

# 천층터널 주변의 흐름거동 및 수치 해석적 모델링기법 연구

신종호<sup>1\*</sup>, 최민구<sup>2</sup>, 강소라<sup>3</sup>, 남택수<sup>3</sup>

## A study on the flow behavior around shallow tunnels and its numerical modelling

Jong-Ho Shin, Min-Gu Choi, So-Ra Kang, Taek-Soo Nam

**Abstract** Design and construction of tunnels require understanding the influence of groundwater. Particularly, it is essential to know how the drainage conditions at the tunnel boundary affect flow behavior of ground adjacent to the tunnels. In this study flow behavior of a leaking tunnel was investigated using physical model tests for tunnel depths and various hydraulic boundary conditions. Particular concerns were given to flow lines toward tunnels. Test results showed that the boundary conditions hardly influence on flow patterns and time required to reach steady state conditions. It is revealed that with an increase in water depth, flow lines concentrated to the drain holes. The physical tests were numerically simulated. Numerical results showed that the flow behavior was represented appropriately by considering filter-drain hole drainage rather than boundary drainage all over the lining.

**Keywords:** Leaking tunnel, hydraulic boundary conditions, physical model test, numerical simulation

**요 지** 터널 설계 및 시공시 지하수 영향에 대한 정확한 이해가 필요하며, 이를 위해 터널 주변의 흐름거동을 파악하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 지하수 아래 건설된 배수형 천층터널에 대한 모형실험을 실시하여 주변 지하수 흐름조건과 지반의 토피고에 따른 터널 주변의 지하수 흐름거동을 조사하였다. 실험결과 정상류/부정류의 지하수 흐름조건은 터널내 유입량이나 도달시간에는 영향을 미칠 수 있으나, 터널 주변 흐름거동에는 큰 영향을 미치지 못함을 확인할 수 있었다. 또, 토피고가 증가할수록 배수공이 위치한 터널 하부로의 유선 집중현상이 뚜렷하게 관찰되었다. 모형실험에 대한 수치해석 결과, 배수형 천층터널 주변의 흐름거동을 수치해석으로도 재현 가능함을 확인하였다. 배수형 천층터널의 경우 수리경계조건이 터널주면 유출이 아닌 배수공 유출로 모사하는 것이 보다 타당함을 보였다.

**주요어:** 배수형 천층터널, 수리경계조건, 모형실험, 수치 해석적 모델링

## 1. 서 론

터널 설계 및 시공시 지하수 영향에 대한 정확한 예측과 대책이 요구된다. 터널 주변의 지하수 흐름은 지반의 상태 및 종류, 주변여건, 터널 배수형식 등 다양한 요소에 영향을 받는다. 특히 터널 배수형식이 지하수 흐름에 미치는 영향을 인지하는 것은 터널의 장기거동과 관련하여 매우 중요하다.

터널 배수형식은 지하수 처리에 관한 기본 개념에 따라 배수형과 비배수형으로 구분할 수 있다. 국내터널의 경우 1980년대 초에 지하철 3, 4호선 터널 건설시 배수터널(NATM)로 설계되기 시작되어 하천하부, 취약 지질지반 등의 경우를 제외하고는 대부분 시공비가 적게

드는 배수형 터널로 건설되었다. 따라서 현재 운영 중인 지하철 터널의 경우 대부분이 경과 년 수 25년 이하의 배수형 터널이다. 이미 운영 중인 배수형 터널은 배수시스템의 기능저하에 따라 붕락 및 박락사고를 야기하며 우수시 지하수위 상승으로 이상 수압이 발생하기도 하는 등 설계 및 시공단계에서 크게 고려하지 않았던 문제들이 많이 발생하고 있는 실정이다. 따라서 배수시스템의 기능저하 및 간극수압 상승과 같은 지하수 관련 문제에 대처하기 위하여 배수형 터널 주변의 흐름거동에 관한 메카니즘의 이해와 이를 정확히 모델링할 수 있는 기법의 연구가 요구되고 있다.

터널 주변의 지하수 흐름은 터널 직경, 지하수위, 토피고 등에 영향을 받는다. 지하수 흐름은 방사형 흐름과 비방사형 흐름으로 구분할 수 있으며, 방사형 흐름은 침투방향과 유선이 동일하지만 비방사형 흐름은 지름방향과 접선방향의 유속성분을 갖는다. 하지만 터널 주변 지

<sup>1</sup>정회원, 건국대학교 공과대학 토목공학과 조교수

<sup>2</sup>청석엔지니어링, 터널부

<sup>3</sup>건국대학교 토목공학과, 대학원생

\*교신저자: 신종호 (jshin@konkuk.ac.kr)

하수 흐름거동에 관한 많은 연구가 그림 1(a)와 같이 흐름유형을 단순화한 방사형 흐름으로 가정하고 있다. Harr(1962)는 터널 주변을 방사형 흐름으로 이상적인 가정을 함으로서 이를 기초로 유량 및 수리특성을 이론적으로 모사하였다. 방사형 흐름으로 가정함은 수리문제를 축대칭화하여 흐름거동을 쉽게 접근가능하게 해주나 실제와는 큰 차이를 보인다. 방사형 흐름은 통상 정상류 흐름상태에서 발생하게 된다. 일반적으로 토피고가 터널 직경의 50배 이상 되는 대심도 터널에서는 방사형 흐름이 나타나는 것으로 알려져 있으며, 신영진(Shin, 2007)은 직경방향에 대한 파라미터 수치해석을 통하여 이를 확인하였다.

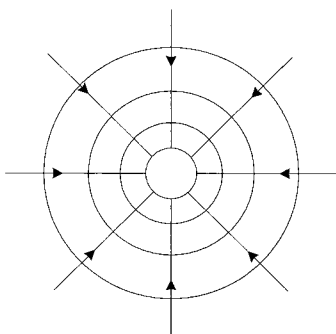
Fernandez and Alvarez(1992), Fernandez(1994)는 전 기장 모형에서 유속으로 비방사형 흐름모형을 그림 1(b)와 같이 설정하여, 터널에 미치는 흐름거동의 영향을 모사하였다.

지하수위의 시간의존적 거동관점에서 터널 주변의 정상류 흐름(steady-state flow)과 부정류 흐름(transient flow)으로 구분할 수 있다. 정상류 흐름은 흐름거동이 한 점에서 유속의 방향과 크기가 시간에 따라 일정한 흐름을 말하며 하천 혹은 강우에 의하여 수위가 변하지 않는 정도의 충분한 물 공급이 있는 경우에 발생한다. 반면 부정류 흐름은 한 점에서 유속의 크기와 방향이

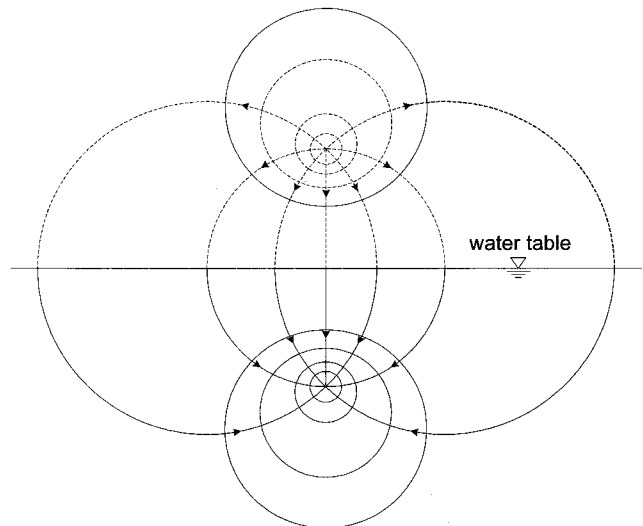
변화하는 흐름이다. 정상류 흐름의 가정은 터널이 존재 하더라도 자유수면의 변화가 없는 경우에 가능하다. 따라서 터널 주변에 하천이 근접해 있거나 해저터널과 같이 물 공급이 항상 충분한 경우 정상류 흐름상태가 유지될 수 있다. 부정류 흐름에서는 터널 위 자유수면이 변화한다.

부정류 흐름인 경우, 자유수면 위의 지반은 불포화토 특성을 나타낸다. 즉, 포화도와 투수계수가 함께 감소하는 특성을 보이며, 세립토일 수록 급격한 변화를 보인다.

이와 관련하여 Shin *et al.*(2002)은 터널 굴착시 주변 유출조건하에서 심도의 영향 그리고 구속조건(정상류) 및 비구속조건(부정류)의 채택이 유선에 미치는 영향을 조사하였다. 이들은 심도가 깊어질수록 터널 주변의 흐름이 비교적 방사형에 가깝게 나타나며, 비구속조건인 경우 같은 심도의 구속조건에 비해 비방사형 흐름특성을 보임을 확인하였다. Atkinson and Mair(1983)는 흐름조건의 가정에 따라 침투압 터널에 작용하는 영향이 크게 달라질 수 있음을 발표하였으며, 이러한 연구결과들을 종합할 때 터널 주변 흐름거동의 이해는 터널 설계, 지상구조물 영향평가 및 건설 후 터널운영 등에 매우 중요한 요소가 됨을 알 수 있다. 특히 도심에서 건설되는 천층터널의 경우, 방사형 흐름 가정이 성립되지 않는 경우가 많으므로 중요하게 다루어질 필요가 있다. 최근



(a) 방사형 흐름(Atkinson and Mair., 1983)



(b) 비방사형 흐름(Fernandez., 1994)

그림 1. 터널 유선망의 이론적 가정

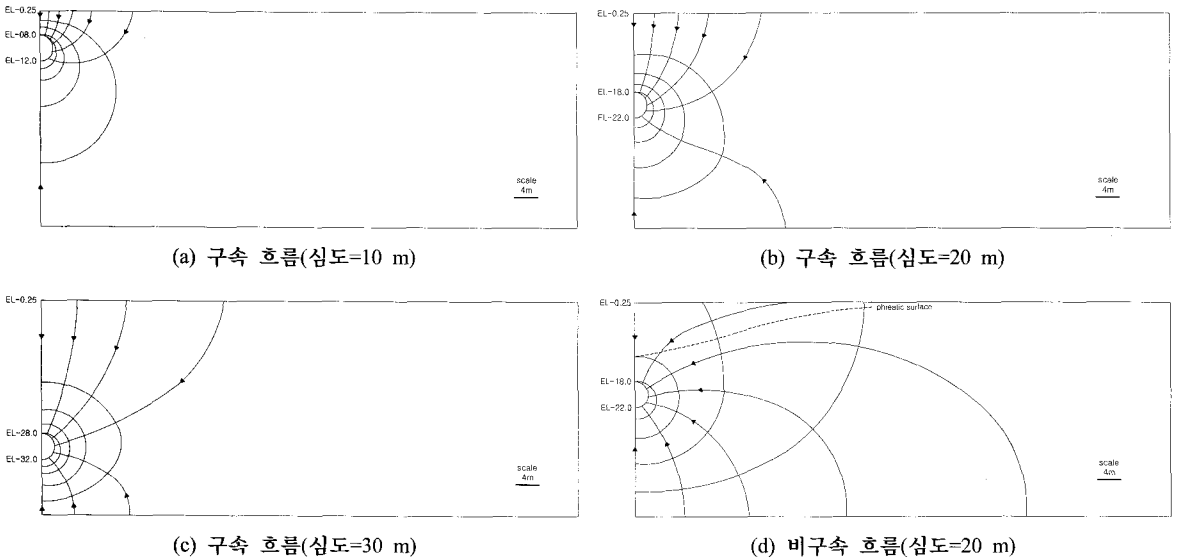


그림 2. 심도와 흐름조건에 따른 유선망 특성(Shin, 2002)

에는 수치 해석적 방법으로 흐름거동을 파악하는 추세가 일반화되고 있다. 수치해석결과는 수리경계조건에 따라 적절히 달라지므로 흐름문제 의 경우 수리경계조건이 가장 중요하게 고려되어야 한다. 흐름거동의 정확한 예측을 위해서는 수치해석의 수리경계조건이 실제 흐름거동과 동일하게 구현되어야 한다.

본 연구에서는 천층터널 주변의 흐름거동을 모형실험을 통하여 파악해보고 이를 수치 해석적으로 모사하여 실제 흐름거동의 수치 해석적 재현성을 만족하는 가장 적절한 수리경계조건을 제시하고자 한다.

## 2. 실내 모형실험

### 2.1 실험개요 및 장치

배수형 천층터널 주변의 흐름거동을 파악하기 위하여 색소를 이용한 실내모형실험을 실시하였다. 모형실험은 실험실에서 다루기 쉽고, 반복 실험이 용이하며, 예상되는 정보를 보다 신속히 얻을 수 있다. 실내모형은 원형의 약 40분의 1로 계획하였다. 모형실험결과의 신뢰성 확보를 위하여 일반적으로 모형과 원형사이에 상사성(similitude)을 검증하여야 하나, 본 연구에서는 단순히 색소를 주입하여 배수형 천층터널 주변의 흐름거동을 파악하는 정성적(qualitative) 결과가 목적이므로 별도의

상사검증은 실시하지 않았다. 따라서 실험결과는 정성적 분석에 국한되었다.

배수형 천층터널 주변의 흐름거동을 모사하기 위하여 가로 400 mm, 폭 150 mm, 높이 650 mm의 토조와 직경 150 mm의 반단면 모형터널을 제작하였다(사진 1, 2). 실험장치의 재질은 투명 아크릴판이며, 지반 및 수압에 의한 변형이 생기지 않도록 두께를 설정( $t=15$  mm)하였다. 배수형 터널을 재현하기 위하여 터널주면에 부직포(filter)를 부착시켜 배수층(drainage layer)을, 부직포 바깥쪽에 200번체(screen)를 두어 1차 라이닝인 숏크리트층을 모사하였다. 실험에 사용된 부직포는 투수계수  $2.1 \times 10^{-1}$  (cm/sec)인 장섬유 부직포를 이용하여 제작하였다. 터널내부로 유입된 지하수는 터널주면을 따라 터널 하부 배수공에 흡수되어 배수되도록 하였고, 지름 12 mm의 밸브를 사용하여 원활한 배수가 이루어지도록 하였다.

토조 지반은 200번체로 거른 주문진 표준사를 24시간 동안 수침시켜 조성한 후, 색소를 주입하고 이동경로를 관찰함으로써 지하수의 흐름거동을 파악하고자 하였다. 시료의 200체 통과량은 2%였으며 물리적 특성을 파악하기 위해 기본 물성시험 및 실내 정수위 투수시험을 실시하여 표 1, 그림 3과 같은 결과를 얻었다. 시간경과에 따른 지하수 흐름을 관찰하기 위해 일정시간간격마

표 1. 모형실험의 지반 물성치

비중, $G_s$	건조단위중량, $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	간극비, $e$	투수계수, $k$ (cm/sec)
2.64	1.648	0.602	$1.83 \times 10^{-3}$

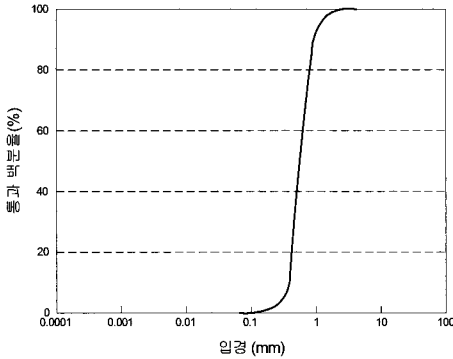


그림 3. 시료의 입도분포

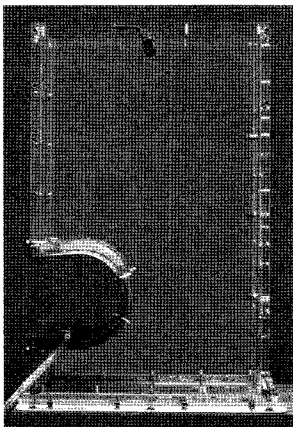


사진 1. 배수형 터널 모형실험장치

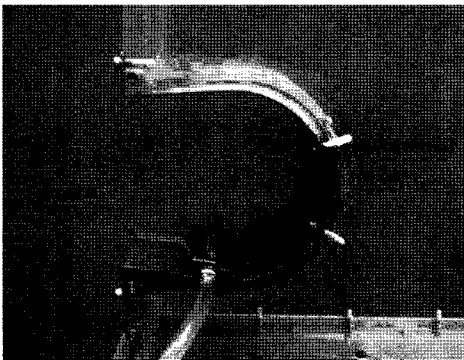


사진 2. 터널 모형 상세도

다 유선의 변화를 기록하였다.

## 2.2 실험조건 및 방법

모형실험은 지반(토피고) 조건 및 지하수(흐름) 조건에 따른 배수형 터널 주변의 흐름거동을 파악하기 위하여 터널 천단에서 지표면까지의 거리를 토피고(H)라 하여, 터널 직경(D)의 1배, 2배인 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 또 위 두 조건에 대하여 자유수면(지반상부 10 cm)이 변하지 않고, 터널내 유입량이 일정한 정상류 흐름과 자유수면이 저하되며 터널내 유입량이 줄어드는 부정류 흐름조건을 재현하여 실험하였다. 유선이 배수관으로 집중되는 특성을 보다 구체적으로 조사하기 위하여 유출량을 1/15까지 줄이는 유출량 제어실험도 실시하였다. 본 모형실험에 적용된 실험조건 및 그림은 각각 표 2와 그림 4에 나타내었다.

본 실험에서 정상류 흐름조건의 정상상태는 모형터널의 배수공을 통하여 유출되는 유량과 토조로의 물 공급량을 같게 제어하여 지반상부 10 cm의 자유수면이 일정하게 유지되도록 함으로서 재현하였다. 정상상태에서 물 공급은 없이 유출만 허용하는 방식으로 자유수면을 저하시켜 부정류 흐름조건을 나타내었다. 실제 지반에서 정상류 흐름은 지하수원의 위치 및 지질상태에 따라 여러 방향에서 지하수의 공급이 이루어질 수 있으나, 본 실험에서는 터널상부에서만 지하수를 공급하되, 유량을 제어함으로서 이러한 영향이 재현되도록 하였다. 지표면 아래 일정 위치에서 물감을 사용하여 색소를 주입하였고, 흐름을 명확하게 관찰하기 위하여 물감이 투명 아크릴판 벽면을 따라 흐르도록 하였다. 물감 주입시 확산

표 2. 실험 Case별 모형실험 조건

실험 CASES	지반(토피고) 조건	지하수(흐름) 조건
C-1.0D	1.0D	steady-state flow
UC-1.0D	1.0D	transient flow
C-2.0D	2.0D	steady-state flow
UC-2.0D	2.0D	transient flow

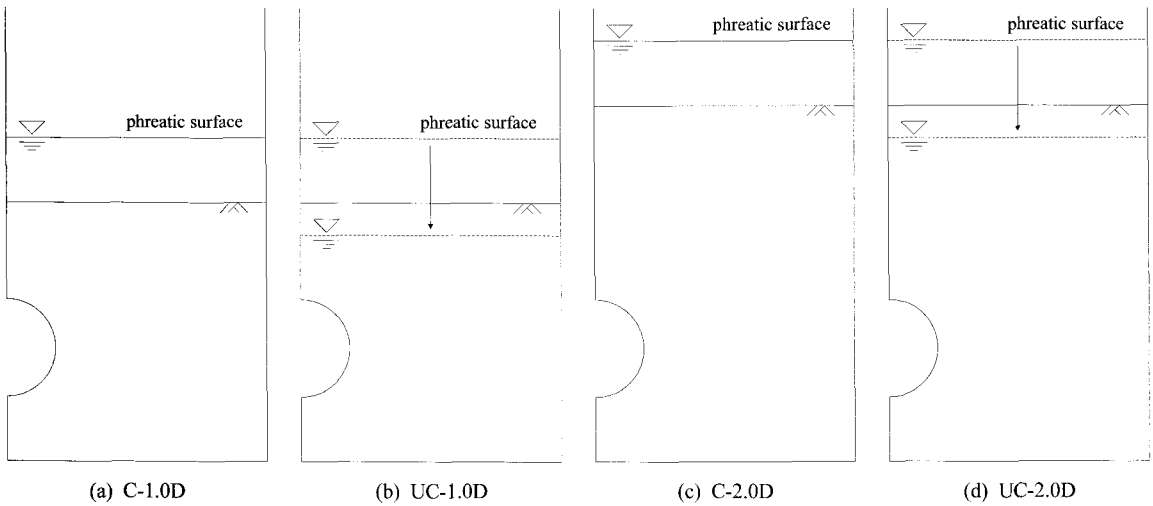


그림 4. 모형실험 Case별 지반-지하수 조건

을 방지하기 위하여 지하수 흐름은 발생하지 않도록 하였다. 또 카메라의 초점을 고정시켜 일정간격으로 사진을 촬영하여 흐름을 관찰하였다.

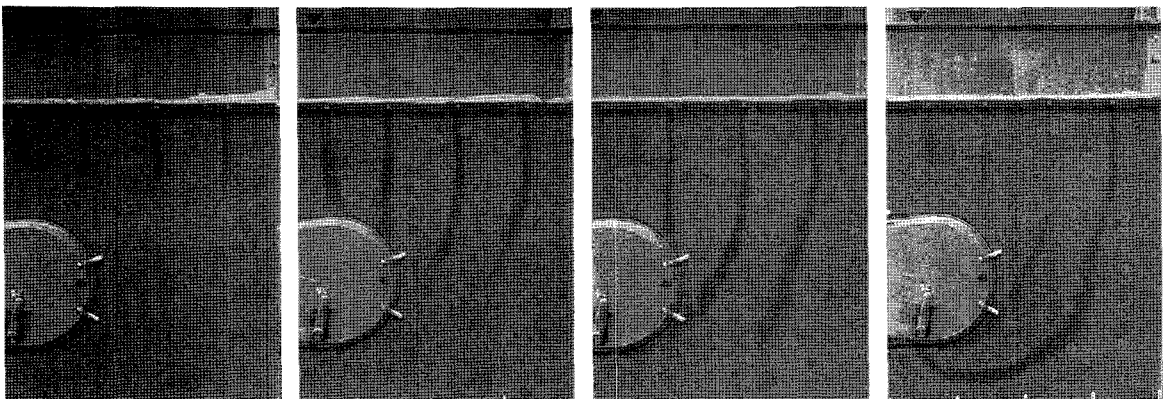
### 2.3 실험결과 및 분석

실험과정에서 시간대별 사진촬영을 통하여 유선변화를 파악하였다. 실험결과는 시간에 따른 단계별 분석과 지반 및 지하수 조건에 따른 분석 등 2가지로 분석하였다.

#### 2.3.1 시간에 따른 단계별 분석

사진 3은 토피고 1.0D지반의 정상류 흐름조건(C-1.0D)

의 실험결과를 시간대별로 나타낸 것이다. 여기서 T는 밸브를 열어 흐름을 발생시킨 후 경과시간이다. 초기 흐름은 수직에 가까운 흐름을 보이나 터널 주변에 도달하면서 터널 배수층 방향으로 약간 휘어지는 흐름거동을 보였다. 배수재의 투수성이 지반보다 약 100배정도 큼에도 불구하고 흐름이 배수재보다는 배수공 방향으로 집중되는 현상을 보였다. 이는 배수공이 위치한 쪽으로 훨씬 더 큰 동수경사가 발생하였기 때문인 것으로 판단된다. 실험결과 유선은 T=5 min까지 터널을 향하고, 그 이후에는 터널 주변을 따라 원주방향으로 휘어져 터널 주변으로 유입되는 양상을 보였다.



(a) T=1 min (b) T=5 min (c) T=10 min (d) T=20 min

사진 3. 시간에 따른 터널 주변의 흐름특성(C-1.0D)

### 2.3.2 지반 및 지하수 조건에 따른 분석

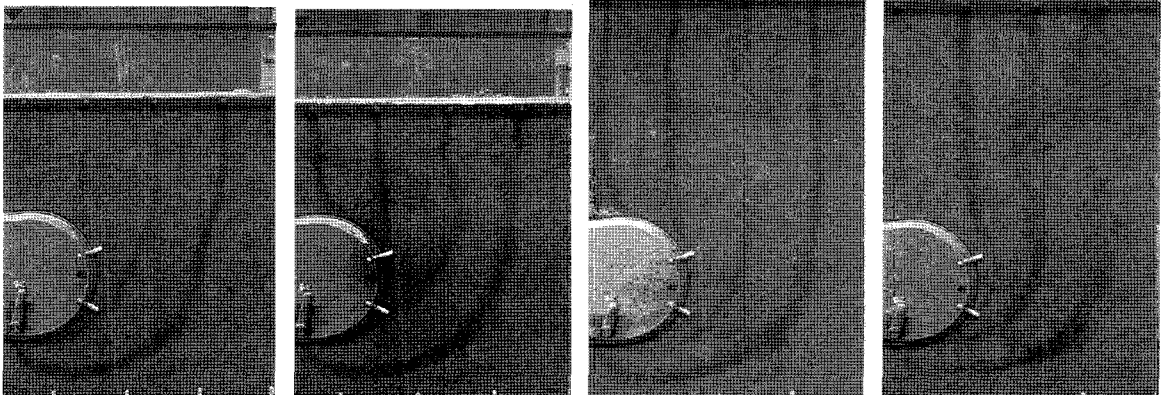
사진 4는 지반 및 지하수 조건에 따른 터널 주변의 흐름거동을 나타낸 것이다. 사진 4(a)는 표준 실험(C-1.0D)에 대한 결과이고, (b)는 토피고 1.0D지반의 부정류 흐름조건 실험결과이다. 색소가 터널주면에 도달하는 소요시간도 정상류 흐름의 1.5배에 달하였다. 전체적인 흐름거동을 보면 터널천단까지는 수직에 가깝게 흐르다가 터널 주변에서 원주방향으로 휘어지면서 터널주면으로 흘러들어 정상류 흐름과 거의 같은 흐름거동을 보였다. 사진 4(c)는 토피고 2.0D지반의 정상류 흐름조건 실험결과를 보인 것인데 토피고 1.0D지반과 다른 두 가지 특징을 보였다. 첫째는 흐름이 터널 원주방향으로 휘어지기 시작한 시점이다. 1.0D지반의 경우 초기에 수직흐름을 보이다가 터널천단에서부터 터널 원주방향으로 휘어짐이 나타났으나 2.0D지반에서는 터널 중심축이하에서 휘어지는 특성을 나타내었다. 둘째는 1.0D지반보다 터널주면으로 흐름이 집중되는 경향이 더 크게 나타났다. 사진 4(d)는 토피고 2.0D지반의 부정류 흐름조건 실험결과로 전체적인 흐름거동은 정상류 흐름과 거의 유사하였다. 다만 추가적인 물 공급이 없어 색소(유선)가 터널주면에 도달하는 시간이 정상류 흐름의 약 두 배에 달하였다.

색소의 이동경로 즉, 유선을 통해 배수형 터널 주변의

흐름거동을 파악할 수 있었다. 모형실험결과 지하수 조건은 터널 주변의 흐름거동에는 대체적으로 영향을 크게 미치지 못하였으나, 흐름속도를 지배하는 것으로 나타났다. 토피고의 크기는 초기 수직흐름에서 터널주면으로 휘어지는 위치의 변화를 야기하였다. 즉, 토피고가 증가할수록 흐름이 휘어지는 위치가 터널 중심축이하로 내려가는 거동을 보였고, 유선이 배수공으로 집중되는 현상이 뚜렷하게 관찰되었다. 흐름이 하부 배수공 주변으로 집중되는 경향은 터널주면을 따른 원할한 유도배수보다 유속이 빠른 하부 배수공으로 집중되는 영향이 보다 지배적이기 때문인 것으로 판단된다.

### 2.3.3 유출량 제어실험

모형터널 배수밸브의 유출량이 현저히 커서 터널 하부로 유선이 집중되는 거동에 대한 보다 구체적인 결과가 제기되어 배수밸브의 유출량을 감소시키는 실험을 실시하여 유선이 터널 주변으로 분산되는지를 관찰하였다. 이 실험은 표준 실험과 동일한 조건에서 유출량만 1/15로 감소시켜 수행하였고, 실험결과는 그림 5와 같다. 결과를 명확하게 관찰하기 위하여 유출량을 1로 본 표준 실험의 유선과 유출량을 1/15로 감소시킨 유출량 제어실험의 유선을 함께 나타내었다. 그림에서 표준 실험과 대조 실험의 유선을 각각 점선과 실선으로 나타내



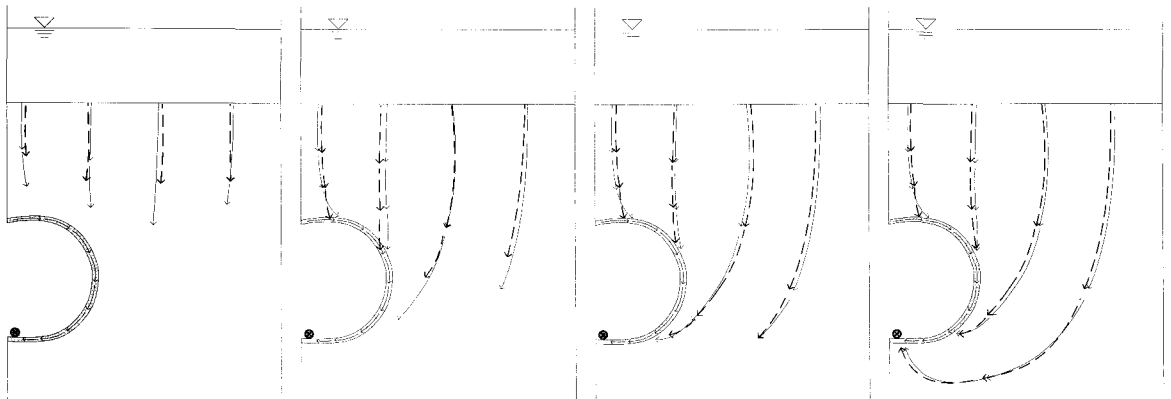
(a) C-1.0D, T=20 min

(b) UC-1.0D, T=30 min

(c) C-2.0D, T=25 min

(d) UC-2.0D, T=50 min

사진 4. 지반 및 지하수 조건에 따른 터널 주변의 흐름특성



(a) T=1 min, t=30 min      (b) T=5 min, t=100 min      (c) T=10 min, t=180 min      (d) T=20 min, t=300 min

그림 5. 유출량에 따른 유선 비교(점선: 유출량 1, 실선: 유출량 1/15)

었고, 경과시간은 각각 T와 t로 구분하였다. 비교고찰결과 배수밸브의 유출량을 1/15로 줄였음에도 표준 실험의 유선과 거의 유사함을 보였다.

### 3. 모형실험의 수치해석 모델링

#### 3.1 수치해석 모델링

본 연구에서는 배수형 천층터널 주변의 흐름거동에 대한 모형실험과 함께 수치 해석적 모델링을 실시하여 모형실험의 수치 해석적 재현가능성을 확인하고, 실험과 수치해석결과를 비교하여 실험결과의 일반화 및 다양한 수리경계조건에 대한 분석도구를 확보하고자 하였다. 해석에는 유한요소법을 근간으로 하는 범용 해석프

로그램인 MIDAS GTS를 사용하였다. 굴착변위가 수반되지 않는 실험임을 감안하여 침투해석에 선형 투수계수 모델을 사용하였고, 지반 및 배수재는 4절점의 등매개변수 요소를 사용하여 모델링하였다. 침투해석시 지반 내부 및 외부의 경계조건이 시간에 따라 변화하지 않으므로 정상류흐름 해석을 하였고 평면변형 조건을 가정한 단순화된 2차원 모델링을 하였다. 터널단면은 원형터널을 선정하였고, 터널중심축을 기준으로 좌우대칭임을 고려하여 반단면 해석을 수행하였다. 해석에 사용한 물성치는 표 3과 같이 실제 모형실험에 사용된 재료의 값과 동일하게 적용하였다. 배수재(filter)의 투수계수  $k_f$ 는 원활한 배수를 위해 지반의 투수계수  $k_s$ 와 동일하거나 커야하나 수치해석상의 여유를 주하고자 10배로

표 3. 수치해석의 지반 물성치

단위중량, $\gamma$ ( $t/m^3$ )	지반 투수계수, $k_s$ (cm/sec)	배수재 투수계수, $k_f$ (cm/sec)	$k_f/k_s$
2.10	$1.83 \times 10^{-3}$	$1.83 \times 10^{-2}$	10

표 4. 해석 Case별 수치해석 조건

해석 CASES	지반-지하수 조건	유출 경계조건	우측 및 모델바닥의 수리경계조건
Case 1	C-1.0D	터널주면	$\Delta u=0$
Case 2	C-1.0D	터널주면	$q=0$
Case 3	C-1.0D	배수공	$q=0$
Case 4	C-2.0D	배수공	$q=0$

※ u=간극수압,  $\Delta u$ =간극수압 변화량, q=유량

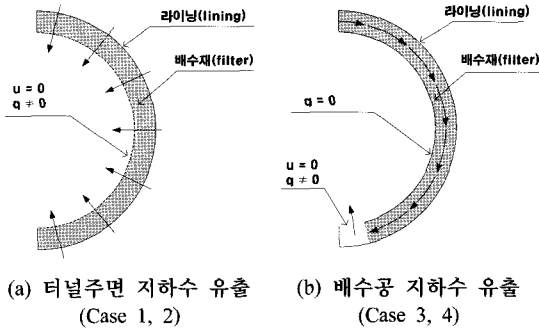


그림 6. 수치해석에서의 지하수 유출 모델 개념도

설정하였다.

해석은 표 4와 같이 터널주면에서 완전배수(fully permeable)가 이루어져 지하수가 터널주면에서 유출된다고 가정하는 경우(Case 1, 2)와 모형실험의 조건과 같이 배수공을 통한 유출만을 가정한 경우(Case 3, 4)로 나누어 수행하였다.

해석 Case 1과 2는 터널주면의 수리경계조건을 완전배수로 가정하는 경우로 배수형 터널의 수치해석에서 통상적으로 사용하는 모델이다. 일반적으로 배수형 터널의 수리경계조건은 설계나 시공과정에서 완전배수조건으로 고려되고 있으나, 라이닝의 투수계수가 지반보다 작거나 터널의 배수기능이 적절히 확보되지 못하는 경우 라이닝에 작용하는 간극수압은 완전배수조건으로 볼 수 없다. 즉, 완전배수조건은 라이닝의 투수성이 지반보다 좋다는 조건에서만 만족된다. 또한 배수재 투수성이 라이닝보다 작아지는 경우 이때 발생하는 간극수압은 배수재에 작용하게 된다. 이를 고려하여 지반-라이닝-배수재의 투수계수를  $k_s < k_l < k_f$ 로 취함으로서 배수시스템이 설계 개념대로 원활히 작동하여 흐름저항이 없고, 간극수압의 영향이 무시할 만큼 작다고 가정한 것이다. 이 경우 터널주면 전 영역에서 지하수 유출이 발생하며, 간극수압은 0이 된다(그림 6의 (a)). Case 1은 지반이 지하수 공급이 충분하여 흐름에 의한 좌·우측 경계면의 영향을 무시한 경우이고, Case 2는 모형실험의 조건과 같이 경계면에서 흐름의 영향을 고려한 경우로서 터널상부에서만 지하수가 공급된다. 따라서 Case 1은 좌·우측 경계 및 모델 바닥의 수리경계조건을 간극수압의 변화가 없는 것으로 설정하였고, Case 2는 흐름이 없는 수리경계조건으로 설정하였다.

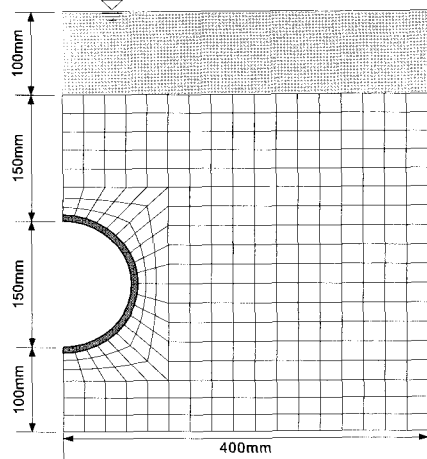


그림 7. 해석에 사용된 유한요소망(C-1.0D)

해석 Case 3과 4는 모형실험의 배수공 유출조건을 재현한 것으로 지하수는 터널상부에서만 공급되며(Case 2와 동일), 배수는 터널 하부 배수공에서만 이루어지게 모델링하였다. 즉, 지하수는 지반을 통과하여 터널주면을 따라 흐르고, 터널 하부 배수공에 집수되어 유출되는 모형실험의 수리경계조건을 모사하였다. 따라서 터널 하부 배수공은 간극수압이 0으로 유출이 일어나지만, 터널주면을 통한 유출은 일어나지 않는다고 보았다(그림 6(b)). 모형실험의 수치 해석적 모델링을 위하여 경계면에서는 흐름에 의한 영향을 고려하였다. 또, 모형실험의 검증을 위해 토피고에 따라 Case 3(모형실험 C-1.0D)과 Case 4(모형실험 C-2.0D)로 구분하였다. 자유수면은 실제모형실험과 동일하게 정상류 흐름으로 가정하였고, 해석에 사용된 유한요소망은 그림 7과 같다.

### 3.2 수치해석 결과 및 분석

앞서 모형실험 또는 현장조건에 근접한 수치해석 모델링을 위한 경계조건에 대해서 알아보았다. 그림 8은 수치해석 결과 각 Case별 유선벡터이다. 그림 8(a)는 터널주면 전 영역에서 지하수 유출을 허용하고, 터널 측면 경계 유입을 허용한 Case 1의 수치해석 결과로 방사형에 가까운 흐름거동을 나타내었다. 그림 8(b)는 터널주면 전 영역에서 유출을 허용하고 측면유입을 허용하지 않는 Case 2의 수치해석 결과로 Case 1보다 터널 하부로 흐름이 집중됨을 알 수 있다. 그림 8(c), (d)는 상부유



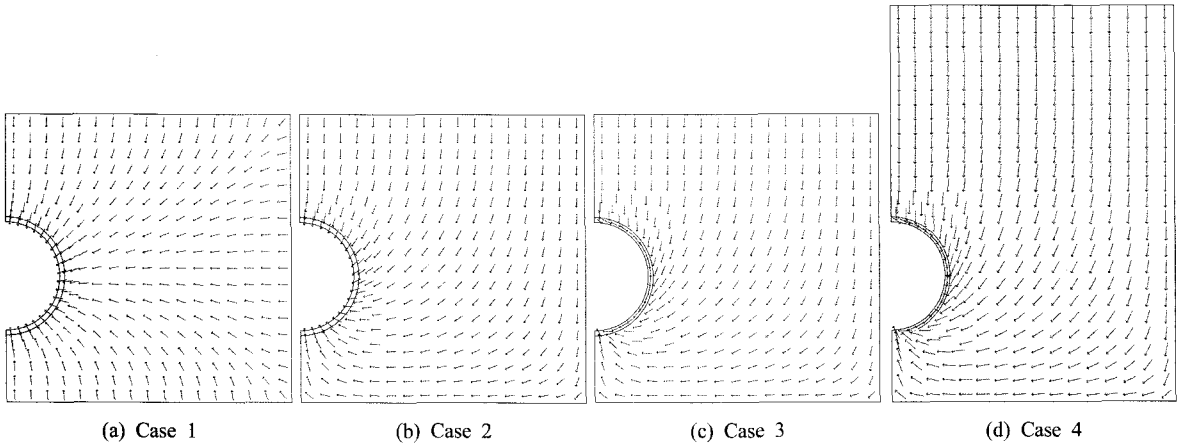


그림 8. 각 해석 Case별 유선벡터

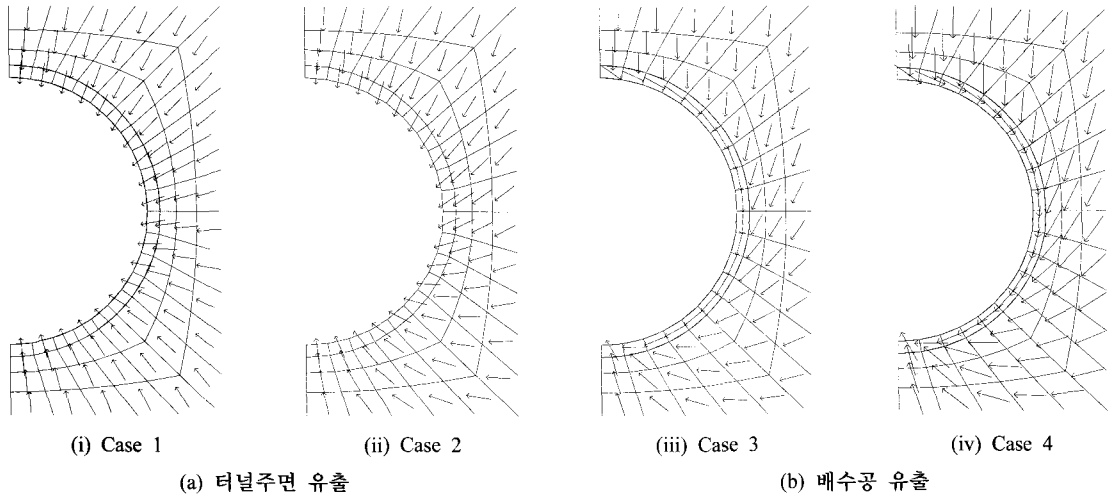


그림 9. 굴착전면에서의 흐름거동 비교

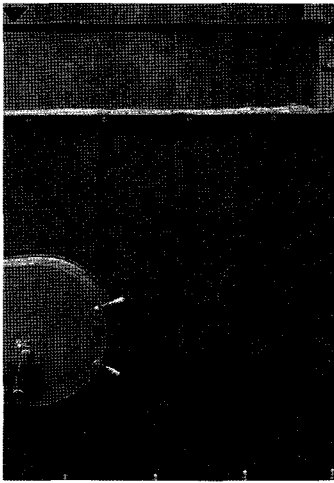
입을 허용하고, 측면유입을 방지하여 배수공 유출을 모사한 모형실험 재현결과로서 배수형 천층터널 주변의 지하수가 터널주면을 따라 흐르면서 하부 배수공에 집중되는 흐름거동을 보인다.

그림 9는 굴착전면에서의 흐름거동을 비교한 것으로 지반-라이닝-배수재의 투수특성에 기인한 수리상호거동을 보여주고 있다. 그림 9(a)는 터널주면의 수리경계조건을 완전배수로 취함으로서 터널주면에서 흐름저항 없이 유출이 발생함을 보여주고 있다. 그림 9(b)는 배수재 투수계수가 지반 투수계수보다 크고, 터널 하부 배수공에서만 유출이 일어나게 구속함으로써 지반을 통과한

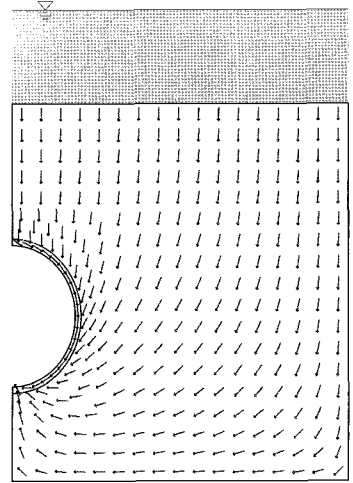
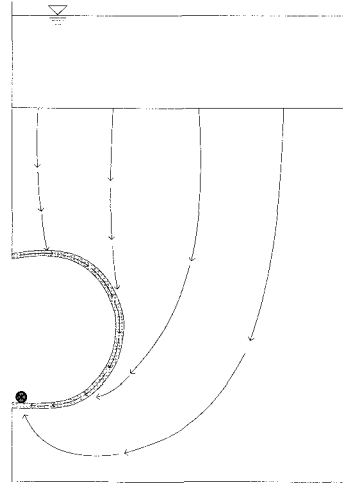
지하수가 터널주면을 따라 흐르다가 배수공에서 집중유출 됨을 나타내고 있다. 즉, 실제 배수형 터널의 배수 시스템과 유사한 거동을 보인 것이다.

### 3.3 수치해석 결과 고찰

해석결과를 종합해 볼 때, 통상 터널건설 시 사용하는 완전배수 모델링은 완성된 배수형 터널에는 적절하지 않은 것으로 확인되었다. 운영 중인 터널 배수 시스템의 모델링은 수치해석 Case 3, 4와 같은 배수공 유출 경계조건이 적절한 것으로 나타났다. 또한 본 모형실험과 같이 측면이 아닌 상부에서만 지하수가 공급되어 정상류



(a) 모형실험 유선



(b) 수치해석 유선

그림 10. 배수형 터널의 흐름특성 비교

조건을 모사하는 경우, 우측 및 하부경계조건은 유입유량이 0인  $q=0$ 인 조건이 타당한 것으로 나타났다.

그림 10은 토피고 1.0D조건인 정상류 흐름에 대한 모형실험(C-1.0D)과 수치해석(Case 3) 결과를 비교한 것이다. 두 경우 모두 유선의 방향이 대체로 일치하고, 지하수는 배수공에서만 집중 유출되는 흐름거동이 확인되었다. 이를 통해 수치해석을 수행하여 배수형 천층터널 주변의 흐름거동이 재현 가능함을 확인하였다.

Shin *et al.*(2002)는 주변유출을 가정한 바 이는 굴착중 모델로서는 적합하다 할 수 있으나, 배수시스템이 설치된 이후의 터널 흐름거동 모델링 혹은 운영 중 터널 주변 흐름거동은 배수재 흐름-배수공 유출모델을 이용하여 수치 해석적으로 예측할 수 있음을 확인하였다.

#### 4. 결 론

지하수 아래 건설된 배수형 천층터널 주변의 흐름거동을 파악하기 위하여 색소를 이용한 흐름 모형실험을 실시하였다. 모형실험은 주변 지하수의 흐름조건과 지반의 토피고 조건을 변화시켜 실시하였고, 사진촬영과 수치해석을 통하여 천층터널 주변의 흐름거동을 비교 분석하였다. 본 연구의 모형실험 및 수치해석을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 배수형 천층터널 주변의 유선은 흐름 경계조건(정상류/부정류 흐름)에 상관없이 대체로 일치하며, 유선이 배수공이 위치한 터널 하부로 집중되는 특성을 확인하였다.
- 2) 토피고가 증가할수록 수두차가 증가하므로 유선의 하부 집중현상이 뚜렷이 관찰되었고, 터널 중심축 하부에서 터널방향으로 유선이 휘어지기 시작하는 현상이 발생하였다.
- 3) 배수시스템 설치 이후 혹은 운영중 터널 주변 흐름거동은 배수재 흐름-배수공 유출모델을 이용하여 수치 해석적으로 잘 예측할 수 있음을 확인하였다.
- 4) 수치해석시 터널주변의 실제 수리경계조건을 고려한 해석이 요구되며, 건설 중은 굴착면 전면유출모델이 타당하나 장기거동은 배수재와 배수공을 모사하는 수리경계조건의 도입이 필요하다.

#### 감사의 글

본 논문은 한국학술진흥재단의 2007년 신진교수연구지원사업(기초과학분야) 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Atkinson, J.H., Mair, R.J. (1983), Loads on leaking and watertight tunnel lining, sewers and buried pipes due to groundwater, *Geotechnique* 33, No. 3, pp. 341-344.
2. Fernandez, G. (1994), Behavior of pressure tunnels and guidelines for liner design, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 120, No. 10-12, pp. 1768-1791.
3. Fernandez, G., Alvarez, T.A. Jr. (1992), Seepage-induced effective stresses and water pressures around pressure tunnels, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 120, pp. 108-128.
4. Harr, M.E. (1962), *Groundwater and Seepage*, McGraw-Hill, New York, N.Y.
5. Jong-ho Shin (2002), *Numerical analysis of tunnelling in decomposed granite soil*, Ph.D. Dissertation, Imperial College, London, UK.
6. 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* 52, No. 6, pp. 391-403.
7. Shin, Y.J. (2007), *Elasto-plastic ground response of underwater tunnels considering seepage forces*, Ph.D. Dissertation, Korea University.



신 종 호

건국대학교 공과대학  
토목공학과  
조교수

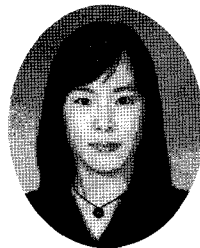
E-mail: jhshin@konkuk.ac.kr



최 민 구

청석엔지니어링  
터널부

E-mail: triparadox@naver.com



강 소 라

건국대학교  
토목공학과  
대학원생

E-mail: sara0105@konkuk.ac.kr



남 택 수

건국대학교  
토목공학과  
대학원생

E-mail: tsnam20@naver.com