

기흥터널 건설에 따른 지하수 변화 수치모델링

이정환¹ · 함세영^{1*} · 정재열² · 정재형³ · 박삼규⁴ · 김남훈⁵ · 김규범⁶

¹부산대학교 지구환경시스템학부, ²한국방사성폐기물관리공단 방폐물기술개발센터,

³한국건설기술연구원 지반연구부, ⁴한국지질자원연구원 광물자원연구본부,

⁵(주)도하종합기술공사 지반공학부, ⁶한국수자원공사 K-water연구원

Numerical simulation of the change in groundwater level due to construction of the Giheung Tunnel

Jeong-Hwan Lee¹, Se-Yeong Hamm^{1*}, Jae-Yeol Cheong², Jae-Hyeong Jeong³, Ki-Seok Kim⁴, Nam-Hoon Kim⁵, and Gyo-Bum Kim⁶

¹Division of Earth Environmental System, Pusan National University

²Radwaste R&D Center, Korea Radioactive Waste Management Corporation

³Geotechnical Engineering Research Department, Korea Institute of Construction Technology

⁴Mineral Resource Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

⁵Dowha Consulting Engineers Co., Ltd.

⁶K-Water Institute, Korea Water Resources Corporation

수치모델링은 지하굴착 지역의 지하수 유입량과 주변 지역의 지하수위 변화를 평가하기 위해서 수행하게 된다. 본 연구에서는 경기편마암복합체로 이루어진 경기도 용인시 기흥터널 지역의 터널 건설에 따른 지하수위 변동과 터널내 지하수 유출량을 평가하였다. 이를 위하여 수리지질학적 및 지질학적 자료와 전기비저항 탐사 자료를 이용하였으며, 특히 기흥터널의 남부에 위치하는 주향이동단층이 터널 내 지하수 유입량에 미치는 영향을 고려하였다. 부정류 수치 모델링 결과 그라우팅 효율이 40%일 때, 지하수 유출량은 약 306 m³/day로 평가되었으며, 이때 관측된 지하수위 변동폭(6.30 m)과 계산된 지하수위 변동폭(6.20 m)은 서로 비슷하였다.

주요어 : 기흥터널, 지하수 모델링, 지질구조, 전기비저항, 지하수위

We performed numerical simulations of the excavation of an underground structure (the Giheung Tunnel) in order to evaluate the rate of groundwater flow into the structure and to estimate the groundwater level around the structure. The tunnel was constructed in Precambrian bedrock in Gyeonggi Province, South Korea. Geological and electrical resistivity data, as well as hydraulic test data, were used for the numerical modeling. The modeling took into account the strike-slip faults that cross the southern part of Giheung Tunnel, as these structures influence the discharge of groundwater into the tunnel. The transient modeling estimated a groundwater flow rate into the tunnel of 306 m³/day, with a grout efficiency of 40%, yielding good agreement between the calculated change in groundwater level (6.20 m) and that observed (6.30 m) due to tunnel excavation.

Key words : Giheung Tunnel, groundwater modeling, geological structure, electrical resistivity, groundwater level

서 론

70% 이상이 산지로 구성되어 있는 우리나라에서는 지형적 특성상 또는 지하 공간 활용의 증가에 따라 고속철도

터널, 도로 터널, 지하철 터널, 도수로 터널, 지하 에너지 저장 시설, 방사성 폐기물 저장소, 식품저장시설 등의 지하구조물 굴착이 불가피하다. 그러나 지하구조물을 굴착하게 되면 지하 암반 내 공극을 따라서 흐르는 지하수가

*Corresponding author: hsy@pusan.ac.kr

지하구조물내로 유출되고, 지하수 고갈과 같은 여러 환경 문제를 초래하게 된다(이정환 외, 2009). 이와 아울러 지하구조물의 안정성 확보를 위해서 배수형 터널 시공이 이루어짐으로써 터널내 지하수 배출이 발생한다(권오엽 외, 2006; 주은정 외, 2010). 따라서 주변 지역에 미치는 환경적 영향을 정확하게 평가하기 위해서는 지하구조물 건설에 따른 터널 내로의 지하수 유출 평가 및 예측이 필수적으로 요구된다(김남훈, 2009). 터널 굴착에 따른 지하수 환경 변화 평가와 관련해서는 수리지질학적 특성 연구(Goodman et al., 1965; Schwartz et al., 1983; Long et al., 1985; 김강주, 1999; 조성일 외, 2004; 정상용 외, 2007; Kolymbas and Wagner, 2007; Ming et al., 2010)와 수치모델링 (Kitterod et al., 2000; Shimojima et al., 2000; Davis and Horswill, 2002; Molinero et al., 2002; 허창환, 2003; 최미정 외, 2004; 오찬성과 김준모, 2008; Hamm et al., 2008; 이정환 외, 2009), 터널 그라우팅 효율성 연구 (Ikuma, 2005, 김진춘과 사공명, 2008; 유광호와 김은혜, 2010, 주은정 외, 2010) 등이 수행되었다. 그러나, 이러한 연구들을 통해서도 지하구조물 굴착에 따른 지하수위 변화와 지하수 유출량 등을 정확하게 규명하기란 쉽지 않다(Meiri, 1985). 왜냐하면 정확한 지하수위와 지하수 유출량 변화를 평가하기 위해서는 지하구조물 주변에 충분한 지하수 관측공을 설치하여 장기적인 지하수위 변동과 지하수 유출량 자료가 획득과 함께 지하구조물 건설시에 정확한 지하수 유출량 측정이 필요하기 때문이다(이정환 외, 2009).

그러나 비용과 시간의 제약 등으로 인해 충분한 지하수위 관측과 지하수 유출량 측정 자료가 획득되지 못하는 경우가 많다. 이 때 지구물리탐사를 통한 지질구조(파쇄대, 단층대 등) 정보를 이용할 수 있다(김인수와 김종열, 1983; Olorunfemi et al., 1986; 김형수, 1997; 박삼규 외, 2005; 안희운 외, 2007; 신종호 외, 2008). 특히, 전기비저항 탐사는 지하 암석의 전기비저항값으로 부터 지하수 부존 가능성을 지시하는 저비저항 이상대나 대규모 파쇄대를 탐지할 수 있으며((Keller and Frickhnecht, 1966; Telford et al., 1979; 김건영 외, 1999), 터널 굴착 지역에 대한 연속적인 지반 정보를 제공해 준다(신휴성과 권영철, 2009).

본 연구는 기흥터널 지역의 수리지질, 지하수위 자료, 전기비저항 탐사 자료를 바탕으로 수치 모델링을 수행하였으며, 기흥터널 건설에 따른 지하수위, 지하수 유량 및 터널 그라우팅과 관계를 평가하였다. 본 연구에서 터널 굴착시의 지하수 유출량을 자료를 구할 수 없었으나, 지하수위 자료와 지하수모델링을 통하여 지하수 유출량을 추정하였다.

지형 및 지질

연구지역인 기흥터널 지역은 경기도 용인시 기흥구 서천동에 위치하며, 동경 127°04'40"~127°05'51", 북위 37°13'39"~37°14'43" 사이에 분포한다. 기흥터널은 수도권이남 지역과 서울특별시를 연결하는 영덕-오산간 광역도로 건설사업(지방도 311호선) 2공구 구간에 속하는 지역이다(Fig. 1). 기흥터널은 쌍굴 터널로서 TBM (Tunnel

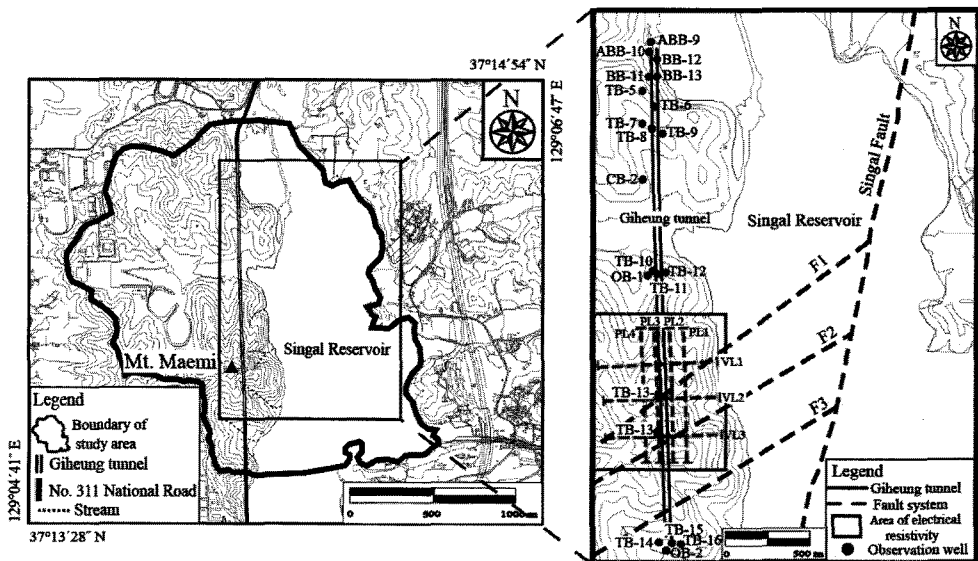


Fig. 1. Location of the study area.

Boring Machine) 공법으로 2006년 10월 27일에 착공되어 2008년 12월 31일에 완공되었다. 터널의 총 연장은 1,395 m, 폭은 15.4 m, 높이는 9.2 m이다. 그리고 터널의 천정은 평균 해수면 기준으로 약 60 m에 위치하며, 지표로부터는 약 2~91 m 깊이에 위치한다(한국건설기술연구원, 2007).

연구지역은 전체적으로 서고동저형으로서 서쪽에는 매미산(해발고도 : 158.5 m), 동쪽에는 신갈저수지가 위치하고 있다(Fig. 2). 그리고 신갈저수지를 중심으로 남북 방향으로 저지대가 길게 분포하고 있다. 산의 능선들은 남북 내지 북북서 방향으로 형성되어 있고, 계곡들 사이에는 동서 방향의 소하천들이 신갈저수지로 유입되고 있다.

연구지역의 지질은 선캠브리아기의 경기편마암복합체와 제4기 충적층으로 구성된다(오인섭과 윤윤영, 1972). 선캠브리아기 경기편마암복합체는 퇴적기원의 변성암으로서 흑운모 편마암과 규장질 편마암으로 분류된다(Fig. 2). 흑운모 편마암은 주로 석영, 장석, 흑운모로 구성되어 있으며 일부 지역에서는 우백대와 우흑대의 호상구조가 나타나기도 한다. 엮리는 북동-동서의 주향과 저각내지 중각의 경사각을 보인다. 규장질 편마암은 주로 석영, 장석류로 구성되며, 소량의 유색광물을 포함한다. 규장질 편마암의 엮리는 흑운모 편마암에 비하여 미비하고 방향성도 무질서하다. 경기편마암복합체를 피복하고 있는 제4기 충적층은 주로 자갈, 모래, 점토로 이루어져 있으며, 산지

계곡의 소하천 주변을 따라 분포하고 있다.

연구지역내 총 400개의 단열의 주향과 경사를 측정 한 결과, 단열의 경사는 6°~88° 범위이고 평균 경사는 63°이다. 장미도표 상에서 단열의 주향과 빈도에 의하면, 동북동의 단열군(J1 : N50°~70°E), 북서북방향의 단열군(J2 : N20°~60°W), 북동북방향의 단열군(J3 : N20°~50°E), 동서 방향의 단열군(J4 : N70°~120°E)으로 크게 분류된다(Fig. 2). 전반적으로는 동북동과 북서북 주향의 단열군이 연구지역내에 가장 균일하게 분포하며, 이들 단열군은 연구지역의 동부에 위치하는 신갈단층(N10°~13°E) 및 신갈단층에 수반된 주향이동단층들인 F1(주향 : N54°E, 경사 : 64°SE), F2(주향 : N60°E, 경사 : 88°SE), F3(주향 : N66°E, 경사 : 87°SE)와 관련되는 것으로 판단된다. 이들 주향이동단층들의 평균 주향은 N60°E이고 평균 경사는 80°SE이다. 이들 단층들은 지하수의 주 유동 통로 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다(손문 외, 2002; 김득호 외, 2008). 한편, 관찰된 대부분의 단열면에서 깃털 구조(plumose structure) 보다 조선(striation)과 수다자국(chatter mark)이 우세하게 관찰되며, 이는 신갈 단열(Mode II)보다 전단 단열(Mode I와 Mode II)의 특성을 지시한다(Pollard and Aydin, 1988). J1 단열군은 주 단층인 신갈단층과 주향이동단층들의 우수향 주향이동 단층운동에 수반되는 T-단열, J2 단열군은 P-전단, J3 단열군은 R-전단, J4 단열군은 R'-전단에 의해 형성되었을 가능성이 높다(Woodcock and Schubert, 1994).

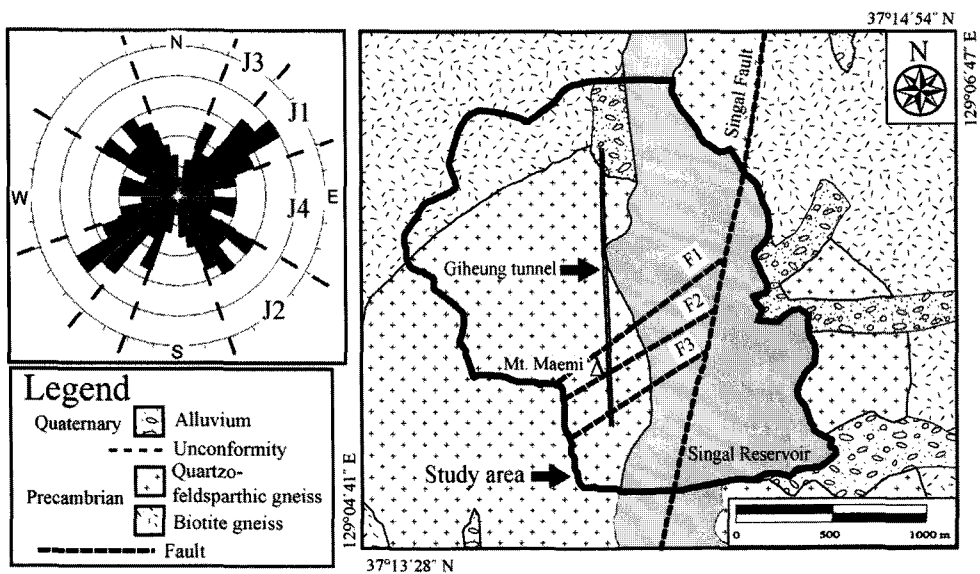


Fig. 2. Geology and fracture system of the study area (modified from Oh and Yuhn, 1972; Daewoo Engineering & Construction Co., 2006; Korea Institute of Construction Technology, 2007).

결과 및 고찰

수리적 특성

2006년 4월 9일부터 2006년 8월 13일까지 굴착된 총 19개의 시추 자료들(TB-5~TB-16, TB-13-1, BB-11~BB-13, ABB-9, ABB-10, CB-2)을 분석하여(대우건설, 2006), 기흥터널 일대의 수리지질학적 특성을 규명하였다. 시추 자료를 분석한 결과, 지표로부터 토양층, 상부 연약대, 상부 경암, 하부 연약대, 하부 경암이 위치한다. 실트질 모래(습윤되고 느슨하게 압밀된 상태의 자갈 일부 포함)로 주로 구성된 토양층은 지표 아래로 0.8~9.4 m(평균 두께 : 4.4 m)까지 분포하고 있다(Table 1). 토양층 아래에는 기반암(흑운모편마암과 규장편마암)의 상부 연약대가 0.2~24.1 m(평균 두께 : 7.3 m)로 나타나며, 단열의 발달이 우세하고 풍화도가 높은 편이다. 그 아래에는 단열의 발달이 미약한 상부 경암이 5.3~29.4 m(평균 두께 : 14.5 m)의 두께로 발달하고 있다. 상부 경암 아래에는 단열이 매우 잘 발달되어 있고 풍화도가 매우 높은 하부 연약대가 3.5~18.4 m(평균 두께 : 10.8 m)의 두께로 분포하고 있다. 그리고 최하부에는 매우 신선한 하부 경암이 위치한다.

19개 시추공의 수위하강시험, 수압시험, 순간충격시험 자료로부터 연구지역의 수리적 특성을 살펴보았다. 수위하강시험과 순간충격시험은 토양층에서 실시되었으며, 수압시험은 단일 팍커를 사용하여 기반암(상부 연약대, 상부 경암, 하부 연약대, 하부 경암)에서 실시되었다. 토양층, 상부 연약대, 상부 경암, 하부 연약대, 하부 경암의 수리전도도를 살펴보면(Table 2), 최상부층인 토양층의 수리전도도는 $1.5910^{-6} \sim 1.4110^{-4} \text{ m/sec}$ 이고 평균값은 $2.3510^{-5} \text{ m/sec}$ 로서, 이는 실트질 모래($1.0010^{-7} \sim 1.0010^{-4} \text{ m/sec}$)에 해당된다

Table 1. Thickness of soil and rock layers of different strengths, as obtained from borehole data in the study area.

	Soil layer (m)	Upper weak zone (m)	Upper hard rock (m)	Lower weak zone (m)
Max.	9.4	24.1	29.4	18.4
Min.	0.8	0.2	5.3	3.5
Mean	4.4	7.3	14.5	10.8

Table 2. Hydraulic conductivities of soil and rock layers in the study area.

(unit: m/sec)

	Soil layer	Upper weak zone	Upper hard rock	Lower weak zone	Lower hard rock	Fault zone
Max.	1.41×10^{-4}	5.46×10^{-7}	4.84×10^{-8}	1.46×10^{-7}	9.63×10^{-10}	3.29×10^{-5}
Min.	1.59×10^{-6}	5.17×10^{-8}	2.06×10^{-8}	6.31×10^{-8}	5.07×10^{-10}	2.25×10^{-7}
Mean	2.35×10^{-5}	2.22×10^{-7}	3.25×10^{-8}	9.62×10^{-8}	7.47×10^{-10}	7.41×10^{-6}

(Fetter, 2001; Todd and Mays, 2005). 한편, 상부 연약대의 수리전도도는 $5.0710^{-8} \sim 5.4610^{-7} \text{ m/sec}$ (평균값은 $2.2210^{-7} \text{ m/sec}$)이고, 상부 경암의 수리전도도는 $2.0610^{-8} \sim 4.8410^{-8} \text{ m/sec}$ (평균값은 $3.2510^{-8} \text{ m/sec}$)이다. 하부 연약대의 수리전도도는 $6.3110^{-8} \sim 1.4610^{-7} \text{ m/sec}$ (평균값 $9.6210^{-8} \text{ m/sec}$)이고, 하부 경암의 수리전도도는 $5.0710^{-10} \sim 9.6310^{-10} \text{ m/sec}$ (평균값 $7.4710^{-10} \text{ m/sec}$)이다. 따라서, 하부 경암을 제외한 모든 지층의 수리전도도는 파쇄된 화성암과 변성암의 범위($1.0010^{-8} \sim 1.0010^{-3} \text{ m/sec}$)에 속한다(Todd and Mays, 2005). 그리고 연구지역의 단층대의 수리전도도는 $2.2510^{-7} \sim 3.2910^{-5} \text{ m/sec}$ (평균값 $7.4110^{-6} \text{ m/sec}$)로서 주변 기반암과 비교할 때 약 100배 정도 수리전도도가 크다(대우건설, 2006).

상부 연약대, 상부 경암, 하부 연약대, 하부 경암의 공간적인 수리전도도는 F1 단층을 기준으로 북측 지역에서는 $2.0610^{-8} \sim 5.7110^{-7} \text{ m/sec}$ (평균값 $1.6210^{-7} \text{ m/sec}$)이고, 남측 지역에서는 $5.0710^{-10} \sim 1.3010^{-5} \text{ m/sec}$ (평균값 $2.0110^{-6} \text{ m/sec}$)이다. 따라서 북측 지역보다 남측 지역의 평균 수리전도도가 약 10배 정도 더 높게 나타나는데, 이는 남측 지역에 분포하는 단층대(F1, F2, F3)의 영향으로 판단된다. 따라서 남측 지역내의 단층대는 기흥터널 굴착시에 터널 내부로 지하수가 용출되는 지하수의 주 유동 통로가 될 수 있다.

지하수위 특성

2006년 4월 9일과 2006년 8월 13일에 측정된 7개 관측공(TB-7, TB-8, TB-10, TB-15, TB-16, ABB-9, ABB-10호공)의 지하수위 자료를 이용하여 기흥터널 주변 지역의 지하수위 분포 특성을 분석하였다. 연구지역의 모든 관측공들은 기흥터널이 건설되기 이전에 굴착되었으므로 측정 당시의 지하수위는 터널 건설의 영향은 받지 않은 것으로 판단된다. 지하수위(Y)와 해발고도(X) 사이의 상관식은

$$Y = 0.89X + 1.06 \tag{1}$$

이며, 결정계수(r^2)는 0.97로서 상관성이 매우 높다. 또한 지하수위는 지표면 아래 평균 6.10 m에 위치하고 있는 것으로 보인다(Fig. 3). (1) 식에 의한 지하수위는 기흥터널 건설 이전의 자연 상태의 지하수위이다. 또한, 연구지역의

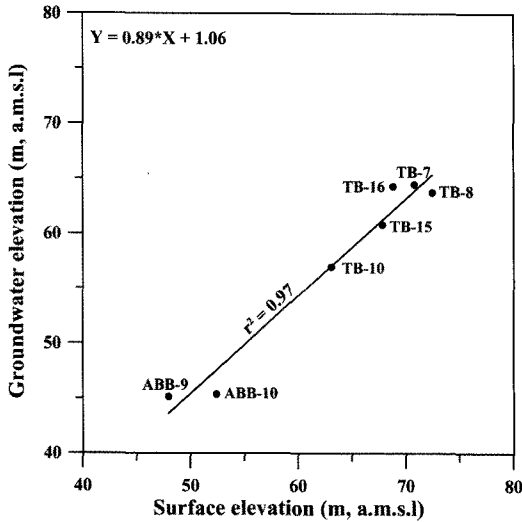


Fig. 3. Relationship between surface elevation and groundwater level, based on observed well data in the study area.

계곡지역(배출지역)에서는 산지지역(함양지역) 보다 지하수위가 지표 가까이 분포하고 있어서 주변 지형 특성을 잘 반영하고 있다(Alan, 2006). 그러나, 단층대에 지역에 위치하는 TB-13호공과 TB-13-1호공의 지하수위는 각각 지표면아래 약 28.5 m와 94.5 m로서 연구지역에서 가장 깊게 위치하고 있다. 이는 단층대를 통한 빠른 지하수 유출의 영향으로 판단된다(문상호 외, 2010).

한편, 기흥터널의 북측과 남측에 각각 굴진된 OB-1호공(2007년 5월 31일부터 2008년 10월 22일까지)과 OB-2호공(2008년 3월 10일부터 2008년 10월 22일까지)의 자료를 이용하여 기흥터널 굴착에 따른 지하수위 변동을 분석하였다. OB-1호공(해발고도 62 m)의 지하수위는 52.2~58.5 m의 범위이고 변동폭은 6.30 m이다. 한편 OB-2호공(해발고도 67 m)의 지하수위는 63.4~64.6 m의 범위이고 변동폭은 1.20 m이다(Fig. 4). OB-1호공보다 OB-2호공의 지하수위 변동폭이 더 작은 이유는 기흥터널이 북쪽에서 남쪽으로(OB-1호공에서 OB-2호공 방향으로) 굴진되었기 때문이다. 2008년 10월 23일까지의 지하수위는 OB-1호공이 기흥터널 천정으로부터 약 5 m 아래에 위치하는 반면에 OB-2호공 지하수위는 기흥터널 천정보다 약 4 m 상부에 위치하고 있다. 이러한 OB-1호공과 OB-2호공의 지하수위 자료는 부정류 수치 모델링의 보정자료로 활용되었다.

전기비저항 탐사 자료 해석

연구지역의 총 5회(2007년 4월 25일, 2007년 5월 7일,

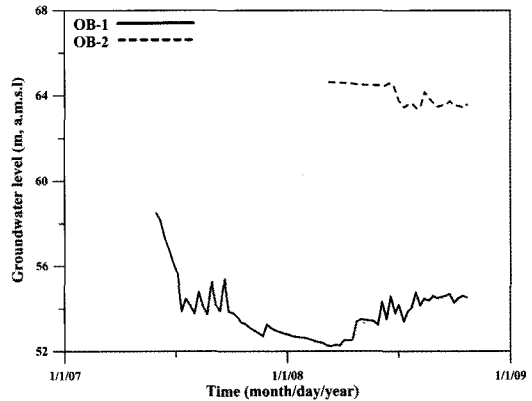


Fig. 4. Groundwater level in the study area from 9 May 2007 until 22 October 2008.

2007년 7월 10일, 2007년 8월 31일, 2007년 10월 4일)의 쌍극자 배열 전기비저항 탐사 자료를 해석하였다. 2007년 10월 4일에 기흥터널은 VL1측선 지점(시점부에서 약 80 m)까지 굴착된 상태였다. 전기비저항탐사측선은 남북방향(기흥터널에 평행한 방향)으로 4측선(PL1~PL4), 동서방향(터널에 직각방향)으로 3측선(VL1~VL3)이며, 쌍극자 전개수는 남북방향 19개, 동서방향 17개이며 전극 간격은 지하수위 심도(최대 : 94.5 m)와 터널 계획고 최대 심도(91 m)를 고려하여 모두 20 m로 하였다(Fig. 1). 전기비저항 탐사자료는 DIPRO for window V. 4.0 역산 프로그램으로 해석하였다.

지형보정을 실시한 후 전기비저항탐사 단면을 해석 결과, 2007년 4월 25일, 2007년 5월 7일, 2007년 7월 10일, 2007년 8월 31일, 2007년 10월 4일의 전기비저항값은 계절에 따른 경향성을 보여주지 않는다. 이는 연구지역의 전기비저항값이 강수량보다는 지반 상태의 영향을 더 크게 받기 때문으로 판단된다. 2007년 4월 25일에 실시된 전기비저항탐사의 남북방향측선(PL1~PL4)의 전기비저항값과 주향이동단층 F1(주향 : N54°E, 경사 : 66°SE)의 관계를 보면, F1단층을 기준으로 북측과 남측의 전기비저항값이 확연하게 다르게 나타나고 있다(Fig. 5). 즉, 북측지역(Zone 1)의 전기비저항값은 292~50,172 ohm-m(평균값은 5,074 ohm-m, 중앙값은 2,103 ohm-m)인 반면에, 남측지역(Zone 2)의 전기비저항값은 145~3,372 ohm-m(평균값은 813 ohm-m, 중앙값은 664 ohm-m)으로서 북측지역의 평균 전기비저항값이 남측지역보다 약 6.2배 더 높게 나타난다. 이러한 전기비저항 차이는 남측지역의 단층대(F1, F2, F3) 및 단열대와 지하수 부존에 기인하는 것으로 판단된다.

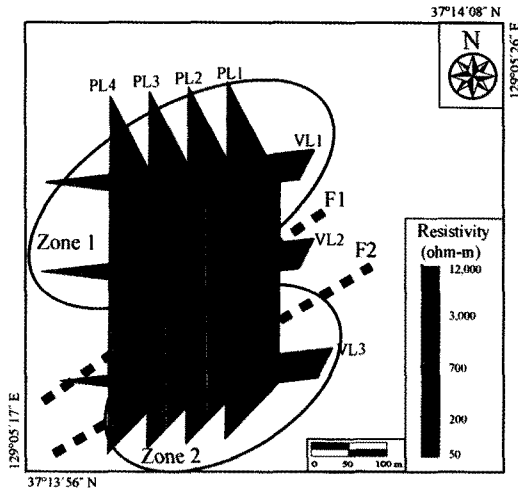


Fig. 5. Fault zone and survey lines of electrical resistivity.

지하수 모델링 입력 자료

모델영역

모델 영역은 2.20km²(=가로 1.70km×세로 1.30km) 이고, 수평 격자수는 총 8,000개(= 80열×100행)이다. 터널의 폭이 15.4m 이므로 격자의 크기는 이보다 작은 14m×12m로 전 영역에 동일하게 적용하였다(Fig. 6). 수직방향으로는 지표로부터 1층(토양층), 2층(상부 연약대), 3층(상부 경암), 4층(하부 연약대), 5층(하부 경암)으로 구분하였으며, 1층은 자유면대수층, 2층부터 5층까지는 피압대수층으로 설정하였다. 5개의 층(layer) 중에서 1층부터 4층까지는 각각 1개의 격자로 하고, 5층의 두께는 두껍기 때문에 격자를 3개로 세분하였다. 그리고 1층의 격자 높이는 5m, 2층의 격자 높이는 7m, 3층의 격자 높이는 10m, 4층의 격자 높이는 15m, 5층의 두께는 30m로서 두껍기 때문에 세 개의 격자 높이 각각 10m로 하였다. 수리지질경계는 북쪽, 남쪽, 서쪽의 산 능선은 무 흐름 경계로 설정하였고, 동쪽의 신갈저수지는 일정수두경계로 하였다.

수리전도도

앞에서 언급된 수리전도도 자료를 이용하여 수평 및 수직 격자별 수리전도도를 입력하였으며, 기흥터널 남부에 위치하는 폭 42m의 주향이동단층대(F1, F2, F3)의 하한은 모델 영역 최하부까지 적용하였다. 특히, TB-13-1의 영상 촬영에서 밝혀진 대로 F1 단층대의 폭은 약 37m로서 지표면으로부터 지하 76m 정도이지만, 지하수 모델링

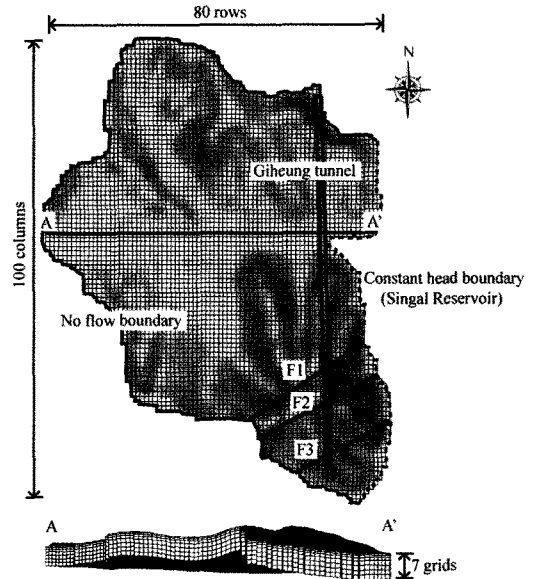


Fig. 6. Model area and hydraulic boundaries of the study area.

에서는 F1 단층대의 주향을 N50°E, 단층폭은 모델 격자를 고려하여 42m로 입력하였다. 그리고 지하수 함양량은 물수지분석법에서 산정한 대로 181.5mm를 적용하였다.

지하수 함양량

물수지 분석법에 의한 지하수 함양량을 식으로 표현하면,

$$\Delta S = P - Q_{ST} - Q_D - Q_S \quad (2)$$

과 같다(김남훈 외, 2008). 여기서, ΔS 는 순수 지하수 함양량, P 는 강수량, Q_{ST} 는 증발산량, Q_D 는 직접유출량, Q_S 는 기저유출량이다. 수원시의 30년간(1978년~2007년) 강수량 자료에 의하면, 연구지역의 연평균 강수량은 1288.5mm이고, Thornthwaite 방법에 의한 증발산량은 630.6mm, SCS-CN 방법에 의한 직접유출량은 309.4mm이다. 그리고 연구지역의 기저유출량은 한강 유역의 평균 유출물(12.96%)에 해당되는 167.0mm를 적용하였다. (2)식에 의해서 산정된 30년간 평균의 순수 지하수 함양량은 181.5mm이고, 함양율은 연평균 강수량의 14.1%이다. 이는 우리나라 평균 지하수 함양율(강수량의 18.0%)보다는 적은 값이지만(최병수와 안중기, 1998), 한강 유역의 지하수 함양율(강수량의 12.1%)보다는 크다(박창근, 1996).

정상류 모델링

기흥터널 건설 이전의 자연적인 평형 상태의 지하수위

분포를 모사하기 위해서 정상류 모델링을 수행하였다. 정상류 모델링에서는 연구지역내 11개의 관측공(OB-1, OB-2, TB-7, TB-8, TB-10, TB-14, TB-15, BB-12, BB13, ABB-9, ABB-10)의 자연수위를 이용하였다.

정상류 모델링에 의해서 1층(자유면 대수층)의 수리전도도는 7.06×10^{-7} m/sec로 결정되었다(Table 3). 이는 비압밀 실트질 모래와 세립질 모래의 수리전도도($1.00 \times 10^{-7} \sim 3.00 \times 10^{-5}$ m/sec) 영역(Fetter, 2001) 및 실트, 양토의 수리전도도($1.00 \times 10^{-9} \sim 2.00 \times 10^{-5}$ m/sec) 영역(한국지하수토양환경학회, 2006)에 속한다. 수리전도도는 F1 단층의 북측지역과 남측지역으로 구분되었으며, 북측지역의 수리전도도는 2층이 7.01×10^{-7} m/sec, 3층이 7.00×10^{-7} m/sec, 4층이 7.77×10^{-7} m/sec, 5층의 5-7격자는 6.96×10^{-7} m/sec로 결정되었다. 그리고 F1 단층의 남측지역의 수리전도도는 2층이 7.21×10^{-7} m/sec, 3층이 7.20×10^{-7} m/sec, 4층이 7.97×10^{-7} m/sec, 5층이 7.16×10^{-7} m/sec로 결정되었다. 2층~5층의 수리전도도는 편암의 수리전도도($4.70 \times 10^{-9} \sim 9.40 \times 10^{-5}$ m/sec)영역(한정상, 1998)과 파쇄된 결정질 화강암 및 변성암의 수리전도도($8.00 \times 10^{-9} \sim 3.00 \times 10^{-4}$ m/sec) 영역(한국지하수토양환경학회, 2006)에 포함된다. 아울러서 F1, F2, F3 단층대는 1층부터 5층까지 모두 적용하였고, 단층대의 수리전도도는 그 외 지역보다 10배 정도(7.41×10^{-6} m/sec)로 높게 적용하였다. 정상류 모델링에서 결정된 수리전도도, 비저류율, 비산출률, 유효공극률, 총공극률은 Table 3과 같다.

모델 보정에 의하면, 제공된 평균제곱오차는 3.42 m이고, 결정계수(r^2)는 0.82로서 11개 관측공의 지하수위와 계산된 지하수위가 비교적 잘 일치하고 있다(Fig. 7). 그

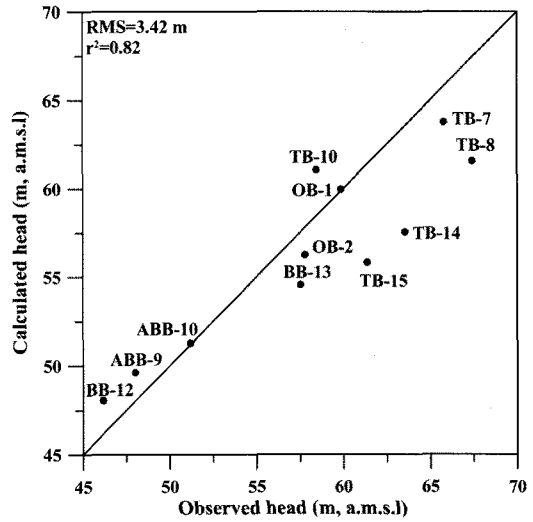


Fig. 7. Relationship between observed and calculated hydraulic head.

리고 정상류 모델링에 의한 등수위선도에 의하면, 지하수는 서쪽의 고지대부터 토양층과 암반을 거쳐 동쪽의 신갈저수지로 배출되고 있다(Fig. 8).

부정류 모델링

그라우팅 정도에 따라서 기흥터널의 굴착기간과 완공 후 기간의 지하수 유동과 터널내로의 지하수 유입량을 평가 하기 위한 부정류 모델링을 실시하였다. 부정류 모델링의 기간은 총 120개월로서 터널 굴착기간(26개월)과 터널 건설 이후 기간(94개월)을 포함한다. 부정류 모델링에서는

Table 3. Hydraulic properties of the model layers.

Layer	Hydraulic conductivity (m/sec)	Specific storage (m ⁻¹)	Specific yield	Effective porosity	Total porosity	
1	The other zone	7.06×10^{-7}	9.39×10^{-4}	9.39×10^{-4}	9.39×10^{-4}	0.50
	Fault zone	7.06×10^{-7}	9.39×10^{-4}	9.39×10^{-4}	9.39×10^{-4}	0.50
2	The other zone	7.01×10^{-7}	2.22×10^{-7}	1.11×10^{-3}	1.11×10^{-3}	0.48
	Fault zone	7.21×10^{-7}	2.25×10^{-7}	1.12×10^{-3}	1.12×10^{-3}	0.49
3	The other zone	7.00×10^{-7}	1.85×10^{-7}	1.32×10^{-3}	1.32×10^{-3}	0.45
	Fault zone	7.20×10^{-7}	1.88×10^{-7}	1.34×10^{-3}	1.34×10^{-3}	0.46
4	The other zone	7.77×10^{-7}	1.59×10^{-7}	1.71×10^{-3}	1.71×10^{-3}	0.47
	Fault zone	7.97×10^{-7}	1.61×10^{-7}	1.73×10^{-3}	1.73×10^{-3}	0.48
5	The other zone	6.96×10^{-7}	1.51×10^{-7}	1.62×10^{-3}	1.62×10^{-3}	0.45
	Fault zone	7.16×10^{-7}	1.53×10^{-7}	1.64×10^{-3}	1.64×10^{-3}	0.46
Fault	7.41×10^{-4}	1.04×10^{-6}	1.11×10^{-2}	1.11×10^{-2}	0.50	

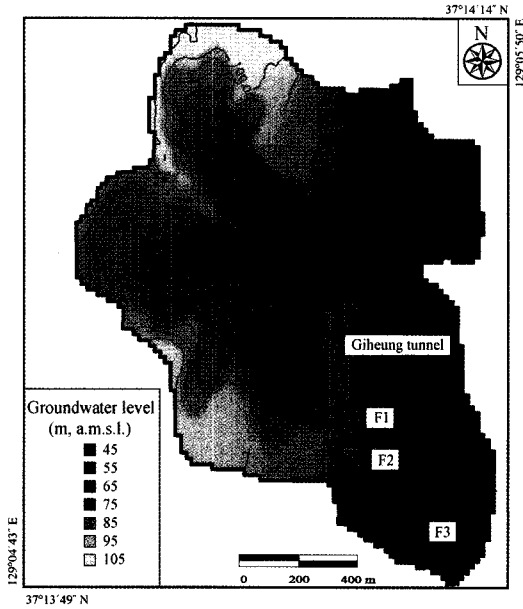


Fig. 8. Groundwater levels under a steady state.

기흥터널을 배수경계로 설정하였으며, 터널의 전도계수는 주변 지층의 수리전도도와 동일하게 적용하였다. 또한 정상류모델링과 같이 북쪽, 남쪽, 서쪽의 산 능선은 무 흐름 경계로 하고, 동쪽에 위치하는 신갈저수지는 일정수두경계로 하였다. 기흥터널의 천정은 평균 해수면으로부터 약 60m 상부에 위치하므로 4층과 5층 사이에 두었다. 부정류 모델링의 초기 지하수위는 정상류 모델링에서 보정된 지하수위와 같다. 터널내 지하수 유출은 터널 건설 기간인 26개월 동안 일어나는 것으로 보았으며, 그라우팅에 의한 차수 효과를 0, 20, 40, 60, 80, 100%로 적용하였을 때 터널내로의 지하수 유입량을 산정하였다.

부정류 모델링 결과, 그라우팅에 의한 차수효과가 100%에서 0으로 변함에 따라 터널 내로의 지하수 유입량은

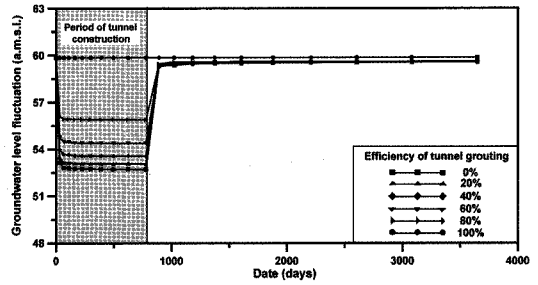


Fig. 9. Fluctuations in groundwater level within borehole OB-1 for a period of 120 months (including the period of tunnel excavation and a period after completion of the tunnel) with respect to tunnel grouting efficiency (0%~100%).

0~339 m³/day로 산정되었다(Table 4). 이때 OB-1호공의 지하수위는 52.7~59.8m에서 변동되며 터널이 굴착기간 동안 주변 지역의 지하수위가 급격하게 하강하지만, 터널 굴착이 완료된 이후에는 지하수위가 점차 회복되어, 터널 완공 약 1년 후에는 터널 굴착 이전의 자연수위(59.8m)의 99%(59.5~59.6 m)까지 회복되었다(Fig. 9). 한편, 그라우팅 효율이 40%일 때 OB-1호공의 지하수위는 53.6~59.8 m (변동폭 : 6.20 m)로 변동되며, 이때의 지하수 유출량은 306 m³/day이었다. 이는 기흥터널 굴착에서 실제 관측된 OB-1호공의 지하수위 변동(변동범위: 52.2~58.5m, 변동폭 : 6.30 m)과 유사하다(Table 4). 따라서, 기흥터널 굴착시 적용된 그라우팅 효율은 약 40% 내외로 평가된다.

결론

본 연구는 지하수 수치 모델링에 의해서 경기도 용인시 기흥구 서천동에 위치하는 기흥터널 건설에 따른 지하수 환경 변화와 터널 그라우팅 정도를 평가하였다. 기흥터널의 남부에 위치하는 주향이동단층들(F1, F2, F3 단층)과

Table 4. Rates of groundwater discharge into the tunnel with varying grouting efficiency.

Efficiency of tunnel grouting (%)	Hydraulic conductivity (m/sec)	Groundwater level fluctuation (m)			Groundwater discharge (m ³ /day)
		0 day	790 day	3650 day	
0	2.3910 ⁻⁵	59.8	52.7	59.5	339
20	1.9110 ⁻⁵	59.8	53.1	59.6	326
40	1.4310 ⁻⁵	59.8	53.6	59.6	306
60	9.5610 ⁻⁶	59.8	54.4	59.6	275
80	4.7810 ⁻⁶	59.8	55.9	59.6	213
100	0.0010 ⁻⁵	59.8	59.8	59.8	0

동북동(N50°~70°E)과 북서북(N20°~60°W)의 단열근들을 파악하였으며, 이들은 기흥터널 내로의 지하수 유입과 관련됨을 있음을 알 수 있다. 특히, 전기비저항탐사자료에서는 F1 주향이동단층의 주향(N54°E)과 유사한 이상대가 나타나고 있어서, 기반암의 수리지질 특성을 판단하는데 도움을 주었다.

지하수 모델링에 의하면, F1 단층의 북측지역의 수리전도도는 2층이 7.01×10^{-7} m/sec, 3층이 7.00×10^{-7} m/sec, 4층이 7.77×10^{-7} m/sec, 5층의 5~7격자는 6.96×10^{-7} m/sec로 결정되었으며, F1 단층의 남측지역의 수리전도도는 2층이 7.21×10^{-7} m/sec, 3층이 7.20×10^{-7} m/sec, 4층이 7.97×10^{-7} m/sec, 5층이 7.16×10^{-7} m/sec로 결정되었다. 부정류모델링에 의하면, 터널 그라우팅의 효율성에 따라 터널 굴착기간 동안 주변 지역의 지하수위가 급격하게 하강하지만, 터널이 완공된 이후에는 지하수위가 점차 회복되어, 터널 완공 약 1년 후에는 터널 그라우팅의 효율성이 0~80%에 대해서 터널 굴착 이전의 자연수위(59.8 m)의 99%(59.5~59.6 m)까지 회복되었다. 한편, 그라우팅 효율이 40%일 때 기흥터널내 지하수 유출량은 $306 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 평가되며, 이때 관측된 지하수위 변동폭(6.30 m)과 계산된 지하수위 변동폭(6.20 m)이 비슷하다.

지하수 수치 모델링 결과를 검증하기 위해서는 장기적인 지하수위 관측 자료와 터널내로의 지하수 유출량 자료가 필요하나, 현실적으로 자료 획득이 어렵기 때문에 실제의 지하수 환경 변화 검증이 불가능하다. 따라서 터널 굴착 이전과 터널공사기간 그리고 터널 완공 후의 지속적인 지하수위 변동과 지하수 유출량을 감시하는 시스템이 제도적으로 확립되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 21세기 프런티어 연구개발사업인 수자원의 지속적확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 3-4-3)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 권오엽, 신중호, 양유홍, 주은정, 2006, 배수시스템 수리기능 저하가 터널구조물에 미치는 영향에 대한 실험적 연구, 한국지반공학회 2006 춘계 학술발표회, 970-979.
- 김강주, 1999, 지하수환경영향예측을 위한 지하수 모델의 적용현황 및 문제점: 환경영향평가서와 먹는샘물환경영향조사서를 중심으로, 지하수환경, 6(2), 66-75.
- 김건영, 이정도, 장태우, 1999, 전기비저항 탐사법을 이용한 지하 천부 파쇄대 조사, 지구물리, 2(3), 217-224.
- 김남훈, 2009, 전기비저항탐사 자료와 수리적 특성을 이용한 지하수 모델링, 부산대학교 석사학위 논문, 부산대학교, 190p.
- 김남훈, 함세영, 김태용, 정재열, 안정훈, 전항탁, 김형수, 2008, 울산광역시 언양지역의 지하수 저류 변화량 산정 및 지질과의 관련성, 지질공학, 18(3), 263-276.
- 김득호, 이종현, 박규태, 김성창, 최유미, 서유리, 노경명, 함세영, 2008, 낙동강 중류 유역의 단열계 특성 및 지하수계와의 관련성, 지질공학, 18(4), 483-492.
- 김인수, 김종열, 1983, 경상분지 연양단층 지역에 대한 전기비저항 탐사연구, 광산지질, 16, 11-18.
- 김진춘, 사공명, 2008, 터널 주변 지반의 손상 및 그라우팅 보강, 기술강좌, 한국터널공학회지, 1(3), 50-61.
- 김형수, 1997, 전기비저항 모니터링 방법을 이용한 총적층 지하수위 변동 감지, 지질공학, 7(2), 139-151.
- 대우건설, 2006, 터널해석보고서, 100p.
- 문상호, 김영석, 하규철, 원종호, 이진용, 2010, K-1 기지 주변 지질 구조와 지하수위 변동 특성, 지질자원환경, 43(2), 149-162.
- 박삼규, 김정호, 김창렬, 조성준, 손정술, 고경석, 2005, 침출수 감시를 위한 전기비저항 모니터링 기법, 2005년 한국지구시스템공학회 추계학술발표회 논문집, 97-100.
- 박창근, 1996, 우리나라 지하수개발가능량 추정: 1. 개념정립과 기법의 개발, 지하수환경, 3(1), 15-20.
- 손문, 함세영, 김인수, 이윤희, 정훈, 류춘길, 송원경, 2002, 부산시 금정산 일원의 지하수 유동 해석을 위한 단열계 분석, 지질공학, 12(3), 305-317.
- 신중호, 신용석, 윤종열, 김호중, 2008, 전기비저항탐사를 이용한 터널라이닝 누수조사 연구, 터널기술, 10(3), 257-267.
- 신휴성, 권영철, 2009, 미시추 구간의 정량적 지반 등급 분류를 위한 원도우쉬프팅 인공 신경망 학습 기법의 개발, 터널기술, 11(2), 151-162.
- 안희운, 정재형, 조인기, 박삼규, 김기석, 정래철, 2007, 전기비저항 모니터링을 이용한 터널 주변 지반상태 변화 파악, 2007년 한국물리탐사학회 · 대한지구물리학회 공동학술대회 논문집, 93-100.
- 오인섭, 윤윤영, 1972, 수원도폭 지질보고서(1:50,000), 국립지질조사소, 21p.
- 오찬성, 김준모, 2008, 경주 중·저준위 방사성 폐기물 처분장 부지에서의 지하수 유동과 염분 및 방사성 핵종 이동 삼차원 수치 모의, 지질학회지, 44(4), 489-505.
- 유광호, 김은혜, 2010, 해저터널에서의 그라우팅 보강을 위한 안정성 연구, 12(2), 145-155.
- 이정환, 함세영, 정재열, 정재형, 김남훈, 김기석, 전항탁, 2009, 지하수 변동자료와 모델링을 이용한 직리터널의 지하수 유출량 평가, 지하수토양환경, 14(5), 29-40.
- 정상용, 김병우, 강동환, 심병완, 정상원, 2007, 터널 굴착에 의한 화강암 대수층의 수리 수문 및 지하수위변동 분석, 지질공학, 17(4), 635-645.
- 조성일, 김천수, 김경수, 송무영, 전한석, 2004, 지하공동굴착시 수리지질조사 자료를 이용한 저장공동 심도의 지하수체계 특성 연구, 지질공학, 14(1), 93-104.
- 주은정, 김용기, 신중호, 권오엽, 2010, 해저터널의 그라우팅 최적 설계를 위한 수치해석적 연구, 터널기술, 12(5), 349-358.
- 최미정, 이진용, 구민호, 이강근, 2004, 터널모델링시 개념 모델에 따른 지하수 유동 예측결과 비교 연구, 지질공학,

- 14(2), 223-233.
- 최병수, 인종기, 1998, 지역단위 지하수 자원함양을 산정방법 연구, 지하수환경, 5(2), 57-65.
- 한국건설기술연구원, 2007, 기흥터널 전기비저항탐사 모니터링 기술의 적용, 한국건설기술연구원, 116p.
- 한국지하수토양환경학회, 2006, 제5차 토양환경단기교육 토양 및 지하수 오염 심층 교육교재, 4-1-4-43.
- 한정상, 1998, 지하수환경과 오염, 박영사, 1071p.
- 허창환, 2003, MODFLOW를 이용한 터널의 지하수 유동 해석, 한국수자원학회, 36(1), 129-142.
- Alan, E.K., 2006, Geology for engineers and environmental scientists, 3rd ed., Prentice-Hall, New Jersey, 696p.
- Davis, G.M. and Horswill, P., 2002, Groundwater control and stability in an excavation in Magnesian Limestone near Sunderland, NE England, Engineering Geology, 66, 1-18.
- Fetter, C.W., 2001, Applied Hydrogeology, Prentice-Hall, New Jersey, 598p.
- Goodman, R.E., Moye, D.G., van Schalkwyk, A. and Javadel, I., 1965, Groundwater Inflows during Tunnel Driving, Engineering Geology, 2, 39-56.
- Hamm, S.-Y., Cheong, J.-Y., Lee, J.-H., Jeong, C.W. and Park, J.Y., 2008, Prediction of groundwater level change in association with the construction of low/intermediate level radioactive waste repository in South Korea, MODFLOW and More 2008 Groundwater and Public policy, International Ground Water Modeling Center (IGWMC), Colorado School of Mines, Golden City, USA, 264-268.
- Ikuma, M., 2005, Maintenance of the undersea section of the Seikan Tunnel, Tunnelling and Underground Space Technology, 20, 143-149.
- Keller, G.V. and Frischknecht, F.C., 1966, Electrical methods in geophysical prospecting, Pergamon.
- Kitterod, N.O., Colleuille, H., Wong, W.K. and Pedersen, T.S., 2000, Simulation of groundwater drainage into a tunnel in fractured rock and numerical analysis of leakage remediation, Romeriksporten tunnel, Norway, Hydrogeology Journal, 8, 480-493.
- Kolymbas, D. and Wanger, P., 2007, Groundwater ingress to tunnels - the exact analytical solution, Tunneling and Underground Space Technology, 22, 23-27.
- Long, J.C.S., Gilmour, P. and Witherspoon, P.A., 1985, A model for steady fluid flow in random three-dimensional networks of disc-shaped fractures, Water Resources Research, 21, 1105-1115.
- Meiri, D., 1985, Unconfined groundwater flow calculation into a tunnel, Journal of Hydrology, 82, 69-75.
- Ming, H., Meng-shu, W., Zhong-Sheng, T. and Xiu-Ying, W., 2010, Analytical solutions for steady seepage into an underwater circular tunnel, Tunneling and Underground Space Technology, 25, 391-396.
- Molinero, J., Samper, J. and Juanes, R., 2002, Numerical modeling of the transient hydrogeological response produced by tunnel construction in fractured bedrocks, Engineering Geology, 64, 369-386.
- Olorunfemi, M.O., Olarecaju, V.O. and Avci, M., 1986, Geophysical investigation of a fault zone-case history from left, southwest Nigeria, Geophysical prospecting, 34, 1277-1284.
- Pollard, D.D. and Aydin, A., 1988, Progress in understanding jointing over the past century, Geological Society of American Bulletin, 100, 1181-1204.
- Schwartz, F.W., Smith, L. and Crowe, A.S., 1983, A stochastic analysis of macroscopic dispersion in fractured media, Water Resources Research, 19(5), 1253-1265.
- Shimozima, E., Tanaka, T., Hosono, Y., Yoshioka, R. and Davis, G. B., 2000, Using short- and long-term transients in seepage discharge and chemistry in a mountain tunnel to quantify fracture and matrix water fluxes, Journal of Hydrology, 234, 142-161.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sherriff, R.E. and Keys, D.A., 1979, Applied Geophysics, Cambridge, England, Cambridge University Press, 455p.
- Todd, D.K. and Mayer, L.W., 2005, Groundwater Hydrology, 3rd ed., John Wiley and Sons, Inc., 636p.
- Woodcock, N.J. and Schubert, C., 1994, Continental strike-slip tectonics, in Hancock, P. I., (ed), Continental deformation, Pergamon Press, 251-263.

2010년 11월 22일 원고접수, 2010년 12월 22일 게재승인

이정환

부산대학교 지구환경시스템학부

609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

Tel: 051-516-8817

E-mail: oathway@pusan.ac.kr

함세영

부산대학교 지구환경시스템학부

609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

Tel: 051-510-2252

E-mail: hsy@pusan.ac.kr

정재열

한국방사성폐기물관리공단 방폐물기술개발센터

대전광역시 유성구 대덕대로 1045번지

Tel: 042-601-5341

E-mail: jjy@krmc.or.kr

정재형

한국건설기술연구원 지반연구부

411-712 경기도 고양시 일산구 대화동 2311번지

Tel: 031-910-0378

E-mail: lavaguv@pusan.ac.kr

박삼규

한국지질자원연구원 광물자원연구본부
대전광역시 유성구 가정동 30번지
Tel: 042-868-3096
E-mail: samgyu@kigam.re.kr

김규범

한국수자원공사 K-water연구원
305-730 대전광역시 유성구 전민동 462-1번지
Tel: 042-870-7640
E-mail: gbkim@kwater.or.kr

김남훈

도하종합기술공사 지반공학부
135-080 서울특별시 강남구 역삼도 736-6 도화빌딩
Tel: 02-2050-6109
E-mail: knh@dohwa.co.kr