

## 장공발파에서 기계화 장전시스템을 활용한 발파효율 개선사례



이상현  
SK건설  
GEOTASK팀 과장



이 효  
SK건설  
GEOTASK팀 부장



김택곤  
SK건설  
GEOTASK팀 부장



이진무  
SK건설  
GEOTASK팀 팀장

### 1. 서론

친환경 교통수송과 국토의 효율적 이용 등의 목적으로 최근들어 터널 및 지하공간의 활용에 대한 관심이 고조되고 있으며, 건설규모가 점차 대단면·초 장대화로 진행됨에 따라 터널 및 지하공간 굴착과정에서 안정성, 경제성 및 효율성이 고려된 고속화 시공에 대한 연구가 활발하게 추진되고 있다.

발파 굴착방법에 의한 고속 시공 방안으로 장공발파에 대한 관심이 높아지면서 최근 기계화 장전 시스템을 활용한 Bulk emulsion폭약의 도입이 적극적으로 검토되고 있으며 더불어 효율적인 심발패턴이나 최종 굴착선 제어 기술등 정밀 장공발파시공에 요구되는 요소기술개발에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

이미 국내 10여개 현장의 시험 시공 및 실 시공단계에서 적용된 사례가 있는 Bulk emulsion system은 기존

포장형 화약류에 비하여 공내 장전밀도를 50~80%이상 증가시킬 수 있어 공저부 절단효과가 좋고 암 파쇄 효율이 우수하여 특히 대단면 장공발파에 매우 적합한 것으로 알려져 있다. 특히 기계화 장전시스템은 장전 호스 및 저장 탱크에 센서가 부착되어 있어 정확한 공내 장전밀도 조절이 가능해 졌다. 따라서, 장비 운전자를 제외한 순 장약에 소요되는 작업원과 장전시간이 절감되고 밀 장전 효과에 의한 파쇄효율증가와 막장 정리작업이 간소화됨에 따라 계획시공 및 공기절감을 통한 경제적 시공이 가능해 졌다. 이는 기존의 포장형 화약류를 이용한 재래식 발파작업이 전반적으로 작업원 개개인의 업무 숙련도에 따라 작업시간 및 작업능률에 큰 차이가 발생될 수 있고 항시 다수의 작업원 확보가 요구된다는 단점을 상당부분 보완할 수 있다.

본 고에서는 2008년 1월~2월에 걸쳐 굴진효율등 굴착 시공성이 상대적으로 저조한 국내 2개 도로터널현장을

대상으로 암반등급 I·II(무지보구간)의 양호한 암반조건에서 기계화 장전시스템인 Bulk emulsion system을 활용하여 총 12회에 걸쳐 시험발파를 수행하였다.

그 결과 기존 발파대비 최대 천공장을 15% 증가시켜 평균 굴진효율이 10%이상 향상된 결과를 얻었으며 Round당 소요 화약량 증가로 인해 발생 가능한 문제점과 공정별 소요 작업시간 분석을 통해 발파 굴착에 의한 고속 시공 가능성을 평가하였다.

부정합으로 덮은 경상계층군의 신동층군, 유천층군과 후기에 이들을 관입한 불국사 화성암류로 구성되어 있다.

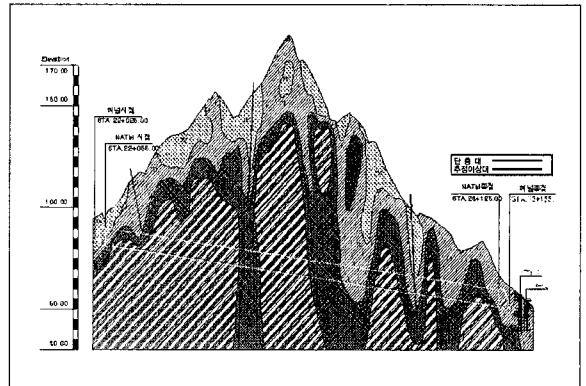


그림 1. 지질 개요도(Site-I)

## 2. 현장시험

### 2.1 대상구간의 지반조건

대상구간 중 Site-I의 광역적 지질은 선캄브리아기의 경기편마암복합체와 이를 부정합으로 피복한 제4기 층적층으로 구성되어 있으며 변성작용에 따라 흑운모호상편마암, 각섬석 흑운모편마암, 우백질편마암이 상호 점이적으로 분포하고 있다. 특히 흑운모호상편마암이 우세하게 분포하고 있고 N50~80E/30~50SE 방향성 엽리를 제외하고 불 연속면이 거의 없고 풍화도도 낮은 상태로 RMR 77~85로 매우 양호한 암반상태이다.

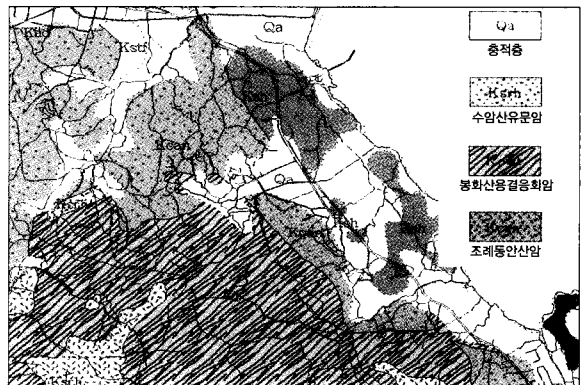


그림 2. 광역 지질도(Site-II)

표 1. 시험현장 암석물성 실험결과

Item	Sample No.	Density (g/cc)	Shear modulus ( $\times 10^8 \text{kgf/cm}^2$ )	Dynamic Young's modulus ( $\times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ )	Poisson's ratio	P-wave velocity (m/s)	S-wave velocity (m/s)	Unconfined compressive Strength ( $\text{kgf/cm}^2$ )
Site-I	1-1	2.68	1.99	4.94	0.239	4,619	2,702	1,420
	1-2	2.71	1.92	4.94	0.286	3,957	2,015	1,690
	1-3	2.66	1.72	4.24	0.232	4,262	2,518	760
Site-II	2-1	2.64	1.63	4.16	0.277	4,432	2,462	1,580
	2-2	2.52	1.49	3.77	0.265	4,262	2,409	1,040
	2-3	2.59	1.76	4.48	0.274	4,617	2,577	910

표 2. 사용 화약류 특성

구분	Gravity (g/cc)	Velocity (m/sec)	Blasting heat (kcal/kg)	Sensitive (cm)	Gas amount (l/kg)
기존 발파	Site-I 1.25	6,000	1,300	100	865
	Site-II 1.22	6,000	1,310	100	770
시험 발파	Site-I 1.15	5,900	650	100	996
	Site-II 1.25	5,500	690	100	976

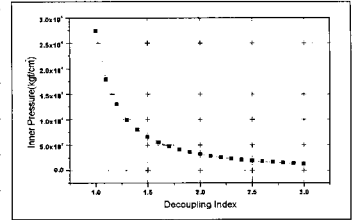


그림 3. De와 공내압력과의 관계



그림 4. 벌크에멀전 폭약

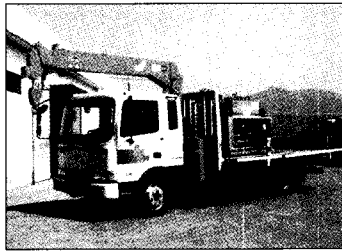


그림 5. 전용 장전차량

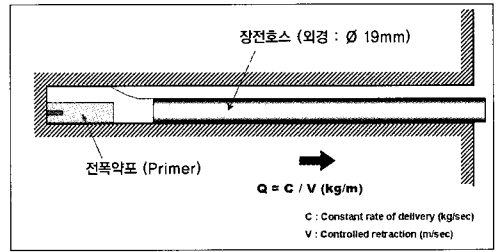


그림 6. 벌크에멀전 폭약 장전 원리

막장면은 절리간격이 대체로 1.5~2.1m이고 절리간극은 0.1mm이하로 풍화도는 낮은 상태이며, N32W~N78W, N42E방향성을 가진 2set의 주 절리군이 우세한 RMR 81~88의 매우 양호한 암반이다.

막장에서 암석의 물리적 특성을 파악하기 위해 Intact rock sample의 기초 물성실험을 수행하였다. 실험결과 Site-I의 경우 일축압축강도는 760~1,690kgf/cm<sup>2</sup>, 탄성 파속도는 4.28km/s, 동탄성계수는 4.71×10<sup>9</sup>kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났고, Site-II의 경우 각각 910~1,580kgf/cm<sup>2</sup>, 4.44 km/s, 4.14×10<sup>9</sup>kgf/cm<sup>2</sup>로 나타나 두 현장 모두 암석조건은 중경암~경암 상태로 조사되었다.

## 2.2 적용 화약류 특성

그림 3은 Decoupling 지수와 공내 생성 폭발압력과의 상관관계이며 Decoupling index가 1에 가까울수록 공내 작용폭약은 급격하게 증가하게 된다. 기존 포장형 폭약에 비하여 Bulk emulsion폭약과의 가장 큰 차이점은 전용

기계화 장전장비를 활용하여 공극을 최소화하면서 공내 밀장전이 가능하므로 장전밀도를 향상시켜 장전시 발생 공극에 의한 폭발압력 손실을 최소화 할 수 있는 점이다 (그림 4~6).

## 2.3 굴진효율 비교결과

시험발파 대상 현장은 2곳 모두 공기절감을 위해 경사 공 심발방식을 채택하고 있으나, 급격한 암질 및 암반강도 변화에 따른 80%미만의 저조한 굴진효율을 나타내었으며, 천공패턴을 크게 변경하지 않는 조건에서 Bulk emulsion system을 반영하여 굴진효율을 증대시키고자 하였다. 굴진효율 비교결과 Site-I의 경우 기존 발파 방식에 비하여 천

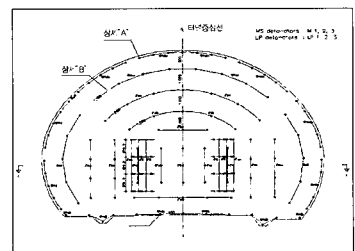


그림 7. 시험발파패턴

표 3. 기존 굴진효율 및 화약 사용현황 (Cartridge type)

구분		Blast pattern & result				Explosives			
		Drill holes	Drill depth(m)	Advance (m)	Efficiency (%)	Cartridge explosive	Fine explosive	Total	Specific charge(kg/m³)
Site-I (90m²)	Average	162	3.9	3.00	76.9	360kg	20.5kg	380.5kg	1.41
Site-II (80m²)	Average	156	3.7	2.85	77.3	295kg	21.5kg	316.5kg	1.39
Note		• 시험발파 예정지와 동일한 구간에서 기존의 시공방법에 의해 일반화약류 적용에 따른 3~5회 발파 결과치의 평균 값임.							

표 4. 굴진효율 및 화약 사용현황 (Bulk Emulsion system)

Station			Blast pattern & result				Explosives				
			Drill holes	Drill depth(m)	Advance (m)	Efficiency (%)	Bulk emulsion	Cartridge (booster)	Fine explosive	Total	Specific C(kg/m³)
Trial blast (Site-I) 90m²	No.1-1	STA22 <sup>km</sup> +561	145	3.90m	2.5m	64.1%	440kg	58.00kg	25.00kg	523.0kg	2.32
	No.1-2	STA22 <sup>km</sup> +585	140	4.05m	3.0m	74.1%	480kg	56.00kg	24.50kg	560.5kg	2.08
	No.1-3	STA22 <sup>km</sup> +554	146	4.10m	3.5m	85.4%	445kg	58.40kg	25.10kg	528.5kg	1.68
	No.1-4	STA22 <sup>km</sup> +578	146	4.10m	3.6m	87.8%	475kg	58.40kg	23.90kg	557.3kg	1.77
	No.1-5	STA22 <sup>km</sup> +548	153	4.15m	4.0m	96.4%	520kg	61.20kg	24.00kg	605.2kg	1.68
	No.1-6	STA22 <sup>km</sup> +572	153	4.20m	4.0m	95.2%	535kg	61.20kg	22.50kg	618.7kg	1.72
	Average			147.2	4.08m	3.43m	84.07%	482.50kg	58.87kg	24.17kg	565.53
Trial blast (Site-II) 80m²	No.2-1	STA05 <sup>km</sup> +985	135	4.00m	2.9m	72.5%	470kg	50.62kg	28.87kg	549.49kg	2.37
	No.2-2	STA05 <sup>km</sup> +981	149	4.20m	3.9m	92.9%	540kg	55.87kg	29.75kg	625.62kg	2.01
	No.2-3	STA05 <sup>km</sup> +977	148	4.20m	4.0m	95.2%	510kg	55.50kg	28.87kg	594.37kg	1.86
	No.2-4	STA05 <sup>km</sup> +973	142	4.25m	4.0m	94.1%	520kg	53.25kg	28.87kg	602.12kg	1.88
	No.2-5	STA05 <sup>km</sup> +969	128	4.20m	4.0m	95.2%	540kg	48.00kg	28.00kg	616.00kg	1.93
	No.2-6	STA05 <sup>km</sup> +965	126	4.15m	3.9m	94.0%	540kg	47.25kg	28.87kg	616.12kg	1.97
	Average			138.0	4.17m	3.78m	90.65%	520.00kg	51.75kg	28.87kg	600.62kg

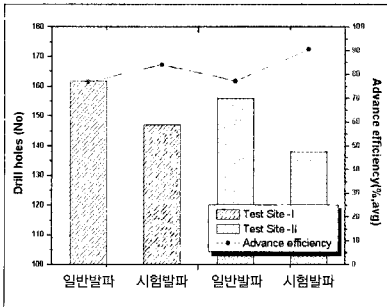


그림 8. 천공수와 굴착효율 관계

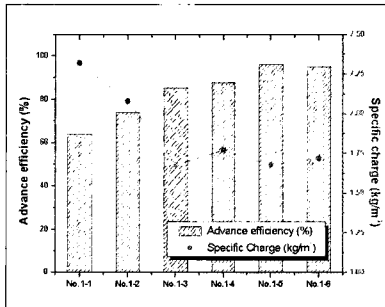


그림 9. 비장약량과 굴진효율 결과(S-I)

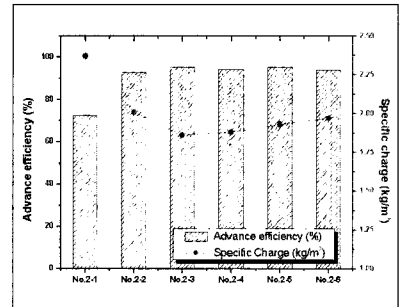


그림 10. 비장약량과 굴진효율 결과(S-II)

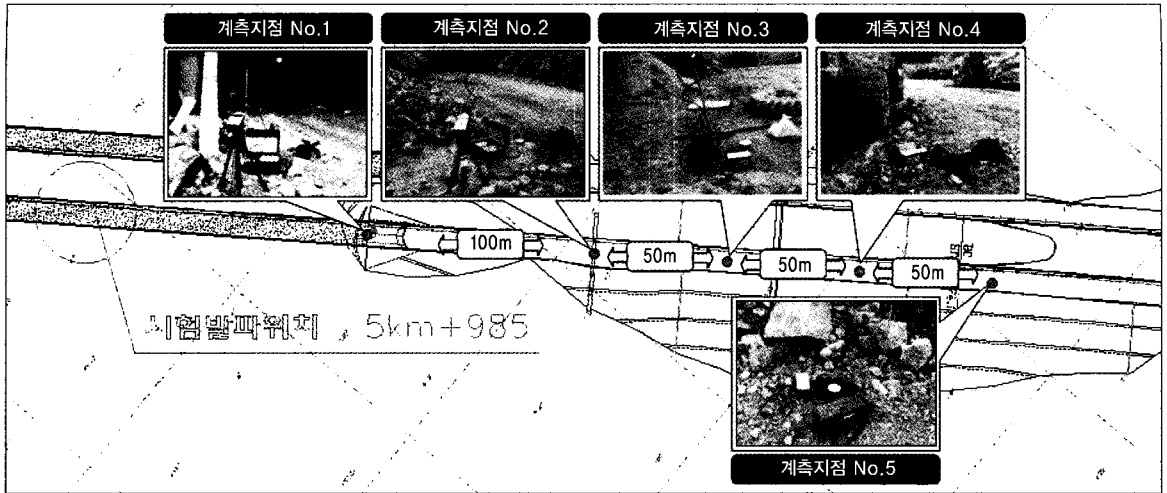


그림 11. 진동계와 소음계 설치위치 (Site-II)

공수는 약 10% 감소하였으나, 평균 굴진효율은 7~8% 증가하였고 비장약량은 약 30%이상 증가하였다. Site-II의 경우 기존 발파방식에 비하여 천공수는 약 13% 감소하였으나, 평균 굴진효율은 12~13% 증가하였고 비장약량은 약 43%가 증가된 결과를 얻었다. Site-I에 비하여 Site-II에서 Bulk emulsion system 적용 시 10%이상의 비장약량이 증가하는 현상이 발생하였는데 이는 장전밀도의 차이에 기인한 것으로 판단된다.

## 2.4 발파진동 계측결과

Bulk emulsion폭약 적용에 따라 공당 장약량 및 Round당 전체 장약량 증가로 발생 진동 및 소음수준이 증가할 것으로 예상되어 각 시험막장별로 발생 진동 및 소음 수준을 파악하기 위해 계측계획을 수립하였다(그림 11). Geo-phone은 현장여건에 따라 50~100m간격으로 5대를 배치하였고 계측기의 Microphone과는 별도로 발생 소음수준 파악을 위해 전용 소음계(SC-160) 2대를 설치하였다. 계측결과 막장으로부터 비교적 근거리 지점인 100~120m근방에서 계측한 진동 수준이 일반발파에 비

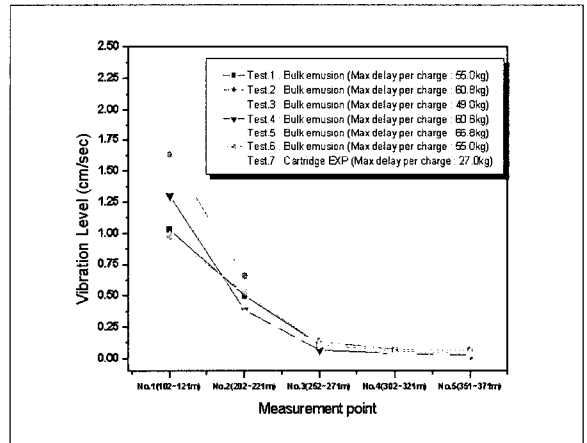
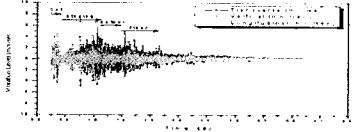
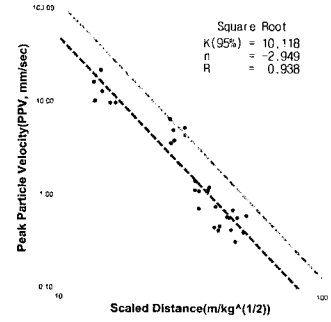


그림 12. 이격거리별 진동수준

하여 2배 수준이었으나 200m근방은 12.5~22.5% 증가하였으며, 이격거리가 증가함에 따라 발생 진동수준 차이는 점차로 줄어드는 경향을 보였다. 지발당 장약량은 Bulk emulsion의 경우 49~69kg/delay인데 비하여 기존 발파방법에서는 27~36kg/delay로서 Bulk emulsion의 지발약량이 기존 발파방법에 비하여 최대 2.56배 증가한 원인에 기인한 것으로 판단된다.

표 5. 발파진동 계측 및 분석결과

구 분	측점 No	계측장비 Serial. No	이격거리 (m)	지발당 장약량 (Max. kg)	성분별 최대 진동속도(mm/sec)			PVS (mm/sec)
					접선성분(T)	수직성분(V)	진행성분(L)	
Site.2-1 (01/29) AM08:58 STA 5 <sup>km</sup> +985	1	BA10675	102	심발부 : 48.0kg	5.570	7.320	6.780	10.30
	2	BA09527	202		1.240	4.510	2.380	5.000
	3	BE10053	252	확대부 : 55.0kg	0.492	0.889	0.905	1.110
	4	BE10788	302		0.349	0.460	0.365	0.467
	5	BE10340	352		0.333	0.365	0.365	0.571
Site.2-2 (01/29) PM18:49 STA 5 <sup>km</sup> +982	1	BA10675	105	심발부 : 48.0kg	9.06	12.50	8.460	16.30
	2	BA09527	205		1.600	5.840	3.080	6.580
	3	BE10053	255	확대부 : 60.75kg	0.524	1.110	1.270	1.420
	4	BE10788	305		0.286	0.587	0.698	0.757
	5	BE10340	355		0.270	0.365	0.651	0.692
Site.2-3 (01/30) AM08:28 STA 5 <sup>km</sup> +978	1	BA10675	109	심발부 : 48.0kg	2.860	9.370	5.870	9.780
	2	BA09527	209		2.190	4.240	1.980	4.400
	3	BE10053	259	확대부 : 49.0kg	0.556	0.698	1.050	1.220
	4	BE10788	309		0.365	0.508	0.413	0.573
	5	BE10340	359		0.508	0.397	0.429	0.600
Site.2-4 (01/31) AM06:58 STA 5 <sup>km</sup> +974	1	BA10675	113	심발부 : 48.0kg	2.160	13.00	4.080	13.00
	2	BA09527	213		1.810	3.780	1.350	3.870
	3	BE10053	263	확대부 : 60.75kg	0.365	0.651	0.460	0.719
	4	BE10788	313		0.254	0.413	0.349	0.418
	5	BE10340	363		0.175	0.254	0.302	0.318
Site.2-5 (01/31) PM17:50 STA 5 <sup>km</sup> +970	1	BA10675	117	심발부 : 48.0kg	6.300	20.70	10.60	21.80
	2	BA09527	217		1.510	3.160	1.700	3.610
	3	BE10053	267	확대부 : 66.825kg	0.714	0.952	0.952	1.140
	4	BE10788	317		0.365	0.397	0.381	0.451
	5	BE10340	367		0.302	0.270	0.381	0.424
Site.2-6 (02/01) AM08:10 STA 5 <sup>km</sup> +966	1	BA10675	121	심발부 : 48.0kg	2.560	9.220	6.380	9.800
	2	BA09527	221		0.825	5.220	1.270	5.290
	3	BE10053	271	확대부 : 55.0kg	0.476	1.130	0.444	1.130
	4	BE10788	321		0.254	0.524	0.365	0.583
	5	BE10340	371		0.190	0.349	0.254	0.398

<p>파형분석결과</p> 			
<p>Note</p>	<p>※ 상기 계측결과와 발파지점에서 100m이격된 위치에서 계측된 성분별 발파파형 측정 자료임. ⇒ 각 측정별 측정결과 대체로 Vertical성분이 우세 성분으로 나타남. ⇒ 우세 주파성분은 거리증가에 따라 50Hz미만으로 급격하게 감소하는 경향을 보임.</p>	<p>회귀분석 결과</p>	

## 2.5 여굴량 측량결과

국내 도입된 터널용 Bulk emulsion system은 제조과정에서 예감제가 첨가된 Emulsion matrix로서 제조사마다 예감제나 유화제, 발열제, 물등 조성 함량비에 약간의 차이가 있고, 고정 비중으로 제조되어 현장에서 비중 조절이 어렵다. 따라서 일반 발파공에 비하여 상대적으로 적은 장전밀도를 요구하는 외곽공 영역은 기존의 Plastic pipe type의 정밀화약을 사용하고 있는 실정이다. 그러

나 설계단계에서 외곽공과 인접한 전열공 장전비중이 여굴량 증가원인으로 고려되고 있으며, 따라서 본 실험에서 장공발파를 위해 기존 천공장 대비 평균 약 13% 천공장을 증대시킴에 따라 추가적인 막장별 여굴량 증가여부를 분석하였다. 그 결과 기존 발파방법에 비하여 Bulk emulsion system적용 및 초과 천공장에 의한 발생 여굴량 및 미굴량과의 직접적인 상관성은 미약한 것으로 파악되었으며, 오히려 현장 막장별 굴착선 주변의 암반 구조 지질학적 상태 및 천공기사의 작업습관이 발생 과굴량 및

표 6. 시험현장 여굴량 및 미굴량 계측결과

구역별		좌측반	좌측(상)	중앙부	우측(상)	우측반	H·C·F	
Site-I	1-1	over	32.7cm	24.8cm	15.0cm	13.3cm	12.0cm	55%
		under	-	-	-	-	-	
	1-2	over	17.3cm	14.3cm	-	11.8cm	15.7cm	78%
		under	-	-	16.3cm	-	-	
	1-3	over	8.3cm	7.5cm	12.5cm	12.5cm	7.0cm	84%
		under	-	-	-	-	-	
	1-4	over	27.3cm	25.3cm	19.3cm	18.7cm	21.0cm	68%
		under	-	-	-	-	-	
	1-5	over	-	-	12.7cm	10.0cm	15.0cm	70%
		under	13.0cm	16.3cm	-	-	-	
	1-6	over	17.6cm	16.0cm	23.0cm	20.8cm	32.3cm	71%
		under	-	-	-	-	-	
기존	over	5.7cm	13.8cm	14.8cm	20.8cm	19.0cm	62%	
	under	-	-	-	-	-		
Site-II	2-1	over	27.6cm	26.0cm	33.0cm	30.8cm	32.3cm	80%
		under	-	-	-	-	-	
	2-2	over	25.0cm	24.0cm	-	12.0cm	13.3cm	85%
		under	-	-	17.5cm	-	-	
	2-3	over	21.0cm	18.8cm	-	23.8cm	29.3cm	80%
		under	-	-	17.4cm	-	-	
	2-4	over	-	-	-	-	-	75%
		under	27.0cm	30.0cm	23.5cm	29.3cm	48.3cm	
	2-5	over	36.7cm	31.3cm	22.7cm	33.0cm	43.7cm	79%
		under	-	-	-	-	-	
	2-6	over	15.0cm	15.3cm	13.4cm	17.5cm	28.3cm	76%
		under	-	-	-	-	-	
기존	over	22.5cm	15.8cm	11.4cm	19.5cm	25.3cm	75%	
	under	-	-	-	-	-		

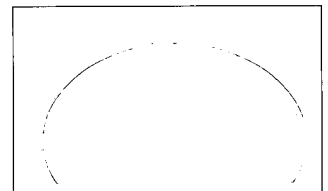


그림 13. 기존 여굴량발생(S-I)

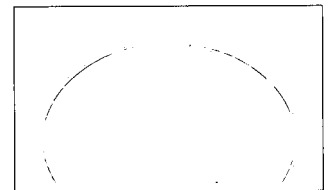


그림 14. Bulk.E여굴량발생(S-I)

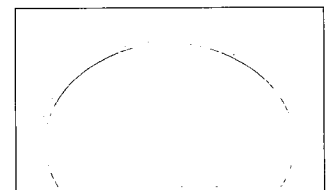


그림 15. 기존 여굴량발생(S-II)

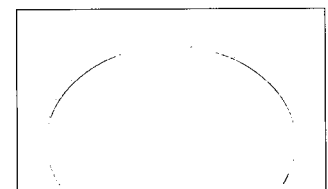


그림 16. Bulk.E여굴량발생(S-II)

미굴량 생성에 주요한 요인으로 판단된다.

## 2.6 후 가스 검측결과

기존의 Cartridge형 Emulsion폭약 사용에 비하여 Bulk emulsion system 적용에 따른 Round당 폭약 사용량이 증가함에 따라 작업환경에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 발파 후 유해가스 발생량에 대한 검토가 필요하다. 이를 위해 발파 후 발생하는 대표적인 유해가스 중 일산화탄소(CO)와 질소산화물(NOx)에 대하여 시간이력에 따른 발생 유해가스의 변화량을 조사하였다. 현재 터널

및 지하공간 굴착시 발파작업에서 발생하는 유해가스 관리기준은 CO가 100~200ppm, NOx는 25~50ppm으로 규정하고 있는데 발파 후 기계환기 시스템을 가동하고 10분 경과 후 막장 전방으로부터 약 15~20m거리에서 관리기준 대비 모두 20%이내 수준으로 조사되었다. 이는 현장 작업여건이 갱구와 비교적 근접한 위치에 있어 강제 환기 및 자연환기 영향에 의해 유해가스 농도가 상대적으로 빠른 감소를 나타내지만 5km이상의 장대터널이나 지하저장소 시설과 같은 밀폐된 작업환경에서는 강제환기에 대한 의존도가 상대적으로 높아 적정 용량의 환기대책의 수립이 필요할 것으로 판단된다.

표 7. 발파 후 가스 측정 결과

구분	Bulk emulsion		Cartridge type	
	Max	10분경과	Max	10분경과
CO gas	429ppm	21.01ppm	457ppm	21.8pp
	100%	4.9%	100%	4.8%
NOx gas	6.0ppm	1.5ppm	6.0ppm	1.5ppm
	100%	25%	100%	25%

비 고

- 측정 시점 : 발파 1분 경과 후 측정
- 측정 장비  
⇒ CO 검측장비 : IQ350(IST社)  
⇒ NOx 검측장비 : ToxiRAE II (RAE社)
- 측정 시간 : 약 10분
- 측정위치  
⇒ 막장 전방 약 15~20m지점
- 측정단위  
⇒ 10초 단위로 가스농도(ppm) 계측

## 2.7 파쇄도 분석결과

가늘고 균질한 파쇄입도를 생산하는 발파기술은 2차 브레이커 작업 소요시간을 최적화 시키고 동일 규모의 Mucking system으로 보다 효율적인 작업을 가능하게 하므로 경제적이고 능률적인 작업여건 조성에 있어 매우 중요한 요소이다. 특히, 대단면 장대 터널에서 급속굴진을 위해 장공발파를 고려한다면 대량으로 발생하는 암 버력에 대한 효율적 처리수단을 강구하여야 한다. 대체로 토목터널에서는 Dump+Loader에 의한 버력 처리 방식이 일반적인 방식으로서 대량의 생산버력 처리수단으로 운행거리별로 장비소요대수와 장비용량을 고려해야할 뿐 아니라, 균질한 입도의 버력을 생산할 수 있는 발파 방법을 선정하는 것 역시 무엇보다도 중요하다. Bulk emulsion 적용

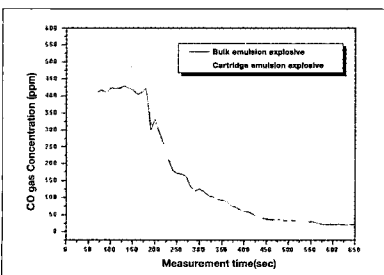


그림 17. 시간이력별 CO gas 변화추이

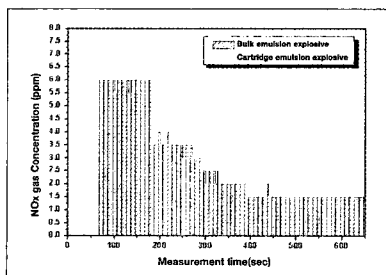

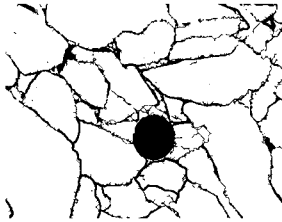
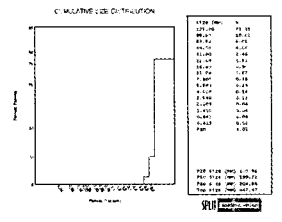

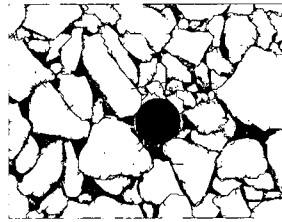
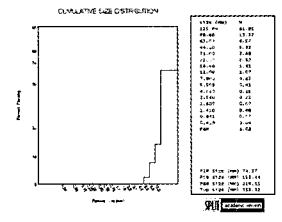


그림 18. 시간이력별 NOx gas 변화추이



표 8. 암 파쇄입도 비교결과

구 분	파쇄입도 분석사진	디지털 영상처리결과	입도누적곡선
일반 Cartridge 적용			
Bulk emulsion 적용			

결과 일반 포장형 화약류를 적용하였을 경우에 비하여 평균 파쇄입도( $P_{50}$ )는 64.52%, 최대 파쇄입도( $P_{Top}$ )는 69.1% 수준으로 평균 35%이상 파쇄효율이 향상된 결과를 얻었고 더불어 균질한 입도 분포 양상을 보이는 것으로 분석되었다.

### 2.8 Cycle time 분석

기존 천공장 대비 10%이상 증가시켰을 경우, 버력량의 처리, 막장 안정화를 위한 정리작업 및 보강구간의 증가 등 공중별 소요 작업시간이 증가할 것으로 예상된다. 따라서 기존의 작업 Cycle내에서 1일 2회 발파로 계획 굴진장 확보가 가능함을 판단하기 위해 공중별 소요 작업시간을 분석하였다. 기존의 작업 Cycle과 비교검증을 위해 천공→발파→버력처리→보강작업등의 작업 Cycle을 12시간, 1일 2회 발파를 기준으로 하였으며 장비 고장이나 기타 불규칙적 장애요인에 의한 시간손실량은 조사대상에서 배제하였다.

조사결과 기존 작업 Cycle은 평균 9.45시간이 소요되었고 Bulk emulsion system 적용시에는 평균 9.83시간

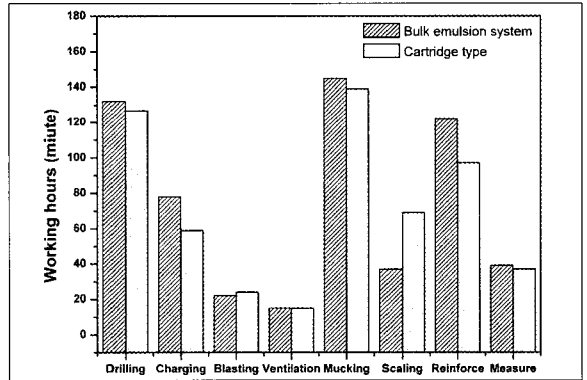


그림 19. 공중별 소요 작업시간 비교

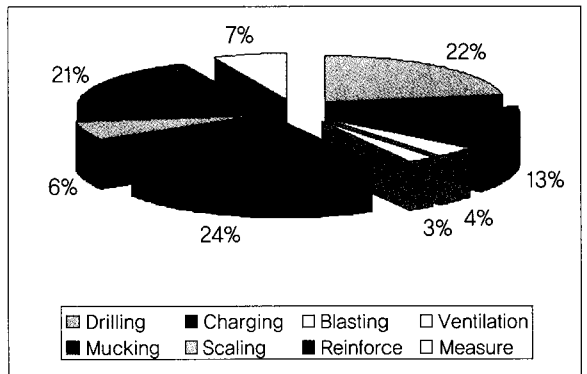


그림 20. 공중별 소요시간 비율 (Bulk emulsion system)

이 소요되었는데 이는 기계화 장전장비 적용에 따른 인원 배치 및 장비활용 미숙으로 인한 장전시간 증대, 10%이상의 굴진장 증가로 인한 보강시간 증대가 주요인인 것으로 판단된다. 반면에 Scaling 및 Mucking에 소요되는 작업 시간은 Bulk emulsion system이 상대적으로 절감되는 효과가 있었다.

### 3. 결론

본 고에서는 굴진효율이 저조한 국내 2개 도로터널 현장을 대상으로 Bulk emulsion system을 적용하여, 기존 방법보다 천공장을 증대하면서 동시에 굴진효율 등 시공성을 향상시키는 고속 발파시공 현장 시험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Bulk emulsion 기계화 장전시스템에 의한 터널굴진은 서구 유럽과 아시아등 이미 전 세계에서 보편적으로 적용되고 있으나 국내에서는 적용실적이 미미한 편이다. 굴진효율이 저조한 국내 2개 도로터널현장을 대상으로 지보패턴 I, II 구간에서 시험시공을 수행하였으며 기존 시공방법에 비하여 최대 15% 천공장을 증가시켰음에도 불구하고 평균 10% 이상 굴진효율이 향상되는 결과를 얻었다.

(2) Round당 폭약 사용량이 기존 Cartridge type에 비하여 48.8~89.8% 증가하나 굴진효율 향상으로 인하여 비 장약량은 30~43% 증가하였다. 진동수준은 이격거리가 증가함에 따라 발생 진동수준 차이는 점차로 줄어드는 경향을 보였으며 여굴량과 발파 후 유해가스 발생량은 기존 발파방법과 크게 차이가 없었다. 파쇄도 분석결과 밀장전 효과로 인해 30%이상의 파쇄도 향상효과가 있어 효율적인 Mucking system 운용에 매우 유리할 것으로 판단된다.

(3) 기존 작업Cycle은 평균 9.45시간인데 반해 Bulk emulsion system은 평균 9.83시간이 소요되었는데 이는 기계화 장전장비 적용에 따른 적정 인원배치 및 장비활용 미숙이 원인으로 향후 작업 숙련도가 확보되면 하단에서 호스를 이용한 장전작업과 상단에서 작업대치를 활용한 외곽공 및 Booster장전 작업을 동시에 수행할 수 있으므로 오히려 작업시간이 절감될 것이다. 또한 10%이상의 Round당 굴진장 증대로 보강시간(Shotcrete 및 Rock bolt시공)에 소요되는 시간은 증가하나 공저부의 파쇄효율 증가에 의한 Scaling등 막장정리에 소요되는 작업시간은 절감되며 파쇄입도 향상에 의해 Mucking 처리에 소요되는 작업시간도 상대적으로 감소하는 효과가 있어 근접 지역에 지장물이 거의 없는 산악지역 대단면 장대터널굴착에서는 공기단축효과가 있을 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. 〇〇~〇〇간 6공구 실시설계 지반조사 보고서, 2001, 에스케이건설(주)
2. 터널에서 bulk emulsion system을 이용한 설계기법 연구, 2006, 대한 화약발파공학회
3. Stig O. Olofsson, 1995, Applied explosives technology for construction and mining, P 31~32
4. T.N Hagan & M.B Duval, 1993, The importance of some performance properties of bulk explosives in rock blasting, Rock fragmentation by blasting, Fragblast-4, p 387~394