

# 허용진동속도를 만족하는 발파이격거리 산정 - 이론식 & 수치 해석적 접근

## Estimation of the Blasting Distance Satisfying Allowable Peak Particle Velocity - Analytical & Numerical Analysis Approach

전 상 수\* / 장 양 원\*\* / 정 두 회\*\*\*

Jeon, Sang-Soo / Jang, Yang-Won / Jung, Du-Hwoe

### Abstract

The blasting load induced by the explosion of the powder generation the vibration of the ground and affects on nearby ground and underground structures. The structures are possibly damaged and it may create the social problems such as noneconomic construction due to the delay of the construction period especially in urban areas. Therefore, the stability of the nearby structures need to be evaluated. In this study, the stability of the tunnel is estimated and examined by the analytical solution and by using FLAC<sup>2D</sup> which is one of the programs based on the finite difference analysis.

**key words** : Tunnel, Blasting Load, Peak Particle Velocity, Numerical Analysis

### 요 지

발파를 통한 지반굴착 시 화약의 폭발로 인해 발생하는 지반의 진동은 인근 지상구조물과 지하매설물에 영향을 미치게 된다. 이러한 영향은 구조물에 피해를 발생시킬 뿐만 아니라 도심지 공사의 경우 민원에 의한 문제로 많은 경제적, 시간적 피해를 야기하므로 이에 대한 사전 영향성 평가가 필요하다. 본 연구에서는 터널상부에 재개발을 통한 주거시설 건립을 위해 부지조성을 목적으로 한 발파작업 시 터널의 안정성을 이론식과 유한차분해석 프로그램인 FLAC<sup>2D</sup>를 이용하여 검토하였다.

**핵심용어** : 터널, 발파하중, 최대진동속도, 수치해석

### 1. 서 론

암반지반의 굴착공사 시 주로 이용되는 발파로 인해 발생하는 지반의 진동은 탄성파의 형태로 전파되어 지반의 진동을 발생하고 인근 구조물에 영향을 미치게 된다. 이러한 발파의 진동 영향을 평가하는 방법으로는 주로 시험발파에 의한 진동측정과 여러 학자

및 기관에서 제시한 발파진동 추정식을 이용한 진동속도 산정, 그리고 수치해석을 이용한 사전 발파진동 영향성 평가가 이루어졌다. 시험발파의 경우 가장 정확한 추정방법이지만 비용이 많이 들며, 기존에 제시된 이론식에 의한 발파진동의 추정은 암반 내 불연속면과 지질학적 구조, 암반의 강도 등의 공학적인 지질 특성을 정확히 반영하기가 어려운 단점이 있었다. 하지만 최근 들어 컴퓨터의 급속한 발달과 여러 수치해

\* 정회원 · 인제대학교 공과대학 토목공학과 전임강사 (e-mail: ssj@inje.ac.kr)

\*\* 인제대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

\*\*\* 부경대학교 공과대학 건설공학부 부교수

석 프로그램의 개발로 수치해석을 이용하여 발파현상 해석하고, 그 결과를 추정하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구 대상의 경우 산악 고지대의 노후화된 주거지를 대상으로 토지이용의 효율성을 높이고 주거환경 개선을 위한 주택 재개발사업을 추진하려고 하나, 개발지역 하부에 터널이 통과하고 있어 발파를 통한 부지조성 시 발파진동에 의한 터널의 안정성 평가가 선행되어야 한다. 본 연구에서는 이론식과 수치해석 프로그램을 사용하여 허용진동속도를 초과하지 않는 발파이격거리를 산정하여 재개발 시 터널의 안정성을 확보하는 것은 목적으로 한다.

## 2. 발파진동

### 2.1 발파진동의 특성

발파를 통한 굴착에서는 화약의 폭발 시 발생하는 충격압과 가스압을 이용하여 굴착단면의 암석을 제거하게 된다. 발파란 연소에 의해 순간적으로 분해되고 많은 양의 열과 가스를 방출하는 화약을 사용하여 바위 따위를 파헤쳐 깨뜨리는 것을 말한다. 폭약이 장약공 내에서 폭발하면 초기 충격 폭압(또는 충격압), 화약의 연소에 의한 지연 폭발 가스압, 그리고 3,000℃ 이상의 고온이 발생한다. 폭원으로부터 3 차원으로 전파되어온 충격압에 의한 충격파는 거리에 따라 현저히 감쇠되어 발파에 의한 에너지의 0.5 ~ 20 %가 탄성파의 형태로 암반 중으로 전파되어 가면서 지반의 진동을 발생시키는데 이를 발파진동(blast vibration)이라 한다. 발파진동은 진폭과 주기를 갖는 진동이며 발파진동의 크기는 진동을 전달하는 매질, 즉 암반의 변위(particle displacement, 또는 진동입자변위), 진동속도(particle velocity, 또는 진동변위속도, 진동입자속도), 진동가속도(particle acceleration, 진동변위 가속도, 진동입자가속도)로 표시할 수 있다. 진동의 형태를 일정주기의 단순조화진동(simple harmonic motion)으로 가정할 경우 진동변위, 속도 및 가속도 사이에는 다음 식 (1) 및 식 (2)와 같은 관계가 성립한다(Bollinger, 1980).

$$u = U \sin(\omega t + \theta_1) \quad (1)$$

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

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

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

여기서,  $u$  : 진동변위  
 $v$  : 진동속도  
 $a$  : 진동가속도  
 $f$  : 진동주파수  
 $T$  : 진동주기  
 $\omega$  : 진동수와 관련된 각속도  
 $\theta$  : 위상차

지반진동의 피해 여부와 관련된 상황에서는 대부분 최대치가 중요하므로,  $u_{\max} = U$ ,  $v_{\max} = V$ ,  $a_{\max} = A$ 라 하면 진동변위, 진동속도, 진동가속도의 최대치는 식 (3)과 같은 관계가 성립한다.

$$U = \frac{V}{2\pi f} : V = \frac{A}{2\pi f} = \lambda f \quad (3)$$

한편 진동의 전파특성을 이론적으로 파악하려는 연구가 계속되어 왔으나, 지반 내의 불연속면과 지질적 구조의 복잡성으로 인하여 진동전파에 관한 이론적인 접근에는 많은 어려움이 뒤따르게 되며, 같은 암반에서도 현장의 발파조건 등에 따라 전파특성이 달라지므로 경험적인 연구가 중요하다. 발파현상에 관련된 변수의 차원해석을 근거로 하여, 많은 발파진동의 측정 경험을 토대로 지상 구조물의 피해의 척도가 되는 지반의 진동속도를 지발당 최대 장약량과 폭원으로부터의 거리를 매개변수로 하여 경험적 관계식이 제시되었다. 지반의 진동속도는 지발당 장약량과 발파원으로부터의 거리를 주요 변수로 하여 식 (4)와 같은 형태로 표시할 수 있다. 일본에서는 입지특성환산식이라 하여 식 (5)와 같은 형태로 많이 표시하지만 진동속도를 발파원으로부터의 거리와 지발당 장약량의 함수로 표시한 것은 역시 마찬가지이다.

$$PPV = K \left(\frac{R}{W^b}\right)^n \quad (4)$$

$$PPV = KR^n W^m \quad (5)$$

여기서,  $PPV$  : Peak Particle Velocity(지반의 최대진동속도, cm/sec)

$R$  : 발파원으로부터의 거리(m)

$W$  : 지발당 장약량(kg)

$K, m, n$  : 상수

$b$  : 1/2 또는 1/3

식 (4)에서 거리와 지발당 장약량의 비  $R/W^b$ 를 환산거리(scaled distance, SD)라 하며,  $b=1/2$  이면 자승근 환산거리,  $b=1/3$ 이면 삼승근 환산거리라 한다. 이는 각각 거리를 장약량의 자승 및 삼승의 비율로 환산한 형태이다.

자승근 환산거리는 장약이 긴 막대기 형태로 분포한 것으로 본 것이며 삼승근 환산거리는 전과경로 위의 한 점에서 보는 장약 형태를 구형으로 가정한 경우이므로 둘 다 모두 사용되고 있다. 식 (5)는 환산거리가 대단히 작은 경우, 즉 근접 발파에서 유용한 것으로 알려져 있다. 자승근과 삼승근 환산 관계의 실질적인 차이점은 6 ~ 30 m 범위의 거리에서는 큰 차이가 없으나 30 m 이상의 거리에서는 자승근 환산거리를 사용하면 삼승근 환산거리를 사용할 때 보다 지발당 장약량이 훨씬 작게 결정되어 안전율이 높게 나타나며, 6 m 이하의 가까운 거리에서는 삼승근 환산거리를 사용할 때 안전율이 더 높다. 일반적으로 짧은 거리에서는 삼승근이, 먼 거리에서는 자승근이 더욱 잘 맞는 것으로 알려져 있다(한국토지공사, 1993).

## 2.2 발파진동 허용기준

### 2.2.1 국외 기준

표 1은 국외의 발파진동에 대한 피해 기준을 나타내었다. 건물에 대한 진동 허용기준은 1.0 ~ 5.0 cm/sec 정도를 기준으로 하며, 인체감응 등을 고려한 허용기준은 0.5 cm/sec를 기준으로 하는 추세이다.

### 2.2.2 국내 기준

표 2와 표 3은 건설교통부와 서울 및 부산 지하철에서 제시한 발파진동 허용기준이다. 국내 지하철 현장의 경우 도심지 공사의 특성상 노선주변에 구조적으로 취약한 주택들이 많고, 민원발생이 증가하고 있어 이를 해소하기 위하여 현재는 0.3 ~ 0.5 cm/sec 이하로 기준하여 발파진동 허용기준치를 하향 적용하고 있다. 외국의 발파진동 허용기준과 국내의 발파진동 허용기준을 비교해 볼 때 국내 기준치는 외국에 비해 엄격하게 설정되어 있음을 볼 수 있다. 본 연구에서는 건물에 대한 허용진동기준 최소값인 1 cm/sec를 적용하였다.

표 1. 국외 발파진동 허용치(건설교통부, 2002)

국가명	적용기준	진동규제치	비고
영국	인구 조밀 지역의 터널발파	1.0 cm/sec	
	인구 드문 지역의 터널발파	2.5 cm/sec	
	주파수 12 Hz 이하의 노천발파	1.2 cm/sec	
	기타	0.5 cm/sec	
미국	40Hz 이상 주파수를 갖는 진동	5.0 cm/sec	
	15Hz 이상 주파수를 갖는 진동	1.0 cm/sec	
	1Hz 이하 주파수를 갖는 진동	0.5 cm/sec	
오스트리아	15Hz 이상 주파수를 갖는 진동	1.9 cm/sec	
	15Hz 이하 주파수를 갖는 진동	0.02 cm	
일본	피해가 발생하지 않음	0.2 cm/sec	진동변위 (1976년 공시)
	진동을 감지할 수 있으나, 구조물 피해는 발생하지 않음	0.2~0.5 cm/sec	
	구조물에 특별히 약한 부분에 한해서 미세한 피해가 발생	0.5~1.0 cm/sec	
스위스	10 ~ 60 Hz에서 역사적 유물 또는 민감한 구조물	0.762 cm/sec	
	60 ~ 90 Hz에서 역사적 유물 또는 민감한 구조물	0.27 cm/sec	

표 2. 터널 표준시방서 발파진동 허용치(건설교통부, 1999)

구 분	진동 예민 구조물	조적식 벽체와 목재 천장을 가진 구조물	지하 기초와 콘크리트 슬래브를 갖는 조적식 건물	철근 콘크리트 골조 및 슬래브를 갖는 중·소형 건축물	철근 콘크리트, 철근 골조 및 슬래브를 갖는 대형 건축물
	문화재 등	채래 가옥, 저층 일반 가옥 등	저층 양옥, 연립주택 등	중·저층 아파트, 중·소 상가 및 공장	내진 구조물, 고층 아파트, 대형 건물 등
허용진동치 (cm/sec)	0.3	1.0	2.0	3.0	5.0

**표 3. 서울 및 부산지하철의 발파진동 허용치 (건설교통부, 2002)**

건물등급	I	II	III	IV
건물의 종류	문화재	주택, 아파트 (실금이 있는 정도)	상가 (균열이 없는 정도)	철근 콘크리트 빌딩 및 공장
건물기초에서의 허용진동속도 (cm/sec)	0.2	0.5	1.0	1.0~4.0

### 2.3 발파진동속도 산정

이론식에 의한 발파진동속도 산정으로 가장 널리 사용되는 미 광무국(USBM)에서 제시한 발파진동식을 사용하여 허용진동속도 1 cm/sec에 대하여 장약량 0.75 kg과 1.0 kg에 대하여 검토하였다.

$$PPV = 160 \left( \frac{D}{W} \right)^{-1.6} \quad (6)$$

검토결과 장약량 0.75 kg과 1.0 kg에서 허용진동속도에 대해 안전한 이격거리는 각각 20.7 m와 23.9 m 이상으로 나타났고, 그림 1에 장약량과 이격거리에 따른 발파진동속도의 변화를 나타내었다.



**그림 1. 발파진동속도변화**

### 2.4 발파하중 산정

발파하중은 이론식과 국내에서 사용되는 에멀전계 폭약의 폭굉압력 중 큰 값을 사용하여 압력으로 산정하였다. 에멀전계의 폭약 제원은 표 4와 같고 화약비중은 평균값인 1.2 g/cm<sup>3</sup>과 평균 폭발속도 5,500 m/sec를 이용하여 발파하중을 식 (7)로 구하면, 발파하중은 96,400 kg/cm<sup>2</sup>으로 일반 에멀전계 폭약의 폭굉압력의 최대 값인 85,000 kg/cm<sup>2</sup> 보다 큰 값이 계산된다.

**표 4. 에멀전계 폭약 제원(정형식, 2004)**

폭발속도 (m/sec)	4,500 ~ 5,500
가 비 중 (g/cm <sup>3</sup> )	1.1 ~ 1.3
폭 발 열 (J/kg)	3487
가 스 량 (l/kg)	810 ~ 890
내 한 성 (°C)	-20
내 수 성	최 우 수

$$P_D = 0.000424 V_e^2 \rho_e (1 - 0.543 \rho_e + 0.193 \rho_e^2) \quad (7)$$

여기서,  $P_D$  : 화약 발파하중(kg/cm<sup>2</sup>)  
 $V_e$  : 화약 평균폭발속도(cm/sec)  
 $\rho_e$  : 화약 평균비중(g/cm<sup>3</sup>)

표 5에 국내에서 사용되는 화약의 특성을 나타내었다. 에멀전계 폭약의 최대 직경은 38 mm이고 국내에서 발파 시 천공경을 대부분 45 mm로 시공하므로 이론식으로 계산된 폭굉압력에서 Decoupling 고려 시 공벽 면에 가해지는 압력을 이용하여 발파공 벽면에 작용하는 발파하중(등가환산 발파하중)을 산정하고 이 값을 Starfield(1968)가 제안한 시간이력함수로 변환하여 유한차분모델의 발파하중 입력 값으로 사용한다.

$$P_A = \frac{2\rho_a C_a}{\rho_a C_a + \rho_e V_e} \times P_D \quad (8)$$

여기서,  $P_A$  : 전색 시 발파하중(kg/cm<sup>2</sup>)  
 $\rho_a$  : 전색밀도(모래 = 1.7 g/cm<sup>3</sup>)  
 $C_a$  : 충격파의 전파속도(700 m/sec)

$$P_B = \left( \frac{d_e}{d_h} \right)^3 \times P_D \quad (9)$$

여기서,  $P_B$  : Decoupling 발파하중(kg/cm<sup>2</sup>)  
 $d_e$  : 화약의 직경(mm)  
 $d_h$  : 천공경(mm)

$$P' = P_B \times W \times 2\pi \times \frac{\text{천공경}}{\text{발파공 주변길이}} \quad (10)$$

여기서,  $P'$  : 등가환산 발파하중(kg/cm<sup>2</sup>)  
 $W$  : 지발당 장약량(kg)

$$P(t) = 4 \times P' \times \left\{ \text{Exp}\left(\frac{-Bt}{\sqrt{2}}\right) - \text{Exp}(-\sqrt{2}Bt) \right\} \quad (11)$$

여기서,  $P(t)$  : 모델입력 하중 값  
 $B$  : 하중계수 (=16,338)  
 $t$  : 하중지속시간 (=0.2 sec)

표 5. 국내터널에 사용되는 화약의 특성 (정형식, 2004)

사용 화약	장전조건	가비중	폭굉 속도	화약 직경	비열비
AN FO	Bulk Charge	0.9 g/cm <sup>3</sup>	3,000 m/sec	45 mm	2.44
Emul-sion	Catridge, Paper	1.1 g/cm <sup>3</sup>	4,000 m/sec	25,29,32,38 mm	2.56
Dyna-mite	Catridge, Paper	1.4 g/cm <sup>3</sup>	5,000 m/sec	25,29,32,38 mm	2.74

식 (8)과 식 (9)에 의해 장약량 0.75 kg의 전색과 Decoupling 시의 발파하중을 구하면 각각 29,452 kg/cm<sup>2</sup>와 58,048 kg/cm<sup>2</sup>이고, 이 값을 이용하여 등가환산 발파하중을 계산하면 식 (10)에서 P'는 1,629 kg/cm<sup>2</sup>와 3,212 kg/cm<sup>2</sup>가 계산되고 동일한 방법으로 장약량 1.0 kg에 대해 전색과 Decoupling 시의 등가환산 발파하중 P'를 계산하면 각각 2,173 kg/cm<sup>2</sup>와 4,282 kg/cm<sup>2</sup>가 산정된다. 이 값을 식 (11)을 이용하여 시간에 따른 발파이력을 계산할 수 있다.

### 3. 해석 조건

#### 3.1 지반조건

지반물성은 그림 2에 나타난 시추주상도를 바탕으로 기존 문헌에 제시된 값을 이용하였다. 이러한 자료를 이용하여 표 6에 나타나있는 지반물성을 수치해석 시에 사용하였다.

표 6. 지반물성

	단위 중량 (t/m <sup>3</sup> )	점착력 (t/m <sup>2</sup> )	내부 마찰각 (°)	탄성 계수 (t/m <sup>2</sup> )	전단탄성 계수 (t/m <sup>2</sup> )	포아송비
매립토	1.7	0.0	25	1,000	357	0.4
풍화토	2.0	1.0	30	6,000	2,222	0.35
풍화암	2.2	3.0	35	14,000	5,385	0.3
연암	2.5	6.0	40	25,000	10,000	0.25

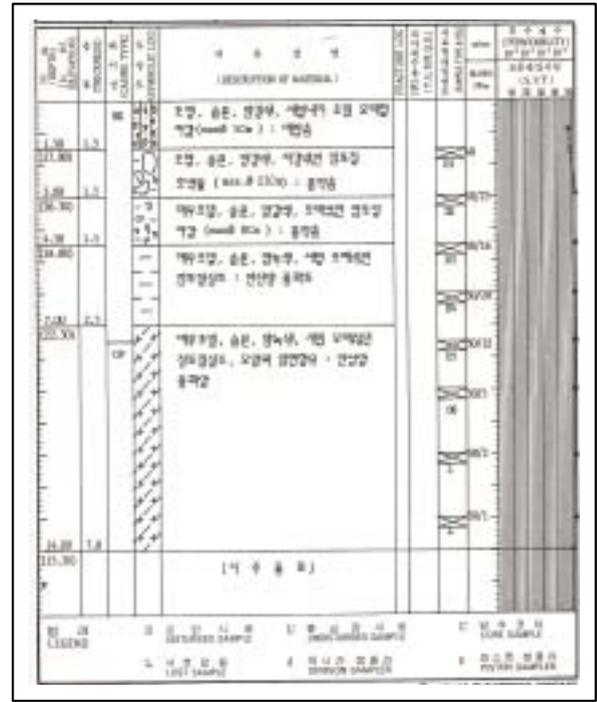
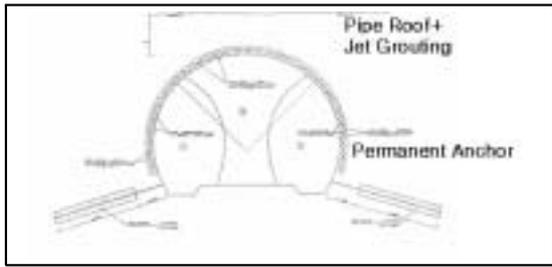


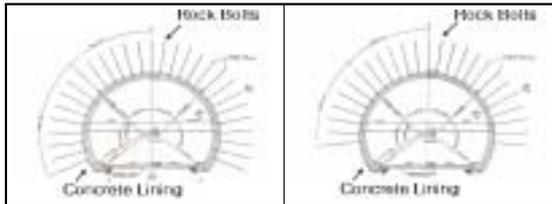
그림 2. 터널 시추주상도

터널 시점부를 STA. 0 K + 0 m라 하면 STA. 0 K + 90 m의 특수 지보패턴 구간을 제외한 검토 구간은 발파진동 해석 시 연암 물성에 의해 지배된다. 부지조성 구역이 터널 구간 STA. 0 K + 95 m부터 0 K + 480 m 영역이 되므로 이 구간을 포함하는 STA. 0 K + 90 m 부터 STA. 0 K + 500 m로 검토구간을 결정하였다. 그림 3에서는 터널 시공 시 사용된 지보패턴의 종류를 나타낸다. 특수구간은 길이 13 m, 직경 0.5 m의 Pipe Roof와 Jet Grouting의 구조 복합체로 터널 상부가 보강되어 있으며, 터널 좌·우의 하단에 길이 8 m의 영구 앵커가 터널진행방향으로 2 m 간격으로 시공되어있다. 지보패턴 I은 길이 3 m, 직경 0.25 m의 록볼트와 H 형강 (H-100×100×6×8)의 아치형 강지보공이 터널진행방향으로 1 m 간격으로 교차 시공되어 있다. 지보패턴 II의 경우 록볼트와 강지보공이 1.2 m 간격으로 교차 시공되었고, 지보패턴 III과 IV의 경우 록볼트의 간격은 각각 1.5 m와 2.0 m로 교차 시공되었으며, 강지보공은 시공되지 않았다. 지보패턴이 I에서 IV로 변함에 따라 시공되어진 록볼트의 수가 감소되었다. 콘크리트 라이닝은 두께 0.3m로 전 구간에 걸쳐 시공되어있다.

특수구간의 경우 터널 상부가 풍화토와 매립토로 이루어져 백호우(back hoe) 굴착이 가능하여 발파진동해석을 수행 할 필요가 없어 해석구간에서 제외되었다.

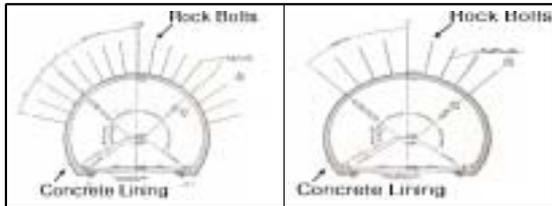


(a) 특수패턴(Pipe Roof + Jet Grouting)



(b) 지보패턴 I

(c) 지보패턴 II



(d) 지보패턴 III

(e) 지보패턴 IV

그림 3. 터널 시공 시 지보패턴 종류

### 3.2 수치해석 조건

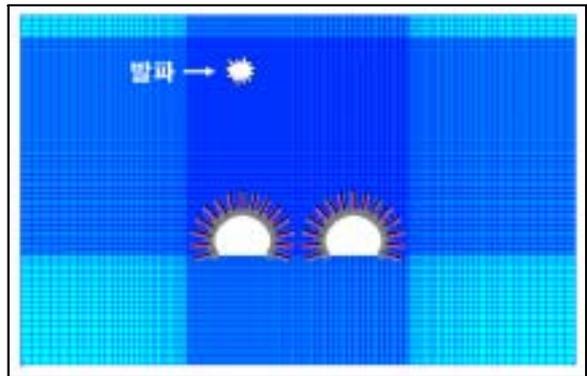
수치해석은 지보재의 패턴 변화에 따라 총 4구간으로 구분하였고, 각 구간마다 장약량 0.75 kg과 1.0 kg에 대하여 발파이격거리를 증가시켜가며 표 7과 같이 구간에 따라 모델링하여 각 구간의 이격거리별 발파진동속도를 측정하였다. 그림 4는 구간 I에 적용된 수치해석 모델도이다. 수치해석은 유한차분해석 프로그램인 FLAC<sup>2D</sup>를 이용하였고, 해석모델로는 탄성모델을 적용하였다. 구간 I의 경우 54,387 zone, 구간 II의 경우 64,017 zone, 구간 III의 경우 68,697 zone, 구간 IV의 경우 71,817 zone으로 구성되었으며 지반의 폭은 100 m로 하였다. 경계조건은 좌를 흡수하는 경계조건인 quiet boundary를 적용하였다.

폭발 진원지에서 터널까지는 격자 간격 0.2 m를 유지하였으며, 그 외 영역에서는 ratio를 적용하여 격자간격을 증가시켰다.

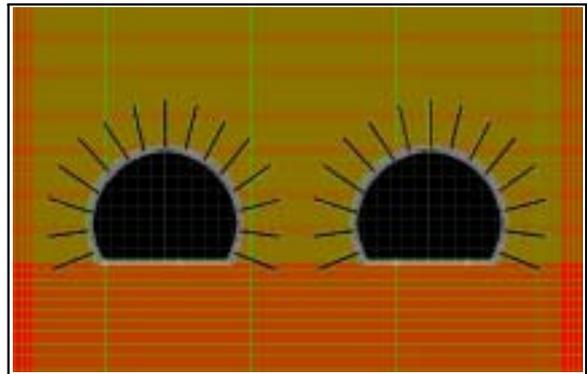
모델격자에서 A 터널은 터널의 시점 방향, B 터널은 터널의 종점 방향으로 진동속도 측정은 양방향 터널의 직상부와 좌측, 우측 그리고 직하부의 8개 지점에 대하여 측정하였고 모식도는 그림 5와 같다.

표 7. 각 구간별 터널의 기하학적 특성

속 성	구간 I	구간 II	구간 III	구간 IV
위 치	STA. 0 K+ 170 m	STA. 0 K+ 295 m	STA. 0 K+ 430 m	STA. 0 K+ 500 m
지보패턴	지보 패턴 I	지보 패턴 II	지보 패턴 I	지보 패턴 IV
기준면에서의 지표면 높이	68 m	107 m	128 m	142 m
터널 하부의 높이	24 m	26 m	29 m	31 m
모델 격자의 높이	64 m	101 m	119 m	131 m



(a) 모형격자



(b) 모형격자 확대도

그림 4. 구간 I (STA. 0 K + 170 m) 모형격자

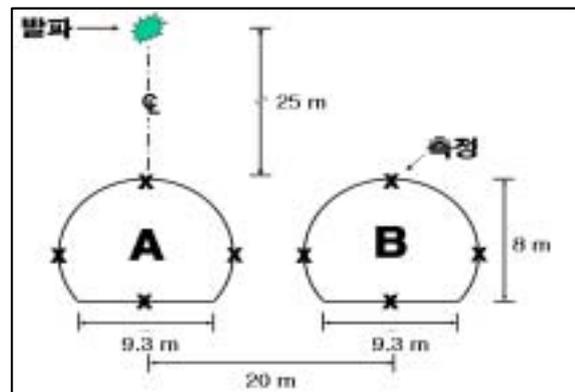


그림 5. 진동속도 측정지점 모식도

#### 4. 해석결과

이론식에 의해 산정된 발파이격거리를 기준으로 하여 발파이격거리를 증가시켜가며 허용진동속도 1 cm/sec를 만족하는 허용이격거리를 산정한 결과, 장약량 0.75 kg에서는 24 m, 장약량 1.0 kg에서는 25 m로 나타났다.

최대진동속도는 구간 I에서 발생하였으며 발파 진원지와 가장 근접한 거리인 A 터널 천단부에서 나타났다. 그림 6은 구간 I에서 장약량에 따른 진동속도 이력곡선이다. 각 측정에서 측정된 최대진동속도가 발생하는 시간은 장약량에 관계없이 동일하였다.

A 터널의 경우 천단부의 최대진동시간은 발파 후

약 0.07 초로 측정되었으며, 장약량 0.75 kg에 대해 0.84 cm/sec, 장약량 1.0 kg에 대하여 0.93 cm/sec로 나타났다. B 터널에서는 발파 진원지와 측정지점과의 거리가 증가함에 따라 천단부의 최대진동속도가 발생하는 시간이 약 0.09 초에 측정되었으며, 최대진동속도는 장약량 0.75 kg에서 0.28 cm/sec, 장약량 1.0 kg에서 0.33 cm/sec로 약 65 %가 감소하였다.

수치해석과 이론식에 의한 진동속도의 차가 발생하는 이유는 이론식이 암반의 강도, 탄성계수 등의 암반 지반의 공학적 특성을 반영하지 못하기 때문이다. 그러므로 실제 발파에 선행하여 수치해석을 이용한 사전 발파진동 영향성 평가가 필요하다. 그림 7은 구간 I에서 장약량에 따른 각 측정지점의 최대진동속도를 나타내었으며, 표 8은 진동속도 측정지점에서 산정된

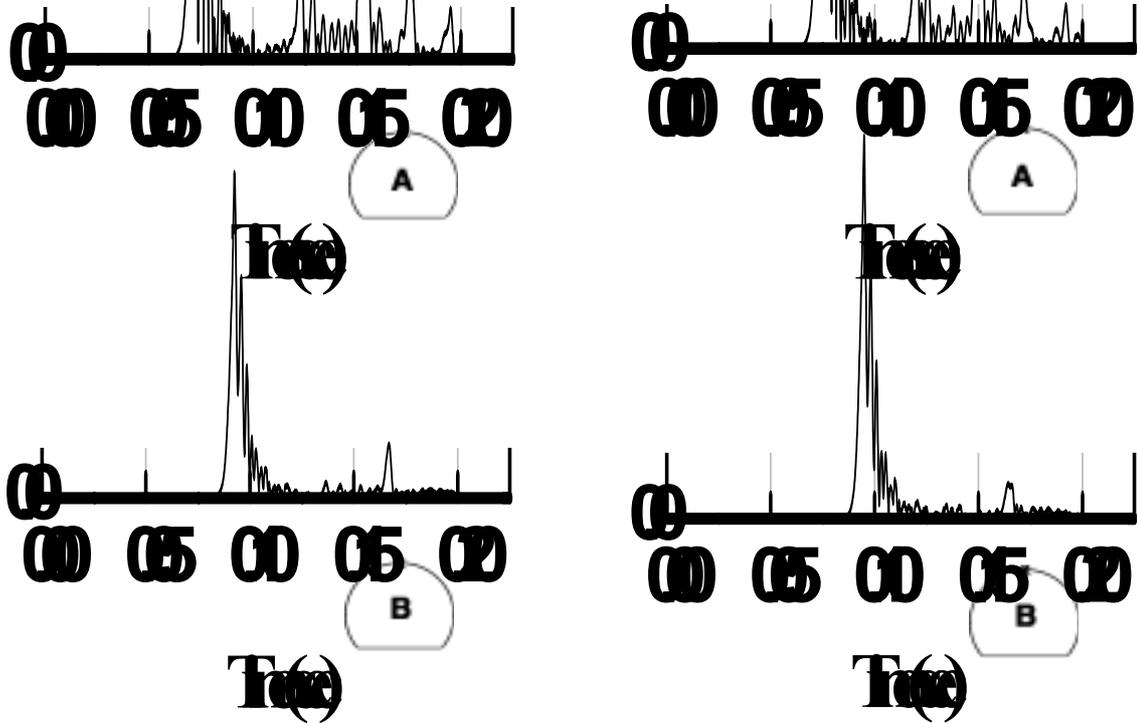


그림 6. 터널 구간 I의 천단부 진동속도

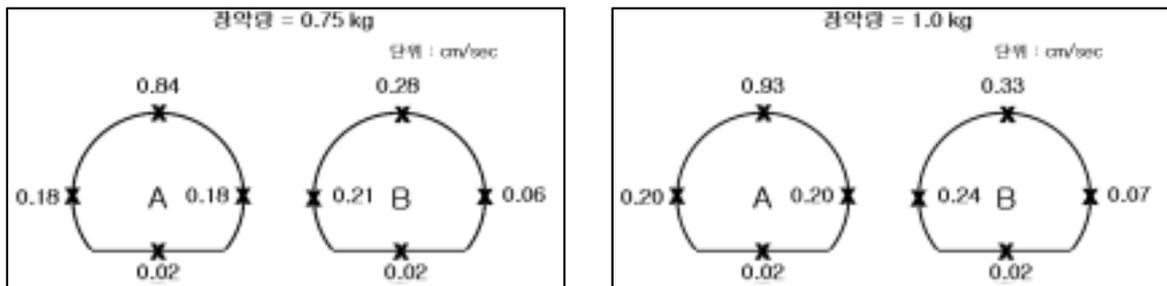


그림 7. 터널 구간 I의 진동속도

터널의 각 구간 별 최대진동속도를 나타내었다. 발파 진원지와 측정지점과의 거리가 멀수록 측정된 최대진동속도는 감소하였으며, 또한 탄성파가 터널 공동을 통과함에 따라 진동속도가 감소하였다. 구간 II, III, IV에서 터널의 심도가 깊어져 터널 천단부에서 측정된 최대진동속도는 장약량 0.75 kg에서 각각 0.74 cm/sec, 0.73 cm/sec, 0.64 cm/sec로 구간 I에 비해 약 11.9 %, 13.1 %, 23.8 %가 구간별로 감소하였다. 장약량 1.0 kg에서 각 구간의 최대진동속도는 각각 0.85 cm/sec, 0.79 cm/sec, 0.76 cm/sec로 구간 I에 비해 약 8.6 %, 15.1 %, 18.3 %가 구간별로 감소하였다.

**표 8. 터널 각 구간별 최대진동속도**

(a) 장약량 0.75 kg, 이격거리 24 m

단위 : cm/sec

구간	터널 A				터널 B			
	상	하	좌	우	상	하	좌	우
I	0.84	0.02	0.18	0.18	0.28	0.02	0.21	0.06
II	0.74	0.02	0.16	0.16	0.25	0.02	0.20	0.05
III	0.73	0.03	0.14	0.15	0.23	0.02	0.19	0.04
IV	0.64	0.03	0.14	0.14	0.24	0.02	0.19	0.04

(b) 장약량 1.0 kg, 이격거리 25 m

단위 : cm/sec

구간	터널 A				터널 B			
	상	하	좌	우	상	하	좌	우
I	0.93	0.02	0.20	0.20	0.33	0.02	0.24	0.07
II	0.85	0.02	0.18	0.18	0.31	0.02	0.23	0.06
III	0.79	0.02	0.17	0.17	0.29	0.02	0.22	0.05
IV	0.76	0.02	0.17	0.17	0.29	0.02	0.22	0.05

## 5. 결 론

본 연구에서는 기존 터널 상부의 재개발로 인한 발파 굴착 시 허용진동속도를 만족하는 발파이격거리를 기존에 제시된 이론식과 수치해석을 이용하여 산정하고 터널의 안정성을 검토하였다.

- (1) 건물 및 콘크리트 구조물에 대한 진동의 허용 기준은 1.0 ~ 5.0 cm/sec이고, 본 연구에서는 허용기준의 최소 값인 1.0 cm/sec를 터널 안정의 기준으로 검토하였다.

- (2) 건교부에서 제안한 발파진동허용속도는 구조물의 안정성 측면에서 검토가 되지 않았으므로 구조물의 안정성을 고려한 기준안이 필요하리라 판단된다.
- (3) 이론식에 의해 산정된 진동속도는 암반의 강도, 탄성계수 등의 암반지반의 공학적 특성을 정확히 반영하지 못하므로 수치해석을 이용한 허용진동속도를 산정하였다.
- (4) 장약량이 증가함에 따라 진동속도도 증가하였으며 발파 진원지와 측정지점과의 거리가 증가할수록 측정된 최대진동속도는 감소하였다.
- (5) 탄성파가 터널 공동을 통과함에 따라 진동속도는 급격히 감소하였다. 터널의 심도가 깊어질수록 터널 천단부에서 측정된 최대진동속도는 감소하였다.

## 참 고 문 헌

- 건설교통부 (1999). 터널표준시방서, 건설교통부
- 건설교통부 (2002). 발파소음 · 진동허용기준검토 (안), 건설교통부 감사관실, pp. 9-29
- 건설교통부 (2003). 암발파 설계요령, 건설교통부 감사관실, pp. 1-6
- 정형식 (2004). 토목기술자를 위한 암반역학, 새론, pp. 262-342
- 한국토지공사 (1993). 암발파 설계 기법에 관한 연구, 한국토지공사
- G.A. Bollinger (1980). *Blast Vibration Analysis*, Southern Illinois University Press, Illinois, USA
- Itasca Consulting Group, Inc. (2002). *FLAC<sup>2D</sup> Manual: Optional Features*, Itasca Consulting Group Inc., Minnesota, USA
- Starfield, A. M., and C. Fairhurst. (1968). *How High Speed Computers Advance Design of Practical Mine Pillar Systems*, Eng. & Mining J., 5, pp. 78-84.

- ◎ 논문접수일 : 2006년 12월 28일
- ◎ 심사의뢰일 : 2007년 01월 05일
- ◎ 심사완료일 : 2007년 02월 27일