한국지하수토양환경학회지 Vol. 14(5), p. 29~40, 2009 ≪原著≫

지하수 변동자료와 모델링을 이용한 직리터널의 지하수 유출량 평가

이정환[1] · 함세영[1]* · 정재열[1] · 정재형[2] · 김남훈[3] · 김기석[4] · 전항탁[1]

[1]부산대학교 지구환경시스템학부, [2]한국건설기술연구원 지반연구부, [3](주)도하종합기술공사 지반공학부, [4](주)희송지오텍

Estimation of Groundwater Flow Rate into Jikri Tunnel Using Groundwater Fluctuation Data and Modeling

Jeong-Hwan Lee[1] · Se-Yeong Hamm[1]* · Jae-Yeol Cheong[1] · Jae-Hyeong Jeong[2]
Nam-Hoon Kim[3] · Ki-Seok Kim[4] · Hang-Tak Jeon[1]

[1]Division of Earth Environmental System, Pusan National University
[2]Geotechnical Engineering Research Department, Korea Institute of Construction Technology
[3]Dowha Consulting Engineers Co., Ltd.
[4]Heesong Geotek Co., Ltd.

ABSTRACT

In general, understanding groundwater flow in fractured bedrock is critical during tunnel and underground cavern construction. In that case, borehole data may be useful to examine groundwater flow properties of the fractured bedrock from pre-excavation until completion stages, yet sufficient borehole data is not often available to acquire. This study evaluated groundwater discharge rate into Jikri tunnel in Gyeonggi province using hydraulic parameters, groundwater level data in the later stage of tunneling, national groundwater monitoring network data, and electrical resistivity survey data. Groundwater flow rate into the tunnel by means of analytical method was estimated 7.12–74.4 m^3/day/m while the groundwater flow rate was determined as 64.8 m^3/day/m by means of numerical modeling. The estimated values provided by the numerical modeling may be more logical than those of the analytical method because the numerical modeling could take into account spatial variation of hydraulic parameters that was not possible by using the analytical method. Transient modeling for a period of one year from the tunnel completion resulted in the recovery of pre-excavation groundwater level.

Key words : Jikri tunnel, Groundwater level, Goundwater flow rate, Numerical modeling, Analytical method

요 약 문

일반적으로 균열 암반 내 지하수 흐름을 이해하는 것은 터널 굴착과 지하 동굴 건설시 중요한 사안이다. 이런 경우에 굴착이전부터 굴착완료까지의 시추공 자료는 균열암반 내 지하수 유동 변화를 고찰하는데 있어서 유용하다. 그러나 충분한 시추공 자료가 여의치 않은 경우가 많다. 본 연구는 경기도 광주시 직리터널 지역에 대해 수리상수, 터널 굴착 후기의 지하수 모니터링 자료, 국가지하수관측망 자료, 전기비저항탐사 자료를 이용하여 직리터널 건설로 인한 지하수 유출량을 평가하였다. 해석학적 방법에 의해 계산된 지하수 유출량은 7.12~74.4 m^3/day/m이었으며, 수치 모델링을 이용하여 산출된 지하수 유출량은 64.8 m^3/day/m이다. 두가지 모델을 비교할 때, 수치 모델링에서는 공간적인 수리상수 변화를 고려할 수 있는 반면에 해석학적 방법으로는 이것이 불가능하기 때문에 수치 모델링에 의한 지하수 유출량이 더 합리적인 것으로 판단된다. 한편, 수치 모델링에 의하면 터널 건설이 완료되고 약 1년 후에는 하강되었던 지하수위가 터널 굴착이전으로 회복되는 것으로 모사되었다.

주제어 : 직리터널, 지하수위, 지하수 유출량, 수치 모델링, 해석학적 방법

*Corresponding author : hsy@pusan.ac.kr

원고접수일 : 2009. 8. 31 심사일 : 2009. 10. 21 게재승인일 : 2009. 10. 23
질의 및 토의 : 2009. 12. 31 까지

1. 서 론

우리나라는 국토의 70% 이상이 산지로 구성되어 있기 때문에 터널 건설이 불가피한 실정이다. 따라서 국토의 효율적인 활용 측면에서, 직선화 도로, 고속도로, 고속철도, 지하철 등의 교통시설을 위한 터널과 도수로터널, 유류 저장시설, 중 · 저준위 방사성 폐기물 처분장 등의 터널 건설이 현재 활발하게 진행 중에 있다. 이러한 터널 건설은 터널 자체의 구조적인 안정성 문제와 아울러 터널 주변 지역의 지반, 생태계, 지하수계 등의 환경 변화에도 큰 영향을 미친다(이병대 외, 2000). 터널 대상 지역 내에 정확한 지하수 환경을 규명하기 위해서는 터널 건설 전, 건설 중 그리고 건설 후에의 지속적인 지하수 변동 모니터링이 필수적이다. 그러나 현실적으로 지하수 관측공 설치와 장기적인 지하수 모니터링은 비용적인 측면에서 어려운 경우가 많다.

도로 터널 굴착에 따른 암반지역의 지하수 유출은 지질, 수리 수문 및 지구물리탐사를 이용하여 분석할 수 있으며(김강주, 1999; Song et al., 2001; 정상용 외, 2007), 터널 굴착에 따른 지하수 유입량은 수치모델링과 지구통계 방법을 이용하여 산정할 수 있다(Shimojima et al., 2000; Kitterod et al,. 2000; Molinero et al., 2002; 허준석 외, 1997; 허창환, 2003; 최미정 외, 2004). 수치모델링에 의한 터널내 지하수 유입량과 영향 반경을 결정할 때는 수리인자들에 대해서 민감도 분석이 실시된다(정복선 외, 2004). 이병대(2001), 박재현 외(2001), 이병대 외(2003)는 도수로터널 건설 현장에서 관측된 수리지질학적 자료를 분석하여 지하수위 변동과 단열 구조들과의 관련성을 분석하였고, 도수로터널이 완공된 후 하강되었던 지하수위의 회복과 회복시기를 예측하였다. 김태희 외(2004)는 터널 굴착과 주변 하천의 연관성에 대해서 고찰하였다. Meiri(1985)는 터널내로의 지하수 유출량 산정을 위하여 좀 더 복잡한 수리학적 조건을 고려한 수치 모델을 제안하였다. 한편, 중 · 저준위 방사성 폐기물의 지하 처분시설의 건설 전과 건설 중 및 건설 후의 지하수 유동 특성에 대해서는 Hamm et al., (2008), 오찬성 · 김준모(2008)가 연구하였고, 정현영 외(2001), 김경수 · 정지곤(2002), 조성일 외(2004)는 지하 석유비축기지 건설에 따른 주변 환경에 미치는 영향을 수치 모델링을 통하여 규명하였다.

비파괴 물리탐사기법인 전기비저항 탐사법은 터널 주변 지반의 안정성을 평가하는데 널리 이용되고 있을 뿐만 아니라(경규하 외, 2007), 배수형 터널의 라이닝 누수거동 모니터링 및 누수탐지에 유용하게 활용될 수 있다(신종호 외, 2008). 김형수(1997)는 지하수위 변동에 따른 겉보기 전기비저항 수치의 변화를 계산하고, 현장의 전기비저항 모니터링에 의한 충적층 지하수의 변동 감지의 유효성을 고찰하였다. 또한, 안희윤 외(2007)는 터널 굴착 지역에 대해 터널 굴착 후기 단계에서 전기비저항과 지하수위의 관련성을 연구하였다. 한편, Davis and Horswill(2002)와 Bossart et al.(2002)은 터널의 안정성과 연관된 지질공학적 연구를 수행하였다.

본 연구는 장기적인 지하수 모니터링이 이루어지지 않은 직리터널 건설 구간에 대해 수리지질, 국가지하수관측망, 전기비저항 자료들을 분석하여 터널 건설 전과 후의 지하수위 분포를 파악하고, 모델링과 지하수 변동 특성을 고찰하여 직리터널내로의 지하수 유출량을 정량적으로 평가하고자 하였다. 본 연구지역인 직리터널은 현대산업개발(주)에서 시공한 성남~장호원간 도로개설(1공구) 건설공사 구간에 속하며(Fig. 1), 동경 127°10'38"~127°11'53", 북위 37°23'45"~37°24'52"사이로서 행정구역상 경기도 광주시 직동에 위치한다. 직리터널은 NATM 공법으로 시공된 2차선의 쌍굴 터널로서, 2005년 11월에 착공되어 2006년 12월에 완공되었다. 터널의 길이는 310 m, 폭 16.4 m, 높이는 9.2 m이고, 터널의 천정은 평균 해수면 기준으로 약 149 m에 위치하며, 터널의 심도는 지표로부터 약 25~38 m이다(한국건설기술연구원, 2006).

2. 연구지역의 지형 및 지질

연구지역의 지형은 북동쪽에는 능안산(해발고도: 332.7 m)이 위치하고 있으며, 북쪽에서 동쪽으로 길게 산릉선이 분포되고 있다. 전체적인 지형 기복은 북동쪽이 높고 남서쪽이 낮으며, 북북서-남남동 방향의 계곡을 따라 직리천과 소하천들이 발달하고 있다.

연구지역의 광역적인 지질을 보면 선캠브리아기의 경기편마암복합체를 중생대 대보화강암과 시대미상의 반상화강암이 관입하고 있으며(김수진 외, 1989), 이들 암석을 신생대 제4기 하성퇴적층이 피복하고 있다(Fig. 2). 선캠브리아기 경기편마암복합체의 변성암류는 편암류와 편마암류로 구분되며, 광역변성작용 이전의 기원 암석에 따라 이질암은 운모를 많이 포함하는 편암과 편마암류로 변성되었고, 사질암은 규질이 풍부한 편암과 편마암으로 변성되었다. 경기편마암복합체 이후에는 시대 미상의 반상화강암과 중생대의 대보화강암의 관입에 의한 접촉변성작용이 일어났다. 특히, 직리터널이 관통하는 지역의 지질은 선캠브리아기 경기편마암복합체에 포함되는 호상흑운모편

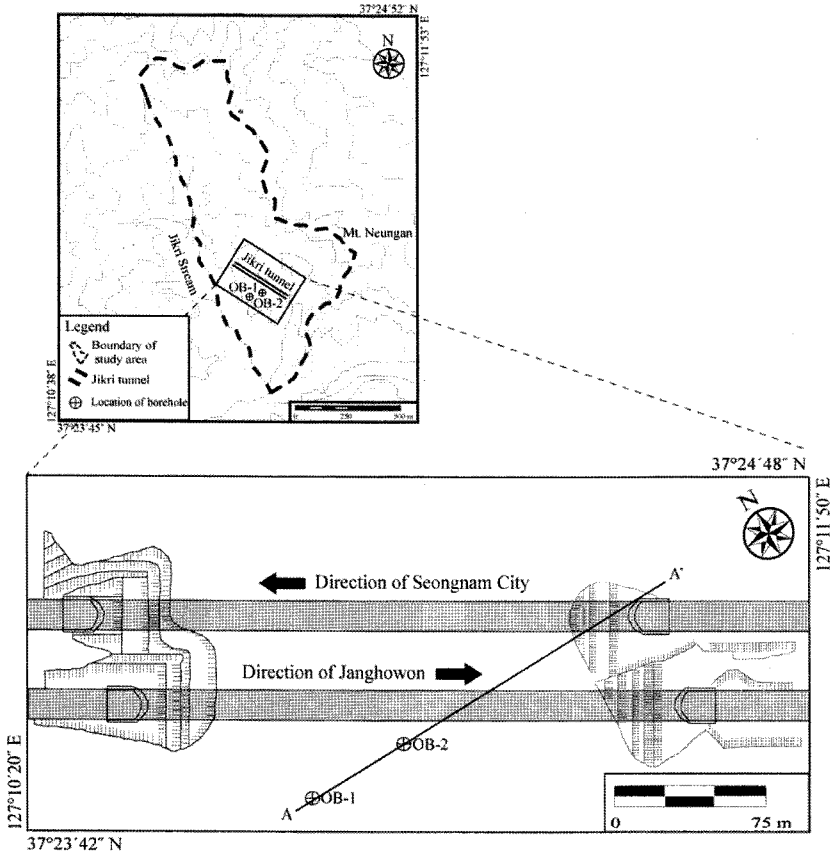

Fig. 1. Location of the study area (Ahn et al., 2007).

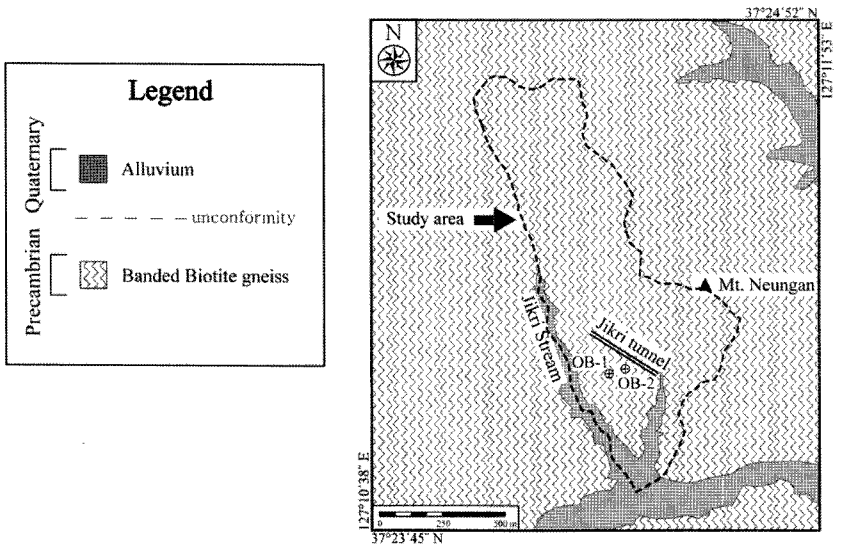

Fig. 2. Geologic map of the study area (Kim et al., 1989).

마암이 넓게 분포하며, 직리천과 소하천들을 따라 신생대 제4기 하성충적층이 분포하고 있다(한국건설기술연구원, 2006).

3. 분석 방법

3.1. 수위하강시험에 의한 수리전도도 산정

보통 미고결층의 수리전도도를 산정하기 위해서는 수위

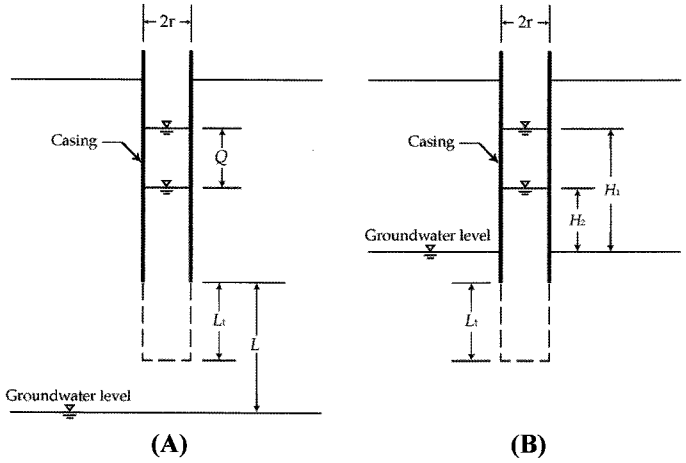

Fig. 3. Schematic diagrams of fall head method for (A) test section higher than water level and (B) test section lower than water level (Ryu et al., 2008).

하강시험을 실시한다. 수위하강시험은 시험구간 상부까지 케이싱을 설치하여 케이싱 상단에 수위가 형성될 때까지 케이싱 외부로부터 물을 주입한 후 시간에 따른 수위강하를 기록하게 된다. 수위강하시험에 의한 수리전도도 결정은 시험구간이 지하수면 보다 위에 있거나 일부 시험 구간이 불포화대에 위치하는 경우(Fig. 3A)와 지하수면 아래에 위치하는 경우(Fig. 3B)의 두 가지가 있다. 시험구간이 지하수위면의 상부에 위치하는 경우에는

$$K=\frac{Q}{2\pi L_t^2}\left[2.3\log\left\{\frac{L_t}{r}+\sqrt{1+\left(\frac{L_t}{r}\right)^2}\right\}-1\right] \quad (L\geq 3L_t \text{ 경우}) \tag{1}$$

$$K=\frac{6.9Q\log\left(\frac{L_t}{r}\right)}{\pi L_t(L_t+2L)} \quad (L_t\leq L<3L_t \text{ 경우}) \tag{2}$$

$$K=\frac{2.3Q\log\left(\frac{L_t}{r}\right)}{\pi L(2L_t+L)} \quad (L<L_t \text{ 경우}) \tag{3}$$

같은 식을 적용한다(한국건설기술연구원, 2006; 류상훈 외, 2008). 여기서, K는 수리전도도(L/T), L은 시험구간에서 지하수위까지의 거리(L), L_t는 시험구간(L), r은 케이싱 반경(L), Q는 주입유량(L^3/T)이다.

시험구간이 지하수면 하부에 위치하는 경우에는 아래와 같은 식을 이용하여 수리전도도를 구하게 된다.

$$K=\frac{5.29r^2}{2L_t(t_2-t_1)}\log\left(\frac{L_t}{r}\right)\log\left(\frac{H_1}{H_2}\right) \tag{4}$$

여기서 H_1과 H_2는 t_1과 t_2의 각각 경과시간(T)의 수두차이(L)이다.

3.2. 수압시험에 의한 수리전도도 산정

수압시험은 수리지질학자, 석유공학자, 토목공학자들 사이에서 여러 가지 방법으로 개발되었으며, 수압시험, 루전시험 또는 패커시험 등으로 불린다. 수압시험은 시추공내 어떤 고립된 구간에 이중패커 또는 단일패커를 설치하고 물을 주입하여, 시간에 따른 주입된 양을 측정하는 방법이다. 시험구간을 격리시키기 위해서는 패커를 팽창시켜서 시추공벽에 완벽하게 밀착시켜야 한다. 단일패커를 이용한 수압시험에 의한 수리전도도는

$$K=\frac{Q}{2\pi LH_0}\ln\left(\frac{L}{r}\right) \tag{5}$$

와 같다. 여기서, K는 수리전도도(L/T), Q는 주입량(L^3/T), r은 시추공의 반경(L), L은 시험구간의 길이(L), H_0는 자연수두에 대한 수두 증가분(L)이다.

H_0를 수식으로 표현하면 식(6)과 같다.

$$H_0=H_w+H_P-H_L \tag{6}$$

여기서, H_w는 압력계의 높이와 수위사이의 거리, H_P는 주입압력(kgf/cm^2), H_L은 압력손실분이다. H_L은 시추공의 길이와 지상에서부터 주입펌프까지의 호스 길이를 합한 총 길이와 유량에 지배된다. H_L은 United States Bureau of Reclamation(1951)에 의해서 제안된 보정곡선을 이용하여 구할 수 있다. 하지만 주입량이 10 *l*/min보다 작으면 H_L을 무시할 수 있다(함세영 외, 2001).

3.3. 해석해를 이용한 터널내 지하수 유출량 평가

Polubarinova-Kochina(1962)는 완전 포화되고 균질한 반무한 매질 내에 굴착된 수평터널에서 정상류 상태에서

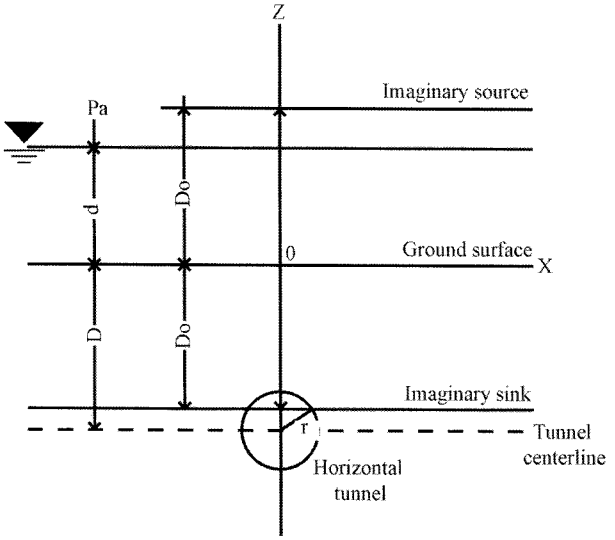

Fig. 4. A tunnel profile (Goodman et al. 1965).

단위 길이에 대한 지하수 유출량을 근사식으로 유도하였다(Fig. 4):

$$Q_0 = \frac{2\pi K(d-\phi_0)}{2.3\log(2D_0/r)} \tag{7}$$

여기서, Q_0는 정상류 상태의 단위 길이 당 지하수 유출량(L^2/T), K는 수리전도도(L/T), d는 지표면 위의 수심(L), ϕ_0는 터널연변부에서의 수위(L), D는 지표에서 터널 중심까지의 거리(L), r은 터널의 반경(L)이다. 이때 모든 변수는 일정한 값을 가진다고 가정한다. 또한 터널의 중앙선상($z=-D$)에서 지하수 유출과 $z=D$에서의 물의 함양에 의한 등수위선은 터널연변부에서 거의 원의 형태를 가지는 조건에서 $r \ll D$ 가정한다. 그러나, Lei(1999)에 의하면, $D/r=2$가 될 때 Polubarinova-Kochina(1962)식은 터널내 지하수 유출량을 5%까지 과소평가하며, D/r이 더 작아질수록 과소평가의 정도는 극적으로 증가하게 된다.

Goodman et al.(1965)은 Polubarinova-Kochina(1962)식으로 부터 다음과 같은 터널내로 지하수의 유출량에 관한 계산식을 제시하였다.

$$Q_0 = \frac{2\pi K H_0}{2.3\log(2H_0/r)} \tag{8}$$

여기서, Q_0는 정상류 상태의 단위 길이 당 지하수 유출량(L^2/T), K는 수리전도도(L/T), H_0는 지하수면과 터널 중심 심도간의 거리(L), r은 터널의 반경(L)이다. (8)식은 (7)식에서 $d=0$, $D=H_0$인 경우에 해당한다. 또한, 터널연변부의 수위 $\phi_0=-H_0$로 가정한 것이다. 그러나 터널 경계부에서 수두가 0이지만, $-H_0$는 위치에 따라 해석해의 적용에는 한계가 있으며, 따라서 정확한 지하수 유출량을 결정하기 위해서는 수치 모델링이 필수적이다(허준석 외, 1997).

한편, Goodman et al.(1965)에 의한 부정류상태의 터널내 지하수 유출량은 정상류상태의 흐름 이후의 경과시간 t에서 단위 길이 당 터널의 누적 유출량

$$Q(t) = \left(\frac{8C}{3}KH_0^3S_yt\right)^{1/2} \tag{9}$$

와 같다. 여기서, K는 지층의 수리전도도(L/T), S_y는 비산출율, 그리고 C는 상수이다. 그렇지만 상기 식은 매우 제한적인 가정에 의해서 유도되었다. 즉, 지하수면이 포물선 모양이고 Dupuit-Forchheimer 수평 흐름이 성립되는 것을 가정한다. 아울러서, (9) 식은 지하수면이 터널 중심까지 하강한 경우에만 유효하다. Dupuit-Forchheimer 이론에 의하면 (9)식에서 상수 C는 0.5인데 대해서, Goodman et al.(1965)는 실험실에서의 모델연구를 토대로 0.75가 더 적당한 값이라고 제안하였다. (9)식은 터널내 지하수의 대략적인 유입량을 추정할 때만 사용될 수 있고, 더 복잡한 수리지질학적 환경에서는 그에 적합한 수치적인 수학적 모델을 적용하여야 한다. Wittke et al.(1972)이 제안한 균열 암반에 굴착된 터널의 유한요소 모델 분석은 Goodman et al.(1965)의 연속체 방법보다는 균열 암반에 대한 불연속체 접근법을 적용한 것이다. Bello-Maldonado (1983)는 일정한 수두나 혹은 변화하는 수두를 가진 대수층을 일정한 속도로 굴진해 나가는 터널에서의 유입량을 예측하는 모델을 제시했다. 이와 같은 모델은 균질하고 단순한 암반 상태의 터널 굴진을 위해 양수해야 할 지하수 유출량을 대략적으로 예측하는데 사용될 수 있다. 그러나 단층 등의 대규모 균열대를 통해 다량의 지하수가 유입될 경우에는 수치해석을 통해서 유출량을 계산하여야 한다.

3.4. 수치 모델링

직교좌표계의 주축과 수리전도도의 주 텐서방향이 동일할 때, 밀도가 일정한 불균질, 이방성 다공질 매체 내에서 부정류 상태의 3차원 지하수 흐름 지배식은

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)\pm Q_w = S_s\frac{\partial h}{\partial t} \tag{10}$$

과 같다. 여기서, K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}은 각각 x, y, z 방향의 수리전도도이고(L/T), h는 수두(L), Q_w는 지하수 함양률이나 배출률(1/T), S_s는 비저유율(1/L), t는 시간(T)이다. S_s,

K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}은 공간도함수[$S_s = S_s(x, y, z)$, $K_{xx}(x, y, z)$ 등]이고, Q_w는 시공간도함수[$Q_w = Q_w(x, y, z, t)$]이다. 수치해석 방법은 위의 지하수 흐름식을 근사식으로 바꾸어서 해석하는 방법이다. 해석학적 방법으로는 단순한 형태의 영역내 임의의 어떤 지점에서 알려지지 않은 수두를 계산할 수 있으나, 복잡한 형태의 영역내의 수두를 계산할 수 없다. 그러나 수치해석 방법은 불규칙하고 복잡한 대수층에 대해서 공간적인 수리상수값을 고려할 수 있으며 대상 영역내 임의의 지점의 수위를 알아낼 수 있다. 본 연구에서는 수치해석 방법으로 유한차분법의 3차원 지하수 유동 모델인 Visual MODFLOW version 4.3를 이용하여 터널내 지하수 유출량을 평가하였다. MODFLOW의 프로그램 언어는 Fortran 77이다. MODFLOW는 다공질 포화매체 내에서 지하수흐름을 모사하기 위해 개발된 프로그램으로 유체의 흐름은 층상흐름이며, 유체의 온도와 밀도가 항상 일정하다고 가정한다. MODFLOW를 이용하여 대상영역 내의 N 개 지점의 수두값을 알아내려면, 초기조건과 경계조건을 설정하여 N개의 미지 수두를 가진 N개의 근사식을 풀어야 한다. 이때 수두는 시간종속적이며, 시간에 따른 대수층내 지하수 저류량의 변화, 지하수 유동속도, 유동방향도 계산할 수 있다.

4. 결과 및 토의

4.1. 수리지질 특성

4.1.1. 층서

연구지역의 수리지질학적 특성을 규명하기 위해 2006년 6월 22일에 굴착된 OB-1호공과 OB-2호공의 시추자료를 분석하였다(Fig. 5). OB-1호공과 OB-2호공의 굴착고도는 해발고도로 162 m와 182 m이고, 굴진심도는 각각 지하 25 m, 50 m이다(한국건설기술연구원, 2006). OB-1호공에서는 표토층(지하 0.0~0.2 m)과 붕적층(지하 0.2~1.5 m)이 약 1.5 m의 두께로 분포하고 있으며, 주로 점토질 모래와 자갈로 구성된다. 자갈의 직경은 30 cm 이하이며, 원마도는 불량한 편이다. 풍화암(지하 1.5~1.8 m)은 호상 흑운모편마암의 풍화물로 생성되었으며, 붕적층 바로 하부에 위치한다. 연암(지하 1.8~4.5 m)은 풍화암 하부에 위치하며, 풍화정도와 절리 빈도는 상부로 갈수록 증가하며, 부분적으로 산화대가 나타나고 있다. 이는 연암 내에서 지하수 유동을 지시한다. 한편, 연암의 아래에 위치하는 경암(지하 4.5~25.0 m)은 대체로 기반암이 약간 풍화되거나 신선한 상태를 보이며, 깊이에 따라서 절리는 균일하게 발달하고 있다. 또한, 연암과 유사하게 산화대가 관찰된다.

OB-2호공의 지질을 보면, 표토층(지하 0.0~0.2 m)과 붕적층(지하 0.2~3.0 m)은 주로 점토질 모래와 자갈로 구성된다. 그 아래 풍화토(지하 3.0~5.2 m)는 소량의 암편을 포함하고 있으며 매우 압밀된 상태를 보인다. 풍화토 아래에 위치하는 풍화암(지하 5.2~5.4 m)은 얇은 두께를 가진다. 연암(지하 5.4~17.3 m)에서는 깊이가 깊어질수록 풍화도가 감소하고 있으며, 약 8 m 깊이에서는 산화대가 발견되는 것으로 보아 이 깊이에서 지하수 유동을 지시한다. 한편, 경암(지하 17.3~50.0 m)은 대체로 약한 풍화도를 보이면서 신선한 암반으로 산출되고 있으며, 절리와 파쇄대는 깊이에 따라 균일하게 분포한다.

4.1.2. 지하수위

직리터널 굴착 후기인 2006년 6월 22일부터 2006년 10월 24일까지 OB-1호공과 OB-2호공에 자동수위 측정압력 센서를 설치하여 지하수위가 관측되었다(안희윤 외, 2007). 지하수위 관측에 의하면. 우기인 7~8월에 지하수위가 급격하게 상승하고 건기로 갈수록 지하수위가 하강하는 경향을 나타낸다(Fig. 6). 한편, OB-1호공과 OB-2호

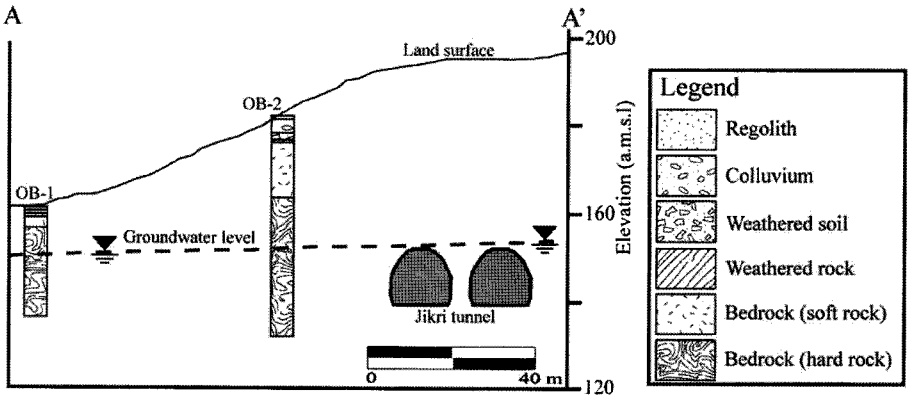

Fig. 5. Cross-section around Jikri tunnel area.

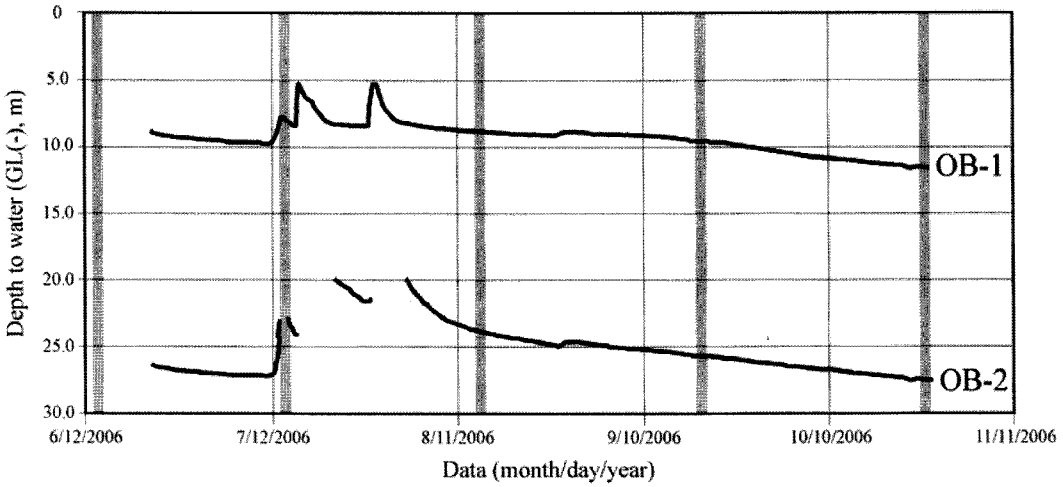

Fig. 6. Groundwater fluctuation in the study area from June 22, 2006 until October 24, 2006. Thick grey lines indicate the dates of electrical survey (Ahn et al., 2007).

Table 1. Groundwater fluctuation of the study area

Observation well	Groundwater level (m, a.m.s.l)				
	6/26/2006	7/13/2006	8/14/2006	9/18/2006	10/24/2006
OB-1	153	154	153	152	150
OB-2	156	range over	158	156	154

공의 해발고도 차이가 20 m임에도 불구하고 서로 비슷한 지하수위를 보인다. 특히, OB-2호공의 지하수위는 장호원 방향으로 직리터널의 천정 고도와 거의 비슷하다(Table 1). 이는 터널굴착으로 인해 터널 천정까지 국지적으로 지하수위가 하강하였음을 나타낸다.

그러나, 직리터널 건설 이전의 자연상태의 지하수 자료는 없다. 따라서, 직리터널 주변에 위치하는 국가지하수관측망의 지하수위와 해발고도간의 관련성을 분석하여 직리터널 건설 이전의 자연상태의 지하수위를 추정하였다. 일반적으로 지하수위가 평형상태에 있을 때 지하수위와 해발고도는 선형적인 비례관계를 보인다. 연구지역 주변에는 총 14개소의 국가지하수관측망(광주광주(거리 32 km), 군포당정(거리 21.1 km), 남양주별내(거리 31.6 km), 안양비산(거리 22.2 km), 양평양동(거리 50.0 km), 양평개군(거리 30.0 km), 양평양서(거리 18.3 km), 양평용문(거리 35.3 km), 여주여주(거리 40.6 km), 오산궐동(거리 29.7 km), 용인남사(거리 29.8 km), 용인마평(거리 20.1 km), 이천율현(거리 28.4 km), 하남하산곡(거리 12.6 km)) 자료가 있으며, 이들은 직리터널로부터 약 12.6~50.0 km 거리에 위치하여 적리터널 굴착의 영향을 받지 않고 있다고 판단된다. 2006년 6월의 이들 국가지하수관측망의 지하수위 해발고도(Y)와 지형고도(X)의 상관관계를 분석한 결과,

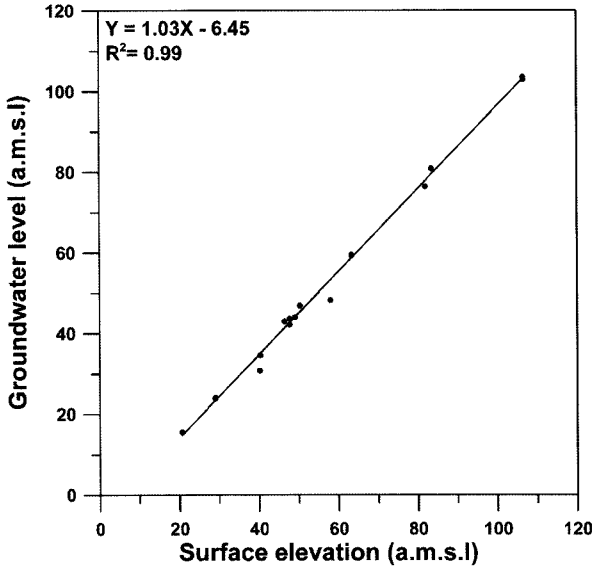

Fig. 7. Relationship between surface elevation and groundwater level using national groundwater monitoring network around the study area.

상관식은 Y = 1.03X - 6.45이고 상관계수는 0.99로서 상관성이 매우 크게 나타난다(Fig. 7). 이는 이들 국가지하수관측망의 지하수위가 자연적인 평형 상태에 있으며, 지하수위와 해발고도의 상관성이 큼을 의미한다(함세영 외,

2006). 따라서 지하수위 해발고도와 지형고도의 상관성에 의해서 직리터널 건설 이전의 자연상태의 지하수위는 지표아래 4.87 m에 위치하는 것으로 추정된다.

한편, 터널 건설에 따른 지하수위 변동 특성을 규명하기 위해서 전기비저항 탐사 자료와 지하수위 변동 자료와의 관련성을 분석하였다(Fig. 6). 연구지역에서 총 5회(2006년 6월 13일, 2006년 7월 13일, 2006년 8월 14일, 2006년 9월 18일, 2006년 10월 24일)에 걸쳐서 직리터널에 평행한 방향으로 6측선, 수직한 방향으로 3측선에서 전기비저항 탐사가 수행되었으며, 전극간격은 5 m와 10 m이었다(안희윤 외, 2007). 전기비저항값은 심도가 증가할수록 감소되는 경향성을 보이고 있으며, 계절에 관계없이 지표아래 5~8 m 부근에서 급격한 변화를 보인다(김남훈, 2009; 안희윤 외, 2007). 그러나 관측공 OB-1호공과 OB-2호공의 평균 지하수위는 지표 아래로 각각 10 m와 26 m에 위치한다. 따라서 터널 건설에 따른 실제 지하수위 변동값과 전기비저항 수치와는 상관성이 거의 없는 것으로 사료된다.

4.1.3. 수리전도도

연구지역의 지층에 대한 수리적 특성을 규명하기 위해서 수위하강시험과 수압시험 자료(한국건설기술연구원, 2006)를 분석하였다. 시험구간이 지하수면 상부에 위치하는 경우의 수위강하법(Fig. 3A)에 의하면, OB-2호공의 3.0~4.5 m 구간의 수리전도도는 1.63×10^{-6} m/sec로서, 이는 실트질 모래에 해당되는 수리전도도를 나타낸다(Fetter, 2001). 그리고 OB-1호공과 OB-2호공에서 각각 2회씩 실시된 수압시험자료에 의한 기반암의 수리전도도는 2.26×10^{-7}~2.36×10^{-6} m/sec로서, 일반적인 편마암 지역의 수리전도도 범위(2.23×10^{-6} m/sec)에 포함된다(Todd and Mays, 2005). 수압시험에 의하면 구간별 투수성 유형은 대부분 층류 상태를 보인다(Bieniawski, 1979). 또한, 심도별 수리전도도는 상부(1.47×10^{-6} m/sec~2.36×10^{-6} m/sec)에서 하부(2.26×10^{-7} m/sec~3.14×10^{-7} m/sec)로 갈수록 작아진다.

4.1.4. 지하수 함양량

연구지역의 지하수 저류 변화량을 산정하기 위해서 물수지 분석 방법을 이용하였다. 물수지 분석 방법을 질량보존 법칙에 입각하여 식으로 표현하면,

$$\Delta S = P - Q_{ST} - Q_D - Q_S \quad (11)$$

과 같다(김남훈 외, 2008). 여기서, ΔS는 순수 지하수함양량, P는 강수량, Q_{ST}는 증발산량, Q_D는 직접유출량, Q_S는 기저유출량이다. 연구지역의 연평균 강수량(1,354.2 mm)은 이천시의 30년간(1978년~2007년)의 강수량 자료를 이용하였으며, 증발산량(612.3 mm)은 Thornthwaite 방법, 직접유출량(319.3 mm)은 SCS-CN 방법으로 결정하였다. 기저유출량에 대해서는 현재까지 정확하게 연구된 자료가 없기 때문에 한강 유역의 평균값(12.96%)인 175.5 mm를 적용하였다. (11)식에 의해서 산정된 30년간의 평균 순수 지하수 함양량은 247.1 mm(연평균 강수량의 18.3%)이다. 이는 우리나라 평균 지하수 함양율(강수량의 18.0%)과 비슷하다(최병수 · 안중기, 1998).

4.2. 수치 모델링에 의한 직리터널 건설에 따른 지하수 유출량 산정

4.2.1. 지하수 모델링 입력 자료

모델 면적은 가로 1.2 km, 세로로 1.8 km로서 총 면적은 2.16 km^2이며, 수평 격자는 각각 80행과 100열로 적용하여 총 수평 격자수는 8,000개이다. 각 격자의 크기는 15 m × 18 m로 하였다. 한편, 수직으로는 3개의 층(Layer)으로 적용하였다. 우선, 1층(Layer 1)과 2층은(Layer 2)은 각각 1개의 수직 격자로 구성되며, 격자 높이는 5 m이다. 1층은 모암의 풍화 산물인 풍화토로 구성되며, 자유면대수층으로 규정하였다. 2층은 연구지역의 기반암인 호상흑운모편마암의 연암층이며, 수리지질학적으로는 피압대수층으로 규정하였다. 그리고 3층(Layer 3)은 호상흑운모편마암의 경암층이며, 수리지질학적으로는 피압대수층으로 규정하였다. 3층의 두께는 50 m로서 두껍기 때문에 5개 격자(3격자~7격자)로 구분하였으며, 각 격자 두께는 10 m로 하였다. 또한 3층의 두께가 상대적으로 두꺼워서 계산값이 수렴되지 않을 수도 있기 때문에 이산화작업(discretization)을 실시하였다.

연구지역의 모델 경계는 북쪽과 동쪽은 산지의 분수령을 무흐름 경계로 설정하였으며, 남쪽과 서쪽 경계인 직리천은 배수 경계로 그리고 모델영역 내부의 소하천들도 배수 경계로 설정하였다. 수직적인 수리전도도는 관측공 OB-1호공과 OB-2호공의 수위강하시험과 수압시험에서 구해진 심도별 수리전도도를 수직 격자별로 적용하였다.

앞에서 언급한대로, 연구지역 내에서 측정된 지하수위는 터널 굴착에 의해서 이미 자연적인 지하수계가 교란된 상태에서 지하수위가 터널 천정까지 하강한 상태였다. 따라서 직리터널 주변에 위치하는 국가지하수관측망의 지하수위 자료와 해발고도와의 상관성을 이용하여 산정된 터

널 굴착 이전의 초기 지하수위(지표아래 4.78 m)를 입력하였다.

4.2.2. 정상류 모델링

터널 굴착 이전의 자연상태의 지하수위 분포를 모사하기 위해서 정상류 모델링을 수행하였으며, 시행착오법을 통한 모델보정을 실시하였다. 이때 국가지하수관측망과 해발고도의 관계식에 의한 지하수위를 초기 평형상태의 지하수위와 같다고 추정하여 정상류 모델보정을 하였다.

모델 보정에 의해서, 1층(자유면대수층)의 수리전도도는 2.06×10^{-7} m/sec로 결정되었다. 이는 Fetter(2003)가 제안한 비압밀된 실트질 모래, 세립질 모래의 수리전도도 범위인 1.00×10^{-7} m/sec~3.00×10^{-5} m/sec과 한국지하수토양환경학회(2006)가 제안한 실트, 양토 수리전도도의 1.00×10^{-9} m/sec~2.00×10^{-5} m/sec 영역에 속한다. 한편, 2층(피압대수층)의 경우에는 2.01×10^{-7} m/sec이고, 3층(피압대수층)의 3격자, 4격자, 5격자의 수리전도도는 각각 2.00×10^{-7} m/sec, 1.67×10^{-7} m/sec, 1.53×10^{-7} m/sec로 결정되었다. 그리고 6격자와 7격자는 5격자와 동일한 수리전도도로 산정하였다. 이는 편암의 수리전도도인 4.70×10^{-9} m/sec~9.40×10^{-5} m/sec 영역(한정상, 1998)과 파쇄된 결정질 화강암과 변성암의 속한다. 수리전도도는 하부로 갈수록 감소하는데, 이는 일반적인 암반대수층의 특성을 반영한다. 정상류 모델링에 의해서 결정된 비저류계수, 비산출률, 유효공극률, 총공극률은 Table 2와 같다.

수리적 경계와 지하수 함양량은 별도의 보정을 실시하지 않았다. 왜냐하면 북동쪽에 발달된 산릉선(무흐름 경계)과 남동쪽에 위치하는 직리천(배수 경계)에 의해 지하수유동계가 분명하게 구분되며, 지하수 함양량은 연구지역 내의 토양도, 토지피복도, 지질 조건들을 종합하여 결정되었기 때문이다.

모델 보정(시행착오법)으로 결정된 지하수위는 OB-1이 166 m, OB-2가 177 m로서 국가지하수관측망과 해발고도의 관계식에 의한 지하수위(OB-1호공은 157 m, OB-2호공은 177 m)와 비교적 잘 맞는다. OB-1호공에서는 약 9 m의 수위 차이가 있으나, 이는 MODFLOW프로그램의 특성상 지형기복이 큰 지역에서는 해발고도에 따른 지하수위 차이를 크게 할 수 없기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 터널이 위치하는 해발고도인 OB-2의 지하수위 보정에 중점을 두었다. 모델 보정으로 얻어진 정상류 상태의 등수위선도에 의하면, 지하수 유동은 북쪽과 동쪽의 고지대로부터 함양되어 토양층과 암반층을 통하여 서쪽 내지 남서쪽으로 배출된다(Fig. 8).

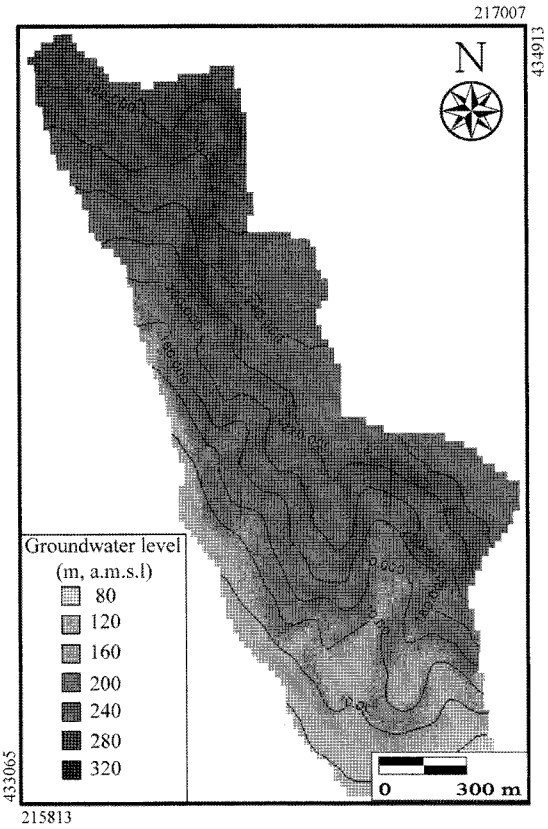

Fig. 8. Initial groundwater levels by the steady-state simulation.

Table 2. Hydraulic properties of the model layers

Layer	Grid	Hydraulic conductivity (m/sec)	Specific storage coefficient (m^{-1})	Specific yield	Effective porosity	Total porosity
1	1	2.06×10^{-7}	5.07×10^{-4}	5.07×10^{-4}	6.67×10^{-4}	0.48
2	2	2.01×10^{-7}	1.40×10^{-7}	5.01×10^{-4}	5.01×10^{-4}	0.50
3	3	2.00×10^{-7}	9.90×10^{-8}	7.07×10^{-4}	7.07×10^{-4}	0.45
	4	1.67×10^{-7}	9.31×10^{-8}	6.65×10^{-4}	6.65×10^{-4}	0.47
	5	1.53×10^{-7}	9.21×10^{-8}	6.58×10^{-4}	6.58×10^{-4}	0.45
	6	1.53×10^{-7}	9.21×10^{-8}	6.58×10^{-4}	6.58×10^{-4}	0.45
	7	1.53×10^{-7}	9.21×10^{-8}	6.58×10^{-4}	6.58×10^{-4}	0.45

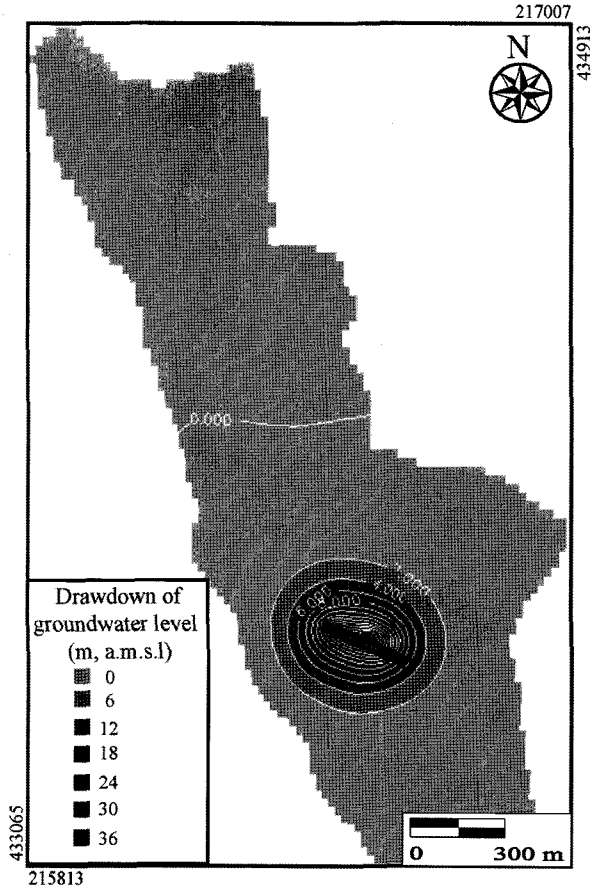

Fig. 9. Drawdown contours of 13 months after tunnel completion.

4.2.3. 부정류 모델링

직리터널 굴착에 따른 각 단계별(터널 굴착 초기, 중기 및 터널 완공 후) 라이닝을 하지 않은 자연 상태를 가정하여 지하수 유출량 및 지하수위 변동 특성을 평가하기 위하여 부정류 모델링을 실시하였다. 부정류 모델링의 기간은 총 107개월간이며, 터널 굴착 기간 동안(13개월)과 터널 건설 이후로 구분하였다. 부정류 상태 모델링의 초기 지하수위는 정상류 모델링에서 결정된 지하수위와 같다. 이때 OB-1호공의 지하수위는 157 m, OB-2호공의 지하수위는 177 m이다. 직리터널은 평균 해수면 기준으로 약 149 m에 건설되었기 때문에, 3층의 6격자와 7격자 사이에 위치하게 된다. 부정류 모델링에서 지하수위 유출량을 평가하기 위해서는 직리터널을 배수 경계로 설정하였으며, 지하수 유출 기간은 터널 건설 기간인 13개월로 하였다.

부정류 모델링에 의하면, 터널 굴착 기간에는 터널내 지하수 유출량(약 64.8 m^3/day)으로 인해서 관측공(OB-1, OB-2)의 지하수위는 급격하게 하강하며, 지하수위 변동

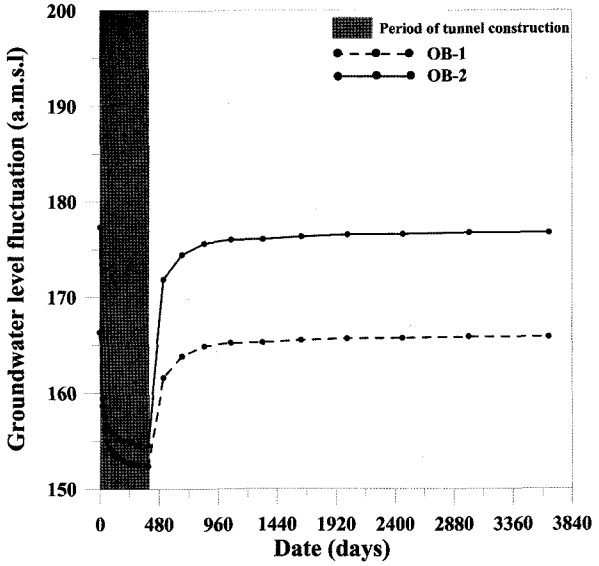

Fig. 10. Groundwater level fluctuation from the beginning of tunneling through 107 months after the tunnel completion.

폭은 OB-1호공과 OB-2호공에서 각각 약 13.4 m과 22.8 m로 결정되었다(Fig. 9). 그러나 터널 굴착이 완료된 후에는 지하수위가 점차 회복되어, 터널 건설 약 1년 후에는 터널 건설 이전의 지하수위로 거의 회복되었다(Fig. 10).

한편, 해석해 방법(Goodman et al., 1965)을 이용한 터널 내로의 지하수 유출량은 7.12~74.4 m^3/day/m이며, 평균 지하수 유출량은 34.3 m^3/day/m이었다. 이때 터널 반경은 8.2 m, 수리전도도는 2.26×10^{-7}~2.36×10^{-6} m/sec, $-H_0$는 179 m(능안산의 자연수위(328 m)와 터널고(149 m)의 고도 차이)이고, 터널 연변부의 총수두(ϕ_0)는 $-H_0$로 하였다. 그러나, Goodman et al.(1965)의 해석해는 지반조건이 균질하고 등방성이며, 터널 상부 지하수위가 일정하고 무한히 긴 원형터널 벽면의 수두가 0인 정상류 흐름 조건에서 적용될 수 있으므로 직리터널의 실제상황과는 상당히 다를 수 있다.

5. 결 론

터널 굴착이전의 지하수위 모니터링이 실시되지 않은 직리터널의 지하수 유출량과 지하수위 변화를 정량적으로 평가하였다. 모델링에 필요한 자연상태의 지하수위 자료가 존재하지 않기 때문에 주변지역의 14개소의 국가지하수관측망의 지하수위와 해발고도 사이의 상관관계를 근거로 산정한 자연상태의 지하수위는 지하 4.87 m로 추정되었다. 따라서 이 수위를 초기수위로 하여 정상류 모델링을 수행하였다. 한편 터널 건설 후기의 지하수위 자료는

존재하므로 이 자료를 터널 굴착시 지하수위 자료로 이용하였다. 비슷한 시기의 전기비저항 탐사 자료를 지하수위와 비교하였으나, 서로 관련성이 거의 없는 것으로 나타났다.

라이닝을 하지 않은 자연상태를 가정하여 해석학적 방법과 수치 모델링으로 직리터널 내로의 지하수 유출량을 산정한 결과, 해석학적 방법에 의한 지하수 유출량은 7.12~74.4 m^3/day/m(평균 34.3 m^3/day/m)이며, 수치 모델링에 의한 지하수 유출량은 64.8 m^3/day/m이었다. 수치 모델링에서는 공간적으로 수리상수 값들을 고려할 수 있고, 불규칙한 영역을 모사할 수 있기 때문에 수치 모델링에 의해서 결정된 지하수 유출량이 더 합리적인 값이라고 판단된다. 또한 부정류 모델링에 의하면, 직리터널 굴착에 의해서 지하수위가 터널고까지 하강되었으나, 터널 굴착 후 약 1년이 경과하면서 지하수위가 거의 원래 상태로 회복되는 것으로 모사되었다. 그러나 이러한 수치 모델링의 검증을 위한 지하수위 관측공이 존재하지 않기 때문에 실제 지하수위 확인은 불가능하다. 따라서 터널공사 기간 뿐만 아니라, 터널 굴착 이전의 지하수위 관측과 터널 건설 후의 지속적인 지하수위 변동 및 지하수 유출량을 감시하는 시스템이 제도적으로 확립되어야 할 것으로 생각된다.

사 사

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

참 고 문 헌

경규하, 조인기, 김기주, 정재형, 배규진, 안회윤, 김기석, 2007, 터널을 포함한 전기비저항탐사 2차원 모델링, 2007년 한국물리탐사학회 · 대한지구물리학회 공동학술대회 논문집, 한국물리탐사학회 · 대한지구물리학회, 대전, p. 179-184.

김강주, 1999, 지하수환경영향예측을 위한 지하수 모델의 적용 현황 및 문제점: 환경영향평가서와 먹는샘물환경영향조사서를 중심으로, 지하수환경, **6**(2), 66-75.

김경수, 정지곤, 2002, 수치모델링을 이용한 지하원유비축시설의 수리지질학적 안정성 연구, 지질공학, **12**(1), 35-51.

김남훈, 2009, 전기비저항탐사 자료와 수리적 특성을 이용한 지하수 모델링, 부산대학교 석사학위 논문집, p. 190.

김남훈, 함세영, 김태용, 정재열, 안정훈, 전항탁, 김형수, 2008, 울산광역시 언양지역의 지하수 저류 변화량 산정 및 지질과의 관련성, 지질공학, **18**(3), 263-276.

김수진, 노진환, 장세원 1989, 장호원도폭 지질보고서(1:50,000), 한국동력자원연구소, p. 17.

김태희, 김영식, 하규철, 김구영, 고동찬, 양인제, 홍순택, 2004, 터널 건설에 따른 인근 하천 영향 평가를 위한 연구, 지질공학, **14**(1), 81-91.

김형수, 1997, 전기비저항 모니터링 방법을 이용한 충적층 지하수위 변동 감지, 지질공학, **7**(2), 139-151.

류상훈, 함세영, 정재형, 한석종, 정재열, 장성, 김형수, 2008, 부산광역시 동래지역 천부지질의 수리적 특성, 지질공학, **18**(1), 55-68.

박재현, 함세영, 성익환, 이병대, 정재열, 2001, 청송군 현서면 일대 도수로터널내 지하수 유입량과 수리지질 특성의 관련성, 지질공학, **10**(2), 141-152.

신종호, 신용석, 윤종열, 김호종, 2008, 전기비저항탐사를 이용한 터널라이닝 누수조사 연구, 터널기술, **10**(3), 257-267.

안회윤, 정재형, 조인기, 박삼규, 김기석, 정래철, 2007, 전기비저항 모니터링을 이용한 터널 주변 지반상태 변화 파악, 2007년 한국물리탐사학회 · 대한지구물리학회 공동학술대회 논문집, 한국물리탐사학회 · 대한지구물리학회, 대전, p. 93-100.

오찬성, 김준모, 2008, 경주 중·저준위 방사성 폐기물 처분장 부지에서의 지하수 유동과 염분 및 방사성 핵종 이동 삼차원 수치모의, 지질학회지, **44**(4), 489-505.

이병대, 2001, 영천댐 도수로터널 굴착과 관련된 수리지질학적 특성 연구, 박사학위논문, 부산대학교, p. 302.

이병대, 성익환, 함세영, 조병욱, 김정숙, 박재현, 2000, 토수로터널 굴착에 따른 주변지역의 지하수위 변동과 단열구조의 관련성 연구, 지질공학, **10**(2), 143-162.

이병대, 추창오, 이봉주, 조병욱, 함세영, 임현철, 2003, 경상북도 영천지역의 지하수위 회복 예측 수치 모델링, 자원환경지질, **36**(6), 431-440.

정복선, 구민호, 김용제, 이진용, 2004, 터널 굴착에 따른 지하수 유동계의 변화에 대한 수리상수들의 민감도 분석, 지질공학, **14**(3), 287-300.

정상용, 김병우, 강동환, 심병완, 정상원, 2007, 터널 굴착에 의한 화강암 대수층의 수리 수문 및 지하수위변동 분석, 지질공학, **17**(4), 635-645.

정현영, 송무영, 이경주, 2001, 지하 석유비축기지 주변의 지하수 개발에 의한 수리지질학적 영향의 수치해석연구, 지질공학, **11**(1), 37-50.

조성일, 김천수, 김경수, 송무영, 전한석, 2004, 지하공동굴착 시 수리지질조사 자료를 이용한 저장공동 심도의 지하수체계 특성 연구, 지질공학, **14**(1), 93-104.

최미정, 이진용, 구민호, 이강근, 2004, 터널모델링시 개념모델에 따른 지하수 유동 예측결과 비교 연구, 지질공학, **14**(2), 223-233.

최병수, 안중기, 1998, 지역단위 지하수 자연함양율 산정방법 연구, 지하수환경, **5**(2), 57-65.

한국건설기술연구원, 2006, 터널건설 환경영향 최소화 기술(III), 터널건설 관련 재해 최소화 및 예방기술 개발(3차년도), 건기연 2006-073, p. 162.

한국지하수토양환경학회, 2006, 제5차 토양환경단기교육 토양 및 지하수 오염 심층 교육교재, 제5차 토양환경단기교육 토양 및 지하수 오염 심층 교육, 한국지하수토양환경학회, 서울, p. 4.1-4.43.

한정상, 1998, 지하수환경과 오염, 박영사, p. 1071.

함세영, 김문수, 이병대, 류상민, 옥수석, 2001, 부산지역 화강암의 단열빈도와 수리적 특성의 상관성, 지질공학, **11**(3), 279-294.

함세영, 이정환, 정재열, 배상근, 강지훈, 김문수, 허성남, 2006, 구미-성주 구간 낙동강과 지하수위 변동 분석, 대한자원환경지질학회 2006년 춘계학술발표회 논문집, 대한자원환경지질학회, 제주도, p. 647-650.

허준석, 정일문, 허준행, 조원철, 1997, 해저 및 하저터널로의 지하수 유입에 관한 정량적 분석, 대한토목학회, **17**(II-1), 13-22.

허창환, 2003, MODFLOW를 이용한 터널의 지하수 유동해석, 한국수자원학회, **36**(1), 129-142.

Bello-Maldonado, A., 1983, Post-construction seepage toward tunnels in variable head aquifers, *Proceedings of international congress on rock mechanics*, Melbourne, Australia, p. 111-117.

Bieniawski, Z.T., 1979, The geomechanics classification in rock engineering applications, *Proceeding of 4th ISRM Congress*, Montreux, Switzerland, p. 51-58.

Bossart, P., Meier, P.M., Moeri, A., Trick, T., and Mayor, J.C., 2002, Geological and hydraulic characterisation of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory, *Eng. Geol.*, **66**, 19-38.

Davis, G.M. and Horswill, P., 2002, Groundwater control and stability in an excavation in Magnesian Limestone near Sunderland, NE England, *Eng. Geol.*, **66**, 1-18.

Fetter, C.W., 2001, Applied Hydrogeology, Prentice-Hall, New Jersey, p. 598.

Goodman, R.E., Moye, D.G., van Schalkwyk, A., and Javadel, I., 1965, Groundwater Inflows during Tunnel Driving, *Eng. Geol.*, **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, p. 264-268.

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, *Hydrogeol. J.*, **8**, 480-493.

Lei, S., 1999, An analytical solution for steady flow into a tunnel, *Ground Water*, **37**, 23-26.

Meiri, D., 1985, Unconfined groundwater flow calculation into a tunnel, *J. Hydrol.*, **82**, 69-75.

Molinero, J., Samper, J., and Juanes, R., 2002, Numerical modeling of the transient hydrogeological response produced by tunnel construction in fractured bedrocks, *Eng. Geol.*, **64**, 369-386.

Polubarinova-Kochina, P.Ya., 1962, Theory of Groundwater Movement, translated by R. J. M. De Wiest, Princeton, New Jersey, Princeton University, p. 613.

Shimojima, E., Tanaka, T., Hoso, 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, *J. Hydrol.*, **234**, 142-161.

Song, W.-K., Chwae, U., and Hwang, H.S., 2001, Geotechnical investigation on the correlation between tunnel excavation and groundwater geotechnical, *Geosystem Eng.*, **4**(2), 39-42.

Todd, D.K. and Mayer, L.W., 2005, Groundwater Hydrology, 3rd ed., John Wiley and Sons, Inc., p. 636.

United States Bureau of Reclamation, 1951, Permeability tests using drill holes and wells, Geology Report G-97.

Wittke, W., Rissler, P., and Semprich, S., 1972, Three-dimensional laminar and turbulent flow through fissured rock according to discontinuous and continuous models (German), *Proc. Symp. Percolation Through Fissured Rock*, International Soc. Rock Mech., Stuttgart, German.