대단면 장대터널의 공기단축 시공사례

글 | **김창수** | 토목기술부 과장 | 전화 02-3433-7767 E-mail : conshot@ssyenc.com

대단면 장대터널이란 3차선(폭 15m) 이상으로 연장 1km 이상의 터널을 말하는 것으로, 최근 들어 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 자료 축적이 이루어져 왔으나, 3차선 이상의 대단면 터널에서는 아직 표준화된 굴착방법과 더불어 시공사례 또한 매우 적은 것이 현실이다. 특히, 공사기간에 맞추어 대단면 장대터널을 시공하기 위해서는 시공시 안정성 뿐만 아니라 시공성, 경제성을 확보할 수 있는 방안이 요구된다.

1 서 론

대단면 장대터널이란 3차선(폭 15m) 이상으로 연장 1km 이상의 터널을 말하는 것으로 최근 들어 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 자료축척이 이루어져 왔으나, 3차선 이상의 대단면 터널에서는 아직 표준화된 굴착방법과 더불어 시공사례 또한 매우 적은 것이 현실이다. 특히, 공사기간에 맞추어 대단면 장대터널을 시공하기 위해서는 시공시 안정성 뿐만 아니라 시공성, 경제성을 확보할 수 있는 방안이 요구된다.

본고에서는 대단면 장대터널 시공시 안정성을 확보하고 공기를 단축할 수 있는 방안에 대해 실 시공사례를 통해서 알아보고자 한다.

2 Bulk 폭약을 이용한 굴진효율 개선

2-1. Bulk 폭약 개선

Bulk 폭약은 폭약을 포장하지 않은 상태에서 기계화 장전시스템을 이용하여 직접 장약을 하는 에멀젼계 폭약을 말하며, 성분은 Emulsion계 폭약의 성분인 질산암모늄(NH_4O_3)과 대부분 동일하다. 현장에서 사용된 Bulk 폭약의 특성치는 〈표 1〉과 같고 제품 규격은 Brrel 당 300kg이다.

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.

〈표 1〉 Bulk 폭약의 제품성능

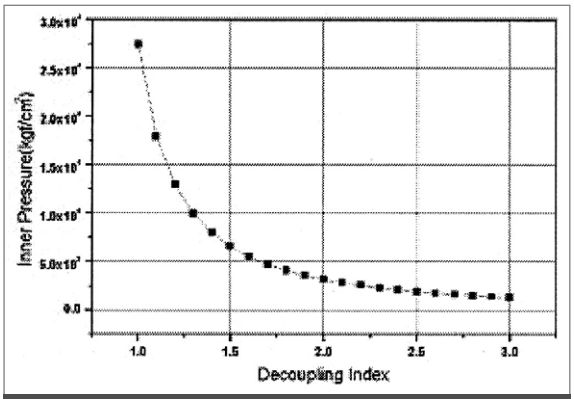
폭속(cm/sec)	5,500
가비중(g/cc)	1.20-1.25
폭발열(Kcal/kg)	690
낙추감도(cm)	100
가스량(ℓ /kg)	976
내한성(℃)	-20
내수성	최우수

2-2. Decoupling 효과

Decoupling이란 장약 공벽과 폭약 사이에 공간을 취하는 것을 총칭하는 것으로서 발파공 지름에 비하여 훨씬 적은 지름의 폭약을 장전하여 발파공 내벽 사이에 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 Ps과의 관계를 [그림 1]에 도시하였다.

$$Decoupling\,Index(D.I.) = \frac{\text{발파공의 직경}}{\text{폭약의 직경}} \qquad (1)$$



[그림 1] 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.

2-3. 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 system등의 암반분류를 실시하였으며, 암반상태에 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 효용성을 비교하기 위하여 Mann-Whitney Test를 적용하여 차이에 대한 유의성을 확인하였다. Mann-Whitney U-통계량은 식(2)와 같이 정의할 수 있다.

$$U = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\psi_{ij} \qquad (2)$$

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

이 통계량은 모든 관측값에 대한 관계식 $\{Y_j > X_i\}$을 만족하는 쌍의 개수를 나타낸다. 유의수준 α에서 Mann-Whitney U-통계량을 사용한 검정 절차는 다음과 같다.

(i) $H_1 : \Delta > 0$ 일때,

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

(ii) $H_1 : \Delta < 0$ 일때,

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

H_0 를 기각

(iii) $H_1 : \Delta \neq 0$ 일때,

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

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

H_0 를 기각

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

2-4. Bulk 폭약 성능평가 결과분석

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

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 3-2에서 제시한 비모수적인 통계기법을 이용하여 분석한 결과를 〈표 3〉에 제시하였다.

〈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/m^3)	1,290(kg/m^3)	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		

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, 장약시간이었고, 그 외의 H.C.F, 비산거리, 진동 등의 경우에는 유의한 차이를 보이지 않았다.

다시 말해 Bulk 폭약을 사용함으로 해서 기존의 카트리지 폭약보다 굴진율과 장약량은 증가하고 천공수와 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 否의 효과로 나누어 [그림 2]에 도시하였다.

터널 굴착시 Bulk 폭약을 사용함으로 얻을 수 있는 효과 중 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 밀장전을 해야 하는 Bulk 폭약의 특성상 불가피한 현상이며 기존의 카트리지폭약 보다 저렴한 비용이 소요되므로 경제적인 면에서는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된

[그림 2] Bulk 폭약을 이용한 터널 굴착시 효과

다. 상기와 같은 이유로 하여 실시공시 현장에서 기존의 카트리지 폭약으로 설계되었던 원설계를 Bulk 폭약으로 설계 변경하여 시공에 적용하였다.

2-5. 소결

벌크폭약을 이용한 대단면 장대 터널의 시공사례를 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, 진동은 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, 장약시간이었고, 그 외의 H.C.F, 비산거리, 진동 등의 경우에는 유의한 차이를 보이지 않았다.

4) 터널 굴착시 Bulk 폭약을 사용함으로 얻을 수 있는 효과 중 긍정적인 효과로는 굴진율의 증가, 천공수의 감소, 장약시간의 감소 등의 효과가 있었다.

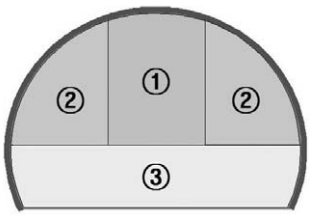
3 굴착공법 개선을 통한 공기단축

당초 설계시 터널 상부단면 굴착시에 1차적으로 중앙부를 발파한 후 버럭을 처리하고 2차로 측벽부 발파 및 버럭을 처리하여 완전히 관통한 후 터널 하부 단면을 추후 굴착하는 것으로 계획된 대단면 터널의 굴착공법을 공기단축을 위하여 상반 전단면 굴착 및 피난연락갱을 이용한 하반 굴착으로 변경한 시공사례로서, 변경된 굴착공법은 상부 전단면을 일시에 발파하고, 하반은 상반의 굴착이 진행됨에 따라 일정거리를 두고 굴착하는 방법으로 상, 하반을 동시에 굴착하면서 장비의 상호 간섭을 배제하여 공기를 줄일 수 있는 방법이다.

굴착공법 변경으로 터널의 단면이 확대됨에 따라 발생한 터널의 안정성에 대한 문제는 굴착전 3차원 FEM 해석을 통한 검증, 굴착 중 TSP 탐사 및 컴퓨터 제어 점보드릴을 이용한 막장 전방 예측, 굴착 후 Face mapping 및 계측관리 등을 통해서 해결할 수 있었다.

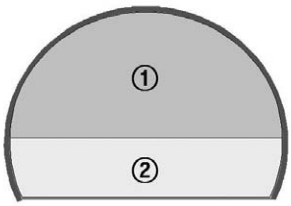
〈표 4〉 굴착단면 변경 사례(지보패턴 3 Type 기준)

당초 단면



- 발파단면 분할 : 4분할
- 중앙 상부 굴착 후 좌우상반 굴착
- 공정복잡, 시공 어려움

변경후 단면



- 발파단면 분할 : 2분할
- 상반 전단면 굴착
- 공정이 간단, 시공성 개선

피난연락갱을 이용한 시공방법은 하부 굴착을 위한 공기를 단축할 수 있으며, 가설 벽체 등을 이용하여 콘크리트 라이닝의 병행타설이 가능하여 또 다른 공기단축 효과를 기대할 수 있다.

품질에 영향이 없다면 발파작업과 동시에 콘크리트 라이닝을 동시에 시공하는 것은 공기단축과 공사비 절감에 큰 도움을 줄 수 있다.

[그림 3]은 하단의 굴착계획 평면도이다. 그림에서 보는 것과 같이 현장에서는 피난연락갱을 시공한 후 한 쪽 방향으로만 장비의 진출입을 허용하고 다른 쪽 방향에서는 양 방향에서 하단을 굴착한다.

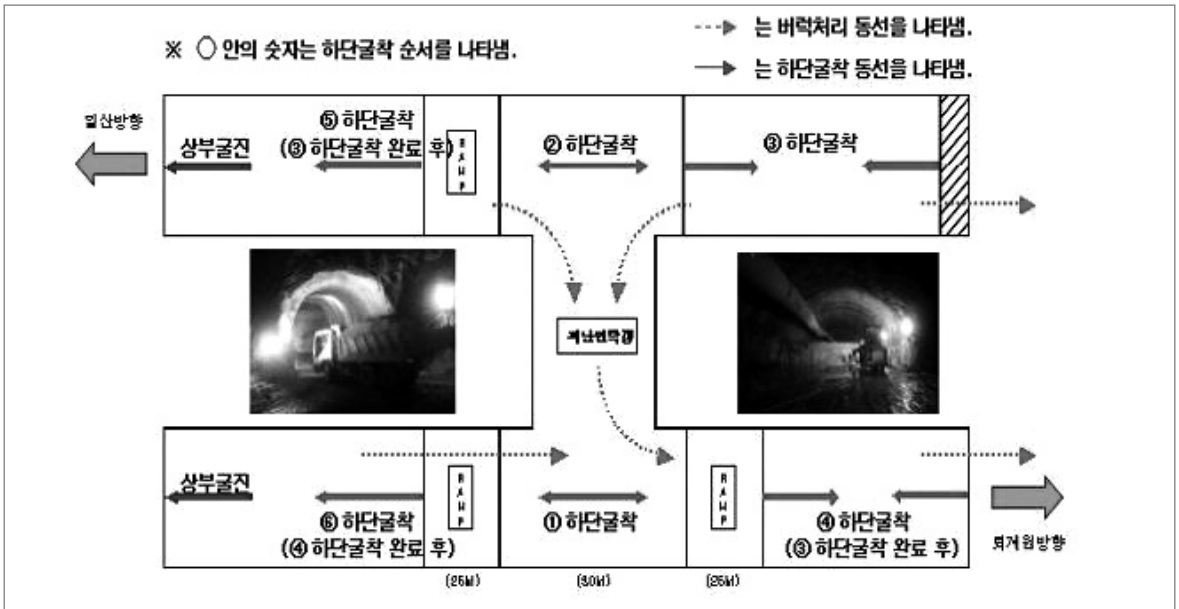
상행선의 하단 굴착이 마무리되면, 상행선 방향으로의 장비 진출입을 허용하고, 하행선방향의 양 방향에서 하단을 굴착할 수 있다. 이러한 시공 방법은 상단의 굴착에 큰 영향을 주지 않기 때문에, 공기 단축의 효과를 기대할 수 있다.

일반적으로 국내의 도로터널 공사에 있어서는 공동구 및 콘크리트 라이닝과 같은 콘크리트 구조물의 시공은 터널 내부 굴착을 완료한 후 이루어져 왔는데, 이것은 발파작업에서 발생하는 발파진동이나 폭풍압이 콘크리트 라이닝에 균열을 발생시키거나 강도를 저하시킬 수 있기 때문이다. 그러나 장대터널의 특성상 터널 굴착이 완료된 후 콘크리트 라이닝 작업이 시작되면 공기가 지연될 수밖에 없다.

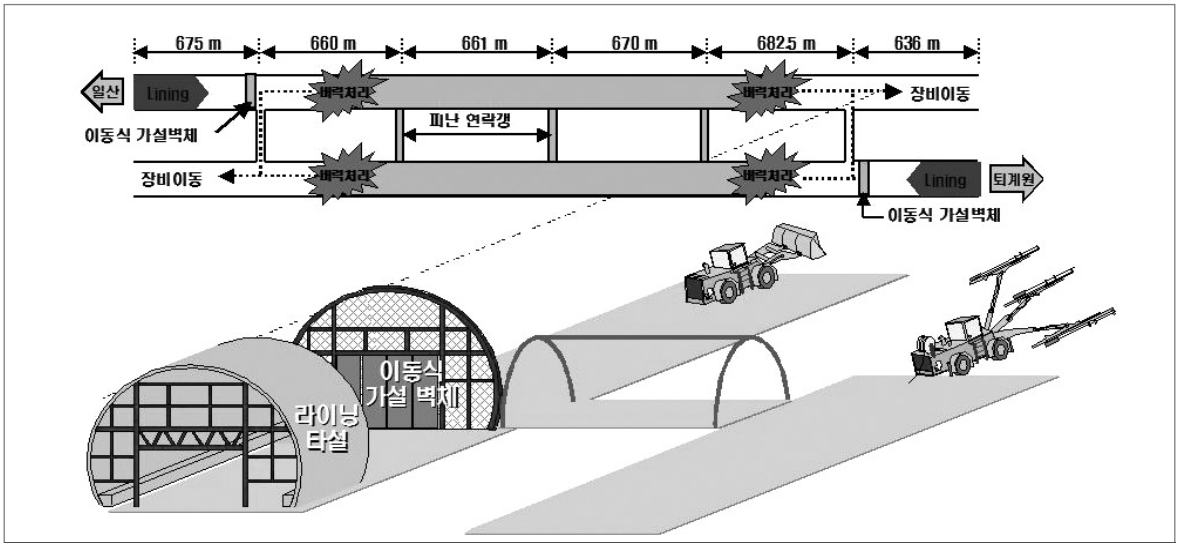
따라서 공기단축을 위해서 하반굴착이 완료된 구간에서 라이닝 콘크리트를 병행하여 시공하는 방안이 검토되었고, 이동식 가설 벽체 등을 이용하여 한쪽 터널을 차단한 후 차단된 터널 밖에서 동시에 라이닝을 시공하였다.

이 때 발파진동 영향에 의한 타설 중인 라이닝의 안정성 확보를 위해 국내외 기준, 기존 연구사례 등을 이용하여 콘크리트 라이닝에 영향을 미치지 않는 허용 진동 한계치를 설정한 후, 터널 발파시 진동 데이터의 회귀분석을 통한 진동추정식을 이용하여 구조물의 최소발파 영향거리를 분석하였다.

본 현장에서는 타설 중 구조물의 안정성 확보 최소치인 0.63 Kine 기준을 적용하였을 경우, 본 현장 피난연락갱 사이 최소 거리가 675m 이상이므로 라이닝 구조물의 안정성에는 영향이 없는 것으로 검토되었다.



[그림 3] 하단 굴착계획 평면도



[그림 4] 라이닝 동시타설 시공 개요도

4 결 론

이상과 같이 대단면 장대터널에서 공기단축을 위해 실제로 적용된 사례에 대해서 알아보았다.

1) 천공장 증가에 따른 굴진효율 및 시공성 향상을 위하여 Bulk-Emulsion 폭약을 적용하고, 심발 패턴을 기존의 V-Cut에서 Cylinder-Cut으로 변경하였다.

2) 상반 3분할~5분할의 분할 굴착방법을 상반 전단면 굴착으로 변경하였고, 피난연락갱을 이용한 양방향 굴착 및 라이닝 동시타설을 적용한 사례로서 굴진장 증대에 따른 시공 중 터널막장의 안정성을 확보하기 위하여 점보드릴을 이용한 막장전방 예측을 실시하였다.

시공사례를 통해 최근 늘어나고 있는 장대터널 시공시 기 적용된 방식에 대해 분석하고 검증하여 벤치마킹함으로써 당사의 기술력을 더욱 견고히 하는 계기가 되었으면 한다.

참고문헌

1. 서울외곽순환 고속도로(벽제~퇴계원간) 건설공사 터널보고서, 2000
2. 대단면 터널에서의 최적 발파 굴진 시스템 개발, 2004, 터널공학회
3. 사패산터널 공기단축 방안 검토보고서, 2003, LG건설(주)
4. 사패산터널 TSP탐사 보고서(1차~6차), 2004, LG건설(주)