

# 지하수 과다유출 풍화대에서의 터널 굴착 및 보조공법 적용



문 경 선  
하경엔지니어링  
터널지반부 과장



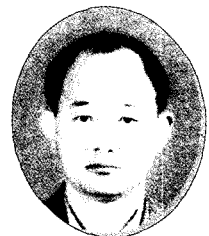
신 영 완  
하경엔지니어링  
터널지반부 이사  
(ywshin@hakyong21.co.kr)



박 태 수  
하경엔지니어링  
터널지반부 상무



이 인 기  
하경엔지니어링  
터널지반부 사장



조 염 래  
쌍용건설(주)  
현장소장

## 1. 서론

최근 국가경제의 눈부신 발전으로 교류되는 물동량 및 교통량이 폭발적으로 증대되고 있으며, 국토의 균형적인 발전을 위하여 다양한 사회기반 시설물이 계획되고 시공이 진행되고 있다. 사회기반 시설의 연결고리인 교통망은 통행의 품질향상과 용지보상 및 환경적인 문제 등으로 선형이 직선화되어 계획됨에 따라 전체 노선중 교량 및 터널구간이 증가되는 추세이다.

특히, 터널의 경우, 산악지형이 많은 우리나라의 지형적인 특성을 고려하였을 때, 교통망의 신설 및 개량계획의 주요 구조물로서 그 중요도가 매우 높다. 현재 국내의 터널 설계 및 시공기술은 지속적인 기술개발과 다수의 시공경험으로 상당한 수준인 것으로 평가되나, 예측하기 곤란한 불확실성을 내포한

지반에 대하여 국부적인 지반조사 결과를 토대로 터널설계 및 시공계획을 수립해야 하는 어려움이 있어 시공 중, 지속적인 계측관리를 통하여 대상 굴착지반에 적절한 지보패턴 변경이 수반된다.

터널구간의 설계변경을 통하여 경제성 및 시공성 향상을 기대할 수 있지만, 본 중앙선 00~00간 복선 전철 건설공사와 같이 굴착 중, 설계단계에서 예측하지 못한 불량한 지반조건과 다량의 지하수 유출로 인하여 장·단기적인 터널의 안정성을 확보하기 위한 대책공법을 선정하는 경우가 다수이다.

터널의 보강대책공법의 적용은 시공중 안정성과 더불어 운영중의 안정성이 확보되어야 하므로, 굴착 대상 지반에 대하여 폭넓고 구체적인 조사계획 수립이 요구된다.

따라서, 시추조사 및 물리탐사와 실내 및 현장시험을 수행하여 수집된 자료를 토대로 터널 전방 굴

## 지하수 과다유출 풍화대에서의 터널 굴착 및 보조공법 적용

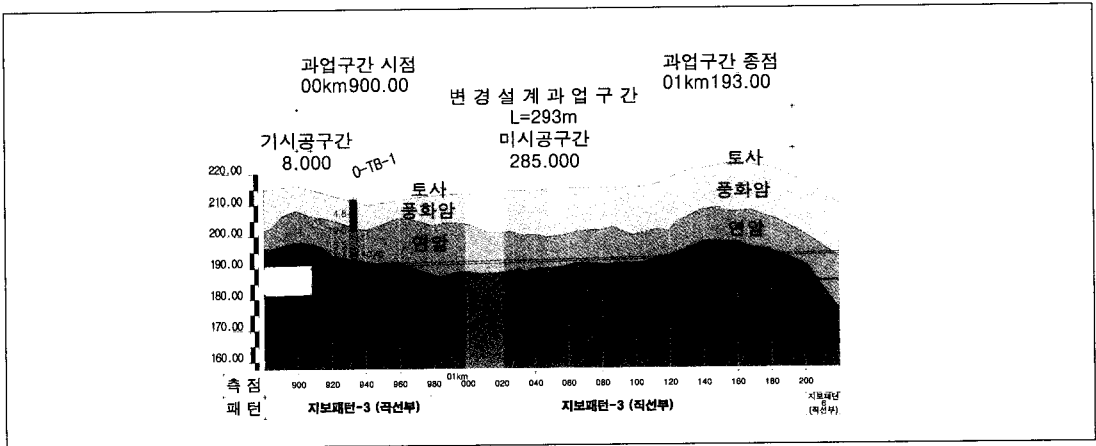
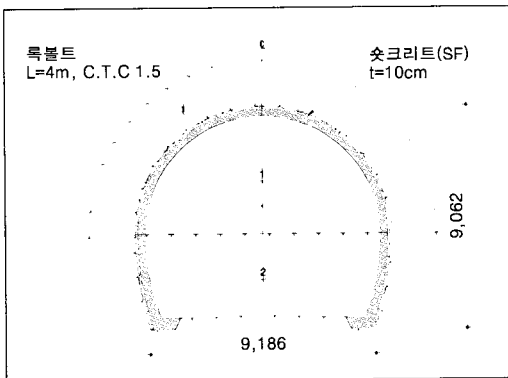
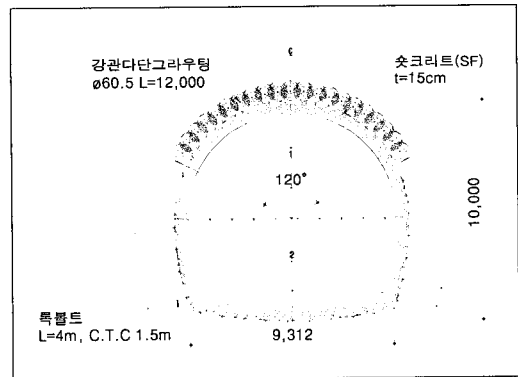


그림 1. 원설계 지반조건 및 시공현황



지보패턴 3(원설계)



지보패턴 4-1(변경 지보패턴)

그림 2. 원설계 및 변경지보패턴

착지반의 공학적인 특성 및 수리적인 특성을 재평가한 후, 다각도의 안정화 검토를 수행하여 현장의 지반 특성 및 시공여건에 적절한 보강대책공법과 공사 중 배수계획을 수립하였다.

## 2. 시공현황

본 터널은 원안설계에 준하여 시점부로부터 종점

관통부로 굴착을 진행하던 중, 불량한 암반의 출현으로 암반정에 의한 지보패턴 변경(지보패턴3→지보패턴4-1)을 통하여 굴착을 수행하였다.

굴착 중, 원안설계에서 예측하지 못한 토사화가 진행된 지반조건과 다량의 막장면 지하수 유출로 인하여 터널 굴착이 불가한 것으로 평가됨에 따라, 강관보강 그라우팅에 의한 터널 천단부 보강과 슛크리트에 의하여 터널 막장을 폐합시켜, 터널의 안정성을 확보한 후 터널굴착을 중지하였다.

표 1. 터널사고 원인 및 유형별 특성

구분	터널사고 원인의 유형	유형별 특성	평가
설계 측면	예상하지 못한 지질학적 원인	· 불량한 지반조건외의 출현 · 지반특성 파악을 위한 충분한 조사 미비 · 부적절하게 평가된 지반조사 자료를 통한 설계입력정수 결정	○
	계획과 시방조건 미비	· 저토피부 형성 · 지질학적 조건을 고려하지 못한 굴착계획 · 지반특성의 평가 및 판단의 오류에 의한 부적합한 지보패턴 적용 · 부적합한 지보재 및 허용오차 선정	△
	수치해석 및 구조계산의 오류	· 설계입력자료 입력의 오류 · 지하수 영향 미고려 · 부적절한 해석모델 및 계산 프로그램 적용	-
시공 측면	시공 실수	· 도면 및 설계시방에 부합되지 못한 굴착계획 및 지보재 시공	-
	경영과 관리 실수	· 경험이 미숙한 시공관리인의 상주 · 터널 시공실적 및 능력이 저급한 시공사 선정 · 불합리한 감리제도 도입 · 터널 시공 시, 계측결과의 반영 미숙	-

### 3. 변경설계 발생원인 고찰

일반적으로 터널에서의 설계변경은 터널붕괴 사고원인 해결에 목적을 두므로, 과업구간 현황이 어떠한 원인의 붕괴사고를 유발시킬 수 있는가를 파악하는 것이 현장에 부합되는 최적의 대책공법 선정에 매우 중요한 인자로 작용하므로, 이에 대한 파악 및 평가가 요구된다.

본 과업구간은 원설계시, 상부지반에 민원발생지역의 분포로 지반조사가 심도 깊게 이뤄지지 않아 터널구간 지반분포 및 특성을 정확하게 파악하지 못하여, 적절한 지보패턴 및 보강계획을 수립하지 못한 경우로 판단되었다.

따라서, 이를 주안점으로 추가적인 지반조사 항목 및 계획을 수립하여, 현장상황에 적합한 최적설계를 수행하였다.

### 4. 지질 및 지반특성

#### 4.1 원설계 지질 및 지반특성 고찰

과업구간의 지질특성은 제4기 충적층과 중생대 주라기 화강암류에 속하는 각섬석흑운모화강암, 흑운모화강암 및 복운모화강암이 광역적으로 분포되어 있으며, 각 암상의 광물성분과 조직의 변화는 심도 및 분포지역에 따라 점이적인 양상을 나타내는 것으로 조사되었다.

원안설계 시, 민원발생에 의한 시추조사 미시행으로 물리탐사(탄성파탐사)에 의존한 지층분포 파악 및 암반등급을 분류하는 것으로 계획하였다.

그 결과, 탄성파 속도가 3,406m/sec 이상 측정됨에 따라, 근접 수행된 시추조사 결과와 연계하여 암반등급을 Ⅲ등급의 연·경암으로 평가하여 설계(지보패턴3)에 반영하였다.

## 지하수 과다유출 풍화대에서의 터널 굴착 및 보조공법 적용

### 4.2 변경설계를 위한 지반조사

지질 및 지형도분석을 통한 지질학적인 특성과 단계별 굴착에 의한 막장의 암반상태 및 지하수 유출현황 등을 종합적으로 파악하여 시추조사 및 물리탐사(전기비저항 탐사)를 수행하였다. 또한, 현장 및 실내시험을 수행하여 지반의 공학적 특성 및 수리학적 특성을 파악하였다.

#### 4.2.1 지층분포 및 지반 공학적 특성

지반조사 계획에 의하여 수행된 수직(TB-1,2) 및 수평시추(HB-1,2,3) 결과, 풍화토 및 풍화암층이 터널하부까지 분포되어 있는 것으로 파악되었으며, 특히 과업시점부에서는 그 경향이 더욱 두드러지게 나타나 암반분류(RMR, Q분류)에 의한 암반등급 평가

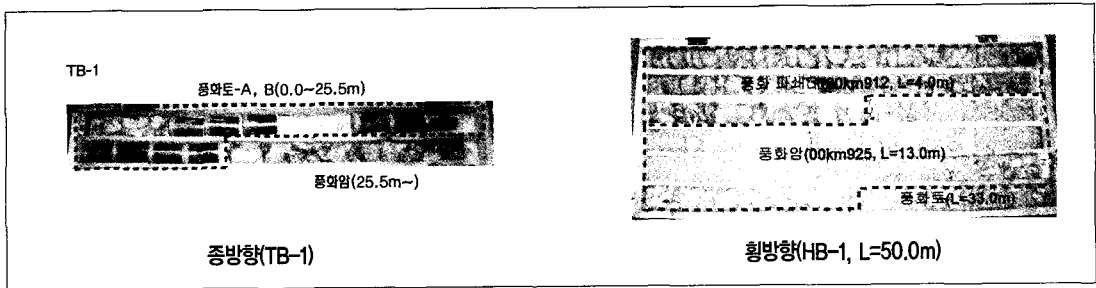
가 불가한 것으로 파악되었다.

또한, 지반의 지층분포 특성을 광역적으로 파악하기 위하여 수행된 물리탐사(전기비저항 탐사) 결과,  $300\Omega \cdot m$  이하의 낮은 비저항 값을 나타냈으며, 비교적 폭넓은 비저항대가 존재하는 것으로 검토되었다.

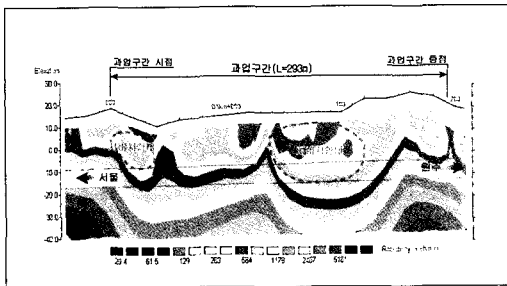
따라서, 시추조사 및 물리탐사(전기비저항 탐사) 결과에 의한 지층현황은 다음과 같이 사질토 성분의 풍화토 및 풍화암층이 터널 계획노선주변에 폭넓게 분포하는 것으로 검토되었다.

#### 4.2.2 수리학적 특성

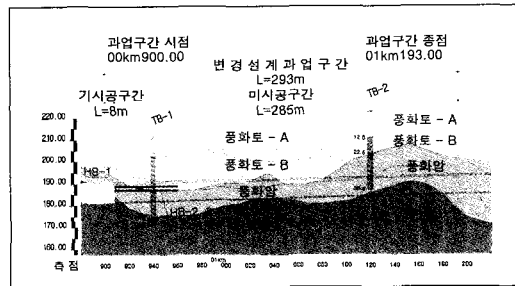
막장 전방의 지반상태를 파악하기 위하여 계획된 수평시추조사(HB-1, 2, 3, L=50.0m) 계획에 의하여 최초 HB-1을 선시추한 결과, 투수계수(K)가 큰 사질토 성분의 풍화토 및 토사화가 진행된 풍화암이



시추조사



물리탐사



지층분포현황

그림 3. 추가 현장조사 및 지층분포

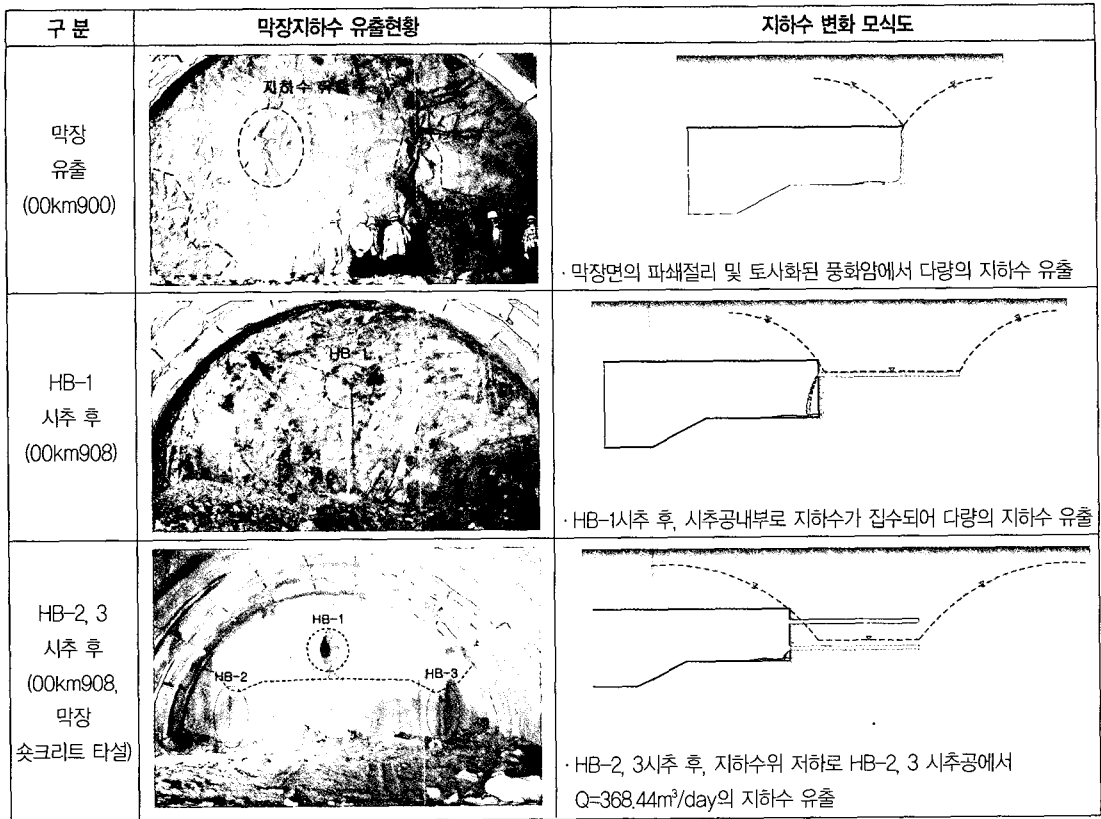


그림 4. 수평시추공 배수에 의한 지하수위 변화

표 2. 과업구간 지층별 지반 특성값

구 분	단위중량 ( $\gamma$ , t/m <sup>3</sup> )	변형계수 (E, t/m <sup>2</sup> )	포아송비 ( $\nu$ )	점착력 (c, t/m <sup>2</sup> )	내부마찰각 ( $\phi$ , °)	투수계수 (K, cm/sec)
풍화토-A	1.80	2,200	0.35	2.0	30.0	K=8.434E-04
풍화토-B	1.84	4,100	0.32	1.48	33.0	
풍화암	2.00	7,300	0.30	1.80	34.0	
연 암	2.36	130,000	0.27	14.0	39.0	

분포하는 것으로 확인되었으며, 시추공을 통하여 상당량의 지하수가 유출되었다.

따라서, 막장면을 통하여 유출되는 지하수의 분포 및 유량(Q)을 파악하기 위하여 단계적으로 HB-2, 3을 추가 시추한 후, 막장관찰과 유량측정 시험을 수행

한 결과, 다음 지하수 변화 모식도와 같이 HB-2, 3시추로 인하여 HB-1의 지하수 유출은 서서히 감소하다 정지되었으며, 주변지반이 서서히 건조되는 것이 확인되었다. 또한, HB-2, 3을 통하여 유출되는 지하수 유량(Q)은 368.44m<sup>3</sup>/day인 것으로 측정되었다.

## 지하수 과다유출 풍화대에서의 터널 굴착 및 보조공법 적용

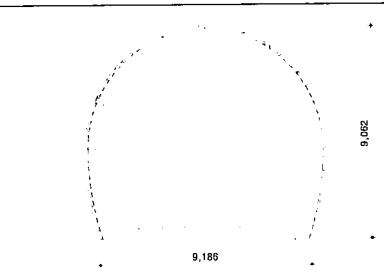
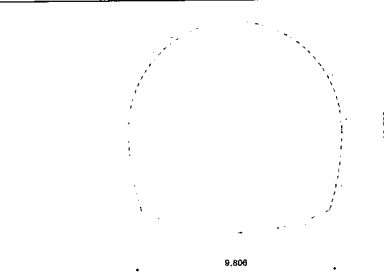
구분	원안	변경안
단면도		
특징	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 외력에 대하여 구조적으로 불안정</li> <li>· 굴착단면 우각부에 응력 집중</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 굴착 단면적이 다소 증가되나, 인버트 설치와 슛크리트에 의한 내공폐합으로 외력에 대한 구조적 안정성 우수</li> <li>· 굴착단면 우각부의 응력집중 감소</li> </ul>

그림 5. 원안 및 변경설계 터널단면도

### 4.3 설계 지반정수 산정

터널안정 검토를 위한 지반정수는 터널안정에 직접적으로 영향을 미치는 터널 천단 1.0~2.0D(터널 폭)구간의 지반에 대하여 실내 및 현장시험을 통하여 다음과 같이 지층별 지반정수를 결정하였다.

## 5. 터널 안정화 대책공법 검토

과업 터널구간에 시행된 지반조사 및 터널 막장관찰 결과, 심한 풍화작용에 의한 토사화된 지반조건과 다량의 지하수 유출조건( $Q=368.44\text{m}^3/\text{day}$ )으로 인하여 현장여건에 적절한 터널단면, 굴착공법 및 보강공법의 적용이 요구됨에 따라, 안정성 및 현장 적용성을 고려하여 안정화 대책을 수립하였다.

### 5.1 터널단면 및 굴착공법 검토

#### 5.1.1 터널단면 검토

과업 터널구간의 지반조건은 굴착이 진행될수록 토사화된 풍화암층 및 풍화토층이 터널 바닥부까지 분포됨에 따라, 굴착 내공단면 및 막장의 안정성에 주안점을 두어 터널단면의 형상을 결정하였다.

#### 5.1.2 터널 굴착공법 검토

일반적으로 터널 굴착 시, 터널의 안정은 조기에 적정한 지보 시스템과 보조공법의 적용으로 확보되나, 현장여건(지반조건 및 작업환경)이 반영된 시공 시간을 고려할 때, 굴착 직후 막장의 안정성이 요구되므로, 문헌자료(RMR분류)에 의한 막장 무지보 자립시간 검토를 통하여 굴착공법 및 보강공법의 적용성을 평가한 후, 수치해석을 통한 적용 굴착공법의 적정성을 검토하였다.

#### ■ 굴착공법의 적용성 검토

추가 지반조사 결과, 터널 막장 전방의 지반은 매우 심한 풍화작용에 의한 토사화가 진행된 상태로, 굴착중 수행된 임판정 결과(00km908, RMR=21점)를 고려하여, RMR분류의 최하등급인 RMR<20로

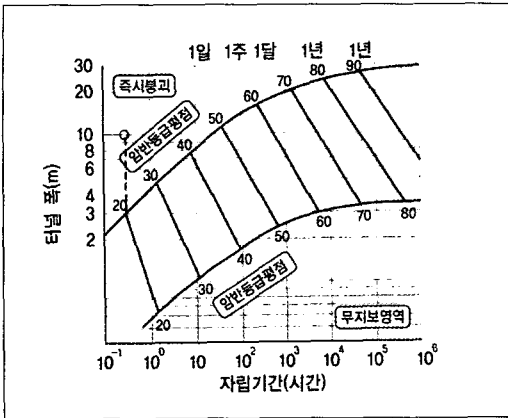


그림 6. RMR등급에 의한 터널 무지보 자립시간 평가

가정하여 무지보 자립시간을 검토하였다.

- 무지보 스패를 추정하여 터널 폭이 무지보 스패보다 크면 분할굴착이 필요.
- 터널 폭에 대한 무지보 자립시간이 짧으면 분할굴착 및 보조공법 필요.

RMR등급에 의한 터널의 무지보 자립시간을 검토한 결과, 터널 폭이 3.0m이하의 분할굴착이 필요하며, 과업 터널구간의 불량한 지반 및 수리적인 특성을 고려하였을 때, 터널 분할굴착 계획과 더불어

추가적인 막장 안정화 대책 및 보조공법의 적용이 요구되는 것으로 검토되었다.

### ■ 분할굴착 공법 검토

과업터널구간의 지반은 공학적인 강도특성이 매우 취약하여 터널막장의 안정성을 보장할 수 없는 상태로 평가되어, 굴착 중 막장지반의 전단저항력 소실에 의한 콘블록 형태의 파괴가 발생할 가능성이 매우 높은 것으로 판단되었다.

따라서, 수치해석을 통하여 원 설계에서 계획된 상하분할 굴착과 막장 안정화 대책으로 일반적으로 적용되는 링컷 굴착(Ring Cut)의 거동특성을 평가하여 적용성을 검토하였다.

3차원 수치해석을 통한 상하분할 및 링컷 굴착에 대한 거동특성을 검토한 결과, 과업구간의 불량한 지반조건의 영향으로 상하분할 굴착의 경우, 막장면 전단저항력의 소실로 천단 및 내공변위가 크게 발생되었으나, 링컷 굴착의 경우에는 코어부의 막장지지 효과로 변위량이 상당부분 감소하는 것으로 검토되었다. 따라서, 굴착작업 시 터널의 안정성 확보를 위

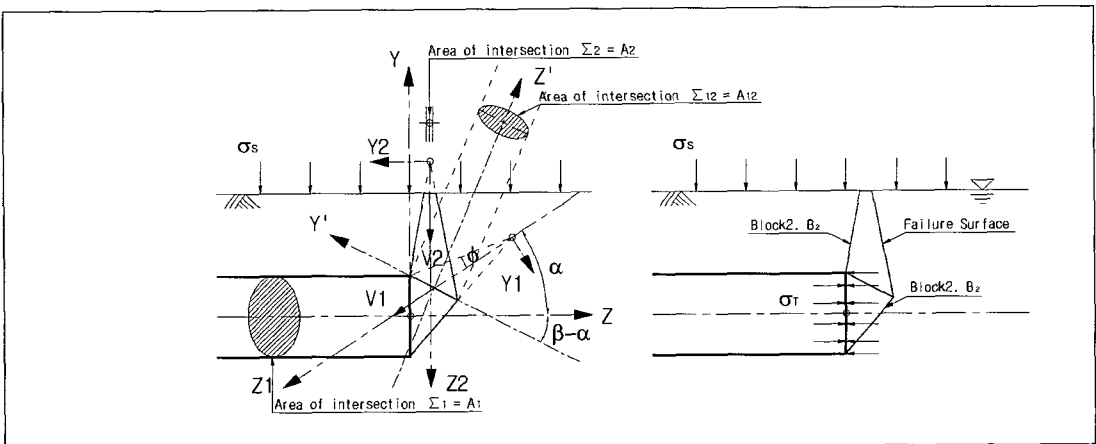


그림 7. 막장의 콘블록 파괴 메카니즘

## 지하수 과다유출 풍화대에서의 터널 굴착 및 보조공법 적용

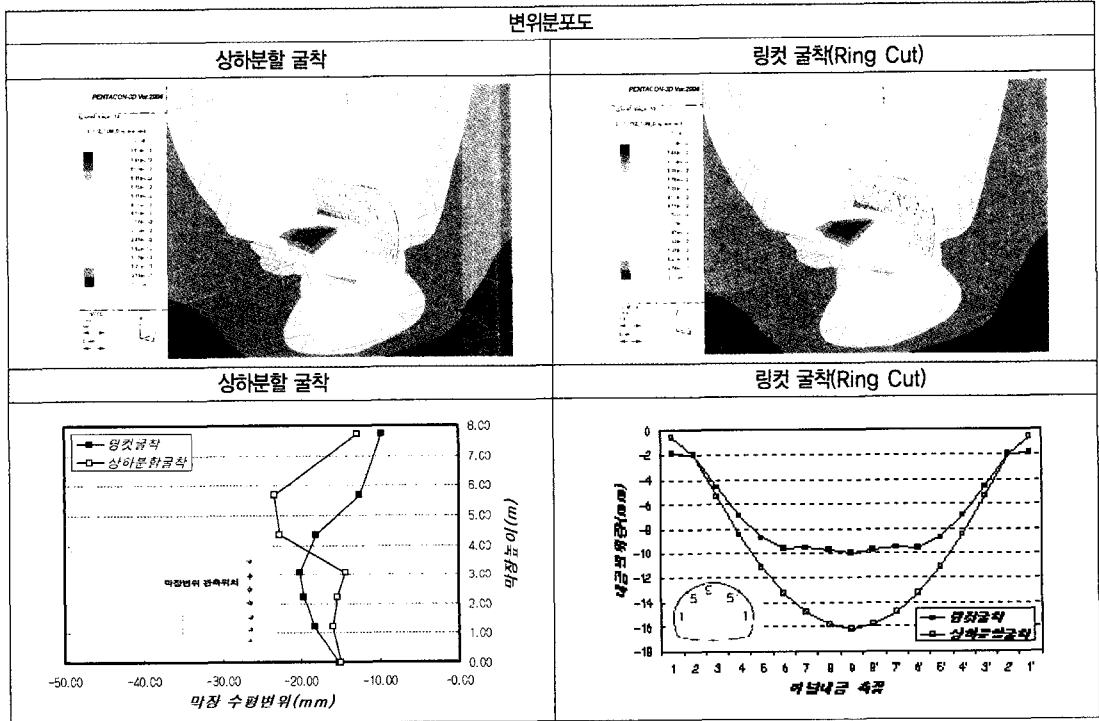


그림 8. 상하분할 및 링컷굴착에 의한 터널 거동특성 분석

하여 링컷 분할굴착공법을 변경설계에 반영하였다.

### 5.2 보강공법 검토

본 과업구간 터널시공계획은 「5.1.2 터널 굴착공법 검토」에서 언급한 바와 같이 터널 무지보 구간 및 막장의 안정성 확보를 위하여, 분할굴착, 막장 안정화 대책 및 보강공법 적용이 요구되는 것으로 검토되었다. 따라서, 코어의 막장보강으로 종방향 야칭 효과에 의한 지반의 전단강도 증진이 기대되는 링컷 분할굴착공법의 적용을 제안하였으나, 과업구간 지반의 강도 및 수리적인 특성이 매우 불량하여 지반 자체의 강도증진은 한계성이 있는 것으로 판단됨에 따라, 추가적인 보강공법의 적용이 요구되는 것으로

평가되었다.

터널 갱내보강 방안으로는 일반적으로 강관과 그라우팅에 의하여 빔야칭 효과를 기대할 수 있는 선진보강공법(UAM)이 적용되며, 지반 및 수리적인 조건에 따라 강관의 형식, 보강범위 및 그라우팅 주입제를 선택적으로 적용한다.

따라서, 과업 터널구간의 지반조사에 의한 지층분포 및 다량의 지하수 유출조건을 토대로 지보패턴 구간을 결정된 후, 강관의 보강범위 및 그라우팅 주입재를 다음과 같이 적용하는 것으로 계획하였다.

### 5.3 터널 안정성 검토

과업 터널구간의 지반조사에 의하여 결정된 지반



표 3. 변경설계 지보패턴 및 보강공법 적용

구분	지보패턴5-3	지보패턴5-4
개요도		
지반 특성	<ul style="list-style-type: none"> <li>터널 상반 - 사질 풍화토</li> <li>터널하반 - 풍화암</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>터널 상반 - 풍화암</li> <li>터널하반 - 풍화암 및 연암</li> </ul>
보강 공법	<ul style="list-style-type: none"> <li>직천공 강관보강 그라우팅</li> <li>측벽지지 파일</li> <li>시멘트 밀크 주입</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>일반 강관보강 그라우팅</li> <li>시멘트 밀크 주입</li> </ul>
공법 특성	<ul style="list-style-type: none"> <li>터널 천단에서 측벽부까지 분포된 사질 풍화토에 의하여 강관 천공시 공벽의 붕괴가 예상되므로, 직천공 강관보강 그라우팅 적용</li> <li>터널 하반 굴착 시, 지반이완으로 인한 터널변형을 억제하기 위하여 측벽지지 파일 적용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>터널 굴착전, 강관을 아치부까지 부채살 형태로 설치하고, 시멘트를 주입하여 지반을 고결시켜 빔아치 형성</li> </ul>

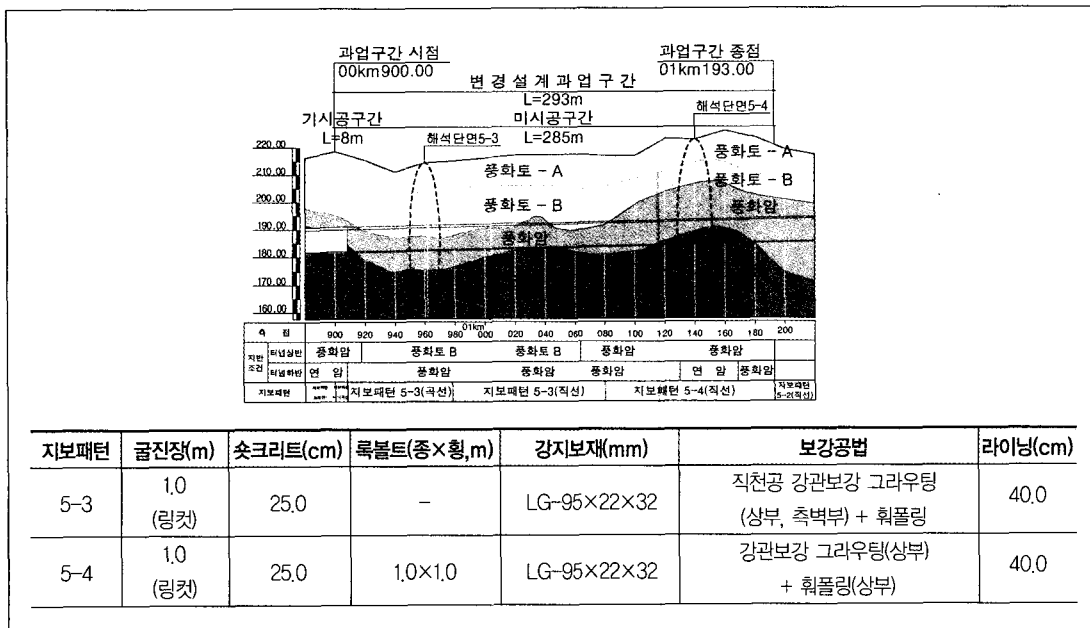


그림 9. 구간별 지보패턴 적용 및 해석위치도

## 지하수 과다유출 풍화대에서의 터널 굴착 및 보조공법 적용

및 수리 특성값을 고려하여 보강공법이 적용된 구간 별 지보패턴의 안정성을 검토하였다. 검토단면은 각 지보패턴 지반특성을 가장 크게 반영할 수 있는 지점을 선정하여 수치해석을 수행하였다.

### 5.3.1 지보재 안정성 검토

수치해석을 통하여 보조 보강공법이 고려된 터널 안정성 검토를 위하여 관련 설계 및 문헌자료를 구간으로 해석영역, 강관보강영역 지반정수 및 하중 분담율(링컷굴착)을 결정하였다. 특히, 과업구간의 불량한 지반조건하에서의 강지보재(LG-95×22×32)는 휨응력에 대한 지보효과를 발휘하는 역할을 하므로 안정검토에 그 지보효과를 고려하여 안정성 검토를 수행하였다.

안정성 검토는 지반범용 수치해석 프로그램인 FLAC2D를 이용하여 터널 시공단계를 모사하였다.

#### ■ 강관보강 그라우팅영역 지반물성

강관보강 그라우팅에 의한 지반 물성값 변화는 일반적으로 변형계수( $E$ ) 및 강도정수( $c, \phi$ )가 증가된다. 여러 관련문헌에 따라 다소 차이가 있으나, 본 과업구간의 사질 풍화토 및 풍화암 조건에서는 변형계

수는 20~40배, 점착력은 주입재의 종류에 따라 매우 크게 증가되는 것으로 제시되어 있다.

따라서, 안전측 검토를 위하여 강관에 의한 보강 효과는 배제하였으며, 그라우팅 보강영역에 대하여 변형계수 및 점착력이 풍화토는 5배, 풍화암은 4배 보강효과가 발휘되는 것으로 선정하였다.

#### ■ 하중 분담율

링컷굴착에 의한 막장 지지코아의 지보효과를 고려한 장<sup>\*)</sup>의 하중 분담율식을 적용하여 지보패턴별 하중 분담율을 결정하였다.

#### ■ 강지보공을 고려한 슛크리트 단면특성 검토

일반적으로, 강지보재는 슛크리트 강도가 발현되기 전에 지보재 역할을 수행하는 임시 지보재로써, 안정검토 시 고려하지 않으나, 과업구간과 같은 매우 불량한 지반조건에서는 슛크리트와 일체화되어 지속적인 지보효과를 발휘하므로 아래와 같은 등가 탄성계수( $E0$ )를 산정하여 수치해석에 적용하였다.

#### ■ 수치해석에 의한 안정검토 결과

상기 지반 및 보강공법을 포함한 지보재 조건을

표 4. 강관보강 그라우팅영역 지반 특성값

구 분	단위중량 ( $\gamma, \text{tf/m}^3$ )	변형계수 ( $E, \text{tf/m}^2$ )	포아송비 ( $\omega$ )	점착력 ( $c, \text{tf/m}^2$ )	내부마찰각 ( $\phi, ^\circ$ )
풍화토-B	1.84	20,500	0.32	7.40	33.0
풍화암	2.00	29,200	0.30	7.20	34.0

표 5. 하중 분담율 적용식(링컷 분할굴착)

시공단계	계 산 식	지지코아 크기에 따른 보정
굴착	$\alpha = 3,340L + 3,778\ln(E)$	· $\alpha$ 에 대한 보정 : 33~36R 만큼 감소
연한 S/C	$\beta = 100 - \alpha - \gamma$	· $\gamma$ 에 대한 보정 : 28R 만큼 증가
강한 S/C	$\gamma = -3,126L + 3,391D$	· R(코아단면적비) : 코아단면적/터널단면적

표 6. 강지보를 고려한 슛크리트 등가 탄성계수(E0) 적용 개념

격자지보 적용 개념도	합성단면 특성치 산정
	<p>· 등가탄성계수(<math>E_0</math>) <math>E_0 = \frac{E_c A_c + E_s A_s}{A_c + A_s}</math>                      (<math>E_c</math>: 슛크리트 탄성계수, <math>E_s</math>: 강지보 탄성계수)</p> <p>· 등가단면2차모멘트(<math>I_0</math>) <math>I_0 = \frac{I_s E_s}{E_0}</math>                      (모멘트는 강지보가 부담하므로 슛크리트 강성은 무시)</p>

표 7. 지보패턴별 터널 안정성 검토결과

구분	지보패턴5-3			지보패턴5-4			
	변위 및 부재력	최대값	허용값	평가	최대값	허용값	평가
최대 주응력도	천단	10.96	-	-	8.08	-	-
	내공	4.56	-	-	4.06	-	-
휨압축응력 (kgf/m <sup>2</sup> )	스틉크리트	38.5	84.0	O.K	56.4	84.0	O.K
	강지보	2,586	3,000	O.K	2,453	3,000	O.K
전단응력(kgf/m <sup>2</sup> )		315.0	1,700	O.K	194.0	1,700	O.K
로볼트 축력(tonf)		-	8.87	-	3.40	8.87	O.K

고려하여 수치해석을 수행한 결과, 지보재의 부재력은 허용값 이내로, 안정한 것으로 평가되었다. 단, 천단 및 내공변위가 다소 크게 발생하는 경향을 나타내므로, 시공 시 지속적인 계측을 통한 관리가 필요한 것으로 검토되었다.

### 5.3.2 콘크리트 라이닝 검토

콘크리트 라이닝은 터널의 주지보재의 기능 저하 혹은 상실에 따른 구조적인 기능과 미관 및 유지관

리 등과 같은 비구조적 기능을 수행한다.

콘크리트 라이닝 설계 및 검토는 구조적인 기능이 확보되는 콘크리트 라이닝의 단면형상과 철근의 보강 유무 혹은 최적의 철근량을 산출하는 것이므로, 대상지반의 공학적 특성 및 수리적인 특성이 반영된 외력을 결정하는 것이 매우 중요하다.

따라서, 과업 터널구간의 사질 풍화도 및 풍화암 조건과 높은 지하수위를 고려하여, 암반이완하중(W<sub>i</sub>)은 Terzaghi의 이완 토압식에 의하여 결정하였

지하수 과다유출 풍화대에서의 터널 굴착 및 보조공법 적용

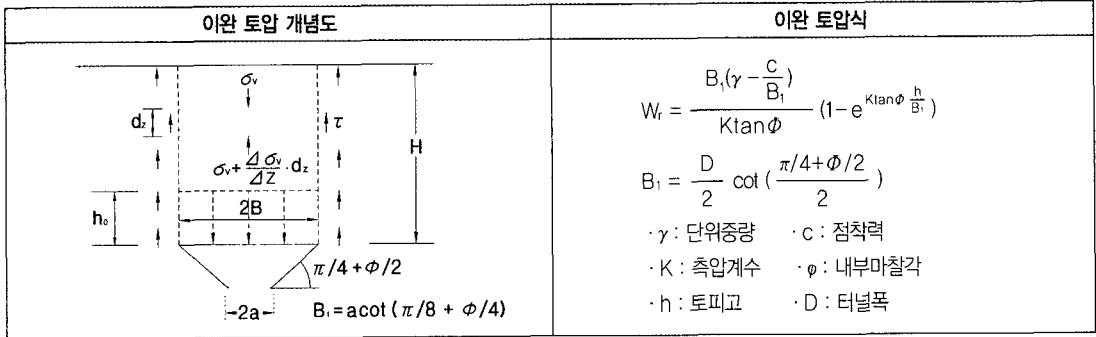


그림 10. Terzaghi 이완 개념도 및 토압식

표 9. 지보패턴별 터널 안정성 검토결과

구분	지보패턴5-3			지보패턴5-4		
구조도 (T=40cm)						
관측위치	주철근	전단철근	사용성	주철근	전단철근	사용성
천단부	D29@125	-	O.K	D29@125	D13@300-2EA	O.K
아치부	D29@125	D19@300-2EA	O.K	D29@125	-	O.K
우각부	D29@125 D22@125	D19@150-4EA	O.K	D22@125	D19@150-4EA	O.K
기초부	D25@125 D22@125	D19@300-2EA	O.K	D29@125	-	O.K

으며, 잔류수압( $W_w$ )은 지반의 세립토 유입으로 터널 배수층의 기능저하를 예상하여  $0.5H_t$  ( $H_t$ : 터널높이)가 작용되는 것으로 가정하여 다양한 하중조합에 의하여 구조검토를 수행하였다.

■ 콘크리트 라이닝 구조검토 결과  
콘크리트 라이닝에 작용될 외력을 다양한 하중조

합에 의하여 구조해석을 수행한 결과, 매우 큰 하중 조건에 의하여 단면두께 40.0cm와 다음과 같은 위치별 보강철근이 필요한 것으로 검토되었다.

### 6. 수리특성을 고려한 배수시스템

터널의 배수설계는 지하수에 의한 터널안정성 저하를 방지하기 위한 것으로, 공사중과 운영중으로 구분된다. 일반적으로 공사중 배수계획은 굴착중 터널 내부로 유입되는 지하수의 처리계획이고, 운영중 배수계획은 NATM 배수터널계획에 따라 방수막, 부직포 및 배수관로의 설치로 지보시스템 및 콘크리트 라이닝의 안정을 도모하는 것을 의미한다.

그러나, 본 과업터널구간과 같이 투수계수(K)가 매우 큰 사질의 풍화토 및 풍화암조건과 다량의 지하수 유출조건에서는 공사중 지하수 유출에 의하여 지반의 전단강도 소실로 인한 지보 시스템에 심각한 문제점을 야기시킬 수 있으므로, 차수, 지수 및 배수공(수발공) 설치와 같은 적극적인 공사중 배수계획의 수립이 요구된다.

따라서, 추가 조사단계에서 파악된 수리특성 결과를 토대로 공사중 배수계획을 수립하였다.

## 6.1 침투류 해석을 통한 검토

시간적, 공간적 가격을 두고 시행된 수평시추(HB-1,2,3, L=50.0m)을 통하여 흡수되어 유출되는 유량을 ( $Q=368.44\text{m}^3/\text{day}$ ) 및 지하수 저하현상 등을 고려하여 선진 수평 배수공에 의한 배수계획을 수립하였다.

시공 시, 막장면을 통한 배수를 방지하여 안정성 확보와 작업환경을 개선하기 위하여 터널측면에 2공의 수평 배수공을 설치하는 것으로 계획하였고, 추가조사에서 파악된 투수계수( $K=8.434\text{E}-04$ )를 근간으로 침투해석을 수행한 결과와 실측결과를 비교·검토하여 배수공의 제원을 결정하였다.

### 6.1.1 지하수 유출량 변화에 따른 수평배수공 검토

지반의 수리조건은 지하수의 유입은 무한하며, 시

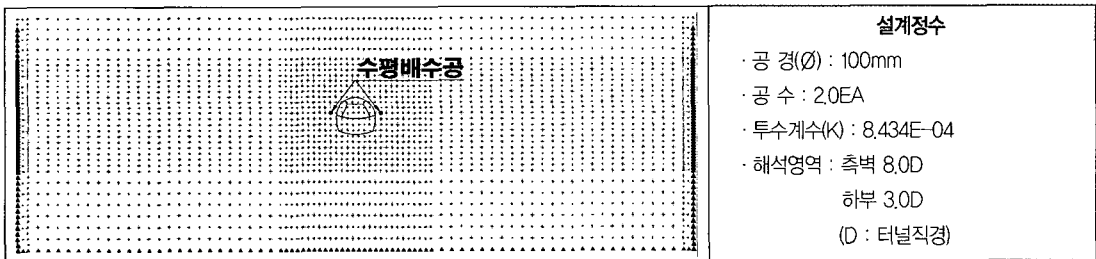
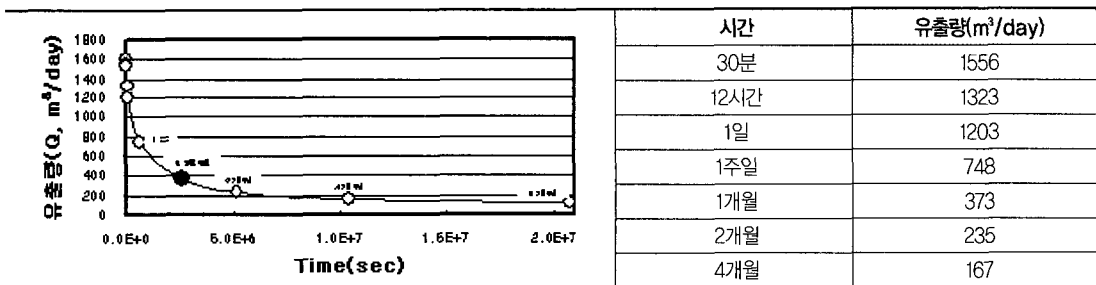


그림 11. 수치해석 모델링(SEEP/W) 및 설계정수

표 10. 시간별 지하수 유출량(Q) 발생경향



### 지하수 과다유출 풍화대에서의 터널 굴착 및 보조공법 적용

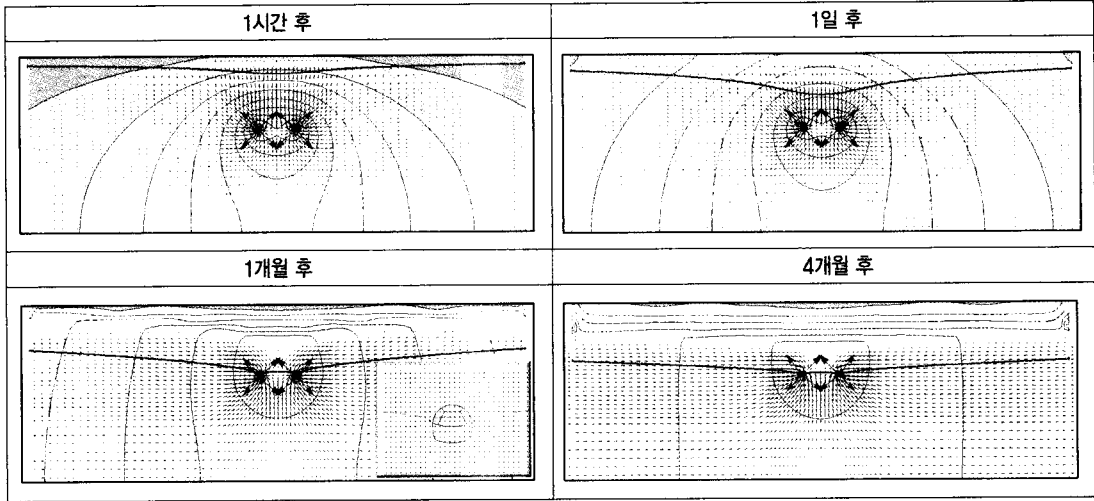


그림 12. 수평배수공에 의한 지하수위 저하 경향

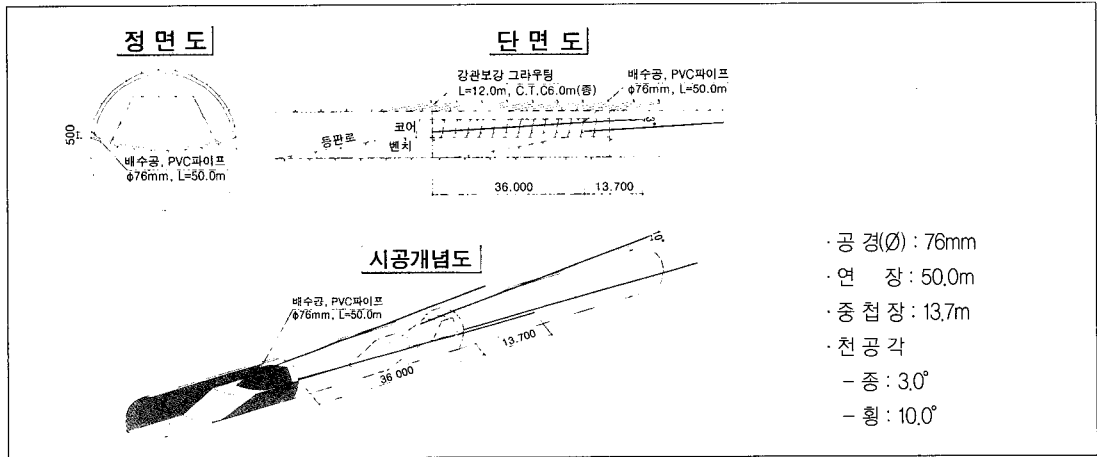


그림 13. 공사중 지하수 처리 계획도

간의 흐름에 따라 지하수위가 변화되는 부정류조건으로 검토하였다. 침투해석 및 현장 측정 용수량 ( $Q=368.44\text{m}^3/\text{day}$ ) 비교·검토하여 수평 배수공의 연장(L)을 결정하였다.

시간에 따른 지하수 유출량 변화를 분석한 결과, 1개월 경과후에 1일 유출량이  $373\text{m}^3$ 으로 수렴하는 양상을 나타내며, 현장에서 실측된 1일 유출량

$368.44\text{m}^3$  과 매우 유사한 것으로 파악되었다. 따라서, 터널 굴진속도(2막장(2.0m)/day)를 고려하였을 때, 터널 측면에 중점장을 갖는 50.0m이상의 수평 배수공의 설치가 적정한 것으로 검토되었다.

#### 6.1.2 지하수위 변화에 따른 막장 안정성 및 시공성 검토

터널 굴착 시, 막장을 통한 지하수 유출로 시공성 저하 및 지반의 전단강도 소실로 인하여 안정성 확보가 우려됨에 따라, 수평 배수공에 의한 시간별 지하수위 변화를 관찰하여 터널 막장의 안정성과 시공성을 검토한 결과, 연장(L) 50.0m이상의 수평 배수공을 증첩하여 설치할 경우, 지하수위는 터널 상반하부에 위치하게 됨에 따라 막장 전방 지반의 전단강도 소실로 인한 위험성은 적을 것으로 판단되며, 터널 시공을 위한 작업환경의 개선으로 시공성이 향상될 것으로 검토되었다.

## 6.2 공사중 배수계획

상기 검토된 내용을 토대로 공사중 배수계획을 그림 13과 같이 수립하였다.

## 7.결론

본 기술기사는 지하수가 과다 유출되는 풍화대 지반에서의 터널 대책공법에 대한 검토사례로, 적절한 지보패턴 및 보강공법 선정과 안정성 검토를 수행한 결과를 소개한 것으로 종합적인 결론은 다음과 같다.

- 1) 과업터널구간의 추가적인 지반조사를 수행한 결과, 토사화가 진행된 사질의 풍화토 및 풍화암이 폭넓게 분포하며, 지하수위가 높게 형성되어 다량의 지하수가 터널내부로 유출되는 상태로, 추가적인 보강공법 및 공사중 배수계획 수립이 요구되는 것으로 평가되었다.
- 2) 유사지반 설계사례분석과 과업터널구간의 지반 및 수리특성을 종합적으로 고려하여 지보시스템 및 보강공법을 결정하였으며, 이에 대한

안정성 검토를 수행하였다.

- 3) 수치해석을 통한 안정성 검토 결과, 터널 안정화 대책공법으로 선정된 지보 보강량 증가, 인버트 설치, 강관보강그라우팅 보강 및 링컷 분할굴착공법은 적절한 것으로 검토되었다.
- 4) 또한, 다량의 지하수 유출이 확인되어 터널막장의 안정 및 시공성 저하가 예상됨에 따라, 시간적 간격을 두고 수행된 추가 수평시추공(HB-1,2,3)을 통한 지하수 유출 및 지하수위 저하양상과 침투해석을 토대로 공사중 배수계획을 수립하였다.
- 5) 공사 중, 배수계획은 연장 50.0m의 수평 배수공 2공을 터널 측면에 선시공하여 배수공 내부로 지하수를 집수하여 배출시키는 적극적인 형태로, 지하수위의 저하와 막장면을 통한 지하수 유출을 방지하므로, 터널 무지보 구간의 안정성 확보와 시공성 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단되었다.
- 6) 현재는 성공적으로 관통되어 추가공정에 의한 시공이 진행되고 있으며, 지속적인 계측관리를 통하여 터널의 안정성을 확인하고 있다.

## 참고문헌

1. 한국철도시설공단(2006.10), "중앙선 00~00간 복선전철 제0공구 00터널 변경설계 보고서"
2. 한국수자원공사(2005.8), "소양강댐 보조여수로 설치공사 천이구간 변경설계 보고서"
3. 한국지반공학회(1998.11), "지반공학시리즈 터널"
4. 이인모(2004), "터널의 지반공학적 원리"
5. 대한터널협회(건설교통부 제정, 1999.10) "터널설계기준"