

# 터널의 수리적 수렴 및 제어 거동특성

정재호<sup>1</sup> · 김승현<sup>2</sup> · 유현일<sup>3</sup> · 신종호<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>정회원, (주)지오엑스퍼트그룹 대표이사

<sup>2</sup>학생회원, 건국대학교 인프라시스템공학과 박사수료

<sup>3</sup>학생회원, 건국대학교 인프라시스템공학과 석사과정

<sup>4</sup>정회원, 건국대학교 사회환경공학부 정교수

## Hydraulic convergence and confinement behavior characteristics of tunnels

Jae-Ho Jeong<sup>1</sup> · Seung-Hyun Kim<sup>2</sup> · Hyun Il You<sup>3</sup> · Jong-Ho Shin<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>CEO, GEO EXPERT GROUP Co., Ltd.

<sup>2</sup>Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Konkuk University

<sup>3</sup>Master Student, Dept. of Civil Engineering, Konkuk University

<sup>4</sup>Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Konkuk University

\*Corresponding Author : Jong-Ho Shin, jhshin@konkuk.ac.kr

### Abstract

Excavation of tunnels below the groundwater table changes the hydraulic boundary conditions, causing flow towards the excavation face. Inflow into a tunnel is generally influenced by pre-excavation grouting, shotcrete lining, drainage system implementation, and the hydraulic deterioration of the drainage system. From the perspective of continuum theory, the groundwater inflow behavior due to excavation is very similar to the tunnel excavation behavior known as the convergence-confinement method. The groundwater inflow behavior due to tunnel excavation can be explained by the hydraulic convergence, while the behavior of shotcrete lining in limiting inflow can be inferred as hydraulic confinement. This study investigates the hydraulic convergence and confinement behavior using theoretical and numerical methods due to tunnelling. It is confirmed that the hydraulic convergence-confinement is exactly the same as the mechanical convergence-confinement concept. It is identified that the behavior is governed by the tunnel geometry, grout thickness and permeability, as well as the thickness and permeability of the support materials, such as shotcrete.

**Keywords:** Tunnel, Groundwater, Hydraulic convergence, Hydraulic confinement

### 초 록

지하수위 아래에서 이루어지는 터널 굴착은 수리경계조건을 변화시켜 굴착면을 향한 흐름을 유발한다. 터널 내 유입량은 굴착 전 시행된 그라우팅, 숏크리트 타설 및 방배수 시스템의 도입, 배수재의 수리적 열화 등에 영향을 받는다. 연속체이론 관점에서 굴착에 따른 지하수의 유입거동은 터널굴착 거동 이론인 내공변위-제어개념과 유사하다. 터

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and  
Underground Space Association  
26(5)489-506(2024)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2024.26.5.489>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received August 1, 2024

Revised August 26, 2024

Accepted September 3, 2024



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

Non-Commercial License (<https://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 © 2024, Korean Tunnelling and Underground Space Association

널굴착에 따른 지하수 유입거동은 수리적 수렴거동(hydraulic convergence) 개념으로 설명할 수 있고, 지보재인 숏크리트가 유입량을 억제하는 거동은 수리적 제어거동(hydraulic confinement)으로 유추할 수 있다. 본 연구에서는 이론과 수치해석을 이용하여 터널 굴착에 따른 수리적 convergence 및 confinement 거동특성을 조사하였다. 터널 굴착에 따른 수리적 유입량 제어거동은 역학적 내공변위 제어 개념과 일치하며, 터널의 기하학적 조건, 그라우트 두께와 투수성, 그리고 숏크리트와 같은 지보재의 두께와 투수성에 지배됨을 확인하였다.

**주요어:** 터널, 지하수, 수리적 수렴거동, 수리적 제어거동

## 1. 서론

터널은 지반 또는 암반연속체와 유체인 지하수의 영향을 받는 구조물로서, 영향 변수가 다양하여 이론보다는 주로 경험적 방법으로 다루어져왔다. 하지만, 대부분의 터널관련 경험법들이 공학이론에 토대한 역학적 이론이며, 터널의 대부분이 수중구조물로 건설됨에도, 터널의 수리거동 이론은 자유유입량 수준에 불과하며, 터널 굴착에 따른 수리적 거동을 다룬 연구는 충분히 확인되지 않는다.

터널 굴착에 따른 역학거동은 내공변위-제어이론(convergence-confinement theory, Panet and Sulem, 1995)으로 설명되어왔다. 내공변위-제어이론은 터널형성원리를 이론적으로 규명하고자한 터널공학 이론으로서 그 의의가 매우 크다. 관용터널공법의 단계별 굴착특성에 따르는 지반변형과 지보압력의 관계로서 실무에서도 내공변위 제어법으로 활용되고 있다. 하지만, 터널주변의 같은 연속체로서 굴착에 따른 지하수 거동, 특히 수리적 평형에 이르는 과정은 설명하지 못한다.

터널의 수리거동과 관련해서는 지반과 지보의 수리거동 특성을 상호 연계하여 수리적 굴착원리를 규명하려는 시도는 거의 확인되지 않는다. 이는 터널 건설시 발생하는 유입수를 완전히 배수하거나, 배수를 전혀 허용하지 않는 두 극단적 수리경계조건의 배수형식만을 터널 설계조건으로 하기 때문인 것으로 이해할 수 있다.

터널공법을 이용하여 도심 지하공간을 적극적으로 활용하려는 최근의 사회적 요구의 증가로 지하수 유입을 제한할 필요가 생기면서, 현장에서는 실무적으로 유입량을 제어하는 기법을 ‘부분 배수’ 혹은 ‘제한 배수형식’의 표현을 사용하기도 한다. 본 연구의 수리거동 특성은 기존의 이중구조 라이닝, 배수재 열화 및 그라우팅 등 터널 주변 수리경계조건에 따른 터널의 수리역학거동 등에 대한 연구결과들을 토대로 한다(Shin et al., 2002; 2005; 2007; Shin, 2010). Joo and Shin (2014)이 Fig. 1과 같이 터널의 굴착경계에서 발생 가능한 수리경계조건을 규명한 바 있다. 터널주변에서 발생하는 흐름은 대체로 층류로 가정할 수 있으며, 이 경우 굴착경계면에서 발생 가능한 수리경계조건은 수압과 유입량이 선형관계로 나타남을 보였다. Fig. 1의 좌표축과 만나는 두 점, 즉 배수조건과 비배수 조건을 제외하면 터널에서 발생하는 대부분의 실제 수리경계조건은 부분배수 또는 제한배수 조건이라 할 수 있다.

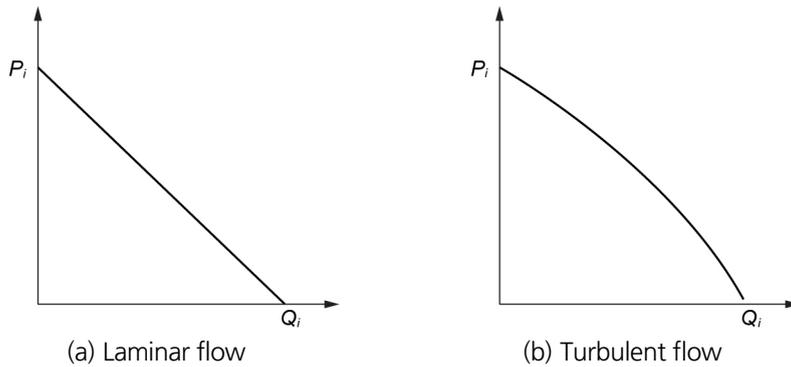


Fig. 1. Tunnel hydraulic boundary conditions (Joo and Shin, 2014)

본 연구에서는 터널 내 유입량이 제어되는 조건의 유입량-라이닝 작용수압 관계를 고찰하고 터널굴착에 따른 유입량 및 수압거동을 내공변위 제어이론의 수리적 개념으로 전개하여, 터널 굴착에 따른 수리적 평형거동의 이론적 기반을 마련하고자 한다.

## 2. 터널의 수리적 수렴(convergence)-제어(confinement)거동 이론

### 2.1 터널굴착에 따른 흐름거동의 가정

터널 굴착에 따른 내공변위에 대한 역학적 거동(변형) 해는 매질의 성상에 따라 다양한 형태로 제시되었다(Panet and Sulem, 1995; Shin, 2007). 한편, 역학적 내공변위에 상응하는 수리적 거동은 유입량으로서, 완전배수조건의 정상상태에 대한 자유유입량 식(free discharge)도 다양한 형태로 제시되었다(Goodman et al., 1965; Freeze and Cherry, 1979; Fernandez and Alvarez; 1994; El Tani, 1999; Lei, 1999). 장기평형조건의 대표적 터널 자유유입량 식인 Goodman et al. (1965) 공식은 Fig. 2(a)와 같이 반무한 흐름조건을 가정한다. 반면, 흐름의 구속조건에서 흔히 적용되는 Fernandez and Alvarez (1994) 식은 Fig. 2(b)와 같이 방사형 흐름을 가정하여 유도되었다.

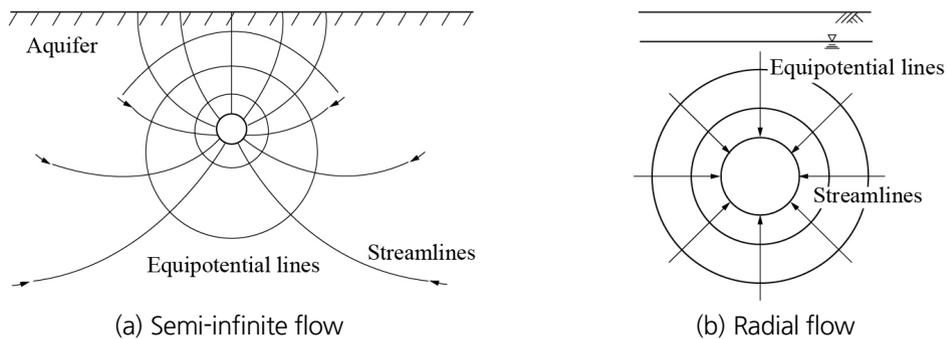


Fig. 2. Flow conditions for tunnelling

일반적으로 반무한 흐름조건은 균질지반, 정상류 구속흐름의 원형터널에서 ‘토피(C)/직경(D)’ 비가 작은 터널 굴착 조건의 자유유입량 산정에 부합하며, 방사형 흐름은 터널주변에 그라우팅 또는 지보재가 동심원 상으로 설치된 경우에 잘 부합하는 것으로 알려져 있다. 각 경우에 대한 장기평형조건의 자유유입량 식은 다음과 같다 (Goodman et al., 1965; Fernandez and Alvarez, 1994).

$$Q_o = 2\pi k_s \frac{H_w}{\ln\left(\frac{2S}{r_o}\right)} \tag{1}$$

$$Q_o = 2\pi k_s \frac{H_w}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \tag{2}$$

여기서,  $Q_o$ 는 단위 터널 길이당 자유유입량,  $k_s$ 는 지반투수계수,  $H_w$ 는 터널 중심에서 지하수위,  $r_o$ 는 터널굴착 반경(외경),  $r_i$ 는 터널지보 내경,  $S$ 는 지하수의 지반 내 침투거리이다.

지하수위가 높고 투수성이 큰 지반의 경우 흔히 그라우팅 작업이 수반된다. 그라우팅 작업이 이루어진 원형터널의 내부를 향하는 흐름은 지반-그라우트 경계와 그라우트-라이닝 경계에서 흐름저항이 발생하는 다층흐름조건을 형성하며, 그라우트존 내부면에서 방사형 흐름을 가정할 수 있다. 흐름의 연속성 법칙에 따라 각 매질의 경계에서의 유량은 동일하다고 가정할 수 있다.

그라우트-라이닝 경계를 통과한 후, 굴착 지보재를 지나 터널 중심을 향하는 흐름을 분석하기 위하여 Fig. 3과 같은 흐름조건을 설정하였다. 여기서 라이닝은 관용터널의 경우 굴착지보인 슛크리트가 이에 해당한다.

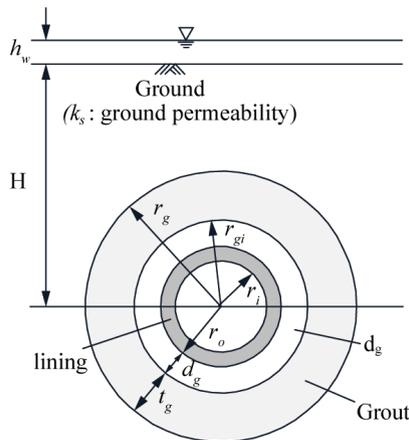


Fig. 3. Multilayer flow boundary conditions

여기서,  $r_o$ 는 터널 굴착 반경,  $r_g$ 는 지반-그라우트 경계면까지의 반경,  $r_{gi}$ 는  $d_g$ -그라우트 경계면까지의 반경, 굴착경계면-그라우트간 이격거리  $d_g$ 이며,  $H$ 는 터널심도,  $H_w$ 는 수심이다.

$h_g, h_{gi}, h_l$ 은 각각 지반-그라우트 경계면, 그라우트 내부 경계면 및 굴착 경계면의 압력수두이며, 터널주변의 흐름조건은 층류상태의 정상류 구속흐름으로 가정하여, 지반과 지보 각각의 수리거동 특성을 재료간 흐름경계면에서 조사할 수 있다.

## 2.2 수리적 수렴(hydraulic convergence)거동

본 연구에서는 터널 굴착에 따라 굴착경계로 유입되는 유입량을 역학적 변형제어(mechanical convergence-confinement) 이론의 내공변위(convergence)에서 유추하여 수리적 수렴(hydraulic convergence)거동으로 정의하였다.

수리적 수렴거동을 이론적으로 유도하기 위해 Fig. 4와 같이 균질한 등방성 투수성 매질 내 원형터널에 대하여 정상류 구속흐름 조건을 가정하였다. 그라우트 존은 통상 굴착 전에 형성되므로 지반매질로 고려하였고, 내측경계가 굴착면으로부터  $d_g$  만큼 이격된 것으로 가정하였다.

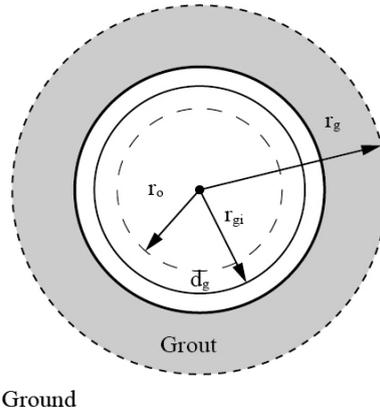


Fig. 4. Excavation boundary flow conditions

굴착경계면에서 자유유입량  $Q_o$ 는 반무한 경계조건 흐름을 가정할 수 있으므로 Goodman et al. (1965) 식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_o = 2\pi k_s \frac{H_w - h_g}{\ln\left(\frac{2S}{r_o}\right)} \quad (3)$$

한편, 그라우트 영역을 통과하여 굴착경계면으로 유입되는 유입량  $Q_g$ 는 반경방향 흐름을 가정할 수 있으므로 Fernandez and Alvarez (1994) 식 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_g = 2\pi k_g \frac{h_g - h_{gi}}{\ln\left(\frac{r_g}{r_{gi}}\right)} = 2\pi k_s \frac{H_w - h_g}{\ln\left(\frac{2H}{r_g}\right)} \quad (4)$$

굴착면과 그라우트 영역간 이격거리  $d_g$ 를 통과하여 굴착 경계면으로 유입되는 유입량( $Q_{cv}$ )은 식 (3)과 식 (4)가 동일하므로, 흐름의 연속성 법칙을 이용하면, 그라우트된 지반을 통과하여 굴착경계면으로 유입되는 유입량은 다음과 같이 구해진다.

$$Q_{cv} = \frac{2\pi h_l}{\left\{ \frac{1}{k_s} \ln\left(\frac{2H}{r_g}\right) + \frac{1}{k_g} \ln\left(\frac{r_g}{r_{gi}}\right) + \frac{1}{k_s} \ln\left(\frac{r_{gi}}{r_o}\right) \right\}} \quad (5)$$

식 (5)는 지반의 수리적 수렴치 즉 지보설치 없이 자유 유입되는 유입량이라 할 수 있으며, 내공변위-제어 이론의 경우 무지보 조건의 내공변위에 상응한다. 식 (5)로부터 터널 굴착에 따른 지하수의 수렴거동(hydraulic convergence)은 지반-그라우트 상대투수성, 그라우트 두께, 터널 심도 및 직경의 함수로 나타남을 알 수 있다.

### 2.3 수리적 제어(hydraulic confinement)거동

굴착 후 지보설치로 인해 터널로 유입되는 흐름은 제약되며, 이를 수리적 제어거동(hydraulic confinement)이라 할 수 있다. 수리적 제어 거동의 이론적 고찰을 위해 지보영역의 흐름 경계를 Fig. 5와 같이 가정하였다.

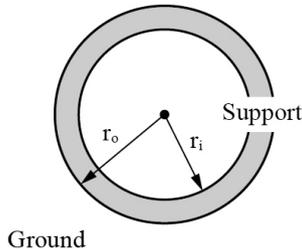


Fig. 5. Support boundary flow conditions

라이닝을 통과하여 터널 내로 유입되는 지하수량  $Q_{li}$ 은 반경방향 흐름을 가정할 수 있으므로 Fernandez and

Alvarez (1994) 식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{li} = 2\pi k_l \frac{h_l}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (6)$$

라이닝 외부, 즉 굴착경계면 유입량은 반무한 흐름을 가정할 수 있으므로, 반경  $r_o$  인 터널에 대하여 Goodman et al. (1965) 식을 적용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_o = 2\pi k_s \frac{H_w}{\ln\left(\frac{2H}{r_o}\right)} \quad (7)$$

연속성 법칙에 따라 식 (6)과 식 (7)은 동일하므로, 두 식을 조합하면 지보재의 도입으로 인해 제약된 유입량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{cf} = \frac{2\pi h_l}{\left\{ \frac{1}{k_s} \ln\left(\frac{2H}{r_l}\right) + \frac{1}{k_l} \ln\left(\frac{r_g}{r_{li}}\right) + \frac{1}{k_s} \ln\left(\frac{r_{li}}{r_o}\right) \right\}} \quad (8)$$

식 (8)은 라이닝 설치로 제어된 유입량으로서 이를 수리적으로 제어된 유입량이라 할 수 있다. 식 (8)로부터 수리적 제어거동의 영향요인은 라이닝-그라우트 상대투수성, 라이닝 두께, 터널 심도 및 직경임을 알 수 있다.

### 3. 터널 수리거동의 영향특성에 대한 이론적 고찰

#### 3.1 터널굴착에 따른 흐름거동의 가정

앞에서 살펴본 이론식으로부터 층류상태의 정상류 구속흐름 조건에서 터널 굴착에 따른 흐름거동영향을 미치는 파라미터는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 터널, 지반 기하학적 파라미터:  $H, H_w, r_o, d_g$
- 지반 및 그라우트 수리 파라미터:  $k_s, k_g, t_g, r_g$
- 굴착 지보재 수리 파라미터:  $k_l, t_l, r_i$

위의 각 영향요인이 터널 수렴거동에 미치는 특성, 즉 유입량 변화특성을 이론식 (5)와 식 (8)을 이용하여 분석하였다. 분석을 위한 터널모델은 Fig. 6 및 Table 1과 같이 설정하였다.

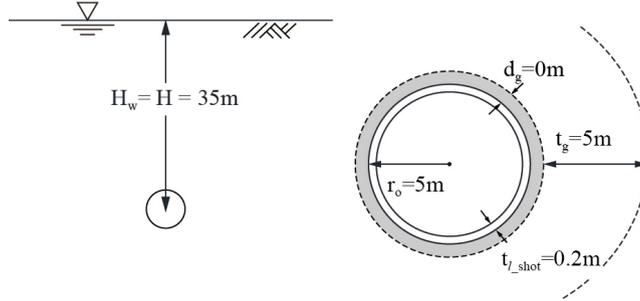


Fig. 6. Representative section of parametric analysis

Table 1. Tunnel and hydraulic conditions

Tunnel depth ( $H = H_w$ )	Tunnel radius ( $r_o$ )	Ground permeability ( $k_s$ )	Lining permeability ( $k_l$ )	Grout permeability ( $k_g$ )	Grout thickness ( $t_g$ )
35 m	5 m	1E-06 m/s	1E-08 m/s	1E-07 m/s	5 m

### 3.2 터널의 수리적 수렴거동(convergence) 특성

터널의 수리적 수렴(자유 유입량)거동 분석을 위해 터널 심도, 그라우트 두께, 지반-그라우트 상대투수성을 Table 2와 같이 설정하였다. 심도 변화, 그라우트 두께 변화와 지반에 대한 그라우트 상대투수성으로 구분하여 조사하였다. 수렴거동은 자유유입조건이므로 굴착경계면에서 수압은 '0'이다. 따라서 수렴거동은 유입량 조건으로만 나타난다.

Table 2. Analysis cases and conditions of hydraulic convergence

	$H$ (m)	$t_g$	$k_g/k_s$	$r_o$
Case A	5, 10, 50, 100, 150, 200	5	0.1	5
Case B	35	3, 5, 7, 9	0.1	5
Case C	25, 35, 50, 100	3, 5, 7, 9	$1 \sim 1 \times 10^{-6}$	5

#### 3.2.1 터널 심도 영향(Case A)

터널 심도에 따른 유입량 변화특성을 Fig. 7에 보였다. 유입량은 심도가 깊어질수록 증가하나, 심도가 변경의 20배 이상이면( $H/r_o > 20$ ),  $Q/Q_o = 0.4$  수준으로 수렴하는 것으로 나타났다.

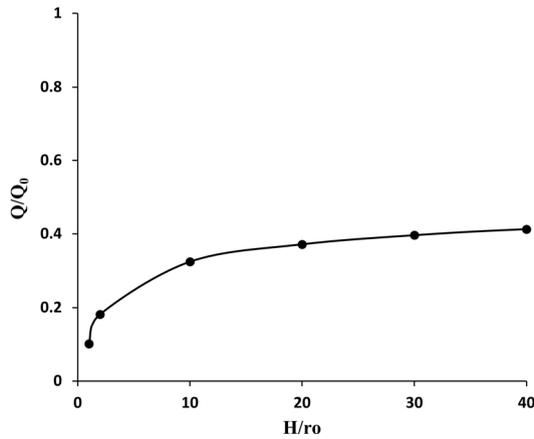


Fig. 7. Effect of tunnel depth on water inflow

### 3.2.2 그라우트 두께 영향(Case B)

그라우트 두께에 따른 유입량 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 그라우트 두께가 증가함에 따라 유입량은 지수적으로 감소하는 경향을 보이는데, 이는 그라우트의 두께가 터널 수리적 수렴거동에 중요한 영향변수임을 의미한다.

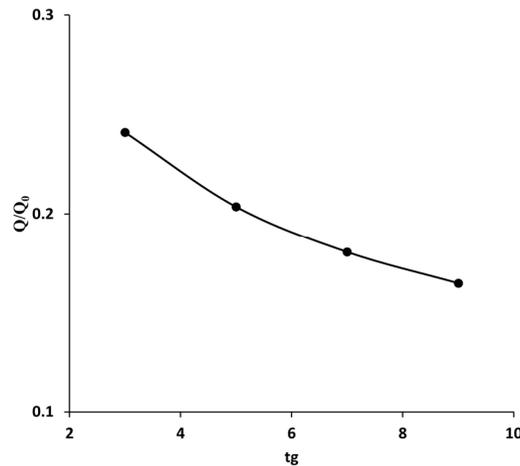


Fig. 8. Effect of grout thickness on water inflow

### 3.2.3 지반에 대한 그라우트의 상대투수성( $k_g/k_s$ ) 영향(Case C)

지반에 대한 그라우트의 상대투수성이 수리적 거동에 미치는 영향을 Fig. 9에 도시하였다. 상대투수성이 감소함에 따라 유입량이 지수적으로 급격히 감소하는 특성을 보였다. 낮은 상대투수성에서 터널심도가 증가할수록 유입량이 증가함 보였고,  $k_g/k_s < 0.001$  구간에서는 유입량 거의 발생하지 않는 거동을 나타냈다.

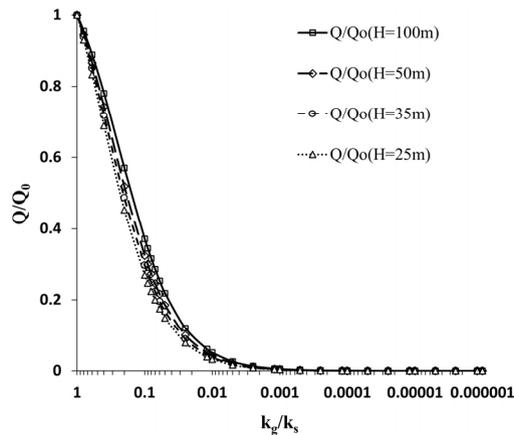


Fig. 9. Effect of  $k_g/k_s$  ( $t_g = 5$  m) on water inflow

### 3.3 터널의 수리적 제어거동(confinement) 특성

굴착 지보의 도입은 유입량을 감소시키고, 이에 상응하는 수준의 수압을 야기한다. 터널의 수리적 제어거동 특성 분석을 위해 굴착지보(숏크리트 라이닝) 두께와 라이닝-그라우트 상대투수성의 영향을 조사하였고, Table 3에 분석조건을 나타내었다.  $t_g = 5$  m,  $k_g/k_s = 0.1$ 로 가정하였으며, 여기서 지보는 방수막 외곽의 굴착 지보재로서 관용터널의 경우 숏크리트에 해당한다.

Table 3. Analysis conditions of hydraulic confinement

	$H$ (m)	$t_l$ (m)	$k_l/k_s$	$r_o$ (m)
Case 1	35	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9	0.01	5
Case 2	35	0.1, 0.2, 0.3	$1 \sim 1 \times 10^{-7}$	5

지보가 도입되면 흐름저항이 발생하여 유입량은 줄어들고 이에 상응하여 굴착지보 외곽면에 수압이 발생한다. 따라서 수리적 제어거동의 결과는 유입량 감소와 수압 증가로 나타난다.

#### 3.3.1 굴착지보 두께의 영향(Case 1)

지보(예, 숏크리트 라이닝) 두께의 영향 분석결과를 Fig. 10에 나타내었다. 라이닝 두께 증가에 따라 유입량 변화의 정도는 크지 않으나, 지수적으로 반비례 감소하는 경향을 보였다. 반면, 수압은 지보 두께가 증가할수록 지수적으로 증가하는 결과를 보였다.

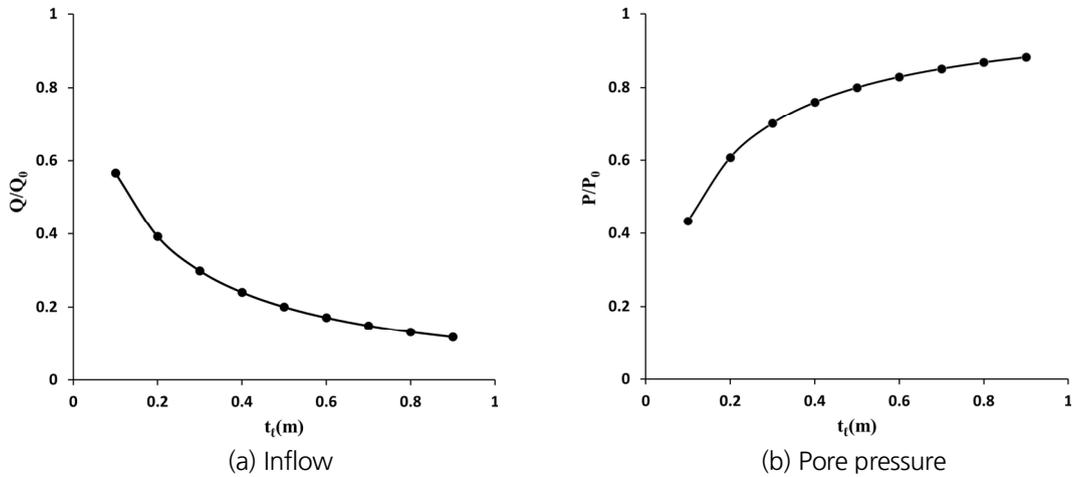


Fig. 10. Effect of support thickness ( $k_l/k_s = 0.01$ ) on water inflow

### 3.3.2 지반에 대한 라이닝의 상대투수성( $k_l/k_s$ ) 영향(Case 2)

지보를 도입하는 경우 지보와 지반의 상대투수성이 유입량과 수압에 미치는 영향을 Fig. 11에 나타내었다.  $0.1 < k_l/k_s < 0.001$  구간에서 유입량이 현저하게 감소함을 보였으며,  $k_l/k_s < 0.001$  구간에서는 비배수에 가까운 거동을 보였다. 수압은 상대투수성 감소에 따라 급격히 증가하였다.  $k_l/k_s$ 가 0.001 이하가 되면 유입이 거의 일어나지 않고, 수압이 정수압에 접근하는 비배수 거동을 나타내었다.

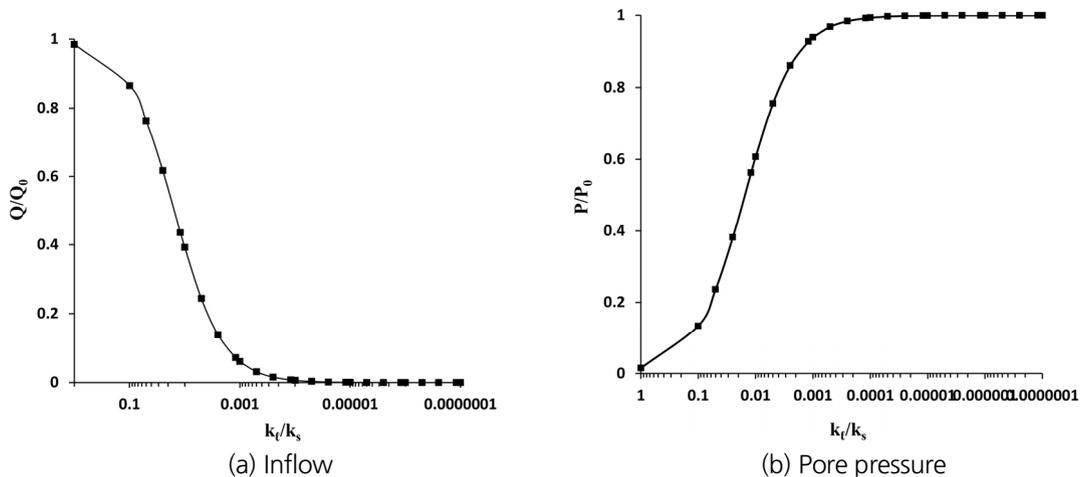


Fig. 11. Effect of  $k_l/k_s$  ( $t_l = 0.2$  m) on water inflow

위 해석결과들로부터 수리적 제어거동에 영향을 미치는 중요인자는 지보-지반의 상대투수성, 굴착지보의 두께인 것으로 나타났다. 터널 굴착에서 라이닝은 지보재로서 터널의 내공변위를 제어하는 역학적인 관점에서만 알려져 있었으나, 수리적 제어거동 분석을 통해 굴착지보가 내공변위 제어는 물론, 수압과 유입량을 제어할 수 있는 중요한 요소임을 알 수 있다.

## 4. 터널 수리거동의 영향특성에 대한 수치해석적 고찰

이론해는 반경흐름의 가정을 토대로 유도된 단순해이며, 실제 터널조건은 이론적 가정과 차이가 있다. 실제 터널조건을 수치해석적으로 모사하여 터널 굴착에 따른 수리적 수렴(convergence) 및 제어(confinement)거동을 검증하고, 이론해석 결과와 비교분석 하였다.

### 4.1 수치해석 모델

수치해석 모델은 Fig. 12와 같이 이론 해석모델과 동일하게 심도(H) 25~100 m, 반경( $r_o$ ) 5 m의 원형터널, 그라우트 두께  $t_g = 3\sim 7$  m, 라이닝 두께  $t_l = 0.05\sim 0.2$  m로 설정하였다. 정상류 구속흐름을 설정하고, 라이닝-지반 경계 주변부를 조밀하게 요소를 분할하여 모델링하였다. 중앙대칭 경계면의 특징을 고려하여 반단면 모델을 설정하고, 좌측 경계면을 정수압 조건으로 가정하였다. 또한 우측과 바닥의 외곽경계면은 원지반의 수두를 유지하는 수리경계조건을 도입하였다. 터널굴착에 따른 수리적 convergence 및 confinement 거동에 대한 수치해석은 유한차분법에 기반한 수치해석 프로그램인 FLAC 2D를 이용하였다.

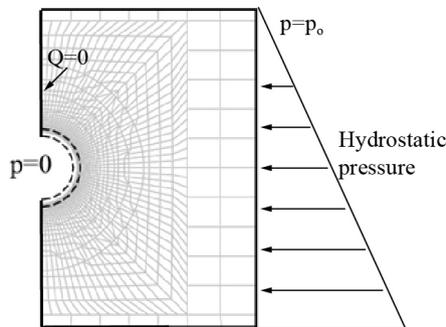


Fig. 12. Numerical analysis model

지반 투수계수는  $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-8}$  m/s, 그라우트는  $1 \times 10^{-7}$  m/s로 가정하였다. 전주면 슛크리트 지보를 가정하였고, 슛크리트 투수계수를  $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-9}$  m/s 범위로 가정하였다.

## 4.2 수리적 수렴거동 해석결과

### 4.2.1 터널 심도 영향

터널직경은 고정하고, 심도를 변화해 영향을 조사하였다. 터널 심도에 따른 유입거동에 대한 해석결과를 Fig. 13에 나타내었다. 터널심도가 증가할수록 터널 내 유입량이 증가하였으며, 상대투수성이 감소할수록 심도의 영향이 감소하였다.

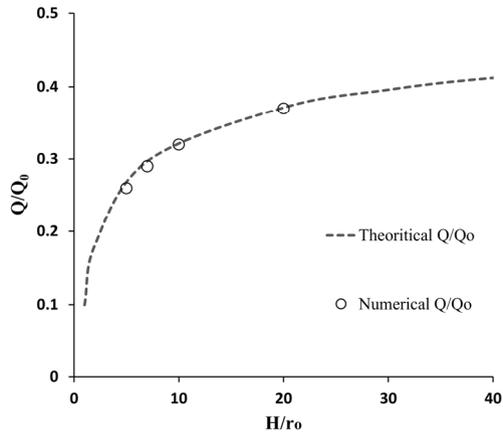


Fig. 13. Effect of tunnel depth ( $k_g/k_s = 0.1$ ,  $t_g = 5$  m) on water inflow

### 4.2.2 그라우트 두께 영향

그라우트 두께가 유입량 제어에 기여하는 특성을 Fig. 14에 나타내었다. 그라우트 두께가 증가함에 따라 유입량은 감소하였으며, 이론해와 거의 일치하였다.

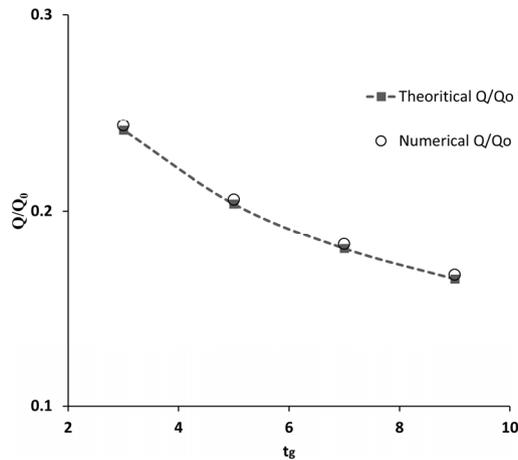


Fig. 14. Effect of grout thickness ( $k_g/k_s = 0.1$ ) on water inflow

### 4.2.3 그라우트-지반 상대투수성 영향

Fig. 15에 상대투수성 영향에 대한 해석결과를 나타내었다. 상대투수성이 감소할수록 유입량이 지수적으로 감소하였으며, 이론분석 결과와 거의 일치하는 경향을 나타내었다.

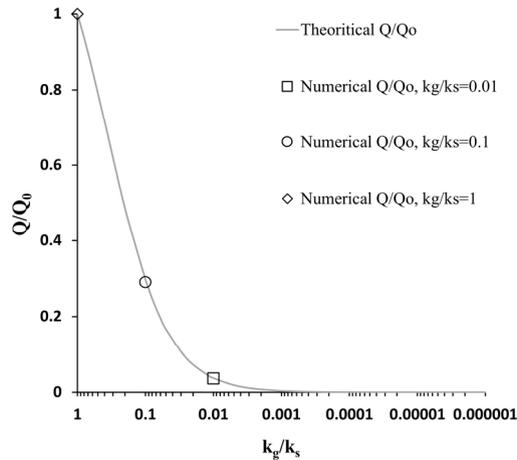


Fig. 15. Effect of  $k_g/k_s$  ( $t_g = 5$  m) on water inflow

### 4.3 수리적 제어거동 해석결과

Fig. 16에 굴착지보 두께에 따른 굴착면에서의 유입량과 수압 변화를 나타내었다. 굴착지보 두께가 증가할수록 유입량이 감소하는 경향을 나타냈으며, 반면, 수압은 굴착지보 두께가 증가할수록 증가함을 보였다. 결과적으로 슛크리트 두께가 증가함에 따라 유입량은 감소하며, 그에 상응하여 굴착지보에 작용하는 수압은 증가하여 지보재의 지지부담이 늘어남을 알 수 있다.

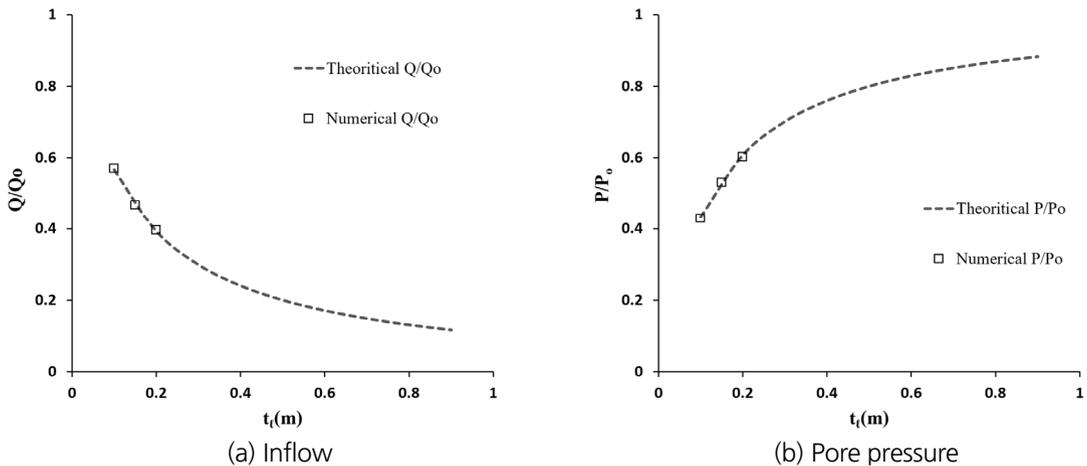


Fig. 16. Effect of excavation support thickness ( $k_l/k_s = 0.01$ ) on water inflow

Fig. 17에 상대투수성에 따른 유입량과 수압 결과를 나타내었다. 상대투수성이 감소할수록 유입량은 감소하고, 수압은 증가하는 거동을 보였다. 수치해석적 분석결과가 이론해와 거의 일치하는 결과를 보였다.

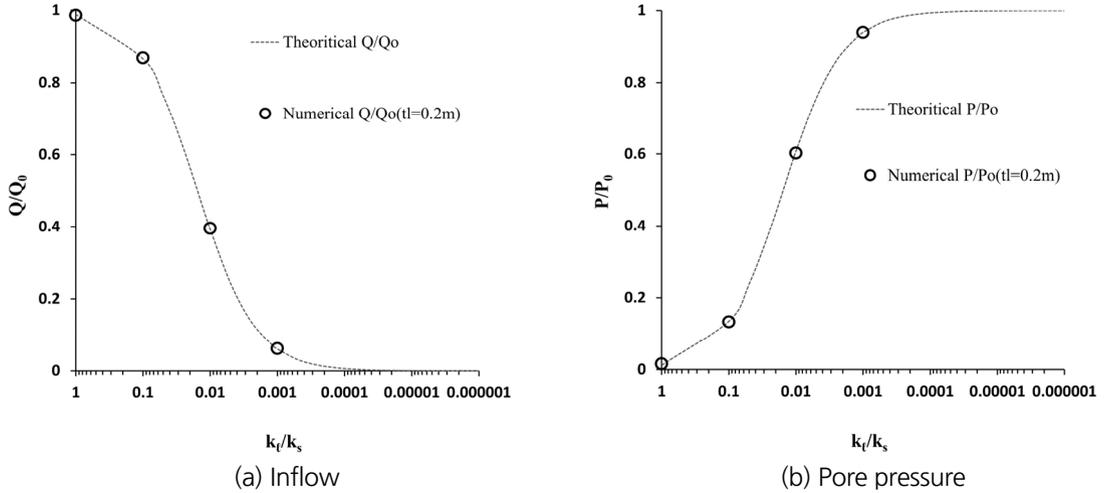


Fig. 17. Effect of  $k_l/k_s$  ( $t_l = 0.2$  m) on water inflow

#### 4.4 이론해와 결과비교

이론해와 수치해석 결과의 일치성을 확인하고, 이론해의 적용성을 판단하기 위하여 해석결과에 따른 편차( $\Delta$ )를 다음과 같이 정의하였다.

$$\Delta = (Q_N - Q_T) / Q_T \tag{9}$$

여기서,  $Q_N$ 은 수치해석결과,  $Q_T$ 는 이론해석결과이다.

터널심도 변화에 따른 각 영향변수별 편차특성을 Fig. 18에 정리하였다. 수리적 수렴거동에서 이론해석과 수치해석 결과의 유입량 편차는 2% 미만으로 나타났으며, 심도가 증가할수록, 상대투수성비가 증가할수록 편차가 감소하는 경향을 보였다. 반면, 그라우트 두께가 증가할수록 편차는 증가하였다.

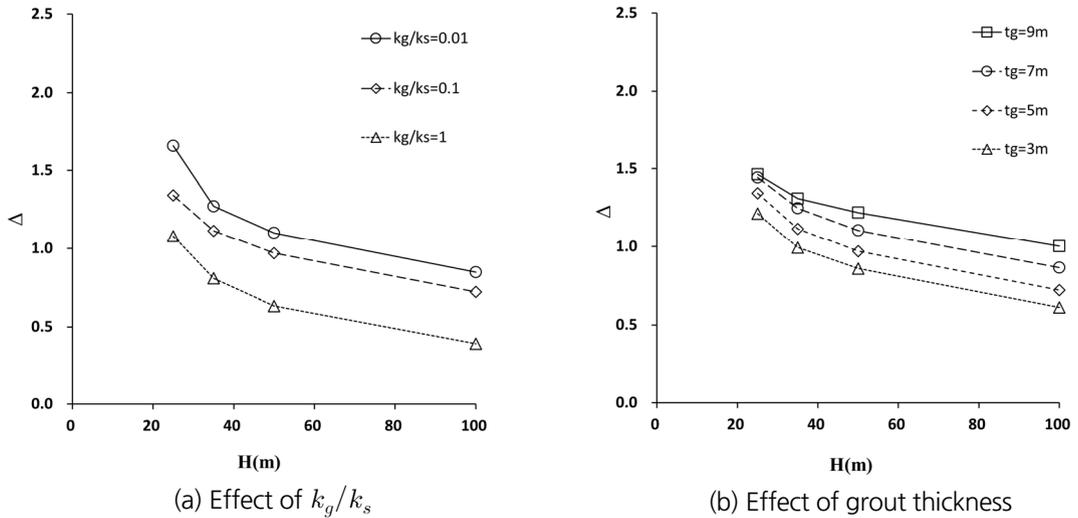


Fig. 18. Deviation of hydraulic confinement inflow

수리적 제어거동에서는 Fig. 19와 같이 상대투수성 편차가 약 1.5% 미만으로 나타났으며, 수렴거동과 유사한 경향을 보였다. 편차는 심도와 상대투수성비가 증가할수록 감소하였고, 라이닝 두께는 증가할수록 편차가 증가하는 경향이 나타났다.

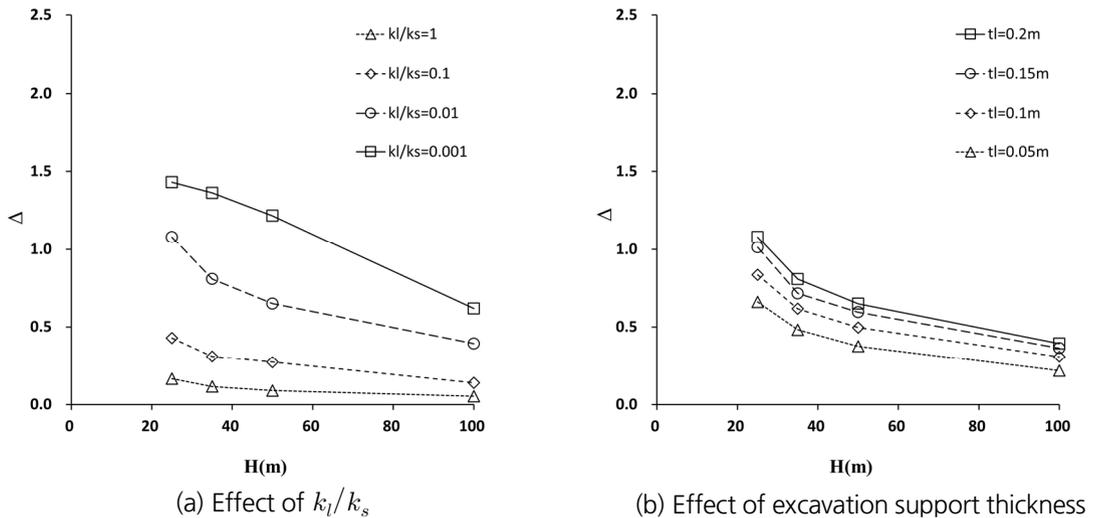


Fig. 19. Deviation of hydraulic convergence inflow

수리적 수렴거동은 심도가 얕아지거나 그라우트 상대투수성이 감소할수록, 그라우트 두께가 증가할수록 이론 해와 수치해석의 편차가 증가하는 현상을 보였고, 수리적 제어거동은 심도와 지보 상대투수성비가 감소할수록

그리고 지보재 두께가 증가할수록 이론해와 수치해의 편차가 증가함을 보였다. 이론해는 등방 균질 지반 내 원형 터널을 가정하므로, 실질적 터널 및 지반조건을 고려할 경우 편차가 증가할 가능성이 높고, 따라서 이론해의 적용성은 터널심도가 깊거나 그라우트 혹은 지보재의 두께가 터널 규모를 초과하지 않되, 상대투수성이 뚜렷한 경우 좋은 결과를 줌을 알 수 있다.

## 5. 결론

터널굴착에 따른 수리적 거동을 터널의 내공변위-제어 이론을 토대로 자유유입과 이의제어 거동개념으로 고찰하였다. 이론해석 및 수치해석법을 이용하여 유입량 거동을 조사하여, 역학적 내공변위 제어거동 특성을 수리적 유입량 제어 거동특성으로 해석이 가능함을 확인하였다. 터널 굴착에 따른 수리적 거동 특성에 대한 주요 결론은 다음과 같다.

1. 터널의 수리적 수렴(자유 유입)거동은 터널의 기하학적 조건(심도, 직경), 그라우트존의 두께와 지반과의 상대투수성에 지배되며, 수리적 제어거동은 굴착지보의 두께, 지반과의 상대투수성에 지배된다.
2. 자유유입조건인 경우, 굴착경계에서 '수압 = 0' 터널의 수리적 수렴거동은 유입량으로만 정의되며, 터널심도, 그라우트 두께 그리고 지반에 대한 그라우트의 상대투수성이 감소할수록 유입량이 지수적으로 감소하는 특성을 나타냈다.
3. 굴착지보의 도입으로 나타나는 터널의 수리적 제어거동은 유입량 감소와 수압증가로 나타났다. 굴착지보 두께와 지반에 대한 지보의 상대투수성 증가에 따라 유입량은 지수적으로 감소하는 특성을 보였으며, 이에 상응하여 수압은 증가하였다.
4. 이론해석 결과와 수치해석결과는 대체로 잘 일치하였다. 특히 터널심도가 증가할수록 두 해석결과의 차이는 감소하였다. 수리적 수렴거동은 그라우트와 지반의 상대투수성이 증가할수록, 그라우트 두께가 증가할수록 결과의 차이가 감소하였고, 수리적 제어거동은 지보-지반 상대투수성이 증가할수록 그리고 굴착지보 두께가 감소할수록 편차가 감소하여, 이론해의 적용성에 대한 판단이 가능한 것으로 분석되었다.

본 연구에서 제안한 식을 통해 지반 및 지보재 적용에 따른 유입량과 수압의 평가가 가능함을 확인하였다. 본 연구의 수리적 수렴 및 제어거동 특성은 터널의 굴착에 따른 수리적 평형 도달 메커니즘을 규명하는데 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 다만 역학적 평형이론의 적용범위(등방응력조건)와 마찬가지로 반경 흐름거동 가정이 가능한 깊은 터널에 타당성이 높은 것으로 분석된다.

## 감사의 글

이 논문은 건국대학교 지원에 의하여 작성되었음.

## 저자 기여도

정재호는 연구 개념과 이론 해석을 하였고, 김승현은 원고 작성 및 수치해석 데이터 해석을 하였고, 유현일은 데이터 해석 및 분석을 하였고, 신종호는 원고의 기획 및 검토를 담당하였다.

## References

1. El Tani, M. (1999), "Water inflow into tunnels", Proceedings of the World Tunnel Congress ITA-AITES, Norway, Oslo, pp. 61-70.
2. Fernandez, G., Alvarez, T.A. (1994), "Seepage-induced effective stresses and water pressures around pressure tunnels", Journal of Geotechnical Engineering, No. 120, Vol. 1, pp. 108-128.
3. Freeze, R.A., Cherry, J.A. (1979), Groundwater, Prentice-Hall Inc., Englewood, NJ, pp. 490-491.
4. Goodman, R.E., Moya, D.G., Van Schalkwyk, A., Javandel, I. (1965), "Ground water inflows during tunnel driving", Bulletin of the International Association of Engineering Geologists 2, No. 1, pp. 39-56.
5. Joo, E.J., Shin, J.H. (2014), "Relationship between water pressure and inflow rate in underwater tunnels and buried pipes", Geotechnique, Vol. 64, No. 3, pp. 226-231.
6. Lei, S. (1999), "An analytical solution for steady flow into a Tunnel", Groundwater, Vol. 37, No. 1, pp. 23-26.
7. Panet, M., Sulem, J. (1995), Le Calcul des Tunnels par la Méthode Convergence-Confinement, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, pp. 61-158.
8. Shin, J.H. (2010), "Analytical and combined numerical methods evaluating pore water pressure on tunnels", Geotechnique, Vol. 60, No. 2, pp. 141-145.
9. Shin, J.H., Addenbrooke, T.I., Potts, D.M. (2002), "A numerical study of the effect of groundwater movement on long-term tunnel behaviour", Geotechnique, Vol. 52, No. 6, pp. 391-403.
10. Shin, J.H., Potts, D.M., Zdravkovic, L. (2005), "The effect of pore-water pressure on NATM tunnel linings in decomposed granite soil", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 42, No. 6, pp. 1585-1599.
11. Shin, J.H., Shin, Y.S., Kim, S.H., Shin, H.S. (2007), "Evaluation of residual pore water pressure on linings for undersea tunnels", Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, Vol. 26, No. 2, pp. 3682-3688.
12. Shin, Y.J. (2007), Elasto-plastic ground response of underwater tunnels considering seepage forces, Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, Korea University, pp. 33-82.