

터널 굴진에서 장약 뿔 기폭방법 개선에 관한 연구

오이환 · 원연호¹⁾ · 임한욱²⁾

1. 서 론

최근 국내에서도 여러 분야에서 발파작업(發破作業)이 활발히 실시되고 있다. 이와같은 발파작업은 시행되는 위치에 따라 크게 노천발파와 터널(지하)발파로 나눌 수 있다. 일반적으로 노천발파는 작업공간의 확보가 용이하여 최신 굴착장비의 채택이 가능하며, 1자유면 상태를 비교적 쉽게 2자유면으로 전환할 수 있어 장공천공(長孔穿孔)에 의한 대규모 발파가 가능하다. 반면에 터널발파는 일반적으로 작업공간이 제한되고, 이로 인해 장비 채택에 한계가 있으며 원칙적으로 1자유면 상태이기 때문에 굴진장이 짧고, 발파효율이 낮은 편이다. 따라서 터널 굴진에서 굴진능율을 향상시키기 위한 여러 가지 방안이 채택되고 있으나 그 중심은 심빼기(心拔) 발파와 뿌리깎기 작업이 얼마나 원활하게 수행되느냐에 달려있다. 이를 위하여 터널과 같은 1자유면 발파에서는 심빼기 방법으로 기하학적 형태에 따라 브이 커트(V-Cut), 번 커트(Burn cut) 및 실린더 커트(Cylinder cut) 등이 널리 이용된다.^{1,2,3,5)} 이 때 어떤 심빼기 패턴을 적용하던 공내 장약 밀도는 전체 장약공 내에 균일하게 실시되고 있다. 한편, 장약시 뇌관을 갖는 전폭약포(Primer)의 위치는 정기폭(正起爆)과 역기폭(逆起爆) 방법이 있는데, 터널의 경우 역기폭 방법을 선호하고 있다. 이와 같은 현행 방법으로는 1회 굴진장은 천공장의 90% 수준이다. 그 주된 이유는 뿌리깎기 작업이 원활치 못하여 공저(孔底)부분에 천공장의 약 10%가 잔류공으로 남기 때문이다.^{1,3,5)} 또한, 터널의 장공 천공시, 좁은 공간에서 심빼기 공을 천공해야 되기 때문에 공심(孔深)에 비하여 공간격이 상대적으로 짧아 발파시 파쇄된 암편이 공저에서 공구(孔口) 쪽으로 이동하는 암편보다 공(孔)과 공(孔) 사이에서 충격파의 진행속도가 더 빨라 소결(Sintering)현상이나 사압(死壓)현상 또는 컷-오프(Cut off)현상 등이 발생하는 경우가 있어 장공발파에 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 심빼기 작업에서 야기되는 이와 같은 뿌리깎기 작업을 원활히 실시하기 위하여 복합장약과 복합기폭을 제안하고 그 결과를 확인하였다.

지금까지는 터널작업에서 모든 공내에 장약밀도를 균일하게 실시하고 있으나 본 연

1) 원앤비 기술사사무소

2) 강원대학교 지구시스템공학과 명예교수

구에서는 공구로부터 깊이에 따라 장약밀도를 서로 달리하는, 소위 복합장약법을 제안하였다. 즉, 터널 굴착을 위한 모든 장약공에 대하여 공내 폭약의 장약밀도를 서로 달리 하는 것으로, 구속압이 커 자유면 형성이 어려운 공저부분은 높은 장약밀도로 장전하고, 주상(柱狀)부분은 이보다 낮은 장약밀도로, 그리고 공구 쪽은 지금처럼 전색(Tamping)만을 함으로서 폭약의 위력을 작용하는 구속압의 크기에 따라 효과적으로 대응시키는 방법이다. 한편, 뇌관이 삽입된 전폭약포의 장약위치는 정기폭과 역기폭 방법이 있는데 터널의 경우 일반적으로 역기폭 방법을 주로 선택한다.^{1,2,3,4)} 그러나 경암 발파나 장공발파를 하는 경우, 컷-오프 현상이나 사압현상이 자주 발생하여 굴진효율을 높이는 데 한계가 있었는데, 본 연구에서는 뿌리각기를 효율적으로 실시하고, 굴진효율을 극대화하고자, 심폐기공에 한하여 동일(同一) 공내(孔內)에 정기폭과 역기폭으로 2개의 뇌관을 장전하는 소위, 복합기폭법을 제안하였다. 따라서, 본 연구의 특징은 복합장약법과 복합기폭법을 채택하여 뿌리각기를 원활히 실시함으로써 1발파당 굴진장을 증대시키는 방안을 모색하는데 있다. 이를 위하여, 본 연구에서는 암반의 강도가 큰 규석광(硃石鑛)을 대상으로, 폭약의 위력이 비교적 낮은 에멀전(Emulsion)계(係) 폭약을 사용하여 현장 적용실험을 실시하였다. 그 결과, 경암이나 장공발파에서 흔히 발생하는 소결현상, 사압현상, 컷 -오프 현상 등을 방지할 수 있어 1회 천공장을 증대시킬 수 있었다. 또한, 금번 실험 결과를 기준할 때 시공성이 약 15% 정도 증대되고, 비장약량(Specific charge weight, kg/m^3) 및 비천공장(Specific drilling rate, m/m^3)이 각각 약 20%, 25% 정도 감소하였다.

2 시험조건 및 현장 적용시험

본 연구는 암반의 물성 중, 암반강도가 비교적 높고 조직이 치밀한 암종과 장공굴진을 요하는 현장을 대상으로 하였으며 시험조건 및 현장 적용실험 내용은 다음과 같다.

2.1 시험조건

시험지역은 행정구역상 강원도 홍천군에 위치한 ○○광산으로 이 지역의 주요 지질 특성 및 암반조건은 다음과 같다.

(1) 지질 및 광상

대상구역의 지질은 선캠브리아기 흑운모 편마암, 시대 미상의 복운모 화강암 및 중생대 관입 산성암맥류 등으로 구성되며, 광상은 관입에 의하여 고품위 부광대를 이루고 있는 산성암맥으로 석영맥 및 규장암맥으로 광구 중앙부에 북동 방향의 단층대를 따라 발달하며 N20~30E, 70~80SE의 방향성을 갖고 단층 열극을 충진하여, 백색, 치

밀한 비정질 석영으로 산출되며 부분적으로 장석질이 혼재되어 유리질 석영-장석맥으로 나타나기도 한다.

광맥의 양쪽 경계를 이루는 부분에는 단층대(fault zone)가 발달하고 있으며 이 단층대를 따라서 경면(slicken-side)과 더불어 0.1~30cm 정도의 breccia를 포획한 단층 점토가 협재되어 있으며, 석영맥의 주향을 따라 약 2km이상 양호한 노두를 보이고 있다.

(2) 암반의 주요 물성

시험 대상 지역의 주요 물성을 파악하기 위하여 실내실험과 슈미트 햄머(Schmidt hammer)에 의한 강도 측정을 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 실내에서의 물성시험 : 발파 후 얻어진 암석 시편을 채취하여 실험실 내에서 주요 물성실험을 실시하였는데 그 결과는 표 1과 같으며 실험결과 중, 암반의 강도만을 기준하면 경암 내지 극경암으로 암반등급“ I “에 속한다.
- 슈미트 햄머(Schmidt hammer)에 의한 강도 측정 : 현장에서 간단한 암반강도를 추정하는데 이용되는 슈미트 햄머로 반발강도를 측정한 결과, 평균 반발치는 47 이며, 환산된 평균 압축강도는 대략 698kg/cm²로서 비교적 낮은 값을 보인다. 이는 반발강도를 측정한 막장면 뒤로 약 0.5~1.0m 지점에 단층점토(두께 약 10~15cm 정도)가 협재된 단층이 교차하기 때문에 이에 기인한 것으로 추정된다. 이러한 강도 측정 결과는 일본 건설성의 암반 분류 방식에 의하면 경암 I 종(반발치 36 이상)이며, 다나카 분류법에 의하면 “A”급 암반으로 역시 경암 내지 극경암에 속한다.

표 1. 암석의 물성

Specimen ID.	Apparent Density (gr/cm ³)	P/S wave Velocity (m/sec)	Absorption (%)	Uni. Comp. Strength (kgf/cm ²)	Elastic Modulus (×10 ⁵ kgf/cm ²)	Poission's Ratio	Remarks Depth (m)
A-1	2.696	5,588/3,362	0.425	2,772	6.427	0.185	55m
B-1	2.674	3,111/1,893	0.665	927*	4.267	0.266	60m
B-2	2.689	3,570/2,148	0.557	1,080*	4.806	0.245	60m
C-1	2.692	3,177/1,924	0.485	949*	4.290	0.264	65m
C-2	2.684	5,058/3,005	0.584	1,551	5.473	0.226	65m
D-1	2.675	4,191/2,505	0.663	1,287	5.216	0.237	70m
E-1	2.628	5,243/3,097	0.316	1,684	5.803	0.218	80m
E-2	2.617	4,857/2,903	0.446	1,517	5.459	0.228	80m
Average	2.694	4,349/2,604	0.518	1,471	5.218	0.234	

※ *는 세로방향의 자연절리가 발달하여 강도 값이 낮다

2.2 기존의 발파공법

당초 현장에서 사용하는 기존의 발파공법을 이용한 현장 적용실험을 한 갱도의 크기는 8(너비)m × 6(높이)m 로서 그림 1, 그림 2와 같이 102mm 무장약공 1개로 천공장 3.8m, 기타 공들은 45mm 공경으로 천공장 3.7m, 총 공수 120공으로 설계되었다. 그러나 발파결과는 굴진율(굴진장/천공장)이 약 56% 로 대단히 낮다. 그 주된 이유는 심패기에서 새로운 자유면의 전개 부족, 뿌리각기가 원활히 이루어지지 못한 까닭이며, 때때로 사압현상과 소결현상, 컷 오프 현상, 철폭현상 등이 일어나기 때문이다. 즉, 이 현상은 실린더 컷트법을 채택하였는데 심패기의 1차 사각형에서 무장약공과 장약공간 거리(이하 a 로 표시)가 a=200mm이기 때문에 정확한 천공이 어렵고, 장약시 공경이 적어(45mm) 공의 청소와 장약작업이 어려웠다. 위에서 a=200mm 로 천공한 이유는 천공장이 3.7m 로서 비교적 장공인 반면 암질은 경암 내지 극경암이므로 계획한 대로 천공정밀도가 나오지 않아 천공중 공저부에서 공간 관통이 되거나 혹은 공간격이 예상외로 멀어지는 등의 사례가 발생하기 때문이다. 특히, 장약 중 공이 막혀있을 때, 새로운 자유면의 예상 발달 입체도를 그려보아 불가피할 정도로 중요한 공이라고 판단되어 공 청소를 해야하는 상황에서는 점보드릴(Jumbo drill)이 상시 대기하여야 하는데 단일 갱도에서 전력선, 고압용수 배관 등으로 인하여 작업 공간 확보가 어려운 점 등이 있었다. 또한, 위에서 언급하였듯이 굴진율이 대단히 낮아 1회 발파후 다음 작업시 1차 발파된 부분에 재 천공해야 하므로 암반 중에 미세균열이 생성되어 천공작업이 원지반 작업보다 어려웠다.

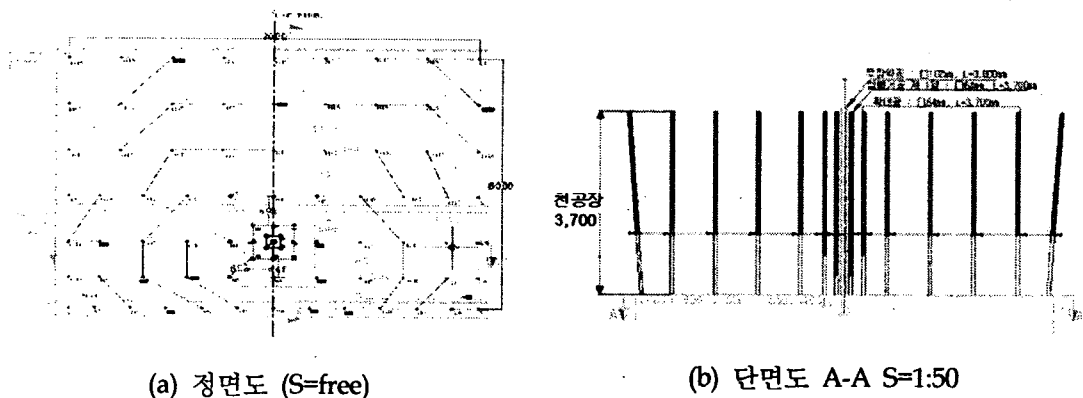


그림 1. Ø45mm 비트를 이용한 기존의 천공패턴

표 2. Ø45mm 비트를 사용한 경우의 총장약량

구분	공수	너관			폭약				비고		
		역기폭	정기폭	합계	EM.32mm	EM.50mm	공별약량	지발당약량			
					32mm×295mm×250g	50mm×380mm×800g					
심발공	ms-0	2	2	2	4	10.8		2,700	5,400		
	ms-1	2	2	2	4	10.8		2,700	5,400		
	ms-2	4	4	4	8	9.5		2,375	9,500		
	ms-3	4	4	4	8	9.5		2,375	9,500		
	소계	12	12	12	24				29,800		
하부확대공	ms-4	4	4		4	9.5		2,375	9,500		
	ms-5	4	4		4	9.5		2,375	9,500		
	ms-6	2	2		2	9.5		2,375	4,750		
	ms-7	2	2		2	9.5		2,375	4,750		
	ms-8	3	3		3	9.5		2,375	7,125		
	ms-9	3	3		3	9.5		2,375	7,125		
	ms-10	3	3		3	9.5		2,375	7,125		
	ms-12	2	2		2	9.5		2,375	4,750		
	ms-13	2	2		2	9.5		2,375	4,750		
	ms-14	3	3		3	9.5		2,375	7,125		
	ms-15	1	1		1	9.5		2,375	2,375		
	LP-4	3	3		3	9.5		2,375	7,125		
	LP-5	4	4		4	9.5		2,375	9,500		
	LP-6	3	3		3	9.5		2,375	7,125		
	LP-7	1	1		1	9.5		2,375	2,375		
	소계	40	40		40				95,000		
	바닥공	ms-6	2	2		2	9.5		2,375	4,750	
		ms-7	2	2		2	9.5		2,375	4,750	
		ms-8	1	1		1	9.5		2,375	2,375	
ms-9		1	1		1	9.5		2,375	2,375		
ms-10		1	1		1	9.5		2,375	2,375		
ms-11		1	1		1	9.5		2,375	2,375		
ms-13		1	1		1	9.5		2,375	2,375		
LP-4		1	1		1	9.5		2,375	2,375		
LP-6		1	1		1	9.5		2,375	2,375		
LP-7		2	2		2	9.5		2,375	4,750		
소계	13	13		13				30,875			
상부확대공	ms-11	3	3		3	8.2		2,050	6,150		
	ms-12	2	2		2	8.2		2,050	4,100		
	ms-13	1	1		1	8.2		2,050	2,050		
	ms-14	1	1		1	8.2		2,050	2,050		
	ms-15	3	3		3	8.2		2,050	6,150		
	ms-16	4	4		4	8.2		2,050	8,200		
	ms-17	4	4		4	8.2		2,050	8,200		
	ms-18	4	4		4	8.2		2,050	8,200		
	ms-19	4	4		4	8.2		2,050	8,200		
	LP-7	1	1		1	8.2		2,050	2,050		
	LP-8	4	4		4	8.2		2,050	8,200		
	LP-9	4	4		4	8.2		2,050	8,200		
	LP-10	4	4		4	8.2		2,050	8,200		
	LP-11	4	4		4	8.2		2,050	8,200		
	LP-12	4	4		4	8.2		2,050	8,200		
	LP-13	4	4		4	8.2		2,050	8,200		
	LP-14	4	4		4	8.2		2,050	8,200		
소계	55	55		55				112,750			
합계	개수	120	120	12	132	1.074			268.425		
	무게량(kg)				0	268			268		

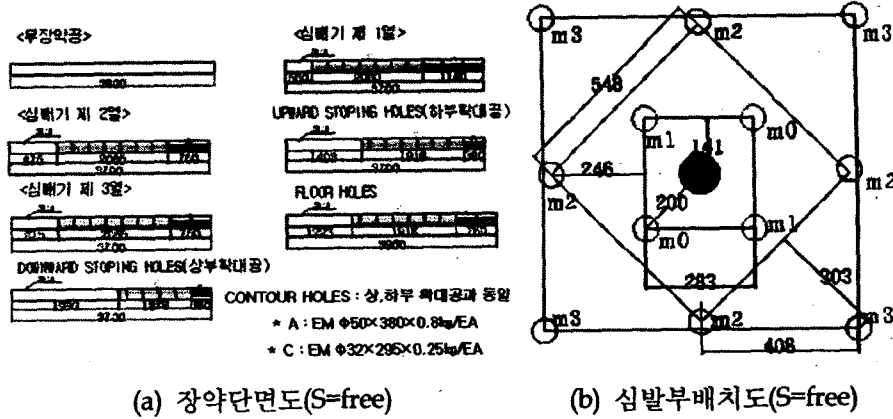


그림 2. Ø45mm 비트를 이용한 심발부 장약도

2.3 새로운 발파 패턴의 설계

기존 발파 방식의 검토 결과 심빼기 과정에서 뿌리각기가 원활히 진행되지 못했던 점을 고려하여, 무장약공의 공경은 당초 설계 그대로 Ø102mm 공으로 고정하고 기타 장약공들은 공경을 Ø64mm로 하여 새로이 설계하였는데 그 내용은 다음과 같다.

(1) 새로운 천공패턴의 설계

실린더 컷트에서 심빼기 공은 그림 3과 같이 구분한다.

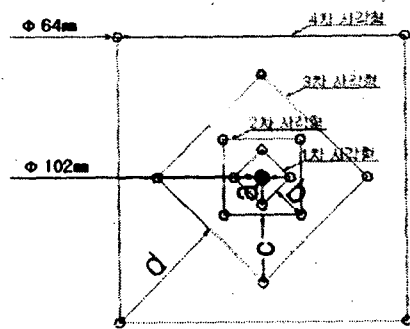


그림 3. 실린더형 심발공

- 심빼기공의 배치 : 먼저 심빼기공에서 무장약공과 장약공간의 간격(a)은 일반적으로 장약공경이 38mm 인 경우에는 다음과 같이 표시된다.

$$a = \frac{d + \emptyset}{2} \quad (1)$$

$$a = 1.5\phi \quad (2)$$

$$a > 2.1\phi \quad (3)$$

위 조건에서 (1)식의 경우 무장약공 쪽으로 분쇄가 완전(clean blasted)하고, (2)조건은 균열 파쇄권으로 심빼기 발파가 가능하지만, (3)의 경우는 소성변형으로 새로운 자유면의 형성이 어렵다. 따라서, $\phi 64\text{mm}$ 비트로 천공작업의 용이성, 천공 오차 등을 고려하여 실험결과 $a=200\text{mm}$ 로 가정하여 다음과 같은 계산식을 제의하였다.

$$a \geq 1.96\phi \quad (4)$$

a =무장약공의 중심에서 1차 사각형과의 최단거리
(상기식에 의한 공간격은 암질에 따라 조정을 하여야 함)

ϕ =무장약공의 직경(비트직경 102mm)

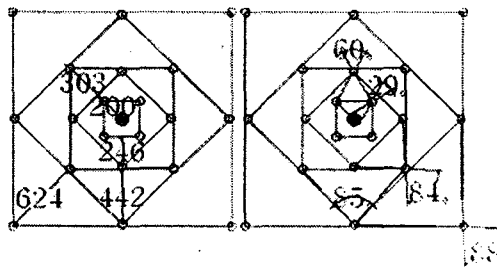
(4)식으로 계산한 기준은, 기존 방법에서는 소성변형권에 가까워 원칙적으로 심빼기가 어려워지지만, 약포경/천공경 비의 확대, 공경/약포경 비(Decoupling계수)의 감소로 발생가스압의 증대, 공저장약량 확대 등의 효과에 의하여 비교적 폭속이 낮은 에멀전 폭약을 사용하여도 심빼기가 가능하였다.

한편 2차, 3차, 4차 사각형 모형에서 각 공간의 간격은 다음과 같이 산정하였다.

$$b = 1.23 a \quad (5)$$

$$c = 1.23 b \quad (6)$$

상기의 식 (5), (6)에 의한 계산 결과를 그림으로 표시하면 그림 4와 같다.



(공 간 격) (파 괴 각)
그림 4. 새로운 심발공의 설계

상기 도면에서 각각의 사각형의 파괴각(장약실로부터 자유면을 향하여 암편의 이동 방향으로 예상되는 각도를 표현함)를 다시 정리하면 아래와 같다.

1차 사각형=29. 2차 사각형=60.

3차 사각형=84. 4차 사각형=85.

뇌관 배열상으로 보면 심빼기 영역은 아니지만 공간격 개념으로 보면 심빼기 영역이라고 할 수도 있는 5차 사각형은 90. 로 보인다. 위에서 보면 새로운 자유면이 점점 확

대되면서 파괴각도 점점 확대됨을 확인할 수 있다. 즉, 심빼기란 터널의 1자유면 환경에서 장약실의 자유면을 향한 파괴각도를 넓히는 과정으로 생각할 수도 있다.

그림 4에서 $a=200\text{mm}$, $b=246\text{mm}$, $c=303\text{mm}$, $d=442\text{mm}$ 등이다. 1차 사각형의 공간격 a 는 새로운 자유면의 확대를 전제로 하여 천공 가능한 가장 짧은 거리로 설정하였다. 그러나 2차 사각형의 전개는 그림에서 보는 바와 같이 파괴각을 이루는 변을 정삼각형(여기서 한 변의 길이를 b' 라고 표현함)으로 할 때의 파괴각은 60° 를 이루며 이러한 경우에는 실험결과 잔류공을 전혀 남기지 않았으나 그 각이 이보다 더 예각을 만드는 경우에는 잔류공을 남기기 시작한다.

3차 사각형의 경우에서도 이전 사각형처럼 정삼각형으로 할 경우 2차 사각형의 약 2.2배로 되어 파괴각은 60° 로 예각이 되므로 약 40 cm 정도의 잔류공을 남겼다. 이러한 원인은 점차적으로 공간격이 멀어짐에 따라 장약실의 압축파괴를 일으키는 영역을 벗어나게 되어 잔류공의 유무 여부는 파괴각이 상당한 영향을 미치는 것으로 보인다. 따라서, 조건을 달리 하면서 발파의 결과를 토대로 잔류공을 남기지 않는 최대 파괴각을 찾아 각 사각형별 배수를 그림 5와 같이 산정하였다.

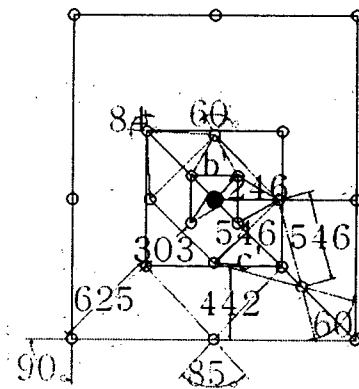


그림 5. 심발공의 새로운 켜기각 설계

$$a''=200/102=1.96\text{배}, b''=246/200=1.23\text{배}, c''=303/246=1.23\text{배}, d''=442/304=1.45\text{배}.$$

이상의 결과를 토대로 산정한 각각의 사각형별 저항선 및 계산식을 종합하여 당초 설계된 실린더 컷트 공법과 비교하면 표 3과 같다.

표 3. 새로운 공법과 기존 공법의 설계변수 비교

구 분		복합장약법의 경우	실린더 컷트 공법의 경우	비 고
무장약공의 공경		102mm	102mm	동일
장약공의 직경		64mm	45mm	45 → 64로 확대
1차 사각형	저항선의 길이	200mm	153mm	
	다른 변의 길이	284mm	216mm	
	이전 저항선에 대한 배율	1.96배	1.5배	
	파괴각	29.	37.	
2차 사각형	저항선의 길이	246mm	230mm	
	다른 변의 길이	284mm	254mm	
	이전 저항선에 대한 배율	1.23배	1.5배	
	파괴각	84.	50.	
3차 사각형	저항선의 길이	303mm	345mm	
	다른 변의 길이	284mm	420mm	
	이전 저항선에 대한 배율	1.23배	1.5배	
	파괴각	85.	69.	

- 확대공 간격 : 확대부의 저항선은 벤치발파(Bench Blasting, 계단식 발파)와 같은 공식으로 계산된다. 이 때 벤치(Bench, 계단)의 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 할 뿐이다.

최소저항선은 다음과 같이 시험발파 결과를 토대로 하였다.

$$B_{\max} = 0.9 \left\{ \left(\frac{IS_{ANFO}}{c'f} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (7)$$

$$c' = 0.4 + 0.05 \quad (8)$$

B_{\max} = 최소저항선 l = 단위장약량.

S_{ANFO} = ANFO에 대한 상대강도(1.42).

c' = 보정된 암석상수(암석상수 = 0.5를 기준함)

f = 구속계수(폭력의 작용방향이 수평이거나 상향일 경우에 $f=1.45$ 를 적용하고 하향일 경우에는 1.2를 적용)

단위장약량의 산정은 천공장 3.7m중에서 장약을 하는 부분에 대하여 산정하였다. 이 유는 그림 7과 같이 공저장약과 주상장약으로 구분하여 서로 장전밀도를 달리하는 복

오이환, 원연호, 임한욱

합장약이므로 공별 총장약량을 환산하는 것이 합당하기 때문이며 그 계산식은 아래와 같다.

사용량 : 공저장약(약경 50mm×1개)+주상장약(32mm 장약 6.5개)=2.425kg

장약길이 : 2.298m

단위장약량 : 2.425kg/2.298m=1.055kg/m

따라서, 상기의 식 (7)에 대입하면 $B_{max}=1.437m$ 이 된다.

천공오차 $E=d/1,000+0.03 \times h(\text{공심})=0.175m$

$B_{app}=1.437m-0.175m=1.262m$

그러나 암반등급이 "I"등급으로서 경암 내지 극경암이며, 현장 점보드릴이 수동식으로서 천공오차가 이론치보다 심하며, 일반적으로 터널 작업시 사용 폭약의 약경이 32mm 인 경우, 연암일지라도 하부확대공의 저항선이 1.2m를 초과하지 못하며, 터널굴진의 특성상 새로운 자유면의 연속적인 생산에 의한 기하학적인 발파 구조를 고려하는 등 제 여건들을 감안한 안전율 20% 를 임의로 적용하여 아래와 같이 공간격을 산출하였다.

$B_{true}=1.262m-(B_{app} \times 20\%) \approx 1m$

그러나 설계 도면은 이보다 더 좁은 0.85 m 를 적용하였다. 기존 45mm 결과치보다 너무 차이가 나기 때문에 동일조건에서 상대 비교하기 곤란하기 때문이다. 그러나 최종 상, 하 단면 실험에서는 본 자료를 적용하였다. 이상의 결과를 종합한 천공 패턴은 그림 6과 같다.

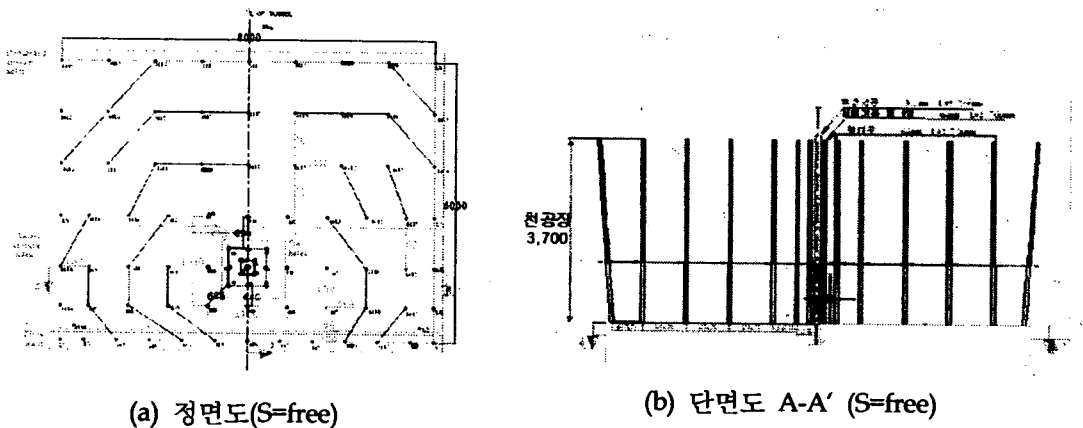
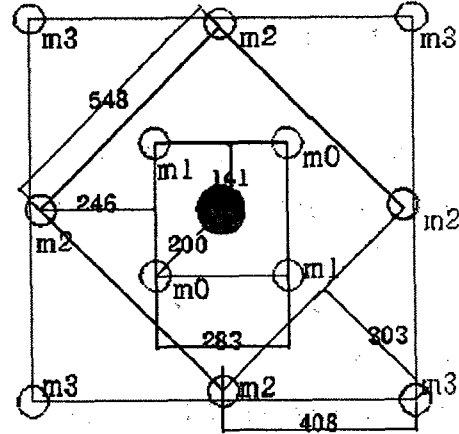
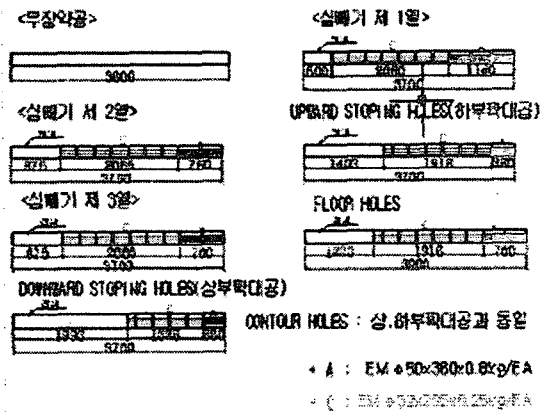


그림 6. Ø64mm 비트를 이용한 새로운 천공패턴



(a) 장약단면도(S=free)

(b) 심발부의 상세 설계(S=free)

그림 7. Ø64mm 비트를 이용한 심발부의 상세 설계

(2) 장약 및 장전 방법

- 장약량의 산정 : 앞부분에서 설명한 바와 같이 터널발파에서 지금까지는 공내에 균일한 장약밀도로 장전하였으나 본 연구에서는 공저 장약과 주상부분의 장약밀도를 다음과 같이 다르게 설계하였다. 즉, 장약은 원활한 뿌리각기를 하고자 기저장약(Bottom charge, 基底裝藥)을 이용하였으며, 장약실의 암반에 대한 투사면적을 크게 하기 위하여 공경/약포경 비(Decoupling 계수)를 이용하여 주상장약을 하는 복합장약법을 시도하였다.

여기서 복합장약(Composition charging, 複合裝藥)이란 노천 계단식 장공발파에서와 같이 공내에 기저장약과 주상장약(Column charge)으로 구분한다. 구속압이 커 자유면의 형성이 비교적 어려운 기저부분에 장약밀도가 높은 장약을 하고, 주상부분에 밀도가 낮은 장약을 하는 방법으로 상, 하 장약밀도를 달리하는 공법으로 정의하기로 한다. 즉, 전체의 장약길이 중 기저장약은 5~40%의 길이만큼 하며, 나머지 장약길이에 대하여 주상장약을 한다는 방식이다.

확대공에 대한 장약량 계산은 다음과 같이 설계 하였다.

① 기저장약밀도

$$I_b = 2.105 \text{ kg/m}$$

$$\text{기저장약의 높이}(h_b) = 0.38 \text{ m}$$

$$\text{기저장약량}(Q_b) = 0.8 \text{ kg}$$

② 전색장(h_0)=공간격(B_{max})

오이환, 원연호, 임한욱

③ 주상장약의 집중도

$$I_c = 0.847 \text{kg/m}$$

주상장약의 높이(h_c)

$$= \text{공심}(H) - h_b - B_{\max} = 1.883 \text{cm}$$

(개략적으로 장약조건에 따라 약간의 가감은 있음)

④ 주상장약량

$$Q_c = I_c \times h_c = 1.595 \text{kg}$$

⑤ 총 장약량

$$Q_{\text{tot}} = Q_b + Q_c = 1.595 \text{kg} + 0.8 \text{kg} = 2.395 \text{kg}$$

⑥ 체적당 장약량

$$q = \frac{Q_{\text{tot}}}{\text{가로} \times \text{세로} \times \text{공심}}$$
$$= \frac{2.395 \text{kg}}{1 \times 1 \times 3.7} = 0.647 \text{kg/m}$$

실제 장약시에는 포장된 약포이므로 위 계산값 보다 약간 큰 값이 된다. 이 이론을 적용하여 새로운 발파법에서 산출한 장약량을 요약하면 표 4와 같다.

- 기폭방법 : 앞부분에서 설명한 바와 같이 터널에서는 주로 역기폭 방법이 채택되나, 여기서는 심발부 위에 한하여 동일 공내에 정기폭과 역기폭을 동시에 장전하여 뿌리깎기를 효과적으로 실시하였으며 다른 부위에서는 역기폭법을 적용하였다.

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 뿌리깎기가 좋고, 동시에 정기폭으로 개구부를 열어주어, 압축응력에 의한 분쇄와 공구 부위에서의 새로운 자유면 형성이 동시에 이루어지는 특성을 갖게 된다. 복합기폭법에 의한 장약의 예를 들면 그림 8과 같다.

표 4. Ø64mm 비트를 이용한 경우의 총장약량

구분	공수	뇌관			폭약				비고	
		역기폭	정기폭	합계	EM.32mm	EM.50mm	공별약량	지발당약량		
					32mm×295m m×250g	50mm×380m m×800g				
하부반단면	심발공	ms-0	2	2	4	7	3	4,150	8,300	복합기폭법, 및 복합장약법 적용
		ms-1	2	2	4	7	3	4,150	8,300	
		ms-2	4	4	8	7	2	3,350	13,400	
		ms-3	4	4	8	7	2	3,350	13,400	
		소계	12	12	24				43,400	
하부반단면	하부확대공	ms-4	3	3	3	6.5	1	2,425	7,275	복합장약법 적용
		ms-5	2	2	2	6.5	1	2,425	4,850	
		ms-6	2	2	2	6.5	1	2,425	4,850	
		ms-7	2	2	2	6.5	1	2,425	4,850	
		ms-8	2	2	2	6.5	1	2,425	4,850	
		ms-9	2	2	2	6.5	1	2,425	4,850	
		ms-10	2	2	2	6.5	1	2,425	4,850	
		ms-12	1	1	1	6.5	1	2,425	2,425	
		ms-13	1	1	1	6.5	1	2,425	2,425	
		ms-14	3	3	3	6.5	1	2,425	7,275	
		LP-6	3	3	3	6.5	1	2,425	7,275	
		소계	23	23	-	23			55,775	
		하부반단면	바닥공	ms-6	2	2	2	6.5	2	
ms-7	2			2	2	6.5	2	3,225	6,450	
ms-8	1			1	1	6.5	2	3,225	3,225	
ms-9	2			2	2	6.5	2	3,225	6,450	
ms-10	1			1	1	6.5	2	3,225	3,225	
ms-13	1			1	1	6.5	2	3,225	3,225	
LP-4	1			1	1	6.5	2	3,225	3,225	
LP-6	1			1	1	6.5	2	3,225	3,225	
LP-7	2			2	2	6.5	2	3,225	6,450	
소계	13			13	-	13			41,925	
상부반단면	상부확대공	ms-4	1	1	1	4.5	1	1,925	1,925	복합장약법 적용
		ms-5	2	2	2	4.5	1	1,925	3,850	
		ms-8	1	1	1	4.5	1	1,925	1,925	
		ms-10	1	1	1	4.5	1	1,925	1,925	
		ms-11	4	4	4	4.5	1	1,925	7,700	
		ms-12	3	3	3	4.5	1	1,925	5,775	
		ms-13	2	2	2	4.5	1	1,925	3,850	
		ms-14	1	1	1	4.5	1	1,925	1,925	
		ms-15	4	4	4	4.5	1	1,925	7,700	
		ms-16	4	4	4	4.5	1	1,925	7,700	
		ms-17	4	4	4	4.5	1	1,925	7,700	
		ms-18	4	4	4	4.5	1	1,925	7,700	
		ms-19	4	4	4	4.5	1	1,925	7,700	
		LP-5	2	2	2	4.5	1	1,925	3,850	
		LP-7	1	1	1	4.5	1	1,925	1,925	
소계	38	38	-	38			73,150			
합계	개수	86	86	12	98	489	115		214,250	
	총 장약량(kg)				0	122	92		214	

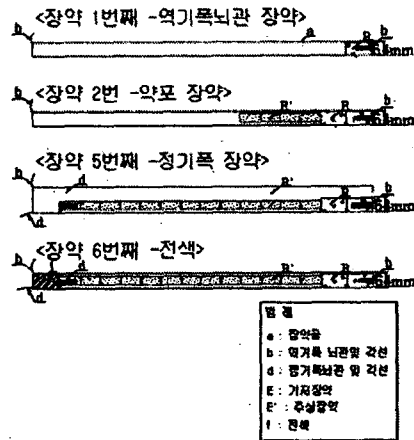


그림 8. 복합기폭법에 의한 장약순서도

2.5 복합장약법과 복합기폭법에 의한 현장 적용실험

복합장약법과 복합기폭법에 의한 현장 적용실험을 위한 천공 패턴 및 장약패턴은 각각 그림 9, 그림 10, 그림 11과 표 4와 같다.

본 실험은 막장의 단면 크기가 10 × 7m 인 비교적 큰 작업장인 관계로 작업공정 (cycle time)을 맞추면서 작업 중의 안전을 고려하고, 결과를 일차적으로 육안 확인하기 위하여 상, 하단면으로 구분하여 실험발파를 실시하였다. 따라서 시험 대상 구간 단면의 크기는 작업 효율상 그 높이를 3.5m 로 기준하였다. 즉, 하부반단면은 1자유면 발파이고, 상부반단면은 2자유면이 되며, 본 연구에서 제안한 복합장약법과 복합기폭법은 실린더 컷트공법의 심빼기공 1 ~ 3th 사각형까지만 적용되며, 그 이외의 부분은 비교적 공간격이 넓어 복합장약법만을 적용한다.

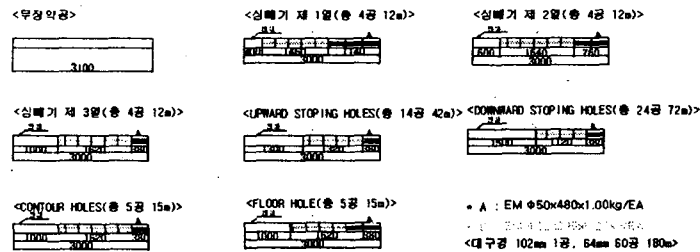


그림 9. 하부 장약 단면도

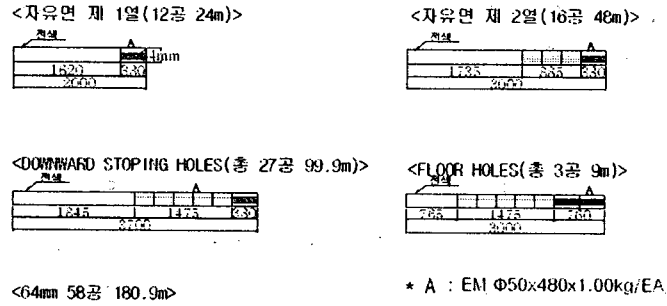


그림 10. 상부 장약 단면도

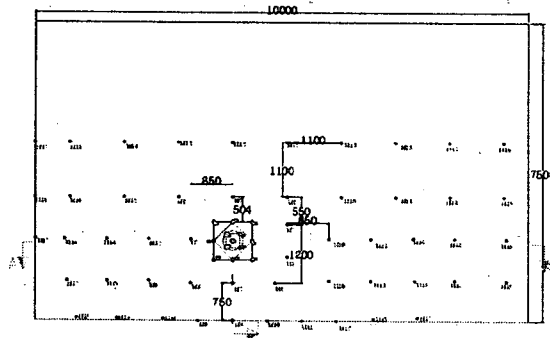


그림 11. 하부의 천공 패턴도

2.6 진동계측 결과

진동계측 결과는 시험발파를 계측한 횟수와 계측장비가 많지 않아 자료로서 불충분 하였으나 회귀분석한 결과에 의한 발파진동 추정식은 다음과 같다.

$$V_{95} = 18.146 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.097}$$

V_{95} : 지반진동속도(cm/sec) 신뢰도 95% 구간

D : 발파지점과 계측점과의 거리(m)

W : 지발당 장약량(kg)

3. 실험 결과 및 검토

터널 단면의 크기가 10 × 7m 되는 막장을 하단면, 상단면으로 구분하여 발파를 실시하였다. 그러나 하단면은 1자유면 상태이며 암편의 자중과 이동방향 때문에 비장약

량이 상대적으로 높고 공간격이 좁은 반면, 상단면은 2자유면상태이며 압편의 자중을 이용하기 때문에 비장약량이 낮고 공간격이 넓다.

3.1 발파 능력의 비교

발파능률의 비교는 두 가지 천공방식에 의한 진행장을 100%라는 가정하에 계산하였다. 왜냐하면, 실제 진행장에 의하여 계산할 경우 값의 차이가 너무 커져 상대비교가 무의미해지기 때문이다.

(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(표 5 참고). 하지만 구경 64mm 비트를 이용한 복합장약법 및 복합기폭법을 이용한 경우에는 잔류공이 전혀 없으므로 굴진율이 거의 100% 이다. 이러한 굴진율의 대폭적인 향상은 복합장약법의 기저장약으로 인하여 뿌리각기 부분에서 약포경/공경 비의 상승으로 발파효과의 증대, 공경/약포경 비(Decoupling 계수)의 감소로 발생가스압의 증대, 압축응력에 의하여 발생된 잔류공의 직경을 새로운 자유면

표 5. 시험 적용 결과

구분	대 비			비 고
	Unit	Ø45mm Drilling	Ø64mm Drilling	
단면적	m'	48	48	
생산 암석량	m'	177.6	177.6	
천공 깊이	무장약공	m	3.8	
	장약공	m	3.7	
천공수	공	120	86	72%수준
비장약량	kg/m'	1.511	1.206	80%수준
비천공장	m/m'	2.5	1.792	70%수준
회당 뇌관수	개	132	98	75%수준
1m' 사용 뇌관수	개/m'	0.743	0.552	75%수준
장약 소요 시간	min	840	602	
천공 소요 시간	min	599.4	671.4	
전체 천공장	m	444	318.2	72%수준
회당 총장약량	kg	268	224	85%수준
평균 잔류공의 깊이	cm	88.13/200	0	
굴진율	%	55.94	100	

으로 활용, 기저장약으로 인하여 공저에서의 압편 이동을 공구 수평방향에서 무장약공 수직방향으로 전환, 기저장약의 폭속 증가효과, 등의 때문이며, 복합기폭법의 효과로 심폐기부에서 폭원부근 압편의 유체적 흐름을 공구에 만들어지는 개구부를 통하여 배출시켜준다. 따라서, 연속적으로 새로운 자유면을 형성시켜 공저부의 압편이 방향성을 갖고 이동할 수 있도록 자유공간을 만들어주기 때문이다.

표 6. 천공 및 장약시간의 비교

구 분		공수	공심	천공 소요시간			장약시간		비고
				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

(2) 작업성(시공성)

발파작업을 함에 있어 천공 및 장약시 소요되는 시간을 작업성이라고 정의할 때, 그 효과는 구경 64mm의 경우, 구경 45mm의 경우에 비하여 약 16.3 % 만큼 향상되었다 (표 6 참고).

(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 복합장약법과 복합기폭법을 사용하는 경우에는 비장약량이 1.206 kg/m³로서 낮아져 약 20%정도의 절감 효과를 보이는데, 이는 복합장약법의 주상장약에 장약밀도가 낮은 폭약을 이용함으로써 장약장을 늘이며, 그로인하여 장약의 투사 면적을 넓히기 때문이다.

(4) 비천공장

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

넓어지기 때문이다.

(5) 사용뇌관수의 비교

암반 1m^3 을 파쇄하는 데 소요된 뇌관의 수(개/ m^3)를 상대 비교하는 것으로서 역시 사용뇌관수가 적을수록 생산원가가 낮으며, 작업성이 우수함을 보여준다. 새로운 발파법의 경우 Table 2.4와 같이 심빼기 공, 즉 12공에 복합기폭을 하므로 뇌관수가 24개로 12개가 증가하지만 전체적으로 천공수가 Table 3.1과 같이 120공에서 86공으로 34개가 감소됨으로 전체적으로 1회 발파당 22개가 감소된다. 따라서 구경 45mm 천공시의 사용뇌관수는 $0.743\text{개}/\text{m}^3$ 인 반면, 구경 64mm 천공시의 그것은 $0.552\text{개}/\text{m}^3$ 에 지나지 않아 약 25%정도가 상대적으로 낮다.

(6) 비석거리

터널 내부에서 조명이 없고, 발파 장면을 육안 확인할 수 없어 비교가 어려웠다. 하지만 개략적으로 비교한다면, 장약량이 많은 구경 64mm의 경우 비석거리가 더 클 것으로 추측한다. 또한 $\varnothing 64\text{mm}$ 의 경우에는 현장 갱도의 연장이 78m 정도의 갱입구에서 1~3mm정도 되는 암편이 약간 흩어질 정도로 비산되었다.

3.2 기대효과

(1) 굴진장의 장공화 추진이 가능하다.

본 연구는 암반등급이 I등급이며, 수동식 점보드릴을 사용하였으므로 심빼기부에서 천공오차가 어느정도 있었을 것이며, 무장약공과 1차 사각형과의 공간격을 소성영역에 가까운 균열권에 위치하는 $B_1=1.96\varnothing$ 로 설계 실시 하였다. 그럼에도 불구하고 복합장약법과 복합기폭법에 의하여 소결현상이나 사압현상의 발생은 없고 잔류공을 발생시키지 않으면서 평균 3.7m 를 진행하였다. 따라서 수동식 드릴이 아닌 자동식 드릴에 의하여 천공오차를 줄이면서, 장공 천공을 한다면, 복합장약법과 복합기폭법에 의하여 장공굴진이 가능하다.

(2) 심빼기 부분에서도 복합기폭법을 사용할 때 소결현상이나 사압현상을 피할 수 있어 장공발파에 이용할 수 있다.

(3) 시공원가의 절감 및 작업장 안전도 향상

복합장약법에 의하여 기저장약과 주상장약에 장약밀도를 달리 적용함으로써 비장약량과 사용뇌관수, 비천공장을 감소시켜 시공원가를 낮추며, 매끈한 뿌리각기로 막장면이 평활하게되어 막장면으로부터의 부석 발생이 적고, 다음 작업을 위한 막장면 정리작업이 용이하게 되며, 다음 막장에 대한 천공작업이 용이하게 되는 등 보다 안전작업을 할 수 있다.

또한, 공수가 적어져 뇌관의 배열작업이 손쉬워져 보다 정확한 배열이 가능하여진다.

4. 결 론

터널 작업에서 1발파당 굴진장을 증대시키기 위하여 최근에는 평행 심빼기의 일종인 실린더 커트(cylinder cut)방법이 널리 채택된다.

이 방법은 1자유면을 2자유면으로 만들어 주기 위하여 3~4차례 사각형 심빼기를 하는데 천공의 정확도와 장약밀도, 기폭방법 등이 성패의 주요인이 된다.

일반적으로 맨 처음 사각형의 경우 무 장약공과의 간격이 대단히 좁아(대체로 150~200mm) 천공 오차가 없도록 정확히 천공해야 함은 물론이다. 또한 공내 장약시 적정 장약밀도를 한 공에 균일하게 장전하고, 역기폭법을 채택하고 있다.

그러나 암질에 따라서는 발파 효율이 낮고 사압, 소결, 컷-오프 현상 등이 발생되어 실패하는 경우도 자주 있다. 그 주요원인은 구속압(지압)이 큰 공저부분과 이보다 적은 중간 부분에 동일한 장약밀도로 장전하기 때문에 구속압에 효율적으로 대응하지 못한 까닭이다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 복합 장약법과 복합 기폭법을 제안하고, 이를 현장에 적용한 결과 우수한 결과를 확인했는데, 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 복합 장약법이란 동일 장전공내에서도 구속압이 큰 공저부분과 이보다 적은 중간 부분에 장약 밀도를 달리하여 구속압에 효과적으로 대처하는 방법이다. 본 연구에서는 Table 2.4와 같이 현재 국내에서 제조되는 약포의 지름, 32mm와 50mm 규격의 폭약을 사용하여 동일공 내에서도 장전 밀도를 달리하였다.

50mm 폭약을 장전하기 위해서 모든 장전공을 일반적으로 사용하는 Ø45mm 비트 대신 Ø64mm 비트로 천공하였다. 천공경이 커짐에 따라 1공당 굴진시간은 증가하지만 전단면으로 계산할 때는 천공수가 감소되어 보다 경제적이다.

(2) 복합 기폭법이란 정기폭과 역기폭의 장점을 두루 이용할 수 있도록 심빼기 공에 한하여 한 공내에 정기폭 + 역기폭으로 두 전폭약을 이용함을 말한다.

(3) 복합 장약법과 복합 기폭법을 이용함 경우 심빼기와 뿌리깎기가 완벽히 이루어져 규석광과 같은 암반등급 I의 경우에도 3.7m 천공장을 100% 완벽하게 굴진할 수 있음을 확인하였다.

천공장이 대체로 5.0m까지 증가 하더라도 이 원리를 효과적으로 적용한다면 거의 완벽한 굴진이 가능할 것으로 기대된다.

(5) 복합 장약법과 복합 기폭법을 채택한 새로운 발파 방법과 종래 발파 방법을 비교한 결과 굴진율, 시공성 외에도 비 장약량 및 비 천공장이 각각 20% 및 28% 감소됨은 물론이고, 전체적으로 사용뇌관 수가 감소되어 경제적임을 확인하였다.

참고문헌

1. 이희근, 임한욱, 1995, 터널 · 지하공간 굴착공학, 구미서관, 서울, pp. 247-321.
2. Persson, P-A., R. Holmberg and J. Lee, 1994, Rock Blasting and Explosives Engineering, CRC Press, pp. 30-35, 100-102, 195-232.
3. 김재극, 1992, 산업화약과 발파공학, 서울대학교출판부, 서울, pp. 204-212, 273-277, 295-297.
4. TAMROCK, Surface Drilling And Blasting, pp. 31-52, 333-334.
5. 윤철헌, 1994, 화약발파해설, 구미서관, 서울.
6. Compton, R. R., Geology in the field.
7. 기경철, 김일중, 2002, 산학인을 위한 발파공학, 동화기술, 서울.
8. 동경세라믹스광산 기술조사보고서