

지하수 유동과 응력-간극수압 연계 해석을 통한 노후터널의 라이닝 안정성 분석

A Study on the Lining Stability of Old Tunnel Using Groundwater Flow Modelling and Coupled Stress-Pore Water Pressure Analysis

김 범 주¹ Kim, Bum-Joo

정 재 훈² Jung, Jae-Hoon

장 연 수³ Jang, Yeon-Soo

천 병 식⁴ Chun, Byung-Sik

Abstract

The degradation of a tunnel drainage system leads to increases in pore water pressure around the tunnel and the lining stress, which results in affecting the tunnel stability. In the present study of the Namsan 3th tunnel, more than 30 year old tunnel, the effects of the drainage performance reduction due to drain hole clogging on the tunnel lining stability were investigated by examining pore water pressure distribution around the tunnel and the lining stresses through numerical analysis. Groundwater flow modeling on the Mt. Namsan region was done first and 3D seepage and coupled stress-pore water pressure finite element analysis were performed on the tunnel using the results of the groundwater flow modeling. The pore water pressure distribution and the tunnel lining stresses could be predicted using a drain hole outflow data measured in the tunnel site. This analysis method may be used to evaluate the current stability of old tunnels for which in most cases field investigations and related information are not readily available.

요 지

터널 노후화로 인한 배수능력 저하는 터널 주변 간극수압의 상승을 유발하고 이로 인해 터널 배면 라이닝 응력이 증가하여 터널 안정성에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 시공된 지 30여년이 지난 재래식 터널인 남산 3호 터널을 대상으로 수발공 폐쇄에 따른 배수조건 변화와 그에 따른 터널 주변 간극수압 및 라이닝 안정성의 관계를 수치해석을 통하여 분석하였다. 해석방법은 남산 지역에 대하여 지하수 유동 모델링을 수행하고 이로부터 설정된 수리경계조건을 적용하여 터널 침투류와 응력-간극수압 연계 3차원 유한요소해석을 수행하는 것으로 하였다. 이를 통하여 운영 중인 터널 현장에서 비교적 간단히 측정가능한 수발공 유출량 데이터를 이용하여 터널 주변 간극수압과 라이닝 응력을 산정할 수 있었으며, 본 연구에서 적용한 해석방법은 기존 자료가 부족하고 현장 조사에 제약이 많은 운영 중인 노후 터널에 대하여 현재 터널의 배수상태를 고려하여 터널 안정성을 평가하는데 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Drainage performance, Finite element analysis, Groundwater flow modeling, Lining stress, Old tunnel

1 정희원, 동국대학교 건설환경공학과 조교수 (Assistant Professor, Dept. of Civil and Environmental Eng, Dongguk Univ., bkim1@dongguk.edu, 교신저자)

2 정희원, 현대건설 연구개발본부 사원 (Staff, Research & Development Division, Hyundai Engineering & Construction Co., Ltd)

3 정희원, 동국대학교 건설환경공학과 교수 (Professor, Dept. of Civil and Environmental Eng, Dongguk Univ.)

4 정희원, 한양대학교 건설환경공학과 교수 (Professor, Dept. of Civil and Environmental Eng, Hanyang Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 국내에서 터널의 공용연수가 늘어남에 따라 여러 문제점들이 나타나는 노후터널의 수가 점차 증가하고 있다. 노후화에 따른 문제가 발생하는 터널들은 대부분 1980년대 이전 재래식 공법(ASSM)에 의해 시공된 터널들로 특히, 설계 당시 배수체계에 대한 적절한 고려가 없어 현재 터널 내 누수가 발생하거나 추가 개·보수를 통해 설치한 수발공에 막힘 현상이 발생하는 등 터널 배수와 관련하여 여러 문제가 발생하고 있는 실정이다. 대표적 도심지 터널인 남산 2호 터널의 경우도 지난 2001년 노후화에 따른 문제로 전면적인 개수공사를 실시한 바 있으며, 3년간의 공사기간동안 교통을 전면 차단함으로 인해 막대한 경제적·사회적 비용이 초래된 바 있다(남산 2호 터널 개수공사 설계보고서, 1998).

재래식 공법으로 시공된 터널에 대해서 그와 같은 배수와 관련된 문제를 근본적으로 해결하기 위해서는 NATM 터널에 적용되는 배수시스템을 적용하는 것이 방법일 수 있으나 실질적으로 기존 터널을 해체 후 재시공을 해야 하므로 통상적으로는 보수 차원에서 터널 측벽에 추가로 수발공을 설치하는 방법이 많이 적용되고 있다. 그러나, 시간이 경과함에 따라 추가로 설치한 수발공에도 폐색이 발생하는 경우가 있으며, 그러한 경우 라이닝 배면에 작용하는 수압이 증가하여 장기적으로 터널의 안정성이 저하될 수 있다. 따라서, 이처럼 터널 배수에 문제가 예상되는 노후터널들에 대해서는 현재 터널의 배수상태를 고려하여 안정성을 판단하고 그에 따라 폐색된 수발공의 영향을 분석하여 터널 배수능 개선을 위한 계획을 합리적으로 수립하도록 할 필요가 있다. 그러나, 노후터널의 경우 대부분 설계와 시공 당시 자료뿐만 아니라 시공 후 지하수위 등의 모니터링 자료가 부재하고 운영 중 터널에 대해 직접 조사를 통한 상태 평가가 쉽지 않으므로, 현재 터널의 배수상태와 그에 따른 터널의 안정성을 평가할 필요가 있을 경우 어려움이 따르게 된다.

본 연구에서는 그와 같은 노후터널이라 할 수 있는 시공된 지 30여년이 지난 ASSM 터널인 서울 남산 3호 터널을 대상으로 수치해석을 통해 현재 터널의 배수상태와 배수조건 변화에 따른 터널 안정성을 간접적으로 평가할 수 있는 방법에 관하여 연구를 수행하였다. 우선 남산 지역에 대한 지하수 유동 해석을 통해 터널의 배수 능력에 영향을 미치는 외부 환경요인인 지형, 지질 및

강우 특성을 반영한 지하수 거동을 예측하고, 이를 통해 확보된 수리학적 경계조건을 터널에 대한 침투류와 응력-간극수압 연계 유한요소해석에 적용하여 터널의 수발공 배수조건과 배면 간극수압과의 관계, 그에 따른 터널 라이닝 안정성 등에 관하여 조사하였다.

2. 문헌 고찰

터널 해석 관련 연구에서 지하수 유동 해석에 관한 연구는 주로 터널 굴착이 주변 환경에 미치는 영향을 파악하기 위한 목적으로 수행된 바 있다. 특히, 2006년 터널 환경영향 최소화 기술에 관한 연구(한국건설기술연구원, 2006)에서는 터널 시공 중, 또는 시공 후의 안정성과 환경 영향성 평가를 위해 Visual MODFLOW v 4.3을 이용하여 지하수 모델링을 실시하고 대상 터널에서의 지하수 유출량 및 자연 상태에서 지하수위 변화 등을 해석한 바 있다. 그리고, 최미정 등(2007)은 터널 모델링 시 개념 모델을 사용하여 산악터널 굴착 중 발생하는 지하수 유입량의 예측 및 지하수 유동 상태 등을 분석한 바 있다. 해당 연구에서 산악터널의 지하수 분포 해석을 통해 초기 지하수 수두조건을 산악 지형 구배를 따라 입력한 경우 수렴도가 높은 것으로 나타났는데, 이는 지하수 유동 해석에서 지반의 지형조건이 해석 결과에 미치는 영향이 크다는 것을 의미한다.

터널의 침투류 해석에 필요한 수리학적 경계조건은 지하수 유동 특성에 영향을 받게 되므로 터널 주변 간극수압을 고려한 터널의 안정 해석을 위해서는 지하수 유동해석과 침투류 해석을 연계한 해석이 필요하다. 그리고, 지하수 유동 해석은 터널 굴착에 따른 지하수 체계의 변화를 모사할 수는 있으나, 지하수 거동 변화가 터널의 구조 안정성 측면에서 직접적으로 미치는 영향을 상세히 모사할 수는 없다. 따라서, 터널의 안정성 분석은 터널 주변에 대한 침투류 해석과 함께 침투류가 터널 주변 지반과 라이닝에 미치는 응력을 해석해야 가능하다. 이정덕 등(2002)은 터널 부직포의 투수계수가 터널에 미치는 영향을 분석하고 터널 부직포의 투수계수에 따른 라이닝 간극수압과 터널 내 유입수량과의 관계를 도출한 바 있다. 또한, 신중호 등(2007)은 NATM 터널의 배수시스템의 수리기능 저하가 터널 라이닝에 미치는 영향을 연구하고 모형실험과 수치해석을 통해 터널 라이닝의 잔류수압발생 메커니즘을 확인한 바 있다. 그리고, 신희성 등(2006)은 측벽수발공의 터널방수라이닝

배면수압 저감효과에 관한 연구를 수행하고 수발공의 길이, 위치, 배열 조건에 따른 터널 라이닝 배면수압의 분포 특성을 조사하였으며, 이를 통해 터널배면의 간극수압을 효과적으로 저감시키기 위한 수발공 패턴을 제시한 바 있다. 또한, 한국형 싱글셀 터널공법 개발 연구(한국건설기술연구원, 2006)에서 주변 암반 및 지하수 조건에 따라 시공 또는 운영 중 터널에 대해서 수발공 배수 성능에 따른 라이닝과 지하수 상호 작용을 수치해석을 통해 조사하고, 수발공이 터널의 잔류수압과 유발응력을 저감시키는데 큰 효과가 있으며 수발공의 폐색이 진행됨에 따라 터널 간극수압과 라이닝 응력이 증가하는 경향이 있음을 확인한 바 있다.

그러나, 위의 연구들에서 해석 터널은 실제 터널을 대상으로 한 것이 아니라 임의 단면과 지반 조건을 가정한 경우이거나, NATM 터널의 배수시스템을 적용한 경우였다. 따라서, 본 연구에서와 같이 실제 재래식 터널에 대하여 터널 지하수 거동에 영향을 미치는 지형적, 강우 특성을 고려한 지하수 유동 해석과 이를 기초로 터널에 대한 침투류 및 응력-간극수압 연계 해석을 수행하여 터널 수발공의 배수능력과 간극수압 관계, 터널 라이닝 안정성 등을 조사한 연구는 기존 연구들과 차별화된 점이라 할 수 있다. 터널 침투류 해석을 수행할 경우 수리학적 경계조건의 입력이 필수적이거나 실제 노후터널을 대상으로 할 경우 관련 조사 자료가 충분하지 않은 경우가 많아 그만큼 정확한 해석이 어렵게 된다. 그러한 경우에는 터널 주변 지역에 대한 지하수 유동 해석을 통해 수리학적 경계조건을 확보하고 이를 이용해 터널 침투류 및 안정 해석을 수행하는 것이 보다 합리적인 방법이라 할 수 있을 것이다.

3. 기본 이론

3.1 지하수의 수리지질학적 특성 인자

지하수의 수리지질학적 특성은 지하수 투수특성과 저류특성으로 대별할 수 있다. 지반 내 투수특성의 주요 인자는 투수계수와 투수량계수이며, 지반 내 지하수와 관련한 저류특성의 주요인자로는 공극률, 저류계수, 비저류계수와 비산출률이 있다. 여기서, 투수량계수란 흡수속에서 물이 단위 동수구배 하에서 대수층의 전두께와 단위 폭으로 이루어진 면을 통하여 투수되는 물의 양을 의미하고 다음 식과 같이 표현된다.

$$T = Kb \quad (1)$$

여기서, T 는 대수층의 투수량계수, K 는 투수계수, b 는 포화대 두께를 의미한다.

저류계수란 흐름이 시간에 따라 변동하는 비정상상태의 해를 구할 때 사용되는 대수층의 저류성을 나타내는 상수로, 피압대수층의 단위면적을 가지는 연직 흡기등에 단위 1의 지하수 수두(piezometric head)가 저하될 때 이 흡기등에서 배출되는 수량을 의미한다.

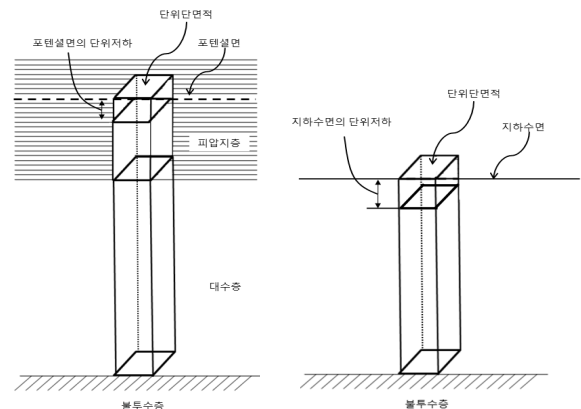
$$S = S_s \times b = \left(\gamma_w \left(\frac{1}{E_s} + \frac{n}{E_w} \right) \right) b = (\gamma_w (\alpha + n\beta)) b \quad (2)$$

여기서, S 는 저류계수, S_s 비저류계수, α 는 피압대수층의 압축계수, 즉 탄성계수(E_s)의 역수이고, n 은 공극률이며, β 는 물의 압축계수로서 물의 탄성계수(E_w)의 역수이다.

저류계수가 대수층 두께 b 에 대한 저류량을 의미하는 반면 비저류계수란 대수층의 두께를 단위 길이로 보았을 때 저류량을 의미하는 것으로, 단위수두 변화 시 단위 대수층 길이의 다공질 매체로부터 배수될 수 있는 지하수 양을 나타낸다.

$$S_s = \gamma_w (\alpha + n\beta) \quad (3)$$

또한, 나머지 저류특성 인자 중 하나인 비산출률은 자유면 대수층의 저류성을 나타내며 단위 수평단면적을 가진 연직 흡기등에 단위길이 1의 지하수면 저하가 일어날 때 이 흡기등이 배출하는 수량을 나타낸다.



(a) 피압대수층의 저류계수 (b) 자유면 대수층의 비 산출률

그림 1. 대수층의 저류성을 나타내는 개요도(장연수, 2006)

피압대수층의 경우, 수압이 감소함에 따른 팽창고 대수층의 압축에 의한 2차 효과로 물이 배출되는 반면 자유면 대수층은 흙의 공극으로부터 실제 물이 배출되는 현상을 반영하여 비산출율은 피압대수층의 저류계수보다 월등하게 큰 값을 가지게 된다.

3.2 지하수 함양량

지하수 함양이라 함은 외부로부터 물이 포화대에 흡수 또는 주입되어 지하수량을 증가시키는 과정을 의미하며, 이러한 과정을 거쳐 포화대에 지하수가 유입된 양을 지하수 함양량이라 한다. 지하수 함양량 산정에는 다양한 방법들이 사용되고 있는데 주로 사용되는 방법 중 하나가 물수지 분석방법이다. 이 방법에서는 분석대상 수역내의 강우량과 지하함양량, 증발산량, 지표유출량 간 수문 평형이 유지된다는 가정 하에 다음 식과 같이 지하수 함양량이 산정된다.

$$R = P - ET - S \pm W \quad (4)$$

여기서, R : 지하수함양량, P : 강우량,
 ET : 증발산량 S : 지표유출량
 W : 타수역으로부터 유입 및 유출된 양을 말한다.

3.3 수압을 고려한 터널 라이닝 검토

터널 콘크리트 라이닝의 허용강도는 라이닝에 재해지는 하중의 조합을 검토하여 결정하게 된다. 설계 시 검토되는 하중은 터널이 유지되는 동안 발생하는 상시 하중으로 정해지고 재하하중 중에서 수압하중은 배수형 터널의 경우 배수능력이 저하됨에 따라 설계하중보다 증가될 수 있다. 따라서, 터널 배수체계에 대한 적절

한 고려없이 콘크리트 라이닝으로만 암반 하중을 지지하도록 설계된 재래식 터널의 경우에는 특히 수압하중이 터널 안정성에 중요한 영향을 미친다고 볼 수 있다. 이 때, 터널 라이닝의 안정성은 재하하중으로 인해 라이닝에 발생하는 휨압축응력과 라이닝 콘크리트의 허용응력을 비교하여 검토할 수 있다. 국내의 경우, 콘크리트의 허용응력으로서 표 1과 같은 기준을 제시하고 있다.

4. 수치해석 방법

본 연구에서는 서울의 대표적 도심지 노후터널인 남산 3호 터널을 대상으로 수치해석을 통해 수발공 배수 능력과 그에 따른 터널 라이닝 안정성과의 관계를 조사하고자 하였다. 라이닝 안정성에 영향을 미치는 터널 배면의 간극수압은 터널 주변 지하수위와 수발공 유출량을 측정하여 상호 관계를 파악함으로써 산정할 수 있다. 그러나, 대상 터널의 경우 이에 대한 기존의 모니터링 자료가 부재하고 터널이 운영 중인 상황에서 정확한 측정이 어려웠으므로 수치해석을 통해 간접적으로 지하수위-수발공 유출량의 관계를 파악하고자 하였으며, 이를 위해 지하수 유동과 침투류 해석을 연계하는 방법을 적용하였다. 지하수 유동 해석 프로그램으로는 3D 유한차분 지하수 유동 모델링 소프트웨어인인 Visual MODFLOW v.4.3을 사용하였으며, 모델링시 서울시 강수량 데이터와 남산 지형, 지질자료 및 터널 위치와는 많이 이격되어 있으나 남산 주변 기존 시추공을 통해 관측된 지하수위 자료를 이용하였다. 또한, 지하수 유동해석을 통해 얻어진 수리학적 경계조건을 터널 침투류와 응력-간극수압 연계 해석에 적용하여 3D 유한요소해석을 수행하였으며, 이를 통해 터널 배면 간극수압과 수발공 배수능력 변화에 따른 터널 라이닝의 안정성을 조사하였다. 터널 침투류와 응력-간극수압 연계 해석 프로그램으로는 범용 지반 유한요소해석 프로그램인 Midas GTS v4.02

표 1. 콘크리트의 허용응력(도로교설계기준, 2008)

허용응력 기준		
허용휨압축응력		$f_{ca} = 0.4f_{ck}$
허용휨인장응력(무근확대기초와 벽체에서)		$f_{ca} = 0.13\sqrt{f_{ck}}$
휨강도(파괴계수)	보통콘크리트	$f_r = 0.63\sqrt{f_{ck}}$
	모래경량콘크리트	$f_r = 0.54\sqrt{f_{ck}}$
	전경량콘크리트	$f_r = 0.47\sqrt{f_{ck}}$

f_{ck} : 콘크리트 설계기준 압축강도

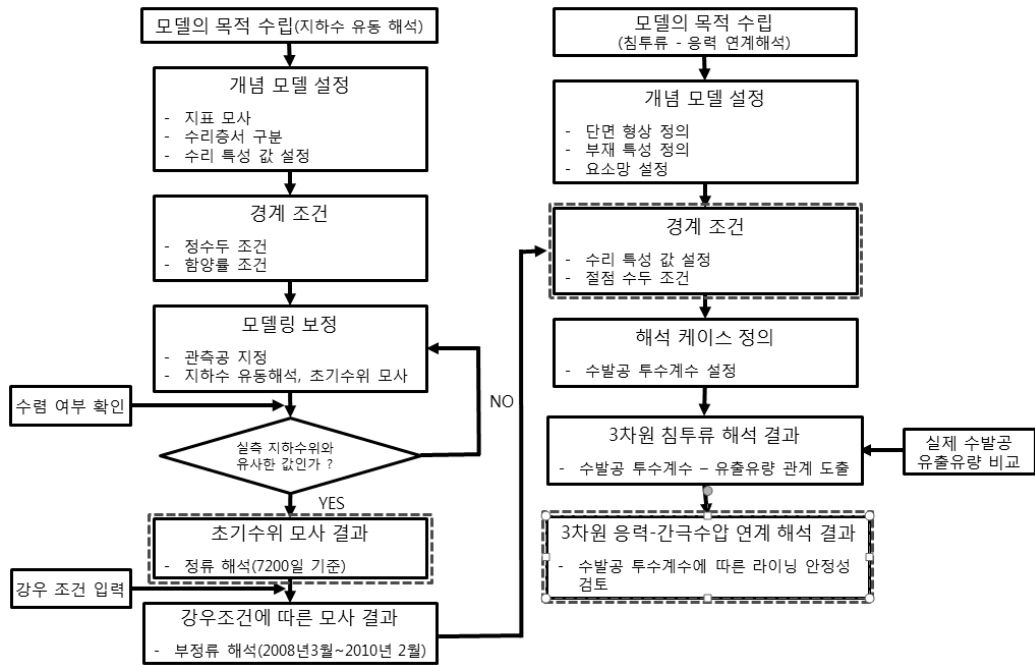
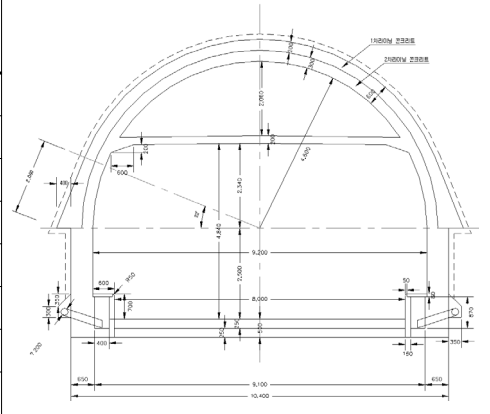


그림 2. 수치해석 과정 흐름도

표 2. 남산 3호 터널 현황

구분	상행선 용산동(종점) → 회현동(시점)	하행선 회현동(시점) → 용산동(종점)
소재지	서울특별시 중구 회현동~용산구 용산동	
준공년도	1978년 3월	
연장 (갱문제외)	설계시	1,280m
	현재	1,284.6m
터널공법	ASSM	
차선	2차선	
차선폭	7.5m	
유효높이	4.548~4.807m	4.616~4.806m



를 사용하였다. 그림 2는 연구에 적용된 해석 과정의 흐름도를 나타낸다.

해석 대상 터널인 남산 3호 터널은 서울특별시 중구와 용산구에 위치한 남산을 남·북측으로 관통하는 산악 터널로써 1980년 준공된 ASSM식 터널이다. 표 2에 해석 터널에 대한 현황을 나타내었다.

5. 지하수 유동 해석

5.1 지하수 유동 모델링

지하수 유동 모델링을 위해 우선 남산 동북 측 지역

을 해석 영역으로 설정하여 해당 구간에 대한 수치지형도를 이용하여 지표면 등고를 모사하였다. 모델링 단계는 정류와 부정류로 구분하였고, 정류의 경우 총 기간을 7,200일을 기준으로 고정된 강우조건을 적용하여 지하수위 분포를 모델링 하였다. 이 때, 지하수 함양량은 김병우 외(2002)가 제시한 서울 연평균 강수량 1,450mm의 19.5%를 가정하였고, 지정 관측공과 실제 지하수위 비교를 통한 모델링 보정(calibration)을 수행하였다. 지하수위 관측공에 대한 정보는 표 3 및 그림 3에 나타낸 바와 같으며 관측공 지하수위와 수정 모델링 결과로부터 보정이 완료된 지하수위를 비교한 결과는 그림 4와 같다.

표 3. 모델링에 적용된 남산 지역 지하수위 관측공

	공 번	지반고(E.L, m)	지하수위		출 처
			심도(G.L, m)	표고(E.L, m)	
남산 3호 터널	2190100146	188.0	163.0	25.0	국가지하수정보센터 (www.gims.go.kr)
	1199900003	90.0	80.0	10.0	
	2190100190	63.6	55.6	8.0	
	2199400009	50.7	32.0	18.7	
	98-ACQ-001	98.3	90.0	8.3	남산 3호 터널 정밀점검보고서(2008) (시추기간: 1996/4월)
	98-ACQ-002	101.3	72.0	29.3	

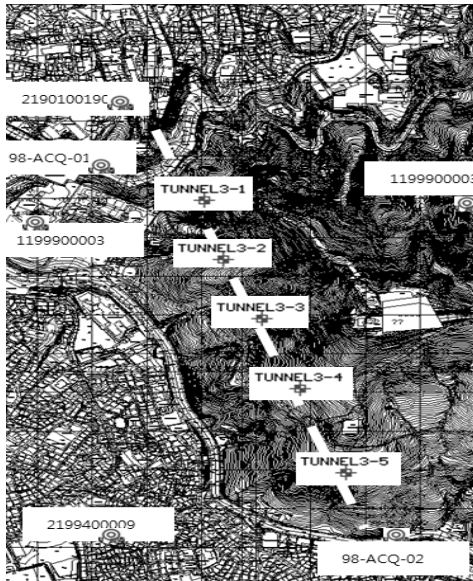


그림 3. 남산 지역 관측공 위치

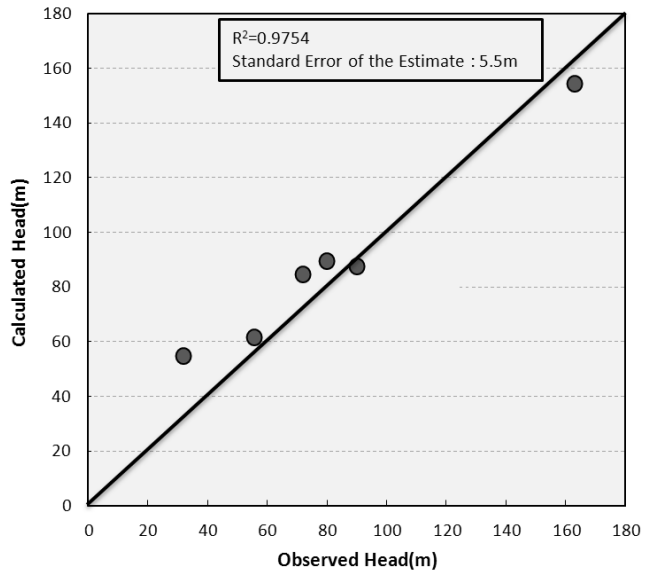


그림 4. 관측공에서의 실측치와 예측치 비교

표 4. 남산 3호 터널 지역 지하수 유동 모델링의 입력 물성값

구 분		투수계수 (m/s)	저류계수	비산출율	공극률	
토 사	Layer1	9.0×10^{-6}	5.0×10^{-5}	0.20	0.20	
풍화암	Layer2	5.0×10^{-6}	1.0×10^{-5}	0.10	0.10	
연 암	Layer3	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-6}	0.05	0.05	
경 암	Layer4	Zone1	1.5×10^{-7}	1.0×10^{-6}	0.01	0.01
		Zone2	1.7×10^{-7}	1.0×10^{-6}	0.01	0.01

표 5. 2007년 3월~2010년 2월까지 서울시 강우량(서울시 기상연보 2007~2010년)

년	월	(mm)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2007				123.5	41.1	137.6	54.5	274.1	237.6	241.9	39.5	26.4	12.7
2008	17.7	15.0	53.9	38.5	97.7	165.0	530.8	323.7	26.7	41.8	19.7	25.8	
2009	5.7	36.9	63.9	66.5	109.0	132.0	576.0	285.3	64.5	66.9	52.4	21.5	
2010	29.6	55.5											

모델링 보정을 통해 부정류 모델링의 초기조건으로 적용을 위한 최적화된 수리특성 값을 도출하였으며, 그 결과는 표 4에 나타난 바와 같다.

정류 모델링 결과를 바탕으로 시간 변화에 따른 지하

수 거동을 모델링하기 위해서 부정류 모델링을 수행하였으며, 대상 기간은 2007년 3월부터 2010년 2월까지의 3년으로 하여 해당 기간 동안의 서울시 강우데이터를 모델링에 적용하였다(표 5 참조).

5.2 지하수 유동 모델링 결과

정류 모델링 결과는 시간에 따른 지하수 유입·유출량 변화가 없는 정상흐름 상태를 나타내며, 그림 5와 6은 각각 그러한 정류 모델링 결과 남산 지역의 지하수위 분포와 지하수 흐름 벡터를 나타낸 것이다. 상대적으로 고도가 높은 동측에서 등고선을 따라 서측방향으로 수위가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 터널 노선을 따른

최고 수위 단면은 그림 6에 B-B'로 표시하였다.

또한, 정류 모델링 결과를 초기 조건으로 하여 2007년 3월부터 2010년 2월까지 3년 동안의 지하수 거동을 부정류 모델링을 통해 모사한 결과는 그림 7~그림 9에 나타낸 바와 같다. 관측정 위치에서의 수위 변화를 해석한 결과 전체적으로 우기인 7~8월에 수위가 최대치를 나타내며 일부 지점에서는 최대 약 60m까지 수위의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 해석 기간 내 최고 수위

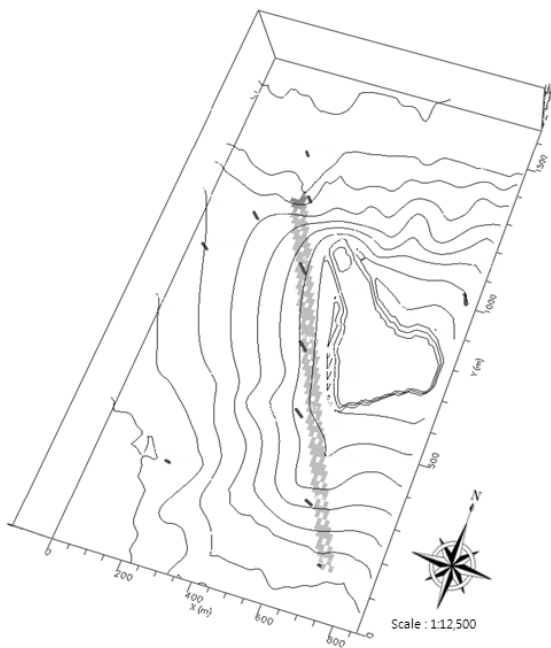


그림 5. 정류 모델링 결과 지하수위 분포

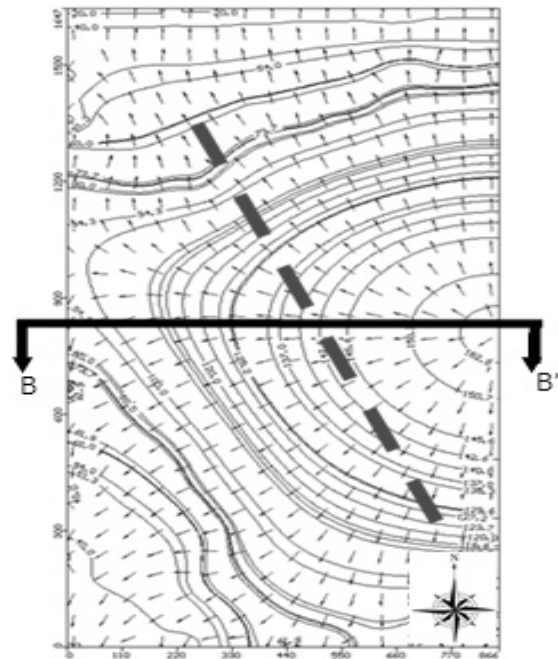


그림 6. 정류 모델링 결과 지하수 유동 벡터

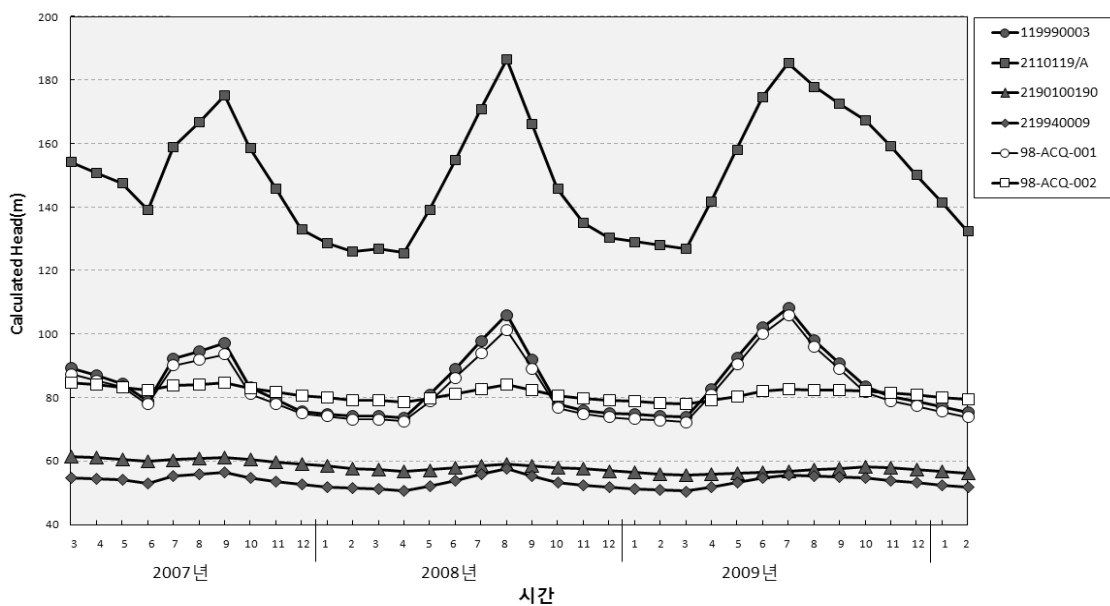


그림 7. 부정류 모델링 결과 관측공에서의 지하수위 변화

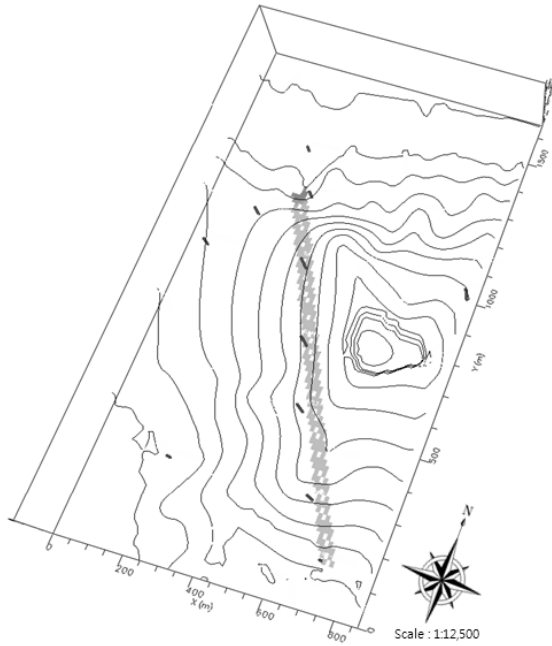


그림 8. 부정류 모델링 결과 지하수위 분포(2008년 8월 기준)

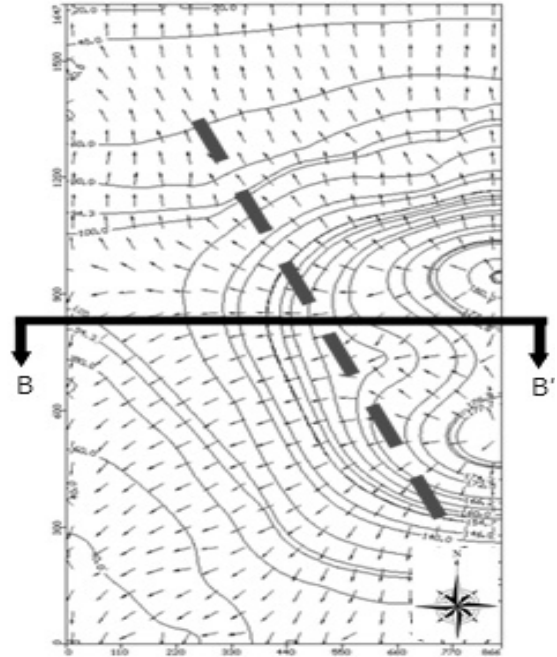


그림 9. 부정류 모델링 결과 지하수 유동 벡터(2008년 8월 기준)

를 나타낸 시점은 2008년 8월인 것으로 나타났으며, 해당 시점에서 터널 노선상 수위가 가장 높은 지점은 한남동 측 600m(그림 9의 B-B'로 표시) 지점인 것으로 확인되었다. 해당 지점은 터널 노선상 지반고가 가장 높은 지점으로써 이는 지하수위 분포가 지형 변화에 영향을 받는다는 것을 의미한다고 볼 수 있다.

6. 터널 침투류 및 응력-간극수압 연계 해석을 통한 터널 라이닝 안정성 분석

6.1 침투류 및 응력-간극수압 연계 해석

지하수 유동 모델링 결과를 이용해 터널 침투류와 응력-간극수압 연계 유한요소해석을 수행하였다. 침투류 해석을 위한 수리경계조건은 터널 라이닝 안정성 평가 시 보수적 해석이 되도록 부정류 모델링 결과 터널 노선상 최고 수위를 기준으로 설정하였다. 이 때 해석 영역은 지하수 유동 모델링 영역에 비해 축소가 되었으므로 해석 영역의 양측 경계 부근에 관측정을 추가로 설정하여 지하수 유동 모델링을 통해 구한 수위 조건을 적용하였다. 그리고 터널 배수로 인한 유출 발생시 그와 동일한 양의 유입이 해석영역 양측 경계를 통해 발생한다고 가정하고 정상류 해석을 수행하였으며 또한, 터널 측벽을 통해 설치된 수발공이 터널 종단을 따라 일정 간격을 이루고 있었으므로 수발공을 실제와 같은 조건으로 모

사하기 위해 3D로 모델링하여 해석을 수행하였다.

수발공 폐쇄 정도에 따른 배수상태의 변화를 모델링하기 위해 수발공의 투수계수를 변화시켜가며 침투류 해석을 수행하고 그에 따른 터널 배면의 간극수압을 조사하였으며, 응력-간극수압 연계해석을 통하여 터널 라이닝 휨압축응력의 변화를 확인하였다. 이 때 지반 모델로는 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 해석 시 대수층 구분은 지하수 유동 모델링과 동일하게 4개 층상으로 구분하였고, 입력 물성치로서 수리상수는 지하수 유동 모델링을 통해 보정된 값을 사용하고, 기타 지반 물성치는 해당 지층에 대해서 남산 2호 터널 개수공사설계 보고서(1998)와 남산 3호 터널 정밀점검보고서(2008)상의 값들을 참고하여 가정한 값을 사용하였다(표 6 참조).

수발공의 폐쇄 정도에 따른 배수능력의 차이는 수발공의 투수계수를 매개변수로 모델링이 가능하나 실제로 현장에서 터널내 배수는 수발공 뿐만 아니라 천공홀과 수발공의 틈에서 동시에 발생하는 상황이었으므로 현장에서 측정하는 수발공의 투수계수가 실제 수발공의 배수능력을 반영한다고 보기 어려웠다. 그리고, 수발공과 천공홀 틈에서 발생하는 유출까지를 포함하여 전체적으로 수발공 1개소당 배수능력을 대표해서 나타낸다고 볼 수 있는 수발공 투수계수를 직접 측정하기란 불가능한 상황이었다. 따라서, 본 연구에서는 수발공 투수계수를 매개변수로 하여 해석을 통해 구해진 수발공 1개소에 대한 유출량과 투수계수의 관계로부터 측정된

유출량과 비교를 통해 해당 수발공의 투수계수를 개략적이거나 추정 가능할 수 있을 것으로 판단하였다. 수발공 투수계수값은 침투류 해석을 통해 간극수압을 예측하는 데 사용될 수 있으며 이로부터 라이닝에 작용하는 하중을 산정하여 현재 라이닝의 안정성을 판단하는데 활용될 수 있다. 이러한 과정을 시도하기 위하여 본 연구에서는 우기였던 2011년 7월 남산 지역에 강한 호우가 있는 후 수발공을 통한 유출이 급격히 증가한 시점에 남산 3호 터널 현장을 방문하여 수발공의 유출량을 측정하였고 이를 통해 침투류 해석을 통해 얻어진 수발공 침투계수와 유출량의 관계로부터 현장 수발공의 투수계수를 산정하였다. 표 7과 8은 본 연구에서 침투류 해석시 적용한 수발공 투수계수 조건과 수발공 유출량 측정을 위한 현장 조사 내용을 간단히 나타낸 것이다. 또한, 그림 10과 11에 실제 수발공 전경과 유한요소해석

에서의 수발공 모델링 형상을 나타내었다.

6.2 터널 침투류 해석 결과

수발공 투수계수를 변화시켜가며 침투류 해석을 수행하고 그에 따른 해석 영역 내 간극수압의 분포를 조사한 결과를 그림 12에 나타내었다. 수발공 투수계수가 10^{-1} m/s로 배수가 원활히 일어난다고 볼 수 있는 경우와 수발공이 완전히 폐쇄되었다고 가정된 비배수조건을 비교할 경우 터널 상부 지하수위의 변화는 약 5m 내외 (≈ 50 kPa)의 차이를 보이는 반면, 터널 주변 간극수압의 크기는 400kPa 이상의 차이를 나타내어 수발공의 배수능력이 터널 주변 간극수압에 미치는 영향이 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 즉, 수발공의 폐쇄정도가 증가함에 따라 간극수압의 상승이 발생하며 그러한 경향은

표 6. 유한요소해석 입력 물성값

지층	변형계수 (tonf/m ²)	단위중량 (tonf/m ³)	프와송비	점착력 (tonf/m ²)	마찰각 (deg)	투수계수 (m/s)
토사층	2,000	1.9	0.3	1.5	30	9.0×10^{-6}
풍화암층	40,000	2.2	0.3	5	33	5.0×10^{-6}
연암층	100,000	2.5	0.3	30	35	5.0×10^{-7}
경암층	1,000,000	2.3	0.3	100	45	1.5×10^{-7}

표 7. 수발공 투수계수에 따른 해석 케이스

Case	투수계수 (m/s)	
1	1×10^{-1}	완전 및 부분 배수
2	1×10^{-3}	
3	1×10^{-5}	
4	1×10^{-7}	
5	-	비배수

표 8. 수발공 유량 실측 결과

일시	2011년 7월 18일
장소	서울 남산 3호 터널
측정위치	S88~S89
유출량 (m ³ /s)	3.06×10^{-5}



그림 10. 남산 3호 터널 수발공

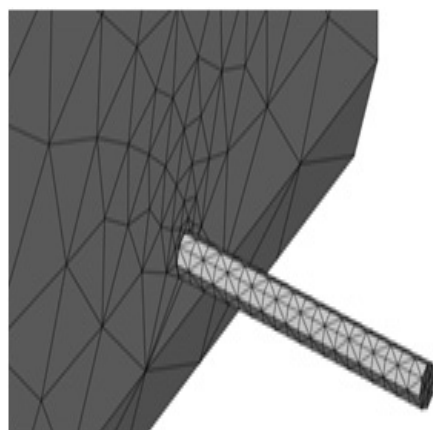


그림 11. 수발공 모델링 형상

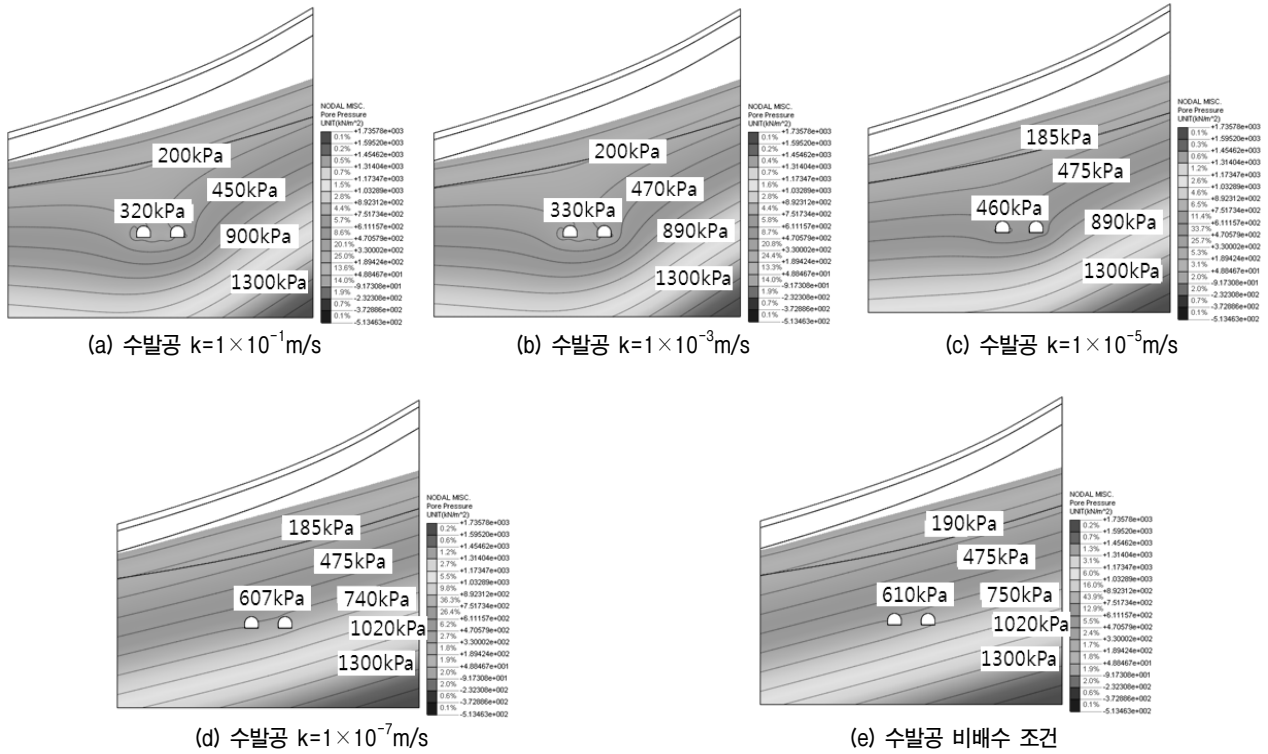


그림 12. 수발공 투수계수와 간극수압 분포

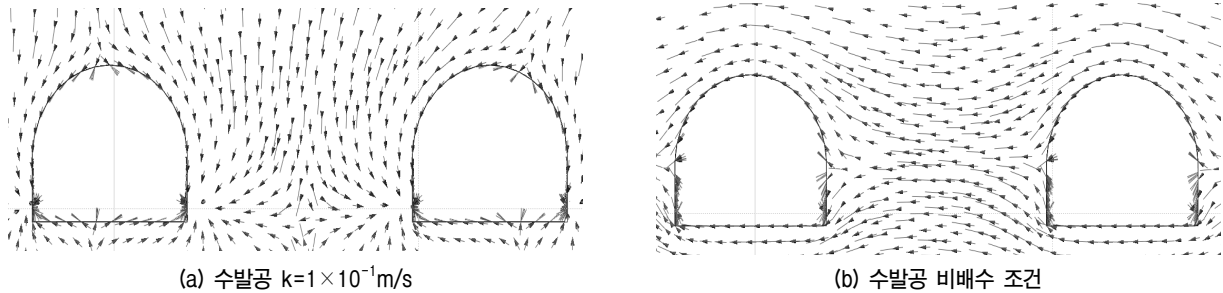


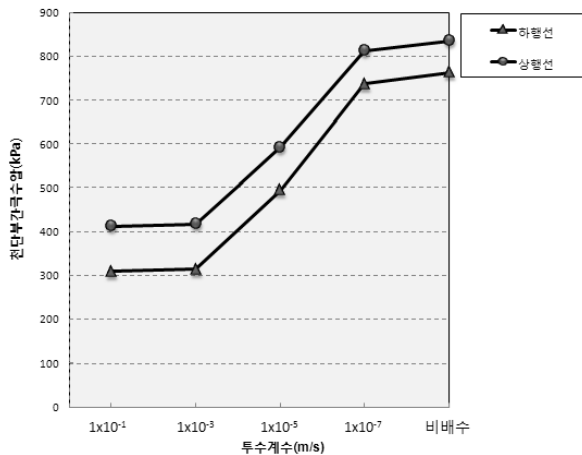
그림 13. 수발공 배수조건에 따른 터널 주변 흐름 벡터

터널 주변부에서 크게 나타났다. 또한, 그림 13은 두 가지 배수조건에 대한 터널 주변의 흐름 벡터를 나타낸 것으로 배수가 원활히 일어나는 경우 지하수 흐름이 수발공쪽으로 유도되나 비배수조건인 경우 수발공이 지하수 흐름에 전혀 영향을 주지 못함을 나타내고 있다.

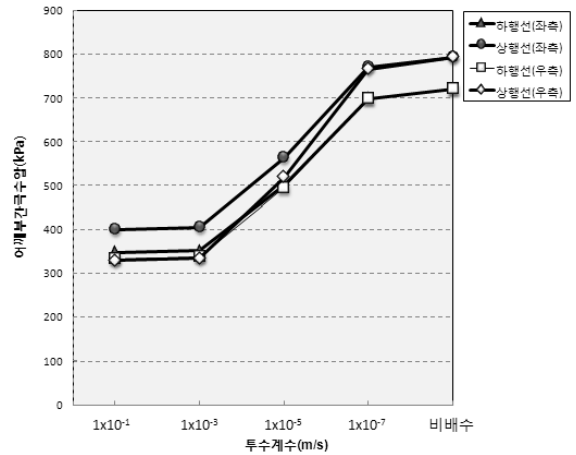
그림 14의 (a)~(c)는 각각 수발공 투수계수 변화에 따른 상·하행선 터널의 천단부, 어깨부, 측벽부의 간극수압 변화를 나타낸 것이다. 전체적으로 수발공 투수계수가 $10^3 \text{ m/s} \sim 10^7 \text{ m/s}$ 인 범위에서 간극수압의 증가 범위가 500kPa 내외로 상대적으로 크게 발생함을 알 수 있으며 수발공이 위치한 터널 측벽부에서 증가량이 가장 큰 것으로 나타났다.

한편, 그림 14의 (d)는 수발공 투수계수 변화와 그에 따른 수발공 유출량의 변화를 나타낸 것이다. 당연히 수

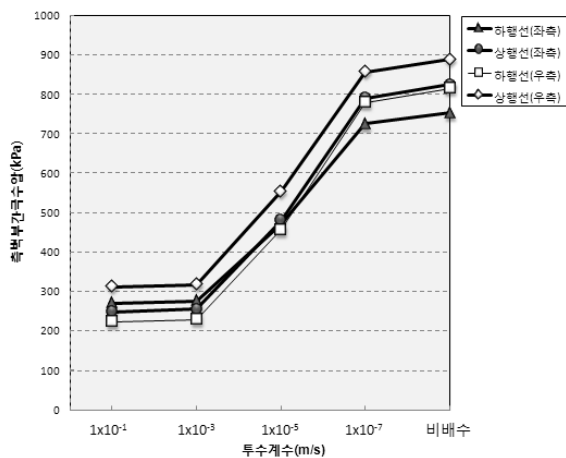
발공 투수계수가 감소함에 따라 유출량이 감소하는 경향을 나타내며, 이렇게 도출된 수발공 투수계수와 유출량의 관계는 수발공 유출량을 측정함으로써 6.1절에서 기술한 방법과 같이 수발공의 투수계수를 개략적으로 추정하는데 활용될 수 있다. 즉 이를 적용시, 표 8에서 나타낸 것과 같이 측정된 수발공의 유출량으로부터 그림 14(d)에서 나타낸 수발공 투수계수-유출량의 관계를 이용해 수발공의 투수계수가 대략 $10^5 \text{ m/s} \sim 10^6 \text{ m/s}$ 범위에 있다고 추정할 수 있다. 본 연구에서 침투류 해석시 적용한 수리경계조건은 지하수 유동 해석시 부정류 모델링을 통해 산정된 최고 수위 조건을 기준으로 설정된 것이나 수발공 유출량 측정이 7월 우기 중 강한 호우가 지나고 얼마 지나지 않은 시점이었으므로 지하수위가 많이 상승한 상태였다고 볼 수 있고 또한, 침투류 해석



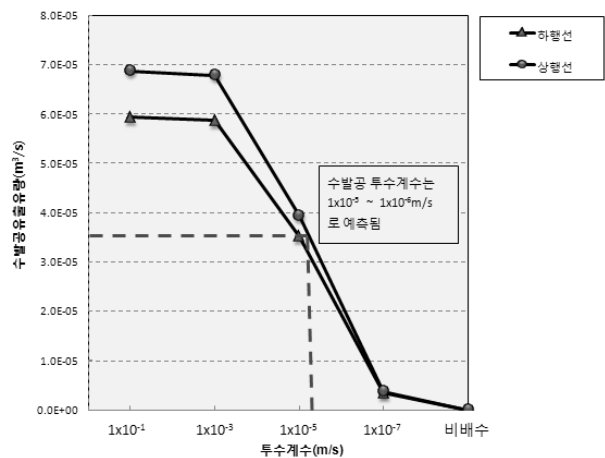
(a) 수발공 투수계수 변화에 따른 터널 천단부 간극수압



(b) 수발공 투수계수 변화에 따른 터널 어깨부 간극수압



(c) 수발공 투수계수에 따른 터널 측벽부 간극수압



(d) 수발공 투수계수와 수발공 유출량의 관계

그림 14. 수발공 투수계수와 터널 배면 간극수압 및 수발공 유출량의 관계

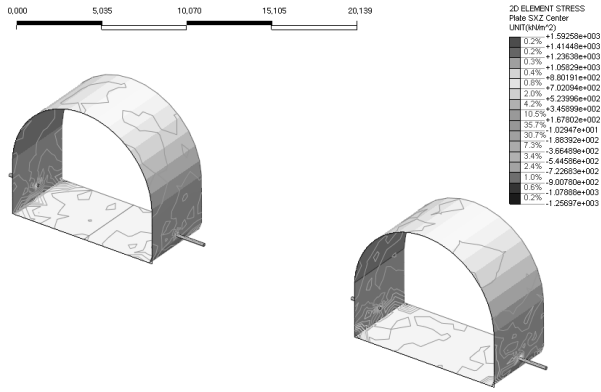
을 통해 지하수위 보다는 수발공 배수조건이 터널 주변 간극수압에 크게 영향을 미치는 결과로부터 그림 14(d)를 이용해 수발공 투수계수를 추정하는 방식이 합리적인 접근이 될 수 있는 것으로 판단하였다. 따라서, 추정된 투수계수는 침투류 해석을 통해 수발공 유출량 측정 당시 터널 주변의 간극수압과 라이닝에 작용하고 있는 하중을 산정하는데 사용이 될 수 있을 것이다.

6.3 응력-간극수압 연계 해석 결과

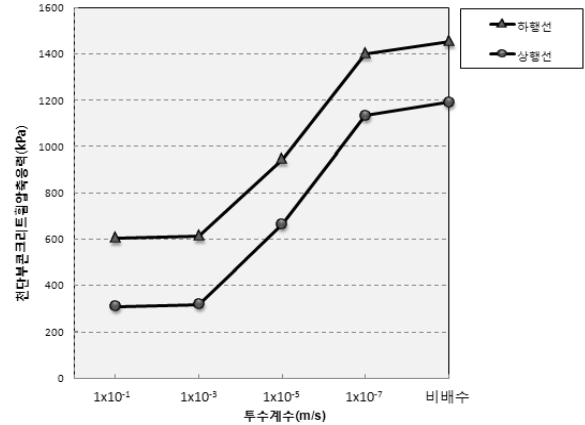
6.2절의 침투류 해석과 동일한 조건에서 응력-간극수압 연계해석을 통해 수발공 투수계수 변화에 따른 터널 라이닝에 작용하는 응력의 변화를 조사하였다. 그림 15(a)는 수발공 비배수조건에서 터널 라이닝의 횡압축 응력 분포를 나타내며, 그림 15(b)~(c)는 수발공 투수계수 변화에 따른 상·하행선 터널의 천단, 어깨, 측벽부 라이닝의 횡압축응력의 변화를 각각 도시한 것이다. 간

극수압 증가에 따라 라이닝에 작용하는 응력은 수발공 투수계수가 10^{-3} m/s에서 10^{-7} m/s로 감소하는 구간에서 상대적으로 증가폭이 크며 전체 수발공 투수계수 범위에 대해서 최대 약 1MPa의 차이를 보였다. 그리고, 상행선과 하행선 터널 그리고 터널 단면의 좌·우측에 따라 차이는 있으나 천단과 어깨부, 측벽부를 기준으로 측벽부에서 전체적으로 가장 큰 응력이 작용하는 것으로 나타났다, 그 크기는 가장 응력이 작게 작용하는 천단부와 비교해 전체 수발공 투수계수 범위에 대해서 평균적으로 약 8~9배 큰 것으로 나타났다.

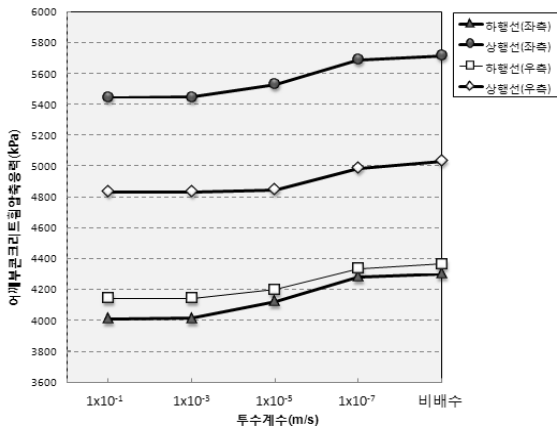
그림 16은 6.2절에서 기술한 대로 측정된 수발공 유출량과 해석을 통해 얻은 수발공 유출량과 투수계수의 관계로부터 추정된 수발공 투수계수를 적용하여 응력-간극수압 연계해석을 수행한 결과를 나타내며, 상·하행선 터널 천단부와 좌·우측 어깨부, 측벽부에 대하여 콘크리트 라이닝에 작용하는 횡압축응력의 크기를 전체적으로 표시한 것이다. 이러한 해석결과는 그림에 함께



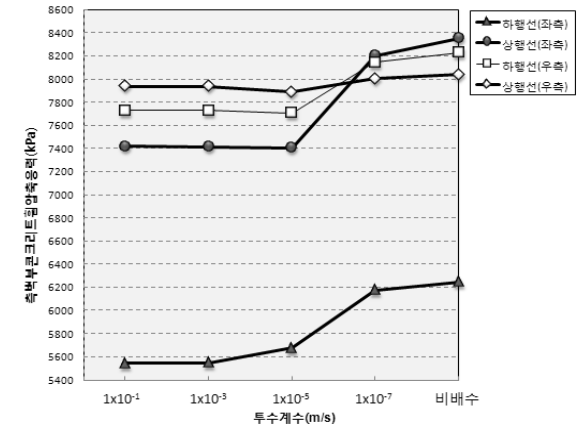
(a) 터널 라이닝 힘압축응력 분포(비배수 조건)



(b) 수발공 투수계수와 터널 천단부 라이닝 힘압축응력의 관계



(c) 수발공 투수계수와 터널 어깨부 라이닝 힘압축응력의 관계



(d) 수발공 투수계수와 터널 측벽부 라이닝 힘압축응력의 관계

그림 15. 수발공 투수계수와 라이닝 힘압축응력의 관계

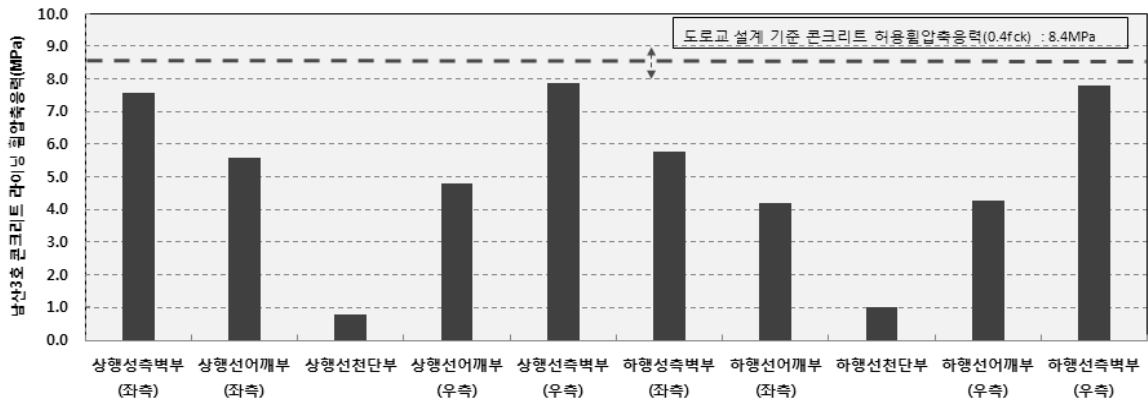


그림 16. 남산 3호 터널 라이닝 힘압축응력 해석 결과

표시한 표 1의 도로교설계기준(2008)의 콘크리트 허용 힘압축응력과 비교시 전체적으로 터널 라이닝 응력이 허용치 이내에 있는 것으로 나타났음을 의미한다. 이러한 결과로부터, 비록 여러 가정을 포함한 해석에 의존한 결과이긴 하나 본 연구에서 적용한 방법은 남산 3호터널과 같이 터널 배수를 수발공에 의존하는 재래식 노후

터널에 대해서 현재 터널의 라이닝 안정성을 간접적으로 평가하는 데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

7. 결론

본 연구에서는 시공된 지 30여년이 지난 대표적 도심

지 노후터널인 남산 3호 터널을 대상으로 터널 배수조건 변화와 그에 따른 터널 주변 간극수압 및 라이닝 안정성의 관계를 수치해석을 통해 분석하였다.

참 고 문 헌

- (1) 대상 터널 주변 지역에 대한 지하수 유동 모델링을 통해 지하수위 분포는 상대적으로 지형과 강우 조건에 크게 영향을 받음을 확인하였으며, 이를 통해 설정한 수리경계조건을 적용하여 터널 침투류 해석을 수행한 결과, 수발공을 통한 배수가 원활한 경우와 수발공이 완전히 폐쇄된 경우 터널 상부 지하수위의 변화는 약 5m 내외($\approx 50\text{kPa}$)의 차이를 보이는 반면, 터널 주변 간극수압의 크기는 400kPa 이상의 차이를 나타내어 수발공의 배수능력이 터널 주변 간극수압에 미치는 영향이 상대적으로 큰 것으로 나타났다.
- (2) 응력-간극수압 연계해석을 통해 수발공 투수계수 변화에 따른 터널 라이닝에 작용하는 응력의 변화를 조사한 결과, 간극수압 증가에 따라 라이닝에 작용하는 응력은 수발공 투수계수가 10^{-3}m/s 에서 10^{-7}m/s 로 감소하는 구간에서 상대적으로 증가폭이 크며 전체 수발공 투수계수 범위(비배수 $\sim 10^{-1}\text{m/s}$)에 대해서 최대 약 1MPa의 차이를 보였다. 그리고, 상행선과 하행선 터널 그리고 터널 단면의 좌·우측에 따라 차이는 있으나 천단과 어깨부, 측벽부를 기준으로 수발공이 위치한 측벽부에서 전체적으로 가장 큰 응력이 작용하는 것으로 나타났으며, 그 크기는 가장 응력이 작게 작용하는 천단부와 비교해 최대 약 8~9 배 큰 것으로 나타났다.
- (3) 지하수 유동과 터널 침투류, 응력-간극수압 연계 해석을 통해 수발공 투수계수와 유출량의 관계를 도출하고 현장에서 측정된 수발공 유출량 데이터를 이용해 측정 당시의 터널 라이닝에 작용하는 수압하중을 추정할 수 있었으며, 이러한 방법은 기존 자료가 부족하고 현장 조사에 제약이 많은 운영 중에 있는 노후터널에 대하여 현재 터널의 배수상태를 고려하여 안정성을 판단하고 그에 따른 개선 대책을 수립하는데 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

1. 국가지하수정보센터, <http://www.gims.go.kr/>
2. 기상연보 (2007~2010), 기상청
3. 김병우, 정상용, 강동환, 심병완, 정상원 (2002), “서울 북부 지역의 지하수 함양량 산정에 관한 연구”, 대한지질공학회 정기총회 및 학술발표회
4. 김형수, 이주현, 안주희, 윤운상 (2006), “산악 지역 내 터널 굴착 시 단열 암반 내 지하수 유동 분석”, 한국암반공학회지 Vol.16, No.4, pp.281-287.
5. 김홍석, 박준모, 장연수 (2006), “신뢰성기법에 의한 굴착지반에서의 3차원 지하수 흐름해석”, 한국지반공학회논문집 Vol.22, No.10, pp.69-76
6. 도로교설계기준 해설 (2008), 대한토목학회, 교량설계핵심기술 연구단
7. 동국대학교산업기술연구원 (2002), “지하수 영향을 고려한 터널 배수재 특성평가 및 터널과 지하공간 해석기법에 관한 연구”, 연구보고서
8. 서울특별시 건설안전관리본부 (1998), 남산 2호 터널 개수공사설계보고서
9. 서울특별시 도시기반시설본부 (2008), 남산 1호 터널 시설물안전점검편람
10. 서울특별시 도시기반시설본부 (2008), 남산 3호 터널 정밀점검보고서
11. 신중호, 권오엽, 신용석, 양유홍 (2007), “NATM 터널의 배수시스템 수리기능저하가 터널 라이닝에 미치는 영향”, 한국지반공학회논문 Vol.23, No.6, pp.77-84.
12. 신휴성, 윤동준, 신중호 (2006), “측벽수발공의 터널방수라이닝 배면수압 저감효과”, 대한토목학회 정기학술대회 Vol.2006, No.10, pp.3235-3238.
13. 이정덕, 김선홍, 정건홍 (2002), 터널 굴착시 지하수 유입량 예측을 위한 침투류 해석, 유신기술회보 제 9호
14. 장연수, 이광열 (2006), 지반환경공학, 구미서관
15. 최미정, 이진용, 구민호, 이강근 (2004), “터널모델링시 개념모델에 따른 지하수 유동 예측결과 비교연구”, 지질공학회지 Vol.14, No.2, pp.223-233.
16. 한국건설기술연구원 (2006), “터널건설 환경영향 최소화 기술 III”, 연구보고서
17. 한국건설기술연구원 (2006), “한국형 싱글셀 터널공법 개발”, pp.127-174, 연구보고서
18. J. H. Shin (2008), “Numerical modeling of coupled structural and hydraulic interactions in tunnel linings”, Structural Engineering & Mechanics, An International Journal, Vol.29, No.1, pp.1-16
19. MIDAS GTS v.4.02 User's Manual
20. Visual MODFLOW v.4.3 User's Manual

(접수일자 2012. 3. 14, 심사완료일 2012. 4. 12)

감사의 글

본 연구는 2010년도 서울시 산학연 협력사업(ST100052)에 의한 연구비 지원으로 수행되었음을 밝히며, 이에 감사사를 드립니다.