

석회암 파쇄대 구간의 장대터널굴착중 싱크홀 발생 및 대책 사례

장석부, 서성호, 문상조 ((주)유신코퍼레이션)
홍종상 ((주)대우건설)

1. 서론

영동선 솔안터널은 16km가 넘는 국내 최장 터널로써 태백지역의 매우 복잡한 지질조건에서 공사가 이루어지고 있다. 2000년에 공사가 시작된 이래 함탄층과 같은 불량한 지질조건에서의 어려움을 극복하여 왔으나, 최종 관통예정 구간에서 석회암지대의 전형적인 싱크홀이 터널 상부 하천변에서 몇 차례 발생하였다. 몇 차례의 싱크홀은 지표에서 관찰된 침하양상, 지표 부근의 수리환경조건, 터널내 용출수 현황 측면에서 다소 차이가 있었다.

이에, 싱크홀 주변의 초동 안전조치와 더불어 근본적 원인분석 및 향후 재발방지를 위한 지반조사를 수행하였으며, 공사중 대책을 수립하였다. 본 고에서는 본 과업지역에서 발생한 석회암지대에서의 싱크홀 발생 특징과 정밀조사 및 대책수립 사례를 소개하였고 대책마련에 있어서의 문제점과 개선방향에 대하여 간단히 제시하였다.

2. 현황 개요

2.1 지질조건

솔안터널이 계획된 일대의 지질은 캄브로-오도비스기의 조선누층군을 최하부 층으로 하여 이를 부정합으로 피복하고 있는 석탄-페름기의 평안누층군, 그리고 이들을 부정합으로 다시 피복하는 백악기 경상누층군, 위 지층들과 분출 및 관입 관계를 가지는 백악기 화산암류 및 모든 지층들을 부정합으로 덮고 있는 충적층으로 구성되어 있다. 각 지층은 층상단층(thrust)에 의해 수차례 반복하여 분포하며, 오십천단층 등 주향이동 단층에 의해 단절되고 있다.

공사구간인 태백시 통동과 삼척시 도계읍 일원은 대표적인 퇴적암지대로 과거 채탄을 실시한 채굴적이 존재하고 석회암 및 사암, 셰일, 탄층이 교호되는 복잡한 지질성상으로 구성되어 있다. 터널이 통과하는 태백시 연화동 일원은 소규모단층들이 분포되어 있는 석회암지대로 비교적 양호한 암반이나 일부 단층대에서 불예측의 출수가 많은 구간으로 본고의 급작스런 터널내 용출수와 지상부 싱크홀 발생지역이 여기에 포함된다. 싱크홀 발생지역은 전형적인 석회암지대의 특성을 보

여주는 막골층 지역을 터널이 통과하고 지상부는 하천지형으로 막골층과 두위봉층이 분포하고 있다.

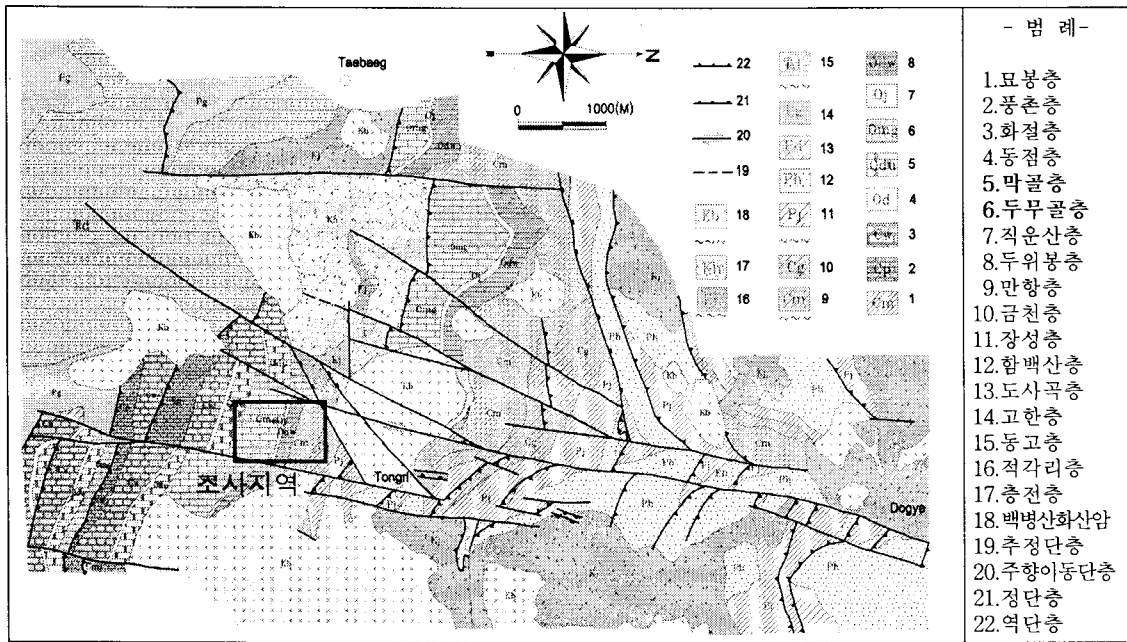


그림 1. 광역지질도

2.2 터널내 용출수 및 상부지표침하 현황

솔안터널은 NATM공법으로 설계되어 시공중이며, NATM구간의 총연장은 15.95km로 343m를 남겨놓은 상태에서 양방향 굴착중 시점측 굴진면과 종점측 굴진면 50m후방에서 용수가 발생하였다.

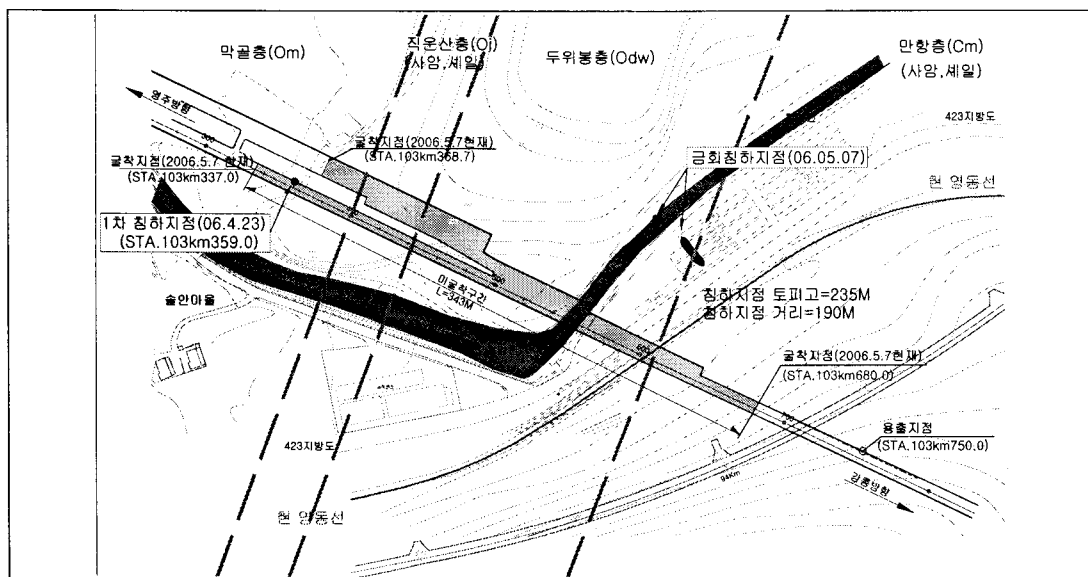


그림 2. 침하발생 현황도

터널시점측에서 상부반단면 굴진중 황색점토 충전물이 용수와 함께 굴진면 측벽에서 발생하였으며 터널 직상부 마을의 농업용수로 사용하는 샘터의 물이 고갈되면서 싱크홀을 형성하였다. 종점측에서의 싱크홀은 시점측 싱크홀 발생 2주후 굴진면 후방 50m지점의 우측 하부측벽에서 슛크리트를 밀어내고 터널상부 하천의 물이 터널내로 유입되면서 하천 주변 비닐하우스에 싱크홀이 발생하였다.

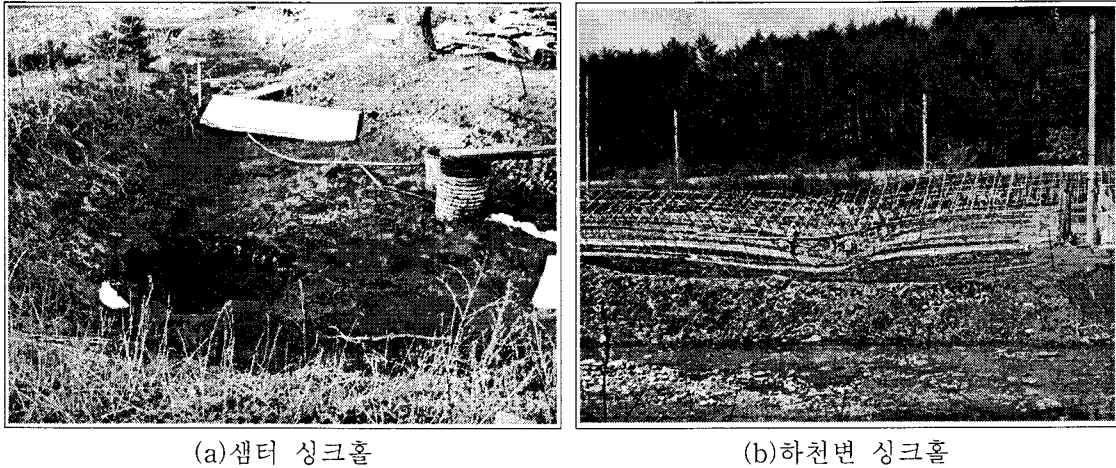


그림 3. 싱크홀 발생 현황

2.3 현장 정밀조사

터널굴착중 용수와 상부지반의 싱크홀 발생에 따라 현장에서는 즉각 작업을 중지하고 하천물돌리기 및 터널 긴급양수와 주변지역 침하계측을 실시하면서 전문가 집단에 의한 합동조사를 실시하였다. 터널상부에서는 지표지질조사, 전기기비저항탐사, 시추조사, 지하수 모니터링조사 등 정밀조사를 시행하였으며, 터널내에서는 갱내탄성과 탐사 및 선진수평시추를 시행하여 터널내 출수 및 침하원인을 분석하고 대책방안을 마련하고자 하였다.

(1) 정밀지표지질 조사 및 선구조 분석

지표지질조사 결과 지표면에 분포하는 암층은 막골 석회암층으로 층리면을 따라 절리가 발달하였으며, 절리면을 따라 풍화가 진행하여 불규칙한 용식 공동을 형성된 상태이다. 터널내 용출구간의 암층 또한 지표면의 막골 석회암층으로 지층방향과 절리 양상이 비슷한 것으로 조사되었다.

또한, 본 조사지역 일대의 음영기복도를 이용하여 주요 선구조를 분석한 결과 조사지역 내 미굴착 터널 구간 343m를 지나는 주요 선구조는 4개로 분석되었다. ①번(N48E) 선구조는 주요 침하지점 및 터널 용출지점과 동일한 선상에 분포하고 있으며, ②번(NS) 선구조는 이 지역내 가장 우세하게 발달하는 단층인 오십천 단층과 동일한 방향으로 발달하고, ③번, ④번(N62W) 선구조는 이 지역내 분포하는 석회암 및 사암층의 주향 방향과 동일하게 발달하고 있는 것으로 분석되었다.

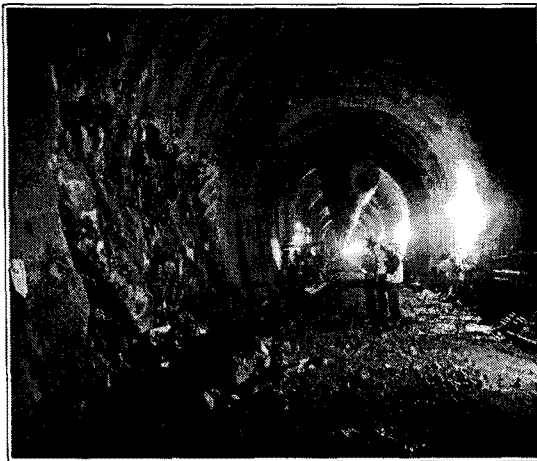


그림 4. 갱내 Mapping

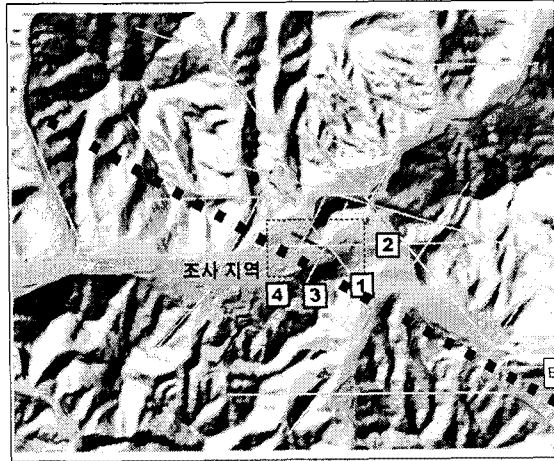


그림 5. 선구조 분석도

(2) 전기비저항 탐사

지표지질조사 및 선구조 분석 내용을 반영하여 싱크홀 발생위치와 터널노선과의 상관관계가 있는 6개의 축선을 선정하여 전기비저항 탐사를 실시하였다. 6개 축선 종합분석결과 터널구간에 4개의 구조선이 영향을 주는 것으로 파악되었다. 샘터부근의 지표수 누수현상은 F4구조선과 막골석회암내 발달한 수직적인 공동분포의 영향으로 분석되었으며, 종점측 터널내 지하수 용출 및 하천변 싱크홀의 발생은 F1구조선을 따라 발달한 단층파쇄대의 영향으로 분석되었다. 또한 잔여굴착구간에 F2, F3, F4구조선에 의한 영향을 받을 것으로 예측되었다.

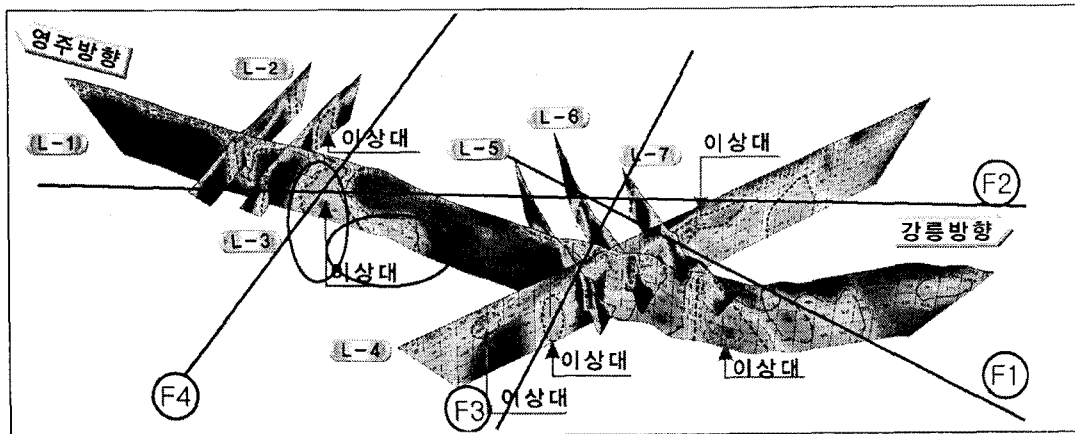
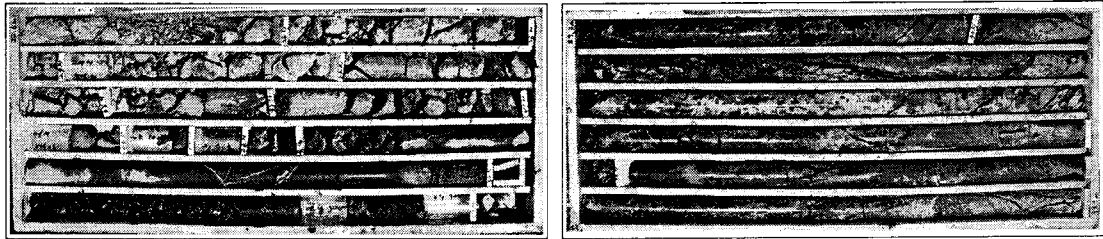


그림 6. 전기비저항 탐사 분석

(3) 시추조사

샘터주변은 긴급조사사항으로 천공기로 계측기홀을 만들기 위해 천공결과 지지암반이 2m이내에 형성되어 있는 것을 확인하였으며, 하천변 주변은 NX시추기를 이용하여 2공의 수직시추와 도로와 철로변 인근에 1공의 경사시추를 시행하였다. 샘터 싱크홀 주변의 암반은 양호한 석회암으로 확인되었으나, 하천변 싱크홀에

인접지반은 매우 심한 파쇄대로 일부공동이 존재하는 것으로 파악되었다. 하천변을 따라 건설되어진 도로 및 철도의 안전을 확인하기 위해 시행한 경사시추는 암종경계 지역으로 세일, 사암, 역암 등으로 이루어진 퇴적암(만항층)지반으로 경암반 지반아래 약 30m 지점에 부분적으로 파쇄대가 존재하는 것으로 나타났으나 도로 및 철도의 영향은 없을 것으로 판단하였다. 추가로 터널노선 상부에 장공시추를 한 결과는 강한 암반강도를 보이는 양호한 암반대로 확인된 것으로 볼 때 구조선과 암종경계를 따라 파쇄대가 분포하는 것으로 판단할 수 있었다.



(a)하천변 시추 상자 (석회암구간) (b)철로변 경사시추 상자 (세일,사암구간)

그림 7. 시추조사 결과

(4) 지하수 모니터링 조사

지하수 유동특성을 파악하기 위해 변수위 투수시험을 실시하고 지하수의 유향과 유속을 측정하는 시험을 4개의 시추공에서 수행하였으며, 시험후 지하수위 관측공으로 이용하였다. 지하수의 모니터링을 위한 4개의 시추공은 2~3.5m에서 암반층을 만나며 지하수위는 공통적으로 지표하 2.5~4m 근처에 위치하고 있었다. 샘플부근의 유향은 229~276°로 지형과 F4 구조선의 영향을 받는 것으로 나타났으며, 유속은 95~98cm/day로 나타났다. 하천변 싱크홀 인근 도로와 철로변 지역의 지하수 유향은 189~347°, 유속은 52~250cm/day로 현 지형에 따른 동수구배와 지질구조선의 투수특성에 지배를 받는 것으로 판단할 수 있다.

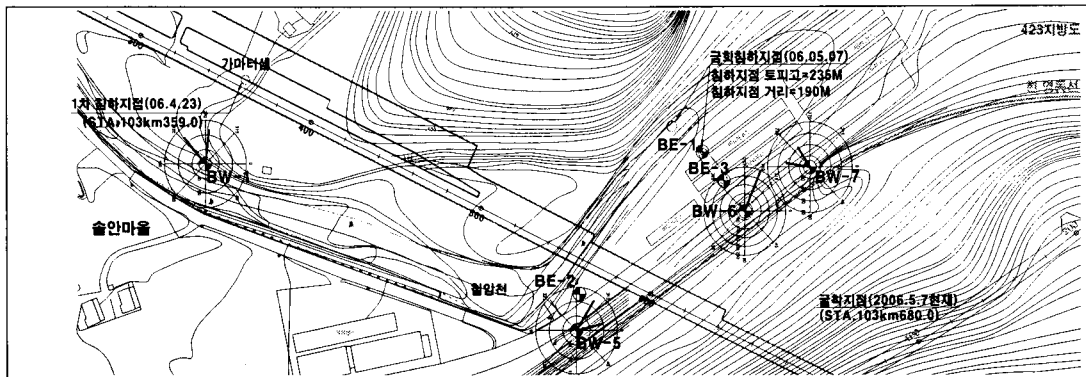


그림 8. 지하수위 모니터링 조사

(5) 갱내 탄성과 탐사(Tunnel Seismic Prediction)

미굴착구간의 지층급변 구간, 추정 구조대 등 지반조건이 불량한 구간에 대한

굴착 및 보강방안 수립을 위한 시공중 TSP를 350m의 잔여굴착구간에 대한 전방암질을 예측하기 위해 양방향에서 실시하였으며, 탐사결과 분석은 다음 그림들과 같다.

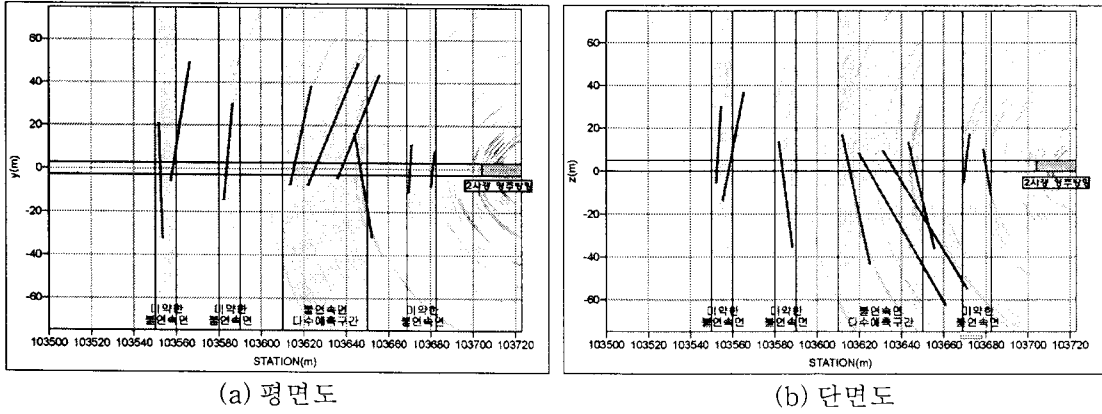


그림 9. 전방예측 영상화 결과 및 해석도(종점→시점방향)

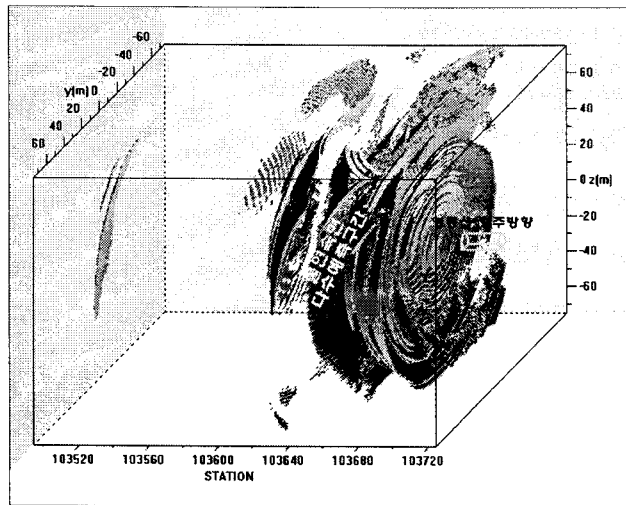


그림 10. 뚜렷한 반사 이벤트(불연속면)만 나타난 3차원 영상화 결과

(6) 갱내 선진수평 시추조사

갱내 탄성파탐사(TSP) 분석결과를 토대로 잔여굴착 구간중 단층 또는 파쇄대가 예상되는 굴진면 전방에 대하여 선진수평 시추조사를 시행하여 파쇄대의 위치, 규모, 방향 및 용수량 등을 사전에 확인하여 사전보강대책을 수립하기 위해 양방향에서 시행하였다.

수평시추결과 지표지질조사의 구조선과 TSP탐사의 불연속면 예측구간에 파쇄대가 존재하는 것을 확인하였으며, 이를 토대로 향후 굴착시 프리그라우팅 등의 보강대책을 수립할 수 있었다.

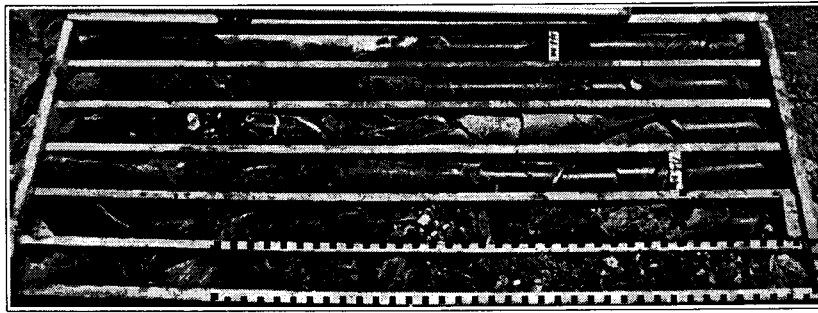


그림 11. 갱내 수평선진 수평시추 결과(시점→종점측, 40.5~46m)

3. 조사결과에 따른 원인 분석

현장에서는 급작스런 돌발용수에 대해 차수그라우팅을 통해 용수량을 줄이면서 상기와 같은 다각적인 조사결과를 분석한후 잔여굴착에 대한 대책을 수립하였다.

석회암구간의 특성을 파악하기 위해 기존 문헌조사와 현장조사를 통한 침하경위조사 및 정밀 지질조사결과를 토대로 지표침하 원인을 분석하면 다음과 같이 추정된다. 터널 상부에서 발생한 싱크홀 및 터널내 다량의 용출수 유입은 암반의 구조역학적인 문제에서 기인했기보다는 석회암 파쇄대구간이 교차하는 구간이 상부 하천의 영향을 받아 일정부분 유로를 형성한 것이 기인한 것으로 분석되었다.

샘터의 싱크홀은 지표지질조사결과 F4구조선과 용식동굴이 현저하게 발달한 막골석회암 지층내 수직으로 발달한 공동분포지역을 터널이 통과함으로써 터널내 용수발생에 따라 샘터하부의 수직공동의 충전물이 유실되면서 싱크홀이 발생된 것으로 분석할 수 있다.

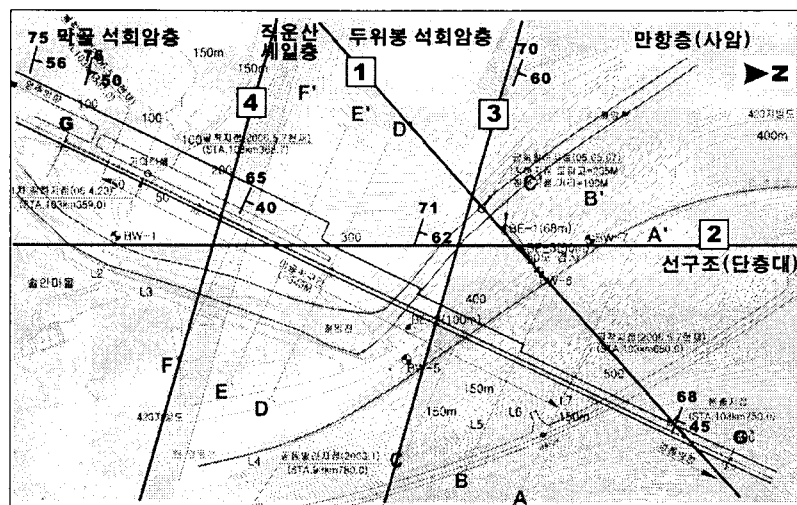


그림 12. 지질구조도

하천변의 싱크홀은 그림 12와 같이 F1의 구조선을 따라 지하수의 유동이 발생

하였고, 이 경로 중 싱크홀의 위치는 3개의 구조선(F1, F2, F3)이 교차하는 지점으로 시추조사(BE-1)에 의해서도 파쇄가 상당히 심하고 공동이 존재하는 것으로 조사되어 지표부근이 매우 취약하여 하천변의 지표수가 터널내로 유입될 때 토사 및 파쇄대 충전물이 유입되어 침하가 발생한 것으로 분석되었다.

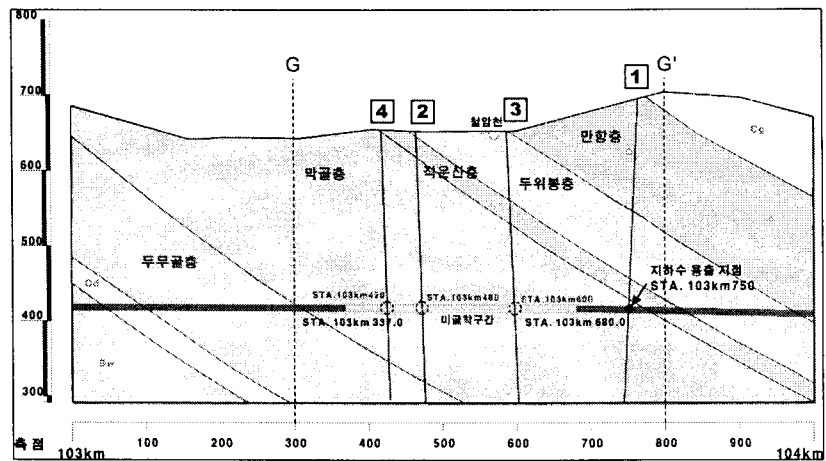


그림 13. 터널구간 지질종단면도

이와 같이 본 구간에 발생한 싱크홀은 터널내 출수와 함께 석회암 공동내 충전물이 터널내로 유실되면서 지표와 연결된 석회암 지하수 유동경로를 통한 지표수의 유입을 유발시킴으로써 표층 토사의 유실에 의한 침하를 발생시킨 것으로 판단할 수 있다.

4. 보강 및 잔여구간 굴착

터널내부에 용출수 유입구간의 터널 안정성에 있어서는 절리 및 파쇄대 구간을 통해서 지하수와 공동 충전물이 터널내부로 유입되어 일부 구간의 공동이 발생된 것으로 추정되어 차수 및 공동충전그라우팅을 터널상부 및 터널내에서 실시하였다. 전문가집단의 합동조사결과 터널 안정성에는 문제는 없는 것으로 판단하였으며, 잔여구간에 조사된 파쇄대 통과구간에 대해서는 지보패턴을 수정하고 사전차수그라우팅을 시행하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다.

4.1 싱크홀에 따른 긴급보강 조치

싱크홀이 발생하자 주위지역에 대한 출입을 통제하고 지표침하 및 수위계측을 실시하여 상황의 진행여부를 관리하면서 합동조사를 실시하였다. 조사결과 침하지역은 더 이상 확산되지 않을 것으로 판단되었으나 제2의 사고로 연계되지 않도록 보강조치를 취하였다.

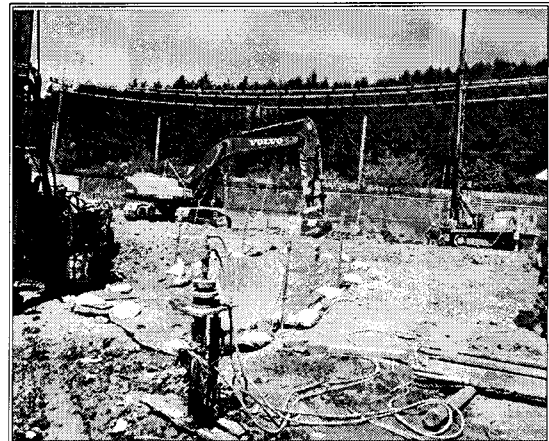
샘터의 싱크홀주변 지반은 양호한 것으로 조사되어 터널내에서 차수그라우팅을

실시하였으며, 터널내 차수그라우팅이 완료된후에 샘터는 일정정도의 수위를 회복하였다.

하천변 싱크홀 발생구간의 지상부에서는 하천변에 대한 차수그라우팅을 실시하여 터널유입수를 줄여 수압을 감소시켰으며, 도로변을 따라 JSP 차단벽 지반보강 공사를 시행하여 도로의 침하를 방지하였다. 터널에서는 지상보강작업과 계측이상이 없음을 확인한 후 차수그라우팅을 시행함으로써 유입수량을 줄이면서 잔여 구간 굴착을 착수할 수 있었다. 또한 하천과 연결된 파쇄대를 통한 직접적인 지하수 유동을 줄이고자 하천하부 바닥을 수로 콘크리트로 전면 시공하였다.



(a)터널내 차수그라우팅



(b) 하천변 지상보강(LW 및 JSP)

그림 14. 터널내 차수 및 지상보강 현황

4.2 현장 계측

싱크홀 주변에 대한 긴급조치로 실시한 계측으로 샘터부근에 대하여는 주변지표침하측정 11개소, 주변관정 지하수위 측정 4개소, 지중침하 3개소를 설치하여 상시계측을 시행하였다. 지중침하계 설치를 위해 천공한 결과 기반암이 2m인근에 분포하고 있으며 지표침하는 7~8mm 내외로 수렴하였으며, 관정수위는 최초 측정후 1.5~4.0m 정도로 변동이 없었으며, 지중침하 역시 1~2mm 정도로 거의 나타나지 않았다. 이는 조사결과에서도 보듯이 샘터와 250m아래의 터널과 수직적인 공동연결이 되어 있음을 알 수 있으며, 샘터의 수위는 현재까지 G.L -1.5m 내에서 강우량에 따라 변동하고 있다.

하천변의 싱크홀은 규모가 상대적으로 크고 인근에 도로 및 철로가 있어 계측기를 기존시설물의 안전에 주안점을 두어 설치하였다. 철로레일 침하계측 8개소, 철로 노반 및 법면 4개소, 도로 7개소를 싱크홀 발생구간과 선구조내에 선상에 위치하는 축선으로 계측기를 배치하였다. 계측결과 철로 레일 및 노반 법면은 자갈도상 특성으로 열차운행에 따라 $\pm 2\sim 4\text{mm}$ 의 변동폭을 가지고 그 외 특이한 침하는 없는 것으로 나타났으나, 철로의 안정상 복구완료시까지 열차는 서행운전을 실시하였다. 도로의 7개소 침하계측기중 3개소(축선 간격 10m)구간에서 약 20mm의 침하가 발생되었으나, 이는 철로 및 도로의 안전을 위해 실시한 JSP 시공중에

일어난 것으로 분석되었으며 JSP 작업완료 후에 더 이상의 침하발생 없이 수렴되는 것으로 나타났다. 도로 역시 공사중 서행을 위한 과속방지턱을 설치하여 안전을 확보하였다.

터널내 천단 및 내공변위는 샘터하부구간에서는 5~6mm로 조기수렴 되었으며, 하천변 하부 용출수 지점에서는 최대 10mm내외에서 조기에 수렴되었다.

이상의 계측결과를 분석해 보면 지표 토사지반의 초기탄성침하가 진행되기는 하였으나 토사 층후가 얇아 보강작업 이후 전반적으로 안정적인 수렴추이를 나타냈으며, 터널이 통과하는 구간에 일부 파쇄대와 공동을 포함하고 있지만 주변 암반조건이 양호하여 별다른 계측이상을 나타내지 않았다.

4.3 재발방지 시스템 구축

터널은 단면에 비해 연장이 긴 선형구조물이고 대부분이 지표면으로부터 깊은 심도에 위치하기 때문에 지형조건으로 인한 장비투입의 난이, 경제성 등으로 충분한 조사를 할 수 없는 경우가 많아 불충분한 지반조사에 기초하여 설계를 하는 경우가 대부분이므로 조사자료의 제한성으로 굴착 전에는 대부분의 대상지반을 직접 확인할 수가 없다. 이러한 터널의 특수성으로 제한된 자료만이 터널시공에 반영될 뿐이어서 시공 중의 막장관찰을 통한 암반평가와 터널전방에 대한 예측기술이 매우 중요하다.

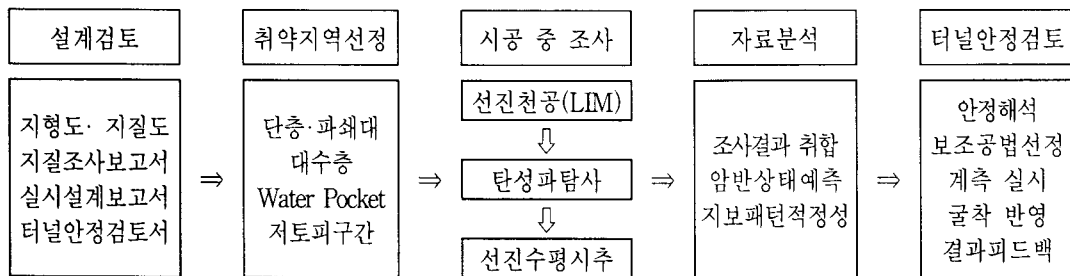


그림 15. 터널굴착 암반예측 시스템

(1) 선진천공시스템

천공장비를 사용하여 굴착면의 전방을 예측할 수 있는 천공검층시스템으로 LIM Recorder에 의한 선진천공시스템이 그것이다. 이 시스템은 유압점보드릴에 LIM Recorder를 장착하여 암반을 천공할 때 굴진속도, 타격에너지 등의 천공데이터가 암반의 경연에 의해 변화하는 것을 이용하여 지질을 평가하는 것으로 해석시에 파괴에너지 계수라는 파라메타를 사용함으로써 지질상황과 파괴에너지계수 사이에 명확한 상관성이 인정되어 여러 적용사례를 통하여 굴착단면 전방 지질의 예측이 가능한 것으로 알려져 있으며, 객관적인 데이터를 얻을 수 있기 때문에 경제적으로 미굴착 부분의 암반평가 및 지질 분포의 예측이 가능하다.

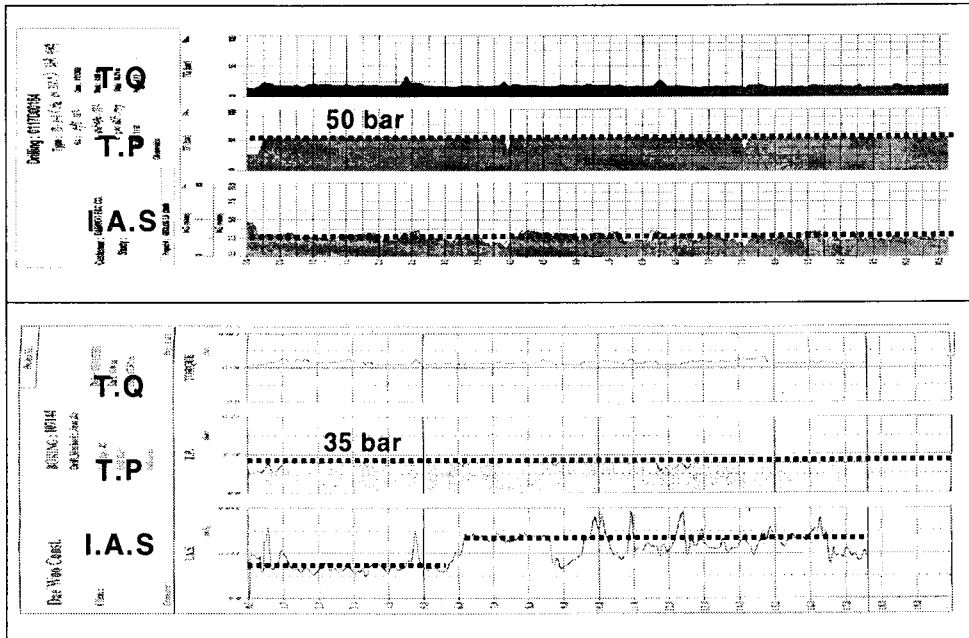


그림 16. LIM Recorder 적용사례

(2) 탄성파탐사

탄성파탐사는 전방의 지질상태 파악 및 불연속면을 예측할 목적으로 시행되는데 크게 TSP(Tunnel Seismic Prediction)와 HSP(Horizontal Seismic Profiling) 방법으로 분류할 수 있으며, 주요 장비는 3성분 지오폰 및 탄성파탐사 기록계로 구성된다.

탄성파탐사는 소량의 발파로 인위적인 탄성파를 발생시키면 탄성파가 전방향으로 파동되는데, 매질의 특성이 다른 경계를 만나면 반사되어 되돌아오는 특성이 있으므로 이를 분석하여 불연속면의 존재를 확인할 수 있는 원리를 이용한 것이다. 탄성파 발생은 발파를 이용하며, 천공구멍내에 소량의 장약 후 순발뇌관을 연결하여 점화시키면 된다. 자료처리 및 해석을 통하여 2차원 및 3차원 영상화작업이 가능하다.

(3) 선진수평시추

LIM Recorder에 의한 선진천공시스템은 코아채취가 불가능하여 전방의 암질에 대한 정보획득이 어렵기 때문에 이를 보완하기 위해 시행하는 코아채취 방식이다. 코아를 획득함으로써 막장 전방의 암질을 평가하고 유입수를 확인하여 고압수를 굴착 전에 해소할 수 있으며, 유입가스 조사가 가능하여 불의의 사고를 방지할 목적으로 사용된다. 시추코아로부터 획득이 가능한 자료는 코아의 육안확인, 암반의 강도, 암반의 불연속성, RQD, 충전물 등이 있다. 이 탐사법의 단점은 탐사중 터널 굴착작업의 중단이 불가피하고(3~4일/100m), 점(Point) 탐사로 대표성의 문제가 있으며, 암반의 상태에 따라 작업난이도 및 작업속도 편차가 크다는 것이다.

이와같은 재발방지시스템을 활용하여 현장에서 적용한 사례를 간략히 다음그림에서 볼 수 있다.

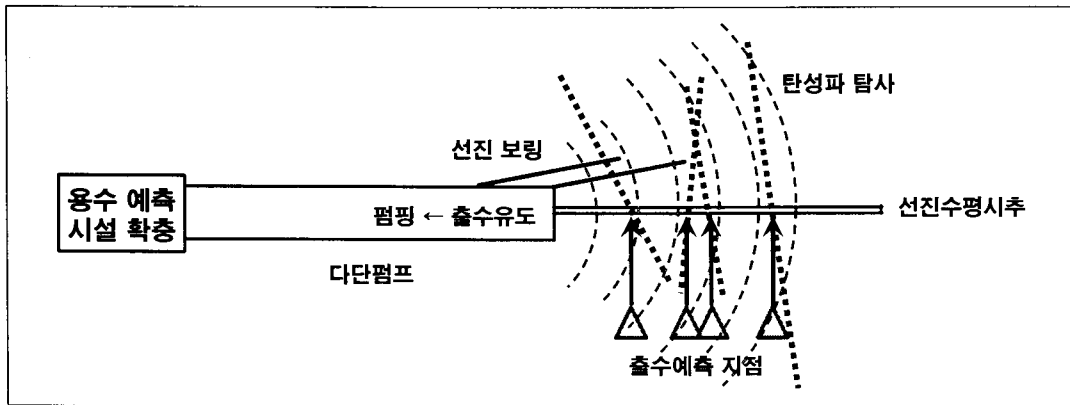


그림 17. 암반예측시스템의 현장적용사례

4.4 잔여구간 안전시공 대책

현장정밀조사 자료를 토대로 본 석회암지역은 망상형 공동이 발생되어있는 지반으로 분석되었으며, 지층경계와 구조선이 위치하고 있어 지하수 유동변화가 발생되지 않도록 지속적인 관리를 위해 4개 시추공을 이용하여 지하수위변동 모니터링을 통해 잔여굴착 구간의 터널굴착에 따른 영향 분석에 활용하였다. 잔여굴착구간에 조사된 절리 및 파쇄대 예상통과지점 전후에 지보패턴을 변경하였으며 사전 차수그라우팅을 실시하는 것으로 반영하였다. 잔여구간의 시공시 수립한 지상 및 터널내 안전시공방안 다음과 같다.

표 1. 잔여구간 안전시공 방안

지 상 부	터 널 내
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 연못부, 철암천 주변, 잔여구간 지표침하 계측으로 지속 감시 ▪ 지하수 모니터링으로 지하수 유동감시 ▪ 지표침하 주변지반조사로 파쇄층 특성 확인 ▪ 발파진동 및 소음 측정관리 ▪ 지상 순찰 시행하여 이상 징후 사전파악 관리 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 선진막장조사(탄성과탐사, LIM, 수평시추) <ol style="list-style-type: none"> ① 탄성과탐사 시행으로 절리 및 단층대, 출수 예측 ② 선진보링(LIM) 시행으로 용수 및 이상대 사전예측 ③ 수평시추로 출수 확인 및 필요시 프리 그라우팅 실시 ▪ 제어발파로 암반충격 최소화 ▪ 계측관리를 지속적으로 시행하고 이상 발견시 즉각 공사 중단, 조치 후 작업재개

5. 결론

터널상부의 토피가 200m 이상의 대심도 터널로 하천수가 유입되는 상황은 흔치 않은 것으로 석회암지대의 망상형 공동 특성에 따라 터널출수와 지표침하가 발생되었다. 전문가집단에 의한 합동조사결과에 따라 지상부에서 유입원 차수 및 지반보강을 실시하고 계측추이를 관찰하면서 터널차수를 시행하여 출수상황을 종료시켰다. 잔여 미굴착구간에 대해서는 암반예측시스템에 의한 사전조사를 계획적으로 실시하여 문제점을 예측하고 출수구간에는 사전차수(Pre-Grouting)를 시행하면서 성공적으로 굴착을 진행하였다.

급작스런 출수의 경우 배수체계 뿐만 아니라 처리시설 부족에 따른 환경문제를 일으키므로 석회암지대의 터널공사시에는 이를 감안하여 용수처리시설을 충분히 확충하는 것이 필요하다.

터널특수성에 기인한 제한적인 지반조사에 따른 설계는 굴착시 일부 자료만이 터널시공에 반영될 뿐이므로 시공 중 막장관찰을 통한 암반평가와 터널전방에 대한 암반예측기술의 중요성은 날로 증가하고 있다. 터널전방에 대한 예지기술의 정도(精度)를 증대시킬 수 있다면 터널붕락이나 출수와 같은 예기치 못한 상황에 사전 대비할 수 있는 많은 정보를 획득할 수 있으므로 이 분야에 대한 연구가 진행되어 현장기술자가 유용하게 활용할 수 있었으면 하는 바람이다.

참고문헌

1. 철도청, 1999, “영동선 ○○○~○○간 철도이설 건설공사 지반조사 보고서”
2. (주)대우건설, 2006, “○○터널 터널내부용출수유입 및 상부지표침하에 따른 정밀안전점검”
3. 박남서, 석회암지역의 지질재해 워크숍, 2003, “석회공동 및 석탄 채굴적의 복합적요인에 의한 지반침하와 대책사례”