

서천터널 굴착 중 용출수 발생에 따른 터널 보수·보강 사례

A case study of sudden groundwater inundation in Seocheon Tunnel

최혁* 김선곤** 김흥국*** 홍준표****
Choi, Hyuk Kim, Sun-Kon Kim, Heung Kuk Hong, Jun Pyo

ABSTRACT

During excavation in seocheon tunnel, sudden groundwater inundation occurred in complex hydro-geological environments prevailing in underground tunnel. Large volumes of groundwater flowed into tunnel at STA 54km600. The authors have provided a comprehensive background to hydro-mechanics of groundwater with a geological analysis, ground investigation, hydro-mechanical modelling etc. To reinforce tunnel, we have applied the TAS grouting and the steel multi-layer grouting, and confirmed the effects of reinforcement.

1. 개요

경춘선 복선전철은 광역수도권 전철망을 확충하여 장래 예상되는 수송수요를 대비하고, 수도권 전철 서비스를 확대하여 수도권 인구의 균형적 분산과 경춘선 주변지역의 개발을 촉진하기 위한 목적으로 건설되고 있다.

이 중 제6공구 건설공사는 강원도 춘천시 남산면 서천리 일원에 위치하며, 공사규모는 연장 L=12km, 교량 3개소(가평교, 경강역 고가교, 서사천교), 터널 총 8km로 6개소(상천 1, 상천 2, 달전, 안산, 서천, 경강)이 있으며, 가평역사와 경강역사가 있다.

서천터널은 터널연장이 2,535m (53km580~55km 1150)이며, 굴착 방향은 4%역구배의 일방향굴착을 하였다. 이때 종점에서 시점방향으로 1,151m 굴진한 지점 STA54km600에서 용수유출이 발생하였다. 이 구간의 굴착패턴은 PD-1A(전단면굴착, 무지보, 굴진장 3m)이다.

본 논문은 서천터널에서의 용수유출에 대한 분석과 대책에 대한 사례이다.



[그림 1] 위치도

- * 현대산업개발 토목건축예산팀 과장
- ** 현대산업개발 토목설계팀장
- *** 현대산업개발 경춘선복선전철 제6공구 부장
- **** 현대산업개발 경춘선복선전철 제6공구 소장

2. 현 황

2.1 용수 유출

서천터널 내에서 발생한 유출은 그림 1에서와 같이 절리면을 통하여 대규모로 발생하기 시작하였다. 이에 따라 그림 2, 3, 4과 같이 막장 붕괴를 방지하기 위해 임시로 암버력을 이용한 되메우기를 실시하였으며, 막장후방으로의 침수면적 감소(후방 300m지점의 변압기 침수방지)를 위하여 막장후방 260m지점에 높이 1.0m의 Earth Dike를 축조하였다. 침수구간의 안개를 방지하기 위해 송기휀을 가동하여 지속적인 환기를 실시하였으며, 양수기 3대, 물차 2대를 동원하여 양수를 시행하였다.

용수 유출에 대한 원인 분석을 위해서는 용출부위 측벽을 천공(L=10m~20m)하여 파쇄대 분포를 조사하였으며, 수위계를 설치하여 매시간 수위변화를 측정하였다.



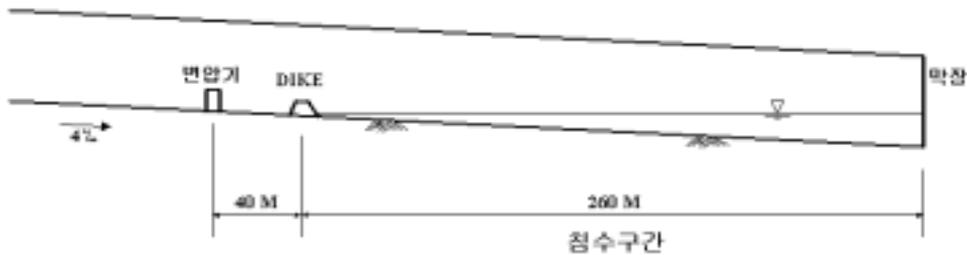
[그림 1] 용출수 유출전경



[그림 2] Earth Dike 축조



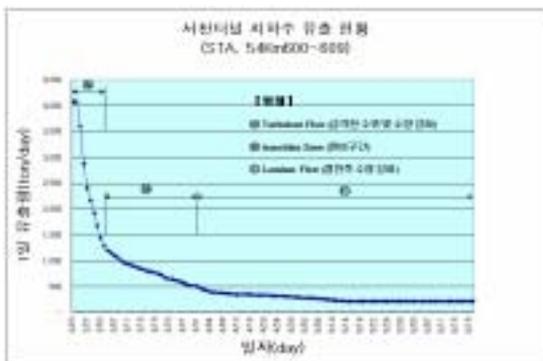
[그림 3] 터널내 침수전경



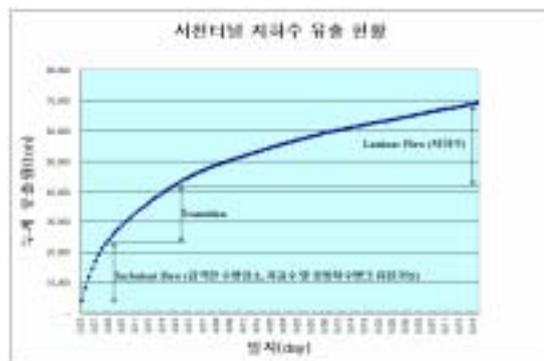
[그림 4] 침수 단면도

2.2 유출 추이

지하수 유출이 발생 후 수위계를 이용하여 1일 유출량을 측정한 결과, 그림 5, 6에서 보는 바와 같이 최초 약 4000ton/day에 이르는 막대한 양의 유출이 발생하였으며, 약 10일 동안에 수위 및 수량이 급하게 감소하였다(Turbulent Flow). 그 이후 20일 동안에는 감소폭이 점차 완만해지는 천이구간 (transition Zone)을 나타냈으며, 마지막으로 1일 유출량의 변화가 거의 없이 일정량을 유지하고 있다 (Laminar Flow).



[그림 5] 유출량 감소 추이



[그림 6] 유출량 누적 추이

3. 원인 분석

3.1 지형 및 광역지질

본 지역은 강원도 서천리 일대로 주변에 북한강이 사행천으로 발달하고 있다. 산세는 험준한 경사를 이루고 있으며, 지형발달 윤희상 장년말~노년기에 해당하는 지형이고, 산세는 북서-남동방향과 남북방향으로 분포하고 있다. 본 현장의 북측에 북한강이 위치하고 있어 수계는 북류하여 북한강으로 유입된다. 북한강은 남서방향으로 흐르면서 본 현장 시점부에서 북남향하고 있다. 터널누수가 발생한 STA54km600지점은 계곡부이며 동서로 낙엽이 쌓여 있는 습지 상태의 넓은 구릉지를 형성하고 있다.

광역 지질은 선캠브리아기의 흑운모편마암, 규암 및 석회 규산염암이 분포하고 일부구간에서 제4기의 충적층이 부정합으로 피복되어 있다. 그림 7의 지질도를 보면, 용출수가 발생한 위치(STA56km600~56km640)는 암중 경계구간(편마암, 규암)으로 추정된다.

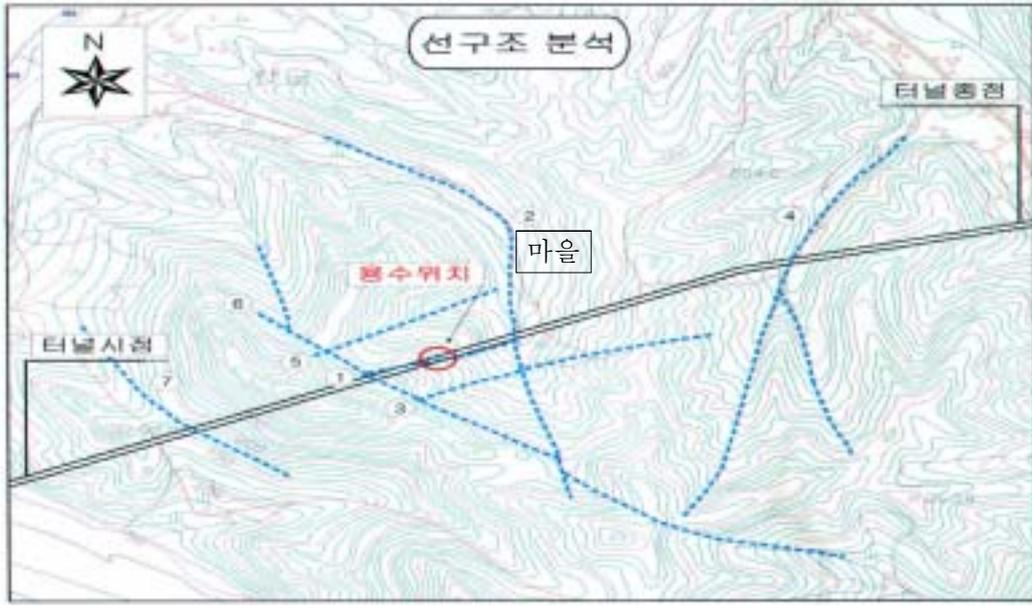
지표 노두관찰 결과, 엽리의 주향은 N40E~N40W로 다양하며 경사는 40~80°의 급경사를 보이고 있다. 습곡구조가 발달한 본 지역에서 단층은 EW/82S, N15E/30E, N4E/70NW, N60W/60NE의 상태로 분포하고 있다. 용출지역에서의 단층대는 매끈한 면(slickenside)을 가진 암중경계면을 이루고, 점토(Clay) 및 각력(Breccia)이 협재하는 연약한 파쇄 상태를 보인다. 지표수 유입 및 이동은 이러한 단층 파쇄대를 통하여 이루어진 것으로 추정되며, 규암층의 절리부를 통하여 유출이 발생하였다.



[그림 7] 지질도

3.2 선구조

선구조 분석을 통하여 지하수 유입경로 및 지하수 유입에 따른 인근 지역에 미치는 범위등을 파악하고자 하였다. 선구조의 연장선, 위치, 방향성 등은 터널굴착과 관련하여 중요한 인자이다. 그림 8은 서천터널과 관련하여 영향을 미칠 수 있는 주요 선구조를 나타내며, 분석결과, 지하수 용출이 발생한 STA54km600구간을 중심으로 지하수 용수와 직접 또는 간접적인 관련성이 있는 선구조가 나타났으며, 특히 STA54km600구간에서 굴진방향과 평행~사교하는 선구조는 다른 선구조와 연결성을 가지며, 터널내 지하수 용출과 주변 지하수위 저하에 영향이 큰 것으로 파악되었다. 그러나 STA54km600구간의 지하수 용출과 관련하여 STA55km000~서천터널 종점측의 선구조와 연결성은 나타나지 않았다. 표 1은 용출수와 관련한 선구조의 특성을 분석한 결과이다.



[그림 8] 선구조 분석결과

선구조 번호	용수와의 관련성	주변지하수에 미치는 연관성
①번	- 터널 선형과 평행 - 용수공급과 직접적 관련	- ①②③⑤⑥번과 연결 - ②번선 부근 마을의 지하수위 감소에 영향 미칠 수 있음
②번	- 터널을 거의 연직 교차 - 용수공급과 직접적 관련	- ①③⑤의 선구조와 관련 - 지하수 수위저하에 직접적인 영향
③번	- 터널 방향과 평행 - 용수공급과 직접적 관련	- 수원공급에 영향
④번	- 터널을 경사 교차 - 용수공급과 관련성 없음	- 수원공급에 간접적인 영향
⑤번	- 터널 방향과 평행 - 용수공급과 직접적 관련	- 수원공급에 직접적인 영향
⑥번	- 터널방향과 경사 교차 - 용수공급과 직접적 관련 - 향후 굴진시 용출가능성	- 수원공급에 직접적인 영향
⑦번	- 터널방향과 경사 교차 - 용수공급과 관련성 없음 - 향후 굴진시 용출가능성	- 수원공급에 간접적인 영향

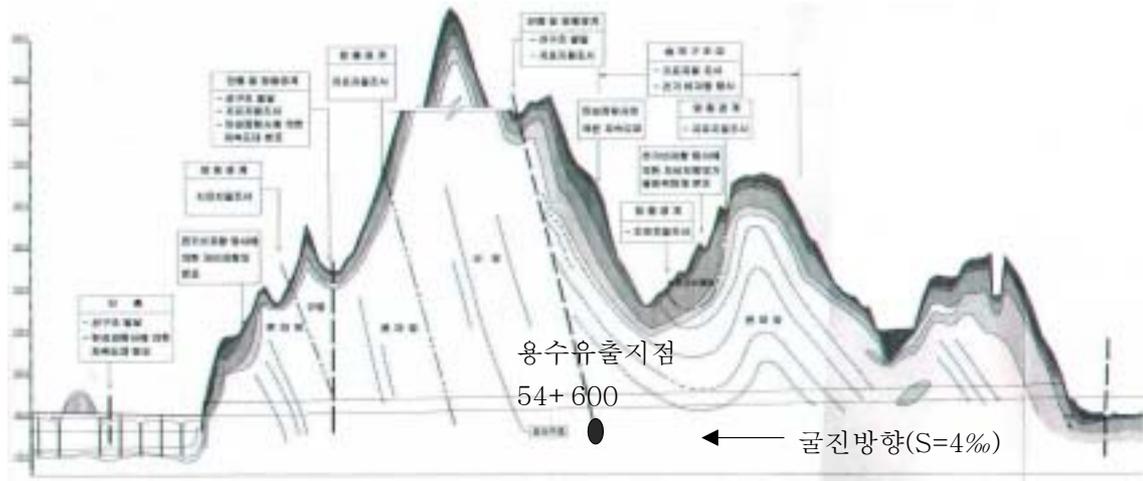
[표 1] 선구조의 특성

3.3 지층분포 및 전기 비저항 탐사

그림 9의 서천터널 지층분포를 살펴 보면, STA53km900~54km600구간은 편마암~규암~편마암이 경계를 이루는 암종변화구간이다. 또한, STA55km100~55km200구간은 향사습곡 구간이며, STA55km200~56km250구간은 배사습곡 구간이다. 용출 유출지점(STA54km600)은 의 토피고는 약 170m이다.

지하수 용출이 발생된 STA54km600구간(P-1)을 중심으로, 지층 하부의 지질구조(파쇄대, 단층, 지층 두께 및 심도 등)와 지하수, 지열지대의 분포 등을 파악하기 위하여 전기비저항 탐사를 실시하였다. 이 탐사법은 각 지층별 물리적 성질, 즉 전기 전도도의 차이에 따른 상대적 전기 비저항의 변화에 따라 지층의 특성을 규명할 수 있으며, 조사구간에 대하여 3점 배열법으로 탐사를 시행하였다.

탐사결과, STA54km600구간에서는 지표면 지반고 GL(-)0~40m, GL(-)60~80m 및 GL(-)170~200m 깊이에서 지하수 이동로로 추정되는 낮은 값의 비저항치 분포가 확인되었다. 또한, STA54km800구간(P-2)구간에서도 GL(-)0~20m, GL(-)25~65m 및 GL(-)95~150m에서 지하수 이동로로 추정되는 낮은 값의 비저항치 분포가 확인되었다. 그러나 STA55km000(P-3)구간의 경우, 지표면 일부를 제외하고 지하수 이동로로 추정되는 비저항치 분포는 나타나지 않았다. 이러한 결과는 막장내 발생된 지하수 유출현상과 상관성을 나타내고 있다. 즉, STA54km600(P-1) ~ STA54km800(P-2) 구간에서 지하수 이동로로 추정되는 단층 파쇄대가 위치하며, 지표에서 터널 유출부위까지 그림 9에서와 같이 급경사를 이루는 형태로 지하수 유입에 직접적인 관련성을 보이는 것으로 추정된다.



[그림 9] 종단면 지층분포

3.4 공내 영상 조사

광역지질, 선구조, 지층탐사 및 막장관찰 자료를 토대로 지하수 유출부위에 대한 육안관찰을 위해 시추공 영상 촬영을 실시하였다. 그림 10과 같이 공내 영상촬영을 위하여 막장 좌측 전면부 1개소와 지하수 유출부위 좌측 2개소(측벽)에 대하여 직경75mm, 굴진장 20m의 수평천공을 실시하였다. 공내 영상촬영 결과, 그림 11과 같이 지하수 유출이 발생된 부위에서 빠른 속도로 용수 유출이 단층대를 통하여 진행되고 있는 것을 육안으로 확인하였으며, 2조의 단층이 터널굴진방향과 사교하고 있는 것으로 나타났다. 한편 막장 전면부에 대한 공내 영상촬영결과, 굴진장 20m 중 2~3m 구간에서 지하수 유출이 소량 발생되고 있었으나, 이후 구간에서는 지하수 유출이 없었으며, 암질상태는 양호한 것으로 조사되었다.



[그림 10] 측벽 천공 사진



[그림 11] 공내영상 촬영사진

3.5 조사공의 지하수 특성

용출수의 수질을 분석하기 위하여 터널 측벽부 공내 영상촬영시 20m정도의 천공위치에서 채취된 시료를 이용하여 분석하였다. 분석결과, 채취위치에서 지하수의 온도가 1번 공에서 13.9℃로 지표의 대기온도(1~13℃)와 비슷하며, PH는 5.29로 일반적인 지표수와 비슷한 값을 나타냈다. 이러한 자료를 근거로 볼 때, 막장에서 유출되는 용출수는 지표로부터 단층파쇄대를 통하여 유입되고 있을 가능성이 큰 것으로 추정된다. 그러나, 15번공의 경우는 온도가 14.6도, PH가 7.26으로 지표수와는 다른 값을 나타내고, 지중에 분포하였던 지하수로 판단된다.

4. 지하수 처리 대책

4.1 주변지역의 장기 수위변동 예측

터널 용수지역의 전반적인 지하수위 분포 및 유동경향을 파악하기 위하여 수리모델링을 실시하였다. 수리모델링은 터널계획고를 기준으로 하고, 수문경계 등 현장여건을 고려하여 설정하였다. 수치해석은 수문특성을 고려할 수 있는 Visual modflow를 사용하였다. 모델링결과, 터널굴착 1년경과 후 지하수위 감소는 용출지역 주변에서 24.5m로 최대이고, 3년 경과 후 최대 28.2m, 5년 후 28.3m, 10년 후 28.5m로 각각 분석되었다. 터널 굴착 3년 이후 점진적으로 지하수위가 안정되는 것으로 분석되었으며, 인근 지역 마을의 지하수위 감소에 대한 장기적인 영향은 미소한 것으로 판단된다.

4.2 대책

이상과 같은 검토결과를 토대로 볼 때, 본 터널의 과도한 지하수 용출의 원인은 터널 측벽부로부터 3~5m 이격된 수직 단층대가 지표까지 연결된 상태로 지표수의 직접적인 유입통로를 형성하였기 때문으로 판단된다. 이 단층에서의 지하수 유입은 유입량의 공급여부에 따라 침투속도가 빠르고 지속적으로 발생 가능성이 있어 장기적인 처리 대책이 필요하다. 단층파쇄대와 터널 막장면과의 공간에 대한 보강 및 차수대책을 통해 지하수 유입을 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

대규모의 지하수 유입이 발생된 본 지역의 지반 특성(단층 파쇄대 특성)을 고려하여 다음과 같은 보수보강대책공법을 선정·적용하였다. 현 설계가 일정량의 지하수 유입을 허용하고 유입수를 유도배수하는 배수터널 개념으로 이루어진 것을 고려하였으며, 이에 따라 인근 지하수위 저하를 최소화, 장기적인 터널의 안정성을 확보할 수 있도록 하였다.

지반의 보강효과를 기대할 수 있는 시멘트계 강관다단 그라우팅 시공을 원칙으로 하며, STA54km610~54km575(L=35m)구간은 폴리우레탄계 TAS공법으로 1차 차수(L=3.0m)를 시킨 후 시멘트계 강관다단 그라우팅(Cement Grouting)으로 보강하였다.

본 대책공법 적용 후 유입된 지하수는 소량으로 배수시설에 의한 처리가 가능하였다. 또한 장기적인 터널의 안전성 확보에 대한 대책공법의 효과 확인을 위해 용출구간을 중심으로 계측을 통한 수압의 변화를 파악하였다. 계측 결과, 수두압은 최대 0.109t/m²로 미소하였으며, 터널의 내공변위가 수렴하는 것을 확인하였다. 이러한 결과를 통하여 적용 대책공법은 지하수 용출을 방지하고 장기적인 터널 안정성 확보에 효과가 있는 것으로 판단되었다.

5. 맺음말

본 사례는 경춘선 6공구 내 연장 2,535m의 서천터널(53km580~55km 1150) 굴착 중 종점에서 시점방향으로 1,151m 굴진한 지점 STA54km600에서 발생한 용수유출에 관한 보수보강사례이다.

용수 유출에 대한 원인 분석을 위한 광역지질 조사, 선구조 분석, 지층탐사, 유출부위에 대한 공내영상촬영 결과, 용출수가 발생한 위치(STA56km600~ 56km640)는 암중 경계구간(편마암, 규암)으로 단층 파쇄대 상태이며, STA54km600구간에서 굴진방향과 평행·사교하는 선구조는 다른 선구조와 연결성을 가지는 것으로 나타났다. 또한, STA54km600(P-1) ~ STA54km800(P-2) 구간에서 지하수 이동로로 추정되는 단층 파쇄대가 위치하고 지표에서 터널 유출부위까지 급경사를 이루는 형태로 존재하는 것으로 파악되었다. 채취된 용출수의 수질 분석결과, 지표수와 유사한 특성을 갖는 것으로 나타나 지표수의 단층파쇄대

를 통한 대규모 유입이 확인되었다.

이러한 결과를 토대로 보수·보강대책 적용후 주변 지역의 장기적인 지하수위 변동 영향을 수치해석을 통하여 검토한 결과 장기적인 영향은 미소한 것으로 판단되었으며, 따라서, 인근 지하수위 저하를 최소화 및 장기적인 터널의 안정성을 확보할 수 있는 대책을 수립·적용하였다.

용출 유출 구간(STA54km610~ 54km575(L=35m))에 대하여 폴리우레탄계 TAS공법으로 1차 차수(L=3.0m)를 시킨 후 시멘트계 강관다단 그라우팅(Cement Grouting)으로 보강하였다.

대책공법의 효과 확인을 위해 수압의 변화에 대한 계측을 실시한 결과, 수두압은 최대 0.109t/m²로 미소하였으며, 터널의 내공변위가 수렴하는 것으로 나타나 지하수 용출 방지 및 장기적인 터널 안정성 확보에 효과가 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 경춘선 복선전철 제 6공구 건설공사 실시설계보고서
2. 경춘선 6공구 건설공사 서천터널 지하수 유출 안정화 대책 안전진단보고서