

## 불연속 암반에서의 터널굴착에 따른 지하수체계 변화에 대한 수치해석적 연구

박정욱, 손봉기, 이정인 (서울대학교)

### 1. 서 론

불연속 암반에서의 터널굴착과 관련하여, 지하수 문제는 구조물의 역학적·수리학적 안정성에 영향을 미칠 뿐만 아니라 주변생태계의 심각한 변화를 초래할 수도 있으므로 이를 적절히 예측하고 제어하는 것은 매우 중요하다.

현재까지의 수치해석 방법에 의한 지하수 유동연구는 암반을 등가다공성 매질(equivalent porous medium), 이중공극 매질(dual porous medium), 그리고 개별균열 연결망(discrete fracture network)으로 모델링하는 세 가지 모형으로 분류할 수 있다(Long et al, 1982; Priest, 1993).

일반적으로 암반을 구성하는 암석 자체의 수리전도도는 매우 작기 때문에 대부분의 지하수 유동은 불연속면을 통해 이루어지며, 이러한 특성을 반영한 개별균열 연결망 모델이 실제적인 암반의 수리거동을 모사하는 데에 적합하다. 그러나 광역적인 규모의 수치해석에서 개별균열을 모두 고려하는 개별균열망 모델은 불연속면에 대한 지질학적 정보 부족과 컴퓨터 메모리의 한계 등으로 그 해석이 제한된다. 최근 불연속 암반의 수리적 거동을 다공성 매질로 간주하고 이를 대표하는 등가수리전도도(equivalent hydraulic conductivity)를 구하여 연속체 수치해석의 입력 자료로 활용하는 방법이 주로 이용되고 있다(Min et al., 2004).

본 연구에서는 실내시험, 현장시험 그리고 개별균열 연결망을 이용한 수치해석에 기초하여 수리전도도의 이방성을 계산하였고, 이를 입력자료로 하여 연속체 해석을 실시하였다. 연속체 해석의 경우에 입력변수가 많지 않지만 이로 인해 결정론적인 해를 얻게 되므로 정확한 데이터의 입력이 무엇보다 중요하다. 그러나 암반의 수리학적 또는 지질학적 특성을 조사하는 데에는 한계가 있으며 이로 인해 입력 데이터는 불확실성을 내포하게 된다. 따라서 이러한 한계를 보완하고 각 입력 자료가 해석결과에 미치는 영향을 검토하기 위하여 해석단면별로 여러 가지 변수에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 해석에 사용된 프로그램은 유한요소법을 기반으로 하고, 포화·불포화 특성을 반영하여 지하수 유동해석이 가능한 GEOSLOP 사의 SEEP/W이다. 지반의 불포화 특성을 반영하기 위하여 입도분포곡선으로부터 음의 간극수압에 따른 수리전도도함수(hydraulic conductivity function)과 체적함수율(volumetric water content function)을 구하여 해석에 반영하였다.

## 2. 연구대상지역 현황

본 연구를 수행한 지역은 울산광역시 울주군 삼동면 보은리(서기(현) 364km+770)에서 경상남도 양산시 웅산읍 주남리(서기(현)363km+600)까지를 잇는 총연장 8,830m의 경부고속철도 13-3공구이다. 삼동터널 235m, 원효터널 8,445m 그리고 토공부 150m의 본선구간과 1,900m의 2개소 사갱, 약 6,000m의 진입도로로 이루어져 있다.

암종 분포 및 특성에 따라서 크게 네 지역으로 분류할 수 있는데, 퇴적암류 지역(364km+770~365km+990), 혼펠스 지역(365km+990~367km+890), 화강암 지역(367km~370km+800), 화산암복합체(370km+800~373km+600) 지역이다. 이 중 원효터널이 통과하는 화강암 지역과 화산암복합체지역 일대에는 생태계 및 습지보전지역이 분포하고 있고 저토피구간의 간천계곡이 위치하고 있어 터널 굴착으로 인한 지하수 체계와 생태계 변화에 대한 검토가 중점 연구사항이 되었다. 정족산 일대의 습지는 산 정상부 혹은 중간 능선부에 장기간의 풍화·침식에 의한 경사지에 이탄층이 퇴적되어 형성된 고층습지로, 유출의 형태는 지표유입과 증발산이 대부분이며 지하수로 유출되는 양은 미미한 것으로 조사되었다.

고산습지 하부를 통과하는 지역에서 터널 노선과 습지와의 이격거리, 습지의 규모, 단층 파쇄대의 교차여부를 근거로 하여 무제치 3능 하부 통과구간 (Sta.369km+820), 대성뒀늪 하부 통과구간 (Sta.370km+400), 대성큰늪 하부 통과구간 (Sta.370km+780)을 해석 위치로 선정하였고, 간천계곡 부의 경우에는 토피고가 가장 작고 계곡의 단면적과 폭이 가장 넓은 Sta. 371km+640 지점을 해석위치로 선정하였다.

습지하부 통과구간의 경우에는 MSG(Micro Silica Grouting)공법을, 간천계곡 하부 통과구간의 경우에는 우레탄 차수그라우팅 공법을 적용하여 전단면 선진 그라우팅하는 것으로 설계되었다.

그림 1은 고해상도 인공위성 영상 분석에 의해 조사된 주요 고산습지와 터널노선의 위치관계를 나타낸 평면도이며 표 1은 해석단면 내에서 교차하는 단층의 현황을 나타낸 것이다.

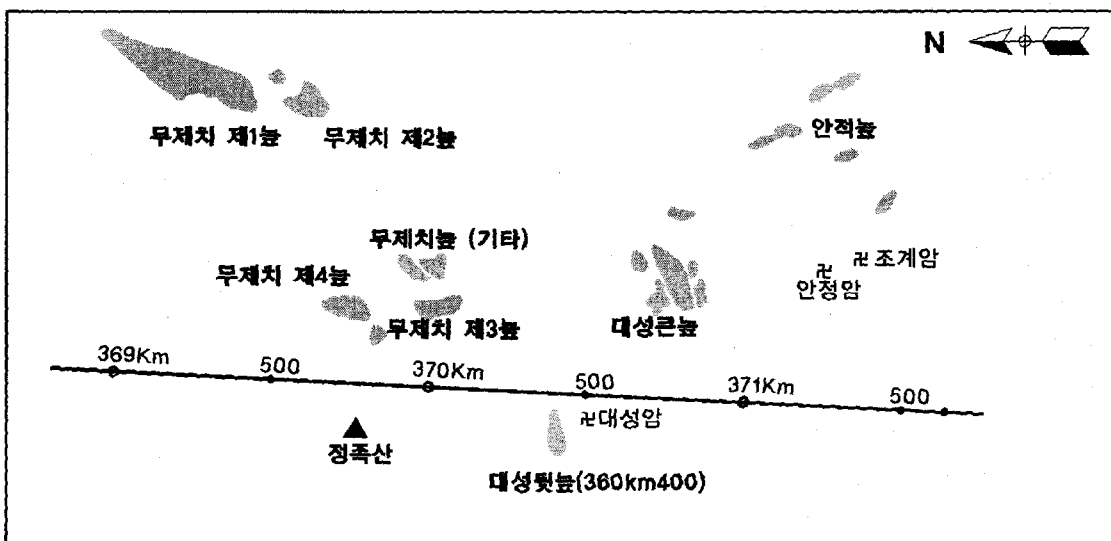


그림 1. 고산습지의 분포위치

표 1. 해석단면 내 단층현황

구분	노선통과 위치	단층종류	방향 (주향/경사)	길이 (m)	단층여부	단층 Gouge	단층 파쇄대	최대 단층 영향권	등급
F2	368km+690	전단단층 (R)	N35°E/ 75°SE	> 1.5km	단층확인 (용암사단층)	10-15cm	10m	20m	VIII
F3	370km630	주단층 (Y)	N14°E/ 80°SE	> 8.0km	단층확인 (용연단층)	10cm	10m	30m	VIII
F4	370km+770	전단단층 (R')	N35°W/ 80°SW	> 2.0km	단층확인 (조계암단층)	3-5cm	5m	15m	IX
F11	교차안합	전단단층 (R')	N30°W/ 78°SW	< 0.5km	단층확인	1cm	1m	5m	X
F16	교차안합	전단단층 (R)	N30°E/ 80°SE	> 1.5km	단층확인	10cm	10m	20m	VIII

\* 단층등급기준 : VIII (길이 <10km, 단층Gouge >5cm, 파쇄대 >5m),  
IX (길이 <5km, 터널에 영향이 큰 단층),  
X 이상 (길이 <1km, 고각도의 전단단층, 단층수반 파쇄대 발달이 미약한 소단층)  
\* Y(주단층, Y Shear), R(동향전단, Riedel Shear), R'(반향전단, Conjugate Riedel Shear), P(P-전단)

### 3. 연속체 모델을 통한 수치해석

#### 3.1 해석입력자료

##### 3.1.1 수리전도도 및 수리이방성

습지하부 통과구역의 수리전도도를 조사하기 위하여 현장 대수성시험, 수압시험, 변수위 투수시험, 실내투수시험 등이 시행되었다. 표 2는 위의 시험결과를 종합하여 해석영역에 적용한 수리전도도를 나타낸다. 수압시험결과 파쇄대의 수리전도도는 최대  $5.86 \times 10^{-7} \text{m/sec}$ 로 조사되었으나, 이를 단층영향권의 수리전도도로 반영하고, 단층파쇄대의 수리전도도를  $1.00 \times 10^{-5} \text{m/sec}$ 인 경우와  $1.00 \times 10^{-6} \text{m/sec}$ 인 경우로 적용하여 민감도 분석을 수행하였다.

표 2. 적용 수리전도도

구분	습지하부 통과구간 (m/sec)	간천계곡 하부 통과구간 (m/sec)
습지 퇴적층	$7.56 \times 10^{-9}$	-
풍화토	$3.24 \times 10^{-6}$	$3.24 \times 10^{-6}$
풍화암	$3.24 \times 10^{-7}$	$3.24 \times 10^{-7}$
연 암	$3.86 \times 10^{-7}$	$3.86 \times 10^{-7}$
경 암	$2.01 \times 10^{-8}$	$1.49 \times 10^{-7}$
숫크리트	$1.0 \times 10^{-9}$	
부직포	$9.0 \times 10^{-3}$	
단층파쇄대	$1.00 \times 10^{-5}, 1.00 \times 10^{-6}$	
단층영향권	$5.86 \times 10^{-7}$	
그라우팅영역	본래 수리전도도의 1/10, 1/50, 1/100로 감소	
굴착순상영역	본래 수리전도도의 10배, 100배로 증가	

불연속 암반에서의 지하수 유동은 주로 불연속면을 따라 발생하기 때문에 불연속망을 통한 지하수의 흐름은 불연속망의 기하학적 특성에 영향을 받는다. 이러한 불연속망은 특정 방향성을 나타내며, 특징적인 분포특성을 가져 불연속 암반의 수리적 이방성을 나타낸다.

본 연구에서는 이를 연속체 해석에 반영하기 위하여 구조지질 조사와 기존 자료를 활용하여 통계적 불연속망을 생성하고, 불연속 암반의 수리이방성 해석을 수행하였다. 각 습지부근과 간천계곡 해석 구간에서 50 × 50 m 크기의 통계적 불연속망을 10회 발생시킨 후 개별요소해석인 UDEC(Universal Distinct Element Code)의 불연속면 자료로 입력하여 수리이방성을 구하였다. 수리이방성이 일정해지는 대표요소체적(representative element volume)을 구하기 위하여 4 × 4 m, 10 × 10 m, 20 × 20 m, 30 × 30 m 그리고 40 × 40 m로 영역의 크기를 바꾸어 가며 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 경계 조건은 그림 2와 같으며, 여기에서 P1과 P2는 경계에서의 압력 수두를,  $q_x$ 와  $q_y$ 는 각각 x 방향과 y 방향의 유량을 의미한다.

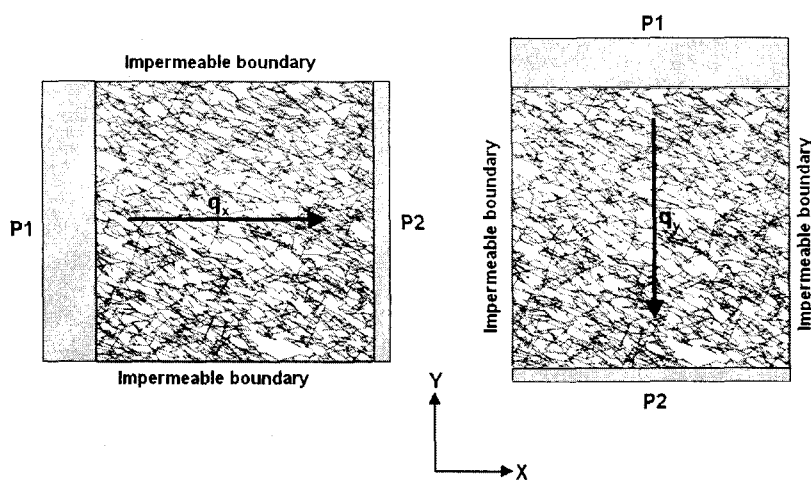


그림 2. 수리이방성 해석에 사용된 경계 조건

그림 3은 UDEC 해석 결과를 보여주고 있다. 고산습지 하부 통과구간의 경우 x 방향과 y 방향의 수리전도도 비인  $K_x/K_y$  값이 0.65이고, 간천계곡하부 통과구간의 경우, 0.91로 해석되었다. 이를 SEEP/W의 입력자료로 활용하였다.

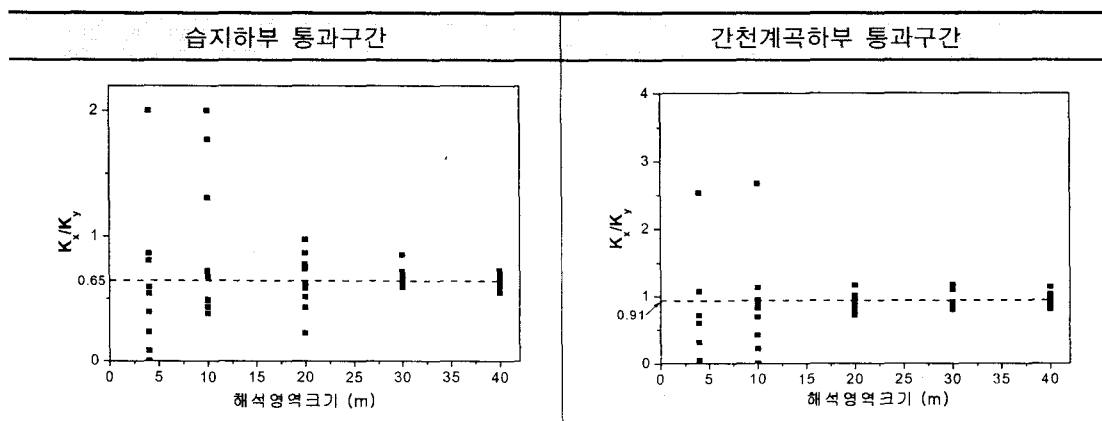


그림 3. 해석대상지역의 수리이방성

### 3.1.2 수리전도도 곡선과 체적 함수율 곡선

수리전도도 곡선과 체적 함수율 곡선은 불포화대가 발생하여 간극수압이 음(-)의 값을 갖는 경우 수리전도도와 체적함수율의 감소를 반영하는 함수이다. 이 함수들을 직접 측정하는 데에는 큰 어려움이 따르기 때문에 주로 여러 학자들의 연구로 제시한 방법에 의해 추정하는 방법이 사용되고 있다.

본 해석에서는 가장 먼저 불포화대가 발생할 것으로 예상되는 습지퇴적층, 풍화토에 대한 함수를 추정하였다. 조사된 입도분포곡선을 이용하여 모래질에 대해서는 Arya와 Paris(1981)이 제안한 방법을, 점토질에 대해서는 Kovacs(1981)이 제안한 방법을 이용하여 체적 함수율 함수를 추정하고 이를 이용하여, Fredlund 등(1994)에 의해 제안된 방법으로 수리전도도 함수를 추정하였다. 함수의 추정을 위해 입력되는 공극률과 저류계수는 현장대수성 시험결과와 실내시험결과를 토대로 하였다. 그림 4는 습지퇴적층, 그림 5는 풍화토에 대한 추정결과이다.

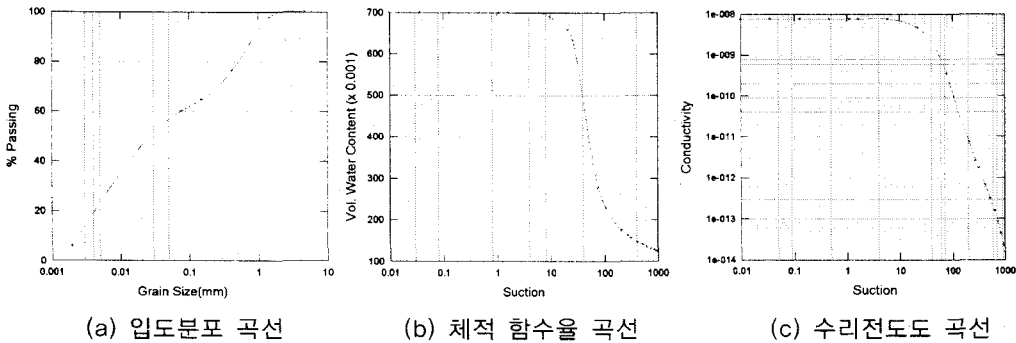


그림 4. 습지퇴적층의 체적함수율 곡선 및 수리전도도 곡선

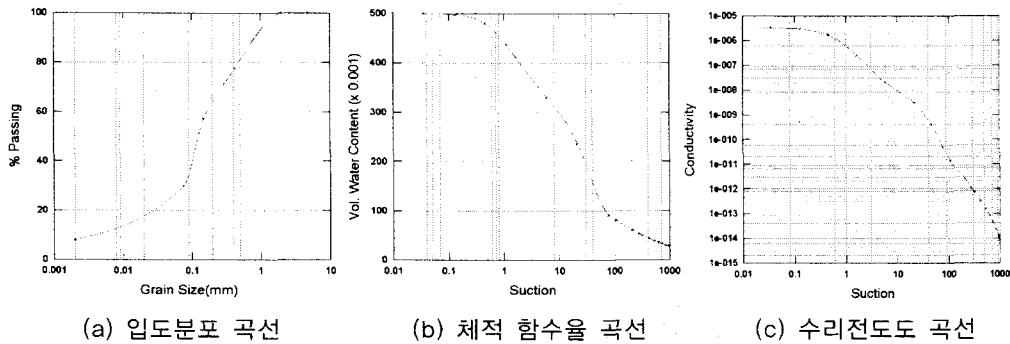


그림 5. 풍화토의 체적함수율 곡선 및 수리전도도 곡선

### 3.1.3 기상자료 및 초기지하수위

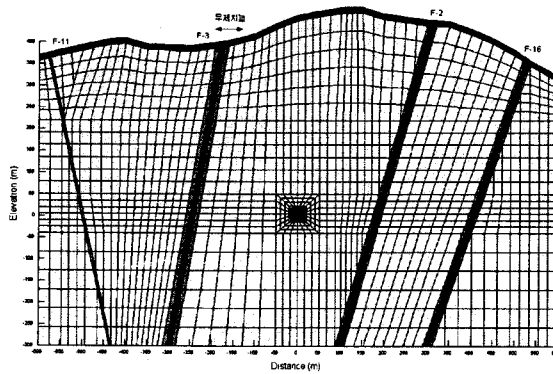
최근 10년간의 월평균강수량은 최대 248mm(8월), 최소 22mm(12월)이며 년평균 강수량은 1,219mm로 조사되었다. 지하침투율은 물수지 분석을 통해 얻어진 14.5%로 연평균 강수량과 지하침투율을 바탕으로 산정된 강수량  $5.6 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/sec을 지표층을 통해 유입되는 것으로 해석에 반영하였다.

지하수위 자동관측 결과를 토대로 지하수위 조사지역과 해석단면의 위치관계, 해석단면의 지형 및 지반고를 고려하여 초기 지하수위를 모사하였다. 습지 부근에서 조사된 지하수위는 대부분 Over Flow로 나타났고, 습지하부 주변지역의 지하수위는 지형에 따라 최저 Ground Level(G.L.)-17.407m로 조사되었다. 습지부근과 지하수위보다 지반고가 같거나 작은 지역의 지하수위는 지표

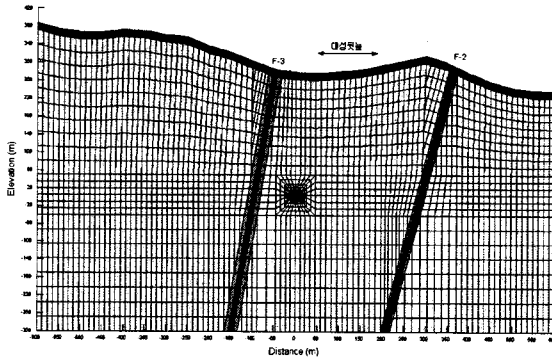
에 닿아있는 것으로 가정하였고, 지하수위보다 지반고가 높은 위치에 대해서는 고려하여 초기 지하수위를 모사하였다. 인접한 시추공의 조사 자료를 근거로 무제치늪의 경우에 최저 G.L-10m, 대성뒷늪의 경우에 최저 G.L-13m, 그리고 대성큰늪의 경우에 최저 G.L-17.5m의 초기 지하수위를 모사하였다.

### 3.2 유한요소망 작성 및 해석절차

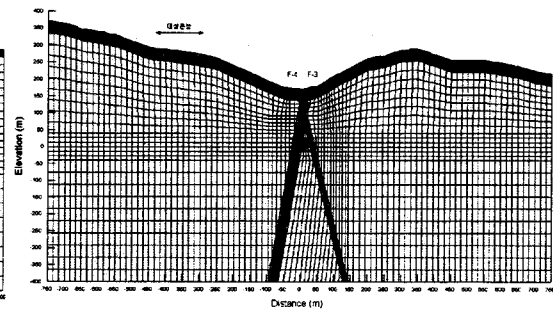
그림 6은 지층 및 단층파쇄대의 구조지질 조사 자료를 토대로 구성된 유한요소망을 나타낸다.



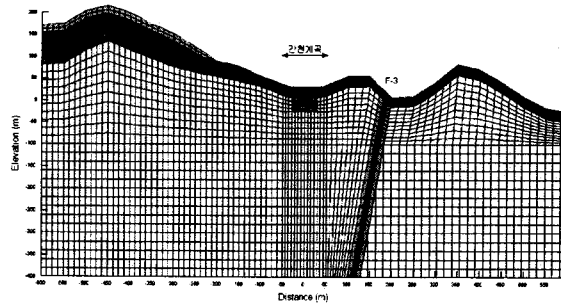
(a) 무제치 3늪



(b) 대성뒷늪



(c) 대성큰늪



(d) 간천계곡

그림 6. 해석단면의 유한요소망

터널을 굴착하기 전의 지하수 상태를 모사하기 위하여 초기 지하수위를 정상류해석으로 모사하

였다. 이를 초기조건으로 하고 터널 굴착 후 경과시간에 따른 유입수량과 지하수위 변화를 검토하기 위하여 터널 굴착부에 널 모델(null model)을 설정하여 10년 경과시까지의 부정류 해석을 수행하였다. 터널의 측벽과 바닥을 통해 유입되는 수량을 검토하기 위해서 부직포와 슛크리트 하단, 하부 맨암거에 대기압 경계조건(P=0)을 설정하였다. 지표면으로는 평균강수량과 지하침투율을 이용하여 계산된 강우조건을 설정하여 해석영역내로 계속 물이 유입되는 것으로 모델링하였다.

습지하부 통과구간의 경우에 좌우와 하부경계의 영향을 최소화하기 위하여 무한요소(infinite element)조건을 설정하였다. 간천계곡 하부 통과구간의 경우에는 터널내 유입수량 검토를 통한 수리학적 안정성 검토가 주 해석목적이므로 해석영역의 좌우경계에 일정 수두 경계(constant head boundary)를 부여하고 계곡의 수심이 일정한 것으로 설정하여 해석하였다. 표 3은 부정류 해석시 사용한 해석 단계를 나타내는 경과시간을 나타낸다.

표 3. 부정류 해석의 해석 단계

해석단계	1	2	3	4	5	6	7	8
경과시간	15일	1개월	6개월	1년	2년	3년	5년	10년

### 3.3 해석단면별 분석내용

#### 3.3.1 습지하부 통과구간 (무제치 3늪, 대성뿔늪, 대성큰늪 하부 통과구간)

습지하부 통과구간의 경우 그라우팅의 유무와 그라우팅의 효과 그리고 단층파쇄대의 수리전도도에 따른 터널내 유입수량 및 습지 지하수에 미치는 영향을 검토하기 위하여 다음과 같은 8가지 경우에 대해 해석을 수행하였다.

표 4. 습지 하부 통과구간의 민감도 분석

파쇄대의 수리전도도	그라우팅영역의 수리전도도	그라우팅을 시행하지 않음	본래의 1/10로 감소	본래의 1/50로 감소	본래의 1/100로 감소
	$10^{-5}$ m/sec		Case 1	Case 2	Case 3
$10^{-6}$ m/sec		Case 5	Case 6	Case 7	Case 8

#### 3.3.2 간천계곡부 하부 통과구간

간천계곡부 하부 통과구간의 경우 유무·효과와 굴착손상영역의 수리전도도 증가에 따른 터널내 유입수량을 검토하기 위하여 다음과 같은 6가지 경우에 대해 해석을 수행하였다. 이때 굴착손상영역(excavation damaged zone, EDZ)은 터널 굴착선으로부터 1.5m까지 형성되는 것으로 모델링하였다.

표 5. 간천계곡부 하부 통과구간의 민감도 분석

파쇄대의 수리전도도	그라우팅영역의 수리전도도	그라우팅을 시행하지 않음	본래의 1/10로 감소	본래의 1/100로 감소
본래의 100배로 증가		Case 1	Case 2	Case 3
본래의 10배로 증가		Case 4	Case 5	Case 6

### 3.4 해석결과 및 분석

#### 3.4.1 무제치 3층 하부 통과구간 (sta.369km+820)

##### ① 터널내 유입수량 분석

그림 7은 시간의 경과에 따라 측벽과 바닥부를 통해 터널내로 유입되는 수량을 그래프로 나타낸 것이며, 여기서 No, 10, 50, 100 은 각각 그라우팅의 유무와 효과를 의미한다.

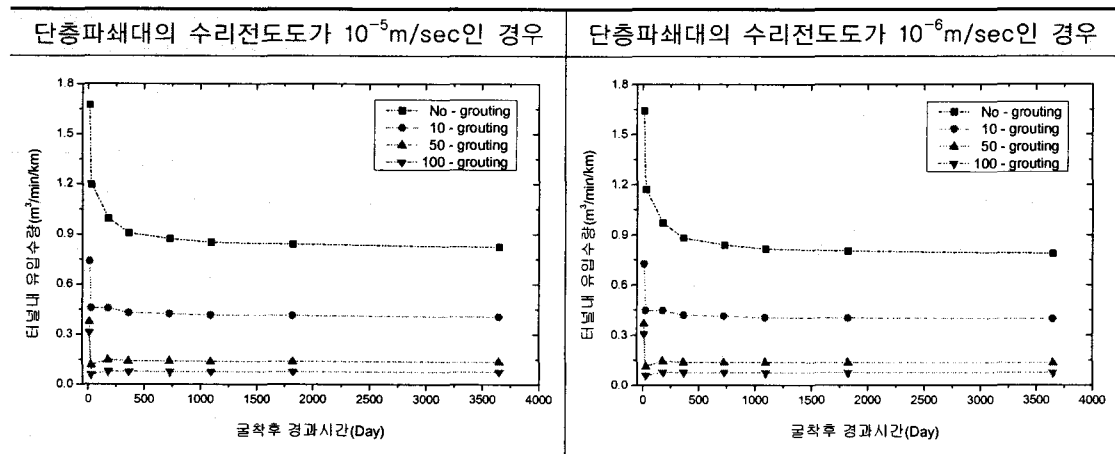


그림 7. 무제치 3층 하부통과구간의 터널내 유입수량 해석결과

단층파쇄대의 수리전도도가  $10^{-5}m/sec$ 에서  $10^{-6}m/sec$ 로 감소함에 따라 터널내 유입수량은 약 0.43~4.4% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 단층파쇄대가 터널과 교차하지 않기 때문에 단층파쇄대의 수리전도도에 크게 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 그라우팅영역의 수리전도도가 감소함에 따라 유입수량은 선형적으로 감소하며 최대 유입수량은 단층파쇄대의 수리전도도가  $10^{-5}m/sec$ 이고, 그라우팅을 하지 않은 Case 1의 경우에  $1.67m^3/min/km$ 로 나타났다.

##### ② 지하수위 검토

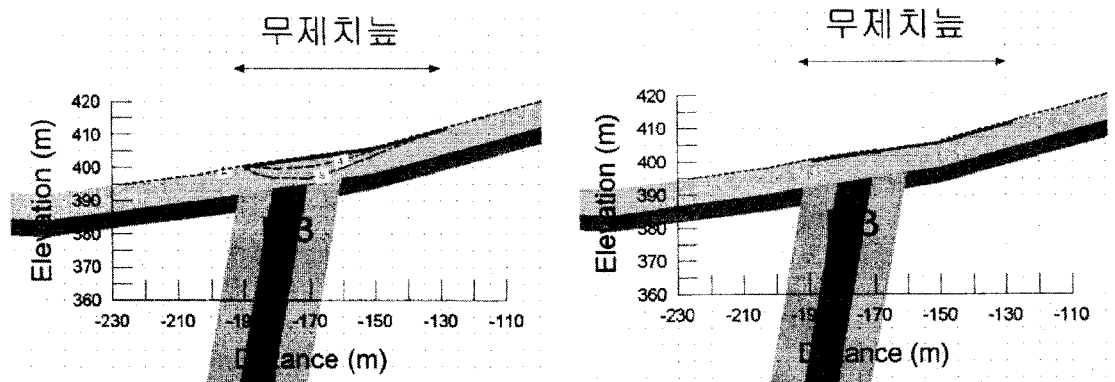
굴착 후 10년 경과시의 결과를 바탕으로 터널 굴착으로 인한 무제치층 부근의 지하수위에 미치는 영향을 검토한 결과, 단층파쇄대의 수리전도도가  $10^{-5}m/sec$  일 때, 그라우팅을 시행하지 않은 경우(Case 1) 최대 6.6m, 그라우팅영역의 수리전도도가 1/10로 감소하는 경우(Case 2) 최대 3.5m, 1/50로 감소하는 경우(Case 3) 최대 1.9m의 지하수위 강하를 보였으나, 수리전도도가 1/100으로 감소하는 경우(Case 4)에서는 무제치층 부근에서는 지하수위 강하가 발생하지 않았다. 또한 단층



파쇄대의 수리전도도가  $10^{-6}$  m/sec일 때, 그라우팅을 시행하지 않은 경우(Case 5) 최대 3.7m, 그라우팅영역의 수리전도도가 1/10로 감소하는 경우(Case 6) 최대 2m의 지하수위 강하가 발생하고 나머지 경우에는 지하수위가 발생하지 않았다. 무제치 3층의 경우에 용연 단층이 습지의 하부에 위치하고 있어 이 부분에서 지하수위의 강하가 발생하였다.

그림 8의 (a)와 (b)는 각각 단층파쇄대의 수리전도도가  $10^{-5}$  m/sec일 때, 그라우팅을 시행하지 않은 경우(Case 1)와 그라우팅을 시행하여 수리전도도가 1/100로 감소한 경우(Case 3)에 터널굴착 후 1개월, 1년, 10년 경과시의 무제치 3층 주변의 지하수위를 보여주고 있다.

그림에서 표기된 숫자는 해석 시 적용된 해석 단계로서 2, 4, 8은 각각 1개월, 1년, 10년경과를 나타낸다.



(a) 단층파쇄대의 수리전도도  $10^{-5}$  m/sec  
그라우팅을 시행하지 않은 경우

(b) 단층파쇄대의 수리전도도  $10^{-5}$  m/sec  
그라우팅 시행, 수리전도도 1/100로 감소

그림 8. 무제치층 주변의 터널굴착 후 1개월, 1년, 10년 경과시의 지하수위

### 3.4.2 대성뒷늪 하부 통과구간 (sta.370km+400)

#### ① 터널내 유입수량 분석

그림 9는 시간의 경과에 따라 측벽과 바닥부를 통해 터널내로 유입되는 수량을 그래프로 나타낸 것이며, 여기서 No, 10, 50, 100 은 각각 그라우팅의 유무와 효과를 의미한다.

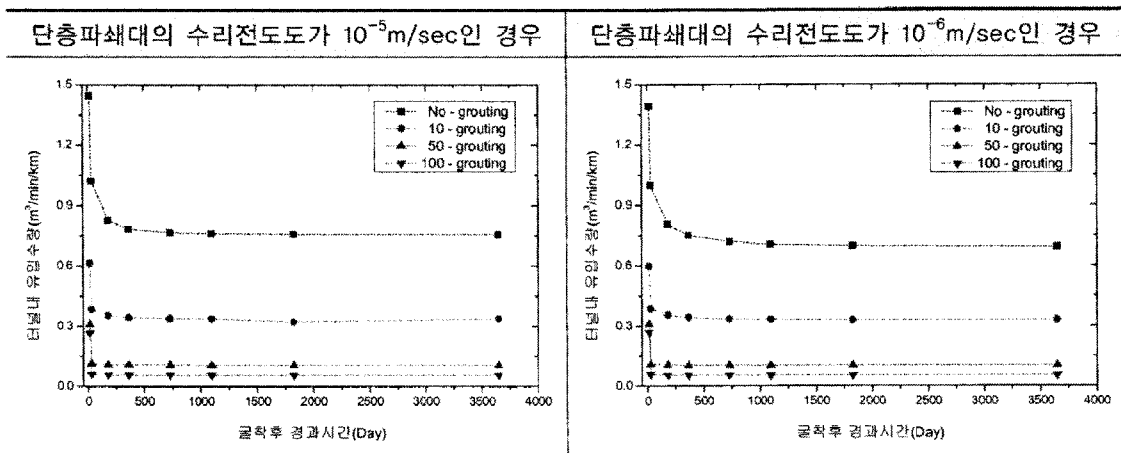


그림 9. 대성뒷늪 하부통과구간의 터널내 유입수량 해석결과

단층파쇄대의 수리전도도가  $10^{-5}$ m/sec에서  $10^{-6}$ m/sec로 감소함에 따라 터널내 유입수량은 약 0.150~8.40% 감소하는 것으로 나타나 단층파쇄대의 수리전도도에 크게 영향을 받지 않는 것으로 해석되었다. 그라우팅영역의 수리전도도가 감소함에 따라 유입수량은 선형적으로 감소하며 최대 유입수량은 단층파쇄대의 수리전도도가  $10^{-5}$ m/sec이고, 그라우팅을 하지 않은 Case 1의 경우에  $1.45\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$ 로 나타났다.

② 지하수위 검토

굴착 후 10년 경과시의 결과를 바탕으로 터널 굴착으로 인한 대성뒷늪의 지하수위에 미치는 영향을 검토한 결과, 그라우팅과 단층파쇄대의 수리전도도에 관계없이 모든 경우에 대해서 대성뒷늪 부근의 지하수위에 영향을 미치지 않는 것으로 해석되었다.

그림 10은 단층파쇄대의 수리전도도가  $10^{-5}$ m/sec이고 그라우팅을 시행하지 않은 경우, 터널굴착 후 1개월, 1년, 10년 경과시의 대성뒷늪 주변의 지하수위를 보여주고 있다. 그림에서 표기된 숫자는 해석시 적용된 해석 단계로서 2, 4, 8은 각각 1개월, 1년, 10년경과를 나타낸다.

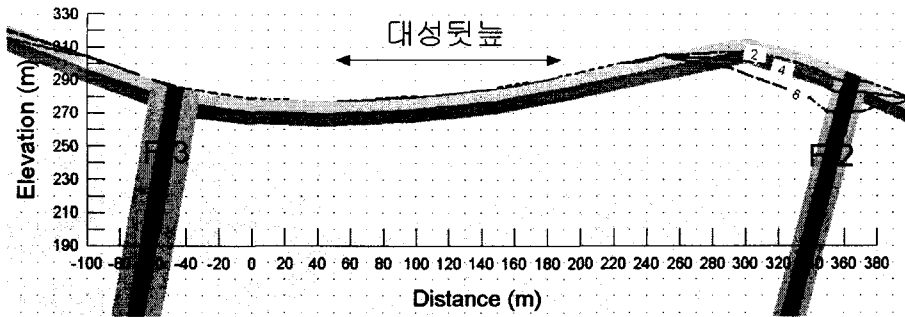


그림 10. 단층파쇄대의 수리전도도가  $10^{-5}$ m/sec일 때 그라우팅을 시행하지 않은 경우 대성뒷늪 주변의 터널굴착 후 1개월, 1년, 10년 경과시의 지하수위

3.4.3 대성큰늪 하부 통과구간 (sta.370km+780)

① 터널내 유입수량 분석

그림 11은 시간의 경과에 따라 측벽과 바닥부를 통해 터널내로 유입되는 수량을 그래프로 나타낸 것이며, 여기서 No, 10, 50, 100 은 각각 그라우팅의 유무와 효과를 의미한다.

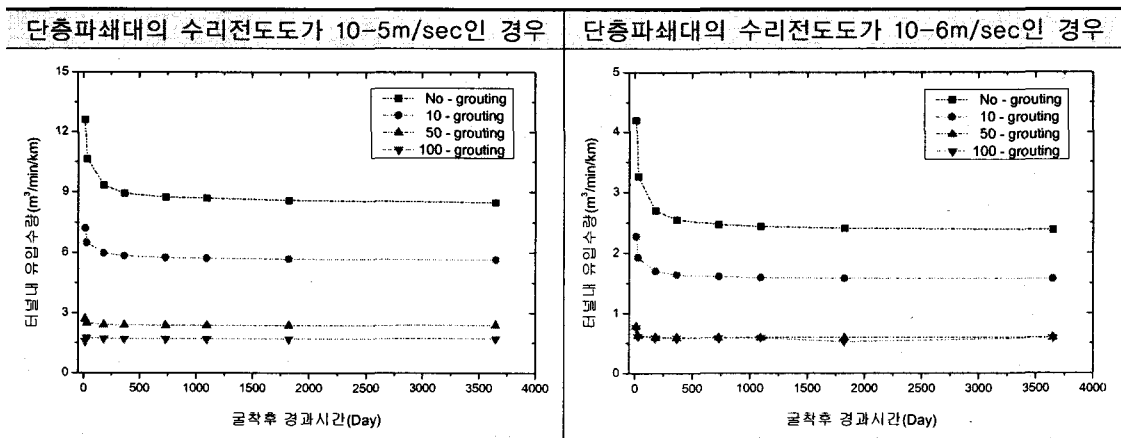


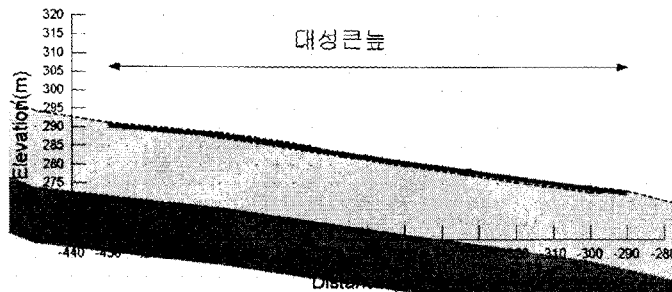
그림 11. 대성큰늪 하부통과구간의 터널내 유입수량 해석결과

대성큰늘의 경우 폭 10m, 최대 영향권 30m의 F3(용연단층)이 터널노선과 교차하고 있으며 폭 6m, 최대 영향권 15m의 F4(조계암단층)이 F3(용연단층)과 터널 상부에서 교차하여 터널내 유입수량은 단층파쇄대의 수리전도도에 직접적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 단층파쇄대의 수리전도도가  $10^{-5}$ m/sec에서  $10^{-6}$ m/sec로 감소함에 따라 터널내 유입수량은 최대 75.18%가 감소하는 것으로 나타났고, 그라우팅영역의 수리전도도가 감소함에 따라 유입수량은 선형적으로 감소하였다. 단층파쇄대의 수리전도도가  $10^{-5}$ m/sec이며, 그라우팅영역의 수리전도도가 1/10, 1/50 그리고 1/100으로 감소할 경우 터널내 최대 유입수량은 각각 7.21, 2.70,  $1.75\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$ 로 해석되었다. 또한 단층파쇄대의 수리전도도가  $10^{-6}$ m/sec이며, 그라우팅영역의 수리전도도가 1/10, 1/50 그리고 1/100으로 감소할 경우 터널내 최대 유입수량은 각각 2.27, 0.79,  $0.76\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$ 으로 나타났다.

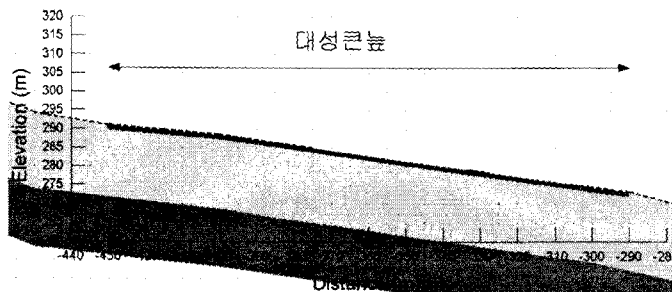
② 지하수위 분석

굴착 후 10년경과 시의 결과를 바탕으로 터널 굴착으로 인한 대성큰늘의 지하수위에 미치는 영향을 검토한 결과, 단층파쇄대의 수리전도도가  $10^{-5}$ m/sec일 때와  $10^{-6}$ m/sec인 경우 모두 그라우팅을 시행하지 않은 경우(Case 1, Case 5)와 그라우팅영역의 수리전도도가 1/10로 감소하는 경우(Case 2, Case 6)에 대해서만 대성큰늘 일부영역에 걸쳐 지하수위가 강하하는 것으로 나타났고, 그라우팅영역의 수리전도도가 1/50 이하로 감소할 경우 대성큰늘 부근의 지하수위 강하는 발생하지 않았다. 최대 지하수위 강하는 Case 1에서 터널굴착 후 10년 경과시에 최대 0.6m로 습지의 일부에서 발생하였다.

그림 12의 (a)와 (b)는 각각 단층파쇄대의 수리전도도가  $10^{-5}$ m/sec일 때, 그라우팅을 시행하지 않은 경우(Case 1)와 그라우팅을 시행하여 수리전도도가 1/50로 감소한 경우(Case 3)에 터널굴착 후 10년 경과시의 대성큰늘 주변의 지하수위를 보여주고 있다.



(a) 단층파쇄대의 수리전도도가  $10^{-5}$ m/sec일 때 그라우팅을 시행하지 않은 경우



(b) 단층파쇄대의 수리전도도가  $10^{-5}$ m/sec일 때 그라우팅을 시행, 수리전도도가 1/50로 감소

그림 12. 대성큰늘 주변의 터널굴착 후 10년 경과시의 지하수위

### 3.4.4 간천계곡 하부 통과구간 (sta.371km+640)

그림 13은 시간의 경과에 따른 터널내 유입수량을 그래프로 나타낸 것이며 No, 10, 50, 100은 각각 그라우팅의 유무와 효과를 나타낸다.

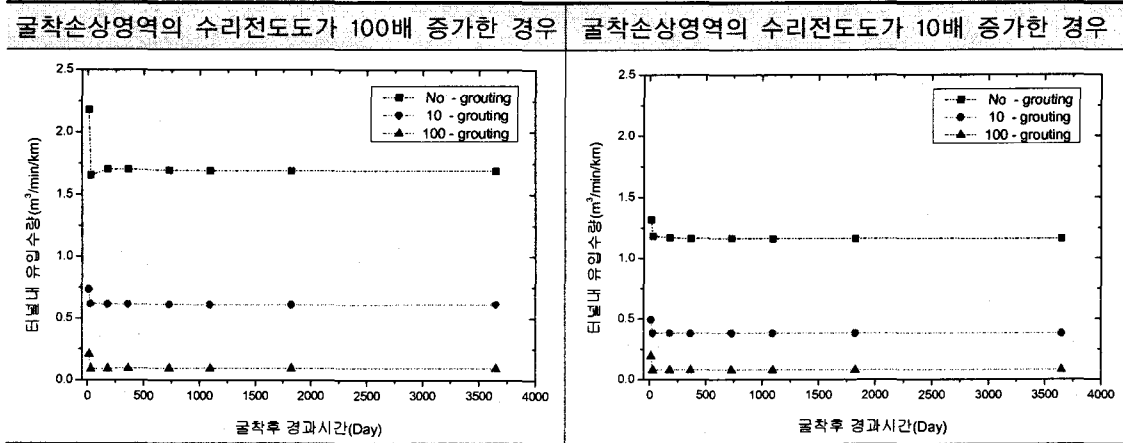


그림 13. 간천계곡 하부통과구간의 터널내 유입수량 해석결과

굴착손상영역의 수리전도도가 100배 증가한 경우에 비해 10배 증가한 경우, 터널내 유입수량은 최대 39.6%가 감소하는 것으로 나타났다.

그라우팅영역의 수리전도도가 감소함에 따라 유입수량은 선형적으로 감소하며 최대 유입수량은 그라우팅을 시행하지 않은 Case 1의 경우에  $2.18\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$ 로 나타났다. 굴착손상영역의 수리전도도가 100배 증가하고, 그라우팅영역의 수리전도도가 1/10, 1/100으로 감소할 경우 터널내 최대 유입수량은 각각  $0.73$ ,  $0.21\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$ 로 해석되었다.

### 3.5 단층파쇄대와 터널의 구조적 위치에 따른 시나리오 해석

단층파쇄대와 터널의 구조적인 위치관계에 따라 고산습지에 미치는 영향을 비교·검토하기 위하여 터널과 습지와 이격거리가 가장 짧은 대성뒷늪을 대상으로 다음과 같은 가상의 조건을 적용하여 시나리오 해석을 수행하였다. 수리전도도가  $10^{-6}\text{m}/\text{sec}$ 인 폭 10m의 단층파쇄대가 터널노선과 교차하는 것으로 가정하였고 그라우팅 영역의 수리전도도가 본래 암반의 1/10로 감소한 경우에 대하여 부정류 해석을 수행하였다.

- Case 1 : 터널의 중심과 단층파쇄대의 중심이 일치하는 경우
- Case 2 : 터널의 중심과 단층파쇄대의 중심간의 수평거리가 10m인 경우
- Case 3 : 터널의 중심과 단층파쇄대의 중심간의 수평거리가 20m인 경우

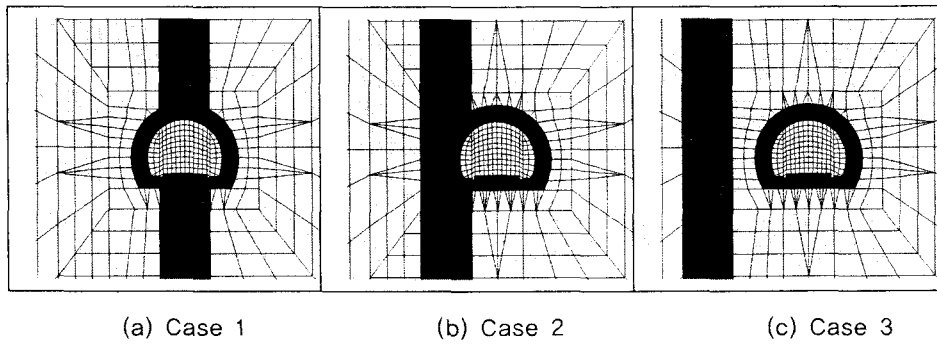


그림 14. 단층파쇄대의 위치에 따른 가상단면

### 3.5.1 해석결과 및 분석

그림 15는 단층파쇄대와 터널의 위치관계에 따른 터널 내 유입수량을 비교한 결과이다.

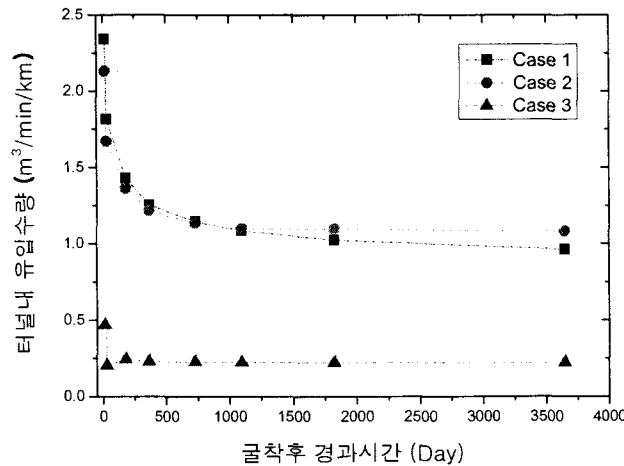


그림 15. 단층파쇄대와 터널의 위치관계에 따른 터널 내 유입수량

단층파쇄대의 위치가 터널의 중심과 멀어질수록 유입수량은 감소하는 것으로 나타났지만, 터널과 수평이격거리가 10m인 경우(Case 2)에는 좌측벽이 파쇄대 내에 포함되어 있어 이를 통한 유입수량이 Case 1보다 크게 나타나 총 유입수량의 감소폭은 10% 내외로 작은 값을 보였다. 하지만 수평이격거리가 20m인 경우에는 터널내 유입수량이 77%~90% 감소하여 현저히 작은 값을 나타내었다. 따라서 단층파쇄대가 터널에 인접하여 있는 경우에도 터널 굴착면에 직접 닿아 있는 경우가 아닐 경우에는 유입수량에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다.

굴착 후 10년 경과시의 결과를 바탕으로 터널 굴착으로 인한 대성뮈늬의 지하수위에 미치는 영향을 검토한 결과, 터널과 단층파쇄대가 교차하는 Case 1, Case 2의 경우에 대성뮈늬 일부의 지하수위가 강하하지만 터널과 단층파쇄대가 20m 떨어진 Case 3의 경우에 대성뮈늬의 지하수위에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

그림 16은 각각의 경우에 터널굴착 후 1개월, 1년, 10년 경과시, 대성뮈늬 주변의 지하수위를 보여주고 있다. 그림에서 표기된 숫자는 해석 시 적용된 해석 단계로서 2, 4, 8은 각각 1개월, 1년, 10년 경과를 나타낸다.

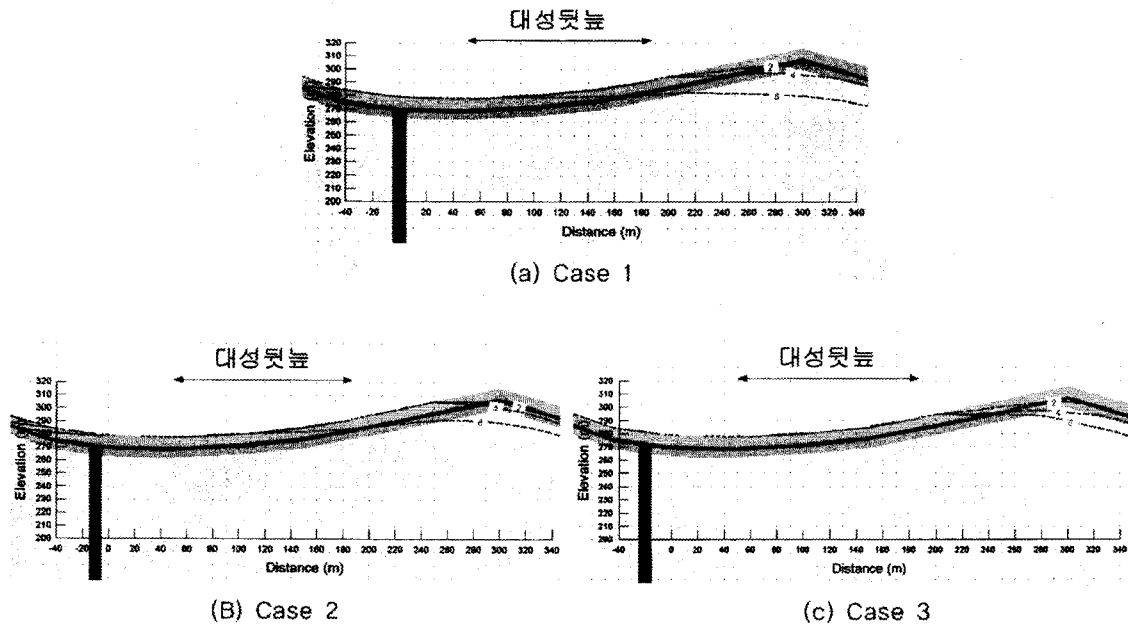


그림 16. 단층과 터널의 구조적 위치에 따른 대성뒷늪 주변의 터널굴착 1개월, 1년, 10년 후 지하수위

#### 4. 결 론

본 연구에서는 유한요소법 2차원 프로그램인 SEEP/W를 사용하여 터널굴착에 따른 터널내 지하수 유입량 및 주변 지하수계의 변동이 고산습지환경에 미치는 영향을 살펴보았다. 이상의 연구를 통해 얻어진 주요 결과들은 다음과 같다.

1. 습지하부 통과구간에 대한 터널굴착에 따른 터널내 지하수 유입수량을 살펴본 결과, 터널과 단층 파쇄대가 교차하지 않는 무제치 3늪과 대성뒷늪의 경우 터널 굴착 막장면에서 그라우팅을 하지 않은 경우에 터널내 최대유입수량은 각각 1.67, 1.45  $\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$ 로 나타났다. 그리고 단층파쇄대의 수리전도도가  $10^{-5}\text{m}/\text{sec}$ 에서  $10^{-6}\text{m}/\text{sec}$ 로 감소할 경우 각각 0.43~4.4%, 0.15~8.40% 감소하여 단층파쇄대의 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났다.
2. 터널노선과 단층파쇄대가 교차하는 대성큰늪의 경우 그라우팅을 하지 않은 경우 단층파쇄대의 수리전도도가  $10^{-5}\text{m}/\text{sec}$ 이며, 그라우팅 효과에 의해 터널 주변의 수리전도도가 1/10, 1/50, 1/100로 감소할 경우 최대유입수량이 각각 7.21, 2.70, 1.75  $\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$ 로 해석되었다. 또한 단층파쇄대의 수리전도도가  $10^{-6}\text{m}/\text{sec}$ 이며, 그라우팅 효과에 의해 터널 주변의 수리전도도가 1/10, 1/50, 1/100로 감소할 경우 최대유입수량이 각각 2.27, 0.79, 0.76  $\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$ 로 나타났다. 단층파쇄대의 수리전도도가  $10^{-5}\text{m}/\text{sec}$ 에서  $10^{-6}\text{m}/\text{sec}$ 로 감소할 경우 최대 75.18% 감소하여 단층파쇄대에 직접적인 영향을 받는 것으로 나타났다.
3. 간천계곡 통과구간에 대한 터널굴착에 따른 터널내 지하수 유입수량을 살펴본 결과, 터널내 유입수량은 최대 2.18  $\text{m}^3/\text{min}/\text{km}$ 로 나타났다. 그리고 굴착손상영역의 수리전도도가 10배 증가한 경우에 비해 100배 증가한 경우, 터널내 유입수량은 최대 1.7배 증가하였다.

4. 터널 굴착 후 10년 경과시에 고산습지 주변의 지하수위 변화를 살펴본 결과, 무제치 3늪의 경우 단층파쇄대의 수리전도도가  $10^{-5}$  m/sec일 때 그라우팅을 시행하지 않은 최악의 조건에서 6.6m의 지하수위 강하가 발생하였으나, 단층파쇄대의 수리전도도가  $10^{-6}$  m/sec와  $10^{-5}$  m/sec일 때, 그라우팅 효과에 의해 터널 주변의 수리전도도가 1/100으로 감소할 경우 무제치 3늪에서의 수위강하는 발생하지 않았다. 대성뫔늪의 경우 그라우팅을 시행하지 않은 조건에서도 수위강하가 발생하지 않아 터널 굴착에 의한 지하수위 영향은 미약한 것으로 해석되었다. 대성큰늪의 경우 그라우팅 효과가 1/10로 나타날 경우 대성큰늪 일부에서 최대 0.6m의 지하수위 강하가 발생하였으나, 그라우팅 효과가 1/50로 나타날 경우에는 대성큰늪에서 지하수위 강하는 발생하지 않는 것으로 나타났다.
5. 단층파쇄대와 터널의 위치관계에 따른 시나리오 해석 결과, 파쇄대가 인접하여 있더라도 터널과 직접적으로 교차하지 않는다면 터널내 유입수량 및 습지생태계에 미치는 영향이 작은 것으로 나타났다.

#### ■ 참고문헌 ■

1. 박병윤, 2000, 화산암질 암반에서의 공동 굴착에 따른 지하수계 변화에 대한 3차원 수치모델 해석, 공학박사학위 논문, 서울대학교 대학원.
2. 천병식, 최송암, 남순식, 1995, 배수형 터널의 과다유입수가 터널의 안정에 미치는 영향, 한국지반공학회지, 제 11권, 제 4호, pp. 125-138.
3. Long, J. C. S., Remer, J. S., Wilson, C. R., Witherspoon, P. A., 1982, Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures, Water Resource Research, Vol. 18(3), pp. 645-658.
4. Priest, Stephen D., 1993, Discontinuity analysis for rock engineering, CHAPMAN & HALL.
5. Min, K. B., Jing, L., Stephansson, O., 2004, Determination of the permeability tensor of fractured rock masses based on stochastic REV approach: Method and application to the field data from sellafeld, UK, Hydrogeology Journal, Vol. 12(5), pp. 497-510.
6. Xing Zhang, David J. Sanderson, 2002, Numerical modeling of fluid flow and deformation of fractured rock masses, Pergamon, pp. 23-90.
7. John Krahn, 2004, Seepage modeling with SEEP/W, GEO-SLOPE International Ltd.