

# Tunnelling Technology

## 전자기폭 시스템에 의한 발파

### Blasting by Electronic Detonators System



김선명

한북대학교  
에너지자원학과  
전임교원,  
공학박사/기술사

#### 1. 서언

터널발파를 원활히 수행하기 위해서는 암반조건에 적합한 합리적인 설계와 정밀한 천공, 정확한 기폭초시가 기본요소로서 이는 현재 국내 터널 설계 시공기술 및 기자재의 발달로 만족할 만한 성과를 얻을 수 있다. 특히 터널발파에서 정확한 기폭초시의 부여는 굴진을 및 버력 파쇄율, 굴착예정선의 미려도, 주변 암반 손상도 등의 시공성에서뿐만 아니라 소음 및 진동 발생율을 좌우하는 환경적인 측면에서 매우 중요한 요소이다. 기폭요소는 최초 도화선을 이용한 공업뇌관에서 전기뇌관, 비전기식뇌관의 순으로 기폭안전성과 정밀성 면에서 급속한 성장을 이루어 왔으며 특히 1990년대 초반에 개발되어 전 세계적으로 최근까지 지속적으로 사용량이 급증하고 있는 전자뇌관은 기폭방식에 일대 혁신을 이루었다.

#### 2. 전자기폭시스템(Electronic detonators system, 전자뇌관)

1867년 Alfred Nobel에 의해 개발된 공업용 뇌관에 도화선을 부착시키는 방식에서 시작한 기폭시스템은 현재의 전기뇌관에 이어 비전기식 시스템(Non-electric system)의 발명에 이르기까지 더욱 확실한 기폭성과 안전성 및 정밀성에 부합하는 방향으로 발전되어 왔다. 특히 1990년대 초반에 전자 타이머에 의해 초 정밀시차로 특수한 용도에 사용하기 위해 개발된 전자 뇌관(Electronic detonator)은 단차별 기폭 시간에 대한 단차별 정밀도와 지연시차의 부여방법에서 기존의 기폭 시스템과 많은 차이를 보인다. 기존 뇌관(MS, DS)의 경우 단차별 오차범위가 후단으로 갈수록 50ms이상의 큰 오차가 날수 있는 데 반하여 전자 뇌관의 경우 단차별 0.2ms이하의 오차범위로 Controlled blasting(터널의 경우 smooth blasting)이나 적정 파쇄

전자기폭 시스템에 의한 발파

입도를 원하는 석산이나 광산 등에서 사용목적에 따라 보다 적절하게 대처할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 전자 뇌관의 내부구조는 디지털 타이머로서 지연초시를 결정하는 IC회로를 뇌관 내에 내장하고 있다. 표 1은 전자 뇌관의 내부 구조와 특징을 나타낸 것이다.

각 뇌관 당 1ms 단위로 자유롭게 지연시차를 부여할 수 있어 발파에 의해 야기되는 과 굴착이나 지반 진동을 효과적으로 통제할 수 있는 이점도 가지고 있다. 전 세계적으로 전자뇌관의 시장 규모는 연간 약 1,500만개 정도로 추정되며 현재 유럽, 미국, 일본과 남아아프리카 등에서 특수 목적으로 사용되고 있다.

전자 뇌관의 특성을 요약하면 다음과 같다.

뇌관 내부의 지연요소를 연시화약에 의존하지 않고 디지털 제어장치 즉 전자 IC회로를 사용한 뇌관이다.

전자뇌관(Electronic detonator)은 각 뇌관 당 보통

1ms 단위로 자유롭게 지연시차 부여가 가능하므로 지반에 따른 발파진동 전파특성을 파악 후 지발 당 최적초시 설계를 통하여 발파에 의해 야기되는 지반 진동을 효과적으로 통제할 수 있다.

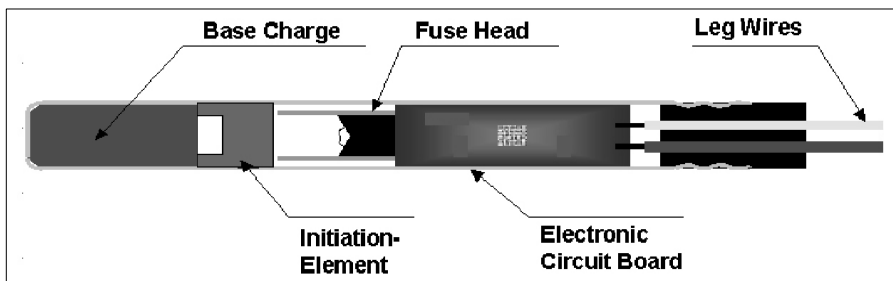
기존 뇌관(DS, LP)의 경우 후단으로 갈수록 일반적으로 50ms이상의 허용 오차 발생하나 전자뇌관의 경우 초시의 오차가 단차별로 0.1~0.2ms 이하의 범위에 있다.

뇌관별로 고유 Bar-Code가 있어 이를 인식할 수 있는 중간 저장장치와 지연시차를 부여하는 Software를 통해 각 뇌관은 지연정보를 필요에 따라 재입력(Re-programing)이 가능하다. 즉 자체 Software를 사용하여 전체 사용 뇌관을 자유롭게 통제할 수 있다.

각국의 생산기준에 따라 약간의 차이는 있지만 대체로 최소 0~8,000ms(Dynatronic, Germany)에서 최대 0~25,000ms(SASOL, South Africa)까지 1ms의 단위로 생산함으로써 단차 적용 범위의 무한성을 가지고 있다.

표 1. 전자뇌관의 내부 구조 및 특징

뇌관 규격	68.6 × 7.6 mm
Shell 재질	Al 이나 Cu
작업온도범위	-40 ~ 70℃
시차범위	0 ~ 25,000 ms
적용가능 지연시차	1ms 단위 가능
내 정수압	3 ~ 8 bar
내 전자기성	10 KHz ~ 100 GHz
내 정전기성	15 KV
기폭약	PETN, 아지화납



### 3. 전자기폭시스템의 구성

전자기폭시스템은 ① 전자뇌관, ② Hardware(발파기 등), ③ Software(전용프로그램), ④ 약세서리로 구성된다.

전자 기폭시스템은 위의 네 개의 메인 그룹으로 이루어져 있다. 첫 번째는 전자 지연 뇌관을 나타낸 그림으로 뇌관 관체, Downline 그리고 암·수(Male, Female) RCA 커넥터로 이루어져 있다. 수(Male) RCA 커넥터에는 뇌관 고유의 바코드가 있어 이를 이용하여 뇌관 초시를 설정하

게 된다. 두 번째는 hardware로 전자뇌관용 발파기와 바코드를 읽을 수 있는 Scanner 등이 있다. 세 번째는 software로 발파기 내의 시스템을 작동하거나 설정된 초시를 전자뇌관의 ic회로에 정상적으로 입력 등의 역할을 한다. 마지막으로 주변 기기로 여러 가지 연결케이블로 이루어져 있다. 위의 그림은 “SASOL”사에서 생산되는 제품으로 “SMI Electronic Blasting system”을 나타낸 것이다.

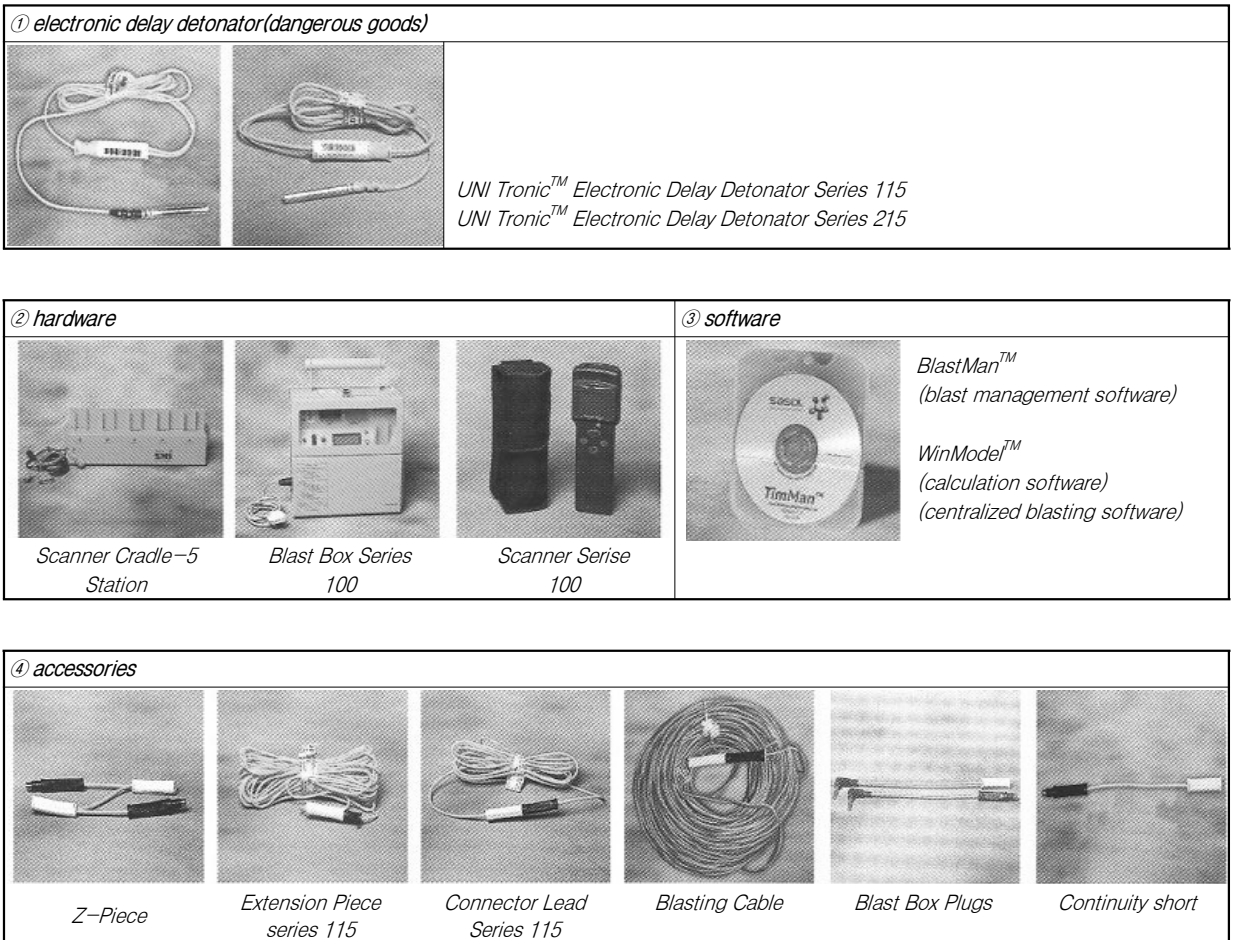


그림 1. 전자기폭시스템의 구성요소

## 4. 전자기폭시스템의 작업 순서

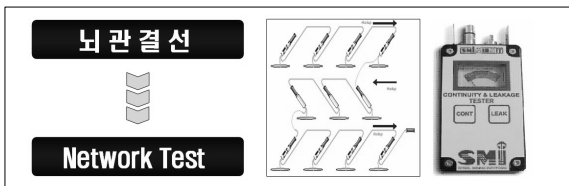
전자기폭시스템의 발파 작업은 점보드릴을 이용한 천공작업과 천공 후 장약 작업까지는 일반 뇌관과 동일한 방법으로 행해진다. 단 장약 작업에서 일반뇌관의 경우 뇌관을 단차별로 배열을 하나 전자뇌관의 경우 무작위로 장약 작업을 수행 한다. 다음은 전자뇌관의 작업 수행 과정을 나타낸 것이다.

모든 장약 작업이 끝나게 되면 다음과 같은 방법으로 작업이 이루어진다.

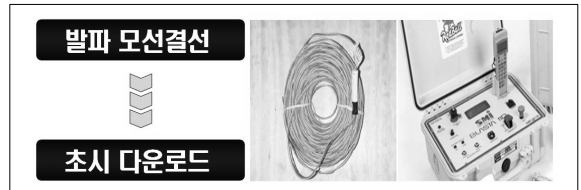
① 우선 각 뇌관의 수(Male) RCA 커넥터에 있는 뇌관 고유의 bar-cord를 Scanner를 통해 Scanning을 실시하게 되는데 이때 뇌관의 초시를 부여하게 된다. 설정된 초시는 Scanner에 저장된다.



② 뇌관의 결선은 이웃하는 뇌관의 서로 다른 RCA 커넥터를 연결작업으로 초시설정 작업과 거의 동시에 이루어진다. 결선 작업 시 단락의 주요 원인이 되므로 결선이 완료되면 각 뇌관 간에 연결 상태를 확인하기 위한 Network Test를 실시하게 된다. Test는 단락검사(Continuity test), 극성 변화 검사(Polarity Test), 누설전류 검사(Leakage Test)등이 이루어진다.



③ Test가 완료되면 모선을 연결작업이 이루어지는데 연결 작업이 마무리되면 Network Test을 재 실시한다. Test 작업 후에 Scanner에 저장된 각 뇌관의 bar-cord 및 초시를 발파기에 다운로드를 실시한다.



④ 다운로드가 완료되면 모선을 발파기에 연결 후 Arming 스위치를 ON으로 하여 뇌관에 전류 공급 및 설정된 초시를 각 뇌관에 전달한다. 다시 전체 네트워크 체크를 실시하고 네트워크 이상 시 Arming 스위치를 OFF로 하여 재점검을 실시 후 발파 준비 작업이 완료되면 발파를 실시하게 된다.

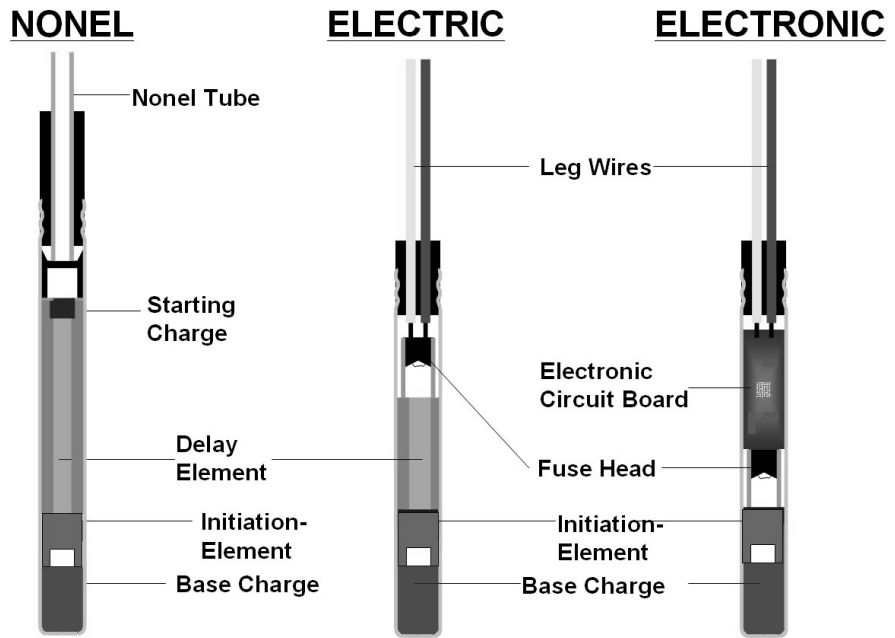


## 5. 전자뇌관과 기존뇌관의 차이점

현재 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 전기뇌관이나 비전기식 뇌관의 지연 초시는 연시약의 길이에 의해 결정된다. 바로 이것이 기존 뇌관의 기폭 초시 오차가 발생하는 원인이 된다. 그러나 전자뇌관은 IC회로에 의해 초시가 결정되므로 기폭이 정확하다는 장점을 가지고 있다. 다음 표는 전자뇌관과 전기 및 비전기식 뇌관의 차이점을 나타낸 것이다.

표 2. 전자뇌관과 일반뇌관의 기폭방식 비교



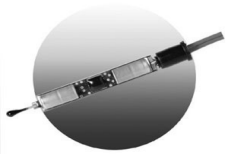
구 분	비전기 뇌관	전기뇌관	전자 뇌관
점화 방식	충격파 전달	전류 전달	Signal
매 개 체	HMX	점화옥	퓨즈
지연 요소	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 화약 성분</li> <li>• 연시약의 길이에 의해 초시결정</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 화약 성분</li> <li>• 연시약의 길이에 의해 초시결정</li> </ul>	IC회로



정밀도 측면에서 기존 MS(Milli Second)의 경우 0.06~4.09ms, LP(Long Period)의 경우 9.11~41.72ms 단차별 표준편차가 발생한 것에 비하여 전자뇌관은 0.2ms이내의 표준편차를 나타내어 허용오차범위(0.1~0.2ms)에서 벗어나지 않는 정밀한 시차를 보여준다. 특히 일반뇌관의 경우 LP(DS)후단으로 갈수록 단차별 표준편차가 더욱 크게 나타나는 경향이 있으나 전자 뇌관의 경우 부여하는

단차에 관계없이 허용 오차범위의 고른 초시 정밀도를 가지고 있다. LP뇌관 후단은 주로 터널의 최외곽부에 대부분 적용하고 있다는 사실을 고려할 때 시차 정밀도는 예정 굴착선의 여굴과 주변 암반 손상과 매우 밀접한 관련이 있음을 예상할 수 있다. 다음 표 3은 각 뇌관에 대한 기타 사항들을 나열한 것이다.

표 3. 기존 뇌관과의 비교

구분	전기 뇌관	비전기 뇌관	전자 뇌관
제품 형상			
사용 및 시공성	<ul style="list-style-type: none"> <li>비전기식뇌관의 보급 확대로 숙련공 확보 문제 없음.</li> <li>장약공 장전시간 차이 없음</li> <li>결선 소요시간은 비전기식 뇌관방식이 다소 단축</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>수입, 통관 문제 수반</li> <li>국내 도입 실적 전무</li> <li>별도의 전용 장비 소요</li> </ul>
경제성	• 비전기식에 비해 저렴	• 전기식에 비해 다소고가	• 고가 (비전기식의 10배)
	100%	135 ~ 145%	1,500 ~ 1,800%
사용 단 수	<ul style="list-style-type: none"> <li>MS 시리즈 : 20 단차</li> <li>LP 시리즈 : 19 단차</li> <li>MS+LP 최대 조합단수 ⇒ 39단차</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>MS 시리즈 : 20 단차</li> <li>LP 시리즈 : 25 단차</li> <li>TLD/Bunch : 7 단차</li> <li>Bunch 적용으로 무한 단차 구현</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>프로그램 Unit를 사용하여 1ms 이상의 초시를 설정 가능.</li> </ul>
외부 전류	• 미주전류, 정전기, 유도 전류, 전파 등의 전기적 요인에 민감	• 물리적 외력, 미주전류, 정전기, 전파 등에 대해 안전	• 물리적 외력과 미주전류, 정전기, 전파에 안전.
결선 확인	<ul style="list-style-type: none"> <li>결선 연결 여부 확인 용이 (도통시험기, 저항측정기)</li> <li>단선 시 점검, 확인에 장시간</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>육안에 의한 결선확인</li> <li>Tube의 인장강도 커서 결선 중 절단되는 경우 희박.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>결선상태 확인 점검.</li> </ul>
효율성	• 다단식 발파기 적용시 단차 확장 가능	<ul style="list-style-type: none"> <li>지연초시 편차 극소화</li> <li>진동 및 소음저감 효과 우수</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>지연초시 정밀성 최우수(0.2ms)</li> <li>진동 및 소음저감 효과 최우수</li> <li>암반 이완대 생성 최소화</li> </ul>

## 6. 전자뇌관 제품 비교

다음 표 4는 다른 나라에서 생산되는 전자뇌관 제품을

비교한 것이다. 현재 우리나라에서는 전자뇌관이 생산되지 않으므로 사용을 위해선 다른 나라의 제품을 수입해야 한다.

표 4. 전자 뇌관의 제품 간 비교

제품명	Unitronic	Daveytronic	I-kon	EDD
제조사	SMI(남아공)	Daveybickford(프)	ORICA	ASAHI(일)
동일 특징	• 뇌관내부에 초시인식장치(IC chip) 삽입		• 뇌관내부에 축전장치(Capaciter) 삽입 ⇒ Cut-off 문제해결	
지연 시간	0 ~ 25,000 ms	1 ~ 4,000 ms	1 ~ 8,000 ms	10 ~ 8,196 ms
	• 발파 Site에서 초시 설정 • 발파기(시스템)로 뇌관초시 이후의 초시 조정 가능			• 초시 고정 • 발파기 조작불가
초시 정밀도	• 0~2,000ms : 0.2 % 이하	• 0.1 ms 이하	• 0~500ms 0.05 ms • 501~8,000ms: 0.01 % 이하	1 ms 이하
뇌관인식 방법	Barcode/Scanner	개별 ID 부여/Programming 장비		초시고정
안전성	1.4S(항공운송가능)			1.4(항공운송불가)
각선 형태	직렬패턴(4개각선)	직렬패턴(2개각선)	직렬패턴(2개각선)	직렬패턴(2개각선)
결선	Plug결속	병렬패턴		

## 7. 외국에서의 전자뇌관 적용사례

일반적으로 터널 발파에서 과도한 기폭초시 오차 및 초시설정의 오류로 인해 굴진율의 불량과 과다한 원지반의 손상, 다량의 대괴생성, 불완전한 암 파쇄, 높은 지반진동 및 폭풍압 생성, 비산으로 인한 시설물 파괴와 작업 지연에 따른 경제적 손실 등 다양한 형태로 문제점을 야기시키는 원인이 된다. 이미 외국에서는 표 5와 같이 크게 4가지의 용도로 초 정밀시차의 전자뇌관을 이용 이를 활용하고 있다.

표 5. 전자뇌관의 용도

적용 개소	기대 효과
대규모 채굴 광산	파쇄 입도 조절
터널 발파	과 굴착 제어효과 소음 및 진동 제어 암반 손상권 제어
제어 발파	소음 및 진동 제어 굴착면 리려도 향상
도심지 발파	소음 및 진동 제어

표 6. 현장개요 및 시험방법

구분	내용
적용현장	• 日本 松の木 3호 Tunnel공사(국도 108호 개량공사)
터널규모	• 총연장 1,774m으로써 R1= 4.65m, R2= 9.3m 규모의 터널
암종	• 제3기 중세 혈청층(응회 각력암, 응결 응회암, 화산암)과 이를 관입한 유문암으로 이루어져 있으며, 이 가운데 유문암이 약 70%를 점유
지질특성	• 파쇄대의 폭이 2~4m인 단층이 수차례 협재하고 있으며, 각력이 점토상으로 파쇄되어 있는 것으로 예상
시험구간	• 터널 노선 중 1,480m~1,560m의 약 80m구간으로 전기뇌관 발파와 전자뇌관 발파로 12~24회 발파씩 교대로 두 구간에서 실시

표 7. 천공 패턴

구분	공간격(cm)	저항선(cm)	공간격/저항선비(Ratio)	천공경(mm)	폭약 직경(mm)	Decoupling Index
S·B 공열	60	80	0.8	42	20	2.2

표 5에서 터널 발파의 경우 과굴착 제어효과, 소음 및 진동 제어, 암반 손상권 제어 등에 전자뇌관을 활용하고 있는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 터널에서는 암반의 과굴착 방지와 암반 손상을 제어하기 위해 Smooth Blasting이 실시하고 있는데 이는 장약공 주변의 폭력을 제어하거나 폭발력을 특정 방향으로 유지하기 위해서 이다. 암반의 벽면보호에 영향을 주는 인자로는 폭약 사용량, 뇌관의 제발성, 공간격, 최소 저항선, 폭약계수, 천공의 정밀도 등이 있으나, 특히 Smooth Blasting 시에는 뇌관의 제발성이 중요하다. 최외곽공에 사용되는 뇌관은 보통 LP #8~#15번등이 많이 사용되며 초시 정밀도가 떨어져 Smooth Blasting 효과를 기대하기가 어려우므로 전자뇌관을 사용하여 이를 보완하는 것이다.

다음은 일본의 시공 사례로 터널의 최외곽공에 전자뇌관과 기존의 일반뇌관(전기뇌관 사용)을 각각 사용하여 Smooth Blasting 효과를 비교한 것이다.

※ 전자뇌관과 일반뇌관의 Smooth Blasting 적용 사례 비교

표 8. 기폭 패턴

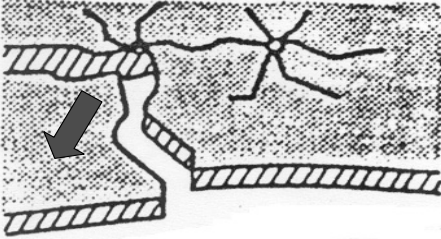
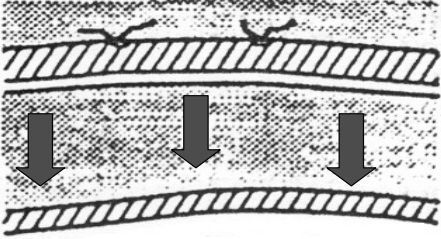
구 분		전기뇌관 발파	전자뇌관 발파
예상 작용 효과			
적용뇌관	S-B 공열	DS #.8 (1,750ms±10%)	1,750 ms
	본 공열	전기 뇌관 동일 적용	

표 9. 결과비교 - 발파 후 천공자국 길이와 여굴량, Shotcrete 타설량 비교

구 분	구 간	천공자국 길이	여 굴 량	S/C 타설량(m <sup>3</sup> )
1차 비교	• 전기뇌관 (Electric, No.1~18)	73.0	5.5	6.1
	• 전자뇌관 (Electronic, No.19~30)	277.0	5.2	5.8
	• 전자뇌관 / 전기뇌관 비	3.79	0.95	0.95
2차 비교	• 전기뇌관 (Electric, No.34~36)	13.0	4.6	5.7
	• 전자뇌관 (Electronic, No.31~33)	29.2	4.0	5.3
	• 전자뇌관 / 전기뇌관 비	2.25	0.87	0.93
3차 비교	• 전기뇌관 (Electric, No.43~45)	210	6.8	6.9
	• 전자뇌관 (Electronic, No.46~48)	300	5.9	6.3
	• 전자뇌관 / 전기뇌관 비	1.43	0.86	0.91

위의 표 9에 제시된 결과를 볼 때 1차, 2차, 3차 비교 실험에서 천공자국길이비나 여굴량, S/C타설량에서 전자 뇌관이 일반뇌관보다 Smooth Blasting 발파 효율이 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

## 8. 결론

폭약의 폭굉력을 충분하게 발휘하기 위해서는 점화, 점 폭, 전폭의 3단계 과정이 필요한데 이들 과정을 완벽하게 만족시켜주는 역할을 하는 것이 기폭시스템 즉 뇌관이다. 따라서 뇌관의 정밀성이 발파 효율을 증대시키는데 있어

서 가장 중요한 요소라고 할 수 있다. 정밀성면에서는 MS 뇌관의 경우 20ms 또는 25ms의 정밀한 시차를 순차적으로 기폭함으로써 발파효과를 크게하고 소음 및 진동제어에 효과를 거두고 있으나 본고에서 소개한 전자뇌관의 경우 자체 IC회로를 내장하여 1~2ms의 초정밀시차의 구현이 가능해짐에 따라 적절히 조합하여 설계함으로써 기존 뇌관에 비해 더욱 우수한 진동억제(vibration control), 제어발파(controlled blasting) 효과의 극대화, 터널 외곽 공 발파에서 미려한 파단면의 생성에 따른 숏크리트 타설량 감소 및 주변압반의 손상영역 저감 등의 효과가 알려지고 있다.

특히 도심지 발파와 같이 발파진동의 제어가 절대적으



로 필요한 곳에서 현재 사용되고 있는 기존의 제어발파나 소량발파보다 전자뇌관을 사용하여 발파함으로써 시공성 및 공사비 절감 면에서 월등한 효과를 거둘 수 있는 것으로 예상할 수 있다.

### 참고문헌

1. 류창하, 2005, 『발파진동에 대한 국내·외 규제기준 고찰』, 발파기술 워크샵, 대한 화약발파공학회, pp.11~12.
2. 윤지선, 1992, 『최신 발파기술』, 구미서관.
3. 윤지선, 김도현, 2006, 『발파진동 파형합성을 이용한 전자뇌관의 최적지연초시에 관한 연구』 터널기술, 한국터널공학회 논문집, Vol.8, No.2, pp. 129~139.
4. 이상현, 윤지선, 조영근, 안봉도, 2004, 『전자기폭시스템을 활용한 터널 시공사례』, 화약·발파, 대한화약발파공학회, 제 22권 제1호.
5. 이상현, 이진무, 이효, 구윤태, 2009 『정밀통신 보안 시설물 하부 통과구간 발파진동 저감사례연구』.
6. 申僖淳, 鮮于 椿, 李斗禾, 『토목기술자를 위한 地質調査 및 岩盤分類』, 구미서관, pp. 238~258.
7. 윤지선, 임종민, 배상훈, 이진무, 2006 『발파진동 파형합성과 전자 뇌관을 이용한 전단면 다단사차 발파에 관한 실험적 연구』, 대한토목 학회 정기학술대회 논문집.
8. 선우 춘, 류창하, 2000. 『발파진동 측정에 대한 고찰』, 화약·발파, 대한화약발파학회, vol. 18, No.4.
9. 윤지선, 김수현, 이진무, 이효, 배상훈, 2007 『연주식발파(OBM)공법 개발에 대한 기초적 연구』, 대한화약발파공학회 춘계학술발표회 논문집.
10. 三浦正信, 赤松英文, 廣野 進, 松永博文, 1995, 電子雷管によるスムーズプラスティグの効果 -國道108号改良工事 松の木3号トンネル, 터널과 지하.
11. Douglas A, Bartley, DBA Consulting, Raphael TROUSSELLE, Davey Bickford, Daveytronic, Digital Detonator Testing in a Vibration Sensitive Environment.
12. John A, Franklin, Takis Katsabanis, 1996. Measurement of Blast Fragmentation.
13. Josef Kohler, Rudolf Meyer, 1993. Explosives.
14. Sasol Co. Ltd. Sasol Explosives Catalogue. (남아프리카공화국)