

# 터널굴착 중 지하수위 강하 및 깊이별 투수계수 변화를 적용한 지하수 유입량 변화 분석

문준식<sup>1</sup> · 정안치<sup>2\*</sup> · 장서용<sup>3</sup>

<sup>1</sup>정회원, 경북대학교 토목공학과 조교수

<sup>2</sup>정회원, 경북대학교 토목공학과 석사과정

<sup>3</sup>비회원, 전남대학교 건축공학과 대학강사

## Assessment of groundwater inflow rate into a tunnel considering groundwater level drawdown and permeability reduction with depth

Joon-Shik Moon<sup>1</sup> · An-Qi Zheng<sup>2\*</sup> · Seoyong Jang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Kyungpook National University, Assistant Professor

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Kyungpook National University, Graduate student

<sup>3</sup>Department of Architectural Engineering, Chonnam National University, Lecturer

\*Corresponding Author: An-Qi Zheng, diuidu8612@163.com

### Abstract

Groundwater seepage into a tunnel is one of the main causes triggering tunnel collapse and the consequent ground subsidence. Thus, it is important to estimate adequately the groundwater inflow rate and porewater pressure change during tunneling with time elapse. In current practice, Goodman's analytical solution (or image tunnel method) assuming homogeneous ground condition around a tunnel is commonly used for estimating groundwater inflow rate. However, the generally-used analytical solution for estimating groundwater inflow rate does not consider groundwater level drawdown and permeability change with depth, and the inflow rate can be overestimated in design phase. In this study, parametric study was performed in order to investigate the effect of groundwater level drawdown and permeability reduction with depth, and transient flow analysis was carried out for studying the inflow rate change as well as groundwater level and porewater pressure change around a tunnel with time elapse.

**Keywords:** Groundwater flow into a tunnel, Groundwater level drawdown, Permeability reduction, Transient flow analysis

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and  
Underground Space Association  
19(2)109-120(2017)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2017.19.2.109>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received January 13, 2017

Revised February 3, 2017

Accepted February 15, 2017



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2017, Korean Tunnelling and Underground Space Association

[www.kci.go.kr](http://www.kci.go.kr)

## 초 록

터널 내 지하수 침투는 터널붕괴와 그에 따른 지반침하의 주요 원인 중 하나이다. 따라서 터널굴착 중 시간에 따른 지하수 침투량과 간극수압 변화를 적절히 예측하는 것이 중요하다. 실무에서는 균질한 지반조건으로 가정하는 Goodman의 산정법을 사용하여 지하수 침투량을 계산하지만, 터널굴착 중 지하수위 강하와 깊이에 따른 투수계수 변화를 고려하지 않아 설계단계에서 지하수 유입량을 과다하게 산정할 우려가 있다. 따라서 본 연구에서는 지하수위 강하 및 깊이별 투수계수의 감소를 적용한 매개변수분석을 통해 지하수 유입량 변화를 분석 비교하였으며, 시간에 따른 지하수 침투량 변화와 지하수위 및 간극수압 분포 변화를 분석하기 위해 비정상류 해석을 수행하였다.

**주요어:** 터널 내 지하수 유입, 지하수위 저하, 투수계수 감소, 비정상류 해석

## 1. 서론

터널 굴착에 있어 지하수의 문제는 터널 붕괴를 포함하여 지반침하, 지반의 강도저하 등과 같은 주요 문제들의 원인이 된다. 그러므로 지하수의 거동을 터널 계획 단계에서 적절하게 예측하는 것은 터널의 안정성 확보에 있어서 매우 중요한 문제로 다루어져 왔다. Jo et al. (2016)은 지하수위 변화에 따른 지하차도 구조물 안정성을 평가하였으며, Yoo (2008)는 지하수가 터널굴착에 미치는 영향을 3차원 연계해석을 통해 분석하였다.

터널굴착 시 터널설계는 일반적으로 지하수위의 강하를 고려하지 않고 등가 투수계수를 적용하여 터널 내 유입량을 산정하고 있다. 하지만 절리암반으로 구성된 지반에서 지하수위 아래에 굴착될 터널의 경우 굴착 시 지하수위 강하가 발생한다. Rim (2009)는 가상 관측정을 통해 지하수위 강하 발생을 관측하였으며, Shin (2005)는 터널 굴착 시 지하수위 강하문제를 Fig. 1과 같이 모사했다.

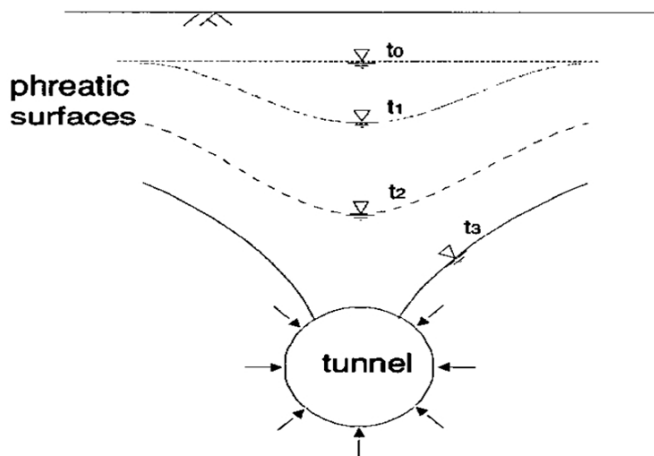


Fig. 1. Groundwater level change due to tunnelling (Shin, 2005)

www.kci.go.kr

투수계수의 산정은 식 (1)의 Darcy's law을 바탕으로 다양한 투수계수 산출식이 제안되어 왔다. 절리암반의 경우 Carlson & Olsson (1977), Snow (1968), Zhang & Franklin (1993) 등의 연구에서 나타난 바와 같이 투수계수는 일반적으로 심도가 깊을수록 감소한다. Fig. 2는 Carlson & Olsson (1977)이 Packer test로부터 관측한 깊이별 투수계수의 변화를 보여주고 있으며, 터널의 심도가 증가할수록 투수계수의 감소현상이 뚜렷하게 발생함을 확인할 수 있다.

$$q = k \cdot i \cdot A \tag{1}$$

여기서,  $q$ 는 유입량,  $i$ 는 동수경사,  $A$ 는 단면적이다.

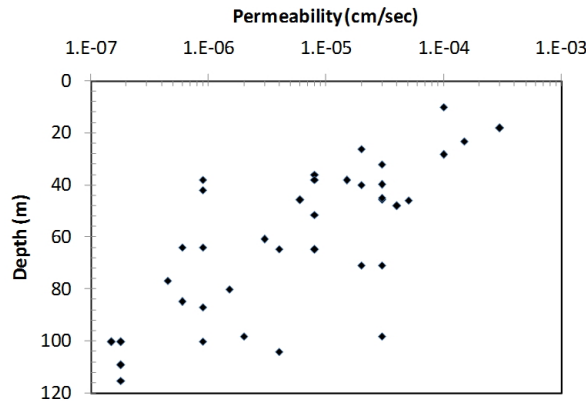


Fig. 2. Field Packer Hydraulic Conductivity Measurements (Carlsson and Olsson, 1977)

터널 내 지하수 유입량은 Harr (1962)과 Goodman et al. (1965)이 제안한 Fig. 3의 Image Tunnel 방법을 통해 산정할 수 있다. Image Tunnel 방법은 복잡한 반무한 경계조건의 문제를 비교적 간단한 무한 경계조건으로 변환하여 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있으며 지하수위로부터 터널과 동일한 거리에 recharge터널이 존재한다고 가정함으로써 산술식 (2)와 같이 유도할 수 있다.

$$q_0 = \frac{2\pi H \cdot k}{\ln[1 + (\frac{2H}{a})^2]^{0.5}} \approx - \frac{2\pi H \cdot k}{\ln(\frac{2H}{a})} \tag{2}$$

여기서,  $k$ 는 등가 투수계수,  $H$ 는 지하수위로부터 터널 스프링라인까지 깊이,  $a$ 는 터널반경,  $q_0$ 는 터널 단위길이 당 지하수 유입률 이다.

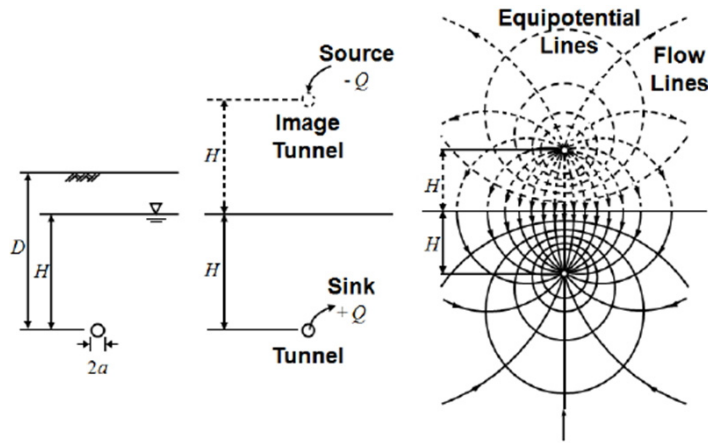


Fig. 3. Image Tunnel Method

본 연구에서는 절리암반 터널 내 지하수 유입량 산정 시 일반적으로 무시되는 지하수위 강하 및 투수계수 감소 효과를 파악하기 위해 수치해석을 수행하고 시간에 따른 터널 깊이별 지하수위 및 지하수 유입량 변화 추이를 분석하였다.

## 2. 수치해석 모델링

수치해석은 유한요소 해석법을 근거로 지반 및 터널 시스템에 대한 수치해석을 위해 개발된 마이더스아이티사의 GTS NX 프로그램을 사용하였다. GTS NX 프로그램은 정해석, 침투해석, 응력-침투 연계해석 등 다양한 해석 기능을 제공하며, 지반 및 터널, 기초, 가시설 등 지반구조물의 정확한 모델링을 위해 다양하고 특화된 요소를 제공한다. 해석에 사용된 모델은 Fig. 4와 같이 가상 지반을 대상으로 GL-15 ~ 150 m 심도에 직경이 3 m 인 원형 터널을 적용하였으며, 모델의 크기는 폭과 길이에 대한 매개변수 분석을 통해 경계조건의 영향이 최소화 되도록 선정하였다. 지하수위는 GL-6 m이며, 지반의 투수계수는 등가 투수계수( $k_m=10^{-4}$  cm/sec)를 적용한 경우와 깊이별 투수계수 변화( $k_m=4 \times 10^{-4} \sim 10^{-6}$  cm/sec)를 고려한 경우로 구분하였다. 깊이별 투수계수의 변화는 Fig. 2의 Carlson & Olsson (1977)의 packer 시험결과를 적용하였다. 또한, 모델별 지하수 강하의 영향과 투수계수 변화에 대한 영향을 분석하기 위해 Table 1과 같이 Case I ~ Case III으로 구분하였다. Case I의 경우 Image Tunnel 방법을 통해 유도된 산정식 (2)를 이용하여 산정하였으며, 깊이별 투수계수 변화 적용의 경우 Fig. 2의 Snow (1968)의 실험결과를 토대로 깊이별 감소율을 적용하였다.

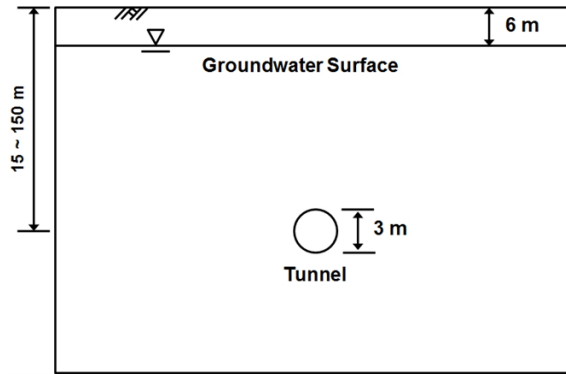


Fig. 4. Numerical model

Table 1. Numerical Modeling Cases

	Groundwater Level Drawdown	Permeability
Case I	No groundwater level drawdown	$10^{-4}$ cm/sec
Case II	Groundwater level drawdown can occur	$10^{-4}$ cm/sec
Case III	Groundwater level drawdown can occur	Varied with depth $4 \times 10^{-4} \sim 10^{-6}$ cm/sec

### 3. 터널 심도별 변화양상

터널이 지하수위 아래에 굴착될 경우 지하수위는 일반적으로 시간이 경과할수록 정상류상태가 될 때까지 강하하며, 지반의 투수계수는 심도가 깊어질수록 감소하는 경향을 보인다. 하지만 투수계수의 변화는 이 뿐만 아니라 터널굴착에 따른 터널주변 지반의 간극수압 감소에 따른 유효응력증가에 의해 발생할 수 있으며, 특히 절리암반의 경우 유효응력 증가는 터널 주변 절리의 닫힘현상을 초래하고 이러한 닫힘현상으로 인해 투수계수 감소가 발생한다. You와 Lee (2008)은 불연속 암반 내 해저터널의 안전성 평가를 위해 연계해석을 수행하여 절리 내 지하수 흐름이 터널거동에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에서는 터널 굴착에 의한 유효응력 변화에 따른 투수계수의 변화는 고려하지 않았으며, Fig. 2의 Carlson & Olsson (1977)의 실험결과를 토대로 깊이에 따른 초기 투수계수 변화만을 고려하여 해석을 수행하였다.

#### 3.1 정상류 해석

터널 굴착 직후 터널 내 지하수 유입량은 시간에 따라 점차 감소하다가 정상류 상태로 수렴한다. 정상류 상태는 외부환경 변화에 의해 지하수 흐름이 발생한 후 시간에 따라 변화하다가 평형상태에 도달한 상태로서, 정상류 상태의 지하수 유입량에 대하여 지하수위 강하와 심도별 투수계수 변화의 영향을 분석하기 위해 Table 1의 Case I ~ Case III로 구분하여 해석을 수행하였다.

Fig. 5는 정상류 상태에서 지하수위 강하를 고려하지 않은 경우(Case I)와 지하수위 강하를 고려한 경우(Case II) 깊이에 따른 지하수 유입량 변화를 비교하고 있다. 결과적으로 그림에서 음영부분은 지하수위 강하에 따른 유입량 감소현상을 나타낸다. Case I은 packer 시험 등으로 추정된 절리암반의 투수계수를 적용하여 식 (2)를 이용하여 산정한 지하수 유입량과 같다.

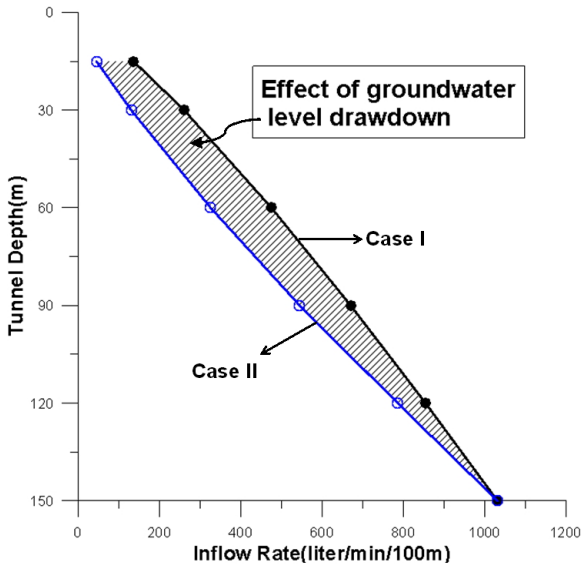


Fig. 5. Inflow rate change with tunnel depth

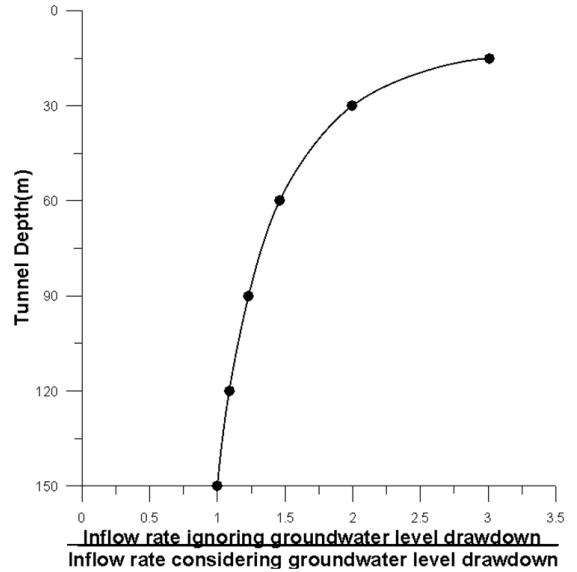


Fig. 6. Effect of groundwater level drawdown with tunnel depth

Fig. 6은 깊이에 따른 지하수 유입량 비를 나타내며, 심도가 깊어질수록 유입량 비가 점차 감소하는 것을 나타낸다. 즉, Fig. 5의 Case II에 대한 Case I의 유입량 증가비를 의미한다. 그림에서 나타난 바와 같이 터널심도 30 m에서는 비교적 큰 유입량의 차이를 보이고 심도가 깊어질수록 유입량의 차이가 점차 작아지며, 깊은터널의 경우 지하수위 강하가 거의 일어나지 않아 유입량비가 1.0에 근접하게 나타남을 볼 수 있다. 지하수위의 강하는 터널 내 지하수 유입량을 감소시키며, 터널 심도가 깊어질수록 터널 깊이에 대한 지하수위 강하율이 작게 나타나게 되어 지하수위 강하에 따른 지하수 유입량 감소가 작게 나타난 것으로 분석된다.

Fig. 7은 정상류 상태에서 심도별 투수계수 감소현상을 고려하지 않은 경우 (Case II)와 심도별 투수계수 감소현상을 고려한 경우(Case III)의 터널 심도별 유입량 변화를 보여주고 있다. 그림에서 음영부분은 투수계수 감소 효과를 의미한다. Case II에서는 터널 깊이와 상관없이 전 구간에서 Case III의 얇은 층의 투수계수( $k_m=10^{-4}$  cm/sec)를 동일하게 적용하였다. Case III에서는 깊이에 따른 지반의 투수계수 감소를 고려하기 위하여 Carlson & Olsson (1977)의 packer 시험결과값( $k_m=4 \times 10^{-4} \sim 10^{-6}$  cm/sec)을 적용하였다.

Fig. 7에서 나타난 바와 같이 터널심도 30 m에서는 지하수 유입량의 차이가 작게 발생하지만 심도가 깊어질수

록 유입량의 차이가 점차 증가하는 것을 볼 수 있다. 심도별 투수계수 감소현상을 고려한 경우(Case III) 심도가 터널심도 30 m에서는 지하수 유입량이 깊이에 따라 증가하지만 일정깊이 이후부터 지하수 유입량이 깊이에 따라 점차 감소한다. 이는 터널의 심도가 비교적 얇은 경우 지하수 유입량이 깊이에 따른 투수계수 감소의 영향보다 지하수위 강하의 영향을 크게 받아 터널심도가 깊어질수록 지하수 유입량이 증가하며, 일정깊이 이상에서는 지하수위 강하의 영향이 급격하게 감소하게 되고 투수계수 감소의 영향이 지하수 유입량 변화에 지배적으로 작용하여 터널 깊이에 따라 지하수 유입량이 점차 감소하게 되는 것으로 분석된다.

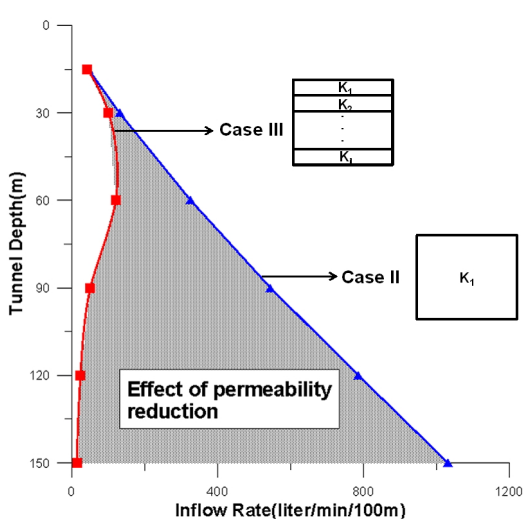


Fig. 7. Effect of permeability reduction with depth

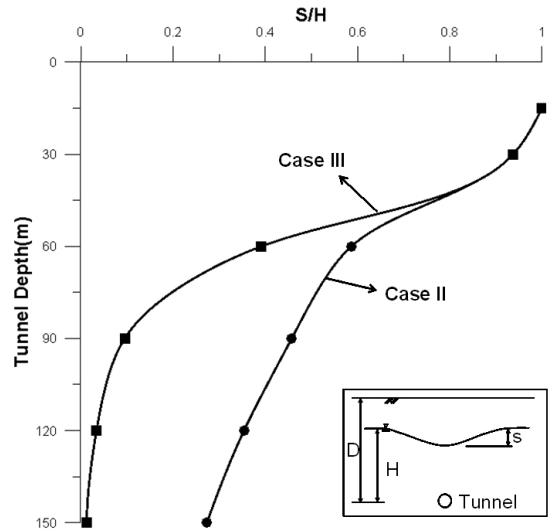


Fig. 8. Ratio of groundwater level drawdown to tunnel depth

Fig. 8은 정상류 상태에서 심도별 투수계수 감소현상을 고려하지 않은 경우(Case II)와 심도별 투수계수 감소현상을 고려한 경우(Case III)의 터널 심도별 지하수위 강하율( $S/H$ )의 변화를 비교하여 보여주고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 터널심도가 비교적 얇은 터널(15~30 m)의 두 곡선은 지하수위 강하율이 비슷한 형태로 나타난다. 하지만 터널 깊이가 깊어질수록 심도별 투수계수 감소현상을 고려하지 않은 경우(Case II)보다 심도별 투수계수 감소현상을 고려한 경우(Case III)의 지하수위 강하율이 작게 나타난다. 이는 Case II의 경우 터널 깊이와 무관하게 동일한 투수계수를 적용하여 터널 깊이가 깊어질수록 지하수 유입량이 선형적으로 증가하므로(Fig. 7) 깊은 터널인 경우 Case III에 비해 상대적으로 터널 깊이에 따른 지하수위 강하율이 작게 나타난 것으로 분석된다.

### 3.2 비정상류 해석

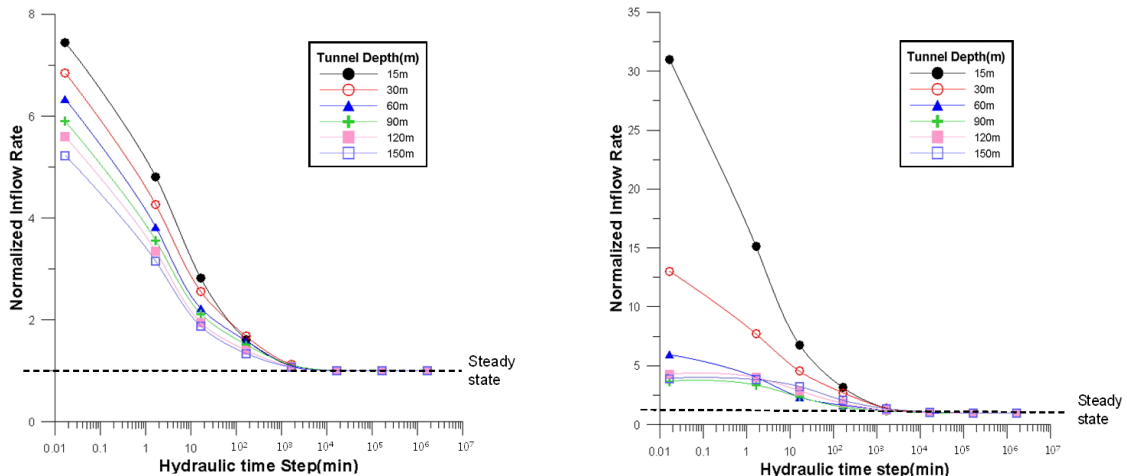
터널 굴착 직후 터널 인접 절리 내 지하수가 유입되며, 동수경사가 급증하여 비교적 큰 지하수 유입(Flush

flow)이 발생하고 점차 동수경사가 완만해지고 지하수위가 강하하면서 시간에 따라 지하수 유입량이 감소하게 된다. 본 절에서는 시간에 따른 지하수 유입량과 간극수압의 변화를 분석하기 위해 비정상류 해석을 수행하였다. 정상류 해석과 달리 비정상류 해석을 수행함으로써 시간에 따른 지하수 유입량 및 간극수압 변화를 분석할 수 있다.

### 3.2.1 터널 심도별 유입량 분석

Fig. 9는 시간에 따른 터널 심도별 유입량 변화를 나타내고 있다. Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)는 각각 심도별 투수계수 감소현상을 고려하지 않은 경우(Case II)와 심도별 투수계수 감소현상을 고려한 경우(Case III)의 시간에 따른 지하수 유입율( $q_t/q_0$ ) 변화이다. 여기서,  $q_t$ 는 비정상류 상태의 지하수 유입량이고  $q_0$ 는 정상류 상태에서의 지하수 유입량이다. 일정한 투수계수를 고려한 Fig. 9(a)에서는 시간에 따른 지하수 유입율( $q_t/q_0$ )이 시간에 따라 거의 선형적으로 감소하다가 정상류 상태로 수렴하며, 얇은 심도의 터널일수록 지하수 유입율이 크게 나타남을 볼 수 있다.

반면 심도별 투수계수 감소를 고려한 Fig. 9(b)에서는 터널심도에 따라 변화 양상이 다르게 나타난다. 터널심도 30 m에서는 초기 지하수 유입율이 크며, 시간이 경과함에 따라 급격하게 감소하고 있다. 하지만, 터널심도가 90 m 이상의 경우 시간에 따른 지하수 유입율이 초기에는 거의 일정하게 나타나다가 서서히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 터널심도 30 m에서는 터널주변 지반의 투수계수가 크므로 터널 굴착 후 초기에 많은 양의 지하수가 터널 안으로 빠져나오기 때문에 지하수 유입율 변화가 급격하게 감소하는 형태를 나타내며, 터널심도가 90 m 이상의 경우에는 터널주변 지반의 투수계수가 작으므로 터널 굴착 직후에는 비교적 적은 양의 지하수가 터널 안으로 유입되고 주변 지반 내 지하수가 재충전되면서 비교적 일정하게 유입이 발생하다가 일정시간이 경과한 후 서서히 지하수위 강하가 발생하면서 지하수 유입량이 감소하는 것으로 분석된다.



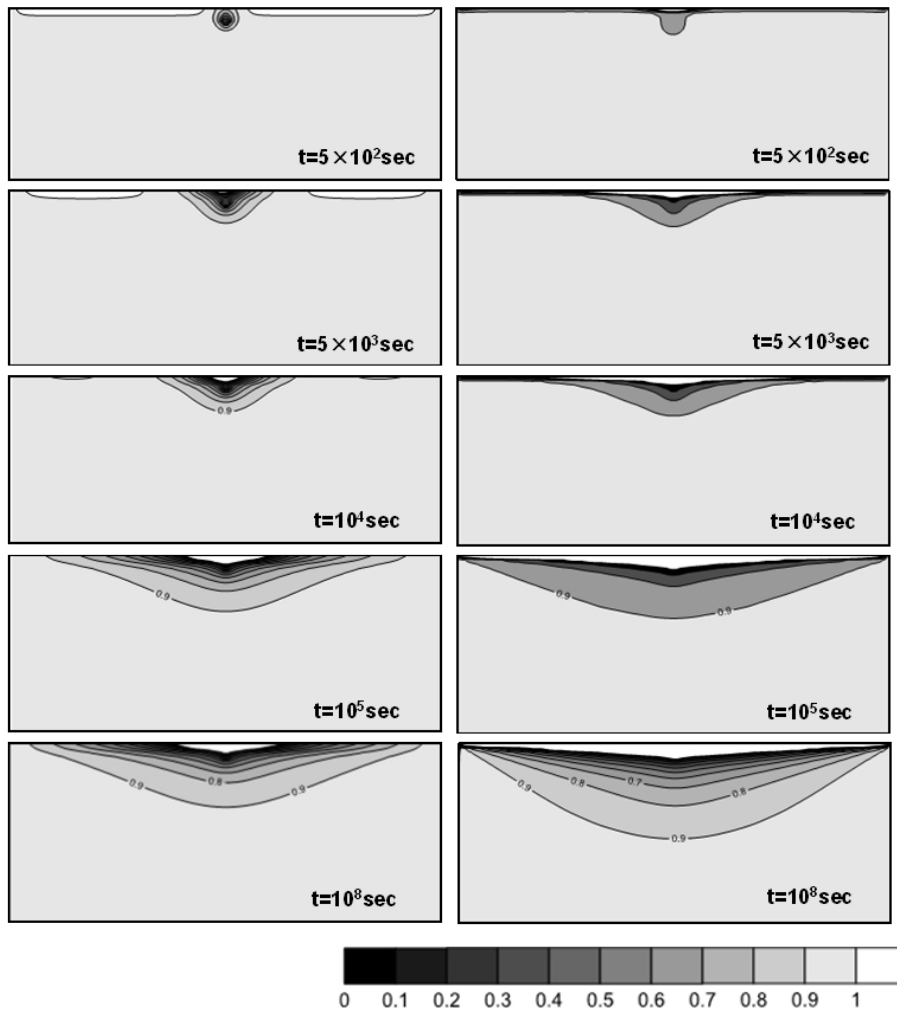
(a) Case II - ignoring permeability change with depth (b) Case III - assuming permeability reduction with depth

Fig. 9. Normalized inflow rate change with hydraulic time step



### 3.2.2 터널 심도별 간극수압

Fig. 10은 터널심도가 30 m인 경우에 대하여 시간에 따른 간극수압 변화를 나타내고 있다. Fig. 10(a)와 Fig. 10(b)는 각각 심도별 투수계수 감소현상을 고려하지 않은 경우(Case II)와 심도별 투수계수 감소현상을 고려한 경우(Case III) 터널굴착 전 초기간극수압에 대한 간극수압 변화정도를 보여주고 있다. 일정한 투수계수를 고려한 Fig. 10(a)에서는 터널 굴착 초기 간극수압이 주로 터널주변에서부터 증가하며, 시간에 따라 점차 수평방향으로 확장되고 있다. 이는 터널 굴착으로 인해 터널 주변의 지하수가 굴착된 터널 내로 유입/손실되고 주로 인접지반으로부터 재충전이 발생하는 것으로 분석된다. 이후 터널 내 지하수 유입이 지속적으로 발생하고 지하수위 강하가 발생하며 터널 상부에서 발생하는 지하수 흐름량이 크게 감소하면서 부족한 지하수를 점차 수평방향에서



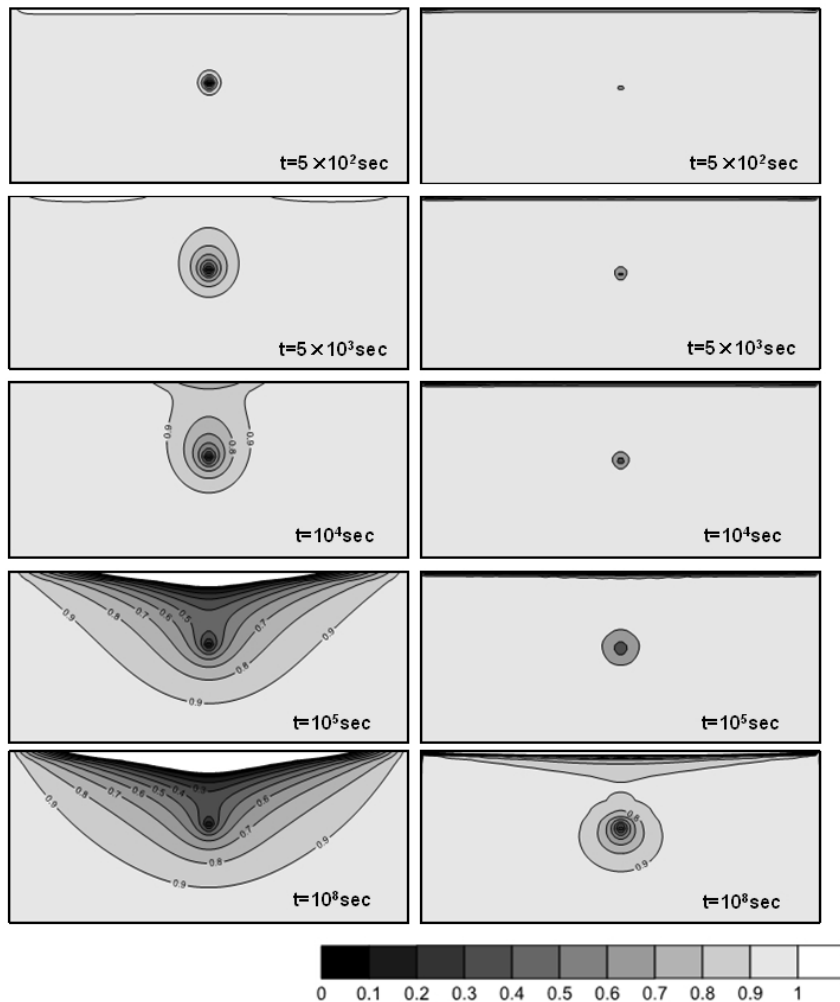
(a) Case II - ignoring permeability change with depth (b) Case III - assuming permeability reduction with depth

Fig. 10. Normalized pore water pressure distribution (tunnel depth = 30 m)

공급받게 되므로 간극수압 변화구간이 점차 횡방향으로 넓어지는 것으로 분석된다.

심도별 투수계수 감소를 고려한 Fig. 10(b)의 경우 시간에 따른 간극수압의 영향범위가 상대적 횡방향으로 빠르게 확장된다. 이는 상부의 투수계수가 커서 터널굴착 초기부터 주로 터널상부에서 터널 내 지하수 유입/손실로 인한 지하수 재충전이 주로 터널상부로부터 발생하여 지하수위 강하가 상대적으로 빠르게 발생하고 간극수압 변화가 심도별 투수계수 감소현상을 고려하지 않은 Case II에 비해 횡방향으로 보다 빠르게 확장되는 것으로 판단된다.

Fig. 11은 깊은 심도(120 m)에 굴착된 터널에 대하여 시간에 따른 간극수압 변화를 나타내고 있다. Fig. 11(a)와 Fig. 11(b)는 각각 심도별 투수계수 감소현상을 고려하지 않은 경우(Case II)와 심도별 투수계수 감소현상을 고려한 경우(Case III) 터널굴착 전 초기간극수압에 대한 간극수압 변화정도를 나타내고 있다. Fig. 11(a) Case II



(a) Case II - ignoring permeability change with depth (b) Case III - assuming permeability reduction with depth

Fig. 11. Normalized pore water pressure distribution (tunnel depth = 120 m)

의 지반의 투수계수가 Fig. 11(b) Case III의 터널 인접지반의 투수계수보다 30배 이상 큰 것을 주의해야 한다. Fig. 11(a)에서 나타난 바와 같이 Case II 터널주변 지반의 투수계수가 상대적으로 크고 깊이에 무관하게 일정하여 터널굴착으로 인한 간극수압 변화범위가 초기에서 반지름 방향으로 확대되다가 지하수위 강하와 함께 간극수압 변화구간이 횡방향으로 확대되는 것을 볼 수 있다.

반면 심도별 투수계수 감소를 고려한 Fig. 11(b)에서는 터널 인접지반의 투수계수가 상대적으로 작아 시간에 따른 간극수압 변화구간이 비교적 느리게 증가하며, 주로 터널주변에서만 발생하는 것으로 나타났다. 이는 심도가 깊을수록 터널주변 지반의 투수계수가 작아서 터널 내 지하수 유입이 작게 발생하여 반지름 방향의 흐름만으로도 터널 내 유입에 따른 지하수 유입/손실에 대한 재충전이 충분하기 때문으로 판단된다. 결과적으로 터널 주변의 간극수압의 영향범위가 지하수위선까지 확대되지 못하여 지하수위 강하가 거의 발생하지 않은 것으로 나타났다.

## 4. 결론

본 연구에서는 일반적인 터널 설계에 사용되는 유입량 산정방법이 고려하지 못하는 지하수위 강하와 깊이별 투수계수 감소 현상의 영향을 분석하였다. 터널 설계에서 일반적으로 사용하고 있는 Image Tunnel 방법과 지하수위 강하와 투수계수 감소영향을 고려한 수치해석을 통해 기존 방법이 유입량을 과다하게 산정할 우려가 있음을 확인하였고, 추가적으로 시간의 개념이 도입된 비정상류 해석을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 터널깊이가 얕을수록 지하수위 강하율이 크며 지하수위 강하를 고려하지 못하는 Image tunnel 방법은 터널 내 지하수 유입량을 과다하게 산정함을 알 수 있었다. 따라서 얕은 터널의 경우 터널 내 지하수 유입량 산정식의 수정이 필요하다.
2. 지반에 동일한 투수계수를 적용한 경우(Case II)와 심도별 투수계수 감소를 적용한 경우(Case III)의 결과에서 터널의 깊이가 얕을 경우 두 Case의 유입량 차이가 작게 발생하나 깊은 터널에서는 그 차이가 크게 발생함을 확인하였다. 따라서 깊은 터널의 경우 심도별 투수계수 감소의 영향을 고려한 지하수 유입량의 산정이 필요하다.
3. 비정상류 해석을 수행한 결과 시간에 따른 터널 내 지하수 유입율( $q_t/q_0$ )은 심도별 투수계수 감소를 적용할 경우(Case III) 터널심도에 따라 변화 양상이 다르게 나타났다. 터널심도가 얕을수록 초기에 터널 내부로 많은 양의 지하수 유입이 발생하고 깊은 터널에서는 일정 시간이 경과 후 서서히 감소함을 확인하였다.
4. 심도별 투수계수 변화를 적용할 경우(Case III) 시간에 따른 지하수위 강하와 간극수압 변화는 터널심도가 얕을수록 간극수압의 변화범위가 깊게 발생하고, 지하수위 강하와 간극수압 변화구간이 넓게 나타났다. 반면 깊은 터널의 경우 간극수압 변화구간이 주로 터널주변에서만 발생하였고 지하수위 강하가 거의 발생하지 않는 것을 확인 하였다.
5. 본 연구에서 적용한 투수계수는 깊이에 따른 감소만을 적용하였다. 하지만 절리암반의 경우 이 외에도 터널 내 지하수 유입에 의한 유효응력 증가가 발생하고 절리간극이 감소로 인해 투수계수가 감소할 수 있다. 따

라서 터널 내 지하수 유입량과 시간에 따른 지하수위 변화를 적절히 예측하기 위해서는 이와 같은 절리암반의 유효응력 변화에 의한 투수계수 변화를 추가적으로 적용하여 수리-역학적 연계해석 연구를 추가적으로 수행하여야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(15AWMP-B079625-02)에 의해 수행되었습니다.

## References

1. Carlsson, A., Olsson, T. (1977), "Storage in Excavated Rock Caverns. Rock store 77", Storage in Excavated Rock Cavers, Vol. 2, pp, 301-307.
2. Goodman, R.E., Moye, D.G., Van Schalkwyk, A., Javandel, I. (1965), "Groundwater inflows during tunnel driving", Eng. Geol., Vol. 2, No. 1, pp. 39-56.
3. Harr, M.E. (1962), Groundwater and Seepage, Chap. 10, pp. 249-264.
4. Jo, S.-A., Hong, E.-S., Cho, G.-C., Jin, K.-N., Lee, J.-M., Han, S.-I. (2016), "Effects of the ground water level on the stability of an underpass structure considering the degree of surface imperviousness, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 18, No. 1, pp. 95-107.
5. Moon, J.S., Fernandez, G. (2010), "Effect of Excavation-Induced Groundwater Level Drawdown on Tunnel Inflow in a Jointed Rock Mass", Engineering Geology 110(2010), pp. 33-42.
6. Moon, J.S. (2013), "Ground inflow rate estimation considering excavation-induced permeability reduction in the vicinity of a tunnel", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 15, No. 3, pp. 333-344.
7. Rim, H.G. (2009), "Predictive analysis of hydraulic change of ground water by tunnel construction using mathematical modeling-In the case of Gyeryong tunnel" University of Kwangwoon, Master Thesis. p. 174.
8. Shin, J.H. (2005), "Behaviour of Leaking Tunnels under Unconfined Flow Condition" Jour. of the KGS, Vol, 21, No. 7, pp. 43-54.
9. Snow, D.T. (1968), "Hydraulic characteristics of fractured metamorphic rocks of the front range and implications to the Rocky Mountain Arsenal Well", Col. Sch. Mines Quart., Vol. 63, pp. 167-99.
10. Yoo, C.-S. (2008), "3D coupled analysis on tunneling under groundwater", Tunnelling Technology, Vol. 5, No. 2, pp. 175-187.
11. You, K.-H., Lee, D.-H. (2008), "Coupled analysis for the stability estimation of a subsea tunnel in discontinuous rock masses using sensitivity analysis", Tunnelling Technology, Vol. 10, No. 4, pp. 421-430.
12. Zhang, L., Franklin, J.A. (1993), "Prediction of water flow into rock tunnels: an analytical solution assuming an hydraulic conductivity gradient, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract", Vol. 30, No.1, pp37-46.