

## 벌크폭약을 이용한 대단면 장대터널 시공 사례

노상림, 문상호, 조영천, 이상필, 유지영<sup>1)</sup>

### The Construction of Large and Long Tunnel Using Bulk Explosives

Sanglim-No, Sangho-Moon, Youngchun-Jo, Sangpil-Lee and Jeeyoung-Yu

**ABSTRACT.** Lately, the length of tunnel, the number of long-large tunnel over 3 lanes are steeply increased because of the request for high-speed and straight road. Therefore, the maximization of excavation efficiency is needed in tunnel construction. The sapaesan tunnel (4 lanes with the length of 4 km) construction was delayed with environmental conflict for 2 years. For making-up delayed construction period, various new methods were adopted to improve excavation length, look-out and blasting efficiency. This study introduced bulk explosive which is new method in tunnel blasting and verified the efficiency of bulk explosive for long-large tunnel.

**Key words.** : long-large tunnel, Sapaesan tunnel, bulk explosive

**초 록.** 최근 신설되는 도로의 경우 고속화/직선화로 인하여 터널의 연장 및 평균터널 길이, 3차선이상의 대 단면 터널이 날로 증가하고 있어 이에 따른 굴착 효율 극대화가 필요한 시점에 있다. 사패산 터널은 약 4km의 4차선 대 단면 도로터널로, 환경문제로 인해 늦춰진 공기를 단축시키기 위하여 터널 굴착 시 굴진효율에 가장 큰 영향요소인 굴진장과 여굴관리, 발파효율의 개선을 위한 다양한 신 공법이 적용되고 있다. 본 논문은 당 현장에서 시도되고 있는 신 공법 중, 새로운 형태의 폭약인 Bulk 폭약에 대하여 소개하고, Bulk 폭약의 대 단면 터널 적용에 대한 효율을 검증하고자 하였다.

**핵심어** : 장대터널, 사패산 터널, 벌크 폭약

## 1. 서 론

최근들어 도로의 직선화, 고속화로 인하여 터널이 전체 공사에서 매우 중요한 역할을 차지하게 되었고, 또한 도심지와 근접한 대단면 터널의 발주 비중이 증가하는 추세에 있다. 2차선 도로 터널의 경우 표준화된 굴착방법과 수많은 시공사례에 의한 자료축적이 이루어져 왔으나, 3차선 이상의 대단면 터널에서는 아직 표준화된 굴착방법과 더불어 시공 사례 또한 매우 적은 것이 현실이다.

본 시공사례는 4차선의 대단면 터널 중 국내 최장의 길이를 가지고 있는 사패산 터널에서의 굴착에 관한 시공사례에 대한 내용을 포함하고 있으며, 아울러 사패산 터널공사시 가장 큰 화두로 대두되고 있는 공기단축을 위한 굴착방법에 대한 개선사

향으로 굴착효율을 증가시키기 위해서 기존의 카트리지 형태의 폭약에서 밀장전이 가능한 Bulk 폭약으로 설계변경을 하였다.

## 2. 현장개요

사패산 터널은 편도4차로의 대단면 터널로서는 국내 최장이며, 당초 '02년1월부터 '06년6월까지 총54개월로 계획되어 있었으나 환경훼손 우려에 따른 민원으로 착공이 2년간 늦어져 공사기간 연장이 불가피하게 되었다. 사패산 터널의 경우 터널이 전체공중의 50%를 상회하므로 Critical Path로 작용하고 있는 터널공중의 공기단축이 가장 중요하다고 할 수 있다.

본 현장은 경기도 양주군 장흥면 교현리-경기도의 정부시 호원동에 위치하고 있고(그림 1 참조), 연장은 일산I/C 기점 18km332.677-25km814.084 (L=7.481km)이다. 터널현황은 그림 2에 도시하였고, 현장의 구조물 개요는 다음과 같다.

1) LG건설(주) 기술본부  
접수일 : 2004년 9월 13일

- 토공 : 각기: 1,724 m<sup>3</sup>, 쌓기: 868 m<sup>3</sup>
- 배수공: 배수관: 683 m (32개소)  
    암거: 670 m (9개소)
- 구조물공: 교량: 5개소
- 터널공: NATM: 약 4,000 m (2개소),  
    단선병렬터널(편도 4차로)
- 부대공: 표지판: 79 개소, 방음벽: 1,882 m

대부분이 산악지형으로 전체적인 지형은 지질분포의 영향을 받아 북한산에서 사패산의 남-북 산계에 대하여 북동 방향으로 위치해 있으며 흑운모 화강암을 기저로 하고 있다.

지형을 종합해보면 하천들은 각기 발원한 소규모 지천들로 동서방향의 방향성을 보이며 가지상으로 뻗어있고, 사패산 일대의 돌출부 형태의 특징적인 형태로 볼 때 전반적인 지형은 장년기 지형양상을 보이며, 북한산 국립공원 북동부의 광범위한 충적층 지역은 노년기 지형이라 할 수 있다.

본 계획노선에 분포하는 지질을 개략적으로 보면 주로 선 캄브리아기의 편마암류와 중생대 쥐라기에 이를 관입한 흑운모 화강암으로 대별할 수 있으며 그 외 암맥류와 충적층 등으로 구분된다(그림 3 참조).

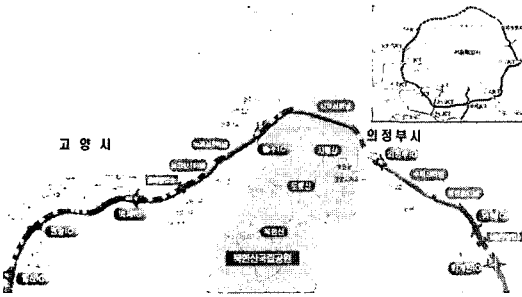


그림 1. 사패산 터널 노선도

#### 4. Bulk 폭약을 이용한 굴진효율 개선

##### 4.1 Bulk 폭약 개요

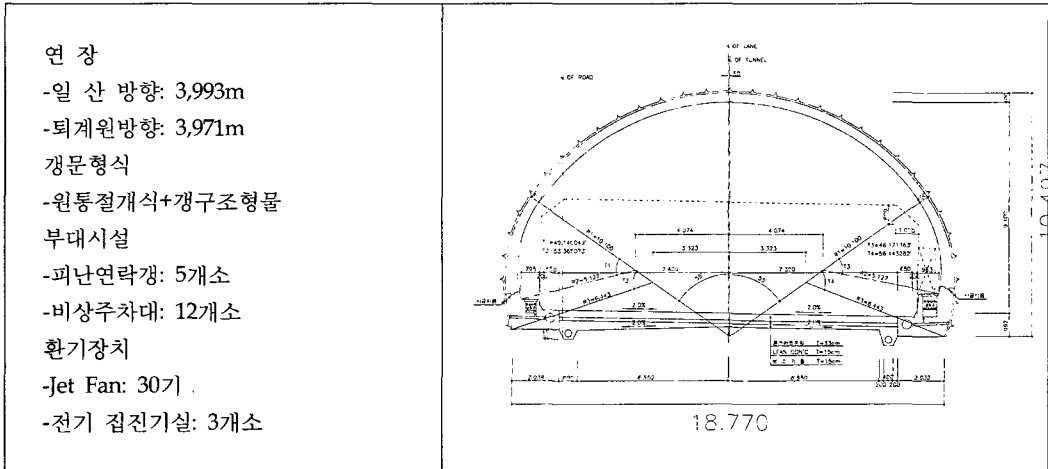


그림 2. 사패산 터널 현황

### 3. 지질 및 지반조건

본 조사지역은 행정 구역상 경기도 양주군 장흥면 일대에서 경기도 의정부시에 위치하며 계획노선의 대부분이 북한산 국립 공원에 걸쳐있다. 노선구간의

Bulk 폭약은 폭약을 포장하지 않은 상태에서 기계화 장전시스템을 이용하여 직접 장약을 하는 예멀전계 폭약을 말하며, 성분은 Emulsion계 폭약의 성분인 질산암모늄(NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>)과 대부분 동일하다. 당 현장에서 사용된 Bulk 폭약의 특성치는 표 1과 같고 제품 규격은 Barrel 당 300kg이다.

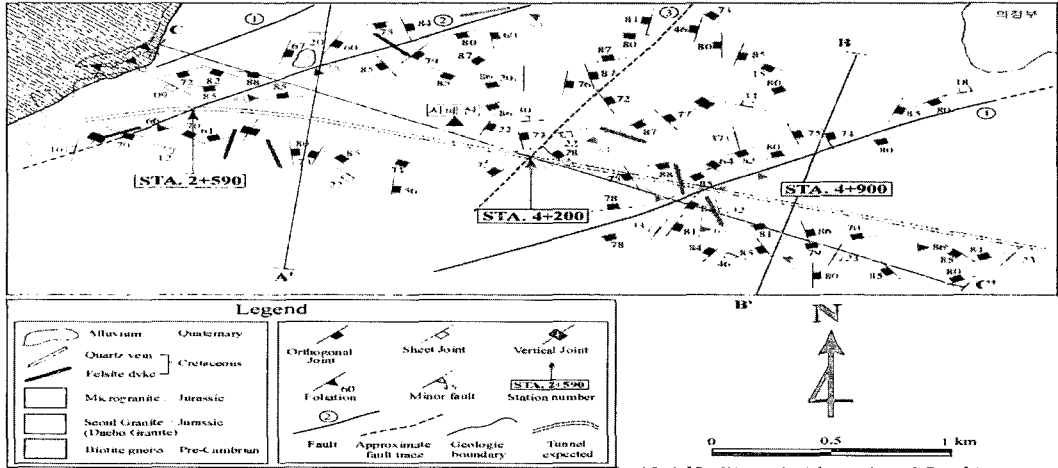


그림 3. 사패산터널 지질도

표 1. Bulk폭약의 제품성능

폭속 (cm/sec)	5,500
가비중 (g/cc)	1.20-1.25
폭발열 (Kcal/kg)	690
낙후감도 (cm)	100
가스량 (ℓ/kg)	976
내한성 (℃)	-20
내수성	최우수

카트리지 폭약은 뇌관이 기폭재 역할을 하지만 Bulk 폭약의 경우 뇌관으로 기폭한 전폭약포가 기폭재 역할을 하므로 보다 안전하게 시공할 수 있으며, 기계화된 장전 시스템을 이용하므로 효율적인 장약작업이 가능하다는 장점이 있다.

4.2 Decoupling 효과

Decoupling이란 장약 공벽과 폭약사이에 공간을 취하는 것을 총칭하는 것으로서 발파공 지름에 비하여 훨씬 적은 지름의 폭약을 장전하여 발파공 내

벽사이에 공간을 유지하도록, 폭약을 위치시킨 상태를 Decoupling 장약이라고 하며, 이 공간이 폭발 충격력을 약하게 한다. 터널의 경우, 최외곽공에 공경이 작은 정밀폭약을 장약함으로 Decoupling 효과를 이용한 Smooth Blasting공법을 적용하게 된다.

Decoupling 지수(D.I.)는 식(1)과 같으며, Abel-Nobel의 상태방정식에서 Decoupling 지수(D.I.)와 장약공 내에 작용하는 가스압력 P<sub>s</sub>과의 관계를 그림 4에 도시하였다.

$$Decoupling\ Index\ (D.I.) = \frac{\text{발파공의직경}}{\text{폭약의직경}} \quad (1)$$

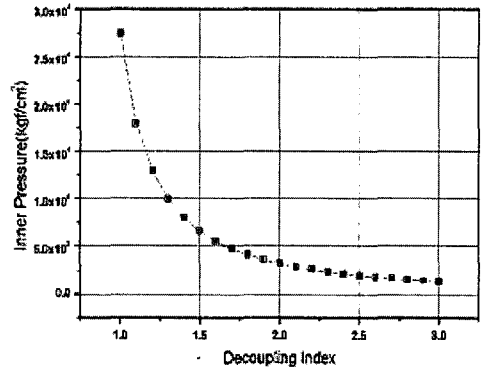


그림 4. Decoupling 지수와 공내 작용 폭압과의 관계

기존의 카트리지 폭약의 경우 폭약의 직경과 천공경 사이에 생기는 공극으로 인하여 필연적으로 Decoupling 효과를 일으키게 되지만, Bulk 폭약의 경우 액상형태의 폭약을 호스를 통하여 장약공에 주입하기 때문에 밀장전이 가능하므로 Decoupling 계수가 1이 되어 폭발력을 최대한으로 발휘할 수 있는 특징을 가지고 있다.

#### 4.3 Bulk 폭약 성능평가를 위한 통계분석

Bulk 폭약과 카트리지 폭약의 성능을 비교평가하기 위하여 시험발파를 실시하였다. 시험발파의 비교항목으로는 굴진율, 천공수, H.C.F(Half cast factor), 비산거리, 장약시간, 비장약량 등의 항목을 비교평가 하였으며, 평가에 영향을 줄 수 있는 요인인 암반의 상태 등을 미리 파악하여 분석에 활용하였다.

Bulk 폭약의 경우 총 7회 시험발파를 실시하였으며, 카트리지 폭약의 경우에는 총 4회의 시험발파를 실시하였다. 각 시험에 앞서 막장관찰과 RMR과 Q system 등의 암반분류를 실시하였으며, 암반 상태에 따른 시험 결과치의 영향을 최소화하기 위하여 RMR값 50-70과 Q system의 값 4-26까지의 범위에 드는 데이터 들을 상호 비교하였다.

표본의 크기가 매우 작은 경우에 모수통계분석에 비해 적용이 용이한 비모수통계분석 이용하였으며 Bulk 폭약을 사용한 집단과 카트리지폭약을 사용한 집단의 효율성을 비교하기 위하여 Mann-Whitney Test를 적용하여 차이에 대한 유의성을 확인하였다. Mann-Whitney U-통계량은 식(2)와 같이 정의할 수 있다.

$$U = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \psi_{ij}$$

(2)

$$\psi_{ij} = \begin{cases} 1, & Y_j > X_i \\ 0, & Y_j \leq X_i \end{cases}$$

이 통계량은 모든 관측값에 대한 관계식  $\{Y_j > X_i\}$ 을 만족하는 쌍의 개수를 나타낸다. 유

수준  $\alpha$ 에서 Mann-Whitney U-통계량을 사용한 검정 절차는 다음과 같다.

(i)  $H_1 : \Delta > 0$ 일때 ,

$$U \geq \omega(\alpha, m, n) - \frac{n(n+1)}{2} \text{ 이면 } H_0 \text{를}$$

기각

(ii)  $H_1 : \Delta < 0$ 일때 ,

$$U < \omega(1 - \alpha, m, n) - \frac{n(n+1)}{2} \text{ 이 면}$$

$H_0$ 를 기각

(iii)  $H_1 : \Delta \neq 0$ 일때 ,

$$U \geq \omega(\alpha/2, m, n) - \frac{n(n+1)}{2} \text{ 또는}$$

$$U < \omega(1 - \alpha/2, m, n) - \frac{n(n+1)}{2} \text{ 이 면}$$

$H_0$ 를 기각

상기의 식을 이용하여 Bulk폭약과 카트리지 폭약을 각각 사용했을 때 굴진율, 천공수, H.C.F(Half Cast Factor), 비산거리, 장약시간, 비장약량에 통계적으로 유의한 차이가 있는지를 검증하였다.

#### 4.4 Bulk 폭약 성능평가 결과분석

Bulk 폭약의 성능평가를 위하여 Bulk 폭약 7회, 카트리지 폭약 4회를 실시한 결과 각각에 대한 평균치를 검토한 결과는 표 2와 같다.

굴진율의 경우 Bulk 폭약이 카트리지 폭약에 비해 약 6% 증가율을 보였으나, 굴진율과 암반상태와는 상관성이 존재하여 절리가 많고 강도가 떨어지는 암반이 무결한 암반보다 발파효율이 상대적으로 좋게 나타나는 현상을 보였으며, 상대적으로 강한 암반상태에서는 그 증가율이 10% 이상 차이가 나는 것으로 분석되었다.

표 2. Bulk 폭약과 카트리지 폭약의 성능비교

구분	Bulk 폭약 평균	카트리지 폭약 평균	증감률
굴진율	94%	89%	6% 증가
천공수	157hole	186 hole	16% 감소
비장약량	1.686(kg/m3)	1.290(kg/m3)	30% 증가
장약시간	1시간 1분	1시간 13분	16% 감소
H.C.F	65%	63%	3% 증가
비산거리	41.4m	38.7m	7% 증가
진동(200m 이격거리)	0.311	0.227	37% 증가

표 3. 순위합 통계량 및 검정 통계량

구분		N	평균순위	순위합	Mann-Whitney의 U	유의확률
굴진율	Bulk	4	4.50	18.0	0.0	0.049
	카트리지	2	1.50	3.00		
천공수	Bulk	7	4.00	28.0	0.0	0.007
	카트리지	4	9.50	38.0		
비장약량	Bulk	7	8.00	56.0	0.0	0.008
	카트리지	4	2.50	10.0		
장약시간	Bulk	7	4.43	31.0	3.0	0.033
	카트리지	4	8.75	35.0		
H.C.F	Bulk	7	6.36	44.5	11.5	0.636
	카트리지	4	5.38	21.5		
비산거리	Bulk	7	6.21	43.5	21.5	0.776
	카트리지	4	5.63	22.5		
진동	Bulk	7	7.00	49.0	7.0	0.186
	카트리지	4	4.25	17.0		

한편, 천공수와 장약시간은 각각 16%정도 감소하였고 비산거리, H.C.F, 비장약량, 진동은 7%, 3%, 30%, 37%가 증가하였다. 이러한 결과들이 통계적으로 얼마나 유의한 값을 가지고 있는지 확인하기 위하여 3.2절에서 제시한 비모수적인 통계기법을 이용하여 분석한 결과를 표 3에 제시하였다.

Bulk 폭약 집단과 카트리지 폭약 집단에 대한

Mann-Whitney Test를 통한 동질성 검정을 한 결과 유의확률을 0.05로 하였을 때, 유의한 차이를 보이는 요소들은 굴진율, 천공수, 장약량, 장약시간 이었고, 그 외의 H.C.F, 비산거리, 진동 등의 경우에는 유의한 차이를 보이지 않았다.

다시 말해 Bulk 폭약을 사용함으로써 해서 기존의 카트리지 폭약보다 굴진율과 장약량은 증가하고 천

공수와 장약시간이 감소한다는 것이 통계적으로 유의하며 H.C.F, 비산거리, 진동 등의 경우에는 사용 폭약 종류에 따른 결과 값이 상호간에 유의할 만한 차이가 없는 것으로 판단된다. 유의한 차이를 보이는 요소를 중심으로 하여 터널 굴착시 **良**의 효과와 **冚**의 효과로 나누어 그림 5에 도시하였다.

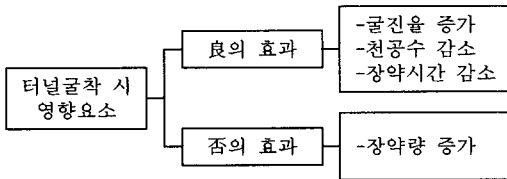


그림 5. Bulk 폭약을 이용한 터널 굴착시 효과

터널 굴착시 Bulk폭약을 사용함으로써 얻을 수 있는 효과중 긍정적인 효과로는 굴진율의 증가, 천공수의 감소, 장약시간의 감소 등을 들 수 있는데, 이는 적은 시간을 들여 최대한의 효과를 거둘 수 있음을 단적으로 말해주고 있다. 한편, 부정적인 효과로는 장약량의 증가를 들 수 있는데, 이는 밀장진을 해야 하는 Bulk 폭약의 특성상 불가피한 현상이며 기존의 카트리지폭약 보다 저렴한 비용이 소요되므로 경제적인 면에서는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 상기와 같은 이유로 하여 당 현장에서는 기존의 카트리지 폭약으로 설계되었던 원설계를 Bulk 폭약으로 설계변경하여 시공에 적용하고 있다.

### 5. 결 론

본 시공사례는 사패산 터널에서 굴진효율 증대를 위하여 적용 중에 있는 Bulk 폭약의 성능 평가를 실시하여 현장에 적용하였으며 이를 요약하면 다음과 같다.

- 1) Bulk 폭약과 카트리지 폭약의 성능을 비교평가하기 위하여 시험발파를 하여 그 결과를 비모수적인 통계기법을 이용하여 분석하였다.
- 2) 천공수와 장약시간은 각각 16%정도 감소하였고 굴진율, 비산거리, 비산거리, H.C.F, 비장약량, 진

동은 각각 6%, 7%, 3%, 30%, 37%가 증가하였다.

- 3) Bulk 폭약과 카트리지 폭약에 대한 Mann-Whitney Test를 통한 동질성 검정을 한 결과 유의한 차이를 보이는 요소들은 굴진율, 천공수, 장약량, 장약시간 이었고, 그 외의 H.C.F, 비산거리, 진동 등의 경우에는 유의한 차이를 보이지 않았다.
- 4) 터널 굴착시 Bulk폭약을 사용함으로써 얻을 수 있는 효과 중 긍정적인 효과로는 굴진율의 증가, 천공수의 감소, 장약시간의 감소 등의 효과가 있어, 기존의 카트리지 폭약으로 설계되었던 원설계를 Bulk 폭약으로 설계변경하여 시공에 적용하고 있다.

### 참 고 문 헌

1. LG건설(주), 2003, 사패산터널 공기단축 방안 검토보고서.
2. 송문섭, 박창순, 이정진, 2003, 비모수통계학, 자유아카데미, pp. 81-124.
3. 기경철, 김일중, 2002, 産學人을 위한 발파공학, 동화기술, pp. 162-171.