

# 주거지역 터널공사에서의 발파진동 저감사례

## A Case of Blasting Vibration Reduction in the Tunnel Construction under a Residential Area

†                    \*                    \*\*

Kang, Jin Ook · Lee, Hyun Koo · Lee, Myong Choul

**Key Words** : Blasting Vibration(발파 진동), Test Blasting(시험발파), Cut(십발)

### ABSTRACT

This paper presents a case study on blasting vibration reduction in NATM(New Australian Tunnelling Method) tunnel construction carried out under a congested residential area. In NATM tunnel constructions, blasting is an essential process, thus vibration phenomenon is inevitable. Therefore, the vibration reduction was tried to avoid expected complaints from the public living in the area. Test blastings were performed to get the constants for an estimation formula of vibration velocity. Then the influence area was approximated using the estimation formula, and construction methods for the vibration reduction were sought based on the results.

### 1.

가옥밀집 지역 터널공사에서는 지반침하 및 발파진동에 의한 건물 균열 또는 파손의 피해가 흔히 발생될 수 있으며 특히, 도자기류와 같은 골동품을 소장하고 있는 박물관 건물은 진동에 대단히 민감하기 때문에 발파작업시 특별한 주의가 필요하다. 중앙선 덕소~원주간 복선전철 3공구 건설공사중 팔당터널(L=4,470m) 노선상 시점에서 330m 지점(Sta.24K60)에 개인 박물관이 터널 상단으로부터 17m 직상부에 위치하고 인근에 건물들이 산재해 있어 굴착 발파로 인한 골동품 파손 및 민원제기가 예상되었다. 따라서 시험발파를 실시하여 진동을 최소화할 수 있는 발파패턴을 설계하고, 선대구경 및 선진도갱 공법을 적용하여 대단면 십발을 형성함으로써 십발발파에서 발생하는 진동을 최소화하고 굴착경계면에 Line Drilling을 적용하여 확대발파에서 발생하는 진동을 감쇄시켰다.

### 2.

- 공사명 : 중앙선(덕소~원주간) 복선 전철 제3공구 건설공사
- 공사위치 : 경기도 남양주시 와부읍 도곡리 ~ 양평군 양서면 양수리
- 공사내용
  - 총연장: L=12.815km                    ▪ 토 공: L= 5.004km
  - 교 량: L= 2.470km/8개소
  - 터 널: L= 5.341km/5개소(NATM 4,839m, 개착 502m)
  - 정거장: 3개소(도곡, 팔당, 능내)
- 팔당터널
  - 총연장: L=4,470km (NATM 4,410m, 개착 60m), 복선 철도터널



그림 1. 중앙선 3공구 노선도

†                    :                    ( )  
 E-mail : jin.kang@samsung.com  
 Tel : (02) 2145-6037, Fax : (02) 2145-6050

\*                    ( )

\*\*                    ( )

□ 지질조건 : 본 지역의 지질은 지질조사보고서에 의하면 선캠브리아기 호상 흑운모 편마암과 화강암이 주로 기반암을 이루고 있다.

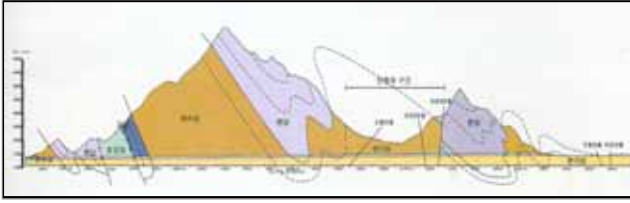


그림 2. 팔당터널 지질도

### 3.

팔당터널 시점으로부터 330m지점 직상부(토포고 17m)에 무속인 김○○ 소유의 가옥이 위치하고 인근의 예봉산에 개인 박물관을 신축하여 여러 해 동안 수집한 소장품(도자기 및 유물 7,000여점 이상)을 전시코자 계획하고 있었으며, 박물관 완공이전에 임시로 주거 가옥에 소장품을 보관하였다. 이에 하부 터널굴착 공사시 발파진동으로 인한 도자기류의 파손에 대한 우려로 지속적인 민원을 제기하고 공공기관 각 처에 탄원서를 제출하였다.

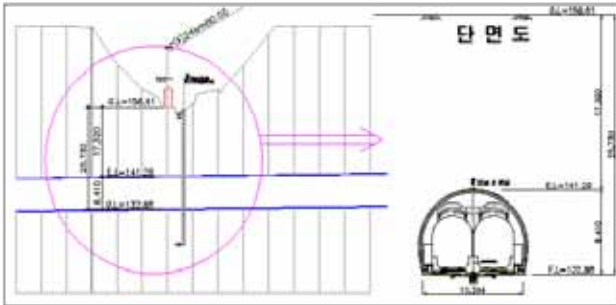


그림 3. 민원가옥 위치도



그림 4. 개인박물관 소장 골동품

## 4.

### 4.1

국내 터널발파 설계기준에 따르면 구조물 별 발파진동 허용기준은 표 1과 같다. 민원인의 건물이 개인박물관으로서의 역할을 수행할 것을 감안하여 해당 구간의 발파 허용진동치는 0.3cm/sec로 관리하는 것으로 하였다.

표 1. 건설교통부 발파진동 규제 기준

구 분	건물의 종류	허용진동치 (cm/sec)
터널발파 설계기준 (1999)	진동예민 구조물(문화재 등)	0.3
	조적식 벽체와 목재 천장 구조물(재래가옥 등)	1.0
	조적식 중소형 건축물(저층 양옥, 연립 주택 등)	2.0
	철근콘크리트 중소형 건축물(중, 저층 아파트 등)	3.0
	철근콘크리트 대형 건축물(고층 아파트 등)	15.0

### 4.2

발파진동의 크기는 주변 구조물의 기하학적 형태와 해당 지역의 지질 및 암반상태에 해당하는 입지조건과 지발당 장약량과 폭원으로부터의 거리에 해당하는 발파조건인 변수로 결정되며, 이와 관련하여 여러학자들에 의해 많은 경험식이 제안되었는데 가장 많이 적용되는 이론적 경험식은 다음과 같다.

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

여기서

V : 지반 진동속도

D : 폭원으로부터의 거리

W : 지발당 장약량

K, n : 발파상수

b : 장약지수(1/2 or 1/3, 자승근 or 삼승근)

지반 진동속도와 환산거리는 식 1과 같이 비선형 관계이므로 양변에 log를 취하여 기울기 n와 절편 logK를 포함하는 다음의 식이 유도된다.

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

식 2의 각 상수는 시험발파 결과 얻어지는 발파진동 데이터를 회귀분석하여 구할 수 있다.

표 2. 시험발파 절차 및 방법

시험발파 실시	·설계패턴에 의한 천공, 장약 ·주변 보안물건에 피해 없는 안전한 곳에서 실시
시험발파 계측 결과분석	·신뢰성 있는 분석을 위해 20점 이상의 계측자료 확보 ·회귀분석을 실시하여 현장특성에 맞는 발파진동 추정식 산출
발파설계	·이격거리별 지발당 허용장약량을 고려한 발파패턴 설계 ·폭약, 뇌관의 종류 및 기폭방법 검토
공사실시	·설계패턴별 장약량, 천공 등 준수 ·발파작업과 병행하여 발파계측 실시

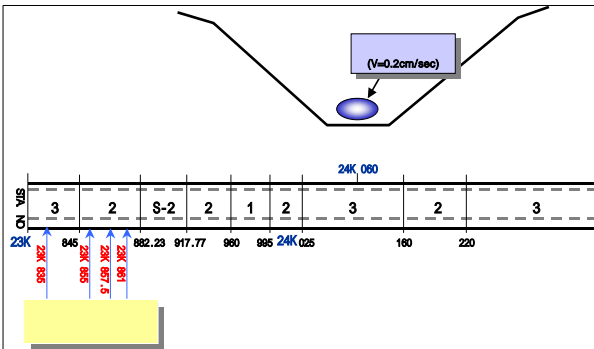


그림 5. 시험발파 위치도

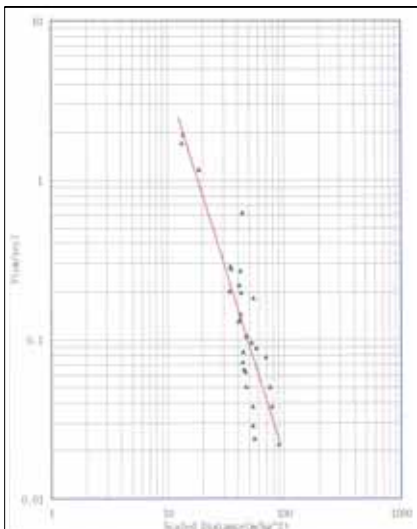


그림 6. 회귀분석 (자승근)

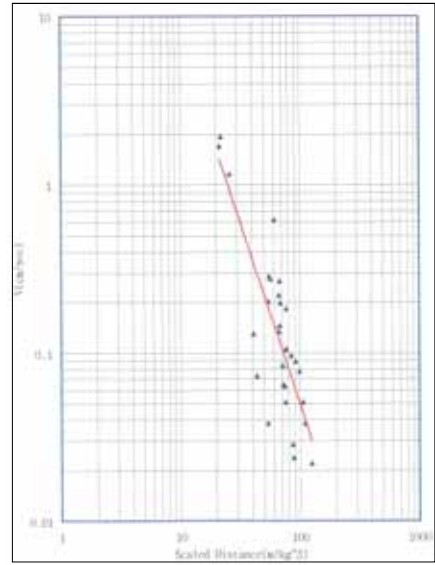


그림 7. 회귀분석 (삼승근)

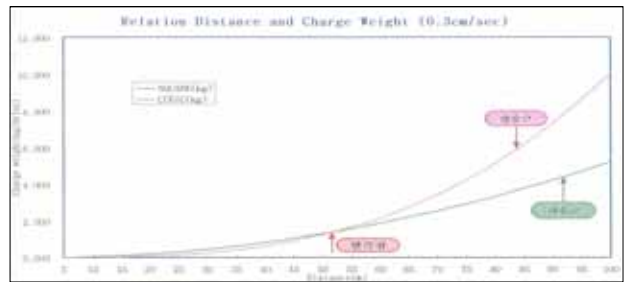


그림 8. 지발당 장약량과 거리의 관계

( 5  
~ 8 ) 3  
(60m )

표 3. 발파진동 속도 추정식

구 분	SRSD(자승근)	CRSD(삼승근)
당초설계	$V = 88.65 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.43}$	-
시점부 시험발파	$V = 2595 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-2.4}$	$V = 1387 \left( \frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-2.2}$

\* V: cm/sec, D: m, W: kg/delay

소장품이 주로 도자기류로 진동에 민감하여 표 1.의 건설교통부 규제 기준을 참고하여 진동 관리기준을 0.3cm/sec

로 하고, 이에 따른 거리별 지발당 허용장약량을 산출하면 표 4.와 같다.

표 4. 거리별 지발당 허용장약량

지발당 장약량(kg/delay)		거리 D (m)	지발당 장약량(kg/delay)	
SRSD (자승근)			CRSD (삼승근)	
당초설계	시험발파		당초설계	시험발파
0.035	0.052	10	-	0.010
0.140	0.210	20	-	0.080
0.315	0.471	30	-	0.271
0.561	0.838	40	-	0.643
0.876	1.309	50	-	1.257
1.262	1.886	60	-	2.172
1.717	2.567	70	-	3.448
2.243	3.352	80	-	5.148
2.839	4.243	90	-	7.329
3.505	5.238	100	-	10.054
5.047	7.543	120	-	17.373
6.870	10.266	140	-	27.588
8.973	13.409	160	-	41.181
11.356	16.971	180	-	58.634
14.020	20.951	200	-	80.431
16.964	25.351	220	-	107.054
20.188	30.170	240	-	138.985
23.693	35.408	260	-	176.707
27.478	41.065	280	-	220.703
31.544	47.141	300	-	271.455

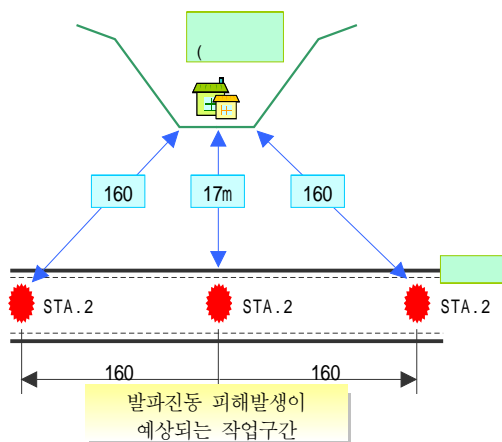


그림 9. 발파 진동 영향권

## 5.

### 5.1

발파진동 저감공법으로는 선대구경과 제어발파를 조합한 방법, 미진동파쇄기를 사용한 공법, 팽창성 파쇄제를 이용한 방법, 및 유압잭 공법 등이 고려되었으며, 표 5는 그 중 선대구경과 제어발파를 조합한 방법 및 미진동파쇄기를 사용한 공법에 대한 비교표를 보여준다.

표 5. 미진동 굴착 공법 비교표

		선대구경+제어발파	미진동파쇄기
시공 사진			
	원 리	고열, 고압에 의한 팽창력 이용(화학작용)	고열, 고압에 의한 팽창력 이용(화학작용)
장 · 단 점	장 점	·계획파쇄 가능 ·시공성 양호	·계획파쇄 가능
	단 점	·비산, 소음 발생	·수중파쇄 불가능 ·경암에 적용이 어려움 ·공발현상, 비산우려
시공 방법		선대구경천공(362mm)→천공→장약→전색→발파	천공→장전→전색→발파
재 료		화 약	화 약
종합 검토 의견		진동, 소음 감소 효과는 타공법에 비해 다소 미약하나, 작업성, 경제성 등에서 유리한 공법이다.	도심지 현장에 적용시 안전한 장소에서 여러 번의 시험발파를 행한 후 신뢰성 확보된 후에 적용하는 것이 좋다.
적 용		●	

### 5.2

#### (1) 대단면 심발공

터널굴착은 1 자유면 발파이기 때문에 효과적인 발파를 위하여 심발(Cut) 발파로 중앙부에 2차 자유면을 형성한 후 확대부와 굴착경계면 발파의 순으로 진행된다. 따라서 1자유면 상태에서 이루어지는 심발 발파에서 진동이 최대가 되고 심발부가 제대로 형성되지 않으면 이어지는 확대발파 시 진동이 크게 발생한다. 심발공(Cut Hole)은 터널발파에서 2차 자유면 생성을 위하여 가장 먼저 발파되며, 심발에 의한

자유면이 크면 클수록 이어지는 확대발파의 효율이 증대되고 진동이 적어진다.

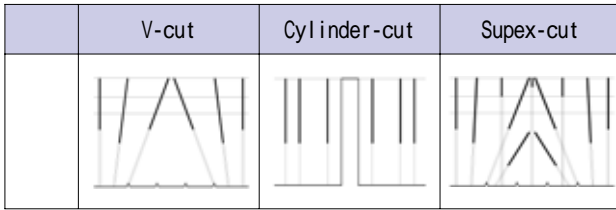
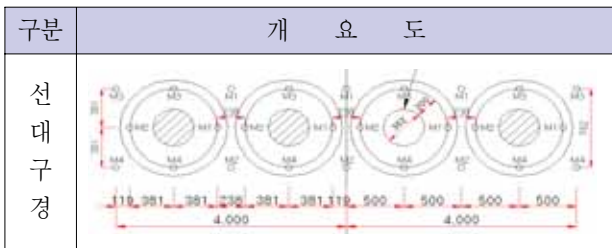


그림 10. 일반적인 심발공의 종류

본 사례에서는 심발공에 의한 자유면 형성을 극대화하기 위하여 표 6.과 같은 대단면 심발공을 적용하였다. 4개의 대구경(∅ 362mm) 수평 홀을 50m씩 천공하여 자유면을 확보하고 주변 심발공을 발파하여 대단면 2차 자유면을 확보함으로써 심발 및 확대공, 발파시 진동을 최소화하였다.(1회 굴진장 1~1.5m)

표 6. 대단면 심발공 : 선대구경 & 심발 확공



(2) 선대구경 굴착공법

선대구경 수평홀 4공을 설치(∅ 362mm× 4공, 공간격 90cm, 공좌위치:바닥에서 1m 상부, 1회 천공장: 50m/회)한 후 심발발파로 거대한 2-자유면을 형성시키고, 자유면 방향을 향하여 확대부 암석을 다분할 소발파와 자중에 의해 파괴를 유도함으로써 무진동수준으로 굴착을 시행하였다.

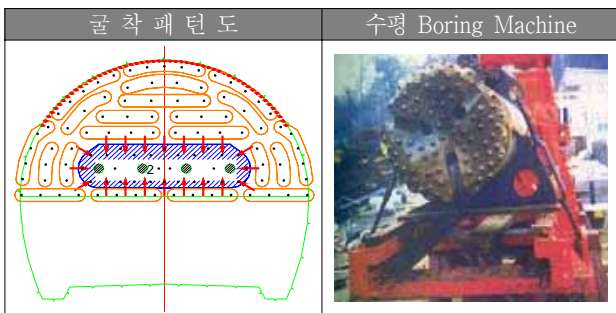
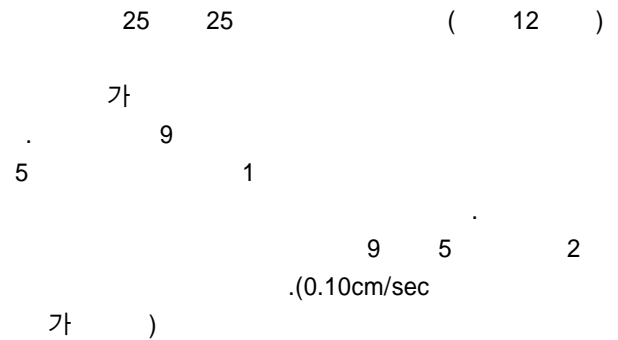


그림 11. 굴착 패턴도 및 수평 Boring Machine

(3) 암질별 최적 천공 및 장약량 산정

발파설계 단계에서는 막장의 상세한 암질조건을 고려하지 못하고 일반적인 암질을 기준으로 전체 막장면이 동일한 조건으로 가정한다. 그러나 실제 발파작업시 1개 막장내에서 암질상태가 서로 다른 부분들이 존재할 수 있고 이러한 경우 발파패턴을 변경하여야 한다. 본 시공 사례에서는 변경 발파패턴을 기본으로 하고 막장 상태에 따라 천공간격 및 장약량을 유동적으로 변경 적용하여 발파효율을 극대화하고 확실한 심발을 형성하여 초기 진동을 최소화하였다.

(4) 분할발파 방법



구분	요약도
원 설계	
1 차 변경	
2 차 변경	

그림 12. 분할발파 방법

5.3

다분할 소발파 공법 적용상의 문제점은 천공후 모든 천공 Hall에 장약한 상태에서 수회에 걸쳐 발파를 시행하는 방법이므로, 화약의 불발 및 오발에 대한 안전성 확보가 어렵고 환기를 미실시한 상태에서 뇌관과 모선의 연결 작업을 수차례에 걸쳐 실시해야 하므로 작업자의 안전확보가 어렵

고, 결선작업 오류가 발생할 수 있다. 또한 선 발파된 암의 버력이 바다에 깔려 상부의 발파 모선 연결 시 대차장비의 접근이 어려워 버력을 안으로 밀어 넣고 버력위에서 결선작업을 해야 하는 어려움이 있다.

6.

선진도갱 공법 적용구간은 시점부 시험발파 진동속도식에 따라 계산하면 0.23cm/sec 정도의 진동이 발생하나 선진도갱에 의한 확실한 심발부 형성과 Line Drilling 방진공에 의한 진동차단효과로 약 20%정도의 진동감쇄 효과를 얻었다. 또한 민원 가옥 하부 선대구경 적용구간에서는 진동값이 대부분 관리기준치 0.3cm/sec 이내로 발생(표 7. 참조)하여 충분한 진동 감쇄효과를 얻었음을 알 수 있다.

7.

		4		4-A			(M)
		(cm/s)	(dB)	(cm/s)	(dB)		
07 23	708	0.089	81.6			T-2-Q (1.5m)	41.0
07 24	705	0.100	82.2			T-2-Q (1.5m)	38.5
07 25	704	0.111	73.8			T-2-Q (1.5m)	38.0
07 26	703	0.124	71.4			T-2-Q (1.5m)	36.5
07 27	709	0.083	72.6			T-3-Q (0.8m)	35.0
07 28	741	0.122	76.4			T-3-Q (0.8m)	34.2
07 29	705	0.198	75.6			T-3-Q (0.8m)	33.4
07 30	954	0.187	80.0			T-3-Q (0.8m)	32.6
08 06	838	0.210	74.4			T-3-K (1.5m)	31.0
08 07	817			0.243	72.2	T-3-K (1.5m)	29.5
08 08	728			0.314	71.6	T-3-K (1.5m)	28.0
08 10	741			0.288	72.0	T-3-K (1.0m)	25.0
08 11	752			0.283	67.0	T-3-K (1.0m)	24.0
08 13	749			0.300	70.0	T-3-K (1.0m)	22.0
08 14	708	0.232	69.0			T-3-K (1.0m)	21.0
08 15	704			0.282	64.0	T-3-K (1.0m)	20.0
08 16	736			0.248	67.4	T-3-K (1.0m)	20.0
08 17	721			0.244	66.6	T-3-K (1.0m)	21.0
08 18	744			0.233	67.2	T-3-K (1.0m)	22.0
08 19	1804	0.186	65.4			T-3-K (1.0m)	23.0
08 20	826			0.210	63.2	T-3-K (1.0m)	24.0
08 21	727			0.219	67.4	T-3-K (1.0m)	25.0
08 22	715	0.366	69.8			T-3-K (1.5m)	26.5
08 23	941			0.179	67.2	T-3-K (1.5m)	28.0
08 24	941			0.179	67.2	T-3-K (1.5m)	29.5
08 26	843			0.267	63.2	T-3-K (1.5m)	31.0
08 27	751	0.211	81.0			T-3-Q (0.8m)	31.8
08 28	1237			0.091	58.8	T-3-Q (0.8m)	32.6
08 30	718	0.289	70.4			T-3-Q (0.8m)	33.4
09 01	1351	0.254	65.4			T-3-( 1.5m)	36.4
09 02	1717	0.229	66.6			T-3-( 1.5m)	37.9
09 03	832	0.373	83.2			T-3-( 1.5m)	38.4
09 04	727	0.181	79.8			T-3-( 1.5m)	40.9
09 05	708	0.246	75.8			T-3-( 1.5m)	42.4

7.

발파작업 시에는 실제로 건물균열 피해도 발생할 수 있지만 작업의 특성상 폭약을 사용하기 때문에 심리적인 이유로 민원이 발생하는 경우가 많으며, 당 현장에서조차 착공 전에 이미 개인박물관 건립예정인 민원인을 중심으로 주민들의 민원이 야기되고 있었다. 민원이 발생하면 주민설명회 또는 개별 설득 등 다방면의 노력으로 타결할 수도 있지만 결국 법적 분쟁으로 이어지는 경우도 흔히 발생한다. 이러한 경우 시공사의 진동저감 노력여하에 따라 책임의 비중이 바뀌므로 진동 최소화를 위한 기술적 노력은 필연적이라 할 수 있다.

당 현장에서는 시험발파를 통해 합리적인 발파 예측식을 구하고 이를 통해 영향권 범위의 설정과 함께 터널 단면별 발파패턴을 계획하였다. 그리고 발파 진동 최소화를 위하여 선대구경 수평보링 공법 및 선진도갱 공법을 적용하여 대단면 심발을 형성함으로써 초기 진동발생을 최소화하였고, 라인드릴링을 적용하여 굴착경계면에 방진공을 형성하여 확대 발파에서 발생하는 진동을 감쇄시켰다. 또한, 1회 발파시의 화약량이 진동크기에 영향을 미치므로 막장을 다분할하여 소발파를 적용함으로써 1회 발파에 사용되는 화약량을 최소화하여 진동을 저감시켰다.

- (1) “ ( ~ )  
,” 2001,
- (2) “ ( ~ )  
,” 2001,
- (3) “ 3  
가 ,” 2004,  
( )