

전자기폭시스템을 활용한 터널 시공사례

이상헌¹⁾, 윤지선²⁾, 조영곤¹⁾, 안봉도¹⁾

A Case Study on the Application of the Electronic Detonator System in Tunnel Blasting

Sang-hum Lee, Ji-sun Yoon and Young-gon Cho, Bong-do An

초 록. 터널 발파를 원활히 수행하기 위해서는 안전조건에 적합한 합리적인 설계와 정밀한 천공, 정확한 기폭초시가 기본요소로서 이는 현재 국내 터널 설계·시공 기술 및 기자재의 발달로 만족할 만한 성과를 얻을 수 있다. 특히, 터널 발파에서 정확한 기폭초시 부여는 굴진율 및 버력 파쇄율, 굴착예정선 미러도, 잔여 암반 손상도 등의 시공성에서 뿐만 아니라 소음 및 진동 발생을 좌우하는 환경적인 측면에서 매우 중요한 요소이다. 기폭요소는 최초 도화선을 활용한 공업뇌관에서 전기뇌관, 비전기식뇌관의 순으로 기폭안전성과 정밀성면에서 눈부신 성장을 이룩하여 왔으며 특히, 90년대 초에 개발되어 전 세계적으로 최근까지 지속적으로 사용량이 급증하고 있는 전자뇌관은 기폭방식에 일대 혁신을 이루었다. 전자기폭 시스템은 기존뇌관의 초시를 결정하는 화약성분의 지연요소 대신에 IC board(전자회로)에 의한 Digital timer로 신호를 발생하여 초시를 결정하는 방식이다. 본 논문에서는 국내 최초로 전자기폭시스템을 활용하여 2003년 9월 23일에서 동년 11월 2일까지 강원도 양구 지역의 ○○터널에 전자뇌관을 이용한 시험발파를 실시하였고, 발파에 의한 진동 등을 조사하여 그 효율성을 검토하였다. 이를 위해 전자뇌관의 특성과 장점을 최대한 살리기 위하여 각공을 발파하는 방식, 즉 1지발에 1공을 발파하는 방식을 채택하고 일반 뇌관과 전자뇌관으로 설계를 하여 각각의 발파효율을 비교하여 보았다. 그 결과 발파진동의 경우 기존뇌관을 이용하여 1공씩을 1지발로 발파를 한 경우에는 18~56%의 진동저감 효과가 있었고, 본선 설계에 의해 진행된 발파에 비하여는 최대 70% 이상의 진동저감 효과가 있는 것으로 나타났다.

핵심어 : 전자기폭시스템(Electronic Delay Detonator System), IC Board, Digital Timer

1. 서 론

1폭약의 폭굉력을 충분하게 발휘하기 위해서는 점화, 점폭, 전폭의 3단계 과정이 필요한데 이들 과정을 완벽하게 만족시켜 주는 역할을 하는 것이 바로 뇌관이다. 따라서 뇌관의 정밀성이 발파 효율을 증대시키는 데 있어 가장 중요한 요소라고 할 수 있다. 정밀성면에서는 MS(Milli Second)뇌관의 경우 20ms 또는 25ms의 정밀한 시차로 순차적으로 기폭함으로써 발파효율의 극대화과 소음 및 진동제어에 큰 효과를 이루었으나 최근 개발된 전자뇌관의 경우 자체 IC회로(Electronic Chip)를 내장하여 1~2ms의 초정밀시차(오차범위 0.2ms이내)의 구현이 가능해짐에 따라 이를 적절히 조합하여 설계함으로써 기존 뇌관에 비해 더욱 우수한 진동억

제(Vibration Control), 제어발파(Controlled Blasting) 효과의 극대화, 터널 외곽공 발파(Contour Blasting in Tunnel)에서 미려한 파단면의 생성에 따른 Shotcrete 타설량 감소와 주변암반의 손상영역 저감 등에 대한 효과가 있는 것으로 알려지고 있다.

특히, 도심지 발파와 같이 발파진동의 제어가 절대적으로 필요한 곳에서 현재 사용되고 있는 기존의 제어발파나 소량 발파보다 전자뇌관을 사용하여 발파함으로써 시공성 및 공사비 절감 면에서 월등한 효과를 거둘 수 있는 것으로 예상되고 있으며, 뿐만 아니라 미주전류 등에 의한 뇌관의 안전사고 발생 우려가 있는 터널에서 불특정 발생 사고를 사전에 방지할 수 있고, 터널 외곽공에 대한 손상 최소화, 파쇄도 향상으로 인한 작업 cycle의 단축 등을 통한 공기절감과 비용절감을 얻을 수 있을 것으로 기대하고 있다.

따라서 본 논문에서는 전자 기폭 시스템의 개요

1) (주)고려Nobel화약

2) 인하대학교

접수일 : 2004년 2월 16일

에 대하여 간단히 소개하고 외국의 터널현장에서 전자뇌관을 적용한 시공사례 및 성과분석을 토대로 국내 터널현장에서 시험 적용하여 전자뇌관 적용 효율성을 검토하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 전자기폭시스템 소개

1990년대 초반 전자 타이머에 의해 초 정밀시차로 특수한 용도로 사용하기 위해 개발된 전자뇌관(Electronic detonator)은 전 세계적으로 약 1,800만 개를 생산하여 전체 뇌관 소비의 약 2.5%를 차지하고 있으며 서구 유럽과 미국, 일본, 남아공 등에서 특수한 목적으로 사용되고 있다. 전자뇌관의 내부구조는 그림1 과 같으며 디지털 타이머로서 지연초시를 결정하는 IC회로를 뇌관 내에 내장하고 있다.

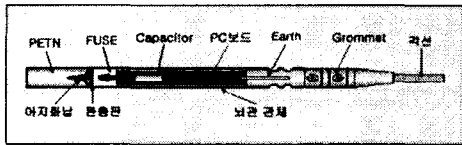


그림 1. 전자뇌관 내부구조

표 1. 전자뇌관 특성

뇌관규격	68.6 × 7.6 mm
Shell 재질	Al or Cu
작업온도범위	-40 ~ 70℃
시차범위	0~25,000ms
적용지연가능시차	1ms 단위 가능
내 정수압	3~8 bar
내 전자기성	10KHz~100GHz
내 정전기성	15KV
기 폭약	PETN, 아지화납

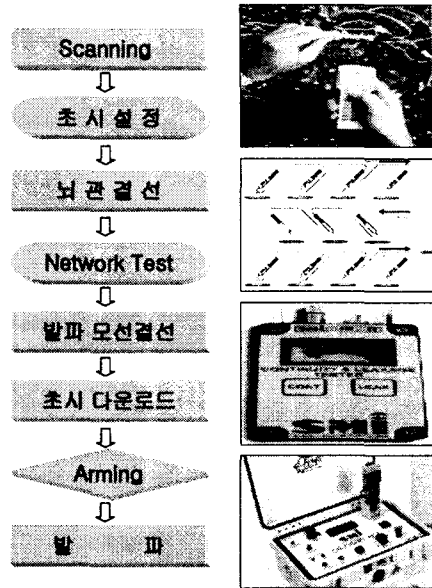
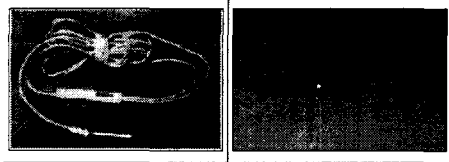


그림 2. 전자뇌관 작업순서

2.2 기존뇌관과의 차이점

현재 국내에서 가장 널리 이용되고 있는 전기식과 비 전기식뇌관과 전자뇌관과의 차이점은 아래 표 2와 같다.

표 2. 기존 뇌관과의 차이점

구 분	비전기뇌관	전기뇌관	전자뇌관
점화방식	충격파전달	전류전달	Signal
매 개 체	HMX	점화옥	퓨 즈
지연요소	화약성분	화약성분	IC 회로

정밀도 측면에서 기존 MS(Milli Second)의 경우 0.06~4.09ms, LP(Long Period)의 경우9.11~41.72ms 단차별 표준편차가 발생한 것에 비하여 전자뇌관은 0.2ms이내의 표준편차를 나타내어 허용오차범위(0.1~0.2ms)에서 벗어나지 않는 초 정밀시차를 구현하였다.

특히, 일반뇌관의 경우 특히 LP(DS)후단으로 갈수록 단차별 표준편차가 더욱 크게 나타나는 경향

이 있으나 전자뇌관의 경우 부여하는 단차에 관계 없이 허용 오차범위의 고른 초시 정밀도를 가지고 있다. LP뇌관 후단은 주로 터널의 최외곽부에 대부분 적용하고 있다는 사실을 고려할 때 시차 정밀도는 예정 굴착선의 미려도와 주변 암반 손상과 매우 밀접한 관계가 있음을 예상할 수 있다.

2.3 외국 터널현장에서 전자뇌관 적용사례

폭발에너지가 암반을 파괴하는 효과의 측정은 에너지가 극복해야할 효과적인 저항선과 직접적으로 비례하며 이러한 관계는 기초적인 발파설계의 결정적인 요소이다. 발파공 폭굉시간의 어떤 변화는 일반적인 점화시간의 전후에 발파공에 폭굉되는 결과를 나타내며 이것은 발파성능에 있어 발파로 인해 발생하는 충격파에 의하여 원하지 않는 방향으로 에너지를 발생시킬 수 있음을 의미한다.

일반적으로 터널발파에서 과도한 기폭초시 오차 및 잘못된 초시설정은 굴진율의 불량과 다량의 대괴 및 불완전 파쇄, 높은 진동레벨 및 폭풍압 생성, 비산으로 인한 시설물 파괴와 작업지면에 따른 경제적 손실등 다양한 형태로 문제점을 야기시키는 원인이 된다. 이미 외국에서는 초 정밀시차의 전자뇌관을 이용하여 아래 표 3과 같이 크게 4가지 용도로 활용하고 있다.

표 3. 전자뇌관의 용도

적용개소	기대효과
대규모 채굴광산	<ul style="list-style-type: none"> • 파쇄입도 조절 • 대규모 발파작업 수행
터널 발파	<ul style="list-style-type: none"> • 소음 및 진동제어 • 암반 손상권 저감 • 굴착 예정선 미려도 확보
제어 발파	<ul style="list-style-type: none"> • 소음 및 진동제어 • 굴착면 미려도 향상
도심지 발파	<ul style="list-style-type: none"> • 소음 및 진동제어

본 논문에서는 90년대 중반부터 본격적으로 전자뇌관을 터널에 적용한 일본의 시공사례를 간단히 소개하고자 한다.

(1) 전자뇌관의 Smooth blasting 효과

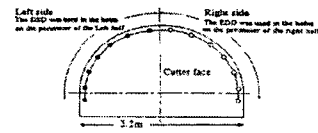
1) 카마이시(Kamaishi) 터널

암질은 세립화강암의 경질암반으로 구성되며 암석 물성치와 시험 요약은 아래 표 4와 같다.

표 4. 현장 암석 물성 및 시험개요

구분	내용
밀도(g/cm ³)	2.66
삼축 압축 강도(MPa)	300
인장강도(MPa)	12
영률(탄성계수)(GPa)	73
포아송비	0.24
P파 속도(m/s)	5800±100

시험개요도



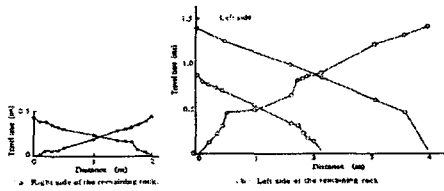
S·B공열에 대하여 동일막장에서 터널중심선을 기준으로 좌측부에 일반뇌관, 우측부에 전자뇌관을 적용하였다.

분석항목은 크게 2가지로 벽면 평활도와 갱내 탄성과 및 수평교아를 관찰하여 손상영역을 조사하였다. 그 결과 전자뇌관 적용부가 일반뇌관 적용부에 비하여 평활도 측면에서 약 1.67~2.5배 증가하였으며 갱내 탄성과 탐사에 의한 손상도 조사결과 손상깊이가 각각 10cm와 30cm로 나타났다.

표 5. 터널 벽면부의 평활도 비교 결과

구분	Half cast factor
A 등급	75~100 %
B 등급	50~75 %
C 등급	25~50 %
D 등급	0~25 %

측정 결과	좌측반	0% 25% 50% 75% 100%			
		[Progressive bar chart showing B, C, D categories]			
측정 결과	우측반	0% 25% 50% 75% 100%			
		[Progressive bar chart showing B, C, D categories]			



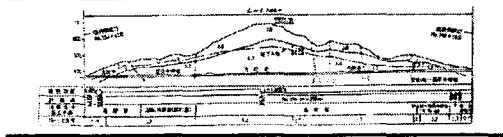
(a) 전자뇌관 적용부 (b) 일반뇌관 적용부
그림 3. 갱내 탄성과 탐사 결과

2) 마쓰노키(Masnokki) 3호터널(국도108호)

본 지역의 지질은 제3기 중신세의 명천층에 관입된 유문암 및 제 4기홍적세의 미고결퇴적물로 구성되어 있으며 터널부 약 70%구성 암종은 경질의 유문암층이다.

표 6. 현장 암석 물성 및 지질개요

구 분	내 용
밀 도	2.29~2.40g/cm ³
압열인장강도	16~38 kg · f/cm ²
일축압축강도	221~312 kg · f/cm ²
P파 속도	3.42~4.6 m/s



본선의 총 80m구간에 대하여 S·B공열에 일반 뇌관과 전자뇌관을 이용하여 12~24회씩 교대로 발파를 수행하여 여굴량 감소에 따른 슛크리트 절감 및 주변암반 손상영역 저감효과를 검증하기 위하여 실시하였다.

비교 시험결과 단면의 미려도 기준인 천공자국 길이는 일반발파에 비하여 전자발파가 1.43~225배 증가하였고 여굴량은 86~95%수준으로 전체 슛크리트 타설량을 5~9%절감 하는 효과가 있었다.

또한, 암반 손상권을 파악하기 위하여 갱내 탄성 파탐사를 수행한 결과 동일지반조건에서 일반발파에 비하여 전자발파의 손상깊이가 44.4%~70.0% 수준으로 전자뇌관사용에 따라 암반열화를 최대한 억제시키는 효과가 있었다.

표 7. 여굴량 및 슛크리트 타설량 비교

발파방법 (지보공No.)		천공자국 길이(cm)	여굴량 (m ³)	타설량 (m ³)
비교 시험 #.1	일반발파	7.3	5.5	6.1
	전자발파	277.0 (3.79)	5.2 (0.95)	5.8 (0.95)
비교 시험 #.2	전자발파	292.0 (22.5)	4.0 (0.87)	5.3 (0.93)
	일반발파	13.0	4.6	5.7
비교 시험 #.3	일반발파	210.0	6.8	6.9
	전자발파	300.3 (1.43)	5.9 (0.86)	6.3 (0.91)

표 8. 갱내 탄성과 탐사 비교결과

시험구간 지보공(No.)	발파 방법	Vp (km/sec)	손상영역 (m)
P - 1 (1270 - 1293)	일반발파	3.4	0.81
	전자발파		0.36
P - 2 (1293 - 1320)	일반발파	4.0	0.49
	전자발파		0.70

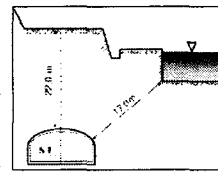
(2) 전자뇌관에 의한 진동 및 소음절감효과

1) 나가노현 터널(국도19호선)

총연장 695m, 단면적 약76m²로 NATM공법으로 굴착하였고 터널의 중앙 상부 약 17m지점에 43년 경과한 공동 저수장이 있으며 갱구로부터 50m부근에 민가가 산재해 있다.

표 9. 시험적용 초시 및 최대 지발당 장약량

구 분	내 용	
허용기준	1.96cm/s	
심발	약량	0.5kg
	초시	20ms
확대	약량	0.4kg
	초시	40ms



지반진동 측정결과 전자발파와 일반발파의 수직 성분을 비교하면 심발부에서 약 80%, 확대부에서 약 30%의 진동저감 효과를 얻었다.

표 10. 일반발파와 전자발파의 계측치 비교

공법	측점	거리 (m)	성분	측정결과		(dB)
				진동속도 (cm/s)		
				심발부	확대부	
일반 발파	1	56.7	X	0.551	0.149	76
			Y	0.640	0.121	
			Z	0.569	0.165	
	2	69.1	X	0.249	0.092	76
			Y	0.327	0.139	
			Z	0.533	0.128	
전자 발파	1	57.8	X	0.124	0.075	71
			Y	0.142	0.139	
			Z	0.121	0.110	
	2	71.1	X	0.050	0.053	71
			Y	0.094	0.094	
			Z	0.098	0.090	

2) 국도184호 선형개량공사(터널)

터널구간은 고생층 분포지역으로 중생대 유라기에서 퇴적한 지층으로 갱구부근의 풍화대 및 파쇄대를 제외하면 고결도가 높은 부암 및 점판암으로 구성되어 있다. 인근에 민가가 있어 갱구로부터 약 200m구간은 상반 선진 Shot-bench 기계굴착으로 시공하였다. 비교시험을 위하여 일반발파와 전자발파를 3회씩 교대로 수행하였다.

표 11. 표준 발파패턴

구분	내용
굴착 단면적	73.374m ²
지보 패턴	C1
1회 굴진장	1.5m
총 천공수	160공
총 장약량	120kg

발파 후 계측된 변위속도 data를 등거리(100m) 지점에 대한 변위속도로 환산하면 일반발파에 의한 평균치는 0.247kine, 전자발파는 0.12kine으로 일반발파에 비하여 전자발파에서 51.4%의 진동감

소효과가 있었다.

표 12. 표준 발파패턴

시험번호	측정점	거리(m)	변위속도(kine)
DS-2	측점1	103.0	0.089
	측점2	129.0	0.161
	측점3	157	0.058
DS-3	측점1	106.0	0.364
	측점2	132.0	0.163
EDD-1	측점1	101.5	0.073
	측점2	127.5	0.096
	측점3	155.5	0.021
	측점4	165.5	0.055
	측점5	256.5	0.017
EDD-2	측점1	104.5	0.121
	측점2	130.5	0.114
	측점3	158.5	0.021
EDD-3	측점1	107.5	0.097
	측점2	133.5	0.056

1종 방음벽의 동일조건에서 전자발파가 일반발파에 비하여 6~12dB의 소음레벨 감소 효과가 있었다.

표 13. 표준 발파패턴

시험번호	측정점	폭원거리 (m)	소음레벨 (dB)	비고	
일반 노 관	No.1	측점5	255.5	105	방음벽1종
		측점6	381.0	-	
	No.2	측점5	258.0	101	방음벽1종
		측점6	384.0	61	
	No.3	측점5	261.0	100	방음벽1종
		측점6	387.0	62	
No.4	측점5	-	89	방음벽2종	
	측점6	-	-		
No.5	측점5	-	92	방음벽2종	
	측점6	-	-		
No.6	측점5	-	34	방음벽2종	
	측점6	-	-		
전 자 노 관	No.1	측점5	256.5	93	방음벽1종
		측점6	382.5	-	
	No.2	측점5	259.5	95	방음벽1종
		측점6	385.5	60	
	No.3	측점5	262.5	91	방음벽1종
		측점6	388.5	60	

2.4 국내 터널현장에서 전자뇌관 적용사례

(1) 현장개요

본 연구의 대상현장은 강원도 양구군 양구읍 응진리에 위치하는 현장으로 주요 구성암은 크게 호상 흑운모 편마암류와 화강편마암류로 구성되어 있었으며 예상 발파 위치 약 20m의 구간에서 그 암반의 불성시험을 실시해본 결과 슈미트 해머에 의한 현지암반 강도는 695~1,350 kgf/cm²로 측정되었으며, 시험구간에서의 RQD 값은 73~100%로 매우 우수한 것으로 나타났다. 또한 일축압축강도의 경우 650~1,140 kgf/cm²로 그 범위가 크게 조사되었는데, 이는 일부 흑운모가 녹니석화가 되어 부분적으로 압축강도가 낮게 나왔다. 탄성계수는 4.43×10⁵kgf/cm², 탄성파속도는 P파의 경우 약 4,700m/s, S파는 약 2,700m/s를 보였다. 비중은 약 2.61로 조사되었으며, 전체적으로 RMR 값을 얻어 1등급을 얻을 정도로 암질이 우수한 것으로 나타났다. 위에서 나타난 물성치를 조사하기 위한 시료채취는 20m 구간을 선진 보링하여 얻어진 시료를 근거로 시험하였다. 다음의 각각의 그림들은 시험구간의 지질도 및 굴착진행 단면도, 선진보링, 불성시험 장면을 나타낸 것이다.

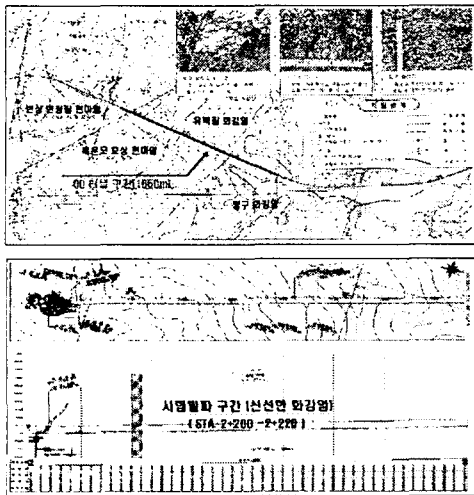


그림 4. 현장 지질도 및 굴착 진행단면도

(2) 시험발파 제원

1) 시험개소 실내암석실험 및 현장시추조사

선진 보링한 코어의 분석결과 RQD 값은 73~100으로 매우 양호하였으나 실내시험 결과는 암반의 녹니석화에 따른 강도 열화양상을 보였고, 현장 RMR은 평균 82점으로 양호하였다.

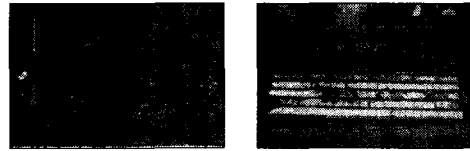


그림 5. 선진 시추 보링작업과 RQD 측정

표 14. 실내 암석시험 결과

구 분	측 정 값	실내실험
일축압축강도 [kgf/cm ²]	875 ± 265	
압열인장강도 [kgf/cm ²]	73 ± 11	
탄성계수(×10 ⁵) [kgf/cm ²]	4.43 ± 2.2	
탄성파속도 [km/sec]	Vp 4.73 ± 0.75	
	Vs 2.71 ± 0.45	
동포와송비	0.26 ± 0.02	

2) 사용 화약류 현황

본 시험에서는 뇌관의 종류 및 정밀성에 의한 발파진동의 제어효과 측면을 검토해보기 위한 것이기 때문에 기본적으로 사용된 화약류의 종류는 같은 것으로 일률적으로 적용하였다. 현장 암반이 경질암인 것을 감안하여 지질조건에 맞는 Emulsion계열 폭약을 사용하였고 터널 외곽의 미려한 단면 형성을 위하여 정밀폭약 1호를 조합하여 장약 하였다. 다음 표15와 16은 현장시험에 사용된 폭약류의 제원 및 특성을 요약한 내용이다.

표 15. 사용 화약류 특성

제품명	폭속 (m/s)	비중 (g/cc)	에너지 (Kcal/kg)	가스량 (l/kg)
Super Emulsion	5,800	1.28	1,398	675
정밀폭약 1호	4,200	1.20	870	900



표 16. 사용 뇌관류 특성

제품명	뇌관번호	Type
Nonel MS	#3~20	공저뇌관
Nonel LP	#6~60	공저뇌관
Nonel Bunch Connector	Series	표면뇌관
Konel MS	순발	Starter
전자뇌관(UniTronic 215)	번호없음	공저뇌관



그림 6. 사용 뇌관 형상

3) 천공 및 발파패턴 요약

동일한 압질조건 및 동일 천공패턴과 장약량으로 일반뇌관과 전자뇌관을 사용한 비교결과를 얻고자 동일한 심발공법으로 뇌관만을 달리하여 연속으로 발파를 실시하였다. 전자뇌관을 이용한 패턴이 1지발 발파라는 점을 고려하여 비 전기발파에서도 다단설계로 1지발기폭을 원칙으로 하였다.

전자뇌관은 심발부, 확대부, 전열부 바닥부는 공당 30ms의 단차를 적용하였고 최외곽부는 공당 10ms의 시차를 부여하여 원칙적으로 단공발파로 수행하였다.

표 17. 발파패턴 요약

구분	비교시험. 1		비교시험. 2	
	비전기	전자	비전기	전자
시험회수	1 회	1 회	1 회	1 회
심발방법	Supex-cut		Cylinder-cut	
천공직경	Φ 45mm		Φ 45mm(장약공), 102mm(무장약공)	
단면적	75.64 m ²		75.64 m ²	
굴착량	264.74 m ³		264.74 m ³	
비장약량	0.932 kg/m ³		1.115 kg/m ³	
천공수	142 공		147 공	

(3) 시험발파 결과

1) 파쇄입도 비교

파쇄암석을 아래 그림7과 같이 디지털 이미지로 변환하여 입도분포를 비교하였다.

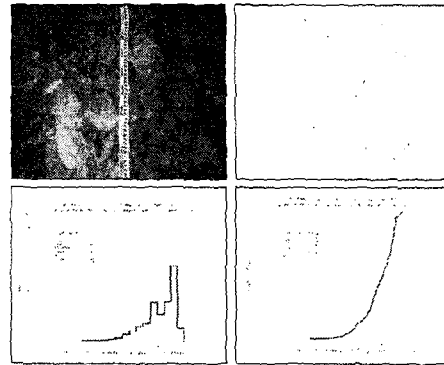


그림 7. Wipfrag 프로그램을 활용한 입도분석결과

표 18. 파쇄입도 분석결과

구분		최소 (m)	최대 (m)	평균 (m)	표준 편차	D50 (%)	D90 (%)
비교 시험.1	일반	0.013	0.457	0.201	0.100	0.179	0.308
	전자	0.007	0.233	0.115	0.053	0.102	0.161
비교 시험.2	일반	0.008	0.396	0.201	0.102	0.177	0.320
	전자	0.010	0.388	0.170	0.089	0.148	0.291

· D50 : 파쇄암 전체무게의 50%를 통과한 입자의 크기
· D90 : 파쇄암 전체무게의 90%를 통과한 입자의 크기

일반뇌관 사용 시에 비하여 전자뇌관 사용 시 40% 이상의 평균 파쇄도 향상효과가 있으며 전체 중량 대 입도 환산 측면에서도 최대 50%의 파쇄도 향상 효과가 있었다. 일반뇌관 사용 시에 비하여 전자뇌관 사용 시 40% 이상의 평균 파쇄도 향상효과가 있으며 전체 중량 대 입도 환산 측면에서도 최대 50%의 파쇄도 향상 효과가 있었다.

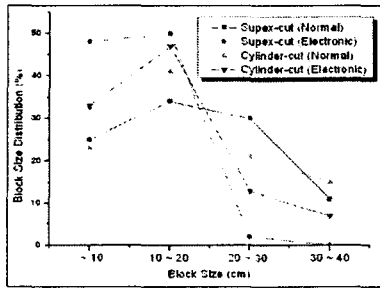


그림 8. 입도비교 분석결과

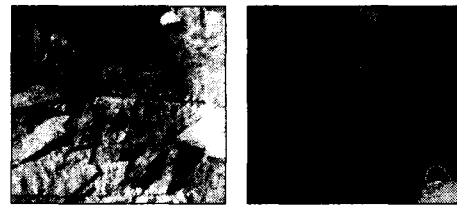
2) 굴착 예정선 미려도 및 여굴량 비교

발파굴착 후 파단면 미려도를 평가하는 판단 기준의 하나로 H.C.F(Half Cast Factor)가 있으며 이는 육안으로 관측된 외곽공의 천공흔적을 실측하여 전 천공장의 비로서 환산해 주는 것이다. H.C.F의 값이 높을수록 원할한 파단면이 형성되었다는 것을 알 수 있다. H.C.F는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$H.C.F = \frac{\text{남아있는 천공흔적길이의 합}}{\text{실제천공된길이}} \times 100 (\%)$$

표 19. Half Cast Factor(%) 측량 결과

구 분	H · C · F (%)			평균 (%)	
	천반	좌측	우측		
비교 시험.1	일반 발파	55.26	71.05	57.89	65.50
		63.16	71.05	63.16	
	전자 발파	97.37	65.79	65.78	
		92.11	73.68	84.21	
비교 시험.2	전자 발파	92.11	100.0	81.58	88.01
		89.47	81.58	89.47	
	일반 발파	81.58	89.47	84.21	
		76.32	78.95	94.74	
비교 시험.2	전자 발파	89.47	94.74	86.84	86.26
		68.42	57.89	63.16	
	일반 발파	50.00	57.89	76.32	
		63.16	73.68	71.05	



(a) 일반 (b) 전자

그림 9. 파단면상태

또한, 광파기를 사용하여 굴진장 및 여굴 발생량을 계측하였다.

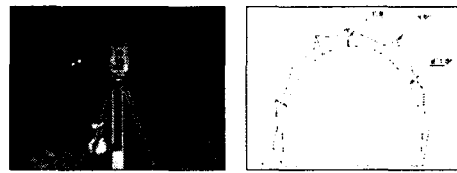


그림 10. 여굴 발생량 계측

3) 발파효율 비교

굴진율의 측정 결과 전자뇌관의 적용시 일반뇌관보다 3~4% 이상의 굴진율이 증가하였다. 굴진율은 발파효율을 평가하는 가장 기본적인 척도라는 측면에서 초 정밀시차로 순차적으로 기록하는 전자뇌관이 상대적으로 우수한 굴진효율을 나타냈다.

표 20. 굴진장 측정결과

구 분	굴진장 (m)					평균 굴진율 (%)	
	심발	좌측	우측	천반	평균		
비교	일반발파	3.8	3.4	3.2	3.4	3.45	90.79
시험.1	전자발파	3.8	3.6	3.4	3.6	3.60	94.74
비교	전자발파	3.8	3.4	3.4	3.6	3.55	93.42
시험.2	일반발파	3.8	3.4	3.3	3.3	3.45	90.79

4) 지반 진동 비교

진동분석결과 전자뇌관으로 발파시에 동일조건 의 비전기뇌관 발파보다 0.13~0.71kine (18~56%)

의 진동저감을 가져왔으며, 일반적으로 시행되는 현행 제발발파에 비해 최대 13kine(70%)의 진동이 저감되었다.

표 21. 지반진동 계측결과

구 분	거리 (m)	최대 지발당 장약량(kg)	진동속도 PVS(cm/s)	
비교 시험.1	일반 발파	2.56	108	0.73
			128	0.67
			150	-
			170	0.51
			192	0.47
			212	0.29
			232	-
	전자 발파	2.56	112	0.60
			132	0.51
			154	-
			174	0.42
			196	0.35
			216	0.29
			236	0.27
비교 시험.2	전자 발파	2.56	115	0.56
			135	0.52
			159	0.31
			179	0.55
			199	0.50
			219	0.29
			239	0.37
	일반 발파	2.56	80	1.27
			100	0.91
			120	0.89
			140	0.51
			160	-
			200	0.18
			220	0.37

감쇄지수 n값의 경우는 진동의 역전현상으로 전자뇌관이 적게 측정되었으나, 반면 입지상수 K값의 경우는 평균 60%의 감소효과를 보였다.

3. 결 론

초 정밀시차로 기폭하는 전자뇌관을 터널현장에 적용한 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 파쇄도 및 굴진효율 측면에서 일반발파에 비하여 40% 이상의 평균 파쇄도 향상 및 3~4% 이상의 굴진효율의 증가효과는 전자뇌관의 정확한 초시에 의해 순차적으로 발파가 완벽히 이루어져 공내 폭발 에너지가 암반파쇄에 이상적으로 분배되었다고 판단된다.

(2) 탄성과 탐사를 수행한 결과 전자발파가 일반 뇌관 적용시에 비하여 25%이상의 소성영역이 감소되었고, 굴착면 미려도 판단기준의 하나인 Half Cast Factor 측정 결과에서도 86%이상의 완벽한 파단면 생성결과를 얻었다. 이는 초 정밀시차에 의한 동시 제발효과로 최외곽 공간의 완벽한 인장파괴를 일으킨 결과로 사료되며 동시지발효과(8ms이하로 알려져 있음)를 내지 않는 범위(본 연구에서 10ms적용)라면 매끄러운 파단면 생성이 가능하며 동시에 이완영역에 대한 범위도 경감할 수 있다고 판단된다.

(3) 지반진동제어 측면에서 장약량, 발파패턴, 지연시차 등 발파 조건이 비슷한 상황에서 일반뇌관을 사용한 것보다 전자뇌관을 사용하여 발파를 한 경우에 진동 레벨이 18~56% 정도 낮게 나타났다. 또한, 기존 본선 발파패턴으로 3~5공씩 묶어 제발 발파를 실시한 경우에 대해서는 약 70%까지 진동 제어 효과가 있는 것으로 나타났다.

초시 설정은 해당 암질에 대하여 단발공 시험 및 실 규모 시험을 통하여 결정하는 것이 상례이나 본 연구에서는 주로 일본학회에서 발표된 결과(31ms 또는 59ms가 가장 효과적)를 토대로 하여 30ms씩(외곽부는 10ms) 지연단차를 일률적으로 부여하여 시험발파를 수행하였다.

또한, 보다 효율적인 전자뇌관 적용을 위해서 이번 연구에서 수행하지 못한 전자뇌관의 초시 특성에 맞는 최적 발파 패턴의 개발과, 노천 및 시가지 등의 제어발파에의 적용성, 그리고 전자뇌관의 국내 적용시 경제성·효율성 평가 등에 대한 검증이 향후 주어진 과제라 할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Yoshiharu Tanaka , Masayuki Yamamoto, 1997, 전자 지연뇌관에 의한 Smooth Blasting의 손상영역의 실험적인 연구
2. 저소음, 저진동 굴착공법, 터널과 지하(日本) 제 24권 제4호, 1993
3. Szkki Yutaka, 1996, 터널 시공에 따른 제어발파 (EDD)뇌관 施工報告
4. 전자 지연식 뇌관에 따른 터널 제어발파시험, 第 22回 日本道路會議, 一般論文集(B)日本道路協會 pp.152-153, 1997
5. 전자 지연식 뇌관을 이용한 터널 발파진동의 파형적 특징, 相木學會 第 53回 年次 學術學會, 土木學會 1998
6. 田中義晴 외, 1995, 스무스플러스티그에 전자 지연식雷管を用いた場合の損傷領域に開す實驗的研究, Kayaku Gakkaishi, Vol. 56, No.1
7. 小出忠男電 外, 子雷管を用いた家室内の低周波音對策の檢討
8. 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スプラスティグの 効果國道108号改良工事 松の木3号トンネル, 터널과 지하.
9. Sasol Co. Ltd. Sasol Explosives Catalogue. 2002. The Republic of South Africa.