

## 터널 지하수 유출량 산정을 위한 수치모델: 신뢰도 향상을 위한 격자망 설정 방법

정재현<sup>1,2</sup> · 구민호<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 지질환경과학과, <sup>2</sup>한국환경공단

### Numerical Simulation of Groundwater Discharge Into a Tunnel: Considerations of Grid Design for Increased Accuracy

Jae-Hyeon Jeong<sup>1,2</sup> and Min-Ho Koo<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University

<sup>2</sup>Korea Environment Corporation

Received 20 July 2015; received in revised form 16 August 2015; accepted 22 August 2015

최근 국내에서 터널 내 지하수 유출량 산정을 위해 MODFLOW와 같은 지하수 수치모델이 많이 이용되고 있다. 수치 모델의 경우 격자망 설계가 터널 유출량 산정 결과에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있으나, 모델 설계 시 명확한 기준 없이 연구자에 따라 임의의 크기로 격자망이 설정되어 왔다. 따라서 본 논문에서는 해석해와 수치해를 비교하는 방법을 통하여 격자의 크기가 수치모델의 유출량 산정 오차에 미치는 영향을 분석하였으며, 최적의 격자망 설정 방법을 제시하였다. 해석해와 수치해의 불일치는 부적절한 격자망 설정뿐만 아니라 모델 영역의 경계 효과에 의해서도 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 수치모델의 경계 효과 성분을 제거한 후 격자의 크기가 터널 유출량 산정 오차에 미치는 영향을 분석하였으며, 결론적으로 정확한 유출량 산정 결과를 나타내는 터널 크기와 격자 크기의 관계식을 도출하였다. 도출된 관계식은 유한차분 수치모델에서 등가우물격자반경과 격자 크기와의 관계식과 동일한 것으로 나타났다.

**주요어:** 터널, 지하수 흐름, 수치모델, 격자망

Numerical models simulating groundwater flow are often used to estimate groundwater discharge into a tunnel. In designing numerical models, the grid size should be carefully considered to ensure that groundwater discharge is accurately predicted. However, several recent studies have employed various grid sizes without providing an adequate explanation for their choice. This paper suggests the optimal grid size based on a comparison of numerical models with analytical solutions. Discrepancies between numerical and analytical solutions result from the effect of model boundaries as well as the grid size. By nullifying boundary effects, the errors solely associated with the grid size could be analyzed. The optimal grid size yielding accurate numerical solutions was thus derived. The suggested relationship between tunnel radius and optimal grid size is analogous to the relationship between the equivalent well block radius and grid size.

**Key words:** tunnel, groundwater flow, numerical model, grid size

\*Corresponding author: koo@kongju.ac.kr

© 2015, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서 론

최근 지하철, 고속철도 터널, 도로 터널, 지하 저장 시설 터널, 해저 터널 등 목적에 따라 터널 굴착이 많이 시행되고 있다. 이러한 터널 굴착을 함으로써 야기되는 환경문제는 소음, 진동, 지하수 유출 및 수위하강 등이 있다. 이 중 지하수에 관한 환경문제는 29%를 차지하고 있다. 예로 고속철도 광명역, 비룡 터널, 천안역사는 터널 굴착으로 인해 지하수가 고갈되는 문제가 발생하였으며, 고속철도 천성산 터널은 습지고갈 및 지하수 누수 문제가 발생하였다(Lee et al., 2004b). 따라서 터널 굴착 전 환경영향평가를 통해 추후 발생하게 될 제반 문제에 대한 사전 예측이 필요하며 주로 모델링 기법이 이용된다. 터널 굴착으로 발생하는 지하수 유출 문제는 지하수 모델링을 이용하여 평가하는데 크게 연속체 및 불연속체 모델링으로 구분되며 MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988)와 FracMan/MAFIC (Dershowitz et al., 1991) 등이 널리 이용된다.

전술한 지하수 유동 프로그램은 터널 굴착으로 인한 지하수 유동체계 변화, 지하수 유출량 평가 및 지하수위 변화를 예측하기 위해 사용되고 있다. Park (2007)은 개념모델을 통해 자유면대수층에서 터널 굴착에 의한 지하수면의 변화를 모의한 바 있다. 또한, 한남-원효 구간 변성암 지역에 시공된 터널 구간 중 과도한 지하수압으로 인한 터널의 누수 현상이 발생하는 지역에 대해 지하수 분포와 흐름 특성을 규명하기 위한 연구가 수행되었다(Ji, 2002). 수도권에서는 각각 성남-여주 복선 전철 터널과 서울지하철 7호선 터널 굴착 시 지하수 유동계 변화와 수위하강을 예측하였다(Cha et al., 2005; Kim, 2011). 더불어, 호남고속철도 계룡산 터널 구간에 대해 환경문제를 사전에 연구하여 대안을 제시하고자 수치모델을 제시하였다(Lim and Chang, 2008). 한편, 영천댐 도수로 터널 굴착 시 지하수위 회복 예측을 위한 모델링을 하였다(Lee et al., 2003). 그 밖에도 터널 굴착

시 지하수 유동 체계 변화를 분석 및 수위하강 및 회복 시기를 예측하기 위해 여수 지역, 충북 제천과 강원 영월군 경계 부근, 수락산, 충북 음성군 맹동면 인곡리에 대하여 수치모델을 생성한 바 있다(Jeong, 2003; Choi et al., 2004; KEI, 2005; Lee et al., 2005; Chung et al., 2007). 최근에는 직리터널의 지하수 유출량 평가와 기흥 터널 건설에서 그라우팅 효율성에 따른 지하수 유출량의 관계를 평가하기도 하였다(Lee et al., 2009; Lee et al., 2010).

위에 열거한 논문에서 사용된 각각의 수치모델은 연구자의 견해에 따라 격자 크기가 뚜렷한 기준 없이 모두 다르게 설정되었다(Table 1). 따라서 터널 내 지하수 유출량이 정확하게 산정되지 않았을 것으로 예상된다. 만약 터널 내 지하수 유출량을 더욱 정확하게 산정할 수 있다면 환경과학적인 연구와 환경영향평가에 대한 신뢰도가 높아질 것으로 판단된다(Lee et al., 2004a).

지금까지 수치모델을 이용하여 터널 굴착 지하수 모델링을 할 때 적절한 격자 망에 대한 연구가 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 Lei (1999)의 터널 유출량 해석식을 통한 해석해와 수치모델을 통한 수치해를 비교하여 분석하는 방법을 사용하였다. 이를 통해 수치모델에서 터널 내 지하수 유출량을 산출하는 데 있어 영향을 미치는 인자를 찾고자 하였으며, 정확한 터널 내 지하수 유출량을 산정하기 위한 격자 크기를 도출해 보고 격자 크기와 유출량에 대해 정량분석을 실시하고자 하였다.

## 연구 방법

### 해석해(Analytical solution)

터널 내 지하수 유출량을 계산하기 위한 해석해가 여러 연구자들에 의해 제시되었다(Polubarinova-Kochina, 1962; Goodman et al., 1964; Lei, 1999). Polubarinova-Kochina (1962)는 균질, 등방성의 반무한 매질의 포화대

**Table 1.** Various grid sizes used in recent groundwater flow models simulating tunnel excavation.

Publication	Grid size (m)	Publication	Grid size (m)
Ji (2002)	22 × 17	Cha et al. (2005)	10 × 9
Lee et al. (2003)	125 × 125	Chung et al. (2007)	62.5 × 62.5
Jeong (2003)	7.5 × 7.6	Lim and Chang (2008)	30 × 15
Choi et al. (2004)	25 × 25	Lee et al. (2009)	15 × 5
Lee et al. (2005)	35 × 40	Lee et al. (2010)	14 × 12
KEI (2005)	10 × 10	Kim (2011)	10 × 10

에 굴착된 수평터널 내로 유입되는 정류상태의 지하수 유출량을 계산할 수 있는 해석해를 제시하였다.

$$q = \frac{2\pi KH_0}{\ln[2H_0/R]} \quad (1)$$

여기서  $q$ 는 터널의 단위길이 당 지하수 유출량[L<sup>2</sup>/T],  $K$ 는 대수층의 수리전도도[L/T],  $H_0$ 는 지하수면에서 터널 중심까지의 거리[L],  $R$ 은 터널 반경[L]이다. 식 (1)은 터널 내 지하수 유출이 발생하더라도 지하수면이 수평하게 유지되며, 지하수면 아래 터널의 심도가 터널의 반경에 비해 매우 큰 것을 가정한다( $H_0 \gg R$ ).

한편, Lei (1999)는 Polubarinova-Kochina (1962)의 터널 심도에 대한 터널 반경의 비율에 대한 가정을 무시할 수 있는 일반해를 제시하였다.

$$q = \frac{2\pi KH_0}{\ln[H_0/R + \sqrt{(H_0/R)^2 - 1}]} \quad (2)$$

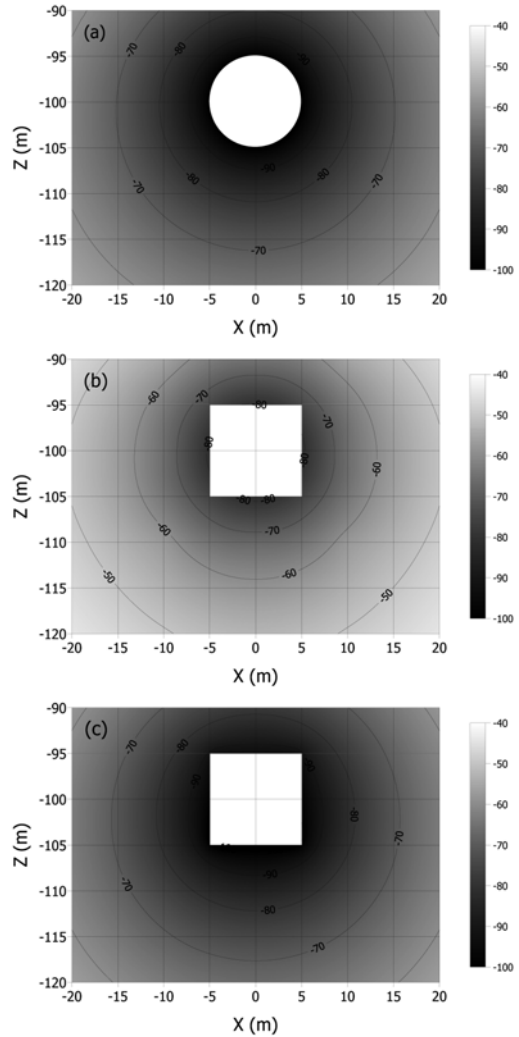
Lei (1999)는 터널 내 지하수 유출량과 함께 터널 주변부의 수두 분포를 계산할 수 있는 해석해를 동시에 제시하였다.

$$h = \frac{H_0}{2\ln[H_0/R + \sqrt{(H_0/R)^2 - 1}]} \ln \left[ \frac{x^2 + (z + \sqrt{H_0^2 - R^2})^2}{x^2 + (z - \sqrt{H_0^2 - R^2})^2} \right] \quad (3)$$

여기서 좌표  $x$ 와  $z$ 는 수평 및 수직 방향을 나타내며  $x$ 의 기준점은 터널 중심,  $z$ 의 기준점은 지하수면이다.

**수치해(Numerical solution)**

대표적인 지하수 흐름 수치모델인 Visual MODFLOW를 사용하여 터널 내 유출량을 산정하였다. 5,000 mm × 3,000 m의 2차원 단면을 모델영역으로 설정하였으며, 균질, 등방성의 대수층을 가정하였다. 해석해와 동일한 조건인 5 m의 터널 반경을 고려하여 10 mm × 10 m 크기의 격자망을 구성하였으며, 지하수면 하부 100 m에 터널이 굴착되도록 하였다. 해석해의 경우 터널 내부로의 지하수 유출에 의해 발생하는 지하수면의 강하는 무시한다. 즉, 해석해에서는 지하수면이 수평하게 유지되는 것을 가정한다. 따라서 수치해에서도 이러한 가정을 고려하기 위하여 모델영역 최상부에 위치하는 지하수면에 대하여 일정수두 경계조건을 설정하였다. 터널이 위치한 격자의 경우 터널의 평균 고도(위치수두)에 해당하는 값을 일정수두 경계조건으로 적용하였다.



**Fig. 1.** Comparison of calculated equipotential lines around a tunnel: (a) an analytical solution, (b) numerical solution with a coarse grid ( $n=1$ ), and (c) numerical solution with a refined grid ( $n=8$ ).

**결과 및 고찰**

**수치해와 해석해의 차이를 발생시키는 수치모델 인자**

**터널 및 주변부 영역의 격자 크기**

Fig. 1a는 지하수면 하부 100 m 깊이에 굴착된 반경 5 m의 터널에 대해 해석해인 식 (3)을 이용하여 계산된 터널 주변의 수두 분포이다. 대수층의 수리전도도는 0.1 m/day를 가정하였다. 원형의 터널면에 형성된 -100 m의 등수두선과 이를 둘러싸며 높아지는 동심원의 등수두선

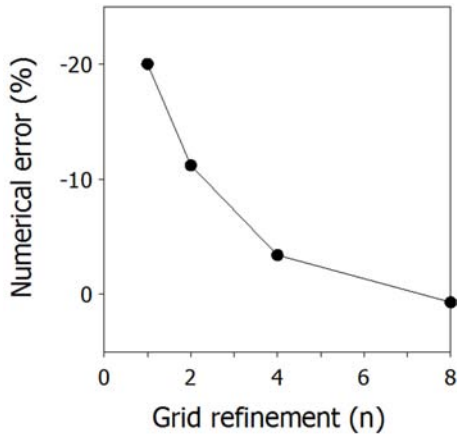


Fig. 2. Numerical errors of the calculated groundwater discharge into a tunnel associated with grid refinement.

분포를 볼 수 있다. Fig. 1b는 터널의 직경에 해당하는 10 m 크기의 격자망을 이용하여 계산된 수치모델의 결과이다. 터널을 중심으로 동심원을 나타내는 수두 분포는 동일하지만, 해석해의 결과에 비하여 터널 주변부의 수두가 상대적으로 높은 것을 볼 수 있다. 이러한 수두 분포의 불일치는 유출량의 차이를 발생시켰는데 수치해를 통해 산정된 유출량이 해석해보다 20% 과소평가되는 것으로 나타났다.

수치모델의 경우 일반적으로 격자의 크기가 작을수록 해의 정확도가 높아지므로, 터널 및 터널 주변부의 격자 크기를 줄여가면서 터널 주변부의 등수두선 분포 및 유출량이 해석해와 얼마나 일치하는지 살펴보았다. 아래 식과 같이 터널의 직경을 격자의 크기로 나눈 값으로 격자의 조밀성 정도를 표현하였다.

$$n = \frac{2R}{\Delta x} \quad (4)$$

위 식과 같이 터널에 해당하는 영역을  $n \times n$ 의 세격자로 설정하였으며, 터널의 주변 부분은 터널에서 멀어지면서 격자의 크기가 완만히 커져 최대 10 m 크기가 되도록 격자망을 설정하였다. 터널 구역에 여러 개의 격자가 위치하는 경우 각 격자의 중심부 고도가 달라지므로 일정수두 경계조건도 격자마다 다른 값으로 설정하였다. Fig. 2는 세격자 정도에 따라 수치모델에 의해 산정된 터널 유출량의 오차를 나타낸 것이다. 그림과 같이 세격자일수록 오차가 줄어들며  $n=8$ 일 경우 수치해가 해석해와 거의 일치하는 것으로 나타났다. Fig. 1c는  $n=8$ 일 경우 수치모델에서 계산된 터널 주변의 등수두

선 분포이며, 해석해의 결과인 Fig. 1a와 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 수치모델을 이용하여 터널 유출량을 산정할 경우 터널 구간을 적어도 8등분하는 세격자의 격자망을 설정해야 정밀한 터널 유출량 산정이 가능하다. 하지만 이 정도 크기의 세격자 격자망 설정은 모델 설계 측면에서 쉽지 않으며 매우 비효율적이다.

#### 모델영역 경계의 영향

해석해의 경우 수평적으로 무한하며, 수직적으로는 지하수면 하부로 무한한 반무한 영역을 가정하지만, 수치해의 경우 무한 영역을 모델에서 다룰 수 없으므로 모델 영역의 경계가 존재한다. 따라서 이러한 모델 영역 경계가 수치해의 결과에 영향을 미치며, 그 영향의 크기는 터널로부터 모델 영역 경계까지의 이격 거리에 따라 달라진다. 본 연구에서 설정한 개념모델의 경우 모델영역 좌우 및 하단의 불투수경계가 수치해의 결과에 영향을 미치며, 하단의 경계가 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위하여 터널의 심도( $H_0$ )를 증가시키면서 해석해와 수치해를 비교해 보았다. 격자 크기의 영향으로 발생하는 수치해의 오차를 최소화하기 위하여  $n=8$ 일 경우의 격자망을 이용하였다.

Fig. 3은 터널 심도가 증가하면서 터널이 모델영역 하단의 경계에 가까워질 때, 즉 모델 경계의 영향으로 수치해가 해석해와 어떻게 달라지는지를 보여주는 그림이다. 하부 경계가 없는 해석해의 경우 터널 심도와 유출량은 선형적인 비례관계를 보이는 반면, 수치해의 경우 터널 심도가 약 1000 m 이상일 때 심도가 증가할수록 해석해보다 유출량이 작아지면서 그 차이가 커지는 것을 볼 수 있다. 모델영역 좌우 및 하부 경계의 영향이다. 이러한 모델 경계의 영향은 터널이 경계에 인접할 때 더욱 크게 나타난다. 터널의 위치가 모델 하부 경계(3000 m)와 아주 가까울 경우, 터널 심도가 증가하더라도 유출량이 감소하는 것으로 나타났다. 수직적으로 무한한 영역을 가지는 대수층은 존재하지 않으며, 보통의 경우 수 십 또는 수 백 m 이내에 불투수성을 나타내는 하부 경계가 존재한다. 따라서 이러한 경계의 영향을 고려하지 못하는 해석해를 이용할 경우 유출량 산정 결과가 과대평가될 수밖에 없다.

한편, 터널이 지하수면에 가까운 경우에도 수치모델에 의해 계산된 터널 유출량이 해석해보다 작게 나타났다. Fig. 3b를 보면 터널 심도가 20-70 m인 경우 수치해가 해석해와 거의 일치한 반면, 심도가 10 m인 경우 수치해가 해석해보다 -34% 과소평가 되었다. 수치모델

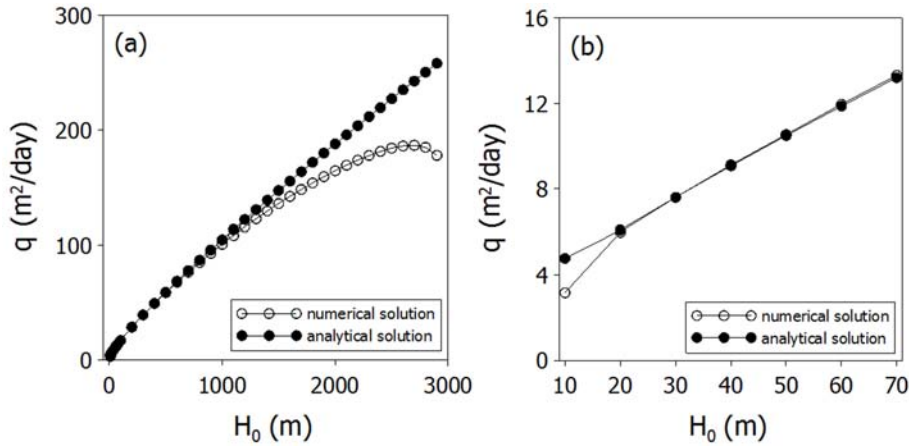


Fig. 3. Discrepancy between analytical and numerical solutions associated with model boundaries: effects of proximity of a tunnel to (a) the lower impermeable boundary and (b) the water table.

에서 터널 깊이가 10 m인 경우, 터널을 나타내는 격자와 상부 지하수면을 나타내는 격자가 서로 인접하게 되는데 이로 인하여 지하수면과 터널 사이의 지하수 흐름이 정밀하게 모의되지 않기 때문인 것으로 해석된다. 따라서 터널이 지하수면에 가까이 위치할 경우 수치모델에서 유출량 산정 결과의 신뢰도를 높이기 위해서는 격자망 설정 시 터널과 지하수면 사이에 다수의 격자층(layer)이 필요하다.

**터널 유출량 정밀 산정을 위한 최적의 격자 크기**

본 논문의 수치모델 사례와 같이 단순한 개념 모델의 경우 정밀한 유출량 산정을 위하여  $n=8$  정도의 세격자를 가지는 격자망을 설계할 수 있으나, 실제 터널 굴착 문제를 다룰 경우에는 세격자의 격자망 설계가 매우 어려우며, 해를 구하기 위해서 상당한 계산 시간이 소요되는 단점이 있다. 지형, 도로의 연결성, 경제성 등 터널과 관련된 설계적 요소들을 고려하여 특정 구간에서 터널이 곡선으로 설계되는 경우 격자망과 관련된 모델 설계의 복잡성은 더 커지게 된다. 따라서 실제 현장의 문제를 다루는 수치모델의 경우 세격자를 이용하여 터널 유출량을 정밀하게 산정하는 것은 현실적으로 매우 어려운 과제이다. 즉, 격자 크기에 따른 수치해의 정밀성과 관련된 문제를 해결하기 위해서는 터널을 하나의 조격자로 처리하면서 정밀한 계산이 가능해야 한다. 터널 크기가 주어졌을 때 터널의 크기와 정밀한 수치해를 나타내는 격자 크기와의 관계를 탐색할 필요가 있다.

수치모델의 터널 격자 크기를 10 m, 20 m, 및 30 m로 증가시키면서 터널의 심도에 따른 유출량의 변화를

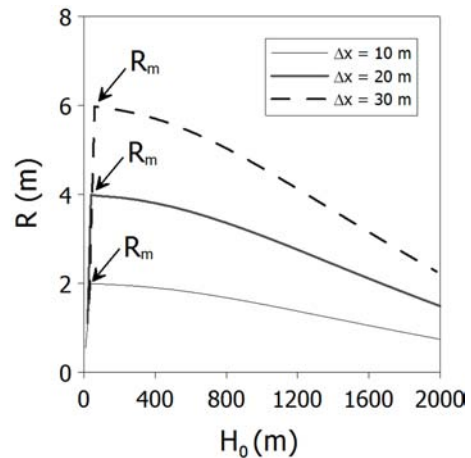


Fig. 4. Relationship between the radius of a tunnel and the grid size which yield an accurate numerical solution; the tunnel radius was calculated from the analytical solution (Eqn. 2).

계산하였으며, 터널 심도 및 계산된 유출량을 해석해에 대입하여 터널의 반경을 계산하였다(Fig. 4). 즉, 터널을 단일 격자의 일정수두 경계로 설정한 수치모델로부터 터널 유출량을 계산하였으며, 계산된 유출량을 식 (2)에 대입하여 이에 해당하는 터널 반경을 역으로 계산하였다.

앞절의 분석 결과와 같이 수치모델의 경우 모델 경계의 영향으로 유출량이 해석해보다 작게 산정된다. 유출량이 작게 산정되면 식 (2)로부터 계산되는 터널의 반경도 동시에 감소하게 된다. 따라서 Fig. 4와 같이 유출량으로부터 계산된 터널 반경이 터널 심도가 증가하면서 점차 감소하는 것은 모델 좌우 및 하부 경계의 영향이

다. 모델 영역 경계의 영향은 터널이 지하수면에 가까울 때에도 동일하게 나타나는데, Fig. 4와 같이 매우 불연속적으로 급격한 변화를 발생시킨다. 따라서 Fig. 4가 보여주는 터널 반경의 최대값( $R_m$ )은 수치모델의 영역 경계 효과가 가장 작게 나타나는 터널 심도에서의 해석 결과라 할 수 있다. 즉, 경계의 효과가 제거된 조건에서 수치해와 해석해가 일치되는 결과이다. 그림과 같이 수치모델의 터널 격자 크기가 10 m, 20 m, 및 30 m 일 때  $R_m$ 은 각각 2 m, 4 m, 및 6 m 인 것으로 나타났다. 따라서 단일 격자 내에 터널이 포함되면서 터널 반경의 5배 크기로 격자를 생성할 때 수치모델의 터널 유출량 산정 결과가 해석해와 잘 일치한다고 할 수 있다.

$$\Delta x_{optim} = 5R \quad (5)$$

한편, MODFLOW와 같은 유한차분모델의 격자 내에 우물이 위치할 경우 격자에서 계산된 수두는 실제 우물의 수두를 나타내지 않는다. 우물의 크기와 격자의 크기가 매우 다르기 때문이다. 격자에서 계산된 수두와 우물 흐름의 해석해로부터 계산된 수두가 같아지는 지점을 등가우물격자반경(equivalent well block radius,  $r_e$ )으로 정의되며, 정방형 격자의 경우 다음식과 같다(Peaceman, 1978).

$$r_e = \exp\left(-\frac{\pi}{2}\right)\Delta x = 0.208\Delta x \quad (6)$$

즉, 우물을 포함하는 정방형 격자에서 계산된 수두는 우물로부터  $0.208\Delta x$  거리만큼 떨어진 지점의 수두를 의미하며, 우물의 반경이  $0.208\Delta x$  와 같으면 격자의 수두가 우물의 수두와 같게 된다. 결국, 식 (5)와 (6)은 지하수 흐름을 모의하는 유한차분모델에서 격자 내에 우물 또는 터널과 같은 원통형의 배출원이 있을 경우 배출원에서의 수두 또는 유출량을 해석하는 동일한 관련 식이다. 식 (6)은 우물을 통하여 일정한 비율로 격자에서 물을 배출시키는 문제인 반면, 식 (5)는 일정수두경계(터널)를 통하여 물이 배출되는 문제이다.

결론적으로, 터널 굴착을 모의하는 수치모델에서 식 (5)와 같이 격자망을 설정하면 격자 크기와 관련된 수치모델의 오차가 최소가 되며, 터널 내부로의 지하수 유출량을 정확하게 계산할 수 있다. 단 전술한 바와 같이 터널 구간과 지하수면 사이에 최소 1-2개의 격자층이 있어야 한다. 따라서 도심지 지하철과 같이 천부 지하수면과 인접하게 터널이 굴착되는 경우에는 식 (4)의 방법과 같이 터널과 터널 주변 영역을 세격자의 격자망으로 수

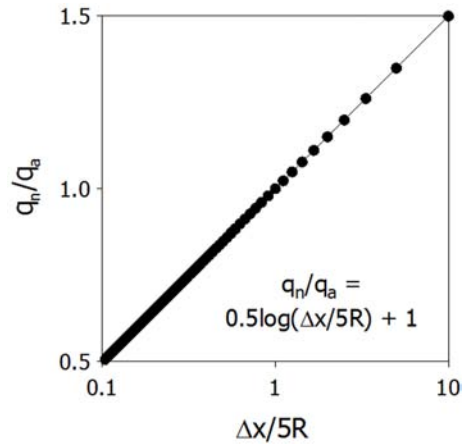


Fig. 5. Errors of the groundwater discharge into a tunnel associated with the grid size ( $\Delta x$ ) of a numerical model;  $q_a$  and  $q_n$  represent the analytical and numerical solutions, respectively.

치모델을 설계해야 정밀한 유출량 산정이 가능하다.

Fig. 5는 반경  $R$ 인 터널에 대하여 격자의 크기를 다양하게 적용하였을 경우 수치모델에서 계산된 유출량이 해석해의 결과와 비교할 때 어떻게 달라지는지를 보여 준다. 즉, 식 (5)의 규칙을 따르지 않고 임의의 크기로 격자망을 설정한 수치모델에서 계산된 유출량의 오차를 분석한 결과이다. 그림의 x축은 격자 크기를  $5R$ , 즉 최적의 격자 크기로 나눈 값이며, y축은 수치해( $q_n$ )와 해석해( $q_a$ )의 비를 나타낸다. 그림과 같이 로그함수적인 비례관계를 보였으며, 회귀분석 결과는 아래 식과 같다.

$$\frac{q_n}{q_a} = 0.5 \log\left(\frac{\Delta x}{5R}\right) + 1 \quad (7)$$

서론에서 언급한 바와 같이 최근 국내에 보고된 터널 굴착과 관련된 수치모델을 보면 모델 설계 시 명확한 기준 없이 연구자에 따라 임의의 크기로 격자망이 설정되어 왔다(Table 1). 따라서 이러한 연구 결과는 본 연구에서 제시한 식 (5)의 기준에 따라 터널 유출량이 과대 또는 과소평가 되었을 것으로 예상된다.

따라서 식 (7)을 이용하여 Table 1의 터널 관련 지하수 모델링 연구에서 격자 크기로 인하여 발생한 유출량의 오차를 계산하였다(Table 2). 12개의 연구 결과에 대한 분석 결과 3개는 격자 크기를 식 (5)의 최적값보다 크게 설정하여 유출량이 과대 평가되었을 것으로 예상되며, 이 중 Lee et al. (2003)의 산정 결과가 161%로 가장 크게 나타났다. 대부분의 연구 결과(9개)는 격자

**Table 2.** Numerical errors in the rate of groundwater discharge into a tunnel for the various grid sizes used in recent studies.

Publication	Grid size (m)	Tunnel radius (m)	Optimal grid size (m)	$q_n / q_a$
Ji (2002)	22 × 17	11.7	58.5	0.79
Lee et al. (2003)	125 × 125	1.5	7.5	1.61
Jeong (2003)	7.5 × 7.6	3.75	18.75	0.80
Choi et al. (2004)	25 × 25	5.6	28	0.98
Lee et al. (2005)	35 × 40	2.0	10	1.27
KEI (2005)	10 × 10	5.5	27.5	0.78
Cha et al. (2005)	10 × 9	3.6	18	0.87
Chung et al. (2007)	62.5 × 62.5	9.4	47	1.06
Lim and Chang (2008)	30 × 15	6.65	33.25	0.98
Lee et al. (2009)	15 × 5	8.2	41	0.78
Lee et al. (2010)	14 × 12	7.7	38.5	0.78
Kim (2011)	10 × 10	5.3	26.5	0.79

크기를 최적값보다 작게 설정하였으며, Jeong (2003)과 같이 많은 경우 격자의 크기를 터널의 크기(직경)와 비슷하게 설정하려는 경향을 보였다. 결과적으로 이러한 수치모델의 터널 유출량은 해석해와 비교할 때 20% 내외의 과소평가된 결과를 나타낸 것으로 예상된다.

## 결 론

터널 굴착과 관련된 지하수 흐름 모델의 경우 격자망 설계가 터널 유출량 산정 결과에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있으나, 모델 설계 시 명확한 기준 없이 연구자에 따라 임의의 크기로 격자망이 설정되어 왔다. 따라서 본 논문에서는 해석해와 수치해를 비교하는 방법을 통하여 격자의 크기가 수치 모델의 유출량 산정 결과에 미치는 영향을 분석하였으며, 유출량 정밀 산정을 위한 격자망 설정 방법을 제시하였다. 본 연구에서 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 터널 및 터널 주변부를  $n=8$  정도의 세격자로 설정하면 터널 유출량을 정밀하게 평가할 수 있으나, 이러한 방법은 실제 현장의 문제를 다룰 때 모델 설계 측면에서 쉽지 않으며 매우 비효율적이다. 따라서 하나의 조격자 내에 터널이 포함되면서 정밀한 유출량 산정 결과를 제시할 수 있는 격자망 설계가 필요하다.

2. 수치해의 경우 격자의 크기뿐만 아니라 모델 경계의 영향으로 해석해와 차이가 발생하였으며, 모델 경계의 효과를 제거하였을 경우 터널 반경의 5배로 격자 크기를 설정할 때 수치모델의 터널 유출량 산정 결과가 해석해와 잘 일치하였다. 이러한 해석 결과는 우물을 다

루는 수치모델에서 등가우물격자반경의 계산식과 동일한 것으로 확인되었다.

3. 터널 내 지하수 유출을 다루는 최근의 수치모델 연구 결과를 분석한 결과, 일부 논문에서는 격자의 크기를 터널의 크기에 비하여 지나치게 크게 설정하여 유출량이 160% 이상 과대평가된 것으로 분석되었다. 하지만 대부분의 연구에서 격자의 크기를 터널의 크기와 동일하게 설정하려는 경향이 있으며, 이로 인하여 수치모델에서 계산된 터널 유출량이 20% 정도 과소평가된 것으로 해석된다.

4. 앞으로 터널 굴착과 관련된 지하수 흐름 모델 개발 시 격자 크기에 대한 본 연구 결과가 적용된다면 좀더 정밀한 유출량 산정 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

## 사 사

이 논문은 2013년 공주대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의해 연구되었습니다.

## References

- Cha, J. H., Na, H. N., and Koo, M., 2005, Modeling transient change of the groundwater flow system by tunnel excavation, Proceedings of KoSSGE 2005 Spring Conference, 389-392.
- Choi, M. J., Lee, J. Y., Koo, M., and Lee, K. K., 2004, A comparative study on groundwater flow depending on conceptual models in tunnel modeling, The Journal of Engineering Geology, 14(2), 223-233 (in Korean with

- English abstract).
- Chung, S. Y., Kim, B. W., Kang, D. W., Shim, B. O., and Cheong, S. W., 2007, Analyses of hydrology and groundwater level fluctuation in granite aquifer with tunnel excavation, *The Journal of Engineering Geology*, 17(4), 635-645 (in Korean with English abstract).
- Dershowitz, W., Lee, G., and Geier, J., 1991, FracMan version 2.3, Interactive discrete feature data analysis, geometric modelling, and exploration simulation, User Documentation, Golder Associates Inc., Redmond, Washington.
- Goodman, R. E., Moye, D. G., Van Schalkwyk, A., and Javandel, I., 1964, Ground water inflows during tunnel driving, College of Engineering, University of California Geology.
- Jeong, B. S., 2003, Transient groundwater flow modeling for tunnel excavation using the MODFLOW program, MSc Thesis, Kongju National University, Kongju, Korea, 1-84 (in Korean with English abstract).
- Ji, H. S., 2002, A Study on drainage characteristics of micro tunnel in metamorphic rock mass, MSc Thesis, Dongguk University, Seoul, Korea, 1-81 (in Korea with English abstract).
- Kim, S. M., 2011, Hydraulic and hydrological study on the change in groundwater level during tunnel construction, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 13(2), 97-114 (in Korean with English abstract).
- Korea Environment Institute (KEI), 2005, A Study on mitigation plan for environmental impacts of groundwater in tunnel, KEI, Seoul, Korea, 148 (in Korean).
- Lee, B. D., Choo, C. O., Lee, B. J., Cho, B. W., Hamm, S. Y., and Im, H. C., 2003, Numerical modeling on the prediction of groundwater recovery in the Youngchun area, Kyungbook Province, *Economic and environmental geology*, 36(6), 431-440 (in Korean with English abstract).
- Lee, B. D., Sung, I. H., Jeong, C. H., and Kim, Y. J., 2005, Modeling on prediction of flow rate and groundwater level drawdown associated with tunnel excavation in fractured rock, *The Journal of Engineering Geology*, 15(3), 289-301 (in Korean with English abstract).
- Lee, J. H., Hamm, S. Y., Cheong, J. Y., Jeong, J. H., Kim, N. H., Kim, K. S., and Jeon, H. T., 2009, Estimation of groundwater flow rate into Jikri tunnel using groundwater fluctuation data and modeling, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 14(5), 29-40 (in Korean with English abstract).
- Lee, J. H., Hamm, S. Y., Cheong, J. Y., Jeong, J. H., Park, S. K., Kim, N. H., and Kim, G. B., 2010, Numerical simulation of the change in groundwater level due to construction of the Giheung Tunnel, *The Journal of Engineering Geology*, 20(4), 449-459 (in Korean with English abstract).
- Lee, J. H., Yoo, H. S., Lee, Y. S. and Park, C. S., 2004a, Case study of environmental impact assessment about groundwater outflow during railroad tunnel construction, *Proceedings of The Korean Society for Railway 2004 Spring Conference*, 303-308 (in Korean with English abstract).
- Lee, Y. S., Kwon, Y. W., and Bae, G. J., 2004b, A study on the environmental effect due to tunnel excavation, *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, 5(4), 81-91 (in Korean with English abstract).
- Lei, S., 1999, An analytical solution for steady flow into a tunnel, *Ground Water*, 37(1), 23-26.
- Lim, H. G. and Chang, Y. Y., 2008, Study on the impact of tunnel construction on geo-environment - simulation study on the Gyerong tunnel -, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 13(5), 88-95 (in Korean with English abstract).
- McDonald, M. G. and Harbaugh, A. W., 1988, A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chap. A1, 83-875.
- Park, S. H., 2007, The change analysis of groundwater flow system produced by tunnel excavation in an unconfined aquifer, MSc Thesis, Kangwon National University, Kangwon, Korea, 171 (in Korean with English abstract).
- Peaceman, D. W., 1978, Interpretation of well-block pressures in numerical reservoir simulation, *Society of Petroleum Engineers Journal*, 18(3), 183-194.
- Polubarinova-Kochina, P. Ya., 1962, *Theory of ground water movement* (Translated by R.J.M. De Wiest), New Jersey, Princeton University.

#### 구민호

공주대학교 지질환경과학과  
314-701 충남 공주시 공주대학교로 56  
Tel: 041-850-8515  
E-mail: koo@kongju.ac.kr

#### 정재현

한국환경공단  
인천광역시 서구 환경로 42  
Tel: 010-9392-0297  
E-mail: wjdwork@nate.com