

# 에멀전계 벌크폭약을 이용한 시공사례와 향후 전망

김희도 · 최성현<sup>1)</sup>

## 1. 서론

일반적으로 벌크폭약이란, 날개 단위의 포장 공정을 거치지 않은 상태의 화약류를 말하며 벌크폭약에는 기존에 국내 대규모 석산에서 일반적으로 사용하는 ANFO(Ammonium Nitrate Fuel Oil)와 터널 및 노천 광산에서 사용되는 Emulsion계열로 구분된다.

벌크 에멀전 폭약(Bulk-Emulsion explosives)은 크게 노천용과 터널용으로 구분되며 노천용 벌크 에멀전은 ANFO와 에멀전의 혼합물로 이루어진 벌크폭약으로 주로 수공에서 사용할 수 없는 ANFO의 단점을 극복하면서 위력을 증가시켜 발파효율을 극대화할 수 있다는 장점을 가지고 있으며 터널용 벌크 에멀전은 기존의 카트리지형 에멀전에 조성비를 변화하여 유체와 같은 유동성을 부여함으로써 기계화 장전 시스템을 이용하여 직접 공내로 주입되는 에멀전계 폭약을 말한다.

또한, 벌크 에멀전과 관련한 기계화 장전시스템도 나날이 발전하여 노천 발파현장에서 화약재료 차량을 이용하여 운반하고 현장에서 즉시 혼합하여 장약을 수행하는 SME system(Site Mixed Emulsion system)과 터널 발파현장에서 장약과정에 예감성을 부여하여 폭약이 되는 SSE system (Site Sensitized Emulsion system)등이 있다.

특히, 터널용 Bulk-Emulsion system은 미주나 서구 유럽등지의 발파분야에 있어 선구적인 역할을 수행하여 왔던 나라에서는 이미 보편화된 시스템으로 최근 국내에도 보급되어 점차 보편화 단계에 와있다. 터널용 Bulk-Emulsion system은 제조, 저장, 운반 및 사용에 있어서 극히 안전하고 장전밀도를 증가시켜 효과적인 파쇄와 굴진을 향상을 기대할 수 있으며 발파 후가스가 매우 양호한 것을 비롯하여 기계화 장전에 따른 시공 능률 향상과 작업 안전성 강화 등 많은 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 터널 발파용 벌크 에멀전의 개념과 시공사례를 통하여 향후 국내 터널굴진에 사용되는 벌크 에멀전 폭약의 전망과 문제점에 대해서 알아보하고자 한다.

핵심어 : Bulk Emulsion, 기계화 장전시스템, SME system, SSE system

## 2. 본론

터널 굴진용 폭약으로 최근까지 가장 많이 사용된 니트로글리세린 계열 폭약은 폭속과 맹도 등 동적 위력이 커서 굴진효율이 양호한 반면, 제품의 원료성분 자체가 폭발성 물질로 안정성이 떨어지고 니트로기에 의한 폭발 화학반응에 의해 질소 화합물 등의 유독가스 배출이 심하고, 지반진동을 과다하게 야기시키며 이에 따른 구조물 안전에 위험을 초래하는 등 시공 능률면이나 환경측면에서 매우 불리한 요소가 많아 이미 전 세계적으로 토목시공(Civil Engineering)분야에서 그 사용량이 급격히 감소하고 있으며, 에멀전 계열의 폭약으로 대체되고 있는 추세이다.

특히, 기계화 장전시스템을 도입한 벌크형 에멀전폭약의 경우 취급 사용에 따른 에멀전계 폭약의 안

1) 주식회사 고려Nobel화약

전성 측면을 더욱 높이고, 아울러 공내 밀장전에 따른 폭력 손실을 최소화하여 굴진 및 암 파쇄효율을 증대시키고, 작업의 편리성을 높인 미래형 터널 폭약장전 시스템이다.

본 연구에서는 터널용 벌크 에멀전의 특성 및 이를 활용한 설계방법과 시공사례를 중심으로 소개하고자 한다.

## 2.1 터널용 벌크 에멀전 폭약

### 가. 벌크 에멀전 폭약 특징

터널용 벌크폭약의 특징은 아래와 같이 요약할 수 있다.

벌크 에멀전 폭약 (Bulk-Emulsion explosives)이란 포장하지 않은 상태에서 기계화 장전 시스템 (PLC1000)에 장착된 장전호스를 통하여 직접 장약공으로 주입되는 벌크형태의 에멀전계 폭약을 말한다. 미주나 서구 유럽등지의 발파분야에 있어 선구적인 역할을 수행하여 왔던 나라에서는 이미 보편화된 시스템으로 ANFO 다음으로 노천이나 터널등지에서는 가장 보편화된 장전 System이다. Bulk-Emulsion system은 원료가 기본적으로 비폭성 물질의 혼합물로서 제조, 저장, 운반 및 사용에 있어서 극히 안전하다. 또한, 기폭을 위하여 반드시 Primer(카트리지 형 Emulsion이나 Dynamite)가 있어야 완전한 기폭이 이루어진다. 그리고, 벌크에멀전은 공당 장전밀도를 증가시켜 천공수가 감소하고 효과적인 파쇄와 굴진을 향상을 기대하는 장점이 있다. 또한, 발파 후 가스가 매우 양호한 것을 비롯하여 기계화 장전에 따른 시공 능력 향상과 작업시 안전성을 강화한 시스템이다. Bulk 폭약의 성분은 Emulsion 폭약의 Matrix와 대부분 동일하며, 제품 생산과정에서 포장 공정을 거치지 않고 치약형의 벌크상으로 출시한다. 기존의 포장 카트리지 제품보다 30% 가량 가격이 저렴하고, 천공내 100% 밀장전이 가능하여 발파 효율을 극대화하며, 5m까지 장공굴착이 가능하게 되었다. 기계화 장전 시스템으로 부분별 장전 밀도 조절은 HRU system이라는 장치를 이용하여 가능하게 되었다.

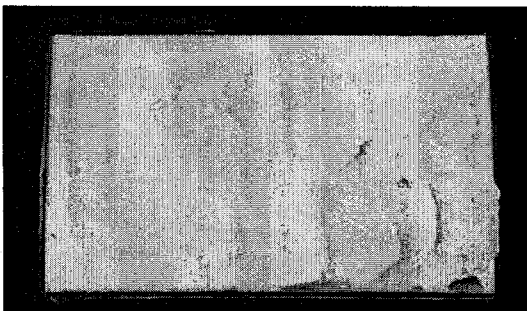


그림 1. Bulk Emulsion 제품 형상



그림 2. Bulk Emulsion 장전차량(터널용)

### 나. 벌크 에멀전 폭약 특성치

표 1. 제품성능

제품명	폭속 (m/sec)	가비중 (g/cc)	폭발열 (kcal/kg)	낙추감도 (cm)	가스량 (ℓ/kg)	내한성 (℃)	내수성
New Emulite1000	5,500	1.20~1.25	690	100	976	-20	최우수

표 2. 포장규격

제품명	포장형태	용도
New Emulite1000	150 / 200 / 300 (kg/barrel)	터널용

다. 기존 카트리지형 폭약과 벌크 에멀전 폭약 비교

표 3. 제품별 장·단점 비교

구분	Cartridge Type		Bulk Emulsion 폭약 (Bulk Type)
	Emulsion 폭약	NG계	
특징	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 운반 및 취급 안정성 우수</li> <li>• 암질의 변화에 따른 적용성 우수</li> <li>• 내수성 최우수</li> <li>• 소음·진동 저감</li> <li>• 다양한 포장 형태</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 전폭성 우수</li> <li>• 고비중 폭약으로 파쇄 효과 우수</li> <li>• 내수성 우수</li> <li>• 암질의 변화에 따른 적용성 우수</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 높은 장전밀도로 발파 효율 및 파쇄도 향상</li> <li>• 기계화 장전 System</li> <li>• 운반 및 취급 안정성 우수 ⇒ 전폭약 필요</li> <li>• 암질의 변화에 따른 적용성 우수</li> <li>• 내수성 최우수</li> </ul>
단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사압 가능성 내재</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지하발파에 부적합 (발파후가스 불량, NOx)</li> <li>• 운반 및 취급 위험</li> <li>• 소음·진동에 극히 불리</li> <li>• 암반 Damage zone 확대</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 전체 비 장약량 증가</li> <li>• 기계화장전System의 Operator 숙련도 요구</li> </ul>

표 4. 기존 카트리지형 에멀전 폭약과의 차이점

차이점	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기존 카트리지 타입에 비하여 기폭 안전성을 향상시켜 전폭약포를 사용하여야만 기폭이 가능함.</li> <li>• 기존 카트리지 타입에 비하여 폭속 및 폭발에너지는 다소 낮으나 밀장전에 따른 공내 폭력의 공극 상쇄 효과가 적어 잔류공이 거의 없는 매우 우수한 굴진율과 파쇄 효율성이 있음 ⇒ 기존 포장형 폭약이 장약시 천공경과 약경의 차이에 따라 불가피하게 발생하는 공극에 의한 폭력 손실율은 밀장전시에 비하여 30~80%임.</li> <li>• 벌크타입은 자동 장전시스템을 이용하므로 작업원의 장전오차를 최소화할 수 있음</li> </ul>
-----	--

표 5. 후가스 및 가시도

구분	폭약류					
	Bulk Emulsion			NG 계열		
후가스	CO	5분후	140 ppm	3~4 l/kg	600 ppm	5~6 l/kg
		15분후	110 ppm		400 ppm	
	NO <sub>x</sub>	5분후	7 ppm	0.5~1 l/kg	-	5~6 l/kg
		15분후	5 ppm		20 ppm	
가시도		155 m			120 m	

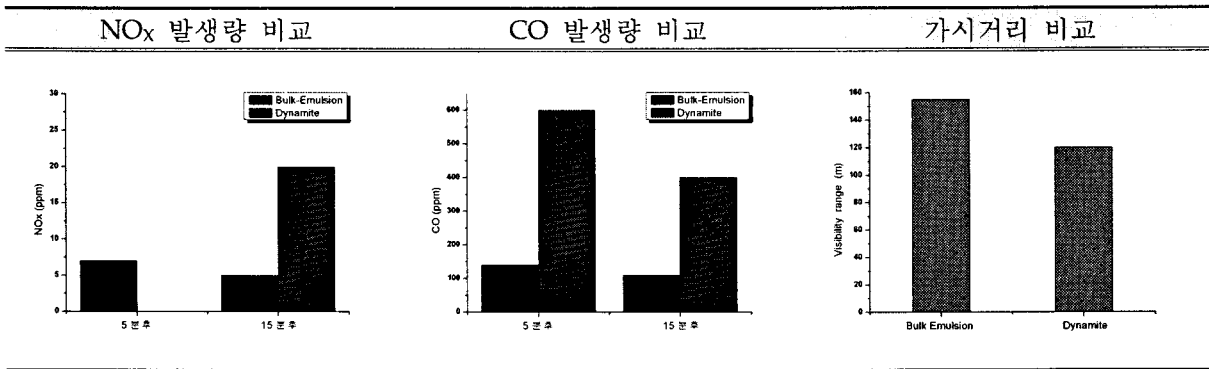


그림 3. NG계와 Bulk Emulsion의 발파 후 가스 및 가시거리 비교

라. Bulk Emulsion폭약의 현장적용

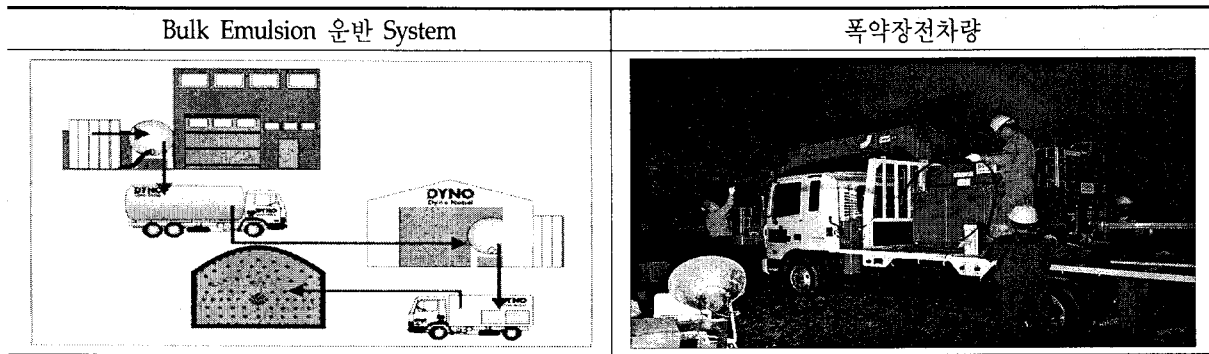


그림 4. 폭약의 공급방식 및 장전차량

마. 부분별 장전밀도 조절

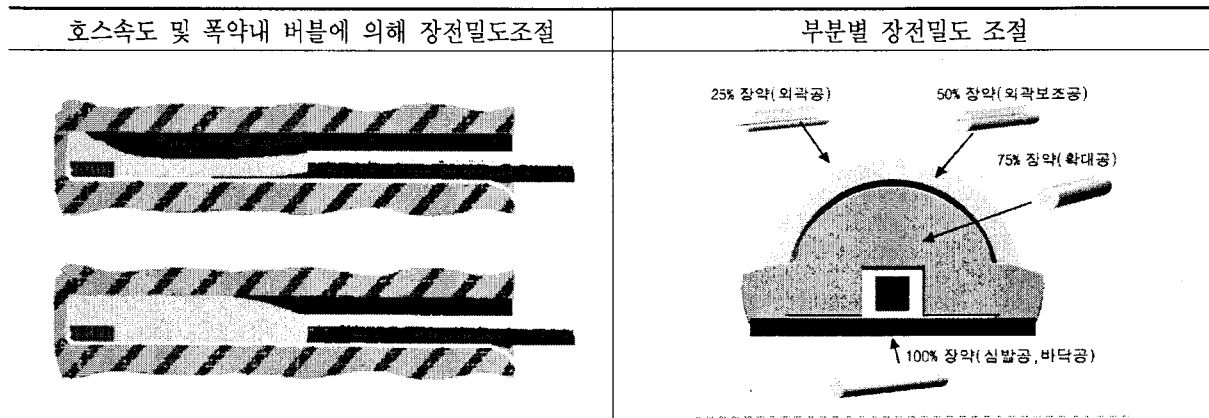


그림 5. 부분별 장전밀도 조절

바. 현장 적용 순서

1) 천공완료	2) 장전준비	3) 상부장약
		
4) 하부장약	5) 결선작업	6) 발 파
		

그림 6. 현장 적용 순서

사. Bulk Emulsion 위력 증대요인

현재 국내에서는 터널용 산업폭약 중 카트리지형의 경우 크게 2분류로서 NG계열의 Dynamite와 경암 이상의 터널조건에 적합하도록 제작된 Emulsion계열의 폭약이 사용되고 있다. 폭약의 위력을 결정하는 1차적인 분류에는 폭발에너지(발생열량)와 가스량, 폭발 속도 등의 기본 요소의 상호 복합적인 작용과 폭약의 약경, 장전밀도와 같은 응용요소에 의해 결정된다. 특히, 동일한 폭약을 적용한 경우 공당 장전밀도를 증가시킬 경우 또는 폭약경을 증가할 경우 공내 폭압을 대폭 증대시킬 수 있다고 보고되고 있다. 상기효과는 터널의 최외곽부나 암반사면의 절취부에 천공구경에 비하여 작은 직경의 폭약을 적용하여 폭압을 공기층과 상쇄시킴으로서 모암층 및 암반 손상권을 줄이는 제어발파의 용도로 적용되기 한다. 이는 터널의 경우 Smooth blasting, 사면 절취부의 경우 Pre-splitting이 대표적으로 활용되는 공법이다. 이와는 상반되는 목적으로 터널의 심발부 및 확대부, 바닥부는 굴진효율의 증대를 목적으로 가급적 집중장약의 형태로 장전하여야 하며 장전부의 공극형성은 우수한 파쇄 및 굴진율을 저해하는 대표적인 요소로서 작용하게 된다.

표 6. De지수와 공내 작용폭압과의 관계

사용 약폭의 직경에 따른 폭력 저감				De지수와 공내 작용폭압과의 관계
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 관련식 : <math>Decoupling\ Index\ (D_e) = \frac{\text{발파공의 직경}}{\text{폭약의 직경}}</math></li> <li>• 천공경 <math>\phi 45\text{mm}</math>에 대하여 <math>\phi 32\text{mm}</math>와 <math>\phi 36\text{mm}</math>의 직경을 갖는 약포를 충전하는 경우 De지수는 각각 1.4와 1.25 정도임</li> </ul>				
폭약직경	Decoupling지수	공내폭압	(B),(C)/(A)	
$\phi 45\text{mm}$ (A)	1.00	$2.75 \times 10^4$	100 %	
$\phi 32\text{mm}$ (B)	1.40	$0.90 \times 10^4$	32.7 %	
$\phi 36\text{mm}$ (C)	1.25	$1.50 \times 10^4$	54.5 %	

또한, 천공직경( $\phi 45\text{mm}$ )에서 약경에 따른 충전비율을 비교하면 아래와 같다.

표 7. 천공직경과 장약경의 충전비율

폭약직경	$\phi 25\text{mm}$	$\phi 32\text{mm}$	$\phi 34\text{mm}$	$\phi 36\text{mm}$
폭약 충전 개요도				
충전밀도	0.5 kg/m	0.8 kg/m	1.05 kg/m	1.25 kg/m
Bulk대비	중량비 26.3%	중량비 42.1%	중량비 55.3%	중량비 65.8%

상기 비교는 장약장 1m에 대하여 Bulk Emulsion으로 100%충진하였을 경우와 대비표이다. 참고로 Bulk대비 카트리리지 폭약의 중량비는 Bulk m당 장약량 1.9kg 대비 중량 %이다

## 2.2 Bulk Emulsion 시공사례

### 가. 국내 터널 시공사례

터널현장에서 에멀전계 벌크폭약의 적용은 2001년부터 개발 및 현장공급이 시작되어 고속도로와 일반국도 및 철도터널 현장에서 시험발파와 본발파 작업을 수행해오고 있으며, 현재까지 대형장대터널 현장이나 지하공간 확보를 위한 터널현장에 설계와 시공이 이루어지고 있다. 또한, 공사기간 단축과 장공발파에 따른 시공효율 극대화를 위하여 현재 벌크에멀전 시스템의 반영이 광범위하게 이루어지고 있으며 향후 전망도 밝을 것으로 예상된다.

표 8. 터널용 벌크에멀전 시공사례

공사명	제품명	공급기간	적용영역	비고
경부선 선형개량 공사	NE1000	2001	전체	
중부내륙고속도로 9공구	NE1000	2001~2002	전체	
대구-부산고속도로 7공구	NE1000	2002	전체	
영월-정양간 도로확·포장공사	NE1000	2003	전체	
경춘선 복선전철 7공구	NE1000	2004.6	전체	
서울외곽순환고속도로 5공구	NE1000	2004.3 ~ 2005.6	전체/부분적용	
서울외곽순환고속도로 4공구	NE1000	2004.10 ~ 2005.7	전체	
중앙선 복선전철 3공구	NE1000	2005.2 ~ 2005.7	부분적용	
여수~순천간 국도 확포장공사	NE1000	2008	전체	

나. 주요 시공사례 1

1) 현장개요

위치	시점	경기도 의정부시 호원동(의정부)	현장위치
	종점	서울시 노원구 상계동(상계동)	
연장	총연장	5.18km(금호 3.47km, 롯데 1.71km)	주요시설
	터널공	수락산터널	
출입시설	의정부 IC		
지질상태	교량	6개소, 2,101m(장암고가교외)	지질상태
	암종	선 캄브리아기의 편마암류, 관입 중생대 화성암류, 부정합 피복 제4기 하성층 화강 편마암, 일축압축강도: 1,250~1,500kg/cm <sup>2</sup>	

2) 발파 굴진 효율 및 비장약량 분석

총 10회에 걸친 시험발파 결과 기존 카트리지 폭약의 시공패턴의 잔류공 길이가 약 40cm 정도로 굴진효율 83.3% 정도인 반면, 벌크 에멀전 시험발파 패턴은 굴진효율이 95.2%로 발파 후 막장면은 잔류공이 거의 남아있지 않은 상태로 굴진효율이 우수하였으며, 카트리지 폭약 대비 약 11.9% 굴진율이 향상되는 효과가 있었다. Bulk emulsion의 적정패턴을 선정하기 위하여 1회부터 10회까지 시험발파를 수행하는 동안 비장약량은 급격히 감소하는 추세를 보이며, 3.5m 이상의 장공패턴으로 변경될 경우 장약량대비 발파 압체적의 상대적인 증가로 적정 비장약량은 1.45~1.5kg/m<sup>3</sup>가 될 것으로 판단된다.

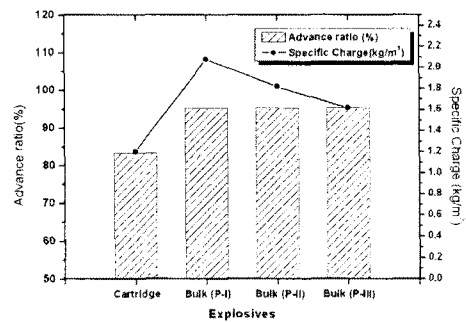


그림 7. 굴진을 대 비장약량 비교

3) 발파진동 및 소음 결과분석

표 9. 발파진동 및 소음 결과

발파회수	분할발파	Serial No.	진동(cm/s)	소음(dBA)
1	1차(중앙)	3016	0.0302	63.2
	2차(좌우)	3016	0.0270	64.0
2	1차(중앙)	3016	0.0238	65.4
	2차(좌우)	3016	0.0381	63.2
3	1차(중앙)	3016	0.0270	65.6
	2차(좌우)	3016	0.0127	65.2
4	1차(중앙)	3016	0.0318	61.0
	2차(좌우)	3016	0.0460	60.6
5	1차(중앙)	3016	0.0349	60.2
	2차(좌우)	3016	0.0286	60.8
6	1차(중앙)	3016	0.0191	65.2
	2차(좌우)	3016	0.0159	67.0
7	1차(중앙)	3016	0.0381	61.8
	2차(좌우)	3016	0.0349	62.4
8	1차(중앙)	3016	0.0413	63.4
	2차(좌우)	3016	0.0429	63.0
9	1차(중앙)	3016	0.0238	66.8
	2차(좌우)	3016	0.0254	61.6
10	1차(중앙)	3016	0.0302	61.0
	2차(좌우)	3016	0.0365	61.2

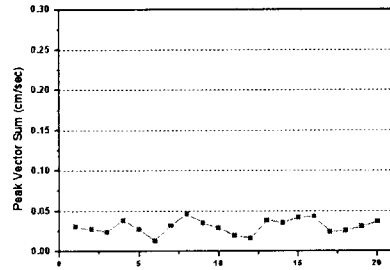


그림 8. 발파진동 계측결과

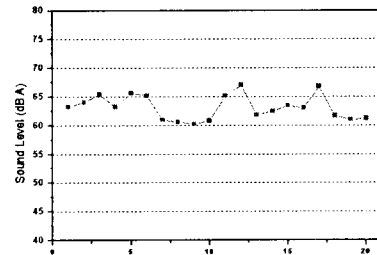


그림 9. 발파소음 계측결과

당 현장 발파진동 및 소음허용기준치			비 고	
주택 구조물	발파진동	0.3cm/sec	서울 민사지법 판례(95. 1. 13) 『발파진동속도는 0.3cm/sec를 넘지 않는 한도 내에서 작업을 실시하라』	
	발파소음	80dB(A)	환경부 생활진동 및 소음규제기준 2004.1.15개정 근거	
구분	진동(cm/sec)		소음(dBA)	
	평균치	대비(%)	평균치	대비(%)
기존시공 (카트리지)	0.045	100	67.5	100
시험발파 (벌크 에멀전)	0.0304	67.6	63.13	93.5

본 시험 발파시 매 발파마다 갱구에서 약 200m이격 거리에 있는 인근 보안물건(주유소)에서 계측을 실시하였으며, 계측결과 진동의 경우 0.045-0.0304 cm/sec 소음의 경우 67.5-63.13dB(A)로 각각 계측되었다. 이는 현장 주변 보안물건에 대한 발파진동 및 소음 허용기준치 이내로서 인체 및 구조물에 대한 물리적인 피해는 발생하지 않을 것으로 판단되는 진동수준으로 기존 카트리지 시공 패턴과 벌크 에멀전 시험발파를 대비할 때 진동의 경우 평균 33.4%의 감소와 소음의 경우 6.5%의 감소되었으며 발파음의 특징에 있어서 카트리지 시공패턴에 의한 발파는 고음이 강하며, 벌크 에멀전 시공패턴에 의한 발파는 저음이 강한 특징을 나타내었다.



4) 발파 후가스 분석

본 시험발파에서 사용된 계측기는 Performance Tester-III(영국)이며 매 발파 10분 경과 후 약 1~2분 동안 측정하였다. 측정 결과 발파 후 기존 카트리리지 폭약에 대비하여 Bulk Emulsion폭약의 평균 일산화탄소(CO) 농도는 14.31ppm (41.6%) 감소한 평균 20.13ppm으로 측정되었으며, 이산화질소(NO<sub>2</sub>) 농도는 카트리리지와 벌크 에멀전 폭약 모두 측정기의 최소 측정단위 이하인 2ppm 미만으로 측정되었다.

따라서, 벌크 에멀전폭약은 터널 등의 환기가 원활하지 못한 지하굴착 작업에 있어서 발파 후 유해가스중 일산화탄소(CO)농도가 기존 카트리리지 형 폭약에 약 42%감소했다.

표 10. 발파 후가스 분석

터널통행유해가스 허용기준		비 고
CO	100ppm	• 측정기명: Performance Tester 3(GMI, UK) • 측정기준: Dyno nobel Bulk 폭약 후 가스 측정기준 -측정장소: 막장면으로부터 100m -측정높이: 지면으로부터 1.5m -측정시간: 발파후 10분후 1분 -통기현황: 통기전
NO <sub>2</sub>	25ppm	

구 분		카트리리지 형	벌크 에멀전	발파 후 가스 측정결과
CO (ppm)	평균치 (ppm)	34.44	20.13	<p>그림 10. 폭약별 발파 후 가스 비교</p>
	대 비 (%)	100	58.4	
NO <sub>2</sub> (ppm)	평균치 (ppm)	N/A( < 2 )	N/A( < 2 )	
	대 비 (%)	-	-	

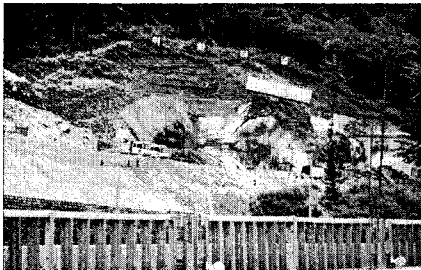
5) 현장 Cycle time 분석

구 분	총 천공시간	1차 장약	1차 버력처리	2차 장약	2차 버력처리	총시간 (1Cycle)
현 시공 (카트리리지)	1시간 30분	30분	1시간	30분	1시간 30분	5시간
시험발파 (벌크에멀전)	1시간 15분	35분	50분	30분	1시간 20분	4시간 30분

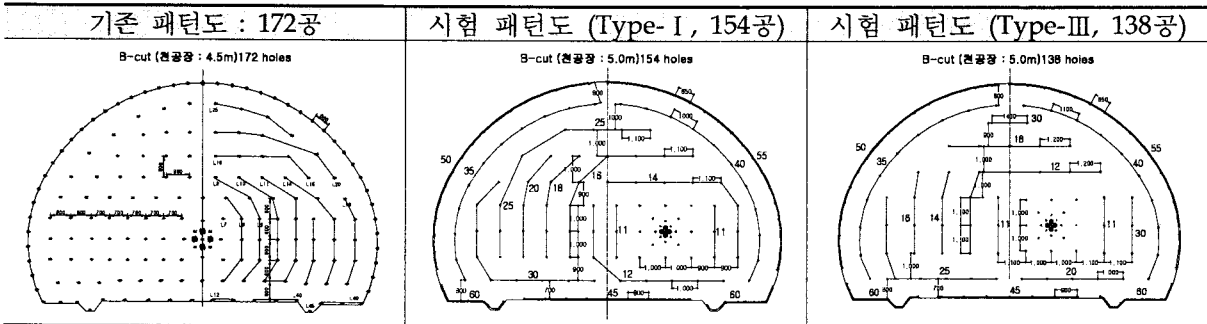
● 천공시간 단축	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 현 카트리지 시공패턴과 대비</li> <li>⇒ 1패턴은 15공 감소 8.8%, 2패턴은 23공 감소 13.5%, 3패턴은 25공 감소 14.6%</li> <li>⇒ 절감효과에 따라 천공시간 15분 단축으로 작업 Cycle Time 절감효과</li> </ul>
↓	
● 장전시간 단축	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 현 카트리지 시공과 대비 기계화 장전시스템 사용으로 인한 인력과 장전 시간 감소효과</li> <li>• 장전작업의 숙련도에 따라 다소 차이가 있을 수 있음.</li> <li>⇒ 장전교육은 2~3일 정도면 기술 이전 가능</li> </ul>
↓	
● 버력시간 단축	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 현 카트리지 대비 NE1000은 천공 내 밀장전이 가능</li> <li>⇒ 균일한 파쇄도 생산효과로 대괴발생이 감소</li> <li>⇒ 1발파 당 버력 처리에 소요되는 시간 평균20분 단축효과</li> </ul>
↓	
● 전체작업 단축효과	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지보패턴 III-Type 기준(천공장 2.0~2.5m)의 1 Cycle Time의 경우</li> <li>⇒ 카트리지 5시간 대비 Bulk Emulsion system은 평균 약 4시간 30분으로 약 30분의 공정시간 단축 효과</li> <li>• 천공장 증가에 따라 작업시간 단축효과는 더욱 클 것으로 예상됨.</li> </ul>

다. 주요 시공사례 2

1) 현장개요

위 치	시 점	• 경북 문경시 호계면 견탄리	현장 위치 
	종 점	• 경북 상주시 이안면 양범리	
연 장	총 연 장	• 5.28 km	
시 행 사	시 공 사	• (주)한라건설	
주요시설	공 사 명	• 중부내륙고속도로 제 9공구	
	터 널 공	• 이화터널	
지질상태	지질상태	• 녹리석 편암과 견운모 편암, 견운모 녹리석 편암이 주를 이룸.	
	지질조건	• 평균 Rock Quality Designation : 59~70% • 평균 Rock Mass Rating : 61~71 • 주향 : N10°W ~ N15°W로서 터널 굴진축에 대해 직교 조건임.	

2) 천공패턴



3) 발파결과

당 현장의 Bulk-Emulsion System을 적용한 위치는 상행선 STA 4+702.1과 하행선 STA 4+701.3에서 상행선 STA 4+728.1과 하행선 STA 4+725.6까지의 구간이다. 2001년 8월 17일부터 8월 22일까지 6일간 총 15회 발파 결과를 종합한 결과는 아래와 같으며 천공장은 3.0m에서 최대 5.0m 까지 천공수는 최대 161공에서 최소 130공까지 실시하였다. 또한, 천공장 및 천공수 변화에 따른 발파결과에서 천공장의 증가 및 천공수의 감소에 따른 특별한 굴진률 저하 현상은 없었다.

표 11. 발파 결과

구 분	Unit	최 대 값	최 소 값	평 균 값
천 공 수	hole	161	130	139
천 공 장	m	5.0	3.0	4.30
굴 진 장	m	4.8	2.8	4.07
굴진효율	%	98	91.4	94.7
비장약량	kg/m <sup>3</sup>	2.04	1.44	1.73
장약시간	Min	175	70	120

총 15회의 발파를 수행하는 동안 평균 굴진 효율은 94.7 % 였으며 천공장 5.0m에서 천공수를 130공 까지 줄였음에도 불구하고 최대 98%의 높은 굴진 효율도 기록하였다. 기존 발파에서 천공수는 보통 172공 정도였으나 Bulk-Emulsion 적용시 최저 130공 이하로 천공수를 최대 25% 절감하여 천공시간을 약 30분 이상 단축할 수 있었다. 그러나 천공수가 줄었음에도 불구하고 카트리지 폭약에 비하여 상대적으로 장전밀도가 높아 비 장약량은 시험 초기 세 번의 발파에서 최대 2.0 kg/m<sup>3</sup> 정도로 다소 과장약의 측면이 있었으나 이후 천공수의 감소와 함께 적정 장약 패턴으로 1.5~1.7 kg/m<sup>3</sup>로 조정하였다.

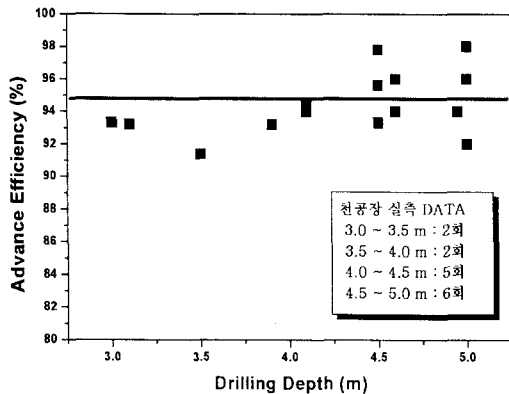


그림 11. 천공장과 굴진률(%) 관계

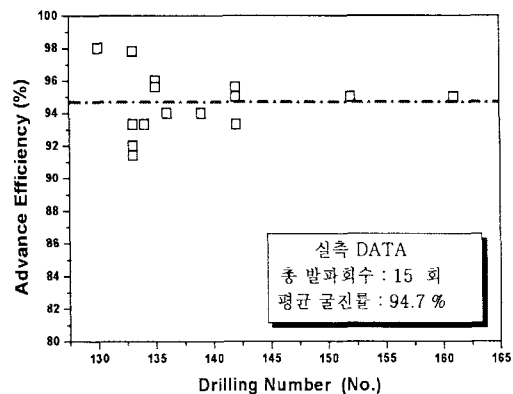


그림 12. 천공수와 굴진률(%) 관계

본 연구에서 적용한 Bulk Emulsion의 밀도는 1.2kg/ℓ로서 고정되어 있으나 차후 가스 Bubble 발생 기등 장비보완을 통하여 폭약밀도를 조정하는 것이 가능하다. 예를 들어 스웨덴의 DYNO Nobel사에서 개발한 SSE (Site-Sensitized Emulsion) System과 같은 터널용 Bulk-Emulsion System의 경우 운송이나 보관 단계에서 Emulsion Matrix의 밀도는 1.4kg/ℓ이지만 일정한 수준으로 밀도를 낮추어 주는 Emulsion Matrix내 미세한 기체 Bubble의 형성으로 0.85kg/ℓ~1.4kg/ℓ 까지 다양하게 폭약 밀도 조정이 가능하다. 따라서 향후 밀도 조정이 가능한 장비 보완에 의해 Bulk-Emulsion System 사용에 따른

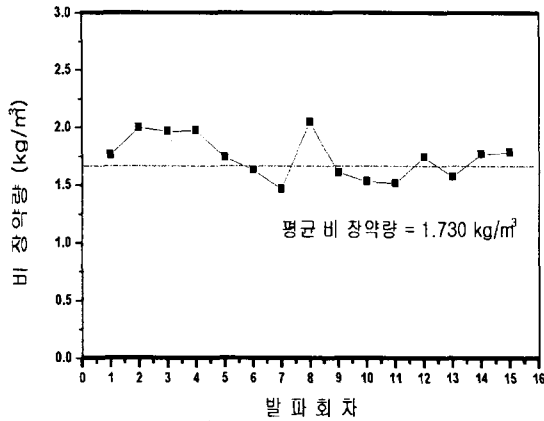


그림 13. 발파 회차별 사용 비장약량

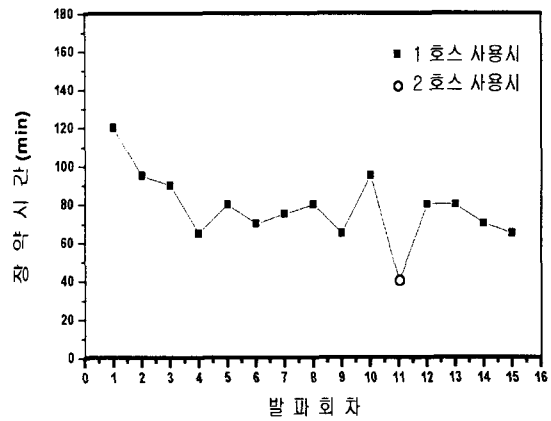


그림 14. 발파 회차별 충전 소요시간

비 장약량의 증가를 초래하는 문제는 해소될 것으로 사료된다. 그림 13은 해당 발파당 사용 비 장약량을 나타낸 것으로 총 15회 실시된 시험 발파에서 평균 비 장약량은 1.73kg/m<sup>3</sup> 정도였으나 발파패턴이 비교적 안정된 시험 후반부에는 약 1.5~1.6kg/m<sup>3</sup> 의 비 장약량으로 충분한 발파효율을 얻을 수 있었다. 또한 (그림 14)은 장약 시간을 비교한 것이다. 장약 시간은 단일 호스를 사용하였을 경우 평균 1시간 30분~ 2시간 정도가 소요되어 기존 카트리지 충전시간과 별 차이가 없으나 2개의 호스로 동시 장약하였을 경우 1시간 이내가 가능하여 공기 절감효과도 기대할 수 있다.

4) 기존발파와 효율비교

기존에 사용되었던 Cartridge 폭약과 본 연구에서 Bulk-Emulsion System으로 시공한 실적을 바탕으로 천공장, 천공수와 굴진 효율을 비교하였으며 차후 경제성을 판단하는 기초자료로 삼고자 하였다. 비교 대상구간의 암반은 주로 녹리석 편암 및 견운모를 다량 함유하고 있는 이화령층으로 암반강도는 대체로 1,500kg · f/cm<sup>2</sup> 정도였다. 비교 대상의 발파결과는 아래 표와 같다.

표 12. 카트리지와 벌크에멀전 효율비교

구 분	천공장 (m)	천공수 (공)	굴진장 (m)	장약량 (kg)	비장약량 (kg/m <sup>3</sup> )	천공시간 (min)	장약시간 (min)	굴진효율 (%)	
Cartridge	8/8	4.46	177	3.8	512.5	1420	294	90	85.2
	8/9	4.46	172	3.7	462.5	1.316	334	85	89.6
	8/10	4.30	175	3.9	497.3	1.342	303	100	90.7
	평균	4.41	174.7	3.8	490.1	1.360	310.3	91.7	88.5
Bulk Emulsion	8/20	4.74	130	4.7	714.0	1.599	269	130	98.4
	8/21	4.90	135	4.5	718.8	1.681	331	125	91.8
	8/22	4.57	133	4.3	740.0	1.811	273	105	94.1
	평균	4.74	132.7	4.5	692.4	1.697	291	120	95.3

각각 3일간의 발파결과를 종합한 결과 굴진효율 측면에서 Bulk-Emulsion System(N/E 1000)을 적용하였을 경우가 기존 일반 Cartridge를 적용하였을 경우에 비하여 천공장이 약 7.5 %가 늘어나고 천공수가 약 24 % 감소되었음에도 불구하고 효율은 약 8 %증가(기존발파 100 기준)하였다. 그러나 공당 장

전밀도 증가에 의해 천공수가 약 24 % 줄었음에도 불구하고 평균 비 장약량은 약 25 % 증가하였다.

### 3. 결론 및 향후 발전방향

본 연구에서는 터널용 벌크 에멀전 폭약을 적용한 경암 및 극경암 암반에서 지보패턴 구간부터 장공 발파패턴에 이르기까지 다양한 시공실적 및 시험발파를 바탕으로 굴진율, 천공수의 감소, 장약시간 및 장전시스템 검토, 폭약사용량 및 전체 작업공정에서의 기대효과에 대한 검토를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 현재 국내 터널에서 적용하고 있는 Bulk Emulsion system은 서구 유럽등지에서 적용하는 SSE system(Site Sensitized Emulsion)과는 폭약의 초기 예감성 부여방법에 다소 차이는 있지만 거의 동일한 장전 System으로 공당 혹은 전체 폭약량 제어가 가능한 신 개념의 기계화 장전 시스템이.
- 2) 기존 카트리지 대비 단위 길이 당 장전밀도를 약 35~60%까지 증가시킬 수 있어 극경암 등의 암질변화에 따른 적용성이 용이하고 공저부 밀 장전에 따른 발파 후 잔류공이 거의 생성되지 않고 파쇄효율이 우수하였다.
- 3) Bulk Emulsion을 이용하여 실 시공 및 시험발파를 수행한 결과 기존 카트리지 폭약대비 천공수는 약 10~30%의 절감효과가 있고, 굴진능률은 약 8~20%, 파쇄도는 30cm이하의 적정상차 입도 사이즈를 기준으로 약 30%정도의 증대 효과가 있었다.
- 4) 장전기를 이용한 장전시간의 경우 현재의 2호스 체제를 가동할 경우 3회까지의 숙련기간 동안 기존 카트리지 장약시간과 거의 비슷한 수준이었으며 이후 숙련도가 늘어남에 따라 카트리지 폭약 장전 시 약 1시간 30분정도 소요되는 현장을 기준으로 동일 인원수로 약 25분~30분 정도의 작업시간을 단축할 수 있다.
- 5) 폭약 사용량의 측면에서는 기존 카트리지 발파패턴에서 Bulk Emulsion 발파패턴으로 정착까지는 최소 3회에서 5회 정도의 시험발파가 필요하며 대체로 비 장약량 수준은 현장별로 다소 차이는 있지만 1.4~1.8kg/m<sup>3</sup>으로 균일한 패턴의 안정을 이루었으며, 향후 Gas Agent 등 예감제의 다변화에 의한 장약 밀도 조절로 비 장약량은 감소될 전망이다.
- 6) 발파 후 가스측정결과 기존 카트리지형 에멀전폭약의 경우 일산화탄소가 평균 34.44ppm이었으나 Bulk Emulsion의 경우 20.13ppm으로 기존 폭약 대비 58.45%수준이었고 질소 산화물은 2ppm이하로 검출 되지 않았다. 이는 3km이상의 장대터널에서 환기시간의 30분 단축 등을 통한 작업공정시간 단축과 발파 후 유해가스의 저감으로 작업환경 개선 및 작업원의 인체 유해성 측면에서도 유리할 것으로 판단된다.
- 7) 상기의 선진화된 벌크 에멀전 폭약을 이용한 기계화 장전시스템은 향후 대형 대단면 터널 현장과 4m~5m이상의 굴진장을 확보할 수 있는 장대터널의 장공발파현장 및 급속 시공을 요

하는 현장에 다양하게 적용하여 공사기간을 단축하고 경제성을 극대화하는 새로운 개념의 발파시스템으로 정착할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. 3 Country Park Section, Tai Lam Road Tunnels, Hong Kong, New Territories.  
Elvøy, Jan ; Storås, Ingvild ; Rønn, Pal-Egil ; " Bruk av Slurry I Hanekleivtunneen I Vestford", Fjellprenger'n nr. 2 1996
2. Fauske, Arve, Dyno Nobel ; "Norwegian Urban Tunnelling", ITA, Washington D.C., April 21-26, 1996
3. Fauske, Arve, Dyno Nobel ; "Development of Drilling Pattern and Initiation Sequences From Controlled Blasting to Conventional Round", Preliminary Report May 1996, Route
4. 노상림 외, GS건설 ; 벌크폭약을 이용한 대단면 장대터널 시공사례, 2004년 추계학술발표회
5. 김희도 외, (주)고려노벨화약 ; 터널용 벌크폭약의 국내 경암터널 시공사례 및 향후 발전방향에 관한 연구, 2001년 추계학술발표회