

대단면 장대터널 공기단축 사례연구

노상림^{1)*}, 노승환²⁾, 이상필³⁾, 김문호⁴⁾, 서정우⁵⁾

A Case Study of Minimizing Construction Time in Long and Large Twin Tube Tunnel

Sang-Lim No, Seung-Hwan Noh, Sang-Pil Lee, Moon-Ho Kim, Jung-Woo Seo

Abstract The Sapaesan tunnel, the longest twin tube tunnel (4km) in Korea with 4 lanes each, is under construction with two years of delayed schedule because of the strong opposition from environmental bodies. Therefore, maximizing the construction efficiency was needed in tunnel project to compensate for time delay. This study includes improvements in the construction of the Sapaesan tunnel such as increasing excavation length and changing excavation sequence. In this paper the system for predicting tunnel face ahead is also introduced. Bulk-Emulsion explosive and Cylinder-Cut method were adopted in tunnel blasting to increase the excavation length. Optimum tunnel excavation step was designed to make up delayed time. Tunnel face mapping, TSP survey and geological prediction system using computerized jumbo-drill were performed for safe construction of long and large twin tube tunnel.

KeyWords Bulk-emulsion explosive, Cylinder-cut, Face mapping, TSP survey

초 록 우리나라의 4차로 도로터널 중 가장 긴 약 4km의 병설 터널인 사패산터널은 환경단체의 민원에 의해 당초보다 약 2년 정도 공사가 지연되어 공사 기간을 단축하기 위한 시공 효율 극대화가 절실히 요구되었다. 본 고는 공기단축을 위해 적용된 사패산 터널의 굴진장 증대 방안, 굴착 공법 개선 방법, 그리고 막장전방 예측 시스템에 대한 사례 연구이다. 터널의 굴진장을 증대시키기 위해 Bulk-emulsion 폭약과 Cylinder-cut 심발패턴이 도입 되었고, 터널 굴착 단면의 변경 및 최적의 굴착 순서 계획을 통해서 공사기간을 단축할 수 있었다. 또한 대단면 터널의 안전한 시공을 위해서 막장관찰, TSP 탐사 및 고성능 천공장비를 이용한 막장전방 예측 System을 적용하였다.

핵심어 벌크폭약, Cylinder-cut 심발패턴, 막장관찰, TSP 탐사

1. 서 론

서울외곽순환고속도로는 서울의 외곽지역을 환형으로 연결하는 왕복 8차선 도로로서 현재 남측구간 93.7km는 완공되어 공용 중에 있으며, 북측구간인 일산~퇴계원 36.3km 구간은 2008년 6월 개통 예정으로 공사가 진행 중에 있다. 이 중 사패산 터널은 북한산

국립공원을 관통하는 것으로 계획되어, 2001년 6월 착공 후 각 계의 민원 때문에 5개월 뒤인 11월부터 공사가 중지되었으며, 정부의 중재 노력에도 불구하고 장기간의 공사중단에 따른 물류비의 증가로 약 5,400억원에 이르는 사회적 손실비용이 발생하였다. 이 후 2003년 12월 정부와 종교계의 극적인 타결로 공사가 재개된 이후 당초보다 2년이 늦춰진 공기를 단축시키기 위해 굴진장 증대, 굴착공법 개선 등의 활동을 통하여 시공이 이루어지고 있다.

본 시공사례에서는 대단면 터널의 굴진장 증대를 위해 사용한 Bulk-emulsion 폭약과 Cylinder-cut 공법, 굴착공법 개선을 위해 실시된 상하반 동시굴착, 횡경을 이용한 시공방법, 터널의 안정성 확보 방안으로 실시된 TSP 탐사 및 고성능 컴퓨터 제어 점보드릴을 이용한 막장전방 예측사례 등을 소개하고자 한다.

¹⁾ 현재 GS건설(주) 기술본부 지하공간팀 과장

²⁾ 현재 GS건설(주) 기술본부 지하공간팀 사원

³⁾ 현재 GS건설(주) 기술본부 지하공간팀 팀장

⁴⁾ 현재 GS건설(주) 토목사업본부 서울외곽순환고속도로 4공구 현장소장

⁵⁾ 현재 GS건설(주) 기술본부 토목기술담당 상무

* 교신저자 : slno@gsconst.co.kr

접수일: 2005년 6월 1일

심사 완료일: 2005년 6월 21일

2. 공사 개요

사패산터널은 경기도 양주시 장흥면과 의정부시 호원동을 연결하는 폭 18.770m, 높이10.497m(굴착단면 기준)의 대단면 도로터널로 4차로 터널로서는 국내 최장이며, 서울외곽순환(일산~퇴계원) 고속도로 민간투자 시설 사업 건설공사 4공구에 속해있다(Fig. 1).

터널의 연장은 일산방향 3,993m, 퇴계원방향 3,997m이다. 갱문형식은 원통절개식과 갱구조형물로 이루어져 있고, 부대시설로는 피난연락갱 5개소와 비상주차대 12개소가 있다. 환기방식은 Jet fan(Φ1,530mm) 30기와 전기집진기실 3개소로 구성되어 있다. 사패산 터널의 표준단면도는 Fig. 2와 같다.

노선구간의 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 돌출부의 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 류라기에 이를 관입한 흑운모 화강암으로 대별할 수 있으며 그 외 암맥류와 충적층 등으로 구분된다(Fig. 3).

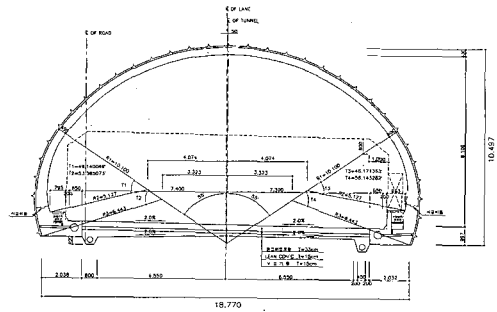


Fig. 2. Standard tunnel section

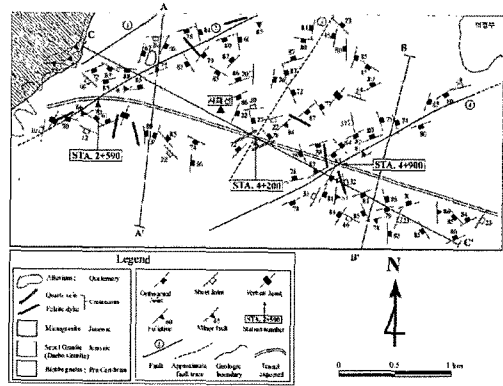


Fig. 3. Geological map

3. 공기단축 방안 검토

사패산 터널은 현재 공기단축을 위하여 굴진장 증대

와 굴착공법 개선 등 다양한 형태의 개선 사항을 통하여 시공중에 있다. 발파효율 증대를 위하여 Bulk-em-

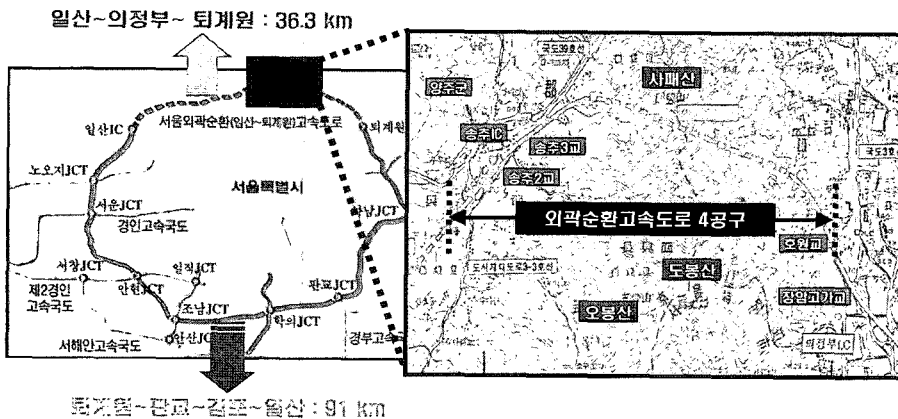


Fig. 1. Line map of project & location of the Sapaesan tunnel

Table 1. Efficiency comparison of bulk explosive & cartridge explosive(2004.7)

구분	Bulk 폭약 평균	카트리지 폭약 평균	증감률
굴진율	95%	89%	6% 증가
천공수	157 hole	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%	2% 증가
비산거리	41.4m	38.7m	7% 증가
진동(200m 이격거리)	0.311 cm/sec	0.227 cm/sec	37% 증가
파쇄입도(P ₅₀ size)	19cm	25cm	24% 감소

* H.C.F(Half Cast Factor) = $\frac{\text{남아있는천공흔적길이의 합}}{\text{실제천공된길이}} \times 100(\%)$

Table 2. Specifications of bulk explosive

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

ulsion 폭약과 Cylinder-cut을 사용하였고, 상하반 동시 굴착, 횡경을 이용한 굴착 등을 통하여 굴착공법을 개선하였다. 또한 안전 시공을 위하여 단층파쇄대나 연약 대가 예상되는 구간에서 총 6차례의 TSP 탐사가 실시되었고, 고성능 컴퓨터 제어 점보드릴을 이용하여 막장 전방을 예측하였다.

3.1 굴진장 증대

먼저 터널의 굴진장 증가에 대한 안정성을 분석하고자 원 설계 굴진장과 장공 굴진장에 대해 PENTAGON 3D를 이용하여 3차원 전산해석을 실시하였으며, 그 결과에 따라 지보패턴 I, II, III Type에 대한 1회 굴진장을 원 설계 대비 1.0~1.5m 증대하였고, 지보패턴 IV, V, VI Type은 기존의 원설계대로 굴진하였다.

일반적으로 장공굴진을 할 경우 천공장 증가에 따른 굴진율의 저하 및 장약량 증가에 따른 소음, 진동 등의 문제가 예상된다. 이러한 문제점을 해결하고자 원설계상의 일반폭약(cartridge-type) 대신 Bulk-emulsion 폭약의 적용성을 확인하였다. 시험발파를 통하여 그 효율성을 비교 분석한 결과(Table 1) 장약밀도의 증가로 굴진율이 향상 되었다. 특히 4m 이상의 장공굴진에 대해서는 Bulk-emulsion 폭약이 기존의 카트리지 폭약에 비해 굴진율이 약 15% 증가하였다. 한편 굴진율 증대 이외에도 천공수 및 장약시간의 감소에 따른 공기단축 효과가 있어 당 현장에서는 Bulk-emulsion 폭약으로 설계 변경하여 시공에 적용하였다.

Bulk-emulsion 폭약이란 포장하지 않은 상태에서 기계화 장전 시스템을 이용하여 직접 장약공으로 주입되는 에멀전계 폭약을 말하며 벌크 폭약의 성분은 Slurry 폭약이나 Emulsion 폭약의 성분과 동일한 질산암모늄(NH₄NO₃) 계열로 이루어져 있다. 벌크 폭약은 불폭성 물질의 화합물로서 매우 둔감하여 Booster(카트리지형 Emulsion이나 Dynamite) 없이는 기폭하지 않으므로 높은 안정성을 가지고 있으며, 장약공 내 100% 밀장전이 가능하여 장전밀도의 증가에 따른 폭발 에너지 향상으로 굴진효율이 증가하고 효과적인 파쇄와 고장전밀도에 따른 천공수 감소로 공기단축 효과를 기대할 수 있다. 기존의 카트리지형 폭약을 사용할 경우에는 천공경과 약경의 차이로 인해 형성된 공간에 의해 폭약이 폭발할 때 발생하는 충격압이 공기층의 폭굉 Impedance 차이에 의해 감쇠되며, 가스압은 장약공 내 체적의 영향을 받아 작아지기 때문에 벌크 폭약에 비해 굴진율이 상대적으로 낮게 나타난다. 벌크 폭약은 장전 밀도의 증가에 따른 발파 진동 및 소음이 증가하는 단점을 가지고 있으나, 기계화 장전 시스템을 이용하여 Emulsion matrix 내 미세 Bubble을 형성하므로 부분별 폭약 밀도 조절이 가능하다. 본 현장에서 적용한 Bulk-emulsion의 장약량은 천공장 4.5m를 기준으로 심발공과 바닥공은 3.0m를 장전하여 장전밀도는 약 1.27 kg/m 였고, 그 외 확대공 부분은 최대 2.8m를 장전하여 장전밀도는 약 1.19 kg/m 였다. 저밀도 폭약을 사용하여 폭발 위력을 저감할 필요가 있는 최외곽 공열(S·B공열)에는 Bulk-

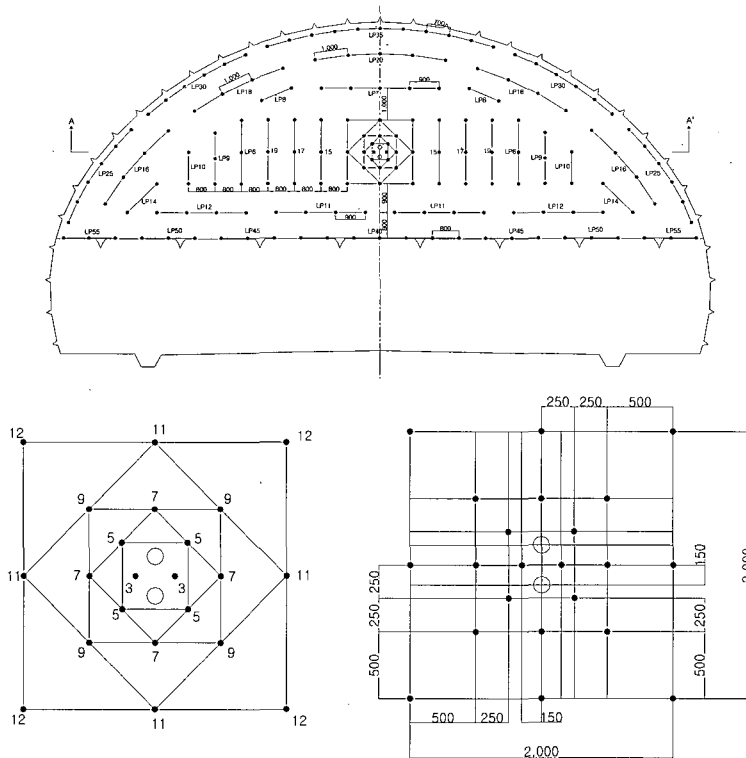


Fig. 4. Drilling & firing pattern of cylinder-cut

Table 3. Modification of tunnel excavation sequence

구분	당초	변경
	지보패턴 3 Type 기준	지보패턴 3 Type 기준
단면		
비고	-발파단면 분할 : 4분할 -중앙 상부 굴착후 좌우상반 굴착 -공경이 복잡하고, 시공이 어려움	-발파단면 분할 : 2분할 -상반 전단면 굴착 -공경이 간단하고, 시공성 개선됨

emulsion을 사용하지 않고 정밀폭약으로 대체하여 장약 밀도를 0.26 kg/m까지 낮추어서 발파를 시행하였다. 당 현장에서 사용된 Bulk-emulsion 폭약의 특성치는 Table 2와 같다.

기존의 카트리지 폭약을 Bulk-emulsion 폭약으로 설계 변경하여 시공함에 따라 심발패턴을 Cylinder-cut으로 변경하여 적용하였다. Cylinder-cut은 일반적으로 1회 발파당 굴진장이 2m 이상인 양호한 암질(암반등급

1, 2, 3 등급)에서 기존의 경사 심발공법에 비해 높은 굴진 효율을 얻을 수 있다. 본 현장에서는 천공시간 단축 및 발파효율성을 고려하여 직경 127mm인 2개의 무장약공을 직렬로 배치하였다. 직경 127mm의 무장약공은 102mm 무장약공에 비해 약 55%의 자유면 증대효과를 갖는다. 변경된 심발패턴은 기존 경사공 천공패턴과 비교하여 총 장약량 및 총 천공수에서 큰 변화가 없다. 변경된 심발패턴의 발파패턴도는 Fig. 4와 같다.

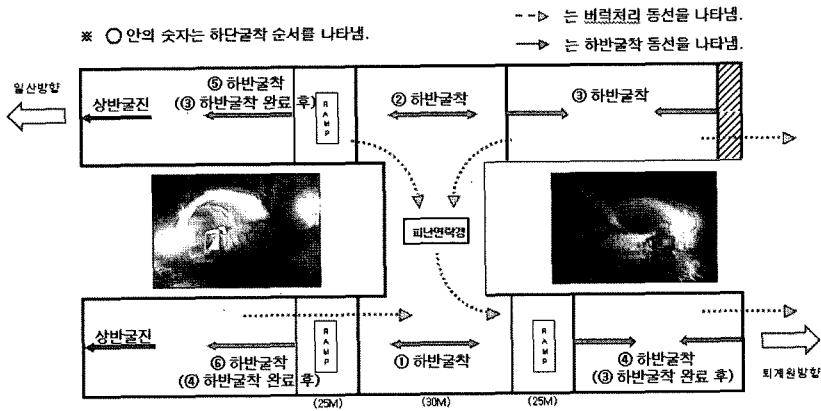


Fig. 5. Excavation plan for lower side of tunnel

Bulk-emulsion 폭약과 Cylinder-cut을 이용하여 장공 굴진을 실시할 경우 천공 길이의 증가 및 폭약량의 증가에 따라 터널 최외곽공의 여굴 관리에 문제점이 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 당 현장에서는 발파패턴 입력에 의하여 자동 착점 및 천공이 가능하여 천공각도를 최소화 시킬 수 있는 전자동 천공장비를 도입하여 여굴량을 감소시키고 있다. 본 현장에서 지보패턴 II Type 20m 구간에서 숏크리트 3차 마감면의 내공측량 데이터를 활용하여 여굴량을 산출한 결과 전자동 천공장비를 이용하는 경우 단위 m당 여굴량이 0.684m³으로 기존 2.247m³에 비해 약 70% 정도 감소하였다.

3.2 굴착공법 개선

원설계시 굴착공법은 터널 상부단면 굴착시에 1차적으로 중앙부를 발파한 후 버력을 처리하고 2차로 측벽부 발파 및 버력을 처리하여 완전히 관통한 후 터널 하부단면을 추후 굴착하는 것으로 계획되어 있었다. 하지만 공기단축을 위하여 상부 전단면 굴착 및 피난연락갱을 이용한 하반 굴착이 계획되었다(Table 3). 변경된 굴착공법은 상부 전단면을 일시에 발파하고, 하반은 상반의 굴착이 진행됨에 따라 일정 거리를 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 굴착 전 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.

피난연락갱을 이용한 시공방법으로 하부 굴착을 위한

공기를 단축할 수 있으며, 가설 벽체 등을 이용하여 콘크리트 라이닝의 병행타설이 가능하여 또다른 공기단축 효과를 기대할 수 있다. 품질에 영향이 없다면 발파 작업과 동시에 콘크리트 라이닝을 동시에 시공하는 것은 공기단축과 공사비 절감에 큰 도움을 줄 수 있다.

Fig. 5는 하반의 굴착계획 평면도이다. 그림에서 보는 것과 같이 본 현장에서는 피난연락갱을 시공한 후 한쪽 방향(퇴계원 방향)으로만 장비의 진출입을 허용하고 다른 쪽 방향(일산 방향)에서는 양 방향에서 하반을 굴착한다. 일산 방향의 하반 굴착이 마무리되면, 일산 방향으로의 장비 진출입을 허용하고, 퇴계원 방향의 양 방향에서 하반을 굴착할 수 있다. 이러한 시공 방법은 상반의 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 수 밖에 없다. 따라서 공기단축을 위해서 하반굴착이 완료된 구간에서 라이닝 콘크리트를 병행하여 시공하는 방안이 검토되었고, 이동식 가설벽체 등을 이용하여 한쪽 터널을 차단한 후 차단된 터널 밖에서 동시에 라이닝을 시공하는 방안을 계획하였다(Fig. 6). 이때 발파진동 영향에 의한 타설 중인 라이닝의 안정성 확보를 위해 국내의 기준, 기존 연구사례 등을 이용하여 콘크리트 라이닝에 영향을 미치지 않는 허용 진동 한계치를 설정한 후, 터널발파시 진동 데이터의 회귀분

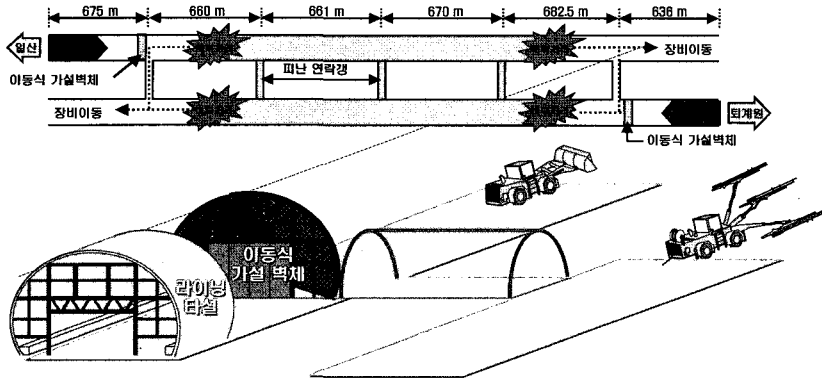


Fig. 6. Outline for concrete lining

석을 통한 진동추정식을 이용하여 구조물의 최소발파 영향거리를 분석하였다. 본 현장에서는 타설 중 구조물의 안정성 확보를 위하여 국내에서 검토된 기준 중 최소치인 0.63 cm/sec를 적용하였을 경우, 최소 영향 거리가 225m로 검토되었고, 본 현장 피난연락갱 사이 최소 거리가 675m 이상이므로 라이닝 구조물의 안정성에는 영향이 없는 것으로 판단되었다. 또한 진동 이외에 타설 중인 라이닝에 영향을 줄 수 있는 발파 후폭풍에 대한 검토도 진행 되었으며, 향후 하반 굴착이 완료된 구간에 대하여 라이닝 콘크리트를 굴착과 병행하여 시공할 예정에 있다.

3.3 막장전방 예측 System

굴진장 증대 및 굴착단면 변경 등에 따라 야기될 수 있는 터널의 안정성에 대한 문제를 해결하기 위해서 본 현장에서는 총 6차례의 TSP 탐사를 수행하였다. 시추 조사, 전기비저항 탐사 등을 통해 예측된 단층 파쇄대 지역, 계곡부 통과 구간, 선진수평 시추 결과 풍화 및 파쇄가 심한 연약층대 구간, 암질이 불량해지는 경향을 보인 집진기설 근접 구간 등에 대해 수행된 TSP 탐사를 통하여 육안확인이 불가능한 터널 전방의 암반특성 및 지질구조를 규명하고자 하였고, 그에 따른 지보방법 및 보조공법을 사전에 검토하였다.

TSP(Tunnel Seismic Prediction) 탐사는 탄성파의 특성을 이용하여 막장전방을 예측하는 탐사로 체적파인 P 파와 S파를 이용하여 지반의 물리적 특성치와 단층 및 파쇄대 등 불연속면을 탐지할 수 있다. 즉, 터널 막장전방 및 주변에 분포하는 이질 지층의 경계면 및 단층파쇄대와 같은 불연속면의 공간적 위치 및 경사, 경계면의 전후에 놓인 상대적 강성도 변화, 그리고 터널 주변 지반의 탄성특성치(탄성계수, 포아송비 등)와 같은 지

반의 성층구조 및 역학적 특성치에 대한 정보를 발진점(shot point)과 수신점(receiver point) 간의 거리를 달리 하여 얻어진 일련의 탄성과 시간 기록들을 개별적 또는 총체적으로 분석함으로써 추출할 수 있는 지반탐사 방법이다. 탐사 소요시간은 약 1시간 정도로 선진수평 시추 등 다른 탐사법에 비해 터널 공정에 미치는 영향이 작다. 또한 시스템에서 측정된 자료를 통합, 분석하여 막장전방 불연속면의 정보를 3차원으로 가시화할 수 있기 때문에 터널시공에 따른 막장전방 예측에 중요한 자료를 제공할 수 있다.

본 현장에서 수행한 TSP 탐사 결과 분석은 여러 가지 탄성과 분석법 중 심도구조보정법(Depth Migration Process)를 사용하였다. 심도구조보정법은 탄성과 단면상에 나타난 반사점이나 회절점들을 본래의 위치에 나타내도록 하는 처리 과정으로, 회절 곡선 상의 적분, 유한차분법의 이용, 파동장의 위상이동 하향연속, 영역 구조 보정 등 다양한 방법으로 수행된다.

Fig. 7은 선진수평 시추 결과 풍화 및 파쇄가 심한 약층대 구간에 대한 TSP 탐사를 실시하여 선진수평 시추 결과, TSP 탐사, Face mapping 자료를 비교한 결과이다. 선진수평시추와 TSP탐사로 확인된 파쇄대 위치가 거의 일치하는데다가 외부 지형상 계곡부에 위치하는

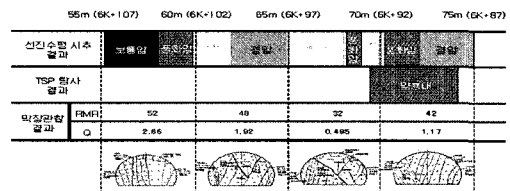


Fig. 7. Correlation among horizontal-drilling, TSP survey and face mapping

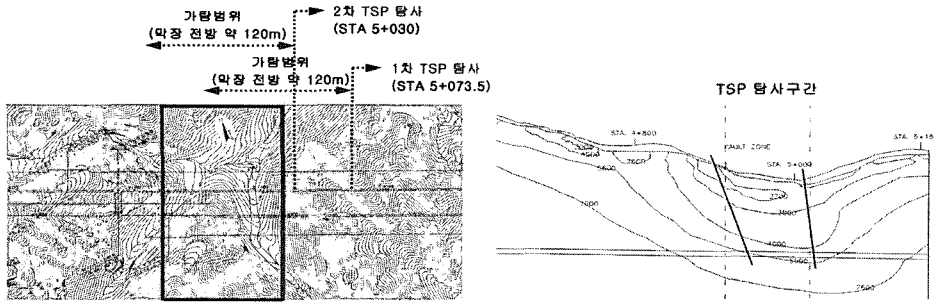


Fig. 8. Geological map and resistivity investigation of survey area

것으로 볼 때 조사결과는 비교적 정확한 것으로 판단되었다.

선진수평 시추는 굴착 전 전방을 예측할 수 있는 확실한 방법이지만, 시추공이 터널 단면에 비하여 극히 적어 한 개의 시추공으로 터널 전체를 풍화대 구간으로 추정하는 오류를 범할 수 있다. 또한 선진수평 시추로 파악된 풍화대의 주향이 터널의 진행방향과 거의 평행한 경우는 TSP 탐사를 통하여 풍화대를 파악할 수 없

다. TSP 탐사는 암질에 대한 정확한 정량적 데이터를 얻기 힘들다는 단점을 가지고 있지만, 전반적인 불량 암질구간을 파악할 수 있다는 장점이 있다. 결국 TSP 탐사를 통한 불량암질 지역의 위치를 파악한 후 Face mapping을 통하여 정확한 정량적 데이터를 얻는 방법이 가장 효율적일 것으로 판단된다.

Fig. 8은 계곡부의 단층 파쇄대로 예상된 구간에 대한 지질개요도 및 전기비저항탐사 단면도이고, Fig. 9는 2차례 TSP 탐사 결과 및 굴착이 진행되면서 실시된 이 구간에 대한 Face mapping 자료이다. TSP탐사로 예측된 불량암질 구간은 전기비저항 탐사 결과 저비저항이 상대의 단층 파쇄대로 예상한 구간보다 약 40m 전방으로 예측되었고, 2차례의 탐사 결과가 거의 일치하고 있다. 굴착 과정에서 TSP 탐사 결과와 거의 일치하는 약 40m 전방에서 단층 파쇄대가 출현하였고, 실제로 이 구간에서 썩기 형태의 소규모 낙반이 발생하여 지보패턴 III Type 구간이 IV, V Type으로 조정되기도 하였다.

한편 본 현장에서 사용 중인 고성능 컴퓨터 제어 점보드릴을 이용하여 막장전방 예측을 할 수 있다(Fig. 10). 고성능 컴퓨터 제어 점보드릴은 Cycle time에 전혀 영향을 주지 않는 상태로 천공구간에 대한 Drilling data를 획득할 수 있으나, 아직 국내 현실에 맞는 해석 기준이 제시 되어있지 않은 실정이다. 현재 굴진속도, 타격압력, 피드 압력, 로테이션 압력 등의 Drilling data를 해석에 이용하여 더욱 설득력 있는 막장전방 예측 방법 개발을 위한 검토가 이루어지고 있으며, 추후 보다 안전한 터널 시공을 위한 자료가 될 수 있을 것으로 사료된다.

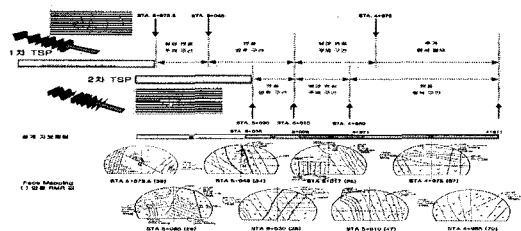


Fig. 9. Result of TSP survey and face mapping

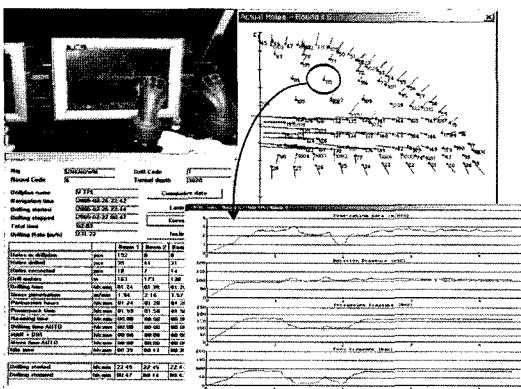


Fig. 10. Geological prediction with computerized jumbo-drill

4. 결 론

서울외곽순환고속도로 사패산 터널의 공기단축을 위한 시공사례에 대하여 기술하였으며, 다음과 같이 요약

할 수 있다.

- 1) 굴진장 증가를 위한 3차원 전산해석을 실시하였으며, 그 결과 지보패턴 I, II, III Type에 대한 1회 굴진장을 원 설계 대비 1.0~1.5m 증대하였고, 지보패턴 IV, V, VI Type은 기존의 원설계대로 굴진하였다.
- 2) 천공장 증가에 따른 굴진효율 및 시공성 향상을 위하여 Bulk-emulsion 폭약을 적용하였고, 심발패턴을 기존의 V-cut에서 Cylinder-cut으로 변경하였다. 4m 이상의 장공발파에서는 기존의 카트리지 폭약에 비하여 Bulk-emulsion 폭약이 밀장전 등의 효과로 굴진율이 10% 이상 증가하였다.
- 3) 상반 3분할~5분할의 분할 굴착으로 설계 되어 있으나, 이를 상반 전단면 굴착으로 변경하였고, 피난 연락갱을 이용한 양방향 굴착 및 라이닝 동시 타설을 적용하였다.

- 4) 굴진장 증대에 따른 시공 중 터널막장의 안정성을 확보하기 위하여 막장관찰, 선진수평 시추, TSP 탐사 및 컴퓨터 점보드릴을 이용한 막장전방 예측을 실시하였다.

본 시공사례를 통하여 대단면 터널의 성공적인 급속 시공방법과 체계를 정립하고 신뢰성있는 데이터를 축적하는 것이 향후 과제로 남아있다.

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)
5. 장공발파 3차원 안정성 검토, 2004, LG건설(주)
6. 굴착방법 변경 안정성 검토, 2004, LG건설(주)

노 상 립



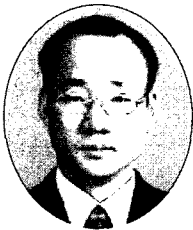
1996 인하대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1998 인하대학교 공과대학 자원공학과 공학석사
 2002 인하대학교 공과대학 자원공학과 공학박사
 Tel: 02-2005-9223
 E-mail: slno@gsconst.co.kr
 현재 GS건설(주) 기술본부 지하공간팀 과장

노 승 환



1999 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 2004 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 공학석사
 Tel: 02-2005-9227
 E-mail: shnoh@gsconst.co.kr
 현재 GS건설(주) 기술본부 지하공간팀 사원

이 상 필



1988 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1990 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학석사
 2005 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사수료
 Tel: 02-2005-9220
 E-mail: spllee@gsconst.co.kr
 현재 GS건설(주) 기술본부 지하공간팀 팀장

김 문 호



1981 연세대학교 공과대학 토목공학과 공학사
 현재 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 석사과정
 Tel: 031-829-8912
 E-mail: mhkim@gsconst.co.kr
 현재 GS건설(주) 토목사업본부 서울외곽순환고속도로 4공구 현장소장

서 정 우



1980 연세대학교 공과대학 토목공학과 공학사
 Tel: 02-2005-9104
 E-mail: jwseo@gsconst.co.kr
 현재 GS건설(주) 기술본부 토목기술담당 상무