

부산시 해안 인근 지역에서의 터널 굴착에 따른 지하수 거동 영향 평가 Physical and chemical analyses of ground-water by impacts of tunneling at coastal urban region in Busan

김형수¹⁾, Hyoung-Soo Kim, 이주현²⁾, Ju-Hyun Lee, 안주희³⁾, Ju-Hee Ahn,
정의진⁴⁾, Ui-Jin Jeong, 김준모⁵⁾, Jun-Mo Kim, 윤운상⁶⁾, Woon-Sang Yoon,
정상용⁷⁾, Sang-Yong Chung, 이진무⁸⁾, Jin-Moo Lee, 우상우⁹⁾, Sang-Woo Woo

- 1) 넥스지오 지하수 환경팀 팀장, Team Manager, Hydrogeological Environment Team, nexGeo Inc.
- 2) 넥스지오 지하수 환경팀 대리, Assistant Manager, Hydrogeological Environment Team, nexGeo Inc.
- 3) 넥스지오 지하수 환경팀, Team staff, Hydrogeological Environment Team, nexGeo Inc.
- 4) 넥스지오 지반기술사업부 이사, Derector, Division of Geotech, nexGeo Inc.
- 5) 서울대학교 지구환경과학부 교수, Professor, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University.
- 6) 넥스지오 대표이사, Chief Executive Officer, nexGeo Inc.
- 7) 부경대학교 환경지질과학과 교수, Professor, Dept. of Environmental Geosciences, Pukyong National University.
- 8) SK건설 GEOTASK팀 부장, Senior Manager, GEOTASK Team, SK Engineering & Construction.
- 9) SK건설 GEOTASK팀 과장, P.E Manager, GEOTASK Team, SK Engineering & Construction.

SYNOPSIS : In the case of tunneling, the equilibrium state of hydro-geologic environments destroy and change abruptly in some section of whole works. Specially, it's very possible for seawater to intrude toward the site of tunnel if the field is nearly located in a costal region. In this study, we have evaluated the mechanism related between groundwater flow and seawater intrusion that by impacts of tunneling. Various hydro-geological field tests have performed for getting four representative hydrogeologic properties of geologic formations such as transmissivity (T), storativity(S), longitudinal dispersity(α_L), and effective porosity(n_e). For the effect of tunneling, the numerical model was first simulated based on the governing equation of groundwater flow. The results showed that the maximum drawdown was 17.2m and the total inflow into the tunnel had the range from 0.48 to 3.63m³/day/m. Secondly, the three dimensional numerical model was analyzed to investigate a characteristic of seawater intrusion based on the previous simulated results of groundwater flow. The results showed the seawater moved as the range of 200~220m from the initial interface between seawater and groundwater toward the tunnel.

Key words : tunnel, groundwater flow, seawater intrusion, hydrogeologic properties, numerical simulation

1. 서 론

터널 설계 및 시공에 있어서 지하수 거동에 대한 영향 평가의 중요성은 지속적으로 강조되고 있다. 터널 굴착 시 급격한 지하수 유출에 의한 안전 사고와 방수 및 배수공 등 지하수가 터널에 미치는 직접적인 영향에 대해서 많은 연구와 적용이 이루어져 왔다. 본 연구지역은 산악지형에 위치하는 기존의 터널과 달리 해안이 인접한 도심지역 하부로 터널 굴착이 계획되어져 있는 실정이다. 또한, 기존에 이미 지하철 공사 등 지하수계에 영향을 주는 다양한 문제들로 노출되어 있으며 터널 시공에 따른 주변 지역의 지하수의 급격한 유동 변화와 그로 인한 해수 침투가 예상되는 지역이다. 따라서, 위와 같이 발생 가능한 문제들을 분석/예측하여 터널 설계 시 대안책을 제시하고 민원 문제가 발생하였을 때 수리적 근거 자료로써 효과적으로 사용할 수 있다.

중전 터널 설계 과정에서 지하수 영향 평가의 경우, 직접 지하수 현장 조사 및 시험을 시행하지 않고 기존 문헌 값 등을 참조하여 그 영향을 모사 하는 사례가 많았다. 본 연구는 연구지역 내 수리지질학적으로 ①지하수 유동(groundwater flow)과 ②용질 이동 중 해수 침투(the seawater intrusion of solute transport)의 크게 두 가지로 나누어서 기존 문헌 및 지하수 관련 현장 답사 결과를 토대로 적절한 지하수 현장 시험 항목과 위치를 선정/실시하고 그 결과를 토대로 모델링 분석을 통해 터널 굴착 시 발생할 수 있는 현상을 예측하고 터널 설계의 활용방안을 제시하고자 수행하였다.

2. 현장 분석

2.1 지질 개요

본 연구지역은 한반도 남동부의 경상분지에 해당되며 대단층대인 양산단층계의 동래단층과 인접한다. 분포하는 주요 암석으로는 중생대 화산암류인 안산암질 응회암류와 안산암, 관입암류인 반려암, 화강섬록암과 흑운모 화강암이 분포하며 해안 인접부에는 제 4기 해성 퇴적층이 이를 피복한다. 70km 이상의 연장성을 보이는 동래단층은 북북동-남남서 방향의 우수향 주향이동 단층이며 이에 파생된 단층, 절리 등 여러 형태의 취성변형(Brittle deformation)이 발달할 것으로 예상된다(그림 1 참조).

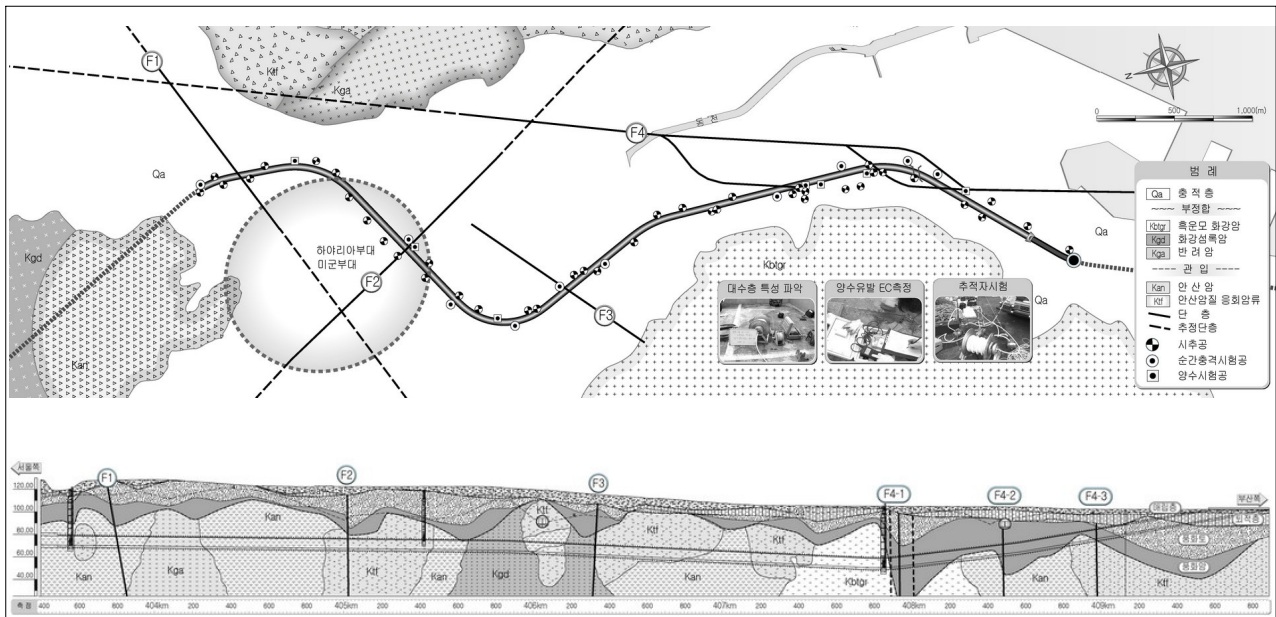


그림 1. 연구지역내 노선 주변 지질 종단면도 및 지하수 현장 시험 배치도

2.2 지하수 현장 시험

본 연구지역 내 수리지질학적으로 영향을 주는 Richards 방정식을 기초로 한 지하수 유동(groundwater flow)관련 지배 방정식(1)(Cheng et al., 1998)과 용질의 이송, 확산, 밀도차등의 이동(solute transport) 지배 방정식(2)(Yeh, 1999)은 다음과 같다.

$$\frac{\rho}{\rho_o}(\alpha\rho_o g \frac{\theta}{n_e} + \beta\rho_o g \theta + n_e \frac{d\theta}{dh}) \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot [K \cdot \nabla h + \frac{\rho}{\rho_o} \nabla z] + \frac{\rho}{\rho_o} q \quad (1)$$

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial S}{\partial t} + V \cdot \nabla C - \nabla \cdot (\theta D \cdot \nabla C) = [(\alpha\rho_o g \frac{\theta}{n_e} + \beta\rho_o g \theta + n_e \frac{d\theta}{dh}) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\rho}{\rho_o} V \cdot \nabla (\frac{\rho}{\rho_o}) - \frac{\partial \theta}{\partial t}] + Q \quad (2)$$

여기서, 대수층의 수리적 특성을 대표하는 상수는 투수량계수(T), 저류계수(S), 종분산 지수(α_L), 유효 공극률(n_e)이며 본 연구지역에서 수리상수를 획득하기 위해 지하수 현장시험을 실시하였다(표 1 참조).

표 1. 각종 지하수 현장 시험들의 목적 및 시험 회수

지하수 현장 시험		장기 양수	순간 충격	추적자	양수 유발 유속	실내수질 분석	수압시험
시험 목적							
지하수 유동	투수량계수(T)	○	○		○		○
	저류계수(S)	○	○				
용질 이동	종분산지수(α_L)			○			
	유효 공극률(n_e)			○			
시험회수 (공/회)		5	10	2	5	27	125

2.2.1 현장 설계

본 연구지역 내 암종 별 대표적인 수리상수를 획득하기 위해 지하수 현장시험들을 배치하였다(그림 1 참조). 대수층 내 전체적인 지하수 유동 특성을 파악하기 위해 장기 양수 및 순간 충격시험을 실시하였다. 또한 각각의 시추공에서 좀더 정밀한 수직별 지하수 유동 특성을 파악하기 위해 수압시험 및 양수 유발 유속 시험을 실시하였다. 연구지역 내 존재하는 지반의 풍화정도가 커서 수압시험이 불가능한 지역들이 발생하였고 이를 극복하기 위해 양수 유발 유속시험을 실시하였다.

이 시험은 구간별 수리전도도를 구해 낸다는 점에서 기존 수압시험과 동일한 성격을 가진다. 그러나, 구간별로 존재하는 단열들을 통해 지하수는 유입 또는 유출되는 양상을 보이는데 수압시험은 일괄적으로 시추공에서 주변 밖으로 지하수를 유출시키는 반면 본 시험은 자연적으로 일어나는 유입과 유출량을 파악할 수 있다. 본 시험의 분석 방법 순서는 첫째, 자연 유속을 측정하고 다음으로 양수를 유발하면서 유속을 다시 측정하여 두 값에서부터 구간별 수리전도도를 얻어낸다(Young et al, 1998).

$$K_i = \bar{K} \frac{(\Delta Q_i - \Delta q_i) / \Delta z_i}{Q/b} \quad (3)$$

여기서, \bar{K} 는 시추공의 평균 수리전도도, ΔQ_i 는 양수 유발 유속의 변화량, Δq_i 는 자연 유속의 변화량, Δz_i 는 측정구간, Q 는 양수율, b 는 대수층의 두께를 나타낸다.

해수 침투 관련하여 추적자 시험, 실내외 수질분석(주요 이온들 포함), 양수유발 EC측정 등을 실시하였다. 추적자 시험은 용질 이송 관련 수리상수인 종분산 지수 및 유효 공극률 획득을 위해 실시하였다.

실내외 수질분석은 연구지역 내 염해 정도를 파악하고 대략적인 해수/담수 경계면을 파악하기 위해 기존 자료 포함 1296공에서 실시하였다. 그림 2(a)는 염소이온 농도 분포도인데 이는 분석결과 매립에 따른 해안 변화와 밀접한 관계가 있는 것으로 판단되었다 (그림 2(b) 참조). 이러한 결과는 뒤에 해수침투 해석 시 해수/담수 경계면의 초기 조건 입력의 근거자료로 사용되었다. 이를 근거로 해수침투 정도를 파악하기 위해 양수유발 EC측정을 실시하였다. 양수유발 EC측정은 해수침투가 예상되는 지역에 양수정을 작성하여 지속적인 양수를 실시하면서 정기적인 EC측정을 하여 해수 포함 유무를 조사하였다.

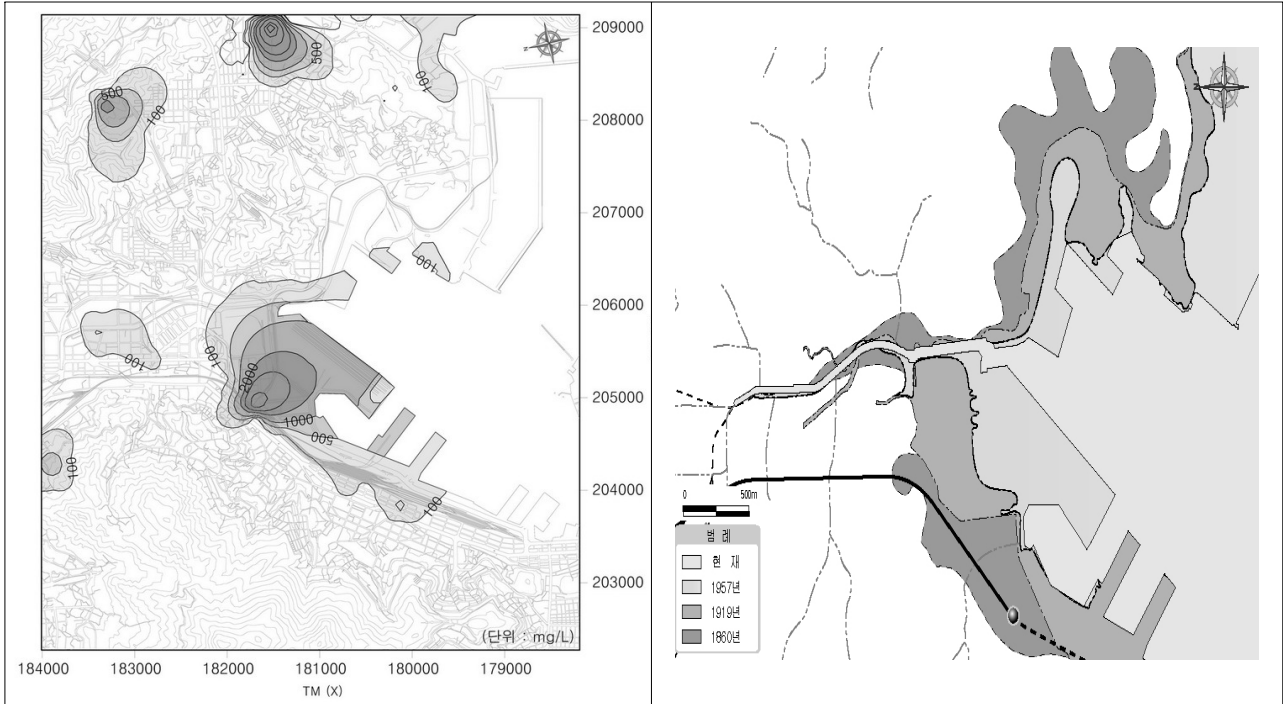


그림 2. 연구지역 내 (a) 염소이온농도 분포도와 (b) 매립에 따른 해안선 변화도(좌 (a), 우 (b))

2.2.2 시험 분석 결과

본 연구지역 내 지표지질조사, 물리 탐사, 시추주상도 분석 등을 종합한 결과 그림 1과 같이 풍화토, 풍화암, 연암, 경암의 네가지 암종으로 구분하였다. 지하수 현장 시험 결과 암종별 대표 수리 상수 값들은 표 2 와 같다.

표 2. 지하수 현장 시험 결과 암종별 대표 수리 상수들의 값

암종	지하수 유동관련 수리상수			지하수 이송-확산 관련 수리상수	
	$K(cm/sec)$	S		n_e	$\alpha_L(m)$
		$S_s(m^{-1})$	S_y		
풍화토	9.58×10^{-5}	3.4×10^{-3}	0.20	0.21	5.5
풍화암	1.74×10^{-5}	2.3×10^{-3}	0.12	0.15	4.2
연암	9.73×10^{-6}	1.3×10^{-4}	0.09	0.08	3.3
경암	7.55×10^{-6}	6.9×10^{-5}	0.05	0.05	0.5

3. 수치해석 분석

3.1 지하수 유동 해석

3.1.1 해석 개요

본 연구 지역은 일반적인 산악지형에서의 터널공사와 달리 복잡한 지하수계를 가진다. 터널 예상 구간 위로 2개의 지하철 노선이 놓여 있고 주변 대형빌딩, 아파트 단지 등에서 산발적인 대용량의 지하수를 사용하고 있다. 또한 도시화로 인하여 지하수 함양량의 산출이 매우 어려워져 계절에 따른 양상이 매우 복잡하다. 이러한 결과는 현장 조사 결과 나타난 일정한 해발 고도를 가지는 터널 예상 노선을 따라 매우 복잡한 양상을 가지는 지하수위 면에서도 잘 나타내었다.(그림 3 참조) 따라서, 모델링 분석 시 현재의 지하수계를 단순/명료화하여 모델링으로 적절히 구현하여 이것을 근거로 터널 굴착에 따른 지하수계의 변화를 분석해야한다. 지하수 유동 해석을 위해 다양한 경계조건을 나타낼 수 있는 다공질 매질에서 3차원 유한차분 프로그램 Visual ModFlow v3.0(McDonald & Harbaugh, 1983)로 모사하였다.

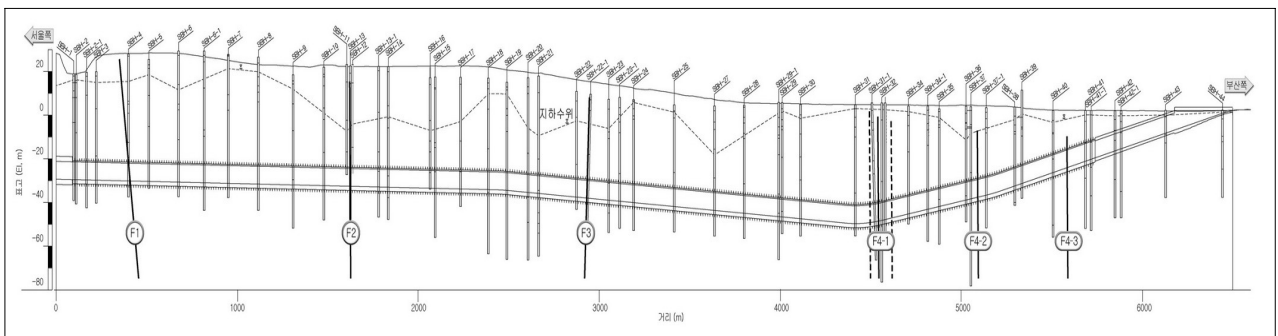


그림 3. 연구지역내 터널 예상 노선을 따른 지하수위 분포도

3.1.2 해석 결과

경계조건, 초기조건(표 2 참조) 및 연구지역 지하철 분포 등을 고려하여 정류 모사를 실시하여 관측된 지하수위로 보정을 하였다. 이를 토대로 터널 굴착 진행에 따른 지하수계의 변화 양상을 분석하였다. 터널 굴착에 따른 지하수위 강하는 최대 17.2m 발생하였고, 주변 약 120m까지의 영향반경을 가지는 것으로 분석되었다. 터널 굴착 후 그라우팅 및 방수시설 공사 후 지하수위는 어느 정도 회복되는 양상을 보였으나, 굴착 전 초기 지하수위의 근접한 회복까지는 상당한 시간이 걸릴 것으로 예측되었다. 또한 터널 내 단위 길이당 지하수 유입량은 $0.48\sim 3.63\text{m}^3/\text{day}/\text{m}$ 로 분석되었다.(그림 4 참조)

3.2 해수 침투 해석

3.2.1 해석 개요

본 연구 지역은 과거부터 해안 매립이 지속적으로 이루어졌다(그림 2(b) 참조). 따라서, 현재 해수 침투정도와 터널 굴착 시 해수 이동에 대한 영향범위를 예측 판단하여 대책을 수립하고 설계에 반영하는 것이 필요하다. 위에서 실시된 지하수 유동 분석 결과를 토대로 ①해수침투 경로 및 확산 정도 파악, ②해수 침투에 따른 구조물 내염해 보강, ③해수 침투 모니터링 위치 선정을 위해 해수 침투 해석을 실시하였다. 해수 이동을 모사하기 위해 용질 이동(solute transport)에서 밀도차도 고려할 수 있는 대표적인 상용 프로그램 FEFLOW v5.1(Diersch et al, 2004)을 사용하였다.

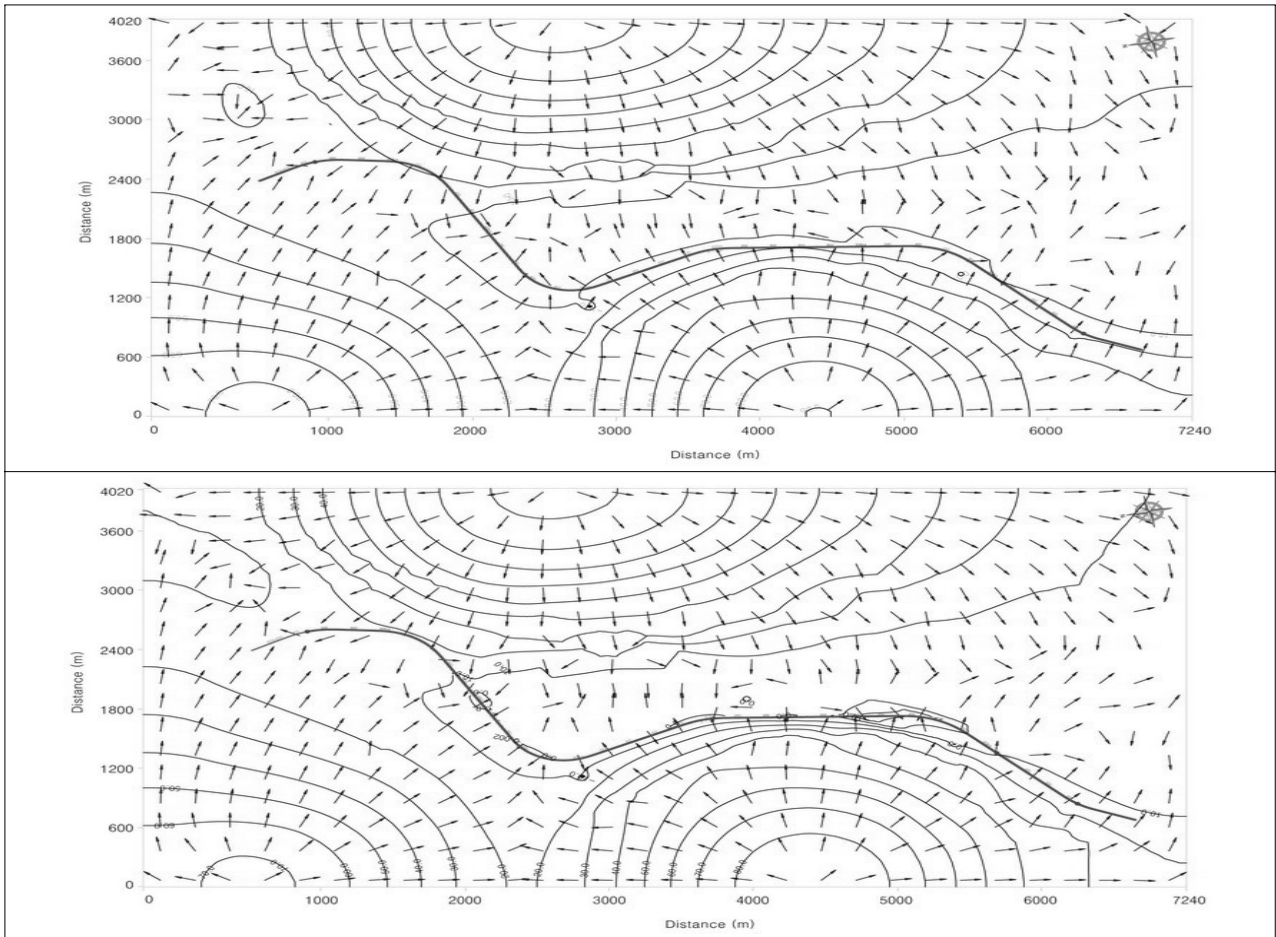


그림 4. 연구지역내 터널 예상 노선을 따른 지하수위 분포도. 상 (a)터널 굴착전, 하 (b)터널 굴착후

3.2.2 해석 결과

터널 굴착 후 약 3년 후 해안으로부터 약 950~970m, 모델링 입력 시 초기 해수/담수 경계면에서 200~220m까지 해수가 침투하는 것으로 예측되었다.(그림 4 참조) 터널 굴착에 따른 지하수 유동 변화로 해수 침투 초기 경계면에서 터널 노선 방향으로 집중하는 결과를 보였다. 모델링 결과 굴착 후 400일까지 급격한 해수 이동이 발생하다가 그 이후 적은 범위를 나타내는데 이는 해수/담수 경계면이 재평형을 이루었기 때문으로 판단된다.

4. 결과

4.1. 지하수 유동 영향 평가

터널 굴착에 따른 지하수위 변화는 터널노선 주변 약 120m에서 최대 17.2m로 나타났으며, 유입량은 0.48~3.63m³/day/m로 분석 되었다. 도심 지역내 복개 및 주변에 산재되어 있는 다양한 지하수 사용등 교란되어진 복잡한 대수층을 감안한다면 실제 발생될 수 있는 지하수계 변화와는 다소 차이가 있을 수 있다. 또한 최악의 경우를 가정하고 모사하였기 때문에 과대평가된 가능성을 내포하고 있다. 그러나, 지하수에 대해 매우 민감한 지역이므로 위와 같은 분석결과가 적절하다고 판단된다. 위 결과를 보완하고 지속적인 관측을 위해 터널 노선을 따라 시점부, 중앙부, 종점부에 총 4개공에서 장기 수위관측을 실시하고 있다(그림 6(a) 참조). 이러한 자료들은 터널 굴착에 따른 차수 대책을 수립하는데 유용하게 사용

될 것이다.

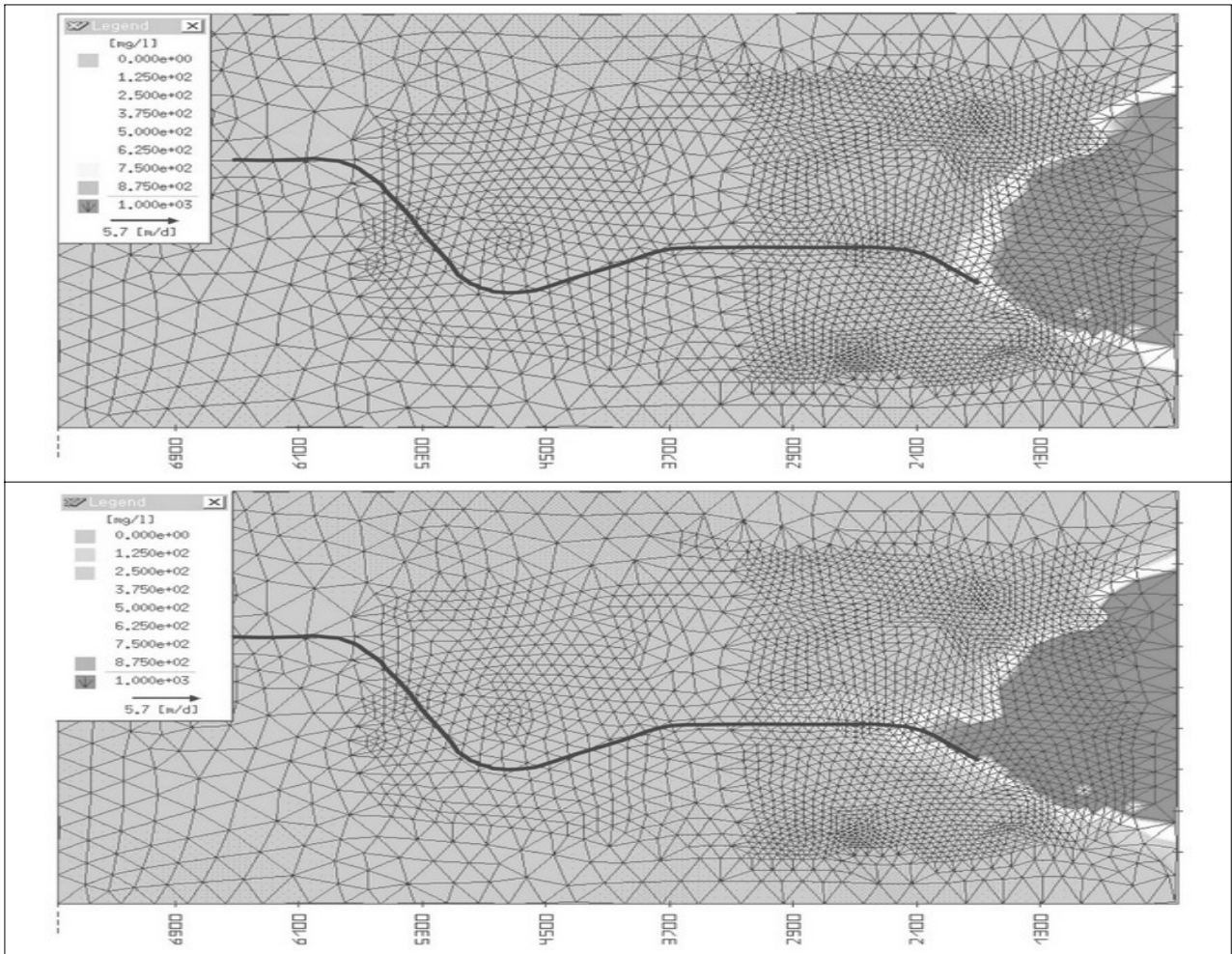


그림 5. 연구지역내 해수 분포도 . 상 (a)터널 굴착전, 하 (b)터널 굴착후

4.2. 염해 영향 평가

터널 굴착 후 약 3년 경과 후 현재 해안으로부터 약950~970m까지 해수 침투가 발생하였다. 터널 굴착에 따른 해수의 이동은 터널 전 전반적으로 해안 방향이 우세하였으나 터널 굴착 후 터널 주변에서는 급속한 흐름이 노선 주변으로 집중되는 것으로 분석되었다. 시간에 따른 해수 침투 양상은 400일까지 진행되다가 그 이후로는 해수/담수 경계면의 재평형이 이루어질 것으로 판단되었다. 결과적으로, 터널 굴착 후 경과시간 초기에 해수침투에 대한 피해가 예상되므로 시공 시 염해 가능 구간에서 구조물에 내염해 보강 마련이 필요하다. 또한, 해수 침투 가능성이 높은 지역에 관측공을 설치하여 지속적이고 장기적인 수질 검증 모니터링이 필요하다. 따라서, 현재 장기 수위 관측이 실시되는 공들에서 그림 6(b)와 같이 정기적인 수질검증이 수행되어지고 있다. 해수/담수 경계면은 계절에 따른 강수, 조석차등 다양한 요인으로 시간에 따라 변하므로 현재 축적되고 있는 자료들은 앞으로 시공 시 발생 가능한 해수 영향을 분석하는데 기초 자료들로 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

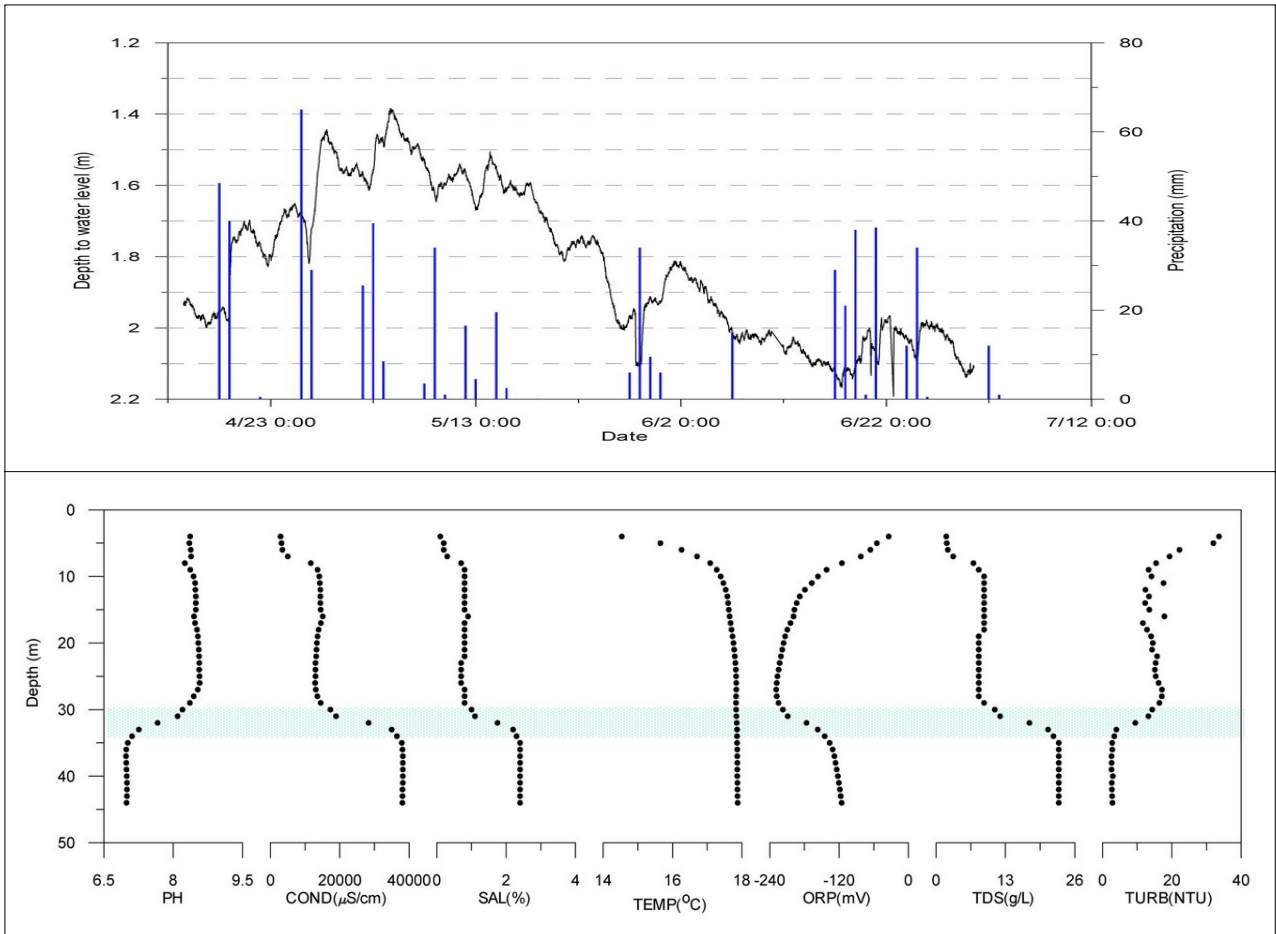


그림 6. 상 (a)장기 수위 관측 자료, 하 (b)정기 수질 검측 자료

참고 문헌

1. Cheng, H.P., G.T. Yeh, J. Xu, M.H. Li, and R. Carsel, A study of incorporation the multigrid method into the three-dimensional finite element discretization: A modular setting and application, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, 41, 499-526, 1998
2. Diersch, H.J.G., *FEFLOW v5.1*, WASY Institute for Water Resources Planning and Systems Research Ltd., Berlin, Germany, 2004
3. McDorald, M.G., and A.W. Harbaugh, A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model, *Techniques of Water-Resources Investigations*, U.S.G.S, 1988
4. Yeh, G.T., *Computational subsurface hydrology*, 277pp., Kluwer academic publishers, 1999
5. Young, S.C., H.E. Julian, H.S. Pearson, F.J. Molz, and G.K. Boman, *Application of the electromagnetic borehole flowmeter*, EPA/600/R-98/058, U.S. Environmental Protection Agency, 1998