

터널굴진에서 장약 및 기폭방법 개선에 관한 연구

오이환¹⁾, 원연호^{1)*}, 임한옥²⁾

A Study on the Improvement of a Charging and Initiating Method in a Tunnel Excavation

E-Hwan Oh, Yeon-Ho Won and Han-Uk Lim

Abstract : In this study, a charging density has been differently applied to all holes to improve an excavated length per round on excavating a tunnel in quartzite mine and to prevent a dead pressure phenomena and sintering phenomena. A composition initiating system using simultaneously a direct initiating system and an indirect initiating system with 2 detonators in one hole has been introduced to cut holes. As a bottom part which is difficult to make a free face are charged with a higher charging density and a column part are charged with a lower charging density, the composition charging and initiating system which the power of explosives works effectively in the rock mass is developed. As the results, a dead pressure phenomena and a sintering phenomena being often produced in a hard rock or in a long hole could be prevented. Besides, the workability was improved by about 15% and the specific charge was reduced to about 20%, as an excavated length vs. a drilled length per round could be increased over 95%.

Key words : charging density, composition charging and initiating system, excavated length, specific charge

초 록 : 본 연구는 규석광의 터널 굴착시 굴진장 향상과 사압현상 및 소결현상을 예방하기 위해 모든 장약공의 장약밀도를 다르게 적용하였다. 이 때 심발공은 동일 장약공내에 2개의 뇌관을 이용한 정기폭과 역기폭의 복합기폭방식을 도입하였다. 자유면 형성이 어려운 공저부분은 높은 장약밀도로 장전하고, 주상부분은 공저보다 낮은 장약밀도로 장전함으로써 폭약의 위력이 효과적으로 암반에 대응할 수 있는 공법인 복합장약기폭시스템을 개발하였다. 그 결과 경암이나 장공발파에서 흔히 발생하는 사압현상 및 소결현상 등을 방지할 수 있었다. 또한 1회 천공장 대비 굴진장을 95% 이상 증대시킴으로써 약 15% 정도의 시공능율이 향상되고 비장약량이 20% 정도 감소되었다.

핵심어 : 장약밀도, 복합장약기폭시스템, 굴진장, 비장약량

1. 서 론

국내에서는 여러 분야에서 발파작업이 활발히 수행되고 있으며, 발파 작업은 시행되는 위치에 따라 크게 노천발파와 터널(지하) 발파로 나눌 수 있다. 일반적으로 노천발파는 작업공간의 확보가 용이하여 굴착장비의 선택 폭이 넓으며 장공에 의

한 대규모 발파도 가능하다. 반면 터널발파는 작업공간의 제한으로 장비운용에 한계가 있으며 구속도가 큰 단일 자유면 상태이므로 굴진장은 짧고 발파효율은 낮은 편이다.

굴진능율을 향상시키기 위해 여러 방안이 채택되고 있으나 그 중심은 심폐기발파법에 의하여 좌우된다고 할 수 있다. 이를 위하여 터널발파는 1자유면하에서의 기하학적 형태에 따라 브이 커트, 번 커트 및 실린더 커트 등이 널리 이용되나, 어떤 심폐기 패턴을 적용하든지 공내 장약 밀도는 전체 장약공 내에 균일하게 실시되고 있다. 따라서 구속압이 큰 공저부분에 보통 잔류공이 남게 된다(임과이, 1995; 이부경, 1998; 강과 심, 1996).

1) 원앤비기술사사무소

2) 강원대학교 명예교수

* Corresponding author : yhwon99@yahoo.co.kr

접수일 : 2006년 5월 27일

게재승인일 : 2006년 6월 22일

한편, 전폭약포의 위치에 따라 정기폭과 역기폭 방법이 있는데, 터널의 경우 발파 효율을 고려하여 일반적으로 역기폭 방법을 선호하고 있으며, 이와 같은 방법으로 1회 굴진장은 천공장의 90% 수준 정도가 된다. 그 주된 이유는 공저부분에서 구속압이 커 뿌리깎기 작업이 원활치 못하여 공저 부분에 천공장의 약 10%가 잔류공으로 남기 때문이다(임과 이, 1995; 김재극, 1992; Person et al., 1994). 또한, 발파에 의하여 파쇄된 암편이 공저에서 공구 쪽으로 이동하는 암편의 속도보다 공(孔)과 공(孔) 사이에서 발생하는 충격파의 진행속도가 더 빨라 소결현상이나 사압현상 또는 컷-오프현상 등에 의하여 장공발파에 한계가 있다.

본 연구에서는 이러한 한계들을 극복하고 뿌리깎기 작업을 원활히 실시하기 위하여 복합장약법과 복합기폭법을 병용하여 뿌리깎기를 원활히 실시함으로써 발파효율을 증대시키는 복합장약기폭

시스템을 개발하였으며, 이러한 시스템으로 암반의 강도가 비교적 큰 규석광산을 대상으로 폭약의 위력이 비교적 낮은 에멀전계 폭약을 사용하였음에도 경압이나 장공발파에서 흔히 발생하는 소결현상, 사압현상, 컷-오프 현상 등의 발생없이 굴진효율을 증대시킬 수 있었다.

2. 시험조건 및 현장 적용시험

2.1 대상지역의 지질 및 암석의 물성

시험 대상 지역의 지질은 선캄브리아기 흑운모 편마암, 시대 미상의 복운모 화강암 및 중생대 관입 산성암맥류 등으로 구성되어 있으며, 광상은 관입에 의한 산성의 규장암맥으로 백색 치밀한 비정질 석영맥이나 부분적으로 장석질이 혼재되어 있다. 발파 후 얻어진 암석의 실내물성실험결과는 Table 1과 같다.

Table 1. The material properties of in-situ rock

Apparent density (g/cm ³)	P/S wave velocity (m/s)	Absorption (%)	Uni. comp. strength (kgf/cm ²)	Elastic modulus (10 ⁵ kgf/cm ²)	Poisson's ratio
2.700	4,400/2,600	0.520	1,500	5.200	0.240

2.2 기존의 발파공법

대상현장 터널의 갱도형태는 사각구조이며, 크기는 8(너비)m×6(높이)m, 적용된 기존발파공법의 발파제원은 Fig. 1과 같으며 제원상 특이사항은 102mm 무장약공 1공 / 천공장 3.8m, 기타 공들은 45mm 공경으로 천공장 3.7m, 총 공수 120공이다.

기존발파패턴의 적용결과, 심빼기에 따른 신자유면의 전개 부족으로 뿌리깎기가 원활히 이루어지지 못하여 사압현상과 소결현상, 컷 오프 현상, 철폐현상 등이 빈발하였으며 굴진율(굴진장/천공장)은 약 56%로 매우 저조하였다.

2.3 새로운 발파패턴

터널 갱도의 형태와 크기는 기존발파공법과 동일하다.

심빼기공의 배치

이론식에 준거하여 Ø64mm 비트를 이용한 시험 발파로 장공발파시 자유면의 형성이 가능한 최단거리의 저항선으로서 a=200mm 로 가정하여 다음과 같은 계산식을 적용하였다.

$$a \geq 1.96\phi \quad (1)$$

$$b = 1.23 a \quad (2)$$

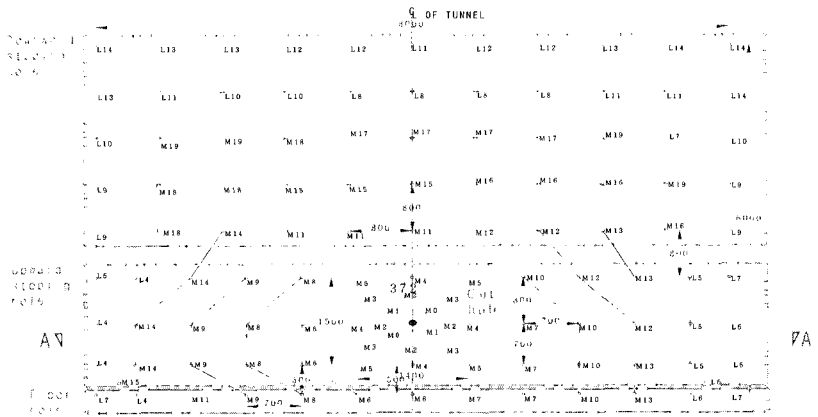
$$c = 1.23 b \quad (3)$$

여기서, a = 무장약공의 중심에서 1차 사각형과의 최단거리, b = 1차 사각형과 2차 사각형과의 최단거리, c = 2차 사각형과 3차 사각형과의 최단

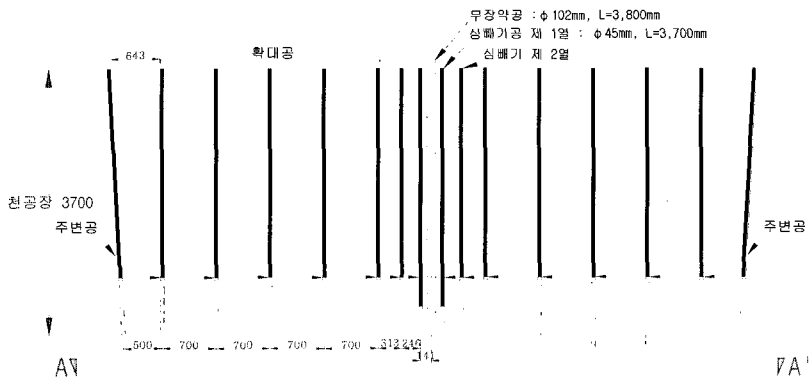
거리, \emptyset = 무장약공의 직경(비트 직경 102mm)

(decoupling계수)의 감소로 발생가스압의 증대, 공저장약량 확대 등의 효과에 의하여 비교적 폭속이 낮은 에멀전 폭약을 사용하여도 심폐기가 가능하였다. 상기의 식 (2), (3)에 의한 계산 결과를 그림으로 표시하면 Fig. 2와 같다.

(1)식으로 계산한 기준은 기존 방법에서는 소성변형권에 가까워 심폐기가 어려워지지만, 약포경/천공경 비율의 확대, 공경/약포경 비율



(a) A tunnel face map



(b) A-A' section map

Fig. 1. A drilling pattern map by $\emptyset 45\text{mm}$ bit.



Fig. 2. A hole spacing and a breaking angle of cutting hole part.

위와 같이 새로운 자유면이 점점 확대되면서 파괴각도 점점 확대됨을 Table 2에서와 같이 확인할 수 있다. 즉, 심빼기란 터널의 1자유면 환경에서 장약실의 자유면을 향한 파괴각도를 넓히는 과정으로 생각할 수 있다.

확대공 간격

확대부의 저항선은 벤치발파와 같은 공식으로 계산된다. 이 때 벤치의 높이는 굴진장과 같은 개념으로 하였으며 단지, 파쇄되는 암편의 이동 방향이 달라 중력이 작용하며, 터널의 기하학적인 구조에 기인하는 구속압 때문에 적용하는 구속계수(fixation factor)를 벤치발파시의 그것과 달리

하였다(강과 심, 1996; Person et al., 1994).

$$B_{\max} = 0.9 \left\{ \left(\frac{l S_{ANFO}}{c' f} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (4)$$

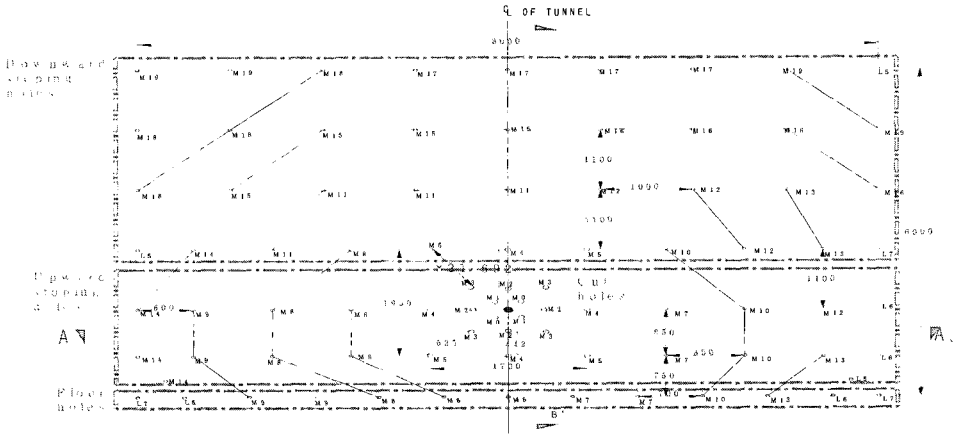
여기서, B_{\max} = 최소저항선, l = 단위장약량, S_{ANFO} = ANFO에 대한 상대강도, c' = 보정된 암석상수(암석상수=0.5를 기준함), f = 구속계수(폭력의 작용방향이 수평이거나 상향일 경우에 $f=1.45$ 를 적용하고 하향일 경우에는 1.2를 적용)

Table 2. The comparison on the cut holes of an old blasting method and a composition charging and initiating system

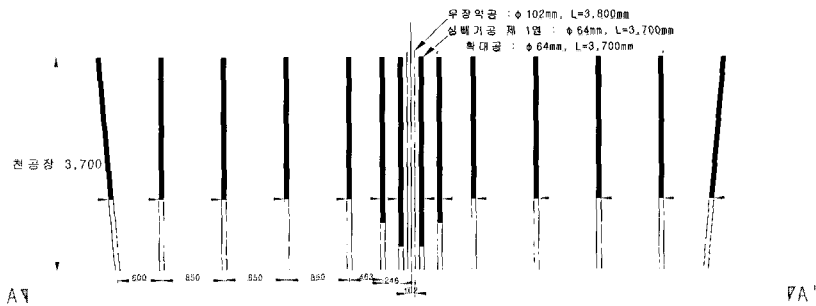
구 분		기존 발파공법	복합장약기폭 시스템의 경우
무장약공의 공경		102mm	102mm
장약공의 직경		45mm	64mm
1차 사각형	저항선의 길이	153mm	200mm
	다른 변의 길이	216mm	284mm
	파괴각	37°	29°
2차 사각형	저항선의 길이	230mm	246mm
	다른 변의 길이	254mm	284mm
	파괴각	50°	60°
3차 사각형	저항선의 길이	345mm	303mm
	다른 변의 길이	420mm	284mm
	파괴각	69°	84°

새로운 발파패턴도

상기와 같은 새로운 방식에 의한 천공 패턴과 장약패턴은 아래의 Fig. 3과 Fig. 4와 같다.



(a) Tunnel face map



(b) A-A' section map

Fig. 3. The drilling pattern map by Ø64mm bit.

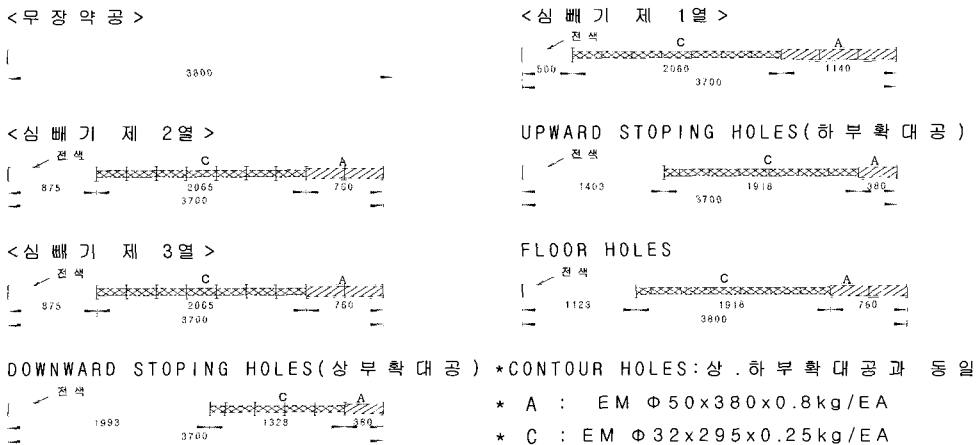


Fig. 4. The detailed map of charging pattern by Ø64mm bit.

장약 및 기폭방법

①장약

장약은 원활한 뿌리작기를 하고자 공저장약을 이용하였으며, 장약실의 암반에 대한 투사면적을 크게 하기 위하여 주상장약을 하는 복합장약법을 하였다. 즉, 전체의 장약길이중 기저장약은 5-40%의 길이만큼 하며, 나머지 장약길이에 대하여 주상장약을 한다는 방식이다(강과 심, 1996; Person et al., 1994).

②기폭방법

동일 공내에 정기폭과 역기폭을 동시에 장전하여 뿌리작기를 효과적으로 실시하였다. 역기폭법의 장점은 기폭점이 공저에 놓이므로 폭약의 위력이 내부에 크게 작용하여 잔류공을 남기지 않는 것이고, 정기폭은 순폭성이 우수하고 충격파가 자유면에 도달하는 시간이 빨라 반사파의 위력이 강한 점이다. 즉, 정기폭과 역기폭의 장점을 동시에 적용할 수 있다면 역기폭으로 잔류공의 직경을 확대시켜 뿌리작기가 좋고, 동시에 정기폭으로 개구부를 열어주어, 압축응력에 의한 분쇄와 공구 부위에서의 새로

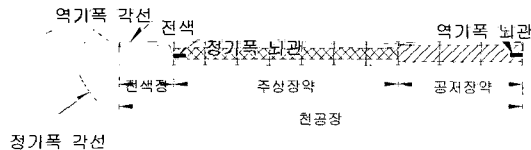


Fig. 5. An example of composition charging and initiating system.

운 자유면 형성이 동시에 이루어지는 특성을 갖게 된다. 복합기폭법에 의한 장약의 예를 들면 Fig. 5와 같다.

3. 실험 결과에 의한 발파 능력의 비교

3.1 굴진율

굴진율은 발파작업을 위하여 천공한 길이 대비 발파로 진행한 길이의 비율로서 정의된다. 구경 45mm 비트를 이용한 경우에는 공심 200cm를 천공하여 111.87cm를 진행하였으므로 발파효율은 55.9 %이다(Table 3). 하지만 구경 64mm 비트를 이용한 복합장약기폭시스템을 이용한 경우에는 잔류공을 남기지 않아 굴진율이 거의 100%에 이르렀다. 이러한 굴진율의 대폭적인 향상은 복합장약법의 기저장약으로 인하여 뿌리작기 부분에서 약포경/공경 비의 상승으로 발파효과의 증대, 공경/약포경 비(decoupling 계수)의 감소로 발생가스압의 증대, 압축응력에 의하여 발생된 잔류공의 직경을 새로운 자유면으로 활용, 기저장약으로 인하여 공저에서의 암편 이동을 공구 수평방향에서 무장약공 수직방향으로 전환, 기저장약의 폭속 증가효과, 등의 때문이며, 복합기폭법의 효과로 심베기부에서 폭원부근 암편의 유체적 흐름을 공구에 만들어지는 개구부를 통하여 배출시켜준다. 따라서, 연속적으로 새로운 자유면을 형성시켜 공저부의 암편이 방향성을 갖고 이동할 수 있도록 자유공간을 만들어주기 때문이다.

Table 3. The comparison on results of old blasting method and new blasting method

Design elements	Bit size		Remarks
	Ø45mm	Ø64mm	
Cross section(m ²)	48	48	
Broken volume(m ³)	177.6	177.6	
Drilled length	Pilot hole(m)	3.8	3.8
	Others(m)	3.7	3.7
Number of drilling hole(공)	120	86	72%
Specific charge weight(kg/m ³)	1.511	1.206	80%
Specific drilling length(m/m ³)	2.5	1.792	70%
Detonators number of round(개)	120	98	82%
Detonators number per 1m ³ (개/m ³)	0.676	0.552	82%
Time for charging(min)	840	602	
Time for drilling(min)	599.4	671.4	
Total length of holes(m)	444	318.2	72%
Charge weight per round(kg)	268	224	85%
Advance rate(%)	56	100	

3.2 작업성(시공성)

발파작업을 함에 있어 천공 및 장약시 소요되는 시간을 작업성이라고 정의할 때, 그 효과는 Table 4

와 같이 구경 64mm의 경우, 구경 45mm의 경우에 비하여 약 16.3 % 만큼 향상되었다.

Table 4. The comparison of time for drilling and charging

구 분	공 수	공 심	천공 소요시간			장약시간		비 고
			sec/m	sec/공	min/단면	min/공	min/단면	
구경 45mm의 경우	천공		81	299.7	599.4			
	장약					7	840	
	소계	120	3.7m					
구경 64mm의 경우	천공		126.6	468.4	671.4			
	장약					7	602	
	소계	86	3.7m					
변동량						72	238	
시공성(%)						△12	△28.3	△16.3

3.3 비장약량

비장약량이란 암반 1m³ 를 파쇄하는 데 소요되는 폭약량(kg/m³)을 나타내는데 그 감소는 원가의 절감을 의미한다. 따라서 구경 32mm 약포 장약시의 비장약량 1.511 kg/m³에 비하여 복합장약기폭시스템을 사용하는 경우에는 비장약량이 1.206 kg/m³로서 낮아져 약 20%정도의 절감 효과를 보이는데, 이는 복합장약법의 주상장약에 장약 밀도가 낮은 폭약을 이용함으로써 장약장을 늘이며, 그로인하여 장약의 투사면적을 넓히기 때문이다.

가 적을수록 생산원가가 낮으며, 작업성이 우수함을 보여준다. 새로운 발파법의 경우 표 3.2와 같이 심빠기공에 복합기폭을 하므로 뇌관수 12개가 증가하지만 전체적으로 천공수가 120공에서 98공으로 감소됨으로 1회 발파당 22개가 감소된다. 따라서 구경 45mm 천공시의 사용뇌관수는 0.676개 /m³인 반면, 구경 64mm 천공시의 그것은 0.552개 /m³에 지나지 않아 약 18%정도가 상대적으로 경제적이다.

3.4 비천공장

비천공장은 암반 1m³ 를 파쇄하는 데 소요되는 천공깊이(m/m³)을 나타내는데 비천공장이 낮아지면 생산성은 높아진다. 구경 45mm 천공시 비천공장은 2.5m/m³인데 반하여, 구경 64mm 천공시의 비천공장은 1.792m/m³에 불과하여 약 28.3%가 감소한다. 이는 복합기폭법에 의하여 새로운 자유면의 연속적인 형성이 이루어지며, 복합장약법에 의한 폭속의 증대효과와 발생가스압의 증대효과로 뿌리짜기가 잘되어 공간격이 넓어지기 때문이다.

4. 결 론

일반적으로 터널 발파를 위한 공내 장약시 장약 밀도를 균일하게 하는 역기폭법에 의하여 작업을 하고 있다. 그러나 암질에 따라서는 발파 효율이 낮거나 사압, 소결, 컷-오프 현상 등으로 인하여 종종 실패하는 경우도 빈발하고 있다. 그 주요 원인은 구속압(지압)이 큰 공저부분과 이보다 적은 중간 부분에 동일한 장약밀도로 장전하기 때문에 구속압의 변동성에 대하여 효율적으로 장약하지 못하였기 때문이며, 장공시 공저부의 신자유면 전개에 의하여 확장된 공간으로 발파압이 소멸되지 못하고 인접공에 대하여 압력으로 작용하여 문제를 유발하기 때문이다. 이와같은 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 복합 장약기폭시스템을 개발하고, 이를 현장에 적용하여, 우수한 결과를 확인했는데, 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

3.5 사용뇌관수의 비교

암반 1m³ 를 파쇄하는 데 소요된 뇌관의 수(개 /m³)를 상대 비교하는 것으로서 역시 사용뇌관수

1. 복합 장약법이란 동일 장전공내에서도 구속압이 큰 공저부분과 이보다 적은 중간 부분에 장약 밀도를 달리하여 구속압에 효과적으로 대처하는 방법이다. 즉, Fig. 5와 같이 약경 32mm와 50mm의 폭약을 사용하여 동일공 내에서 장전 밀도를 달리하여 장약하는 방법이다. 50mm 폭약을 장전하기 위해서 모든 장전공을 일반적으로 사용하는 $\varnothing 45\text{mm}$ 비트 대신 $\varnothing 64\text{mm}$ 비트로 천공하였다. 천공경이 커짐에 따라 1공당 굴진시간은 증가하지만 전단면으로 계산할 때는 천공수가 감소되어 보다 경제적이었다.
2. 복합 기폭법이란 정기폭과 역기폭의 장점을 두루 이용할 수 있도록 심빼기 공에 한하여 한 공내에 정기폭 + 역기폭으로 두가지의 전폭약을 동일 공내에서 이용함을 말한다.
3. 복합 장약기폭시스템을 이용할 경우 심빼기와 뿌리깎기가 원활히 이루어져 규석광과 같은 암반 I 등급의 경우에도 3.7m 천공장을 거의 100%에 이르도록 완벽하게 굴진할 수 있음을 확인하였다.
4. 복합 장약기폭시스템을 채택한 새로운 발파 방법과 종래 발파 방법을 비교한 결과 굴진율과 시공성을 향상되며 비장약량과 비천공장은 감소되어 전체적으로 경제적인 시공이 가능함을 확인하였다.

5. 이러한 결과로 인한 효과로서 천공장의 장공화 추진이 가능하며, 터널 시공원가의 절감 및 막장의 부석이 적어져 작업장의 안전도가 향상될 것으로 기대된다

참고문헌

1. 강대우, 심동수, 1996, 응용발파기술, 구미서관, 서울, pp. 73-129.
2. 김재국, 1992, 산업화약과 발파공학, 서울대학교출판부, 서울, pp. 204-297.
3. 윤철현, 1994, 화약발파해설, 구미서관, pp. 240-247, 254, 291.
4. 이부경, 1998, 굴착공학의 원리, 대운, 서울, pp. 61-162.
5. 임한옥, 이희근, 1995, 터널·지하공간 굴착공학, 구미서관, 서울, pp. 83-86.
6. Perrson, P-A., R. Holmberg and J. M. Lee, 1994, Rock Blasting and Explosives Engineering, CRC Press, pp. 30-35, 100-102, 195-232.



원 연 호

원앤비 기술사사무소 대표

전화 : 031)478-1271

E-mail : yhwon99@yahoo.co.kr



오 이 환

원앤비 기술사사무소 기술부장

전화 : 031)478-1271

E-mail : oehe1382@hanmail.net

임 한 옥

강원대학교 공과대학 명예교수

전화 : 031)478-1271

E-mail : wonnb@wonnb.co.kr