리는 20.3~33.0 m이며

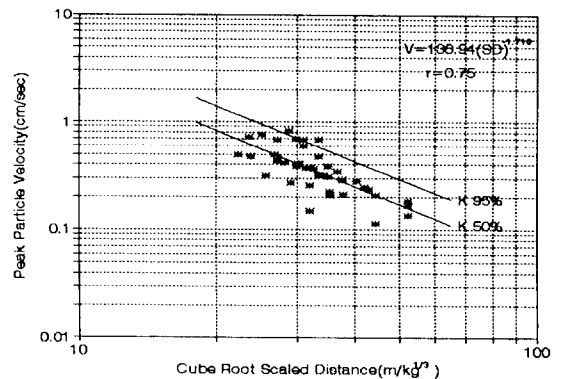


Fig. 5. Relationship between peak particle velocity and cube root scaled distance by traditional blasting

지발당 최대 장약량은 0.25~0.75 kg으로써 진동속도의 크기는 0.112~0.82 cm/sec로 계속되었다. 즉 측정치를 회귀분석에 의해 입지상수인 K, n을 구하기 위하여 최대진동속도와 환산거리의 log-log 1차 상관관계를 이용하여 전산처리 하였으며 이때 최대진동속도는 종, 횡 및 수직방향의 성분을 합성한 벡터값을 적용하였다. 이때 자승근 및 입방근으로 환산한 결과는 Fig. 4 및 5와 같다.

그리고 식(1)에 의한 회귀분석 결과는 다음과 같다.

$$V = 56.26 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.400} \quad r = 0.77 \quad (3)$$

$$V = 136.94 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.710} \quad r = 0.75 \quad (4)$$

한편 재래식 발파의 경우 분할발파로 인하여 다음 차례의 발파를 시행할 때 종종 발파모선이 단절되며, 또한 이미 결선이 완료된 각선에 단락이 자주 일어나는 관계로 발파작업시 지하 약 20 m 거리의 계단을 작업자들이 자주 왕복해야 하는 문제가 발생한다. 이때 발파작업장 접근시 발파개스나 낙석에 의한 위험성이 있기 때문에 작업의 안전성이나 작업공정에 커다란 영향을 주기도 한다. 따라서 이러한 단점을 보완하고 작업의 능률과 안전성을 확보하기 위해서 다단식 System에 의한 발파 패턴을 고안하여 적용하였다.

#### 4.3.2 다단식 발파 시스템에 의한 터널발파의 측정 결과

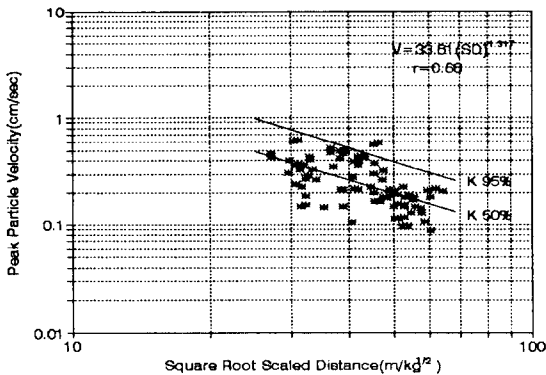


Fig. 6. Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance by sequential blasting monitoring

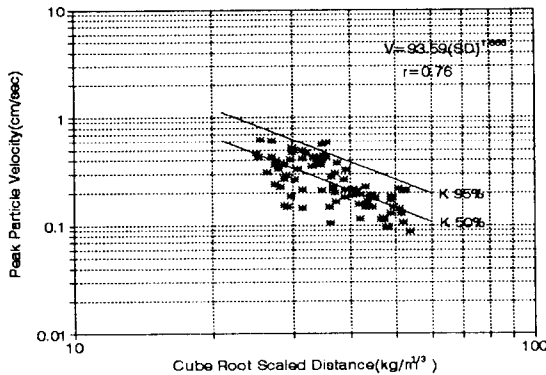


Fig. 7. Relationship between peak particle velocity and cube root scaled distance by sequential blasting monitoring

재래식 발파에서의 문제점을 보완하고 작업공정을 원활히 하기 위하여 다단식 발파를 터널에 적용하였다. Fig. 3의 발파패턴에 나타난 바와 같이 6개의 보조모선을 하단부 좌측에 1번 보조모선, 우측에 2번 보조모선, 중앙부 좌측에 3번 보조모선, 우측에 4번 보조모선, 상단부 좌측에 5번 보조모선, 우측에 6번 보조모선을 다단식 발파기에 연결시켜 기폭시켰다. 이때 회로당 시차는 42 ms로 조정하였다. 이와 같이 다단식 발파기(BM175-10PT)는 지발당 장약량을 감소시키기 위해 보조모선을 최대 10개까지 연결시킬수 있으나 본 실험에서는 6개의 보조모선을 연결시켜 총 152공의 장약공을 전단면 1회로 기폭시켰으며 총 89회 측정하였는데 그 결과는 Fig. 6 및 7과 같다. 또한 다단식 발파는 1번과 2번 보조모선 사이에서 심폐기

부분의 발파가 선행적으로 이루어지기 때문에 최대 진동속도는 주로 1번 및 2번 보조모선에서 발생하였다. 따라서 진동측정은 주로 1번 및 2번 보조모선 발파시의 계측자료를 이용하였다. 발파진동의 총 측정회수는 89회이고 폭원과 측정점간의 거리는 21.1~42.0 m이며 지발당 최대장약량은 0.25~0.625 kg으로써 재래식 발파의 경우보다 약간 감소하였다. 이때 진동속도의 크기는 0.064~0.611 cm/sec로서 재래식 경우에 비하여 전체적으로 약간의 감소를 나타내고 있다. 이때 측정회수별 진동치의 상대적인 크기의 차이는 폭원으로부터의 거리, 지발당 장약량 외에도 불연속면의 발달정도 등 현지 암반의 조건에 기인한 것으로 추정된다.

여기에서 측정된 89회 측정치중 폭원으로부터 21.4 m에서 계측된 값이 0.611 cm/sec로 최고치를 보이고 있고 반면에 최저치는 36.8 m 떨어진 곳에서 0.064 cm/sec로 나타났다. 따라서 몇몇 측정자료를 제외하고는 모두 일반적인 진동 허용 기준치인 0.5 cm/sec 이하임을 알 수 있었다. 이것은 다단식 발파기에 의해 6개의 보조모선으로 지발당 장약량을 감소시켜 발파하였기 때문이라고 생각되며, 현장여건상 심발공의 경우 3공의 무장약공을 추가시켜 발파하였기 때문으로 추정된다.

한편 다단식 발파기는 10개의 보조모선까지 연결할 수 있어 더 많은 보조모선으로 지발당 장약량을 감소시킬 수 있으나 결선의 어려움과 단락(Cut off) 현상 때문에 2~3회 시도하였으나 단락으로 인한 작업 지연과 사고위험 때문에 중지하였다.

이상의 진동결과로부터 나타난 자승근 및 입방근으로 환산한 결과는 Fig. 6 및 7에 나타나 있으며, 또한 회귀분석 결과는 각각 식(5) 및 식(6)과 같다.

$$V = 33.81 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{1.316} \quad r = 0.68 \quad (5)$$

$$V = 93.59 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.655} \quad r = 0.76 \quad (6)$$

#### 4.4 다단식 발파기에 의한 발파 특성

전산해석을 통해 얻은 결과식의 신뢰도를 검증하기 위해 상관계수를 구하였다. 재래식 발파의 경우 자승근 및 삼승근 환산식에서 각각 77%와 75%로 나



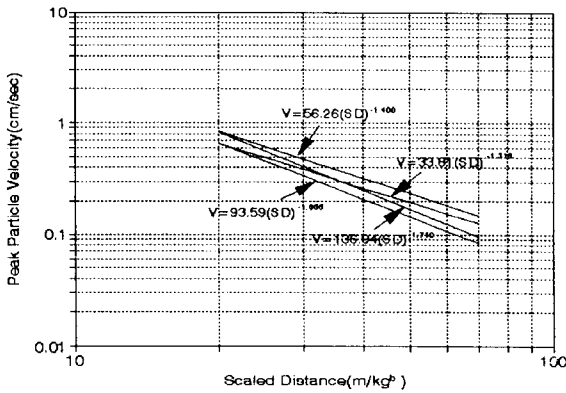


Fig. 8. Comparison of two types blasting

타났으며 다단식 발파의 경우에는 각각 68%와 76%의 값을 얻었다. 따라서 비교적 낮은 상관계수를 보이고 있으며, 2가지 발파방식에 따른 상관계수(correlation factor)는 별 다른 차이를 나타내지 않고 있다. 이는 주로 피해가 예상되는 인접 구조물 근처에서 측정하였는데 가옥마다 표고차가 심하고 또한 터널 진행방향에 하천이 흐르고 있어 암질의 풍화정도가 심한 지역과 그렇지 않은 양호한 지역등 측정주변 암반 및 환경의 차이가 심한 곳에서 측정하였기 때문으로 판단된다.

또한 지반조건 및 발파조건에 따른 발파진동상수 K 값은 재래식 발파의 경우에는 각각 56.26, 136.94를 얻었고, 다단식 발파의 경우에는 각각 33.81, 93.59로 나타나 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이는 지발시차의 효율성을 감안하여 설계하였고, 진동속도 허용치 이하가 되도록 굴진장을 1m로 계획하여 지발당 장야량을 줄임으로써 나타난 결과라고 예측되어진다.

그리고 감쇠지수 n은 재래식 발파의 경우 -1.4, -1.71로 나타났으며, 다단식 발파의 경우에는 -1.316, -1.655의 값을 보였다. 전, 후자 공히 약간의 차이를 보이고 있음을 알 수 있는데 이는 굴착이 진행됨에 따라 암질의 변화가 있고 지하수의 유입 및 발파패턴 그리고 기폭방법(MS, DS 뇌관의 시차)의 차이로 여겨진다.

이상의 결과를 종합하여 나타내면 Fig. 8과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 자승근 환산식에서는 측정 결과로부터 환산거리가 최저 24.6에서 최고 66 m/kg<sup>1/2</sup>일 때 재래식 발파에 비하여 다단식 발파의 경우 각각 21.34% 및 14.81%의 진동이 감소하는 경향을

나타내었고 삼승근 환산식의 경우에는 환산거리가 27.07로부터 60.25 m/kg<sup>1/3</sup>로 변할 때 각각 18.05%와 14.38%의 감소효과를 나타냈다. 따라서 진동의 감소효과를 위해서 MS 뇌관을 사용하는 4분할 재래식 발파보다는 다단 발파기에 의한 발파방법이 작업공정이 원활할 뿐만 아니라 도심지에서 민원의 대상이 되고 있는 진동제어에 훌륭한 방법임을 입증할 수 있었다.

한편 다단식 발파의 효과를 비교하기 위해서는 동일한 작업조건, 예를 들면 천공간격, 천공수, 폭원에서 측점까지의 거리, 사용 폭약의 종류 등을 동일하게 설정하고 그 측정치를 근거로 비교하는 것이 합리적이다.

그러나 현장시험 조건이 정상적인 굴진작업과 병행해야만 하는 사정이 있었고 본 실험이 국내 최초로 실시된 것이기 때문에 만약의 경우 불완전 발파가 일어나는 경우 조업의 차질 등이 우려되어 약간의 실험조건에 차이가 있었다. 이들 실험조건 및 측정 결과중 중요한 항목을 비교하면 Table 4와 같다.

또한 작업환경에 따라 비교하면 다음과 같다. 재래식 발파의 경우는 제1분할 발파로 인하여 제2분할 경계부에서의 뇌관 각선 연결 부분이 단선되기 쉬우며, 통기시간 및 조명설치에 소비되는 시간과 기타 결선을 위한 막장 접근시 낙석 및 부석의 위험으로 안전재해가 발생되기 쉽다. 또한 분할 경계부의 굴착 암반의 최소저항선 간격의 확장으로 인하여 대괴가 발생하므로 소할발파로 인한 파쇄시간이 소모되어 버럭처리에도 많은 시간이 소요된다.

그러나 다단식 발파의 경우는 한번의 발파로 전단면 발파와 같은 효과를 나타낼 수 있기 때문에 재래식 발파의 여러가지 불편한 점을 해소할 수 있을 뿐만 아니라 재래식 발파와는 달리 다단식 발파에서는 천공수의 증가로 인하여 천공시간이 다소 증가하지만, 반면에 천공수의 증가로 소할발파를 할 염려가 없으며 분할발파에 따른 발파 보조모선의 단선 현상을 방지할 수 있어 전체적인 작업시간 17.5시간/교대(보강, 버럭처리등 포함)중 16.0시간/교대로 1.5시간을 단축할 수 있었다.

재래식 발파는 심베기공의 제발효과를 증대시키기 위하여 동일시차로 폭발시켜 발파효과를 증대시킬 수 있지만, 다단식 발파기에 의한 경우는 심베기 발파시 지발 효과를 이용하기 때문에 재래식 발파에 비하여

Table 4. Comparison of blast conditions and measurement results

Items		Traditional Blasting	Sequential Blasting	
V-cut Type		Perpendicular V-cut with Arrangement of 3 row, 2 column	Perpendicular V-cut with Arrangement of 3 row, 2 column, Addition of 3 Holes with Non-Charge	
Blasting Conditions	Charge per Delay (kg)	0.25-0.75	0.25-0.625	
	Total No. of Holes	115	152	
	Total Charge (kg)	30.399	32.775	
	Detonator	MS # 1-20	MS # 2-20	
Measurement Results	Distance (m)	20.3-33.0	21.1-42.0	
	P.P.V (cm/sec)	0.112-0.82	0.064-0.611	
	over 0.5 cm/sce	8/45	5/89	
	Square	K	56.26	33.81
	Root	n	-1.400	-1.316
	Cube	K	136.94	93.59
	Root	n	-1.710	-1.665

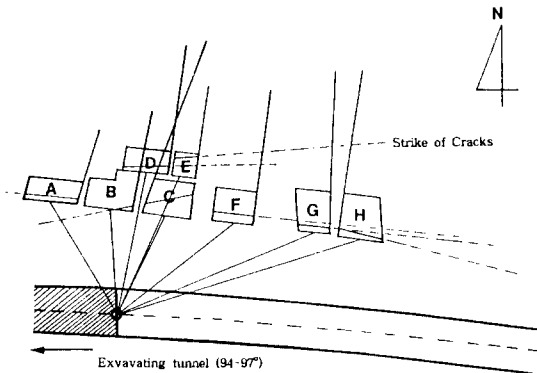


Fig. 9. the plan view of gauge points on concrete wall

초기진동을 감소시킬 수 있다. 그러나 심빼기 효과를 최대한 증대시키기 위하여 심빼기 중앙부에 무장약 공을 삽입하여 발파작업을 수행하였다.

한편 경제적인 면에서도 전 막장을 MS 뇌관을 사용하여 발파하는 재래식 발파보다 다단식 발파기에 의하면 값이 싼 DS 뇌관을 사용하더라도 충분한 시차를 줄 수 있기 때문에 MS 뇌관 사용시와 거의 동일한 파쇄효과를 나타낼 수 있으며, 뇌관의 구입시 약 29% 정도 원가절감이 가능하다.

## 5. 건물내 균열상태의 관찰

터널 주변 가옥 및 빌딩의 기존 균열이 발파진동으로 인하여 확대되는 경우 민원의 요인이 된다. 예기치 못한 사유로 진동치가 허용기준치를 상회할 것을 가정하여 균열 게이지로 균열의 변위량을 측정하여 안전성 판단자료 및 발파진동으로 인한 인접구조물에 미치는 영향을 조사하였다. 세라믹 기준점(reference point)을 총 8개소에 설치하여 측정하였는데, Fig. 9는 본 지역에서의 측정 위치도를 나타내고 있다. 또한 디지털 균열 측정기(digital crack meter)로 측정된 결과를 도시하면 Fig. 10과 같다.

본 디지털 균열 측정기의 구성은 150 mm 범위의 디지털 마이크로 메타(digital micro meter)와 세개의 로드 그리고, 기준점으로 구성되어 있으며, 허용오차는 0.01 mm이다. 설치방법은 설치하고자 하는 균열의 양단면을 요철 및 습기가 없도록 준비한 다음 균열의 양단면에 접착제를 이용하여 기준점을 부착시키고 초기치를 계측한다. 다음에 2~3일 간격으로 지속적으로 계측을 하였으며, 매회 5회 이상 측정하여 그 평균치를 대표값으로 하였다.

4분할 재래식 발파에 의한 계측결과는 3월 31일까지이고 그 이후의 계측결과는 6개의 보조모선을 사용한 다단식 발파의 경우이다.

Fig. 10에 나타난 바와 같이 측정점 A의 경우 3월 14일 측정 초기값은 57.56 mm였고, 4분할 재래식 발파로

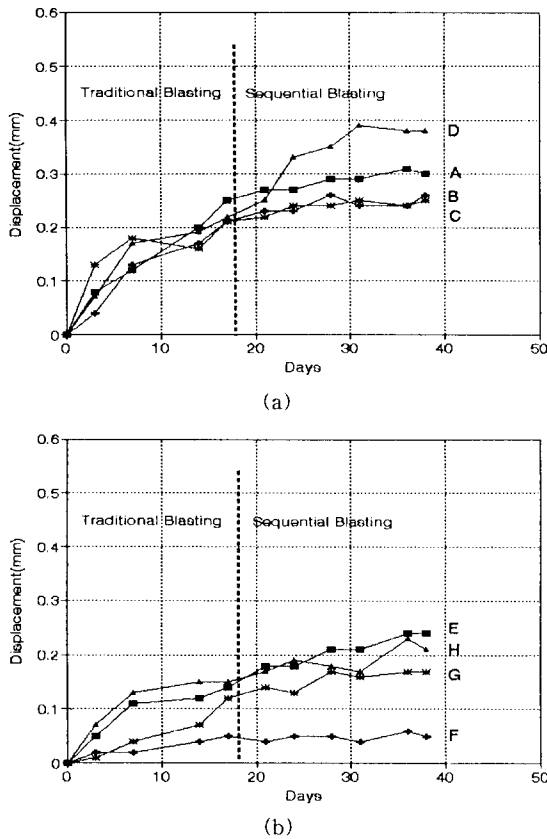


Fig. 10. Fitting of displacement measured using crack meter

다소 발파진동 허용 기준치를 초과하였지만 3월 31일까지의 측정치는 57.81 mm로 그 변위는 0.25 mm로 나타났다. 그리고 그 이후 다단식 발파로 시행하여 4월 21일 57.87 mm로 그 동안의 변위가 0.31 mm이다.

그리고, 측정점 B의 경우는 변위가 전체적으로 0.26 mm였고, 측정점 C는 0.25 mm, 측정점 D는 0.39 mm, 측정점 E는 0.24 mm, 측정점 F는 0.06 mm, 측정점 G는 0.17 mm 및 측정점 H는 0.23 mm의 변위를 각각 나타내고 있다.

국내의 건축물이나 시설물에 대하여 발파로 인한 균열의 허용기준치는 아직까지 없는 실정이다. 따라서 여기서는 건축기술정보지에 보고된 일본 콘크리트 공학협회의 제안치를 인용하기로 한다.<sup>10)</sup>

협회가 제시한 균열의 허용기준치와 적용 사례와의 관계가 명확히 설명되어 있지 않아 판단하기는 어려우나 대체로 균열폭이 0.4 mm 이상을 초과하는 경우

내구성면에서는 보수가 필요한 것으로 추정된다.

그러나 금번 측정 지점 8개소중 6개소에서의 균열 폭은 0.06~0.26 mm인데 비하여, 2개소 즉 측정점 A와 측정점 D에서의 값은 다소 큰 편으로 각각 0.31 mm, 0.39 mm를 나타내고 있는데 이는 보수 기준에 근접한 값을 보이고 있다.

또한 인접지역에서 본 연구와 별도로 계측한 사례에 의하면 지하수위 하강에 따른 지표침하가 관측되고 있는 점에 비추어 발파진동의 영향은 무시할 수 있을 정도로 미소한 것으로 추정된다.

## 6. 결 론

국내에서는 지발전기뇌관의 지연 시차가 적기 때문에 장약공수가 많을 경우 발파진동을 감소시키기 위하여 분할발파(分割發破)를 실시하고 있다.

본 연구에서는 분할발파 실시에 따른 문제점을 해결하기 위하여 다단식 발파기에 의한 전단면 발파법의 터널굴착에 적용성과 진동감소 효과를 확인하고자 하였다.

이를 위하여 부산 지하철 현장에서 재래식 분할발파와 다단식 발파기에 의한 전단면 발파를 총 135회 실시하고 그 결과를 비교, 분석하였다.

1. 재래식 패턴과 다단식 시스템 패턴을 시행한 결과 그중 다단식의 6개 보조모선을 연결한 것이 작업 공정면에서 1시간 30분(1교대 16시간중)의 감소를 보였다.

2. MS 뇌관을 사용하는 재래식 발파 및 DS 뇌관으로 기록시키는 6개의 보조모선을 연결한 다단식 발파에서 발파진동식  $V=K(D/W^b)^{-n}$  식으로 표시하여,  $b=1/3$  즉 입방근 환산거리로 해석한 결과 발파진동 환산식은 다음과 같다.

$$\text{재래식 발파} : V = 136.94 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.710} \quad r=0.75$$

$$\text{다단식 발파} : V = 93.59 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.655} \quad r=0.76$$

3. 회귀분석을 통한 발파진동 환산식으로부터 삼승근 환산거리로 하였을 때 환산거리가 최저 27.7에서 최고 60.25 m/kg<sup>1/3</sup>로 변할 때 각각 18.05% 및 14.38%의 진동감소 효과를 나타내어 진동 제어면에서

우수한 패턴으로 여겨진다.

4. 균열 개이지를 부착하여 변위를 측정할 결과 측정점 8개소 중 6개소는 0.30 mm 미만이고 2개소에 서의 최대변위는 0.31 및 0.39 mm이지만 보수기준치 0.4 mm보다는 적은 값이다.

인근지역의 측정사례를 참조해 보면 균열성장의 주요인은 발파진동의 영향이기보다는 건물의 노후 및 터널 굴진에 따른 지하수위의 하강으로 인한 부등침하에 기인하는 것으로 추정된다.

외국의 노천발파에서 주로 사용하는 다단식 발파기를 이용하면 제한된 지발전기뇌관을 이용하더라도 지연시차 조절을 통해 터널 전단면을 1회에 기록시킬 수 있음은 물론 진동의 감소, 조업공정의 부분적인 개선을 할 수 있다. 따라서 논넬(Nonel)과 같은 비전기식 뇌관의 기능을 부여하면서도 결선의 단락여부도 확인할 수 있는 효과적인 방법이라 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 1) Devine, J.R., 1966, Avoiding damage to residences from blasting vibrations, highway research record 135, highway research board, National Research Council, National Academy of Sciences, pp. 35-42.
- 2) Clark, D., B. Larsson, and G. Lande., 1983, Vibration; It's effect and measurement techniques at or near dwellings, Proc. of the 9th Symp. on Explosives and Blasting, Dallas, Texas.
- 3) Vazquez, J.R., et al, 1986, Progress in studying low frequency vibration waves caused by blasting, Proc. of the 2nd Mini-Symp. on Explosives and Blasting Research. Atlanta, Geogia. pp. 72-80.
- 4) 류창하, 이정인, 1979, 발파작업에 의한 지반진동이 지상구조물에 미치는 영향에 관한 연구, 대한광산학회지, 16, pp. 41-50.
- 5) Federal Highway Administration., 1991, Rock blasting and overbreak control, National Highway Institute Course No. 13211, pp. 229-274.
- 6) Z.T. Bieniawski., Engineering rock mass classifications, Publication by John Wiley & Sons, 1989.
- 7) Ghosh. A., and J.J.K. Daemen., 1986, Best source modelling of blast vibration; Cube-root scaling, square-root scaling or site specific, Intn'l Symp. on Environmental Geo technology. Lehigh Univ. 580.
- 8) Huh Ginn, Lee Kyoung-Won and Lim han-Uk, 1987, A determination of vibration equation by empirical method, Proc. 6th Intn'l Cong. on Rock mechanics, Montreal Canada, pp. 629-632.
- 9) 임한욱, 김재동, 1992, 발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구, 한국자원공학회지, 29, pp. 146-157.
- 10) 철근콘크리트의 허용 균열폭. 건축기술정보(일본건축기술정보 판권 제휴), 1994. Mar. 3, pp. 35-36.
- 11) Holmberg, R and P.A. Persson, 1979, Design of tunnel perimeter blasthole patterns to prevent rock damage, Tunnelling '79. Proc. 2nd Int. Symp.