

불연속 암반에서의 터널굴착에 따른 지하수체계 변화에 대한 수치해석적 연구

박정욱^{1)*}, 손봉기²⁾, 이정인³⁾, 송재준⁴⁾

Numerical Analysis of the Change in Groundwater System with Tunnel Excavation in Discontinuous Rock Mass

Jung-Wook Park, Bong-ki Son, Chung-In Lee, Jae-Joon Song

Abstract In this study, a 2D finite-element analysis, using the SEEP/W program, was carried out to estimate the amount of groundwater flowing into a tunnel, as well as the groundwater tables around wetland areas during and after a tunnel excavation through rock mass. Four sites along the Wonhyo-tunnel in Cheonseong Mountain (Gyeongnam, Korea) were analysed, where the model domain of the tunnel included both wetland and fault zone. The anisotropy of the hydraulic conductivities of the rock mass was calculated using the DFN model, and then used as an input parameter for the continuum model. Parametric study on the influencing factors was performed to minimize uncertainties in the hydraulic properties. Moreover, the volumetric water content and hydraulic conductivity functions were applied to the model to reflect the ability of a medium to store and transport water under both saturated and unsaturated conditions. The conductivity of fault zone was assumed to be 10^{-5} m/sec or 10^{-6} m/sec and the conductivity of grouting zone was assumed as 1/10, 1/50 or 1/100 of the conductivity of rock mass. Totally 6~8 cases of transient flow simulation were performed at each site. The hydraulic conductivities of fault zone showed a significant influence on groundwater inflow when the fault zone crossed the tunnel. Also, groundwater table around wetland maintained in case that the hydraulic conductivity of grouting zone was reduced to be less than 1/50 of the hydraulic conductivity of rock mass.

Key words Groundwater flows, Wetland, Fault, Grouting

초 록 본 연구에서는 암반의 수리적 거동을 다공성매체로 간주하고 개별균열 연결망을 통해 구해진 암반의 등가수리전도도와 수리이방성을 입력 자료로 하여 유한요소법 프로그램을 사용한 2차원 수치해석을 수행하였다. 입력변수에 의한 결정론적인 해를 얻게 되는 연속체 해석의 단점과 입력자료의 불확실성을 보완하기 위하여 입력변수에 대한 민감도 분석을 실시하고, 터널과 단층파쇄대의 다양한 위치관계를 고려한 가상의 시나리오 단면에 대하여 해석을 수행하였다. 이때 암반의 포화·불포화 특성을 반영하기 위한 수리전도도함수와 체적함수를 구하여 해석에 반영하였다. 해석대상지역은 경부고속철도 13-3공구, 원효터널의 고산 습지(무제치 3늪, 대성뒀늪, 대성큰늪) 하부통과구간과 간천계곡하부 통과구간으로서 부정류 해석을 통하여 터널 굴착 후 10년 경과사까지의 터널 내 유입수량과 인접지역의 지하수위를 살펴봄으로써 수리학적 안정성과 습지 및 계곡에 미치는 영향을 검토하였다. 그라우팅을 시행하지 않은 경우에는 무제치늪과 대성뒀늪 주변의 지하수위가 강하하지만, 그라우팅을 통해 수리전도도를 1/50 이하로 감소시킬 경우 지하수위는 강하하지 않는 것으로 나타났다. 그리고 단층파쇄대가 터널에 인접하여 위치하더라도 터널을 관통하지 않는 경우에는 단층파쇄대가 터널내 유입수량에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

핵심어 지하수 유동, 습지, 단층, 그라우팅

¹⁾ 서울대학교 에너지시스템공학부 박사과정

²⁾ 한국석유공사 기술원 평가팀

³⁾ 서울대학교 에너지시스템공학부 명예교수

⁴⁾ 서울대학교 에너지시스템공학부 교수

* 교신저자 : jwpark@rockeng.snu.ac.kr

접수일 : 2007년 12월 26일

심사 완료일 : 2008년 2월 19일

1. 서 언

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 모사하는데에 적합하다. 그러나 광역적인 규모의 수리해석에서 개별균열을 모두 고려하는 개별균열망 모델은 불연속면에 대한 지질학적 정보 부족과 컴퓨터 메모리의 한계 등으로 그 해석이 제한된다. 최근에는 불연속 암반의 수리적 거동을 다공성 매질로 간주하고 이를 대표하는 등가수리전도도(equivalent hydraulic conductivity)를 구하여 연속체 수리해석의 입력 자료로 활용하는 방법이 주로 이용되고 있다(Zhang and Sanderson, 2002, Min et al., 2004).

본 연구에서는 실내시험, 현장시험 그리고 개별균열 연결망을 이용한 수리해석에 기초하여 수리전도도의 이방성을 계산하였고, 이를 입력자료로 하여 연속체 해석을 실시하였다. 연속체 해석의 경우 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 실시하고 단층파쇄대의 구조적 위치에 따른 시나리오 해석을 수행하였다. 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)와 체적함수율함수(volumetric water content function)를 구하여 해석에 반영하였다.

2. 연구대상지역

연구대상 지역은 경부고속철도 2단계 13-3공구로서 울산광역시 울주군에서 경상남도 양산시에 걸친 총 연장 13.28km의 천성산 구간 원효터널이다. 본래 2002년

6월 착공되어 2010년 완공될 예정이었으나, 지울스님 등 내원사 스님들과 환경단체의 환경논란 제기로 인하여 큰 사회적 관심이 되었다. 이런 가운데 2003년 10월 고속철도 천성산 구간 공사착공금지가처분신청인 이른바 ‘도롱뇽 소송’이 제기되었고, 2004년 4월과 11월 울산지방법원과 부산고등법원에서 잇따라 기각판결을 받았다. 대법원의 최종판결을 앞두고, 정부는 지울스님의 단식농성과 시민·환경 단체의 거센 반발에 부딪혀 천성산 환경영향공동조사 실시 요구를 받아들였다. 사업 시행자측인 한국철도시설공단과 녹색연합 등 시민·환경단체들로 구성된 ‘고속철 천성산관동저지 전국 비상대책위원회’측이 10명의 조사위원을 선정하였고, 이들이 2005년 8월 30일에 천성산 일대의 지하수, 구조지질, 암반공학, 지구물리, 생태계 분야에 대한 현장조사에 착수하여 3개월간 환경영향공동조사를 진행하였다. 본 연구는 상기 암반공학 분야의 일부이다.

연구대상지역은 암종 분포 및 특성에 따라서 크게 네 지역으로 분류할 수 있는데, 퇴적암류 지역(364 km+770~365 km+990), 혼펠스 지역(365 km+990~367 km+890), 화강암 지역(367 km+370 km+370 km+800), 화산암복합체(370 km+800~373 km+600) 지역이다. 이 중 원효터널이 통과하는 화강암 지역과 화산암복합체지역 일대에는 생태계 및 습지보전지역이 널리 분포하고 있고 저토피구간의 간천계곡이 위치하고 있어 터널 굴착으로 인한 지하수계의 변동이 고산습지환경에 미치는 영향 뿐만 아니라 터널내 출수에 의한 안정성에 대한 검토가 중점 연구사항이 되었다.

천성산 일대의 습지는 산 정상부 혹은 중간 능선부에 장기간의 풍화침식에 의한 이탄층 퇴적으로 인해 형성된 고층습지로 유출의 형태는 지표유입과 증발이 대부분이며 지하수로 유출되는 양은 미미한 것으로 조사되었다.

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

그림 1은 인공위성 영상 분석에 의해 조사된 주요 고산습지와 터널노선의 위치관계를 나타낸 평면도이며 표 1은 고산습지의 분포현황, 표 2는 해석단면 내에 교차하는 단층의 현황을 나타낸 것이다.

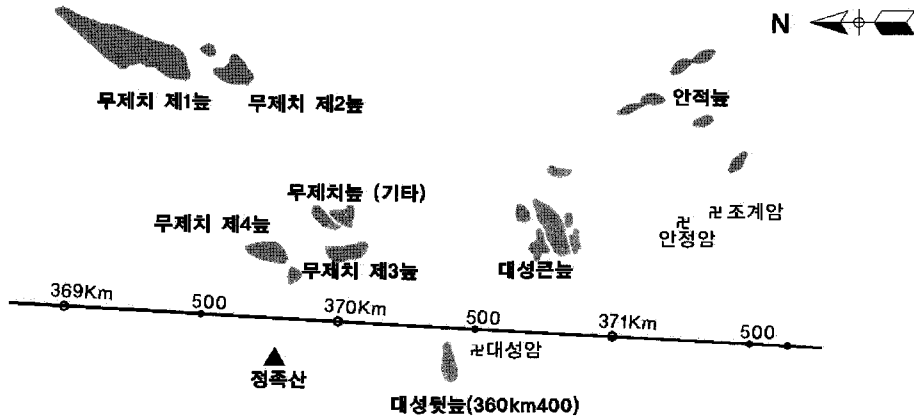


그림 1. 고산습지의 분포위치

표 1. 고산습지의 분포현황

구분	Station	규모 (m ²)	터널과의 이격거리			비고
			수평거리 (m)	수직거리 (m)	최단거리 (m)	
무제치 제1층	369 km+250 (Left)	400×150	900	300	950	
무제치 제2층	369 km+570 (Left)	150×100	850	330	910	
무제치 제3층	369 km+820 (Left)	50×50	130	400	420	해석위치
무제치 제4층	369 km+730 (Left)	100×150	200	380	430	
무제치 층 (기타)	370 km+00 (Left)	30×30 ~ 50×50	220	390	450	
대성뒷층	370 km+400 (Right)	150×50	50	270	275	해석위치
대성큰층	370 km+780 (Left)	50×80 ~ 120×300	285	260	380	해석위치
안적층	371 km+390 (Left)	60×150 ~ 70×80	620	140	630	

표 2. 해석단면 내 단층현황

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

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

3. 수리안정성 해석

3.1 해석개요

불연속 임반에서의 지하수 유동은 주로 단층이나 절리 등의 불연속면을 통하여 이루어지므로 불연속면의 방향이나 분포와 같은 기하학적 특성에 따라 수리적 이방성과 비균질성을 갖는다. 따라서 개별균열망 모델이 실제 암반의 수리거동을 반영하는 데에 적합하지만, 광역적인 규모의 해석에 있어서 개별균열을 모두 고려하는 것은 불연속면에 대한 지질학적 정보 부족과 오랜 해석시간 등으로 인해 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 구조지질 조사자료를 이용하여 통계적 불연속망을 발생시킨 후 대표요소체적의 수리이방성을 해석하고 이를 연속체 해석의 입력자료로 활용하였다. 연속체 해석에 사용된 프로그램은 유한요소법을 기반으로 하고, 포화·불포화 특성을 반영한 지하수 유동해석이 가능한 GEOSLOP 사의 SEEP/W이다. 정상류 해석을 통하여 초기 지하수위를 모사하고 터널 굴착 후 10년 경과시까지 부정류 해석을 실시하여 시간의 경과에 따른 터널내 유입수량과 고산습지 주변의 지하수위를 검토하였다. 이 때 입력자료의 불확실성을 보완하고 각 입력 자료가 해석결과에 미치는 영향을 검토하기 위하여 해석단면별로 여러 가지 변수에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 또한 단층파쇄대가 습지에 미치는 영향을 최대한 고려하기 위하여 단층파쇄대와 터널 노선이 이루는 구조적 위치에 따른 시나리오 해석을 수행하였다.

3.2 해석단면별 분석내용

3.2.1 습지하부 통과구간(무제치 3늪, 대성뒷늪, 대성큰늪 하부 통과구간)

습지하부 통과구간의 경우 그라우팅의 효과와 그라우

팅의 효과 그리고 단층파쇄대의 수리전도도에 따른 터널내 유입수량 및 습지 지하수에 미치는 영향을 검토하기 위하여 표 3과 같은 8가지 경우에 대해 해석을 수행하였다.

3.2.2 간천계곡부 하부 통과구간

간천계곡부 하부 통과구간의 경우 그라우팅의 효과와 굴착손상영역의 수리전도도 증가에 따른 터널내 유입수량을 검토하기 위하여 표 4와 같이 6가지 경우에 대해 해석을 수행하였다. 이때 굴착손상영역(excavation damaged zone, EDZ)은 터널 굴착선으로부터 1.5 m까지 형성되는 것으로 모델링하였다. 최근의 문헌자료와 현장측정자료를 바탕으로 수리학적인 측면의 굴착손상영역의 범위는 대략 0~1.5 m 범위 내외이며, 수리전도도는 약 10~100배 증가하는 것으로 알려진 바 있다 (Bäckblom and Martin, 1999).

3.2.3 단층파쇄대와 터널의 구조적 위치에 따른 시나리오 해석

터널과 습지와 이격거리가 가장 짧은 대성뒷늪을 대상으로 다음과 같은 가상의 조건을 적용하여 시나리오 해석을 수행하였다. 수리전도도가 10^6 m/sec인 폭 10 m의 단층파쇄대가 터널노선과 교차하는 것으로 가정하였고, 그라우팅을 통하여 수리전도도가 본래 암반의 1/10로 감소하였다고 가정하였다. Case 3-1~3-3은 단층파쇄대의 터널로부터의 이격거리에 따라 다음과 같이 구분된다.

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

표 3. 습지 하부 통과구간의 민감도 분석

파쇄대의 수리전도도	그라우팅 영역의 수리전도도	그라우팅을 시행하지 않음	본래의 1/10로 감소	본래의 1/50로 감소	본래의 1/100로 감소
10^5 m/sec		Case 1-1	Case 1-2	Case 1-3	Case 1-4
10^6 m/sec		Case 1-5	Case 1-6	Case 1-7	Case 1-8

표 4. 간천계곡부 하부 통과구간의 민감도 분석

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

3.3 해석 입력자료

3.3.1 수리전도도 및 수리이방성

습지하부 통과구역의 수리전도도를 조사하기 위하여 현장 대수성시험, 수압시험, 변수위 투수시험, 실내투수 시험 등이 시행되었다. 표 5는 이러한 시험결과를 종합하여 해석영역에 적용한 수리전도도를 나타낸다. 수압시험결과 파쇄대의 수리전도도는 최대 5.86×10^{-7} m/sec로 조사되었으나, 보수적인 해석을 위하여 이를 단층영향권의 수리전도도로 반영하고, 단층파쇄대의 수리전도도는 사질토의 수리전도도와 비슷한 수치인 1.00×10^{-5} m/sec와 1.00×10^{-6} m/sec로 가정하여 민감도 분석을 수행하였다. 단층파쇄대와 그 영향범위는 상기 표 2에서 제시된 바와 같다. 슛크리트의 수리전도도는 콘크리트의 투수계수 시험결과 및 슛크리트의 시공기준을 참고로 적용하였다. 일반적으로 콘크리트의 투수계수는 물/시멘트비에 따라 $10^{-10} \sim 10^{-12}$ m/sec의 범위를 보이며, 슛크리트의 허용공극률은 12%이내여야 한다. 본 연구에서는 터널 시공에 따른 불균질성을 감안하여 슛크리트의 수리전도도를 10^9 m/s로 적용하였고, 슛크리트의 두께는 해석단면의 지보패턴에 따라 50 mm~250 mm 범위의 값을 가진다.

불연속 암반의 수리이방성을 해석하기 위하여 구조 지질 조사 자료를 바탕으로 고산습지와 간천계곡 구간의 통계적 불연속망을 생성하였다. 각 구간에서 50 m × 50 m 크기의 통계적 불연속망을 10회 발생시킨 후 개별 요소해석인 UDEC(Universal Distinct Element Code)의 불연속면 자료로 입력하여 수리해석을 실시하였다. 수리적 특성이 일정해지는 대표요소체적(representative element volume)을 구하기 위하여 4 m×4 m, 10 m×10 m, 20 m×20 m, 30 m×30 m 그리고 40 m×40 m로 영역의 크기를 바꾸어 가며 수리해석을 수행하고, 대표요소체

적에서의 해석결과를 바탕으로 수리이방성을 산정하였다. 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 3은 UDEC 해석 결과를 보여주고 있다. 40 m×40 m 영역일 때 수리전도도가 수렴하는 것으로 나타났으며, x 방향과 y 방향의 수리전도도 비인 K_x/K_y 값은 고산 습지의 경우 0.65, 간천계곡하부 통과구간의 경우 0.91로 해석되었다.

3.3.2 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 추정하였

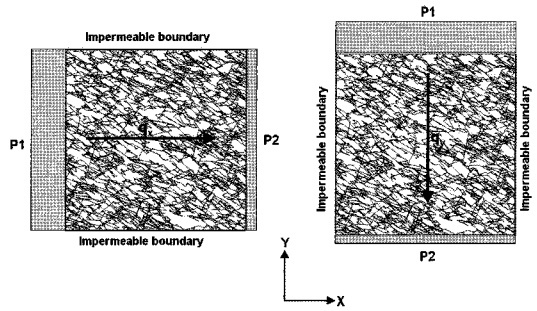
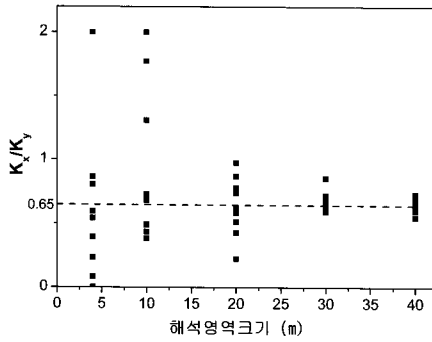


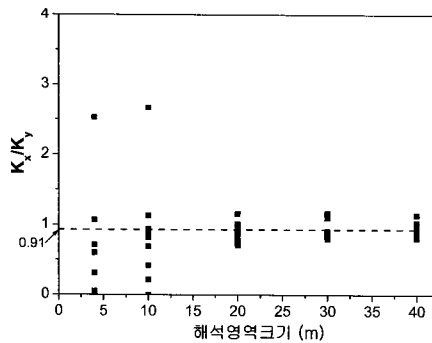
그림 2. 수리이방성 해석에 사용된 경계 조건

표 5. 적용 수리전도도

구 분	습지하부 통과구간 (m/sec)	간천계곡 하부 통과구간 (m/sec)
습지 퇴적층	7.56×10^{-9}	-
풍화토	3.24×10^{-6}	3.24×10^{-6}
풍화암	3.24×10^{-7}	3.24×10^{-7}
연 압	3.86×10^{-7}	3.86×10^{-7}
경 압	2.01×10^{-8}	1.49×10^{-7}
스�크리트	1.0×10^{-9}	
부직포	9.0×10^{-3}	
단층파쇄대	1.00×10^{-5} , 1.00×10^{-6}	
단층영향권	5.86×10^{-7}	
그라우팅영역	본래 수리전도도의 1/10, 1/50, 1/100로 감소	
굴착손상영역	본래 수리전도도의 10배, 100배로 증가	



(a) 고산습지하부 통과구간



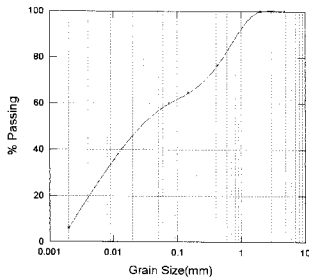
(b) 간천계곡하부 통과구간

그림 3. 수리이방성 해석에 사용된 경계 조건

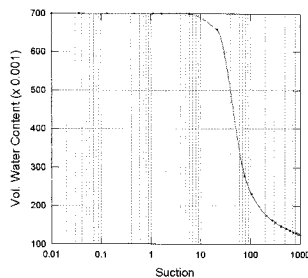
다. 조사된 입도분포곡선을 이용하여 모래질에 대해서는 Arya and Paris(1981)이 제안한 방법을, 점토질에 대해서는 Kovacs(1981)이 제안한 방법을 이용하여 체적 함수율 함수를 추정하고, 이를 이용하여 Fredlund et al.(1994)가 제안한 방법으로 수리전도도함수를 추정하였다. 함수의 추정을 위해 입력되는 공극률과 저류계수는 현장대수성 시험결과와 실내시험결과를 토대로 하였다. 풍화암, 연암, 경암에 대하여는 입도분포를 조사할 수 없었고, 적합변수를 추정하기에는 한계가 있었으므로 SEEP/W에서 제공하는 데이터를 사용하여 입력하고, 추정근거가 없는 숏크리트나 부직포에 대해서는 수리전도도가 감소하지 않는 것으로 가정하여 보수적으로 해석하였다.

3.3.3 기상자료 및 초기지하수위

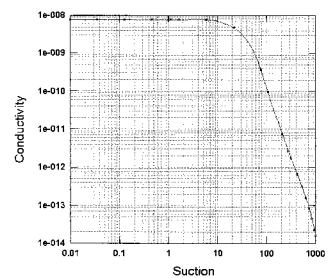
최근 12년간의 월평균강수량은 최대 248 mm(8월), 최소 22 mm(12월)이며 연평균 강수량은 1,219 mm이다. 물수지 분석을 통하여 지하침투율은 평균 20.76%로 계산되었으나 물수지 분석법이 일반적으로 과대평가되는 점을 감안하여, 약 70%의 안전율을 적용한 14.5%를 적용하였다. 월평균강수량과 평균 지하침투율을 바탕으로 지표에 5.6×10^{-9} m/sec의 flux boundary를 경계조건으로 설정하였다.



(a) 입도분포 곡선

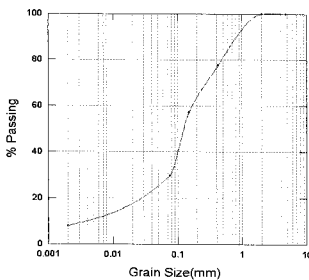


(b) 체적 함수율 곡선

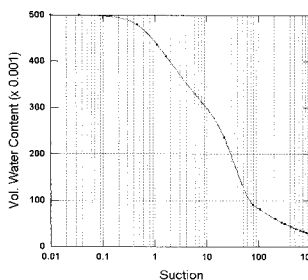


(c) 수리전도도 곡선

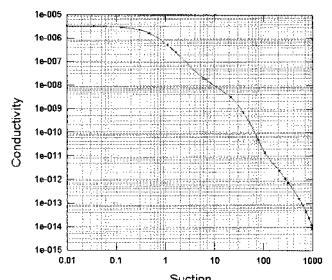
그림 4. 습지퇴적층의 체적함수율 곡선 및 수리전도도 곡선



(a) 입도분포 곡선



(b) 체적 함수율 곡선



(c) 수리전도도 곡선

그림 5. 풍화토의 체적함수율 곡선 및 수리전도도 곡선

지하수위 조사지역과 해석단면의 위치관계, 해석단면의 지형 및 지반고를 고려하여 지하수위 자동관측 결과를 토대로 초기 지하수위를 모사하였다. 습지 부근에서 조사된 지하수위는 대부분 over flow로 나타났고, 습지 하부 주변지역의 지하수위는 지형에 따라 최저 ground level(G.L.)-17.407 m로 조사되었다. 습지부근과 지하수위보다 지반고가 같거나 작은 지역의 지하수위는 지표에 닿아있는 것으로 가정하였고, 지하수위보다 지반고가 높은 위치에 대해서는 지형을 고려하여 초기 지하수위를 결정하였다. 인접한 시추공의 조사 자료를 근거로 무제치늪의 경우에 최저 G.L-10 m, 대성뫔늪의 경우에 최저 G.L-13 m, 그리고 대성큰늪의 경우에 최저 G.L-17.5 m의 초기 지하수위를 모사하였다.

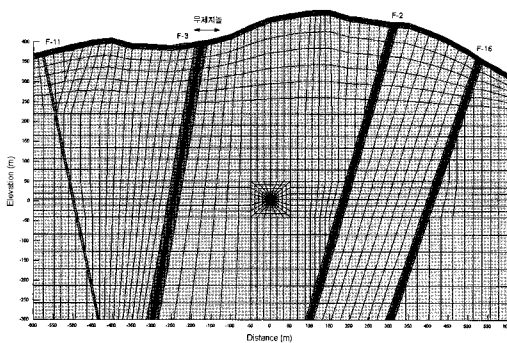
3.3.4 유한요소망 작성 및 경계조건

그림 6은 지층 및 단층파쇄대의 구조지질 조사 자료를 바탕으로 구성한 유한요소망을 나타낸다. 고산습지하부 통과구간의 경우 습지의 위치를 고려하여 해석영역의 좌우경계는 습지로부터 최소 300 m의 이격거리를 두었다. 간천계곡부의 경우 계곡부의 폭은 실제 1.3 m로 2차원상의 단면에서는 터널을 중심으로 약 좌우 -30 m~30 m에 걸쳐 교차하는 것으로 나타났다. 해석단면상에서

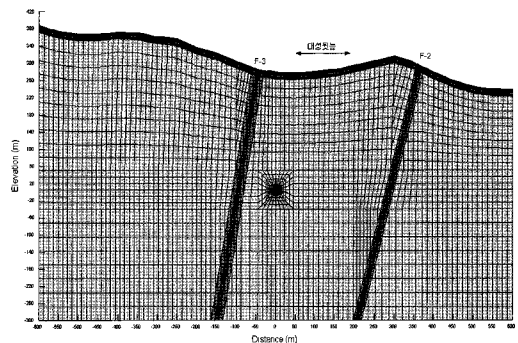
서쪽으로 약 200 m 지점에 계곡의 지류가 포함되어 있었는데 이를 해석에 고려하기 위하여 해석영역을 터널 중심 기준 좌우 -600 m~600 m로 확장하고 하부경계는 터널 바닥 기준 -400 m로 설정하여 유한요소망을 작성하였다. 그림 7은 단층파쇄대와 터널의 구조적인 위치에 따른 시나리오 해석의 유한요소망이며, 터널 주위를 확대한 모습이다.

터널 굴착 전 지하수 상태를 모사하기 위하여 기지의 지하수위를 경계조건으로 하여 정상류해석을 수행하였다. 이를 초기조건으로 하고 터널굴착부에 널 모델(null model)을 설정함으로써 터널굴착과정을 모사하였다. 터널의 측벽과 바닥을 통해 유입되는 수량을 검토하기 위해서 부직포와 슛크리트 하단, 하부 맹암거에 대기압 경계조건(P=0)을 설정하고, 평균강수량과 지하침투율로부터 구한 강우조건을 부여하여 지표를 통하여 해석영역내로 계속 물이 유입되는 것으로 모델링하였다.

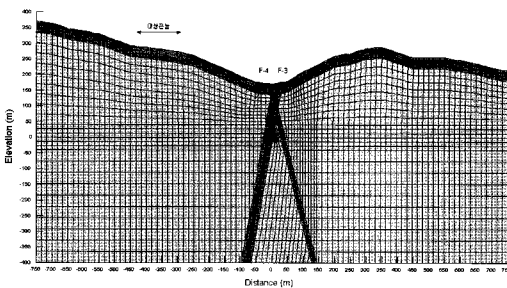
습지하부 통과구간의 경우에 좌우와 하부경계에 해당하는 요소를 무한요소(infinite element)조건을 설정하였다. 무한요소로 설정할 경우, 외곽에 위치한 절점의 위치정보가 무한대로 확장되기 때문에 해석결과에 미치는 경계효과(boundary effect)의 영향을 최소화할 수 있다는 장점이 있다. 간천계곡 하부 통과구간의 경우에



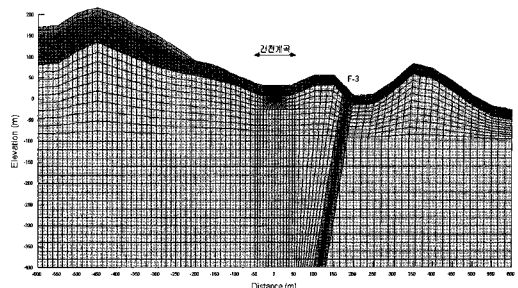
(a) 무제치 3늪



(b) 대성뫔늪

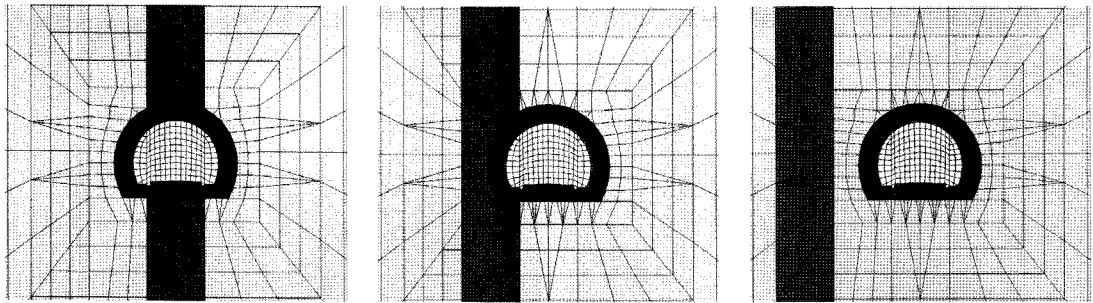


(c) 대성큰늪



(d) 간천계곡

그림 6. 해석단면의 유한요소망



(a) Case 3-1

(a) Case 3-2

(a) Case 3-3

그림 7. 단층과쇄대의 위치에 따른 가상단면(대성뒷늪하부 터널주변)

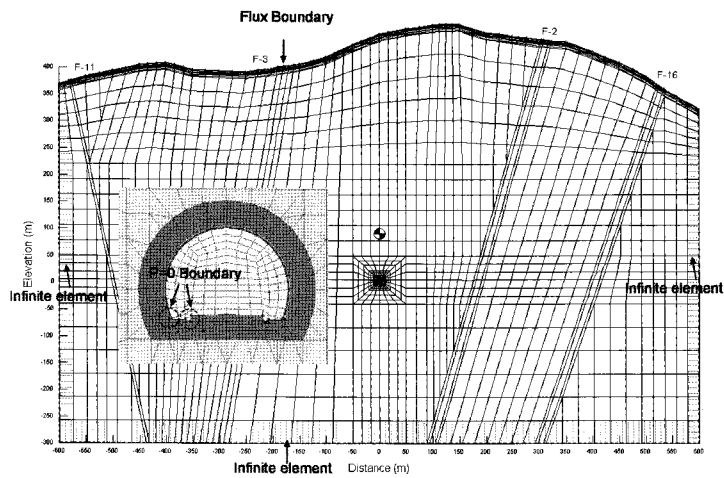


그림 8. 고산습지 하부 통과구간 부정류 해석 경계조건(무제치 3높)

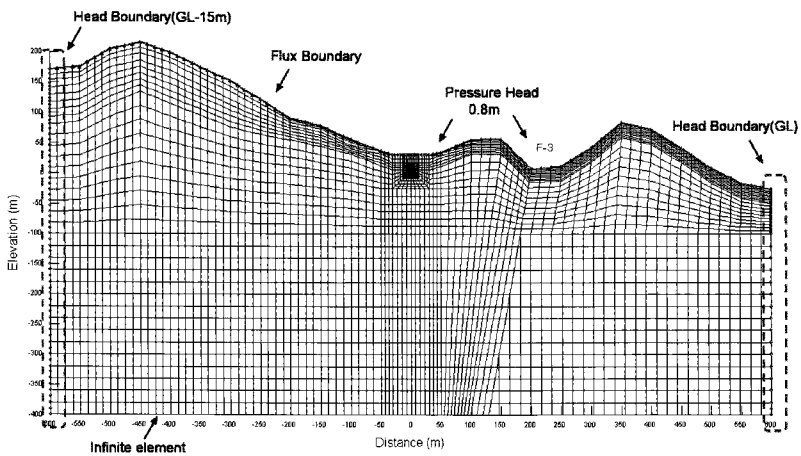


그림 9. 간천계곡 통과구간 부정류 해석 경계조건

는 터널내 유입수량 검토를 통한 수리학적 안정성 검토가 주 해석목적이므로 해석영역의 좌우경계에 일정 수두 경계(constant head boundary)를 부여하여 계곡의

수심이 일정한 것으로 가정하였다. 그림 8과 9는 부정류 해석의 경계조건을 나타내며 표 6은 부정류 해석시 사용한 해석 단계에 따른 경과시간을 나타낸다.

표 6. 부정류 해석의 해석 단계

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

3.4 해석결과 및 분석

3.4.1 무제치 3층 하부 통과구간(sta.369 km+820)

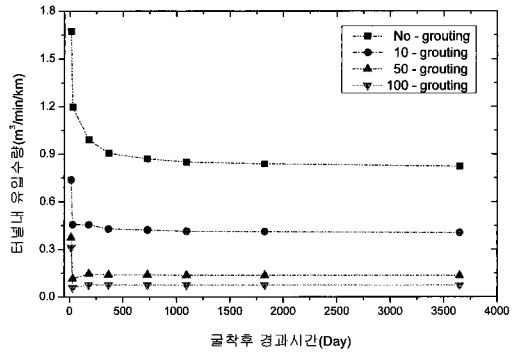
① 터널내 유입수량 분석

그림 10은 시간의 경과에 따라 측벽과 바닥부를 통해 터널내로 유입되는 수량을 그래프로 나타낸 것이며, 여기서 No, 10, 50, 100 은 각각 그라우팅의 유무와 효과를 의미한다. 그라우팅의 효과가 커질수록 유입수량은 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 단층파쇄대의 수리전도도가 10^{-5} m/sec일 때와 비교하여, 10^{-6} m/sec일 때 터널내 유입수량이 약 0.43~4.4% 감소하였다. 이는 암반 자체의 수리전도도가 매우 작은 값을 가지기 때문에 단층파쇄대가 터널과 교차하지 않는 경우 터널내 유입수량이 단층파쇄대의 수리전도도에 큰 영향을 받지 않음을 의미한다. 최대 유입수량은 단층파쇄대의 수리전도도가 10^{-5} m/sec이고 그라우팅을 하지 않은 최악의 조건(Case 1-1)에서 굴착직후 $1.67 \text{ m}^3/\text{min}/\text{km}$ 로 나타났으며 굴착후 점점 감소하여 2년 후에 약 53%인 $0.91 \text{ m}^3/\text{min}/\text{km}$ 로 수렴하였다. 참고로 원호터널 완성후의 터널 설계배수용량은 $3.0 \text{ m}^3/\text{min}/\text{km}$ 이다.

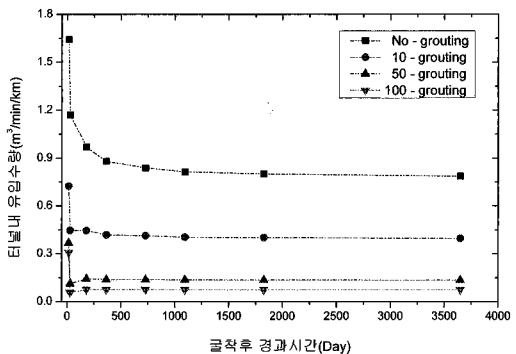
② 지하수위 검토

굴착 후 10년 경과시 무제치 3층 주변의 지하수위 강하를 살펴본 결과, 습지 하부에 위치한 용연 단층에 의하여 지하수가 유출되는 경향을 보였다. 단층파쇄대의 수리전도도가 10^{-5} m/sec일 때, 그라우팅의 여부/효과에 따라서 최대 6.6 m (Case 1-1), 3.5 m (Case 1-2), 1.9 m (Case 1-3)로 나타났고, 수리전도도가 1/100으로 감소하는 경우(Case 1-4)에서는 지하수위 강하가 발생하지 않았다. 단층파쇄대의 수리전도도가 10^{-6} m/sec일 때, 그라우팅에 의해 수리전도도가 1/50 이하로 감소한 경우에는 지하수위가 유지되는 것으로 나타났다.

그림 11의 (a)와 (b)는 각각 단층파쇄대의 수리전도도가 10^{-5} m/sec일 때, 그라우팅을 시행하지 않은 경우(Case 1-1)와 그라우팅을 시행하여 수리전도도가 1/100로 감소한 경우(Case 1-3)에 터널굴착 후 1개월, 1년, 10년 경과시의 무제치 3층 주변의 지하수위를 보여주고 있다. 그림에서 표기된 숫자는 해석시 적용된 해석 단계로서 2, 4, 8은 각각 1개월, 1년, 10년경과를 나타낸다.



(a) 단층파쇄대의 수리전도도: 10^{-5} m/sec



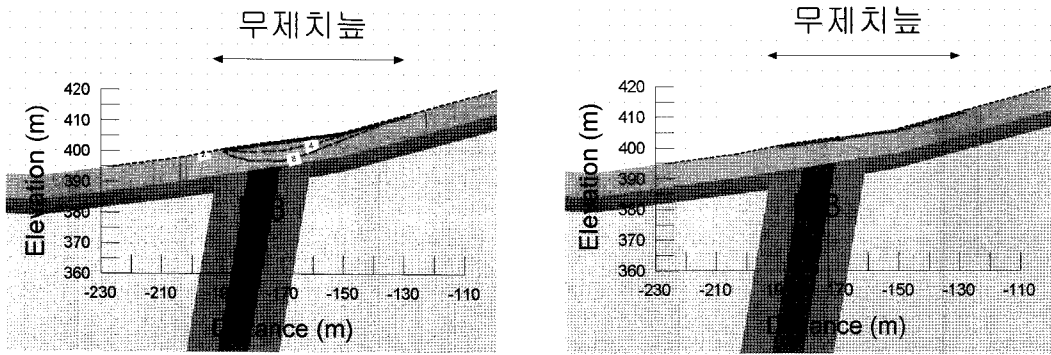
(b) 단층파쇄대의 수리전도도: 10^{-6} m/sec

그림 10. 무제치 3층 하부통과구간의 터널내 유입수량 해석결과

3.4.2 대성뿔봉 하부 통과구간(sta.370 km+400)

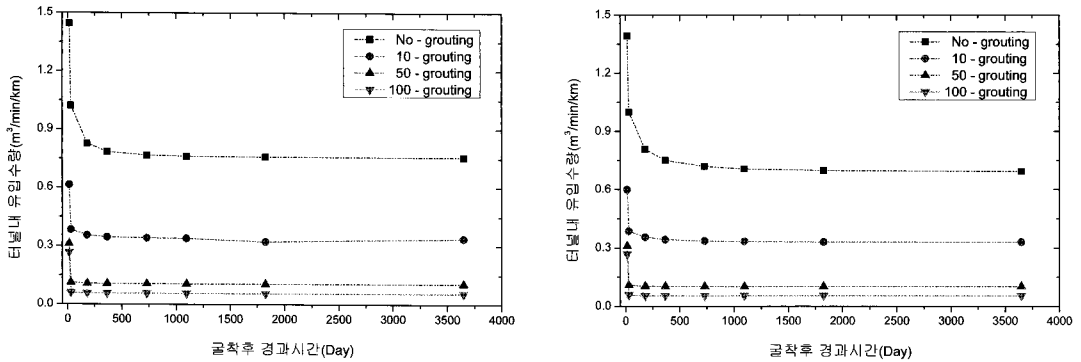
① 터널내 유입수량 분석

그림 12는 시간의 경과에 따라 측벽과 바닥부를 통해 터널내로 유입되는 수량을 그래프로 나타낸 것이며, 여기서 No, 10, 50, 100은 각각 그라우팅의 유무와 효과를 의미한다. 단층파쇄대의 수리전도도가 10^{-5} m/sec에서 10^{-6} m/sec로 감소함에 따라 터널내 유입수량은 약 0.15~8.40% 감소하였고 이는 무제치 3층의 경우와 같이 유입수량이 단층파쇄대의 수리전도도에 큰 영향을 받지 않았음을 의미한다. 그라우팅영역의 수리전도도가 감소함에 따라 유입수량은 선형적으로 감소하였고 최대 유입수량은 Case 1-1의 경우 굴착 직후 $1.45 \text{ m}^3/\text{min}/\text{km}$ 로 나타나 설계용수량 $3.0 \text{ m}^3/\text{min}/\text{km}$ 를 초과하지 않는 것으로 나타났다.



(a) 단층파쇄대의 수리전도도 10^{-5} m/sec 그라우팅을 시행하지 (b) 단층파쇄대의 수리전도도 10^{-5} m/sec 그라우팅 시행하여 수리전도도 1/100로 감소

그림 11. 무제치 3층 주변의 터널굴착 후 1개월, 1년, 10년 경과시의 지하수위



(a) 단층파쇄대의 수리전도도: 10^{-5} m/sec

(b) 단층파쇄대의 수리전도도: 10^{-6} m/sec

그림 12. 대성뒷늪 하부통과구간의 터널내 유입수량 해석결과

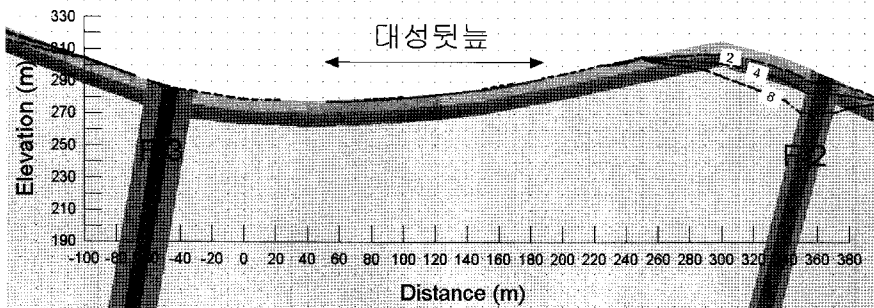


그림 13. 단층파쇄대의 수리전도도 10^{-5} m/sec, 그라우팅을 시행하지 않은 경우 대성뒷늪 주변의 터널굴착 후 1개월, 1년, 10년 경과시의 지하수위

② 지하수위 검토

굴착 후 10년 경과시의 대성뒷늪 부근의 지하수위는 그라우팅과 단층파쇄대의 수리전도도에 관계없이 모든 경우에 대해서 강하하지 않는 것으로 나타났다.

그림 13은 단층파쇄대의 수리전도도가 10^{-5} m/sec이

고 그라우팅을 시행하지 않은 경우(Case 1-1), 터널굴착 후 1개월, 1년, 10년 경과시의 대성뒷늪 주변의 지하수위를 보여주고 있다. 그림에서 표기된 숫자는 해석시 적용된 해석 단계로서 2, 4, 8은 각각 1개월, 1년, 10년 경과시를 나타낸다.

3.4.3 대성큰늘 하부 통과구간(sta.370 km+780)

① 터널내 유입수량 분석

그림 14는 시간의 경과에 따라 측벽과 바닥부를 통해 터널내로 유입되는 수량을 그래프로 나타낸 것이며, 여기서 No, 10, 50, 100은 각각 그라우팅의 유무와 효과를 의미한다. 단층파쇄대의 수리전도도가 10^{-5} m/sec에서 10^{-6} m/sec로 감소함에 따라 터널내 유입수량은 최대 75.18%가 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 폭 10 m, 최대 영향권 30 m의 F3(용연단층)이 터널을 관통하고 폭 6 m, 최대 영향권 15 m의 F4(조계암단층)이 F3(용연단층)과 터널 상부에서 교차하여 터널내 유입수량이 단층파쇄대의 직접적인 영향을 받기 때문이다. 터널내 최대유입수량은 단층파쇄대의 수리전도도가 10^{-5} m/sec 일 때 그라우팅 효과에 따라 $7.21 \text{ m}^3/\text{min}/\text{km}$ (Case 1-2), $2.70 \text{ m}^3/\text{min}/\text{km}$ (Case 1-3), $1.75 \text{ m}^3/\text{min}/\text{km}$ (Case 1-4)로 해석되었다.

② 지하수위 분석

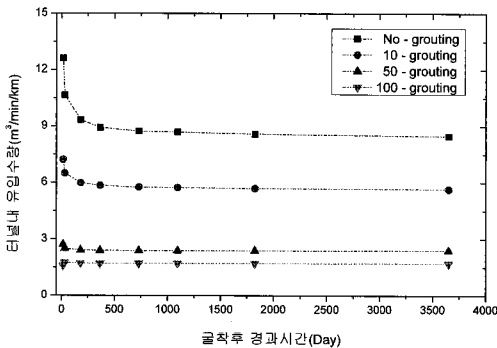
굴착 후 10년 경과시 대성큰늘 주위의 지하수위는 그라우팅을 통하여 수리전도도가 1/50 이하로 감소할 경우 강하하지 않는 것으로 나타났다. Case 1-1의 경우에

습지의 일부에서 0.6m로 최대 지하수위 강하를 보였다.

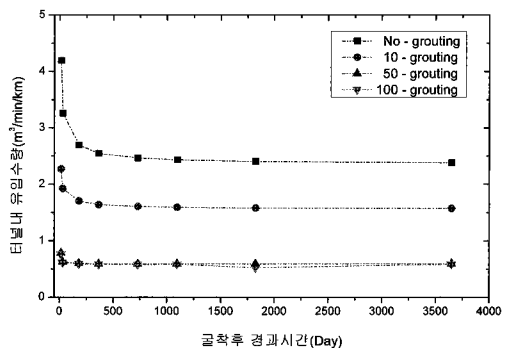
그림 15의 (a)와 (b)는 각각 단층파쇄대의 수리전도도가 10^{-5} m/sec일 때, 그라우팅을 시행하지 않은 경우(Case 1-1)와 그라우팅을 시행하여 수리전도도가 1/50로 감소한 경우(Case 1-3)에 터널굴착 후 10년 경과시의 대성큰늘 주변의 지하수위를 보여주고 있다.

3.4.4 간천계곡 하부 통과구간(sta.371 km+640)

그림 16은 시간의 경과에 따른 터널내 유입수량을 그래프로 나타낸 것이며 No, 10, 50, 100은 각각 그라우팅의 유무와 효과를 나타낸다. 굴착순상영역의 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 2-1의 경우에 $2.18 \text{ m}^3/\text{min}/\text{km}$ 로 나타났다. 굴착순상영역의 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 나타났다.

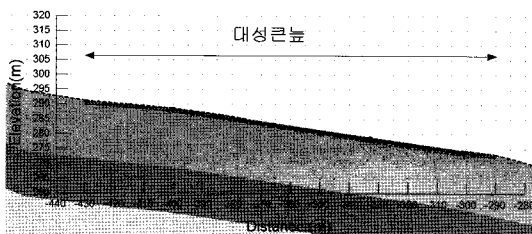


(a) 단층파쇄대의 수리전도도: 10^{-5} m/sec



(b) 단층파쇄대의 수리전도도: 10^{-6} m/sec

그림 14. 대성큰늘 하부통과구간의 터널내 유입수량 해석결과

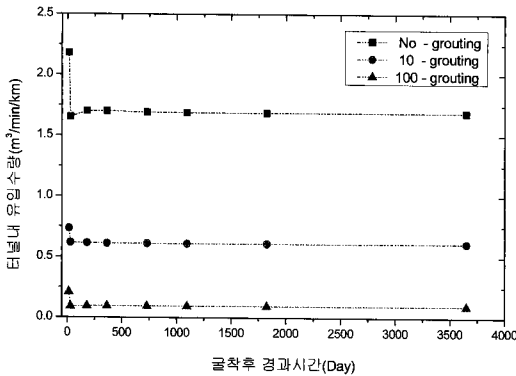


(a) 단층파쇄대의 수리전도도 10^{-5} m/sec, 그라우팅을 시행하지 않은 경우

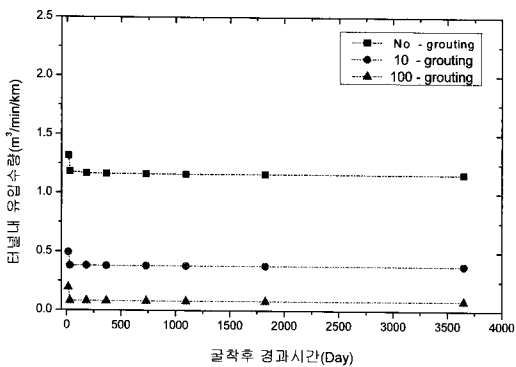


(b) 단층파쇄대의 수리전도도 10^{-5} m/sec, 그라우팅을 시행하여 수리전도도 1/50로 감소

그림 15. 대성큰늘 주변의 터널굴착 후 10년 경과시의 지하수위



(a) 굴착손상영역의 수리전도도: 100배 증가



(b) 굴착손상영역의 수리전도도: 10배 증가

그림 16. 간천계곡 하부통과구간의 터널내 유입수량 해석 결과

3.4.5 단층파쇄대와 터널의 구조적 위치에 따른 시나리오 해석

그림 17은 단층파쇄대와 터널의 위치관계에 따른 터널 내 유입수량을 비교한 결과를 나타내며 단층파쇄대의 위치가 터널중심과 멀어질수록 유입수량은 감소하였다. 단층파쇄대가 터널을 관통하는 경우와 비교할 때 터널과 수평이격거리가 10 m인 경우(Case 3-2)에는 10% 감소하였고, 20 m인 경우(Case 3-3)에는 약 77~90% 감소하여 현저히 작은 유입량을 보였다. Case 3-2의 경우에는 터널의 좌측벽이 단층파쇄대 내에 포함되어 있어 유입량의 95% 이상이 좌측에서 발생하였다. 그림 18은 굴착 후 6개월 경과시 유속벡터의 상대적 크기와 유입수량을 나타낸 것으로 Case 3-2의 경우 터널축을 중심으로 유속벡터가 비대칭의 형태를 보이며 좌우의 유입수량이 현저한 차이를 보이는 반면, Case 3-3의 경우에는 터널 좌우의 유입수량과 유속벡터가 큰 차이를 보이

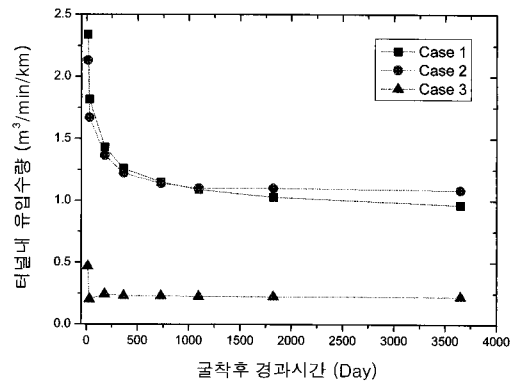
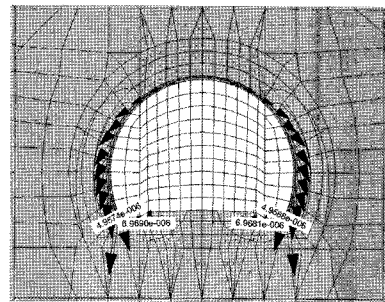
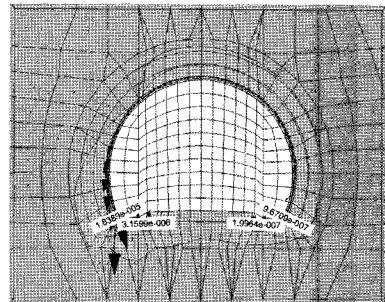


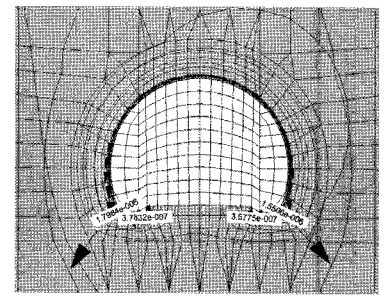
그림 17. 단층파쇄대와 터널의 위치관계에 따른 터널 내 유입수량



(a) Case 3-1



(b) Case 3-2



(c) Case 3-3

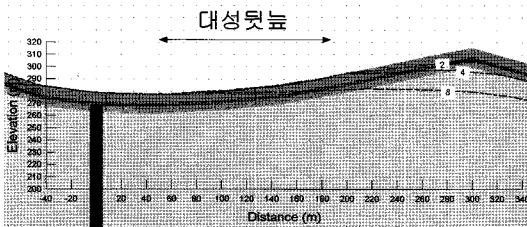
그림 18. 굴착 후 6개월 경과시 유속벡터의 상대적 크기와 유입수량

지 않는 것을 알 수 있다. 이를 통하여 단층파쇄대가 터널에 인접하여 존재하더라도 터널을 관통하지 않는다면, 유입수량에 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

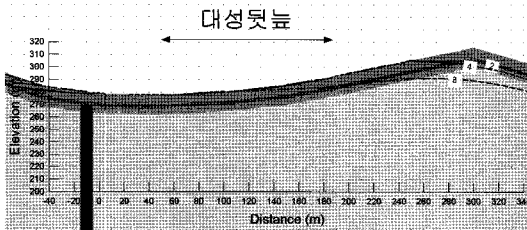
그림 19는 각 경우의 터널굴착 후 1개월, 1년, 10년 경과시, 대성딿늪 주변의 지하수위를 보여주고 있다. 그림에서 표기된 숫자는 해석 시 적용된 해석 단계로서 2, 4, 8은 각각 1개월, 1년, 10년 경과를 나타낸다. 굴착 후 10년 경과시 대성딿늪의 지하수위는 터널과 단층파쇄대가 교차하는 Case 3-1, Case 3-2의 경우에 대성딿늪 일부 강하하지만 터널과 단층파쇄대가 20 m 떨어진 Case 3-3의 경우에 대성딿늪의 지하수위에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

3.4.6 대책수립

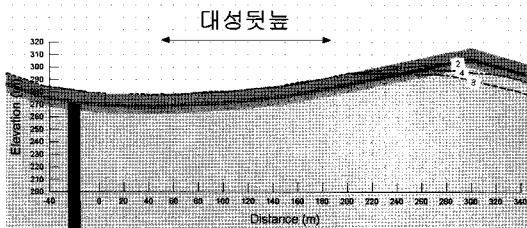
고산습지 하부 일부 구간에서 수리안정성 해석시 프리그라우팅이 필요치 않은 경우도 있었지만 불연속 암반의 불확실성에 대한 안전대책으로 초미립자로 침투



(a) Case 3-1



(b) Case 3-2



(c) Case 3-3

그림 19. 단층과 터널의 구조적 위치에 따른 대성딿늪 주변의 터널굴착 1개월, 1년, 10년 후 지하수위

능력이 우월한 MSG(Micro Silica Grouting)공법과 같은 프리그라우팅 차수 공법이 필요할 것이다. 터널 막장 전방의 파쇄대와 같은 지질이상대를 사전에 예측하고 안정성을 확보하기 위해서 TSP(Tunnel Seismic Prediction)탐사를 수행하고, 탐사에 의하여 파쇄대 징후가 있을 때에는 20 m 이상의 선진시추에 의한 터널 막장면에 감지공을 천공하여 용수량 예측이 선행되어야 한다. 단층파쇄대와 터널이 교차할 경우 파쇄대 부근의 집중적인 차수 그라우팅이 필요하며, 수리전도도를 1/100 이하로 감소시키기 위해 터널 막장 지하수 용출 구간에 차수 그라우팅이 필요하다. 습지 주변의 암반지하수위 관측공과 습지 수위 계측을 통하여 공사중 수위저하가 발생할 경우 추가 차수 그라우팅을 시행하도록 한다.

간천계곡부 하부 구간에서 수리안정성 해석만으로는 프리그라우팅이 필요없는 해석결과를 보이고 있지만 터널 상부에 계곡이 존재하고, 저토퍼 구감임을 감안하여 프리그라우팅이 필요할 것으로 판단되며 터널 공사중 갑작스런 용출 구간이 발생할 경우 급속으로 차수효과가 발휘되는 보조 차수공법이 필요하다.

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.

습지하부 통과구간의 터널 굴착에 따른 터널내 유입수량을 살펴본 결과, 터널과 단층파쇄대가 교차하지 않는 무제치 3늪과 대성딿늪의 경우에 프리그라우팅을 시행하지 않은 경우에도 최대 1.67 m³/min/km(굴착직후, 무제치3늪)로 나타나 설계용수량을 초과하지 않았다. 단층파쇄대의 수리전도도에 따라 유입수량이 10% 미만의 차이를 보였으며, 이는 터널내 유입수량에 단층파쇄대가 미치는 영향이 크지 않음을 의미한다.

터널노선과 단층파쇄대가 교차하는 대성큰늪의 경우 단층파쇄대의 수리전도도 감소에 따라 유입량이 최대 75.18%로 현저히 감소하였다. 단층파쇄대의 수리전도도가 10⁻⁵ m/sec일 때 프리그라우팅을 하지 않은 경우, 터널내 유입수량이 설계용수량을 크게 초과하는 것으로 나타났다.

터널 굴착 후 10년 경과시의 고산습지 주변 지하수위를 관찰한 결과, 대성큰늪의 경우 그라우팅 유무와 관계없이 지하수위 강하가 발생하지 않았다. 그러나 무제

치 3층과 대성뿔늪의 경우 그라우팅에 의해 터널 주변의 수리전도도를 각각 1/100, 1/50 이하로 감소시킬 경우 지하수위가 강하하지 않는 것으로 나타났다.

단층파쇄대와 터널의 위치관계에 따른 시나리오 해석 결과, 파쇄대가 인접하여 위치하더라도 터널과 직접적으로 교차하지 않는다면 터널내 유입수량 및 습지생태계에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 나타났다.

터널 막장 전방의 파쇄대와 같은 지질이상대를 사전에 예측하고 안정성을 확보하기 위한 TSP탐사와 용수량 예측이 선행되어야 하며 터널 막장 지하수 용출 구간에 암반의 수리전도도를 1/100 이하로 감소시키기 위한 차수 그라우팅이 필요할 것으로 판단된다.

간천계곡부 하부 구간에서 수리안정성 해석만으로는 프리그라우팅이 필요없는 해석결과를 보이고 있지만 터널 상부에 계곡이 존재하고, 저토포 구감임을 감안하여 프리그라우팅이 필요할 것으로 판단되며 터널 공사 중 갑작스런 용출 구간이 발생할 경우 급속으로 차수효과가 발휘되는 보조 차수공법이 필요하다.

사 사

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2007년도 첨단도시개발사업(04핵심기술C01)의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Long, J. C. S., Remer, J. S., Wilson, C. R. and Witherspoon, P. A. (1982). "Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures", *Water Resource Research*, 18(3) : 645-658.
2. Priest, S.D (1993). "Discontinuity analysis for rock engineering", Chapman & Hall.
3. Zhang, X. and Sanderson, D. J. (2002). "Numerical modeling of fluid flow and deformation of fractured rock masses", Pergamon : 23-90.
4. Min, K. B., Jing, L., and 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 sellafield, UK", *Hydrogeology Journal*, 12(5) : 497-510.
5. Bäckblom, G. and Martin C.D. (1999). "Recent experiments in hard rocks to study the excavation Response : Implications for the performance of a nuclear waste geological repository", *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 14(3) : 377-394.
6. Kovacs (1981). "Seepage Hydraulics", Elsevier Science Publishers, Amsterdam
7. Arya, I. M. and Paris, J. F. (1981). "A Physic-empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data", *Soil Science Society of America Journal*, 45 : 1023-1030.
8. Fredlund, D.G. and Xing, A. (1994). "Equations for the soil-water characteristic curve" *Canadian Geotechnical Journal*, 31 : 521-532.

박 정 욱



2003년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 공학사
 2006년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학석사
 Tel: 02-880-7234
 E-mail: jwpark@rockeng.snu.ac.kr
 현재 서울대학교 에너지시스템공학부 박사과정

손 봉 기



1998년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 2000년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2005년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사
 Tel: 031-380-2689
 E-mail: bkson@knoc.co.kr
 현재 한국석유공사 기술원 기술평가팀

이 정 인



1963년 서울대학교 광산학과 공학사
 1965년 서울대학교 대학원 광산학과 공학석사
 1974년 일본 도호쿠대학(東北大學) 대학원 자원공학과 공학박사
 Tel: 02-880-7221
 E-mail: cilee@snu.ac.kr
 현재 서울대학교 에너지시스템공학부 명예교수

송 재 준



1993년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1995년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사
 Tel: 02-880-9043
 E-mail: songjj@snu.ac.kr
 현재 서울대학교 에너지시스템공학부 교수