

대단면 장대터널에서의 공기단축 시공사례

KIGEMA



김욱영, GS건설(주) 대리
노상림, GS건설(주) 과장

1. 서론

서울외곽순환고속도로는 서울의 외곽지역을 환형으로 연결하는 왕복 8차선 도로로서 현재 남측구간 91km는 완공되어 공용 중에 있으며, 북측구간인 일산~퇴계원 36km 중 사패산터널 구간을 제외한 구간은 부분 개통하여 현재 운행중에 있다. 서울북부인 의정부 및 일산지역의 순환고속도로로서의 완전한 교통기능을 찾기 위해서는 미개통구간인 사패산터널을 조기 관통하는 것이 매우 중요하다. 지금까지의 사패산 터널의 공사중지 및 공사재개 상황을 살펴보면, 당초 북한산 국립공원을 관통하는 것으로 계획되어 2001년 6월 착공 후 각 계의 민원 때문에 5개월 뒤인 11월부터 공사가 중지되었으며, 정부의 중재노력에도 불구하고 장기간의 공사중단에 따른 물류비의 증가로 약 5,400억원에 이르는 사회적 손실비용이 예상되었다. 이후 2003년 12월 정부와 종교계의 극적인 타결로 공사가 재개된 이후 당초보다 2년이 늦춰진 공기를 단축시키기 위해 굴진장 증대, 굴착공법 개선 등의 활동을 통하여 시공이 이루어졌으며 현재까지 성공적으로 굴착을 완료하여 2007년 12월 말 개통할 예정이다.

터널 굴착공기단축을 위하여 굴착공법을 변경하고 굴진장을

증대시켰으며, 새로운 형식의 폭약인 Bulk 폭약을 사용하였다. 또한 횡형을 이용한 동시굴착 및 대단면 터널의 급속시공에 따른 안정성 확보를 위하여 TSP 탐사 및 선진시추를 통한 막장전반 예측을 실시하였다. 본 고에서는 사패산 터널의 시공사례를 분석하여 대단면 장대터널에서의 효과적인 공기단축 공법을 소개하고자 한다.

2. 공사 개요

서울외곽순환고속도로는 급증하는 수도권 지역의 교통량 증가 및 신도시 건설에 따른 교통수용을 위하여 건설되었으며, 판교~퇴계원 간 33.1km 구간 중 하일~구리간 구간부터 1988년 2월에 착공하여 1991년 11월 개통하였고, 구리~퇴계원 간 구간은 1990년 8월 착공하여 1993년 12월 31일 개통하였다. 남부순환

표1. 서울외곽순환고속도로 구간별 현황

구간명	연장(km)	개통일
판교~퇴계원	33.1	'91.11.29
판교~일산	58.2	'99.11.26
일산~송추, 의정부~퇴계원	28.8	'06.6.30
송추~의정부	7.5	'07.12월 말 개통예정
계	127.6	

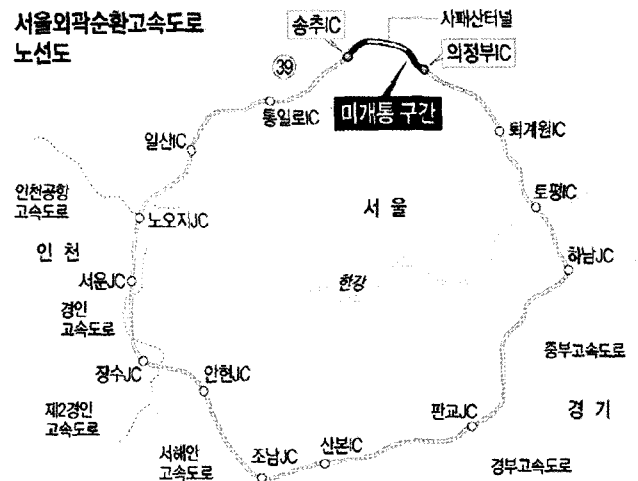


그림 1. 전체노선도 및 미개통 구간

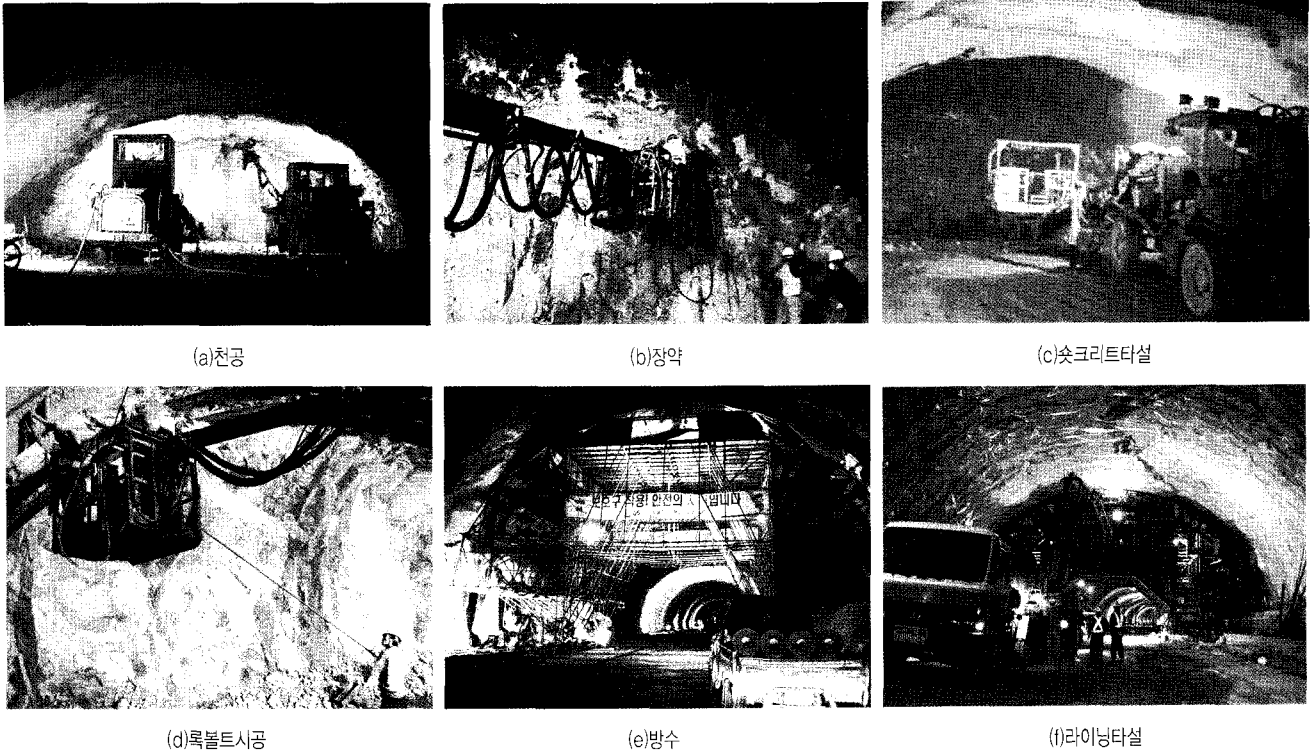


그림 2. 터널공종

도로는 경부고속도로의 판교분기점~안양~일산으로 이어지는 58.2km 구간의 왕복8차선 도로로, 1991년~1996년 10월 30일 판교~안양 간 15.9km를 시작으로 1999년 11월 26일에 완공되었다. 북부순환도로는 전체 36.3km로 이중 일산~송추, 의정부~퇴계원 구간은 2006년 6월 30일 개통하였다. 표 1과 그림 1에 보이는 바와 같이 현재 전체 127.6km의 노선중 7.5km에 달하는 사패산구간을 제외한 전구간이 현재 개통 운행중에 있으며, 미개통구간인 사패산 터널은 2007년 12월 말 개통 예정에 있다.

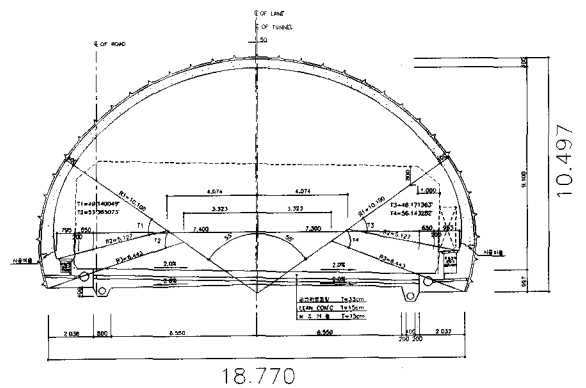


그림 3. 표준단면도

3. 시공현황

사패산터널 본선구간의 단면은 그림 3과 같다. 굴착폭원은 B 18.77m× H10.497m이며 굴착단면적은 170.04m²로 일반 도로터널에 비하여 단면규모가 크다.

터널의 연장은 일산방향 3,993m, 퇴계원방향 3,997m로 4차선 대단면 도로터널중 국내 최장의 터널이다. 갱문형식은 원통절개식과 갱구조형물로 이루어져 있고, 부대시설로는 피난연락 갱 5개소와 비상주차대 12개소가 있다. 환기방식은 Jet Fan(φ 1,530mm) 30기와 전기집진기실 3개소로 구성되어 있다.

터널공사의 단계별 시공순서를 보면, 천공장약 발파로 이루어

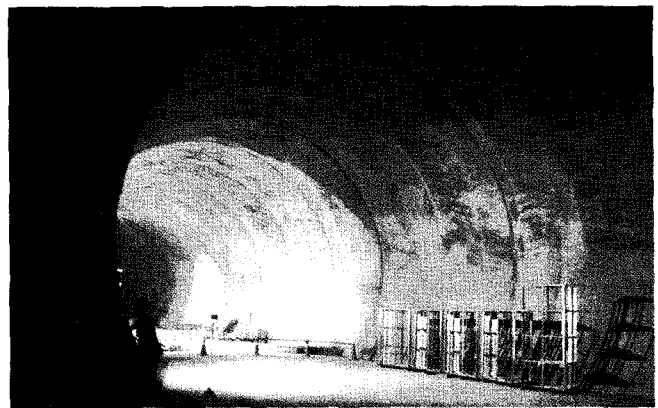
지는 굴착공과 발파된 버력을 처리하는 버력처리공, Shotcrete와 Rock Bolt를 시공하는 지보공 그리고 마지막으로 터널관통 후 라이닝을 타설하는 구조물공으로 구성되어 있으며 그림 2에 도시하였다. 각 공종에서의 Cycle Time 분석 결과 굴착공, 버력처리공, 지보공, 구조물공에서 각각 25.4%, 25.4%, 22.8%, 26.5%로 공종별 소요시간이 비슷하였다. 터널의 공기단축을 위해서는 각 공종별 굴착공기에 영향을 미치는 요소를 검토하여 이를 단축시킬 수 있는 방안을 마련하였는데 굴착공에서는 굴진장의 증대와 굴착단면 개선, 버력처리공에서는 장비용량 개선,



(a) 갱문전경



(b)터널내부 전경



(c)집진장 전경

그림 4. 사패산터널 시공현황

지보공 및 구조물 공에서는 지보량의 최적화와 라이닝 병행타설 등의 방법들이 도출되었으며 이들 중 공기단축에 가장 영향이 큰 항목들에 대해 시공에 반영하였다.

본선굴착의 경우, 2004년 5월 터널갱구부 발파후 2005년 7월 상부를 관통하였고, 2005년 12월 굴착을 완료하여 일평균 14m씩 굴착하였다. 그림 4는 굴착이 완료된 사패산 터널 내외부 전경이다.

터널의 공기단축을 위하여 굴진장 증대와 굴착공법 개선 등 다양한 형태의 개선 사항을 통하여 시공하였다. 발파효율 증대를 위하여 Bulk 폭약을 사용하였고, 상하반 동시굴착, 횡갱을 이용한 굴착 등을 통하여 굴착공법을 개선하였다. 또한 안전시공을 위하여 단층파쇄대나 절리대가 예상되는 구간에서 총 6차례의 TSP 탐사가 실시되었다.

4. 공기단축 시공 사례

터널의 공기단축을 위하여 굴진장 증대와 굴착공법 개선 등

다양한 형태의 개선 사항을 통하여 시공하였다. 발파효율 증대를 위하여 Bulk 폭약을 사용하였고, 상하반 동시굴착, 횡갱을 이용한 굴착 등을 통하여 굴착공법을 개선하였다. 또한 안전시공을 위하여 단층파쇄대나 절리대가 예상되는 구간에서 총 6차례의 TSP 탐사가 실시되었다.

4.1 굴진장 증대

먼저 터널의 굴진장 증가에 대한 안정성을 분석하고자 원 설계 굴진장과 장공 굴진장에 대한 3차원 전산해석을 실시하였으며, 그 결과에 따라 지보패턴 1, 2, 3 Type에 대한 1회 굴진장을 원 설계 대비 1.0~1.5m 증대하였고, 지보패턴 4, 5, 6 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. 시

험발파를 통하여 그 효율성을 비교 분석(표 2 참조)한 결과 장약 밀도의 증가로 굴진율이 향상되며, 천공수 및 장약시간의 감소로 공기단축 요소가 많은 Bulk-Emulsion 폭약으로 화약을 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. Bulk-Emulsion 폭약의 기계화 장전모습을 그림 5에 나타내었다.

표 2. Bulk 폭약과 카트리지 폭약의 성능 비교

구분	Bulk 폭약	카트리지 폭약	증감률
굴진율	95%	89%	6% 증가
천공수	157hole	86 hole	16% 감소
비장약량	1.68(kg/m3)	1.29(kg/m3)	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)	0.311cm/s	0.227cm/s	37% 증가



(a) 장전 시스템



(b) 폭약 장전

그림 5. Bulk-Emulsion 폭약 장전

4.2 굴착공법 개선

원설계시 굴착공법은 터널 상부단면 굴착시에 1차적으로 중앙

표 3. 굴착단면 변경 사례 (지보패턴 3 Type 기준)

구분	분할방법	변경
원설계		-4분할 -공정 복잡 -시공 어려움
변경		-2분할 -공정이 간단 -시공성 개선

부를 발파한 후 버력을 처리하고 2차로 측벽부 발파 및 버력을 처리하여 완전히 관통한 후 터널 하부단면을 추후 굴착하는 것으로 계획되어 있었다. 하지만 공기단축을 위하여 상반 전단면 굴착 및 피난연락갱을 이용한 하반 굴착이 계획되었다(표 3 참조). 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 시공방법은 하부 굴착을 위한 공기를 단축할 수 있으며, 가설 벽체 등을 이용하여 콘크리트 라이닝의 병행타설이 가능하여 또다른 공기단축 효과를 기대할 수 있다. 품질에 영향이 없다면 발파작업과 동시에 콘크리트 라이닝을 동시에 시공하는 것은 공기단축과 공사비 절감에 큰 도움을 줄 수 있다.

그림 6은 하단의 굴착계획 평면도이다. 그림에서 보는 것과 같이 본 현장에서는 피난연락갱을 시공한 후 한 쪽 방향(퇴계원 방향)으로만 장비의 진출입을 허용하고 다른 쪽 방향(일산 방향)에서는 양 방향에서 하단을 굴착한다. 일산 방향의 하단 굴착이 마무리되면, 일산 방향으로의 장비 진출입을 허용하고, 퇴계원 방향의 양 방향에서 하단을 굴착할 수 있다. 이러한 시공 방법은 상단의 굴착에 큰 영향을 주지 않기 때문에, 공기 단축의 효과를

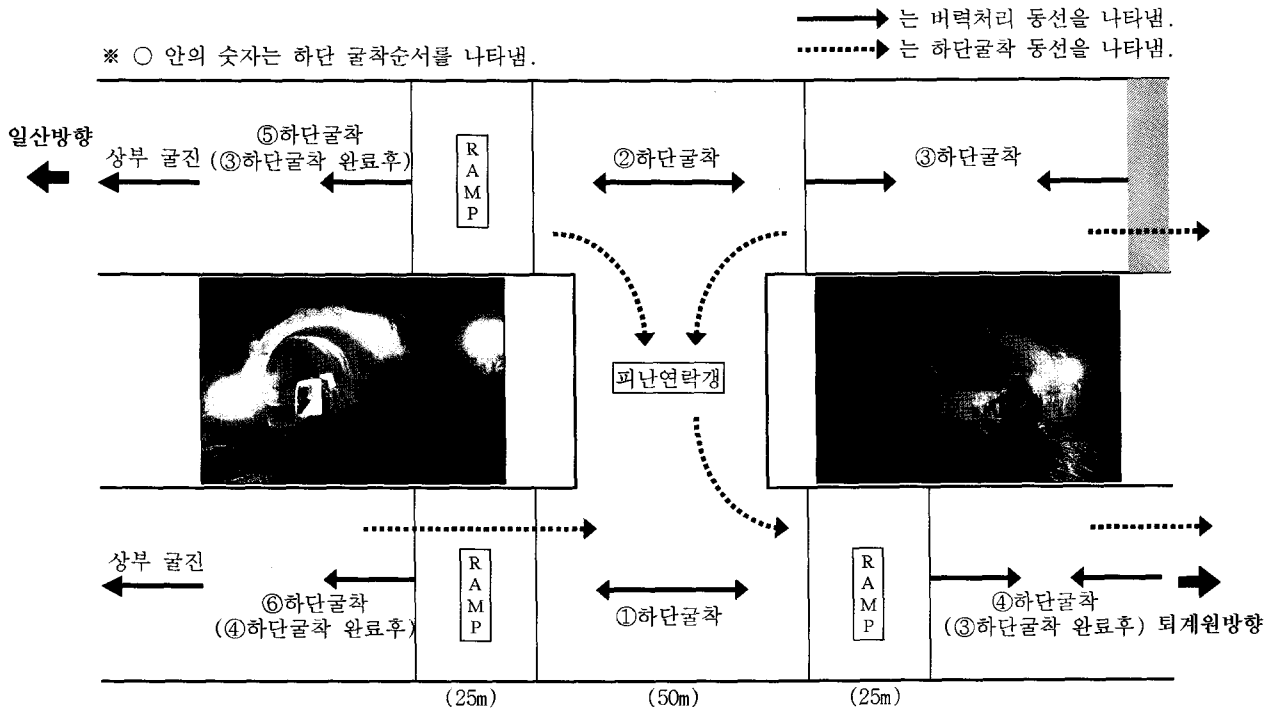


그림 6. 피난연락갱을 이용한 하단굴착 평면도

기대할 수 있다.

4.3 막장전방 예측사례

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

TSP(Tunnel Seismic Prediction) 탐사는 탄성파의 특성을 이용하여 막장전방을 예측하는 탐사로 체적파인 P파와 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 주변지반의 탄성특성치(탄성계수, 포아송비 등)와 같은 지반의 성층구조 및역학적 특성치에 대한 정보를 발진점(shot

point)과 수신점(receiver point) 간의 거리를 달리하여 얻어진 일련의 탄성과 시간 기록들을 개별적 또는 총체적으로 분석하여 탐지하는 것이다. 탐사 소요시간은 약 1시간 정도로 선진수평 시추 등 다른 탐사법에 비해 터널 공정에 미치는 영향이 적다. 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 단면 상에 나타난 반사점이나 회절점들을 본래의 위치에 나타나도록 하는 처리 과정으로, 회절 곡선 상의 적분, 유한차분법의 이용, 파동장의 위상이동 하향연속, 주파수-주파수 영역 구조 보정 등 다양한 방법으로 수행된다.

그림 7은 선진수평 시추 결과 풍화 및 파쇄가 심한 약층대 구간에 대한 TSP 탐사를 실시하여 선진시추 결과, TSP 탐사, Face Mapping 자료를 비교한 결과이다. 선진수평시추와 TSP 탐사로 확인된 파쇄대 위치가 거의 일치하는데다가 외부 지형상 계곡부에 위치하는 것으로 볼 때 조사결과는 비교적 정확한 것으로 판단되었다.

선진시추는 굴착 전 전방을 예측할 수 있는 확실한 방법이지만, 시추공이 터널 단면에 비하여 극히

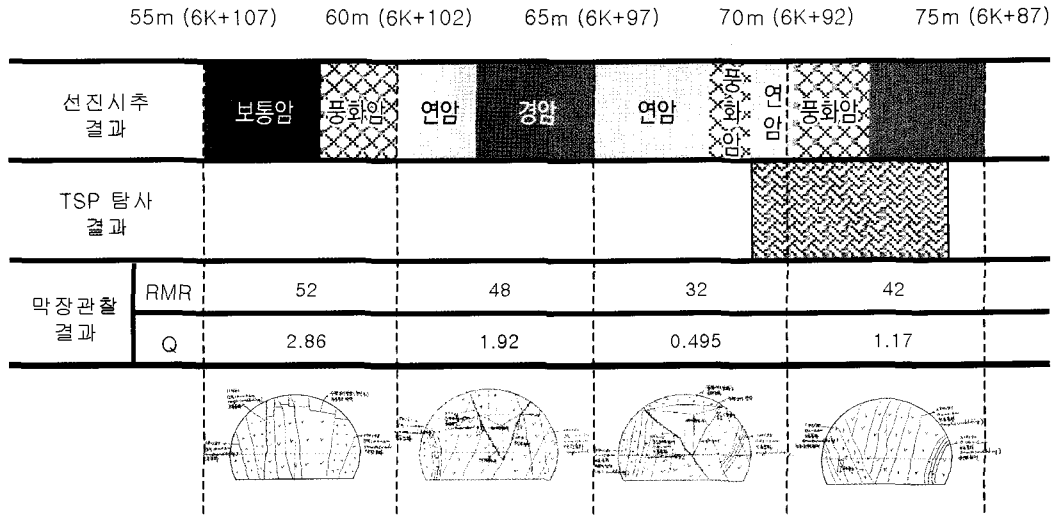


그림 7. 선진시추, TSP, Face mapping 상호비교

적어 한 개의 시추공으로 터널 전체를 풍화대 구간으로 추정하는 오류를 범할 수 있다. 또한 선진시추로 파악된 풍화대의 주향이 터널의 진행방향과 거의 평행한 경우는 TSP 탐사를 통하여 풍화대를 파악할 수 없다. 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 막장의 Mapping을 통하여 정확한 정량적 데이터를 얻는 방법이 가장 효율적일 것으로 판단된다.

5. 결론

대단면 장대터널인 서울외곽순환고속도로 사패산 터널은 국립공원에 위치하여 많은 사회적인 관심을 받은 곳이며, 특히 민원에 의한 공사중지로 인하여 공사초기부터 터널공기단축이 가장 중요한 선결과제였다. 천공장 증가에 따른 굴진효율 및 시공성 향상을 위하여 Bulk-Emulsion 폭약을 적용하였고, 상반 3분할~5분할의 분할 굴착으로 설계 되어 있었으나, 이를 상반 전단면 굴착으로 변경하였고, 피난연락갱을 이용한 양방향 굴착을 적용하였다. 굴진장 증대에 따른 시공 중 터널막장의 안정성을 확보하기 위하여 TSP 탐사와 선진시추, Face Mapping등을 실시하였다. 대단면 장대터널에서의 공기단축 요소로는 굴진장 증대와 굴착공법 개선이 가장 큰 효과가 있으나 대단면이라는 특성상 터널의 안정성을 확보하는 범위에서 공기단축공법을 적용하는 것이 중요할 것으로 판단된다.