

장공 터널발파에서 Emulsion폭약의 시공사례와 적용성에 관한 연구

A Case Study of Application of the Emulsion Explosives in Long Hole
Tunnel Blasting

조영곤¹⁾, 이상돈²⁾, 김희도¹⁾

Young-gon Joe, Sang-don Lee, Hee-do Kim

¹⁾(주)고려노벨화약, ²⁾한국도로공사 도로연구소

초 록

일반적으로 장공발파(長孔發破) 방법(Long hole blasting method)은 그동안 주로 대규모 채탄막장이나 댐 기초굴착, 광산 등에서 행하여져 왔으나 최근 토목터널에서 시공 효율성 및 경제성을 목적으로 관심이 높아지고 있다. 기존의 터널설계 패턴은 I-Type을 기준으로 3.5~3.8m 천공이며 신공법 적용시 최대 4.0m까지 설계되는 것이 보통이었다. 과거 착암장비는 천공장이 늘어남으로서 슬러지에 의한 천공속도가 저하되어 천공비가 증가하기 때문에 빠른 슬러지 배제가 필요하고 Rod의 휨 현상에 의한 천공오차의 증대를 초래할 수 있는 단점이 있었다. 그러나 최근 장비의 발달로 인하여 천공각도 및 천공장 등을 Computer로 모니터링하여 제어할 수 있어 정밀한 천공이 가능하여 졌고 또한, 고성능 에멀전계 폭약(Super Emulsion)의 개발로 그동안 극 경암터널에서 에멀전계 폭약의 단점으로 여겨졌던 비 장약량의 증대와 사압현상의 발생, 굴진효율 저하문제를 극복할 수 있었다. 따라서 본 연구는 현재 건설중인 대상현장을 중심으로 장공 터널발파의 효율성과 경제성을 분석하고 나아가 암질에 따른 새로운 Type별 설계기준을 마련하는 기초자료로서 활용하고자 하였다. 본 연구의 대상현장은 충북 괴산군 영풍면 소재 중부내륙(여주-구미간) 고속도로 제 9공구 이화터널 건설공사현장으로 ϕ 102mm 무 장약공 Cylinder 4공을 이용한 심발법을 사용하였으며 천공장은 최대 5.0m로 2000년 11월 15일에서 동년 12월 15일까지 31일간 총 112회의 시험발파를 실시하여 평균 92%의 높은 굴진 효율을 기록하였다.

핵심어 : 장공발파, 에멀전계 폭약, Super Emulsion, 무장약공 Cylinder-cut

1. 서론

전 국토의 70% 이상이 산악지대인 국내의 지리적인 여건상 각종 도로터널과 지하공간에 대한 수요가 급증하고 있으며 이는 국토의 효율적인 이용과 자원의 낭비를 방지하기 위한 수단으로서 앞으로도 시급히 전개되는 중요한 국가 정책중의 하나이다. 또한, 각종 토목터널을 시공하는 현장에서는 적합한 시공기술을 적용하여 가장 효율적인 굴착방법이 될 수 있도록 꾸준한 노력을 하여왔다. 그러나 현장에서 요구하는 사항 중 안전성과 경제성, 시공성을 동시에 만족시키기는 그리 쉽지 않은 것이 사실이다. 본 연구에서는 터널 현장에서 발파로 인해 발생하는 각종 유해 요소 중 최대한 안전한 시공이 될 수 있도록 Emulsion계중 극경암용 폭약을 사용하였고 터널내 잔존할 수 있는 모든 전기적인 요소에 의한 위험성을 배제하기 위해 비전기식 뇌관을 사용하였다. 또한, 천공 정밀도에 의한 시공능률을 증진시키기 위하여 컴퓨터 장비를 장착한 점보드릴을 사용하였으며 최소 3.0m에서 최대 5.0m의 장공 천공을 하여 굴진률을 비교하였으며 S·B공열 간격에 따른 여굴 및 미굴량을 측정하므로써 적절한 최 외곽공 설계에 대해 알아보고 발파 후 가스량을 측정하여 장대터널 시공에 있어서의 작업자들의 작업여건 개선 사항에 대해서도 알아보았다.

2. 본론

본 연구의 대상현장은 충북 괴산군 영풍면에 위치하는 현장으로 대상 지형 및 지질을 알아보면 다음과 같다.

2.1 지형 및 지질

가. 지형

大韓火藥技術學會誌

본 발파현장은 총 연장이 5.28km 고속도로 편도 2차선 터널현장으로 도로노선은 북동쪽에서 남서쪽으로 이어져서 소백산맥 줄기를 동서로 가로지르는 위치에 있다.

본 지역은 장년기의 험준한 산악지대로서 계획노선 상하로 북쪽의 조령산(1,025m)과 남쪽의 백화산(1,063m), 회양산(998m), 덕사산(866m)등 크고 험준한 산봉들이 능선을 이루고 있으며, 조령산에서 이화령고개를 지나 백화산의 정점들이 좌, 우 경계로 서쪽은 충청북도 괴산군, 동쪽은 경상북도 문경군으로 구분된다.

나. 지질

본 현장의 지질은 시대미상의 백화리 각섬암 및 상내리층, 이들과 부정합 관계에 놓여있는 시대미상의 옥천계 지층인 이화령층, 조봉층, 백화산층과 이들을 관입한 중생대 백악기 지층인 화강암류들이 다양하게 분포하고 있다. 시험기간중 대상암반을 Face mapping한 결과 막장면은 최소 2~3개 이상의 절리군과 Fault zone을 내재하고 있으며 절리면 상태는 대체로 매끄럽고 기복상의 평면절리가 약 40~60cm 간격으로 잘 발달되어 있었다. 평균 RQD는 60~70% 였고 지하수 조건은 건조한 상태로 평균 RMR은 62~72 였다.

암의 주향은 N10° W~ N15° W로서 터널 굴진축에 대해 수직에 가까우므로 굴진에 상당히 유리한 상황이다.

2.2 발파제원

(1) 사용화약류

본 연구에 사용된 폭약류 및 뇌관류의 성능 및 재원을 대략 정리하면 표 1, 표 2, 표 3과 같다.

표 1. 사용된 폭약의 특성

Product	Velocity (m/sec)	Density (g/cc)	Energy (Kcal/kg)	Gas Amount (ℓ/kg)	Cold Resistance	Water Resistance	USE
Super Emulsion	5,800	1.28	1,398	675	-20 ℃	Excellent	For Hard Rock
New Emulite 150 / 200	5,900	1.25	1,100 / 1,165	830 / 812	-20 ℃	Excellent	
Kinex-1	4,200	1.20	870	900	-20 ℃	Excellent	

표 2. 사용된 폭약의 재원

Product	Diameter	Length	Weight	Number per Box	Weight per Box	Packing type
Super Emulsion	32 mm	400 mm	375 g	60 EA	22.5 Kg	Paper Pipe
	36 mm	500 mm	625 g	32 EA	20.0 Kg	Plastic Pipe
New Emulite 150/200	32 mm	400 mm	375 g	60 EA	22.5 Kg	Paper Pipe
	36 mm	500 mm	625 g	32 EA	20.0 Kg	Plastic Pipe
Kinex-1	17 mm	1,000 mm	250 g	80 EA	20.0 Kg	Plastic Pipe

표 3. 사용된 뇌관 재원

Applied Detonators	Period No.	Tube Length	Type
Nonel MS	# 3 ~ 20	7.8 m	공지뇌관
Nonel LP	# 6 ~ 30	7.8 m	공지뇌관
Nonel Bunch Connector	SL0, SL42	4.8 m	표면뇌관

(2) 천공

가. 천공경 : 무장약공 - 102mm , 장약공 - 45mm

나. 천공장 : 5.0m

다. 천공장비 :

- TAMROCK Data Titan 316 1대 (3-boom, 440V, Computer-controlled drilling System)

- Atlas Copco - Rocket Boomer 353ES 1대 (3-boom, 440V, Automatic Drilling System)

라. 천공패턴

본 연구에서는 T-CAD(Computer Aided drilling)를 탑재한 점보드릴을 사용함으로써 가능한 정밀한 천공이 이루어 질 수 있도록 하여 천공오차에 의한 발파 실패율을 경감시켰다.

그림 1은 천공패턴도이고 그림 2는 심발부의 천공패턴이다. 그림 2에서와 같이 심발부는 중앙에 $\phi 45\text{mm}$ 장약공을 두고 십자형으로 $\phi 102\text{mm}$ 무장약공을 4공 천공하였다.

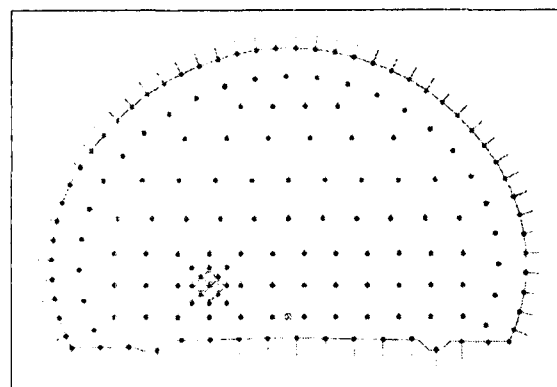


그림 1. 천공 패턴도

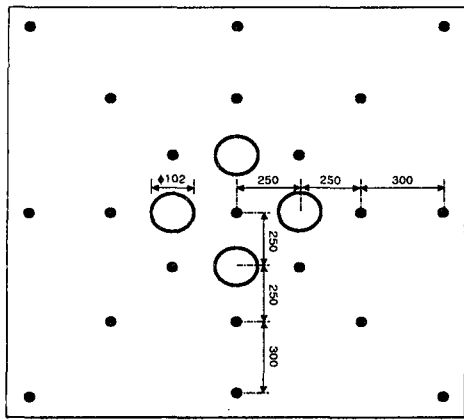


그림 2. 심발부 천공 패턴

은 평균 92.8%, 하행선은 평균 90.8%의 굴진효율을 나타내었고 평균 비 장약량은 상/하행선 각각 1.18kg/m³와 1.29kg/m³ 이었다.

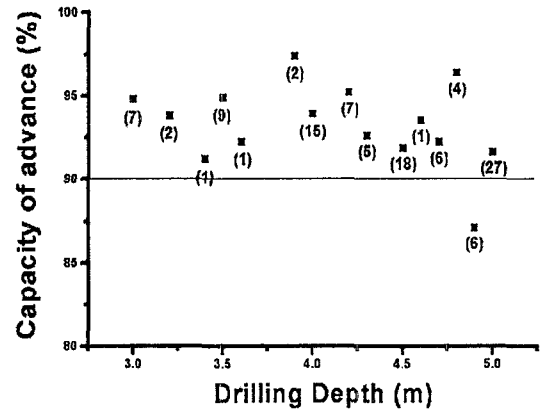


그림 3. 천공장에 따른 굴진률 비교

3. 발파결과

3.1 상/하행선 발파결과

2000년 11월 15일부터 동년 12월 15일 까지 31일간 상행선과 하행선의 총 112회 발파 결과를 종합한 결과는 표 4와 같으며 천공장은 3.0m에서 최대 5.0m 까지 변화를 주었다. 천공장의 변화에 따른 굴진효율은 그림. 3과 같으며 천공장의 변화에 따른 굴진효율의 저하현상은 나타나지 않았다.

그림 3에서 괄호 안의 숫자는 발파회수를 나타내고 각 천공장에 따른 굴진효율은 이들의 평균치를 계산한 결과를 나타낸 것이다. 상행선

본 터널현장의 단축압축강도는 150MPa~250MPa의 경암 및 극경암 지역으로 당사 극경암용 Emulsion 폭약인 Super Emulsion을 사용하였으나 일반적으로 장공(長孔)에서 Emulsion 폭약의 단점으로 알려진 사압현상으로 인한 잔류공 생성 및 암반 강도에 따른 발파효율의 저하에 대한 문제점은 본 연구에서 찾아볼 수 없었다. 따라서 터널현장의 굴진 능력을 좌우하는 여러 가지 설계변수 중 암질(巖質)에 따른 적정

표 4. 상행선 및 하행선 발파 결과 비교 (기간 : 2000년 11월 15일 ~ 12월 15일 (31일간))

구분	상행선	하행선	합계
단면적 (m ²)	98.6	98.6	197.2
발파횟수	56회	56회	112회
폭약량 (Kg)	25,529	28,029	53,558
천공장 (m)	239.5	245.8	485.3
굴진장 (m)	222.4	223.2	445.6
굴진율 (%)	92.8	90.8	91.8
암 생산량 (m ³)	21,573	21,650	43,223
비 장약량 (kg/m ³)	1.18	1.29	1.24

한 천공패턴의 설계 및 정밀한 천공이 무엇보다 중요하다 하는 것은 주지한 사실이며 이와 더불어 발파 작업 중 안전사고를 미연에 예방할 수 있는 화약류의 사용의 올바른 인식과 선택이 무엇보다도 선행되어야 할 것이다.

3.2 최외곽공 천공패턴과 여굴 및 미굴현황

당 현장의 최외곽공은 S.B공법을 적용하였으며 공간격은 60~70cm 간격으로 천공하였고 장약 밀도는 0.275kg/m이었고 약 30~40cm는 발파효과를 높이기 위하여 Tamping 하였다.

여굴은 Profiler를 사용하여 측정하였으며 결과는 표 5와 같다. 여기서 미굴을 포함하지 않은 여굴 깊이는 여굴 부분만을 따로 계산하여 구한 평균 여굴 깊이이다. 당 현장의 경우 단면외곽으로부터 천공편차를 30cm로 설계하였으므로 점보드릴에 의한 여굴량은 굴진 중간지점에서 13.5cm(굴진률 90% 기준)나 되는데 실제로 평균 여굴량은 아주 작게 측정되었다. 총 5차례에 걸친 여굴 측정 결과를 종합하면 여굴 발생에 영향을 미치는 가장 주요한 변수는 천공이며 천공 정밀도를 확보한 상태에서 최적의 패턴 설계가 이루어 저야만 전체 여굴량을 줄일 수 있게된다. 만약 암질이 불량하다면 최 외곽공의 천공패턴을 줄여주어야 할 필요성이 있겠지만 일반적으로 천공간격은 60cm 내외가 적당

하며 균질한 암질일 경우 최고 70cm 이상으로 설계하는 것도 가능할 것으로 판단된다.(2)

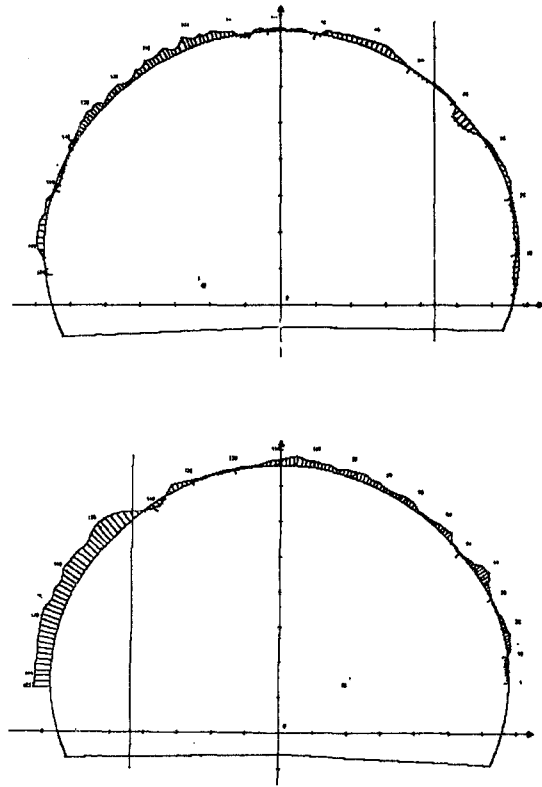


그림 4. 여굴 및 미굴 측정 결과

표 5. 시험발파에서의 단면측정 결과

발파 회차	장약공수 (개)	비장약량 (kg/m ³)	최외곽공 간격(cm)	여 굴		미 굴		평균여굴깊이 (cm)
				단면적 (m ²)	원주길이 (m)	단면적 (m ²)	원주길이 (m)	
1	156	1.2338	71	7.155	22.831	0.074	2.073	27.9
2	169	1.5499	58	2.164	17.230	0.208	5.016	10.2
3	171	1.6795	62	3.371	18.532	0.089	1.766	16.0
4	167	1.4084	61	1.946	15.703	0.527	7.062	8.9
5	166	1.3376	62	4.362	19.057	0.101	1.748	20.2
평균			62.8					16.6

3.3 발파 후 가스 측정결과

본 연구에서는 G·C(Gas Chromatography)를 사용하여 발파 후 후가스를 20회 이상 측정하였다. 터널내 작업환경에서 발파 후가스는 작업원의 인체에 직접적인 피해를 줄 수 있고 특히, 1km이상의 장대터널과 같은 열악한 환경에서는 작업원의 건강을 위해 유해가스를 작게 배출하는 제품을 선택하여야 한다. 본 실험에서는 기존의 Emulsion 제품과 당 대상현장에서 사용하고 있는 Super Emulsion의 암모니아(NH₃) 농도를 측정하였다. 측정방법은 발파 약 1~2분 후 막장에 들어가 버럭 더미에서 5분에 걸쳐 총 20여 차례 측정하였다. 측정결과 기존 Emulsion폭약 사용시 5~8 ppm이었던 NH₃ 농도가 1~2ppm⁽¹⁾ 정도로 줄어들어 기존 Emulsion 제품의 약 15~25% 정도 수준이었다. (표 6 참조)

표 6. NH₃ (암모니아) Gas 발생량 비교

기존의 Emulsion 폭약	Super Emulsion	비 고
5 ~ 8 ppm	1 ~ 2 ppm	75 ~ 85 % 감소

또한, 발파 후 Super Emulsion은 가시정도가 정상시와 거의 비슷한 수준으로 쾌적한 환경을 유지할 수 있는 환경 친화적인 폭약이라고 말할 수 있다.

4. 결과분석

- 1) 상행선과 하행선에서 총 112회 실시하여
 - 485.3m를 천공하여 445.6m를 굴진함으로써 91.8%의 굴진효율을 보임.
 - 비장약량은 상행선이 1.18, 하행선이 1.29로써 평균 1.23으로 나타남.

2) Cylinder-cut을 이용한 長孔발파를 기존의 발파방식(V-cut)과 비교하면,

구 분	장공발파	기존발파	비 고
심발방법	Cylinder-cut	V-cut	
천 공 장	5.0m	3.5m	
굴 진 율	91.8%	87.9%	
굴 진 장	4.6m	3.1m	
1일 굴진장	13.8m	9.3m	48.4% 증가
공사기간	72.5일	107.5일	35일 단축

- Cylinder-cut을 이용한 장공발파시 V-cut 대비 굴진율 3.9% 증가를 보임
- 비장약량은 17.5% 감소함

3) 위의 결과를 토대로 1,000m 터널 굴진시 (1일 3회 발파)

구 분	장공발파	기존발파	비 고
위 치	이화터널(9공구)	연풍터널(8공구)	중부내륙고속도로
심발방법	Cylinder-cut	V-cut	
천 공 장	5.0m	3.5m	
굴 진 율	91.8%	87.9%	3.9% 증가
비장약량	1.23	1.49	17.5% 감소
사용폭약류	Super Emulsion NONEL	Super Emulsion NONEL	

- 1일 3회 발파시 V-cut 대비 1일 굴진장은 48.4%의 증가를 보임.
- 1,000m 굴진시 V-cut 대비 공사기간이 35일 단축되어 시공비 절감효과가 있음 (단순 굴진비용 비교)

표 7. 상행선 발파결과

No	Weight (kg)	Detonator (EA)	Drilling depth (m)	Advance (m)	Specific charge (kg/m ³)	No	Weight (kg)	Detonator (EA)	Drilling depth (m)	Advance (m)	Specific charge (kg/m ³)
1	435.00	163	4.9	3.7	1.21	29	533.25	171	4.5	4.4	1.25
2	408.75	156	3.3	2.2	1.92	30	478.00	171	4.5	4.3	1.15
3	408.54	172	4.2	4.0	1.05	31	507.00	180	4.3	4.0	1.31
4	533.13	167	4.3	4.0	1.37	32	461.00	178	5.0	4.9	0.97
5	515.25	185	3.4	3.1	1.71	33	481.88	188	4.5	4.4	1.13
6	633.25	179	4.6	4.3	1.52	34	498.50	178	4.8	4.7	1.09
7	490.75	176	4.2	4.0	1.26	35	533.75	181	4.7	4.5	1.22
8	546.75	175	4.2	4.0	1.41	36	493.25	178	4.7	4.5	1.13
9	588.00	176	4.3	4.3	1.41	37	497.88	179	4.5	4.4	1.17
10	570.25	178	4.3	4.1	1.43	38	462.75	178	4.2	4.0	1.19
11	652.50	165	4.9	4.8	1.40	39	519.38	178	4.7	4.5	1.19
12	660.00	161	5.0	4.8	1.42	40	469.63	184	4.5	4.4	1.10
13	397.50	154	3.0	2.8	1.46	41	520.63	182	5.0	4.9	1.78
14	461.63	157	5.0	4.7	1.01	42	401.25	178	4.5	4.3	0.96
15	424.25	165	5.0	4.8	0.91	43	355.75	177	3.2	3.0	1.22
16	263.25	165	3.0	2.8	0.97	44	426.00	151	4.2	4.0	1.10
17	521.00	159	5.0	4.8	1.12	45	335.50	176	3.2	3.0	1.15
18	372.50	159	3.5	3.4	1.13	46	451.25	176	4.5	4.2	1.11
19	533.25	188	4.5	4.4	1.25	47	408.75	164	4.0	3.5	1.20
20	478.00	191	4.5	4.3	1.15	48	325.50	159	3.0	2.7	1.24
21	652.50	176	4.9	4.8	1.40	49	346.25	176	4.5	2.5	1.43
22	660.00	173	5.0	4.8	1.42	50	423.63	189	5.0	4.0	1.09
23	397.50	176	3.0	2.9	1.41	51	325.50	176	4.0	3.0	1.12
24	461.63	173	5.0	4.8	0.99	52	296.75	176	3.0	3.0	1.02
25	424.25	176	5.0	4.8	0.91	53	356.75	171	3.5	3.5	1.05
26	263.25	167	3.0	2.9	0.94	54	426.88	178	4.5	3.5	1.26
27	521.00	177	5.0	4.8	1.12	55	497.50	184	5.0	4.2	1.22
28	372.50	177	3.0	2.8	1.37	56	517.00	189	4.5	4.2	1.27
TOTAL							-	9,725	239.5	222.4	1.18

표 8. 하행선 발파결과

No	Weight (kg)	Detonator (EA)	Drilling depth (m)	Advance (m)	Specific charge (kg/m ³)	No	Weight (kg)	Detonator (EA)	Drilling depth (m)	Advance (m)	Specific charge (kg/m ³)
1	294.50	147	4.9	4.8	0.63	29	585.00	188	4.0	3.8	1.59
2	289.50	181	3.9	3.7	0.81	30	480.00	177	4.0	3.7	1.34
3	376.88	177	4.3	3.5	1.11	31	508.13	190	4.7	4.5	1.16
4	510.00	166	4.0	3.8	1.38	32	550.13	178	5.0	4.8	1.18
5	614.38	171	5.0	3.8	1.67	33	427.88	181	4.0	3.8	1.16
6	543.38	166	3.9	3.9	1.44	34	540.88	180	5.0	4.8	1.16
7	565.00	175	4.0	4.0	1.46	35	511.25	190	4.5	4.4	1.20
8	606.50	176	4.9	2.7	2.32	36	377.38	174	3.5	3.4	1.14
9	395.00	176	3.6	3.5	1.16	37	532.00	182	4.8	4.6	1.19
10	637.50	176	4.9	4.8	1.37	38	539.63	178	4.8	4.6	1.21
11	540.00	178	4.0	3.8	1.47	39	473.88	179	4.5	4.3	1.14
12	567.50	178	5.0	4.8	1.22	40	535.63	181	5.0	4.9	1.13
13	610.12	170	5.0	2.0	3.14	41	432.75	177	4.5	4.0	1.12
14	478.75	175	3.5	3.3	1.50	42	506.38	182	4.5	4.2	1.24
15	565.48	178	5.0	3.7	1.58	43	463.75	181	5.0	4.8	1.00
16	456.50	178	4.0	3.6	1.31	44	512.63	173	5.0	4.8	1.10
17	475.75	178	3.5	3.2	1.53	45	490.75	177	4.7	4.5	1.12
18	570.00	174	4.0	3.5	1.68	46	447.50	178	4.2	4.0	1.15
19	585.00	176	4.0	3.8	1.59	47	476.25	178	5.0	4.5	1.09
20	637.50	188	5.0	4.8	1.37	48	375.00	177	3.5	3.0	1.29
21	540.00	190	4.0	3.8	1.47	49	524.50	176	4.8	4.6	1.18
22	567.50	190	5.0	4.8	1.22	50	485.00	178	4.7	3.5	1.43
23	610.12	184	5.0	3.5	1.80	51	362.25	178	4.0	4.0	0.93
24	478.75	187	3.5	3.4	1.45	52	436.88	178	4.2	4.0	1.13
25	565.48	191	5.0	4.0	1.46	53	349.88	174	3.5	3.5	1.03
26	456.50	190	4.0	3.7	1.27	54	521.50	181	5.0	4.8	1.12
27	425.75	190	3.5	3.2	1.37	55	559.50	188	4.5	4.2	1.37
28	570.00	186	4.0	3.8	1.55	56	489.63	188	4.5	4.0	1.26
TOTAL							-	10,034	245.8	223.2	1.29

5. 기대효과 및 발전방향

1) 건설장비의 발달로 인하여 천공장비를 컴퓨터로 제어하는 점보드릴을 사용함으로써 정확한 천공을 요구하는 Cylinder-cut에서 5m 이상의 장공(長孔)천공이 가능해졌다.

2) 정확한 천공을 통한 장공발파는 비 장약량의 감소로 이어져 폭약의 사용량을 줄일 수 있다.

3) Cylinder-cut을 이용한 장공발파의 적용으로 경암 및 극경암 터널현장에서 1회 발파당 굴진장의 증가로 공사기간이 단축되어 시공비용을 절감할 수 있다.

4) Cylinder-cut에 Emulsion 폭약을 적용함으로써 발파 후 발생되는 유해가스가 감소되어 1Km 이상의 장대터널에서 작업환경을 쾌적하게 하여 작업의 능률을 향상시킬 수 있다.

참 고 문 헌

1. Patent application No. 10-1999-0045024 "Energetic cartridge explosive emulsions", Nobel Explosives France(5-1999-051536-2), 1999, Section10 Comparative Technical data for Super Emulsion and standard emulsions (Detonating performances, operational efficiency, safety and impact environment , 10.4 Toxic fumes measurements.
2. "여굴 최소화를 위한 최적 발파패턴 설계 방안에 관한 연구", 이상돈, 김나경, 김동인, 한국 도로공사 도로 연구소, p.106, 2000.