

# 비전기 순발뇌관과 도폭선을 이용한 터널여굴 감소 발파공법

이 현 구<sup>1)</sup> · 김 영 근<sup>2)</sup> · 이 봉 안<sup>3)</sup> · 최 성 웅<sup>4)</sup>

## 1. 서 론

터널 굴착 공정중 최외곽공 발파에서는 발파후 잔존하는 터널 벽면의 모양을 최대한 손상없이 신선하게 유지하여 낙석을 방지하고 보강량을 최대한 감소시키는 것이 가장 중요하다. 일반적으로 굴착 발파후 미려한 파단면을 얻기 위해서 스무스 블라스팅(smooth blasting) 공법이 많이 적용되고 있으며 굴착 예정선을 따라 천공한 외곽공에 공경보다 훨씬 작은 폭약경을 갖는 정밀폭약을 장약하여 발파함으로써 디커플링 효과(decoupling effect)를 이용한 공벽에서의 완충작용으로 굴착면의 암반손상을 최소화하고자 하는 공법이다.

그러나 이러한 조절발파공법도 전기 또는 비전기식 지발뇌관을 사용하기 때문에 뇌관 자체가 갖는 제조상의 오류로 인해 요구되는 초시에 정확하게 기폭되지 않아서 미려한 파단면을 얻지 못하고 모양손상과 과다여굴 발생 등의 문제를 야기시키며 여굴 발생지점은 고가의 슛크리트 또는 콘크리트 등으로 채우게 되어 터널공사 원가 증가를 초래한다. 따라서 현재 최외곽공은 다양한 방법에 의해 발파작업이 시도되고 있으나 뇌관의 시차오류, 장약 배분 문제(과장약, 집중장약) 등으로 계획된 굴착선 이상으로 과굴착되는 문제점이 자주 발생되고 있다.

본 연구에서는 제조상의 기폭시차 오류가 매우 적은 비전기 순발뇌관을 사용하고 기폭시스템을 개선하여 제발효과를 극대화함으로써 굴착경계면의 모양 손상을 최소화하고 여굴을 줄여 슛크리트 및 라이닝 콘크리트 투입 자재를 줄임으로써 터널공사 원가절감을 도모하고자 하였다.

## 2. 공법의 개요 및 특성

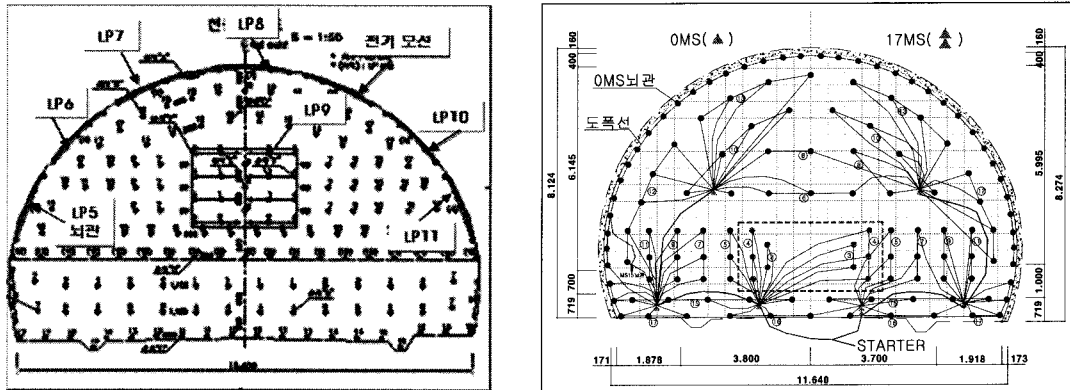
기존의 터널 굴착에서는 그림 1(a)에서 보는 바와 같이 최외곽공에 일정한 지연초시를 갖는 지발뇌관을 사용하여 몇 개의 구역으로 나누어 순차적으로 기폭하여 최종 굴착경계면을 형성하도록 발파설계를 하고 있다. 그러나 지연뇌관은 생산 과정상의 정밀도 부족으로 뇌관 자체의 기폭 초시에 오차가 많이 발생하고 또한 단차가 다른 수개의 영역으로 분할되어 기폭되기 때문에 제발효과를 얻기가 어려우며 결과적으로 미끄러운 파단면을 얻지 못하고 여굴이 상대적으로 많이 발생하게 된다.

본 발파공법은 그림 1(b)에서 보는 바와 같이 최외곽공에 초시오차가 매우 적은 비전기 순발뇌관(0-MS)을 장전하고 도폭선을 사용하여 동시기폭함으로써 제발효과를 극대화하여 인접공간의 인장균열을 유도하여 미려한 굴착면을 만들어 결과적으로 여굴을 감소시켜 슛크리

1) 삼성물산(주) 토목ENG팀 차장  
2) 삼성물산(주) 토목ENG팀 부장  
3) 삼성물산(주) 성남-여주 7공구 현장소장  
4) 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 교수

트 타설량과 라이닝 콘크리트 타설량을 절감하는 경제적인 발파 패턴이며 작업 순서는 다음과 같다.

- 전열공까지는 설계 발파패턴도에 준하여 장약 및 결선
- 최외곽공은 순발(瞬發) 비전기뇌관을 폭약과 함께 장전
- 공 밖으로 노출되는 비전기식 뇌관의 튜브는 5g/m의 도폭선으로 전체 결선
- 도폭선에는 외곽공 기폭순서에 해당하는 뇌관 결선 후 발파 실시
- 심발공 - 확대공 - 전열공 - 최외곽공 순서로 기폭, 최외곽공은 도폭선으로 동시기폭



(a) 일반적인 발파 패턴도 (b) 비전기 순발뇌관과 도폭선 이용

그림 1. 터널 최외곽공 smooth blasting 발파 패턴도 비교

본 공법의 장점은 다음과 같다.

- 낙석이나 낙반의 위험이 적어지므로 안정성이 양호하다.
- 지나친 굴착이 적어지므로 콘크리트 타설량이 감소되고 공사비용이 적게 든다.

본 공법의 단점은 다음과 같다.

- 천매암, 결정 편암과 같이 절리, 층리, 편리 등이 발달한 암석에서는 효과가 적다.
- 발파공의 공간 간격과 최소저항선과의 차이에 조화와 정확도를 요구함으로써 고도의 천공기술이 요구된다.
- 발파공의 천공 간격이 보통의 발파공법보다 좁기 때문에 천공수가 많게 된다.

### 3. 현장 시험발파

#### 3.1 공사 개요

현장시험이 실시된 터널현장의 공사 개요는 다음과 같으며, 현황도가 그림 2에 나타나 있다.

- 현장명 : 정관지방산업단지 진입도로 건설공사(제2공구)
- 공사위치 : 부산광역시 금정구 회동동 개좌산 일원
- 공사기간 : 2005년 06월 ~ 2008년 08월

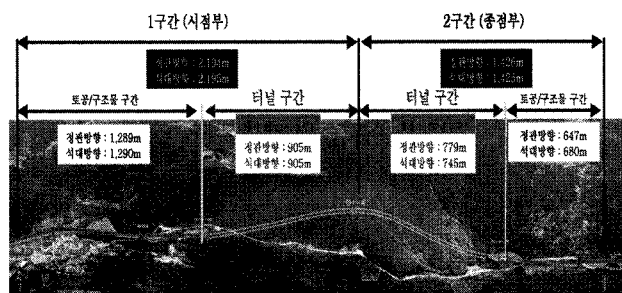


그림 2. 현장시험 적용현장 현황도

### 3.2 시험 발파

(1) 개요

- 일 자 : 2007년 7월 12일 ~ 14일(3일간)
- 장 소 : 정관지방산업단지 진입도로 건설공사(제2공구) 개좌터널





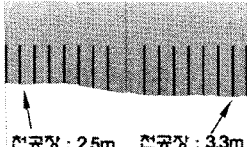
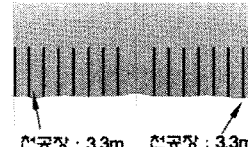
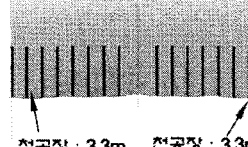
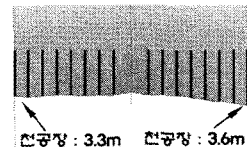
(2) 진동 및 소음 측정

발파영역별(심발공, 확대공, 외곽공) 진동 및 소음 분석을 위해 발파위치로부터 터널 내부(약 330m), 터널 갱구부(약 500m), 터널 외부(약 550 ~ 650m)에서 측정하였다.

(3) 시험발파 패턴

시험발파패턴의 전체적인 천공배치는 기존 발파패턴과 동일하나 최외곽공은 비전기 순발뇌관을 장전하고 도폭선(5g/m)을 사용하여 기폭하였으며, 전체 연결된 도폭선은 외곽공의 기폭순서에 해당하는 지연시차의 뇌관을 1개 연결하였다. 시험발파패턴은 표 1에서 보는 바와 같이 총 4가지 경우를 실시하였으며, 그림 3에는 시험발파패턴도가 나타나 있다.

표 1. 시험발파패턴

시험발파패턴-1	시험발파패턴-2	시험발파패턴-3	시험발파패턴-4
			
1회발파(정관방향) STA NO. 8+438	2회발파(석대방향) STA NO. 8+431	3회발파(정관방향) STA NO. 8+435	4회발파(정관방향) STA NO. 8+432
비전기 순발뇌관 & 도폭선 (최외곽공 좌측 적용)	비전기 순발뇌관 & 도폭선 (최외곽공 우측 적용)	비전기 순발뇌관 & 도폭선 (최외곽공 전체 적용)	당초 설계패턴 (최외곽공 비전기 지발뇌관)
천공장 2.5m~3.3m	천공장 3.3m	천공장 3.3m	천공장 3.3m
			

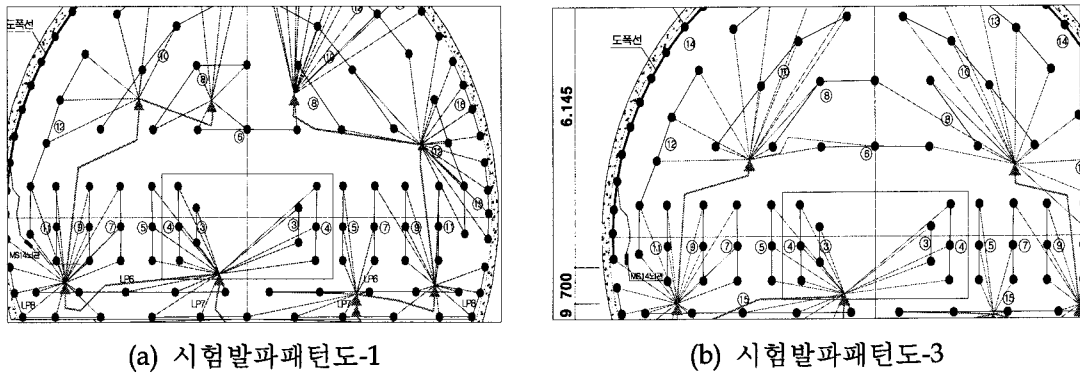


그림 3. 시험발파패턴도

#### 4. 시험발파 결과 분석 및 검토

##### 4.1 천공자국 길이(half cast factor)

천공자국길이는 발파 후 외곽공의 전체 굴진장에 대한 천공자국 길이의 비율로 나타내었으며, 표 2에 측정결과가 정리되어 있다.

표 2. 천공자국길이 측정결과

TYPE	굴진장 (m)	천공장 (m)	비전기 순발너관 & 도폭선 발파		기존 발파(지발너관)	
			평균 천공자국 길이(m)	천공자국길이 /굴진장(%)	평균 천공자국 길이(m)	천공자국길이 /굴진장(%)
4TYPE(격자지보)	1.5	1.65	1.30	86.7	0.19	15.38
3TYPE(무지보)	2.0	2.2	1.85	92.5	0.78	38.80
비상주차대 (무지보)	2.0	2.2	1.83	91.5	0.72	42.73
2TYPE(무지보)	3.0	3.3	2.73	90.9	1.53	58.36

최외곽공에 비전기 순발너관을 장전하고 도폭선으로 기폭한 적용한 경우 천공자국길이는 87%~92% 정도를 나타냈으며, 미적용한 기존발파시에서는 15~58% 정도를 나타내며 암질이 다소 불량한 지점에서 큰 차이를 나타냈으며 암질이 양호할수록 차이는 감소하는 경향을 나타낸다.

##### 4.2 여굴량 비교

표 3은 종점부 터널에서 굴착 Type별로 최외곽공에 비전기 순발너관과 도폭선을 적용한 구간과 미적용 구간을 구분하여 비교한 결과이다.

표 3. 비전기 순발뇌관과 도폭선 사용시와 비전기 지발뇌관 사용시의 여굴량 비교

구분	평균여굴량(cm/m)				
	3-TYPE (무지보, 굴진장 2.0m)	2-TYPE (무지보, 굴진장 3.0m)	1-TYPE (무지보, 굴진장 3.5m)	비상주차대 (무지보, 굴진장 2.0m)	
정관방향	당초 설계패턴 (비전기 지발뇌관(MS+LP))	19.3	19.0	20.0	19.5
	도폭선 & 비전기 순발 뇌관 발파	13.1	13.1	14.9	13.6
석대방향	당초 설계패턴 (비전기 지발뇌관(MS+LP))	16.4	17.8	-	20.7
	도폭선 & 비전기 순발 뇌관 발파	10.0	12.2	-	11.5
여굴량 차이	정관방향 (기존발파-도폭선발파)	6.2	5.9	-	5.9
	정관방향 (기존발파-도폭선발파)	6.4	5.6	-	9.2

무지보 굴착구간에서 동일 발파패턴에 대하여 비전기 순발뇌관과 도폭선을 적용하여 발파를 실시한 경우와 당초 설계대로 비전기 지발뇌관을 적용한 경우의 여굴량 비교결과 여굴량이 54.4 ~ 10.6cm 정도 여굴이 줄어드는 것으로 나타났다.

#### 4.3 슛크리트 타설량 비교

스�크리트 타설량은 batch plant에서 실시된 중량 계량 실측치를 기준으로 리바운드량을 포함한 전체 슛크리트 타설량(실링, 1차, 2차)을 측정 하였다. 표 4는 당초 설계패턴(MS+LP 지발뇌관)에 의한 발파 후 투입된 슛크리트 타설량이며, 표 5는 비전기 순발뇌관과 도폭선을 적용한 경우의 투입된 슛크리트 타설량을 설계치 대비 정리한 결과표이다.

표 4. 당초 설계발파패턴(지발뇌관 사용) 적용시 슛크리트 타설량

구분	굴착Type	굴착연장 (m)	시공타설량 (m <sup>3</sup> )	단위길이(m)당 시공타설량(m <sup>3</sup> )	단위길이(m)당 설계타설량(m <sup>3</sup> )	시공타설량/ 설계타설량(%)
정관터널	P-1	136	505	3.71	2.69	138
	P-2	498	1,995	4.01	2.69	149
	P-3	33	193	6.00	4.20	143
	비상주차대	50	370	7.40	5.83	127
석대터널	P-2	497	1,978	3.98	2.69	148
	P-3	108	588	5.44	4.20	130
	비상주차대	50	378	7.56	5.91	128

표 5. 비전기 순발너관과 도폭선 발파시 슛크리트 타설량

구분	굴착Type	굴착연장(m)	시공타설량(m <sup>3</sup> )	단위길이(m)당 시공타설량(m <sup>3</sup> )	단위길이(m)당 설계타설량(m <sup>3</sup> )	시공타설량/설계타설량(%)
정관터널	P-1	158	467	2.96	2.69	110
	P-2	70	223	3.19	2.69	119
	P-3	21.8	110	5.05	4.20	120
	비상주차대	21.6	153	7.08	6.35	112
석대터널	P-2	120.4	365	3.03	2.69	113
	P-3	26	127	4.88	4.20	116
	비상주차대	50	364	7.28	6.35	115

동일 발파패턴을 적용하여 최외곽공에 비전기 순발너관과 도폭선을 사용하여 발파한 경우와 당초 설계패턴대로 비전기 지발너관을 적용한 경우의 슛크리트 타설량을 비교한 결과 당초 설계패턴을 적용한 구간은 설계치 대비 실타설량이 Type별 127~149%를 정도를 나타내었고 비전기 순발너관을 사용한 경우 실타설량이 설계량 대비 110~120%를 나타내었다.

#### 4.4 라이닝 콘크리트 타설량

라이닝 콘크리트 타설량은 레미콘 공장에서 생산된 콘크리트의 현장 반입량을 기준으로 터널내 배수공동구 콘크리트 타설후의 양을 측정하였다. 표 6은 비전기 순발너관과 도폭선을 사용한 발파와 당초 설계대로 지발너관을 사용한 발파 굴착 후 투입된 라이닝 콘크리트 타설량을 설계치 대비 정리한 결과이다.

표 6. 라이닝 콘크리트 타설량 비교(비전기 지발너관/비전기 순발너관)

구분	굴착 Type	콘크리트 타설연장(m)	시공타설량(m <sup>3</sup> )	단위길이(m)당 실타설량(m <sup>3</sup> )	단위길이당 설계타설량(m <sup>3</sup> )	실타설량/설계타설량(%)
당초 설계패턴 (지발너관 사용) (시점부)	P-1	160m (16Span)	1,274	7.96	6.60	121
	P-2	130 (13Span)	1,048	8.10	6.60	122
도폭선+비전기 순발너관 사용 (종점부)	P-1	230m (23Span)	1,628	7.07	6.60	107
	P-2	80m (8Span)	571	7.13	6.60	108
적용효과 (타설량 차이)	P-1	-	-	0.89	-	-
	P-2	-	-	0.97	-	-

동일 발파패턴(무지보 굴착구간 1, 2Type)에서 비전기 순발뇌관과 도폭선을 사용한 발파와 당초 설계패턴대로 지발뇌관을 사용한 경우의 라이닝 콘크리트 타설량을 비교한 결과, 본 기술 적용구간은 설계치 대비 Type별 실타설량이 108~109% 정도를 나타냈으며 당초 설계패턴을 적용한 경우는 설계치 대비 실타설량이 Type별 121~122%를 정도를 나타내었다.

## 5. 결 론

최외곽공에 비전기 순발뇌관을 장전하고 도폭선을 이용하여 기폭하는 터널 여굴 감소 발파공법은 지발뇌관을 사용하는 기존 터널 발파공법에 비해 월등히 우수한 전자뇌관 수준의 시차 정밀도로 나타내며 이로 인해 여굴 감소 및 평활한 발파 파단면을 얻을 수 있다.

전자뇌관은 일반 비전기 뇌관에 비해 8~10배 정도 고가이며, 발파기/모선/보조모선 등을 기존발파와 혼용할 수 없는 단점이 있어 실효성, 경제성이 매우 떨어지므로 비전기 순발뇌관은 경제성과 여굴감소 효과를 동시에 만족시킴으로써 터널에서 적용할 수 있는 매우 유용한 기폭시스템이며 여굴 감소는 결과적으로 숏크리트 타설량 및 라이닝 콘크리트 타설량을 줄이고 후속공정(부석정리, S/C 타설 등)의 작업시간 단축하여 터널 공사 원가 절감에 기여할 것으로 판단된다.

그러나 본 공법은 동시 기폭으로 인해 진동이 다소 커질 수 있으므로 도심터널에 적용할 때는 2~3개의 영역으로 분할하여 진동 및 소음 발생을 억제하여야 필요성이 있으며, 향후 지속적인 현장적용을 통하여 문제점을 보완할 계획이다.

## 참고문헌

1. 삼성물산(주), 동아지질(주), 터널 여굴감소를 위한 발파패턴 개발 연구보고서, 2008