

소단면 터널에서 효율적인 발파 패턴에 관한 연구

A Study on Effective Blasting Patterns on Small Area Tunnel

임 한 옥* 권 오 성**
Lim, Han-Uk Kwon, O-Sung

Abstract

In underground drilling and blasting, particularly in small headings(generally under 20 m²), the prospects for changes of blast parameters are usually more limited than those employed by large area tunnel(over 20m²). It is also well known that the consumption of explosives and specific drilling rate for small tunnel areas are exponentially increased also tunnel areas decrease.

To confirm above results, some tests for two tunnels(irrigation water tunnel with 6.0 m² area, electric supplies tunnel with 15.0m²) are also carried out in this study.

As a results, specific drilling rate and specific charge for irrigation water tunnel were decreased from 13.8 to 7.7m/m³ and from 4.88 to 2.56kg/m³ respectively. Those for electric supplies tunnel were also decreased from 8.0 to 4.9m/m³ and from 3.46 to 2.22kg/m³.

키워드 : 소단면 작업장, 대단면 터널, 비 천공율, 비 장약량

Keywords : *small headings, large area tunnel, specific drilling rate, specific charge*

1. 서론

현재 국내 대부분의 터널은 폭약을 사용한 발파를 통하여 굴착하는 것이 일반적이다. 이와 같은 굴착을 위한 발파작업은 암반의 상태, 굴착단면의 크기 등에 따라 달라진다. 터널은 노천발파와 달리 대체로 1자유면 발파를 실시한다. 이때 암반상태가 양호하여 보갱(保坑)에 전혀 문제가 없는 경우 효율적인 심빼기와 함께 가능한 장공(長空) 천공을 실시하여 1회 굴진장을 증대시키는 것이 바람직하다. 그러나 굴착단면이 협소한 때는 천공장비의 선정과 발파패턴의 채택에 제한을 받기 때문에 1회

굴진장이 대단면 발파에 비하여 감소하는 것은 당연하다. 따라서 소단면 발파의 경우 심빼기 패턴과 1회 굴진장 결정시 여러 가지 암반조건과 작업조건을 고려하여야 한다.

외국의 연구 결과에 의하면 일반적으로 대단면 터널 굴착시에는 비 장약량(specific charge) 및 비 천공장(specific drilling length)이 낮지만 소단면 터널의 경우 이들 값이 급격히 증가하는데 특히 터널단면의 크기가 20m² 이하일 때는 이 현상이 두드러진 것으로 알려지고 있다. 이때 천공경에 따라 차이를 보이지만 어느 천공경이던 대체로 유사한 경향을 보인다.

이와 같이 발파작업의 효율성 및 경제성은 암반 조건 외에도 터널 단면적의 크기에 따라 차이를 보인다.

본 연구에서는 비장약량과 비천공장이 급격히 증가하는 대체적인 한계라 할 수 있는 20m²이하를 소단면 터널이라 정의하고, 이들 소단면 터널 굴착

* 강원대학교 지구시스템공학과 교수, 공학박사
** 강원대학교 일반대학원 지구시스템공학과 석사 과정 졸업. (주)한화 근무

시 비장약량과 천공공을 효과적으로 감소할 수 있는 발파패턴을 제시하는데 연구의 목적이 있다. 이를 위하여 국내터널 현장의 발파 상황을 조사하고 적용할 심베기 방법, 효과적인 1회 천공장 등을 제시하고자 한다.

본 연구에서는 터널단면의 크기와 용도가 다른 2개 터널에서 시험을 실시하였으며, 이들 두 터널의 가장 큰 차이점은 천공경이 각각 35, 45mm인 점이다. 심베기 패턴, 비장약량, 기폭 초시 등을 변경해 가면서 각각의 경우 발파결과를 구하고, 비교하여 그 변화 경향성을 구하였다.

이들 두 터널은 ○○ 지구 농업용수로, ○○ 양수발전소 모선 터널이다.

2. 이론적 배경

2.1 터널발파 설계 기초이론

터널발파는 단일 자유면에서 시행한다는 것이 노천 발파와의 큰 차이점이다. 터널발파는 암석이 상당히 구속된 상태이고 2차 자유면을 형성하면서 암석이 파쇄 되어 자유면으로부터 암석이 밀려 비산한다.

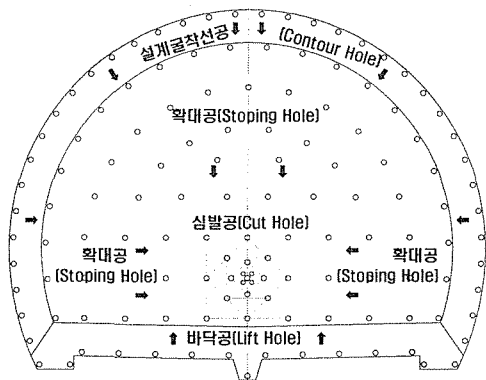


Fig. 1 Conditions of drilling at tunnel blasting

터널에서 가장 중요시 되는 심발 공법은 경사공 심발공법과 평행공 심발 공법으로 구분된다. 보통 평행공 심발공은 막장 암반이 경암일 구간에서 적용이 된다. 이유는 모암이 경암일 때 상대적으로 굴진장을 길게 할 수 있기 때문이다. 또한 천공을 평행하게 하므로 터널의 폭에 영향을 받지 않는다. 이와 반대로 경사공 심발공법은 모암이 경암 이하일 때 주로 적용된다. 암반의 상태가 좋지 않기 때문에 굴진장은 보통 2.4m이하로 하고 있다. 또한 천공시의 경사를 주어야 하기 때문에 기계 등의 사용으로 터널의 폭에 제한을 받는다.

발파 형태별로는 평행공 심발공법은 발파 형태-1,2에서 적용을 하며 경사공 심발공법은 발파 형

태-3,4,5,6에 적용을 한다.

최초 단일 자유면에서의 심발 발파 후에 신자유면을 확보한 후 다음 발파로 확대공 영역의 압반을 파쇄하게 된다. 확대공 영역은 Konya 및 Ash의 제안한 식에 의해서 주로 계산된다.

$$W_{lst} = 0.012 \cdot \left(\frac{2 \cdot SGe}{SGr} + 1.5 \right) De \quad (1)$$

여기서, W_{lst} 는 확대공 영역의 공간적이며 SGe : 폭약의 가비중이고, SGr : 암석의 비중이며, De : 폭약의 직경이다. 저항선은 공간적의 90%의 수준으로 설정한다.

외곽공은 일반적으로 천공경이 25~48mm일 경우 저항선은 0.7~0.9m이고 공간적은 0.5~0.7m로 하고 있다.⁽¹⁾ 현장에서 이를 적용하였다.

2.2 터널 단면적과 천공 수, 비장약량의 관계

터널의 단면적이 클수록 천공수는 자연적으로 증가하게 된다. 이때 천공경이 클수록 같은 단면이라고 해도 그 천공수는 감소하게 된다.

Fig. 2는 터널단면적에 따른 비장약량의 관계를 나타낸 것이다. 전체적으로 터널의 단면이 커질수록 비장약량이 수렴하는 것을 알 수 있다.

그러나 터널의 단면이 20m² 이하의 구간에서는 비장약량이 급격히 증가하게 된다. 또한 천공경이 클수록 비장약량은 증가한다.

Fig. 2에서는 단면적이 20m²이하일 경우에는 급격히 비장약량이 증가됨을 보이고 있다.⁽⁷⁾

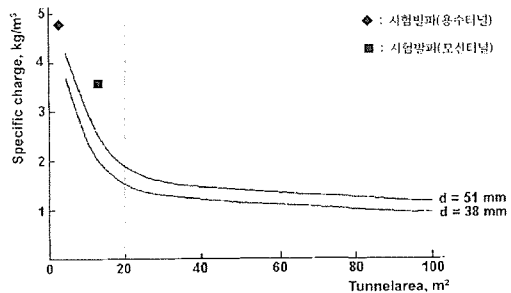


Fig. 2 The relation between tunnel area and the amount of specific charge

2.3 터널 단면적과 굴진장과의 관계

도로터널이나 철도터널에서는 비교적 단면적이 넓어 심발공법의 제약 및 굴진장의 제약도 적게 받는다. 그러나 소단면 터널의 경우는 터널의 단면적에 따라서 굴진장의 제약을 많이 받는다. 평행공 심발의 경우라면 굴진장의 영향을 적게 받으나, 단면이 작을 경우 소결이나 사암 등의 우려로 평행공 발파의 경우는 원하는 만큼의 굴진장을 얻기

힘들다. 경사공 심발의 경우는 필요한 터널폭에 의해서 천공의 제약을 받을 수 있다.

Fig. 3은 터널의 면적에 따른 경사공 심발공법의 적정 굴진장을 나타내고 있다.¹⁾

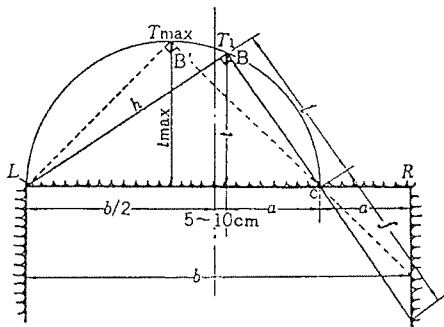


Fig. 3 The relation between tunnel width and digging length at angle cut

천공장의 길이가 길어지고 장진된 폭약이 폭굉하면, 폭굉력이 천공에 직각으로 작용하므로, 위 그림에서 나타내는 h 가 굴착폭의 범위이상에 이르러서는 힘을 소비하게 된다. 이러한 경우에는 심발이 실패하게 된다. 즉 h 는 커트홀 CT_1 에 대해 직각방향의 선, T_1L 로 한계가 되면 커트홀의 깊이 t 가 T_{max} 로 최대가 되고, 커트깊이 t_{max} 가 최장의 깊이가 된다.

천공에 필요한 길이 f , 천공장 l , 커트깊이 t , 갱도 폭 b 의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$a = \frac{b}{4} - 5 \quad (2)$$

$$t = \sqrt{\frac{b^2}{8} - 50} \quad (3)$$

$$l = \sqrt{a(b-a)} \quad (4)$$

$$f = l \quad (5)$$

2.4 소단면 터널과 일반 터널과의 비교

앞에 언급한 바와 같이 소단면 터널은 상대적으로 일반 터널에 비해서 발파하는데 많은 제약(장비적용, 패턴의 선정, 경제적 손실)이 따른다.

일반적으로 소단면 터널과 일반터널과는 다음과 같은 차이가 있다(소단면 터널은 경사공 심발 적용).

식 2~5에 의하면 경사공 심발일 경우 소단면 터널은 굴진장에 제한을 받는다(터널 폭 $\times 0.35$). 그러나 일반 터널에서는 평행공 심발의 적용이 가능하기 때문에 굴진장에 영향을 받지 않는다. 또한 소단면 터널이 비장약량이 높으며 장비의 선택 또

한 제한적이다.

2.5 국내터널의 단면적과 발파재원과 관계

국내현장의 터널의 단면적 별 발파패턴을 조사하였다. 조사대상 현장은 2000년부터 2005년까지 시공 및 설계 자료를 바탕으로 조사하였다. 조사대상 현장은 일반 도로터널, 철도터널 및 기타 용도로 사용되는 터널이며 일축압축강도가 180Mpa 이상인 경암의 현장을 대상으로 하였다. 터널발파에서 경제성 및 시공성에 가장 기본이 되는 천공수(비천공장)와 비장약량을 조사하였다.

도로터널 및 철도터널은 도로공사 및 철도청에서 발주한 현장을 비롯하여 지방도로 까지 포함되어 있다.

시공된 터널에 대해서는 발파일지를 근거로 조사하였고 아직 공사가 진행되지 않은 터널에 대해서는 설계 자료로 조사하였다. 터널의 단면적이 20m^2 이하의 터널은 비교적 그 수가 적었으며 용수터널, 모선터널(수력발전소), 개인용 피난갱 등의 용도로 다양하게 사용되고 있었다. 일반 터널의 경우는 발파효율이 굴진율 80%~90%의 결과를 보였으나 소단면 터널의 경우는 60%~80%로 비교적 낮은 굴진율을 나타내었다.

3. 현장 시험

소단면 터널에서의 효율적인 발파패턴의 제안을 위해 본 시험에서는 터널 단면적과 천공경에 따른 비장약량 및 천공수를 달리하였으며 그 시험 결과는 굴진률 및 파쇄도로 측정하였다. 시험현장은 소단면 터널 중 발파의 효율이 좋지 않은 경암 현장을 선택하였다.

3.1 시험 현장

현장시험은 터널의 크기와 천공경이 다른 ○○지구 농업용수로, ○○양수발전소 모선터널 등 2개소에서 시행하였다.

연구대상의 암반은 주라기 시대의 화강암으로 구성되어 있다. 발파에 의해서 발생하는 버력 중 신선하다고 판단되는 압괴를 채취하여 다음과 같이 물성 실험을 하였다.

물리적 시험 방법은 국제암반공학회가 제안한 방법(ISRM)을 적용하였으며 압괴를 원주형 코어 시험편으로 제작 후 길이 대 직경의 비가 2:1이 되도록 시료를 절단, 양끝 면을 표면 연삭기를 이용하여 편평도의 오차가 0.02mm이하가 되도록 성형하였다. 이렇게 성형한 시료를 -50mmHg상태의 진공실내에 24시간 이상 방치하여 완전히 포화시킨 후 무게를 측정하고 성형된 시료를 105℃에서 24시간이상 건조시킨 후 무게를 측정하였다. 이렇게 측정된 무게를 통하여 공극율, 흡수율, 비중을

계산하였다. 그 후 스트레인 게이지를 부착한 후 영국 ELE (Civil and Environmental Engineering Test Equipment, Model : ADR 2000)사에서 제작된 것으로 최대 가압용량은 2000KN 인 가압기를 사용하여 하중속도 0.5~1.0MPa/sec로 하중을 가압하면서 이때 발생하는 변형율을 읽어 탄성계수를 구하였다.

암석의 인장강도는 간접인장강도인 압열인장강도 시험법을 사용하였다. 시험편에 원판의 중심선을 따라 상하에 집중하중을 가하면 중심부에 인장응력에 대해서 3배 크기의 압축응력이 작용하게 된다. 일반적으로 암석은 압축응력에 대해서 매우 큰 저항을 나타내지만 인장응력에 대해서 극히 취약하다. 그러므로 원판형 시험편은 압축응력에 의해서 파괴가 일어나기 전에 인장응력에 의해서 파괴가 된다. 이때의 파괴강도를 사용하여 간접인장강도를 측정하였다. 이와 같은 원리에 의해서 얻어진 두 현장 시료의 물성은 Table 1, Table 2와 같다.

3.2 두 현장의 발파패턴

○○ 지구 농업용수로공사 현장에서 적용하고 있는 터널의 발파패턴도는 Fig. 4와 같으며 발파제

원은 Table 3과 같다. 너관은 MS너관을 사용하고 있다. 천공수는 외곽공을 포함한 공수이다.

○○ 양수발전소 모선터널현장에서 적용하고 있는 발파패턴도는 Fig. 5와 같으며 발파제원은 Table 4와 같다. 너관은 MS, LP를 사용하고 있다. 두 현장의 가장 큰 차이점은 터널 단면적 외에도 천공경이 35mm, 45mm로 틀리다는 점과 천공장비가 틀리다는 것이다. 농업용수 터널의 경우는 사람이 직접 천공(hand drill)을 실시하고 모선터널의 경우는 점보드릴을 사용하여 천공을 실시한다. 모선터널의 폭은 4.6m인데 점보드릴이 투입될 수 있는 최소 터널폭은 4.5m로 터널 내에서의 점보드릴의 움직임이 자유스럽지 못하였다. 두 터널 모두 평행공 심발을 적용하고 있고 사용폭약은 다이아마이트계열의 폭약을 사용하고 있다. 또한 모선터널의 경우는 터널의 폭이 4.6m인데 천공장을 3.0m로 공사를 시행하고 있다. 이러한 경우는 상대적으로 폭약의 집중도가 높아지고 이로 인해 소결현상 및 사암의 발생되기 쉽다.

일반적으로 발파의 설계 시는 굴진율을 90%정도로 설계한다. 그러나 용수터널의 경우는 굴진율이 60%정도였고 모선터널의 경우는 70%의 굴진율을 보였다. 이로 인해 굴진율이 중요한 변수로 작

Table 1 Rock's physical characters from irrigation water tunnel

	Apparent Density (g/cm ³)	Porosity (%)	Absorption (%)	Elastic Wave velocity (m/sec)	Uniaxial Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Type of rock
Range	2.74~2.59	0.70~0.22	0.33~0.12	5530~4235	220.6~185.9	59.08~41.56	13.8~6.2	I ~ II
Average	2.63	0.43	0.22	4620	200.18	48.30	9.2	

Table 2 Rock's physical characters from Electrical supplies tunnel

	Apparent Density (g/cm ³)	Porosity (%)	Absorption (%)	Elastic Wave velocity (m/sec)	Uniaxial Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Type of rock
Range	2.70~2.64	0.75~0.30	0.31~0.13	5725~4529	230.7~200.5	63.09~45.30	14.6~7.5	I ~ II
Average	2.68	0.53	0.21	4730	217.21	52.06	10.8	

Table 3 Irrigation water tunnel blasting data

Hole diameter (mm)	Hole depth (m)	Round length (m)	Round rate (%)	Number of holes (hole)	Area of tunnel (m ²)	Specific charge (kg/m ³)	Specific drilling (m/m ³)
35	1.8	1.08	60	50	6.00	4.88	13.8

Table 4 Electrical supplies tunnel blasting data

Hole diameter (mm)	Hole depth (m)	Round length (m)	Round rate (%)	Number of holes (hole)	Area of tunnel (m ²)	Specific charge (kg/m ³)	Specific drilling (m/m ³)
45	3.0	2.1	70	88	15.75	3.46	8.0

용하는 비천공장은 각각 13.8m^3 , 8.0m^3 로 높게 나타났다. 이는 일반 터널이 $2.0\sim 3.0\text{m}^3$ 정도의 비천공장과 비교하면 경제적으로 크게 손실을 보고 있다는 것을 알 수 있다.

파를 실시하고 그 결과를 기존패턴의 발파결과와 비교 분석하였다.

발파패턴의 변경은 터널발파에서 가장 중요시 되는 심발 패턴부터 변형을 실시하였다. 즉, 심발 패턴의 변경 → 비장약량 및 천공수의 변경 → 뇌관초시의 변경으로 시험을 진행하였다. 전체적인 시험 내용은 Table 5와 같다.

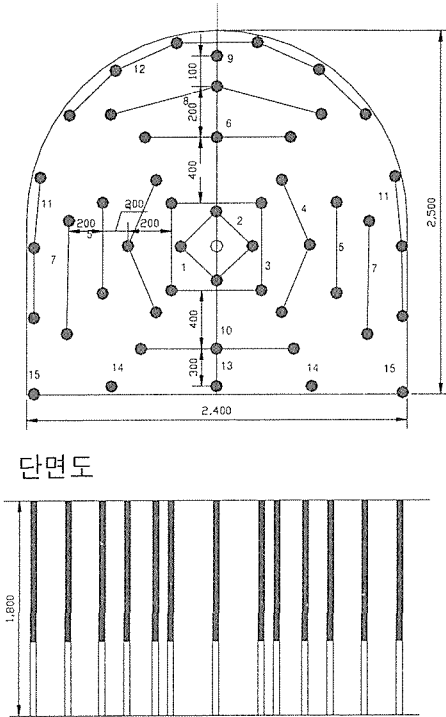


Fig. 4 Blasting pattern of an Irrigation water tunnel

3.3 시험 방법

두 터널에서 비천공장 및 비장약량이 일반적으로 높은 것으로 나타났다. 경제성이 크게 좌우되는 비천공장 및 비장약량을 감소시키기 위해 본 연구는 발파패턴의 검토 후 심발패턴, 굴진장, 비장약량, 뇌관의 시차 등의 조건을 변경하면서 진행하였다.

현장에서 발파결과와 효율이 좋지 않은 원인을 분석 후 현장에 맞는 발파 패턴의 적용 후 시험발

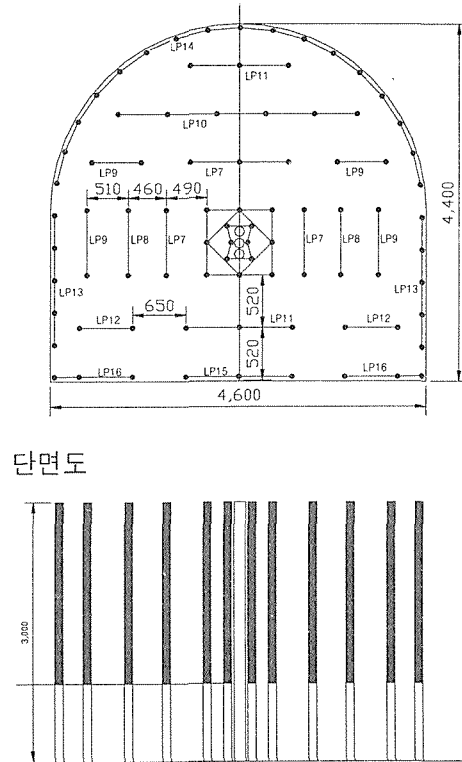


Fig. 5 Blasting pattern of an Electrical supplies tunnel

터널의 단면이 제한적이기 때문에 심발패턴의 변경 시 부득이하게 천공장도 같이 변화를 시켰다. 터널 공기에 문제가 생길 수 있으나 굴진율이 70% 미만으로 매우 취약하기 때문에 우선적으로 심발패턴의 변경(1차)이 필요하였다. 심발공법을

Table 5 Test blasting patterns

Test number	Items	Irrigation water tunnel	Electric supplies Tunnel
1st(No. 5)	Kind of center cut	burn cut→v cut	cylinder cut→v cut
	Hole depth (m)	1.8 → 1.3	3.0 → 1.6
2nd(No. 5)	Number of holes (hole)	50 ~	88 ~
3rd(No. 5)	Specific charge (kg/cm^3)	4.88 ~	3.46 ~
4th(No. 6)	Detonator delay	MS → LP	-

변경하는데 있어서 천공장은 천공각도 때문에 감소되었다. 용수터널의 경우는 사람이 직접 천공(hand drill)을 하기 때문에 터널면적대비 비교적 큰 천공 길이를 확보할 수 있었으나 모선터널의 경우는 점보드릴(jumbo drill)을 사용하므로 천공장이 많이 감소하였다. 심발공법의 변경 후 발파결과가 양호하면 다음 단계인 천공수를 변화(2차)시켜가면서 발파결과를 확인하였다. 비장약량의 변화와(3차) 같이 진행되어도 무관하지만 정확한 분석을 위해서 시험은 구분해서 실시 하였다. 이러한 과정을 걸쳐 시험결과와 분석 후 마지막으로 뇌관초시의 변경(4차)시험을 실시하였다. 초시변경 시험은 용수터널에서만 시행하였다. 이유는 모선터널은 일반 터널에서와 같이 LP뇌관을 사용하고, 용수터널의 경우는 MS뇌관만으로 발파를 실시하기 때문이다.

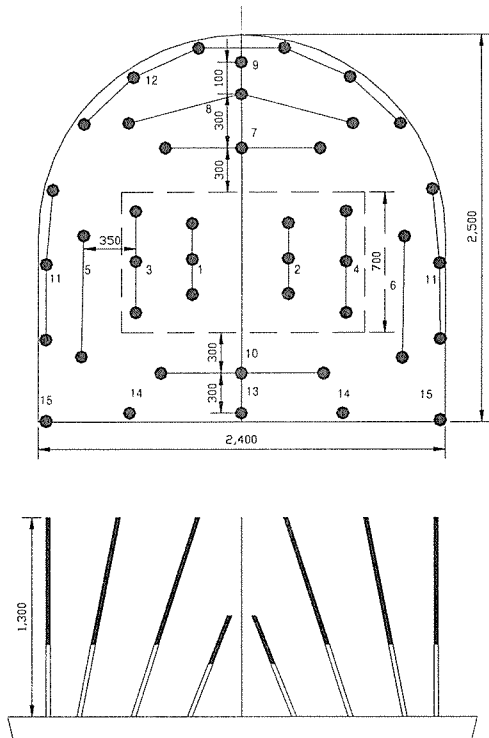
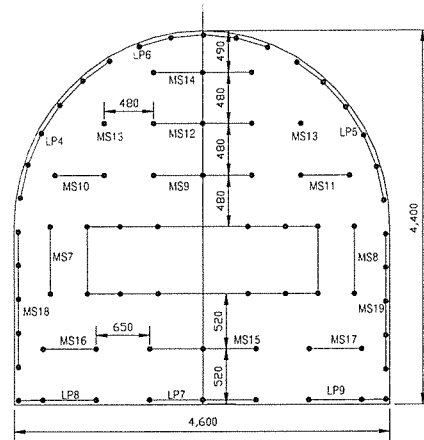


Fig. 6 Pattern of cut variations on irrigation water tunnel

심발패턴의 변경은 두 현장의 평행공 심발을 경사공으로 변경하여 시험을 진행하였다. 두 터널의 심발 변경패턴은 Fig. 6, Fig. 7과 같다. 주변공 및 외곽공의 패턴은 그대로 적용을 하였으나 심발공법 변경으로 인한 천공수는 평행공일 때보다 감소하였다.

3.3.1 1차 시험조건

용수터널의 경우는 식 (2)~(5)에 의하면 천공장을 0.75m로 설계되어야 하나 시공상의 문제로 천공장을 1.3m로 설계하였다. 경사공의 각도는 75.로 하였으며 높은 경사각으로 인해 발파의 실패를 막기 위해 보조심발공(baby-cut)을 적용하였다. 심발공법의 변경으로 천공수는 50공에서 43공으로 감소되었다. 공당 장약량은 기존의 전색장의 길이비와 동일하게 장약하였고 총 5회의 시험발파를 통해 그 결과를 확인하였다.



단면도

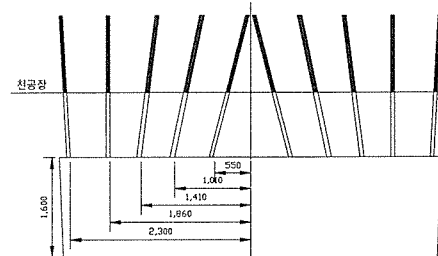


Fig. 7 Pattern of cut variations on electrical supplies tunnel

또한 모선터널의 경우는 식 (2)~(5)를 근거로 천공장은 1.6m로 선정하였다. 용수터널보다는 단면적이 크므로 천공각도는 65.로 하였다. 터널의 단면적상 경사공의 각도는 45.로 줄 수 있으나 점보드릴의 사용으로 장비의 작업공간이 필요해 경사 각도를 크게 하였다. 천공수는 85공에서 74공으로 11공이 감소되었다. 용수터널과 마찬가지로 기존의 패턴에서 전색장비를 동일하게 하여 장약을 실시하였으며 총 5회의 시험발파로 그 결과를 확인하였다.

3.3.2 2차 시험조건

천공수는 확대공 영역의 공수를 변경시키면서 시험을 진행하였다. 식 (1)에 의한 두 터널 확대공 영역의 공간격과 저항선을 구하면 식 (6), (7)로 계산할 수 있다. 식 (6)은 용수터널의 공간격이며 식 (7)은 모선터널의 공간격 계산이다. 두 현장의 암석의 비중은 2.7g/cm^3 이고 폭약은 (주)한화에서 생산하는 다이나마이트류 폭약으로 가비중은 1.2g/cm^3 이다. 용수터널의 경우는 천공경이 35mm 이므로 약경이 25mm인 폭약을 사용하고 모선터널의 경우는 천공경이 45mm이므로 약경이 32mm인 폭약을 사용한다.

$$W_{kst} = 0.012 \cdot \left(\frac{2 \times 1.2}{2.7} + 1.5 \right) 25 \quad (6)$$

$$W_{kst} = 0.012 \cdot \left(\frac{2 \times 1.2}{2.7} + 1.5 \right) 32 \quad (7)$$

상기의 식으로 이론상 각 현장에 적합한 확대공 영역의 공간격 및 저항선은 Table 6과 같다.

현재 두 현장의 터널은 Table 5처럼 공간격 및 저항선을 적용하고 있지 않고 이보다 50~60% 작은 수준을 적용하고 있다. 본 시험에서는 문헌조사의 저항선 및 공간격을 근거로 해서 점차적으로 증가시켜 천공수의 감소를 시험하였다. 그러나 터널에서는 기본 형상이 필요하므로 단면이 작으면 설계에 일반적으로 널리 적용되고 있는 Konya 및 Ash의 제안식의 적용에 한계가 있다. 이유는 이 식들은 약경이 큰 변수로 작용하기 때문이다.

본 시험에서는 터널의 형상을 위해서 Konya 및 Ash의 식의 80% 수준의 설계를 적용하였다. 총 5회 시험을 기본으로 하여 심발공법의 변경으로 얻은 용수터널 및 모선터널의 천공수 39공, 74공을 각각 31공, 64공까지 감소시켜 시험하여 그 결과를 평가하였다.

3.3.3 3차 시험 조건

비장약량의 감소에 대한 시험은 천공수에 대한 시험 결과를 근거로 공당 장약량을 감소시켜 시행하였다. 시험의 진행은 우선적으로 확대공 부분의 장약량을 줄이면서 이때의 굴진장을 측정된 후 비장약량을 산출하였다. 두 터널에서 비장약량을 확대공, 바닥공, 심발공 순으로 변경시켜 가면서 각각 5회의 시험을 실시하였다.

3.3.4 4차 시험 조건

또한 지연초시에 대한 시험은 MS너관을 사용하는 용수터널에서만 시험하였고 1차~3차의 시험결과로 얻은 가장 효율적인 패턴을 가지고 초시가 긴 LP너관을 사용하여 시험을 진행하였다. 적용 패턴은 1~3차 시험결과 가장 양호한 패턴을 선정하여 Fig. 8과 같이 초시를 변경 시켰다.

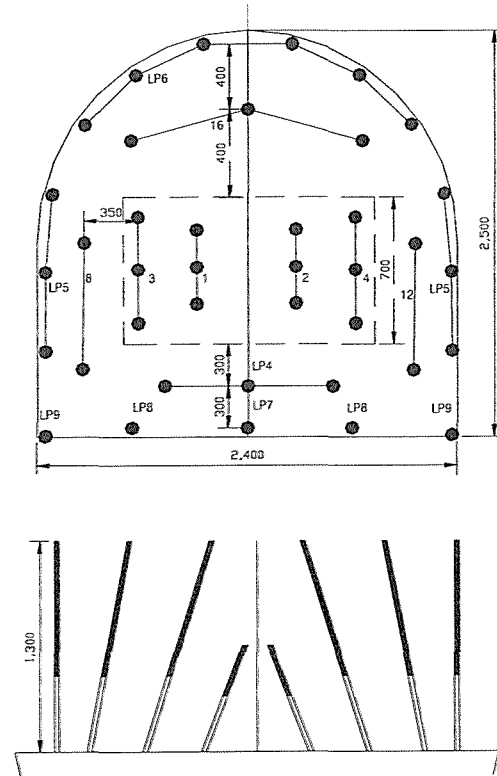


Fig. 8 Pattern of delay time variations on irrigation water tunnel

4. 시험결과 및 분석

시험결과는 굴진장 및 파쇄도 측정으로 검토를 하였다. 굴진장은 발파 후 어굴의 길이를 실제로 측정하였다. 측정은 심발영역, 확대영역으로 나누어 실시하였으며 그 측정값의 평균을 이용하였다.

파쇄도는 Split-Desktop 4.0를 이용하였다. 이는 The University of Arizona에서 개발된 암석 파쇄물의 크기를 측정하기 위한 이미지 처리 프로그램

Table 6 The space and burden of the two tunnels based on study records

Items	Water tunnel	Electric tunnels	Remarks
Hole space (m)	0.72	0.92	Assume
Burden length (m)	0.65	0.83	

이다. 이 프로그램은 현장에서 촬영된 칼라 이미지를 흑백의 디지털 이미지로 전환하고, 전환된 이미지로부터 파쇄물의 경계를 인식하여 파쇄물의 크기를 평가하는 방법을 이용한다.⁵⁾

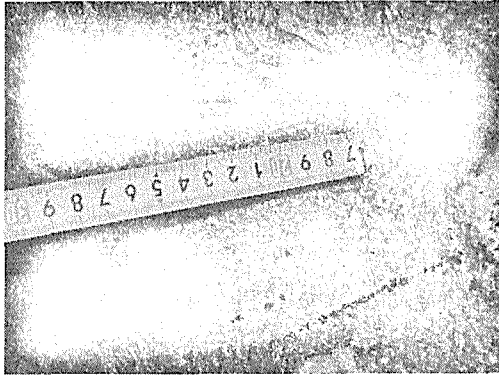


Fig. 9 Measuring of advance

향상되어 이에 따르는 비장약량도 용수터널의 경우는 4.88kg/m^3 에서 3.18kg/m^3 로 감소하였고 모선터널에서도 3.46kg/m^3 에서 2.85kg/m^3 로 감소하였다. 또한 비천공장도 용수터널은 13.8m^3 에서 8.6m^3 로 모선터널의 경우는 8.0m^3 에서 5.2m^3 로 각각 감소하였다.

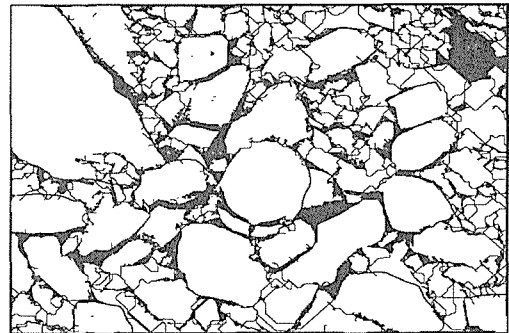


a) Crushed stones from the field

4.1 심발공법의 변경

두 터널현장에서 총 5회를 실시하였으며 각 시험 당 발파결과는 Table 7과 같다. 기존 패턴의 발파결과는 총 5회를 측정해서 평균화 하였다. 평균 굴진율은 용수터널의 경우는 60%였고, 모선터널의 경우는 70%였다. 또한 평균 파쇄도는 용수터널의 경우 18.4cm였고 모선터널의 경우는 18.9cm였다.

시험결과 용수 터널의 평균 굴진장은 1.06m로 82%의 굴진율을 보였으며 모선터널의 평균 굴진장은 1.44m로 90%의 굴진율을 보였다. 또한 평균 파쇄입도는 용수터널의 경우 16.62cm이었으며 모선터널은 15.52cm로 기존의 패턴보다 4~10% 감소하였다. 또한 파쇄석의 균질성도 경사공 심발이 더 좋게 나타났다. 이러한 결과로 터널의 단면적이 작은 소단면 터널에서는 평행공 심발보다는 경사공 심발을 적용하는 것이 효율적인 면에서 더 좋다고 볼 수 있다. 심발공법의 변경으로 굴진율이



b) Digital imagined figure of picture of crushed stones

Fig. 10 Analysis process on crushing data by Split-Desktop 4.0

4.2 천공수의 변경

천공수의 변경 시험은 1차 시험의 결과로 얻은

Table 7 Test results from cut variation

Number of test	Water tunnel				Electric tunnel			
	Hole depth (m)	Round length (m)	Round rate (%)	Degree of fragmentation (cm)	Hole depth (m)	Round length (m)	Round rate (%)	Degree of fragmentation (cm)
conventional pattern	1.8	1.08	60	18.4	3.0	2.10	70	18.9
1st	1.3	1.1	85	18.3	1.6	1.5	94	15.6
2nd	1.3	1.0	77	16.8	1.6	1.4	88	18.8
3rd	1.3	1.1	85	17.7	1.6	1.5	94	12.4
4th	1.3	1.0	77	16.2	1.6	1.4	88	16.3
5th	1.3	1.1	85	14.1	1.6	1.4	88	14.5
Average	1.3	1.06	82	16.62	1.6	1.44	90	15.52

패턴으로 시험을 실시하였다. 천공수의 변화에 따른 발파 결과는 Table 8과 같다. 단, 공당장약량은 심발공법 변경 패턴과 동일하게 하였다.

천공수를 변화시키면서 그 결과를 측정 한 결과 용수터널에서는 천공수가 36공 이하로 되면서 파쇄도가 크게 나타났다. 모선터널의 경우는 64공이하에서는 굴진을 및 파쇄도가 심발시험(1차시험)과 비교하여 좋지 않게 나타났다. 천공수의 변화는 터널단면에서 저항선 및 공간격의 변화를 의미한다. 즉, 파쇄도에 큰 영향을 주는 것으로 볼 수 있다. 이러한 이유로 용수터널의 경우는 파쇄도가 36공일 경우에 크게 나타났다. 모선 터널의 경우는 천공수가 64공일 경우에 파쇄도가 크게 나타났다. 또한 굴진율도 72%로 좋지 않게 나타났다.

4.3. 비장약량의 변경

비장약량에 대한 시험은 천공 수 시험결과에 대한 패턴을 이용하였다. 용수터널의 경우는 천공수가 39공인 패턴을 적용하였으며 모선터널의 경우는 천공수가 68공일 경우의 패턴을 적용하였다. 각 시험 결과는 Table 9와 같다.

굴진율과 파쇄도를 고려한 비장약량의 변화에 따른 발파시험 결과 용수터널의 경우는 비장약량이 $2.56\text{kg}/\text{m}^3$, 모선터널의 경우는 $2.22\text{kg}/\text{m}^3$ 이하인 경우는 굴진장이 좋지 않게 나왔다. 각각의 터널 단면에 그 이상의 비장약량의 감소는 경제적으로 이익이 없을 것으로 판단된다. 천공수의 변화패

턴과 비교해 보면 비장약량의 변화는 파쇄입도 보다는 굴진장에 영향을 많이 미치는 것을 알 수 있다.

4.4. 발파 초시의 변경

자연초시의 변경이 발파 결과에 미치는 영향을 보고자 실시한 시험이다. 시험결과는 Table 10과 같다. 상기시험결과 가장 경제적인 패턴을 가지고 MS너관, MS+LP너관을 혼용하는 시험을 실시하였다. 단, 터널의 단면상 용수터널에서만 시험을 하였다. 심발의 경우는 제발효과를 위해 MS너관을 사용하였고 확대공 및 바닥공의 초시를 변경하였다.

발파결과 초시간격이 길수록 굴진장 및 파쇄도가 양호하게 나타났다. 이는 발파의 경제성 및 효율에는 앞의 조건들 보다는 미치는 영향이 적으나 어느 정도의 발파결과에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 즉, 소단면 터널에서는 선 기폭된 앞반의 이동(moving)이 완전하게 이루어진 후 다음열의 기폭이 효과적일 수 있다는 것이다.

4.5 시험 결과의 고찰

발파효율이 낮은 두 현장의 소단면 터널에서의 발파효율 증대를 위해 소단면 터널의 특성을 파악 하고 발파패턴을 변경하여 그 효율성 증가를 위한 시험하였다.

터널발파에 영향을 줄 수 있는 변수를 순차적으

Table 8 Test results from number of drilling variation

Number of test	Water tunnel				Electric tunnel			
	Number of holes (hole)	Round rate (%)	Specific drilling (m/m^3)	Degree of fragmentation (cm)	Number of holes (hole)	Round rate (%)	Specific drilling (m/m^3)	Degree of fragmentation (cm)
Conventional pattern	50	60	13.8	18.4	88	70	8.0	18.9
1st	39	92	7.1	17.6	74	88	5.3	13.8
2nd	35	92	6.4	17.4	70	94	4.7	14.2
3rd	31	83	6.2	23.2	68	88	4.9	13.6
4th	31	83	6.2	20.2	64	69	5.4	16.8
5th	31	75	6.9	24.5	64	75	5.7	17.2

Table 9 Test results from charge variation

Number of test	Water tunnel			Electric tunnel		
	Specific charge (kg/m^3)	Round rate (%)	Degree of fragmentation (cm)	Specific charge (kg/m^3)	Round rate (%)	Degree of fragmentation (cm)
Conventional pattern	4.88	60	18.4	3.46	70	18.9
1st	2.65	85	19.8	2.45	94	14.1
2nd	2.56	85	19.7	2.22	94	14.3
3rd	2.85	81	18.9	2.47	81	13.6
4th	2.57	77	21.2	2.68	75	14.5
5th	3.21	62	22.5	2.92	81	14.8

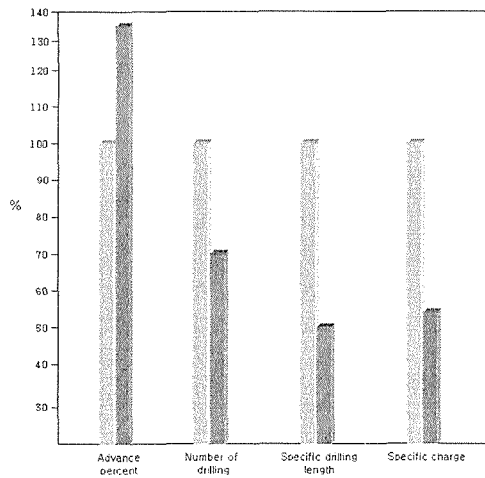
로 변형해 가면서 시험을 실시하였는데 심발공법의 변경을 시작으로 천공수, 비장약량, 뇌관 초시등을 변경하여 시험을 실시하였고 그 결과는 굴진장 및 파쇄입도로 평가하였다.

심발공법 변경은 평행공 심발을 경사공심발로 적용하였으며 천공장은 1.8, 3.0m를 1.3m, 1.6m로 변경하였다. 그 결과 기존의 패턴은 굴진율이 60~70%였으나 심발공법의 변경 후 굴진율은 80~90%로 20%정도 상승하였다.

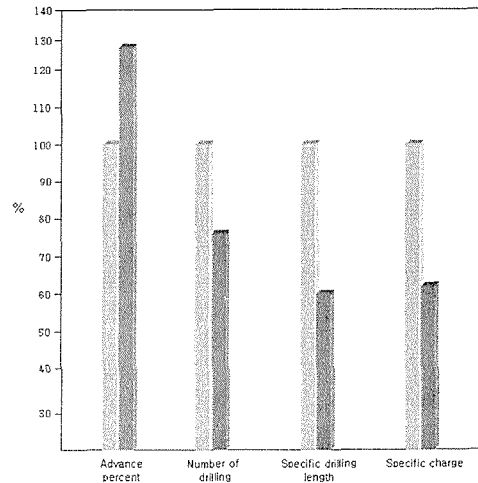
다음으로 천공수를 변경하여 시험을 진행하였다. 발파패턴은 심발공법 변경 시험에서 타당하다고 판단되는 패턴을 적용하였다. 문헌에서는 터널단면적 20m²이하 터널의 경우는 30공으로 제시하고 있으나 시험터널의 경우는 50, 88공으로 많은 천공을 하고 있었다. 공당 장약량을 조절하여 비장약량은 고정시키고 천공수의 변화를 시험한 결과 각각 39, 68공으로 그 공수의 감소를 확인 할 수 있었다.

감소시킨 천공수를 가지고 비장약량에 대한 시험을 실시하였다. 그 결과 비장약량은 각각 4.88kg/m³, 3.45kg/m³에서 각각 2.56kg/m³, 2.22kg/m³으로 감소함을 알 수 있다.

Fig. 11은 기본패턴을 100%로 했을 때의 두 터널에서의 결과를 그래프로 표현한 것이다.

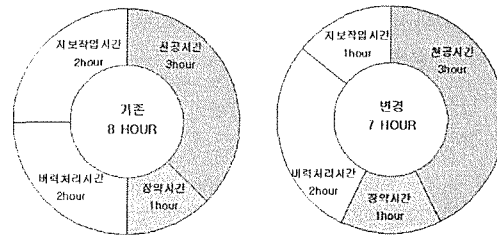


(a) Test results of various patterns on irrigation water tunnel

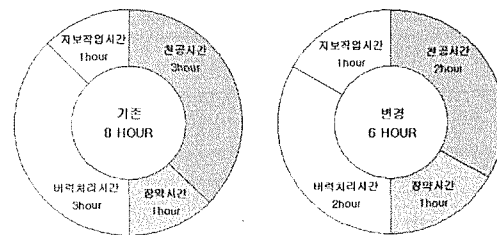


(b) Test results of various patterns on electrical supplies tunnel

Fig. 11 Test results of various patterns to two tunnels



(a) Irrigation water tunnel working time comparison



(b) Electrical supplies tunnel working time comparison

Fig. 12 Working time comparison to two tunnels

Table 10 Test results from delay time

Number of test	Kind of detonation	Drilling rate (%)	Degree of fragmentation
1회	MS detonator	77	19.3
2회		85	19.2
3회		77	20.1
4회	MS+LP detonator	85	16.2
5회		85	15.3
6회		77	16.0

또한 지연초시와 발파의 효율과의 시험을 알아보기 위해 MS너관만을 사용하는 현장에 MS와 LP너관을 혼용해서 시험을 실시하였다. 그 결과는 지연초시가 긴 MS와 LP너관을 혼용한 발파가 굴진을 및 파쇄도가 다소 좋게 평가 되었다.

터널에서의 1 사이클(cycle)은 천공→장약→발파→환기→버력처리→보갱→측량으로 이루어진다. 굴진율 및 비장약량 등의 경제성이 좋다고 해도 현장에서의 적용을 위해서는 시공능력(작업시간)을 검토해야 한다. Fig. 12는 두 현장에서의 기존의 작업 시간과 변경된 패턴 적용시의 작업 시간을 나타낸 것이다. 크게 천공시간, 장약시간, 버력처리 시간, 지보작업시간으로 구분하여 검토하였다.

용수터널의 경우는 천공장이 감소해도 발파효율의 증대로 1일 동안 동일 사이클로 3.24m를 굴진을 할 수 있다. 그러나 모선타널의 경우는 발파패턴의 변경으로 효율이 좋게 나타났으나 본 패턴의 천공장이 상당히 길게 적용되고 있기 때문에 1회 사이클당 굴진장은 시험패턴이 작게 나타났다. 이는 1회 사이클당 투입비용과 발파의 효율성에 의한 비용 등을 산출하여 경제성을 비교해야 할 것이다. 순수하게 작업시간만을 고려한다면 1일 굴진장은 본 연구에서 제안한 발파패턴이 현장에 유리하게 작용할 것이다.

5. 결론 및 제언

문헌조사 및 국내 터널 자료의 조사 결과 발파의 경제성이 급격히 저하하는 단면 20m²이하인 용수터널, 모선타널에서 시험을 진행하였다. 두 터널의 단면은 각각 6m², 15.75m²였으며 굴진율은 60~70%로 매우 낮게 나타났다. 이러한 이유로 비천공장 및 비장약량이 높게 나타났다. 이렇게 경제성이 좋지 않은 이유를 분석하고 그 효율을 높이기 위해 심발공법, 천공수, 비천공장, 비장약량 등을 변경해 가면서 시험을 진행하였다.

연구결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 단면이 작은 터널(20m²이하)에서는 경사공 심

발공법이 유리하며 터널의 폭이 2.4m일 경우에는 1.3m의 천공이 가능하며 4.6m일 경우에는 1.6m의 천공이 가능하다. 단, 천공장비의 선택에 따라 가능한 천공장은 다소 변화될 수 있다.

나. 두 현장에서 발파패턴을 변경하여 시험 한 결과 용수터널의 경우는 비천공장은 54%감소하였고, 비장약량은 57% 감소하였다. 모선타널에서는 비천공장이 39%감소하였으며 비장약량은 36% 감소하였다. 두 현장의 기존 발파패턴 및 최적의 발파패턴은 Table 11과 같다.

다. 소단면 터널에서는 비교적 자유면이 작아 암석의 이동(moving)이 완전히 이루어진 후에 다음공이 기폭 될 수 있도록 너관 초시가 긴 것(LP너관)을 사용하는 것이 굴진을 및 파쇄도 개선에 효과가 있다.

라. 시공성은 제안패턴을 두 현장에 적용 시 용수터널의 경우는 1일 굴진장이 기존과 동일하게 3.24m가 되고 모선타널의 경우는 작업시간만을 고려했을 때에는 기존의 패턴은 4.2m였으나 제안패턴으로 발파 시는 1일 굴진장이 4.5m가 가능하였다.

본 연구는 터널의 단면적이 6m², 15.75m²인 경암의 두 현장에서 시험한 결과이다. 암반의 상태 및 현장 여건에 따라 발파패턴은 많은 변화가 있을 수 있으나 상기의 단면적을 가지는 현장에서는 효율적인 발파를 시행할 수 있는 패턴을 제안하였으며, 현재 두 현장에서 제안 패턴을 현장에 적용하여 경제적인 효율이 많이 증대하였다. 추후에 보다 많은 현장에서 시험을 진행한다면 여러 단면의 소규모 터널에서의 일반적인 발파패턴을 제안할 수 있을 것이라 생각된다.

Table 11 Comparison of the results from two tunnels

Remarks	Water tunnel		Electric tunnel	
	Conventional pattern	New pattern	Conventional pattern	New pattern
Hole diameter(m)	1.80	1.30	3.00	1.60
Round length(m)	1.08	1.08	2.1	1.45
Round rate(%)	60	83	70	91
Number of holes(hole)	50	35	85	68
Specific drilling(m/m ³)	13.8	7.7	8.0	4.9
Specific charge(kg/cm ³)	4.88	2.56	3.46	2.22

참고문헌

- [1] 기경철, 김일중, “산학인을 위한 발파공학”, pp. 133~161, 2002.
- [2] 한국암반공학회, “지반공학 시리즈 터널”, pp. 77, 1998.
- [3] 두준기, 양형식, 김형건, 김용욱, “다단장약에 의한 V-cut 발파공법의 진동제어효과와 발파효율증대에 관한 연구”, 화약·발파, Vol20, No3, pp.1~10, 2003.
- [4] 김양관, 김형철, 유정훈, “터널발파 작업시 여굴저감을 위한 천공방법에 관한 연구”, Vol21, No2, pp.1~13, 2003.
- [5] 최용근, “벤치발파에서 암석 파쇄도에 영향을 미치는 요인 분석과 파쇄도 예측 모델 개발”, 서울대학교박사학위논문, pp.127~128,
- [6] 임한욱, “암발파 설계 기본에 관한 연구”, 한국토지개발공사 pp.169~242, 1993.
- [7] Stig. O. Olofsson, “Applied Explosives Technology for Construction and Mining” 164p, 1991.
- [8] ISEE, “Blaster’s Handbook”, 1998.