

## 침투를 고려한 원형수직터널 거동특성 연구

김도훈<sup>1</sup>, 이강현<sup>2</sup>, 이인모<sup>3\*</sup>

### Seepage-induced behaviour of a circular vertical shaft

Do-Hoon Kim, Kang-Hyun Lee, In-Mo Lee

**ABSTRACT** When a circular vertical shaft is constructed below the groundwater level, additional forces caused by groundwater flow besides horizontal effective stresses will act on the wall. The inward direction of the groundwater flow will be inclined to the vertical wall and its direction will change depending on the wall depth. In this paper, to figure out the effect of seepage forces acting on the circular vertical shaft, the slope of the inclined flow varying with the depth is divided into vertical and horizontal components to derive the coefficient of earth pressure considering the seepage pressure and to obtain the vertical stress by taking the seepage pressure into account. The control volume in this study is assumed to be the same with that of the dry ground condition within which the earth pressure is acting on the wall by the creation of the plastic zone during shaft excavation. An example study shows that the vertical stress increases by about 1.4 times and the horizontal earth pressure increases up to 2.5 times compared to the dry ground condition. The estimated values from the proposed equation considering seepage forces and the calculated values from numerical analysis with “effective stress+seepage force” show similar values, which verifies appropriateness of the proposed equation to estimate the earth pressure under the seepage condition.

**Keywords:** Vertical circular shaft, seepage forces, hydraulic gradient, coefficient of earth pressure, earth pressure

**요약** 원형수직터널의 시공시 지하수가 존재하는 경우 굴착에 의해 지하수의 흐름이 발생되어 추가적인 힘이 작용하게 된다. 원형수직터널의 지하수의 흐름은 일반적인 수평터널과 달리 깊이방향으로 다르게 작용되며, 수직터널의 벽체에 경사방향으로 작용하게 된다. 본 연구에서는 원형수직터널에 작용하는 침투력의 영향을 파악하기 위해 깊이에 따라 변하는 경사방향의 흐름성분을 수직과 수평방향으로 나누어 각각을 이론식에 적용하였다. 지하수가 영향을 미치는 범위는 토압을 야기하는 이완영역과 같은 것으로 가정하여 이론식을 유도하였다. 침투력에 의해 발생하는 추가적인 힘으로 인하여 원형수직터널의 이완영역에 작용되는 응력이 달라짐에 따라 침투력을 고려한 토압계수 산정식과 원형수직터널 벽체에 작용하는 응력 산정식을 본 연구를 통해 제안하였다. 가상지반을 설정하고 제안식을 적용한 결과, 침투를 고려하지 않은 건조한 지반에 비하여 수직방향응력은 약 1.4배, 토압은 2.5배 증가하는 결과를 보였다. 침투해석을 통하여 “유효응력+침투력”으로 구한 값과 제안식을 이용하여 산정한 값은 유사한 경향을 보여 제안식은 침투력을 적절히 고려하여 토압을 예측하는 것으로 나타났다.

**주요어:** 원형수직터널, 침투력, 동수경사, 토압계수, 토압

접수일(2011.9.26), 수정일(2011.11.9), 게재확정일(2011.11.15)

<sup>1</sup>정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정

<sup>2</sup>정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정

<sup>3</sup>정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

\*교신저자: 이인모 (E-mail: inmolee@korea.ac.kr)

---

## 1. 서론

우리나라의 강우는 여름에 집중적으로 발생하고, 현재에는 기후변화 등에 의해 강우가 단시간에 집중되어 발생하고 있다. 이러한 집중 강우에 의해 건설 현장에서 폭우에 의한 피해가 매년 발생하고 있는 실정이다. 특히, 지상에서는 사면파괴, 지하에서는 개착 시공을 위한 가시설 구조물에서의 붕괴가 주를 이루고 있다. 이러한 강우에 의한 지반의 문제는 지반에 추가적인 힘인 침투력이 작용하여 발생하는 것으로 사면 절개나 개착구조물을 계획하기 위해서는 이러한 침투에 관한 검토를 반드시 수행하여야 한다.

원형수직터널은 구조물의 특성상 지표에서 계획 깊이까지 수직으로 굴착되며, 가시설을 설치하고 지반의 거동을 억제하여 시공하게 된다. 원형수직터널 시공시 가시설에 작용되는 토압은 지반의 3차원적인 거동을 보이며, 이러한 토압을 산정하기 위한 연구가 수행되어져 왔다. 천병식 등(2003)은 사질토 지반에서 여러 파괴형상을 고려하여 아칭이 고려된 토압을 산정하는 이론식을 제안하였고, 신영완 등(2007, 2008)은 원형수직터널의 직경과 깊이의 비를 이용하여 파괴면의 형태에 따른 토압을 제시하였고, 이인모 등(2007)은 다층지반에서 적용가능한 토압산정 방법을 제안하였으며, 김도훈 등(2009)은 사질토 및 다양한 지반 조건에서 적용가능한 토압계수식 및 토압식을 제안하였다. 하지만, 이러한 기존의 연구들은 건조한 지반을 대상으로 하여 지하수위가 존재하는 경우 정수압에 대한 적용은 가능하나 침투력의 고려는 어렵다. 일반적인 가시설의 경우 배수구조물의 형태로 설계되어 시공 중 수위저하가 발생하여 지하수에 대한 영향을 배제한 기존 연구의 결과가 적용될 수 있으나, 집중호우 등으로 단 시간에 포화상태가 되어 침투가 발생하는 경우 기존 제안식들에서 고려할 수 없는 침투에 의한 응력이 추가적으로 발현되어 구조물의 안전성에 문제를 야기할 수 있다. 따라서, 배수조건인 원형수직구 가시설 구조물의 안전성의 확보를 위해 지하수에 의한 지반의 거동을 파악하는 것이 중요하다.

본 논문은 원형수직터널의 배수형태의 가시설 구조물에 작용하는 침투력을 파악하기 위해 기존에 수행된 작용 토압의 연구를 검토하고 이를 통하여 침투의 영향이 고려된 이론식을 제안하였다. 제안된 이론식은 정상류 조건하에서 침투가 발생한 경우를 가정하였으며, 기존 연구의 파괴면을 가정하여 이론식을 유도하였다. 침투력은 원형수직터널 굴착시 발생하는 지반의 아칭현상을 고려하기 위해 토압계수식과 토압식에서 각각 고려되었다. 이론식의 적용을 위해 수치해석을 수행하였으며, 수치해석을 통해 산정된 동수경사를 이용하여 원형수직터널에 작용하는 최종응력을 산정하였다.

## 2. 원형수직터널의 침투 특성

지반에서의 물의 흐름은 수두차에 의해 지배되며, 수두가 높은 곳에서 낮은 곳으로 발생되게 된다. 배수 형태의 원형수직터널인 경우 벽면 및 하부 굴착면에서 배수가 수행되어 지하수의 흐름이 발생되며 침투력이 작용한다. 이러한 경우 원형수직터널에 작용하는 응력은 “유효응력+침투력” 상태로 작용하게 되며, 침투력은 식 (1)에 의해 산정된다. 이때에 침투력은 수두차와 흐름거리에 의해 결정되는 동수경사( $i$ )에 의해 지배된다. 따라서, 수두차를 통하여 지반에 작용하는 침투력을 산정할 수 있다.

$$S.F / volume = \frac{i\gamma_w \text{volume}}{volume} = i\gamma_w \quad (1)$$

수두차에 의해 지배되는 침투력은 수두의 발생 형태에 따라 다르게 산정되어진다. 그림 1(a)과 같은 일반적인 산악, 도심지 터널은 수평한 터널로 터널 바닥면을 기준으로 하였을 때, 지표에서 가장 큰 전수두를 가지며 배수가 되는 터널면에서 가장 작은 전수두를 가지게 된다. 또한, 지표가 평평한 면이라 가정하면 지표와 터널 벽면에서의 수두차이는 동일하게 발생된다. 하지만, 그림 1(b)와 같은 수직터널의 경우는 구조물이 지표에서 지표와 수직하게 건설됨에 따라 터널의 벽면에서 깊이별로 수두차이가 발생하게 되어 깊이에 따라 벽면에서 산정되는 수두차가 상이하게 된다.

수두의 차이가 발생함에 따라 물의 흐름 방향 또한 달라지게 된다. 침투력에 주요인자인 동수경사의 방향을 지배하는 것은 수두차이에 의한 물의 흐름방향이다. 수직터널에서 침투력을 고려하기

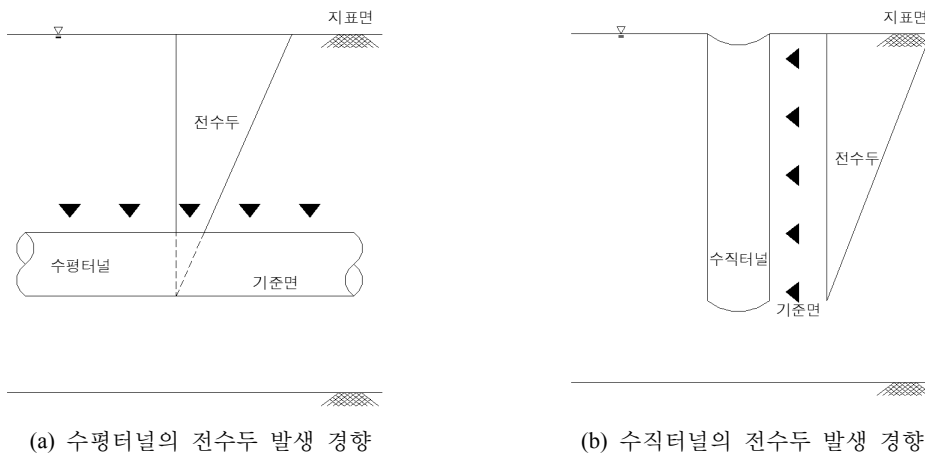
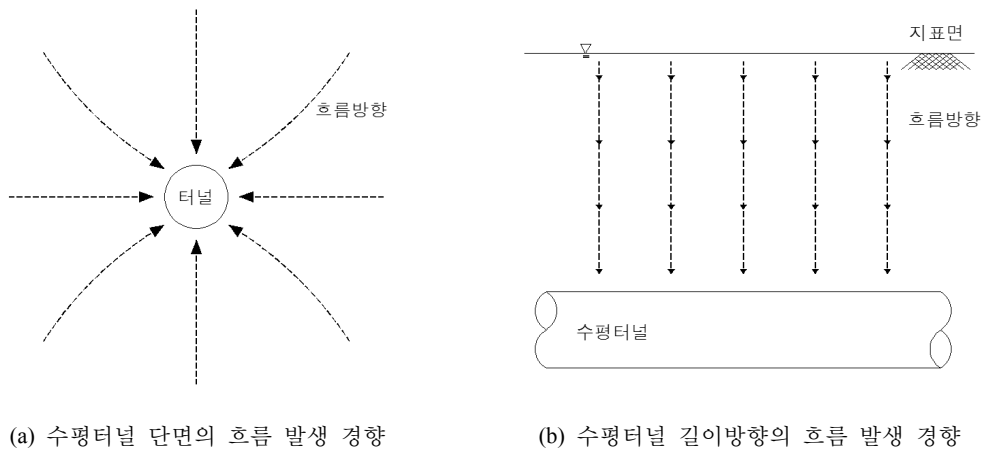


그림 1. 터널에서의 전수두 발생경향

위해서는 수두에 따른 흐름 특성을 파악하여야 한다. 수평터널 단면에서의 흐름방향은 그림 2(a)와 같이 단면의 반경방향으로 작용하게 되며, 터널 길이방향으로 모든 단면에서는 그림 2(b)와 같이 동일한 흐름이 발생하게 된다. 그림 3(a)에서 보이듯이 수직터널의 경우에도 단면에서는 수평터널과 동일하게 단면의 반경방향으로 물의 흐름이 발생되지만, 이는 수평방향의 물의 흐름이며, 깊이에 따라 그림 3(b)와 같이 수직흐름의 차이로 인해 터널의 길이방향에 따라 흐름이 변하게 되며, 이로 인해 단면에서는 다른 크기의 흐름이 발생하게 된다.

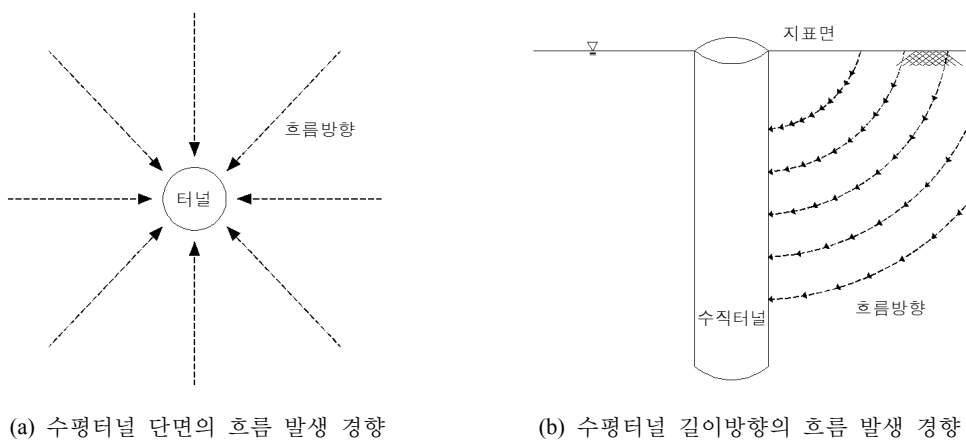
따라서, 원형수직터널에 작용하는 침투력의 산정을 위해서는 깊이에 따라 수직흐름에 의해 변화하는 특성을 고려하여야 한다.



(a) 수평터널 단면의 흐름 발생 경향

(b) 수평터널 길이방향의 흐름 발생 경향

그림 2. 수평터널에서의 흐름



(a) 수평터널 단면의 흐름 발생 경향

(b) 수평터널 길이방향의 흐름 발생 경향

그림 3. 수평터널에서의 흐름

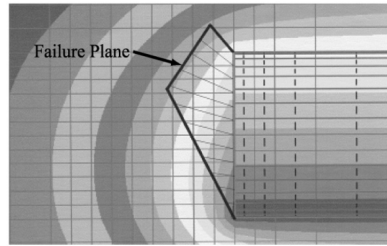


그림 4. 터널굴착면의 예상파괴면과 수두의 변화(Lee와 Nam, 2001)

### 3. 원형수직터널의 침투력 산정 범위 및 흐름 특성 분석

#### 3.1 원형수직터널 침투력 산정범위 결정

이인모(2004)는 침투력이  $i \times volume$ 의 식에 의해 계산됨에 따라 침투가 이루어지는 지반의 범위를 산정하고 이를 control volume으로 하여 이를 전체 구조물로 보고 응력해석을 수행하는 것으로 설명하였다. 여기서 control volume의 범위는 정수압상태에서 수압이 변하는 시점을 기준으로 하는 것으로 설명하였다. Lee와 Nam(2001)은 수평터널의 굴착면에 작용하는 침투력 연구에서 굴착면에 예상 파괴면을 control volume으로 하여 침투력을 산정하였으며(그림 4 참조), Lee 등(2007)에서는 터널 단면에서 벽면에 작용하는 침투력을 산정할 때 한계동수경사를 산정하여 한계동수경사가 '1.0'이 되는 지점을 까지를 control volume하였다. 나아가 신영진 등(2007)은 한계동수경사가 '0.0'인 지점까지 확장하여 침투력 범위를 산정하였다. 원형수직터널에 작용하는 토압은 원형수직터널 시공으로 발생하는 이완영역의 크기에 의해 지배됨으로 이완영역 전체를 하나의 구조물로하여 응력해석을 수행하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 이완영역을 control volume으로 하고, 이완영역 내에서의 지하수의 흐름을 파악하여 침투력을 고려하였다. 이러한 가정은 Lee와 Nam(2001)가 침투력을 산정하기 위해 가정한 것과 동일한 것이다.

#### 3.2 침투해석을 통한 예상 파괴면의 수두 분석

김도훈 등(2009)는 원형수직터널에서 토압을 산정하기 위해 그림 5와 같이 파괴면을 가정하고 이론식을 유도하였다. 본 연구는 추가적으로 침투력을 고려한 원형수직터널의 거동 파악하기 위해 기존의 연구와 동일하게 깔때기형 파괴면을 가정하고 이를 control volume으로 하여 원형수직터널에 작용하는 침투력을 산정하는 것으로 하였다. 원형수직터널의 지하수 흐름 거동을 파악하기 위해 표 1과 같이 직경이 변하고 깊이가 일정한 원형수직터널을 가정하고 침투해석을 수행하였다. 지반은 풍화토 지반을 가정하였고, 표 1에 대략적인 물성을 정리하였다.

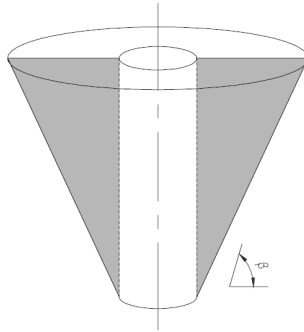


그림 5. 가정된 파괴면 및 control volume

표 1. 침투해석에 적용된 원형수직터널 특성 및 지반 특성

구 분	원형수직구 특성		지반 특성				
	직 경 (m)	깊 이 (m)	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	내부마찰각 (°)	점착력 (kPa)	탄성계수 (MPa)	투수계수 (m/sec)
Case 1	3	10	18	30	0	25	1.0×10 <sup>-6</sup>
Case 2	5	10	18	30	0	25	1.0×10 <sup>-6</sup>

지반의 물성치는 동일한 것으로 하였고 정상류 상태에서 수직, 수평방향으로 투수계수가 동일한 것으로 가정하여, 투수계수의 차이에 대한 물의 흐름의 변화에 대한 영향은 검토하지 않았다. 수직 및 수평방향의 투수계수가 같으면 식 (2)에서 투수계수의 항이 소거되어 정상류 상태의 침투해석의 주요 물성인 투수계수항이 영향을 미치지 않으므로 지반의 물성을 변화하지 않고 해석을 수행한 것이다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

여기서,  $h$ 는 전수두이며,  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$ 는 투수계수이다. 정상류 상태에서 수직과 수평방향의 투수계수가 같으면,  $k_x = k_y = k_z$ 가 되어 투수계수에 대한 영향이 소거되어 투수계수가 다르더라도 동일한 침투 해석 결과를 산정하게 되는 것이다.

그림 6은 Midas/GTS를 이용해 침투해석을 수행한 요소망이다. 경계조건의 영향을 최소화하기 위해 좌우 범위를 6D, 바닥부는 수직구 바닥에서 3H로 하여 경계를 설정하였다(그림 6(a) 참조). 경계면의 수두는 가장 보수적인 조건인 지표포화를 가정하였고 원형수직구에서 배수가 발생하는 것으로 하였다. 그림 6(a)에서 ①, ②의 경계에 요소망의 바닥면을 기준면으로 하여 지표포화조건의 수두를 가하였고, 원형수직터널의 벽면인 ③과 바닥면인 ④에 압력수두 '0.0'의 수두를 설정하여

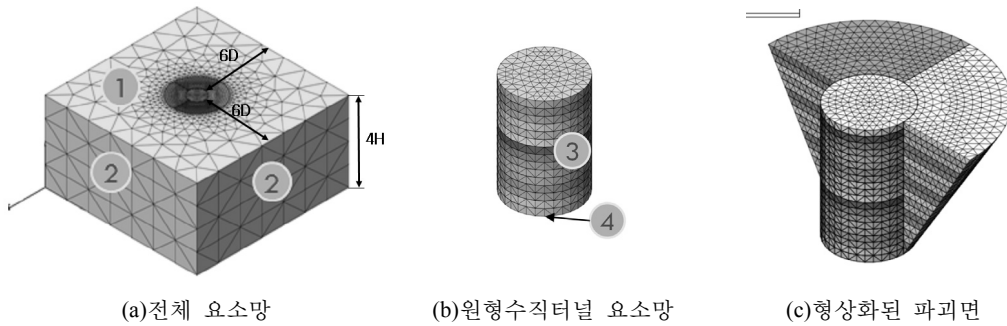
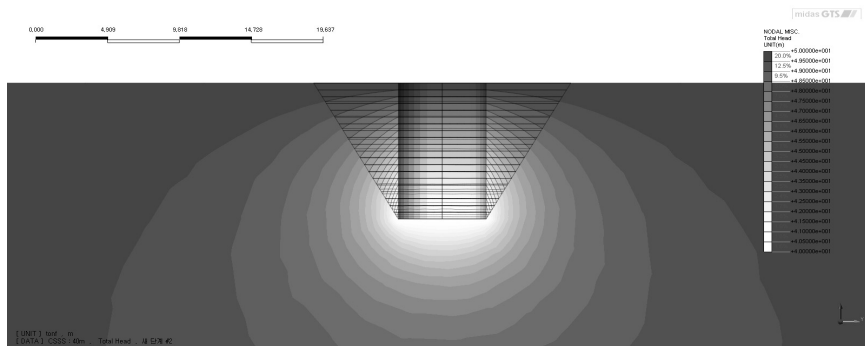


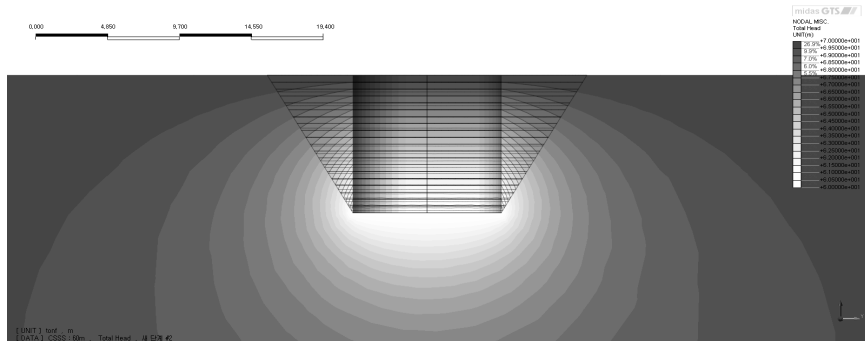
그림 6. 침투해석에 적용된 요소망

배수조건으로 하고 침투해석을 수행하였다. 또한, 가정된 파괴면에서 수두변화를 검토하기 위해 그림 6(c)와 같이 해석 요소망에 가정된 파괴면을 형상화하였다. 침투해석은 초기단계에서 경계면 ①, ②에 지표표화조건의 수두를 적용하였고, 굴착이 진행됨에 따라 ③, ④의 입력수두를 '0.0'으로 하여 배수가 발생하는 것으로 하였다.

그림 7은 각 Case에 따른 해석결과 중 전수두에 대한 결과를 나타낸 것이다. 수치해석의 경계조



(a) 직경 3 m인 경우(Case 1)의 전수두 결과



(b) 직경 5 m인 경우(Case 2)의 전수두 결과

그림 7. 침투해석의 전수두 결과

건에 따라 원형수직터널의 벽면 및 바닥면에서 배수가 발생되어 이를 중심으로 하여 전수두가 감소함을 보이며, 바닥부를 중심으로 하여 전수두의 변화가 큼을 알 수 있다. 전수두 결과에서 지표면에 가까운 부분에서는 물의 흐름방향이 수직성분이 강한 경향을 보이고 심도가 깊은 바닥부에서는 수평흐름이 크게 발달되는 경향을 보인다. 직경이 3 m인 그림 7(a)와 직경이 5 m인 그림 7(b)를 비교하면 직경이 증가함에 따라 심도가 깊어질수록 수평흐름의 요소가 작아짐을 보인다.

그림 8은 원형수직터널의 바닥부를 기준면으로 하여 파괴면 내의 일정한 위치에서 전수두의 변화를 나타낸 것이다. 그림 8(a)는 동일한 깊이에서 수평으로 변화하는 전수두를 나타낸 것이며, 그림 8(b)는 벽체에서의 동일한 이격거리를 가지는 위치에서 수직으로 변화하는 전수두의 변화를 나타낸 것이다. 따라서, 그림 8(a)는 흐름의 수평방향 성분이며, 그림 8(b)는 수직방향 성분을 나타낸 것이라 할 수 있다. 그림 8을 보면 지표부근에서는 직경변화에 따라 전수두의 차이가 크지 않으나, 심도가 깊어짐에 따라 직경에 따른 전수두의 차이가 발생하게 된다. 그림 8(a), (b)에서 수평방향과 수직방향의 차이를 보면, 원형수직터널의 직경이 작은 경우에는 수평성분의 흐름이 크게 발생되고 직경이 큰 경우에는 수직성분의 흐름이 상대적으로 크게 발생하는 것으로 나타났다. 하지만, 두가지 경우 모두 원형수직터널의 심도가 깊어짐에 따라 수평방향의 전수두 변화량이 수직방향의 전수두 변화량보다

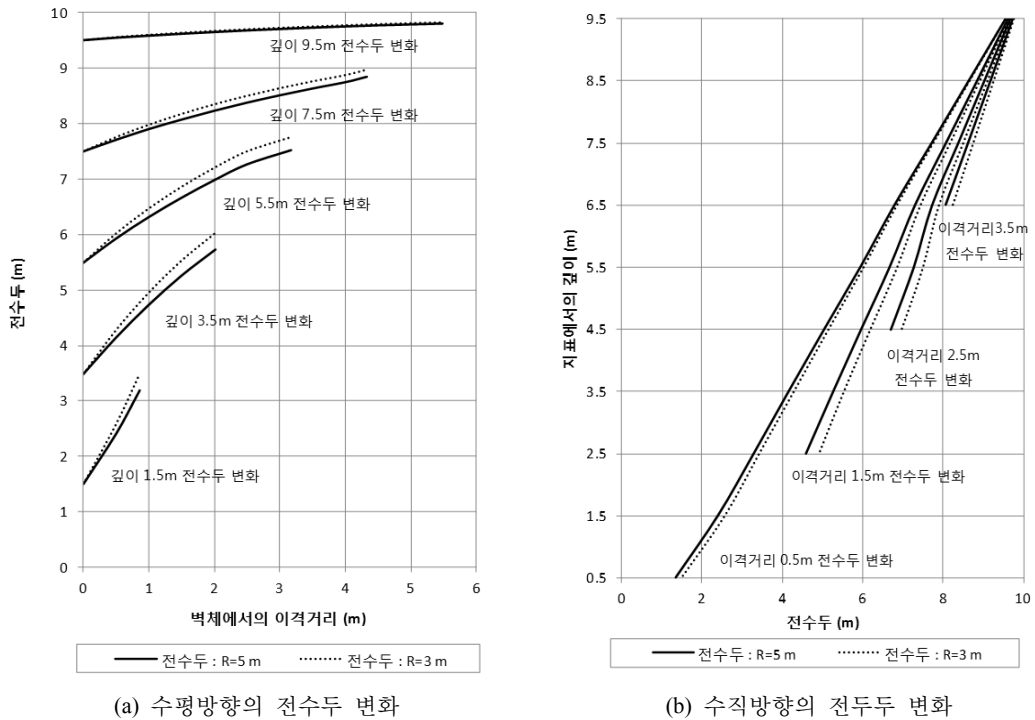


그림 8. 일정 위치에서의 전수두 변화



크게 나타남에 따라 수평방향이 커짐을 본 연구에서 수행한 침투해석을 통해 알 수 있었다.

본 연구에서 수행한 침투해석의 결과 원형수직터널에서 지하수의 흐름은 깊이에 따라 변화하게 되고, 흐름방향은 경사를 가지기 때문에 수직과 수평방향의 흐름성분을 모두 고려하여 침투력을 산정하여야 한다. 따라서, 침투력을 고려하기 위해서는 이론식에서 이러한 경사의 흐름을 고려하여야 하는 것으로 판단된다.

#### 4. 침투력을 고려한 이론식 산정

##### 4.1 침투력을 고려한 토압계수식 산정

김도훈 등(2009)는 원형수직터널에서 아칭현상이 고려된 토압을 산정하기 위해 토압계수식과 토압식을 제안하였다. 토압계수식을 제안하는 과정에서 파괴면을 가정하고 파괴면에서의 응력의 회전과 미소토체에 작용하는 응력을 이용하여 수식을 유도하였다. 하지만, 침투력 또한 파괴면에 작용되는 힘이므로 침투력이 작용되면 미소토체에 작용하는 응력이 달라짐에 따라 수직응력과 수평응력의 비로 나타나는 토압계수는 달라지게 되어 침투력을 고려하기 위해서는 토압계수를 새로이 산정하여야 한다. 기존에 제안된 토압계수식은 벽면 마찰에 의해 회전된 응력을 고려하여 산정된 것이다. 하지만, 물의 흐름에 의해 발생하는 침투력은 벽면 마찰에 따라 회전되지 않으며, 회전된 응력면에 추가적인 힘으로 작용하게 된다. 물의 흐름이 경사방향으로 발생하기 때문에 수직 및 수평 방향 모두 추가적인 힘이 발생되며, 이로 인해 수직방향과 수평방향의 비로 나타나는 토압계수

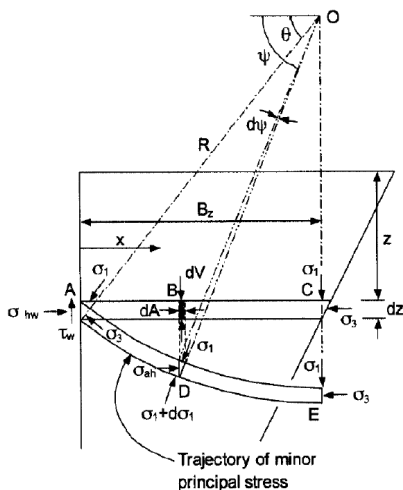


그림 9. 파괴면의 응력상태(Paik과 Salgado, 2003)

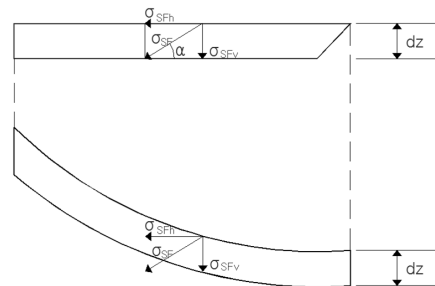
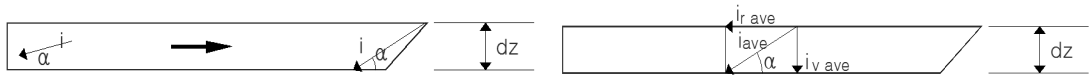


그림 10. 미소토체에서 침투력의 작용



(a) 미소토체의 동수경사 발생 경향

(b) 미소토체의 평균동수경사

그림 11. 미소토체에서의 동수경사

는 변화하게 된다. 또한, 물의 흐름 방향이 깊이에 따라 달라지기 때문에 깊이별로 토압계수를 산정하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 이를 고려한 토압계수를 유도하였다. 그림 9는 기존의 연구에서 벽면마찰저항에 의해 회전되어진 응력을 보인 것이며, 그림 10은 응력이 방향이 회전하여도 회전하지 않는 동수경사의 방향을 나타낸 것이다.

그림 11(a)는 침투해석의 결과에서부터 흐름방향을 고려한 동수경사의 발생 경향을 나타낸 것이다. 미소토체내에서의 흐름방향은 벽체에서 이격될수록 수직성분이 강하게 되며, 벽체에 이격거리가 작을수록 수평성분이 강하게 작용한다. 침투력을 적용하려면 이러한 방향성에 대한 고려가 필요하고, 본 연구에서는 이러한 흐름방향을 변화를 평균동수경사의 각도를 산정하여 고려하였다. 그림 11(b)에 나타난 것과 같이 동수경사가 이루는 각도의 평균을 구하여 이를 평균동수경사로 하고, 구해진 평균동수경사를 수직 및 수평방향 성분으로 나누어 적용하였다.

그림 9에서 벽면마찰에 의한 응력방향의 회전은 물의 흐름에 의해 추가적인 영향이 없기 때문에 기존의 연구와 동일하며, 회전각도( $\theta$ )는 식 (3)과 같다.

$$\theta = \tan^{-1} \left[ \frac{(K_i - 1)\sigma_3' \tan \phi \pm \sqrt{\{(K_i - 1)\sigma_3' \tan \phi\}^2 - 4 \tan^2 \delta (K_i \sigma_3' \tan \phi + c)(\sigma_3' \tan \phi + c)}}{2(\sigma_3' \tan \phi + c) \tan \delta} \right] \quad (3)$$

$$K_i = \frac{\sigma_1'}{\sigma_3'} = \frac{1}{\tan^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right) - 2 \frac{c}{\sigma_1'} \tan \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right)} \quad (4)$$

여기서,  $\phi$  는 내부마찰각,  $c$  는 점착력,  $\delta$  는 벽면마찰각이며, 이러한 강도정수는 지하수 흐름 유무에 따라 변하지 않는 것으로 가정하였다. 그림 9에  $A$ 의 삼각형 요소에서 수평방향의 힘의 평형은 식 (5)로 표현되며, 이와 유사하게  $D$ 의 위치에서 수평응력은 식 (6)과 같이 나타난다.

$$\sigma_{hw}' = \sigma_1' \cos^2 \theta + \sigma_3' \sin^2 \theta \quad (5)$$

$$\sigma_{ah}' = \sigma_1' \cos^2 \psi + \sigma_3' \sin^2 \psi \quad (6)$$

Mohr 원인 그림 12에 의해 식 (7)이 성립되고, 식 (6)와 식 (7)에 의해 식 (8)을 구할 수 있다.

$$\sigma_{ah}' + \sigma_v' = \sigma_1' + \sigma_3' \tag{7}$$

$$\sigma_v' = \sigma_1' \sin^2 \psi + \sigma_3' \cos^2 \psi \tag{8}$$

식 (6)과 식 (8)에 침투력을 더하면 식 (9)과 식 (10)으로 정의된다.

$$\sigma_{ah} = \sigma_1' \cos^2 \psi + \sigma_3' \sin^2 \psi + SF_h \tag{9}$$

$$\sigma_v = \sigma_1' \sin^2 \psi + \sigma_3' \cos^2 \psi + SF_v \tag{10}$$

여기서,  $SF_h$ 와  $SF_v$ 는 침투력의 수평과 수직방향의 성분이며,  $SF_h = i_{have} \gamma_w B_z$ ,  $SF_v = i_{have} \gamma_w z$ 이고,  $B_z = R \cos \theta$ 이다. 주동토압계수는 수직방향 응력의 평균과 수평방향 응력으로 정의되며, 평균 수직방향 응력은 식 (11)과 같이 임의의 깊이( $z$ )에 작용하는 전체 수직방향 하중을 임의의 깊이에서의 폭( $B_z$ )으로 나누어 구할 수 있다.

$$\bar{\sigma}_v = \frac{V}{B_z} = \frac{1}{\cos \psi} \int_0^{\pi/2} \sigma_1' \left( \sin^2 \psi + \frac{1}{K_i} \cos^2 \psi + SF_v \frac{SF_v}{\sigma_1'} \right) \sin \psi d\psi \tag{11}$$

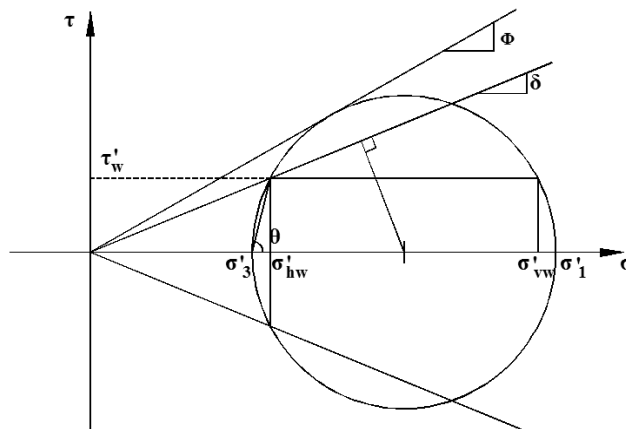


그림 12. 침투력 작용시 응력의 Mohr 원

식 (11)을 정리하면, 식 (12)로 표현되며 식 (9)에 침투수력을 더한 비를 통하여 지반의 토압계수를 산정할 수 있다.

$$\bar{\sigma}_v = \sigma_1' \left( 1 - \frac{K_i - 1}{3K_i} \cos^2 \theta + \frac{SF_v}{\sigma_1'} \right) \quad (12)$$

$$\frac{\sigma_{hw}}{\sigma_v} = k_{wa(seepage)} = \frac{3(K_i \cos^2 \theta + \sin^2 \theta) + 3k_i SF_h}{3K_i - (K_i - 1) \cos^2 \theta + 3k_i SF_v} \quad (13)$$

구해진 토압계수는 식 (13)과 같다. 원형수직터널인 경우 벽체의 변위는 내측으로 발생되고 토압은 반경방향으로 발생됨에 따라 이를 침투력을 고려한 원형수직터널에 작용하는 응력을 산정하는 식에서 반경방향토압계수로 적용하였다.

#### 4.2 침투력을 고려한 원형수직터널에 작용하는 응력 산정식

김도훈 등(2009)은 원형수직터널의 파괴면을 바닥과 ‘ $\beta=45+\phi/2$ ’의 각도를 이루는 깔때기형으로 가정하고 이완영역의 미소토체에 반경방향 토압계수와 접선방향 토압계수를 이용하여 3차원적인 응력인 수직방향응력, 반경방향응력, 접선방향응력을 고려하여 수직아칭과 수평아칭을 고려하였다. 본 연구는 원형수직터널에서 지하수흐름이 발생하는 지반에서의 토압을 산정하기 위해 침투력을 추가적으로 고려하였다. 지하수가 영향을 미치는 범위는 토압을 야기하는 이완영역과 동일한 것으로 하였고, 침투력을 고려하기 위해 본 연구에서 유도한 식 (13)의 반경방향 토압계수를 적용하였다. 또한 접선방향응력을 고려하기 위해 접선방향 토압계수( $\lambda$ )인 ‘ $1 - \sin \phi$ ’를 적용하였다. 침투해석시 접선방향으로는 흐름이 발생하지 않기 때문에 접선방향 토압계수는 건조한 지반의 토압계수와 동일한 것으로 하였다. 반경방향 토압계수와 접선방향 토압계수를 적용하여 침투력을 고려함과 동시에 원형수직터널의 배면지반에서 발생하는 3차원적 응력을 고려할 수 있도록 하였다. 그림 13은 깔때기형 파괴면을 나타낸 것이며, 그림 14는 침투력을 추가한 경우에 미소토체의 힘의 평형을 나타낸 것이다.  $\sigma_{SF_v}$ 와  $\sigma_{SF_r}$ 은 각각 수직방향과 반경방향의 침투력을 표현한 것이며, 침투력은 토압계수식과 동일하게 미소토체에서의 평균동수경사를 이용하여 산정하는 것으로 하였다.

그림 13에서  $R$ 은 원형수직터널 단면의 반지름,  $r$ 은 이완영역의 크기,  $z$ 는 임의의 미소토체까지의 거리,  $H$ 는 원형수직터널의 깊이를 나타낸다.  $r$ 은 식 (14)와 같이 나타나며, 임의의 깊이에서의 이완영역의 면적( $A$ )은 식 (15)로 나타난다.

$$r = \frac{(H - z)}{\tan \beta} \tag{14}$$

$$A = \pi(2rR + r^2) \tag{15}$$

그림 14에서  $N_f$ ,  $N_w$ 는 파괴면과 벽면에서의 수직저항력이며,  $\tau_f$ ,  $\tau_w$ 는 파괴면과 벽면에서의 전단저항력이다. 그림 14을 참조하여 미소토체의 수평방향 힘의 평형방정식을 구하면 식 (16)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \int_0^{2\pi} N_w R d\theta dz + \int_0^{2\pi} 2\sigma_t \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) r dz + \int_0^{2\pi} \tau_f \frac{\cos \beta}{\sin \beta} (r + R) d\theta dz \\ & = \int_0^{2\pi} N_f \frac{\cos(90 - \beta)}{\sin \beta} (r + R) d\theta dz + \int_R^{r+R} \gamma_w i_{rave} dz 2\pi r dr \end{aligned} \tag{16}$$

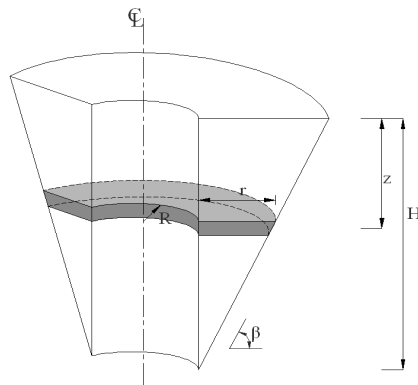
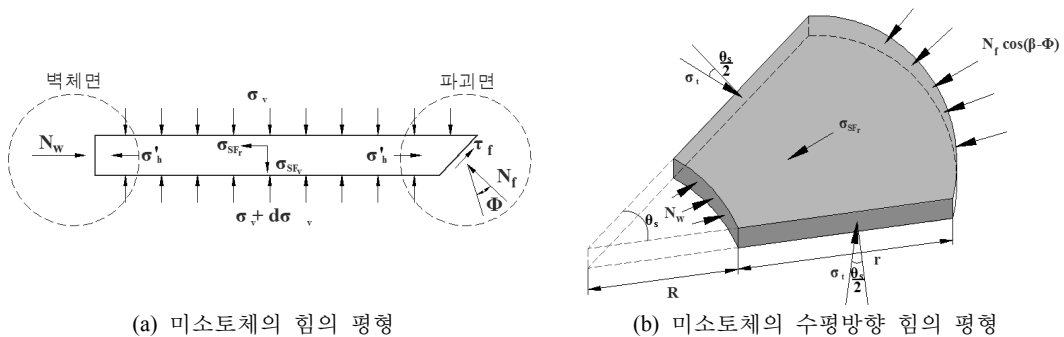


그림 13. 깔때기형 이완영역



(a) 미소토체의 힘의 평형

(b) 미소토체의 수평방향 힘의 평형

그림 14. 힘의 평형

여기서,  $\sigma_v$ 는 접선방향 응력이며 '(1-sin $\phi$ ) $\sigma_v$ '로 구해진다. 식 (16)을 적분하여  $N_f$ 의 식으로 나타내면 식 (17)로 표현된다.

$$N_f = \frac{(Rk_{wa(seepage)} + r\lambda)\sigma_v + c \frac{(r+R)}{\tan \beta} - \frac{\gamma_w i_{rave}(2R+r)r}{2}}{R+r} \frac{\tan \beta}{\tan \beta - \tan \phi} \quad (17)$$

그림 14(a)로부터 수직방향 힘의 평형방정식을 구하면 식 (18)과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} & \sigma_v A + Adzr + \gamma_w i_{rave} Adz \\ & = (\sigma_v + d\sigma_v)A + 2\pi R \tau_w dz + 2\pi(r+R) \{ \tau_f \sin \beta + N_f \sin(90 - \beta) \} \frac{dz}{\sin \beta} \end{aligned} \quad (18)$$

식 (17)을 식 (18)에 대입하여 정리하면 식 (19)로 표현된다.

$$\frac{d\sigma_v}{dz} + T_{SF} \sigma_v = S_{SF} \quad (19)$$

여기서,  $S_{SF}$ 와  $T_{SF}$ 는 아래와 같다.

$$S_{SF} = \frac{2\pi}{A} \left\{ k_{wa(seepage)} R \tan \delta + (K_{wa(seepage)} R + \lambda r) \frac{1 + \tan \beta \tan \phi}{\tan \beta - \tan \phi} \right\} \quad (20)$$

$$T_{SF} = r' - \frac{2\pi}{A} \left[ c_w R + (R+r) \left\{ c + \left( \frac{c}{\tan \beta} - \frac{\gamma_w i_{rave}(2R+r)r}{2(R+r)} \right) \frac{1 + \tan \beta \tan \phi}{\tan \beta - \tan \phi} \right\} \right] + \gamma_w i_{rave} \quad (21)$$

식 (19)를  $z=0$ ,  $\sigma_v = q$  (상재하중)인 경계조건을 이용하여 풀면 식 (22)로 나타내어진다.

$$\sigma_v = \left( q - \frac{T_{SF}}{S_{SF}} \right) e^{-S_{SF}z} + \frac{T_{SF}}{S_{SF}} \quad (22)$$

식 (22)은 침투력을 고려한 경우에 수직방향응력을 산정하는 식이며, 식 (23)에 의해 최종적으로 원형수직터널 벽면에 작용하는 응력을 산정할 수 있다.

$$p_i = k_{wa(seepage)} \sigma_v \tag{23}$$

### 4.3 침투력을 고려한 원형수직터널 작용 응력 산정

제안된 식을 통하여 원형수직터널에 작용하는 응력을 계산하기 위해서는 동수경사의 산정이 필요하다. 제안식에 적용된 평균동수경사는 그림 15에서 보이듯이 동수경사의 작용 각도( $\alpha$ )를 구하면 산정할 수 있으므로, 정상류 상태의 침투해석을 수행하여  $\alpha$ 를 구하였다. 앞서 실시한 Case 1의 조건의 결과에서부터  $\alpha$ 를 각 깊이별로 산정하였다.

평균동수경사의 각도를 구하면, 그림 15와 같이  $dz$ 의 깊이를 가지는 미소토체의 상부와 하부의 수두를 식 (24)와 식 (25)를 통해 구할 수 있다.

$$h_1 = H - z + \frac{r}{2} \tan \beta_1 \tag{24}$$

$$h_2 = H - z - dz - \left( \frac{r}{2} - \frac{dz}{\tan \alpha_1} \right) \tan \beta_1 \tag{25}$$

여기서,  $\alpha_1$ 은 임의의 깊이에서 깊이  $dz$ 를 가지는 미소토체에서의 평균동수경사의 각도이고  $\beta_1$ 은 등수두선의 각도이며, 미소토체의 상부에서의 평균동수경사의 각도는  $\alpha_2$ 이고  $\beta_2$ 는 등수두선의 각도이다. 흐름거리( $L$ )은 식 (26)에 의해 산정되며 평균동수경사는 식 (27)에 의해 계산된다.

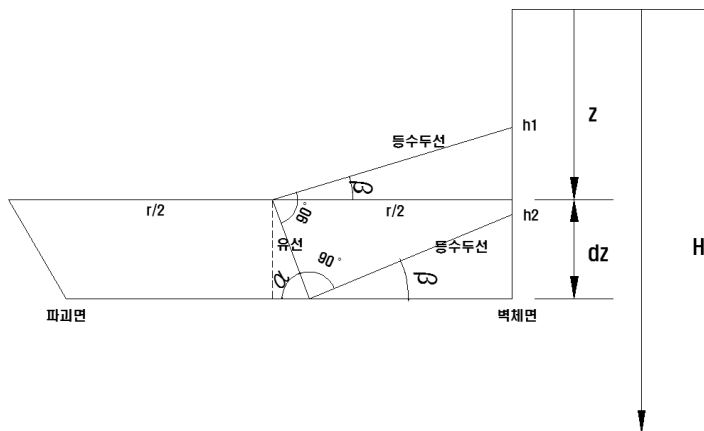


그림 15. 동수경사의 산정

$$L = \frac{dz}{\sin \alpha_1} \quad (26)$$

$$i_{ave} = \frac{\Delta h}{L} \quad (27)$$

평균동수경사의 수직방향 및 반경방향 성분은 식 (28)과 식 (29)를 통해 산정된다.

$$i_{vave} = i_{ave} \sin \alpha_1 \quad (28)$$

$$i_{rave} = i_{ave} \cos \alpha_1 \quad (29)$$

산정된 동수경사를 그림 16으로 표현하였다. 그림 16(a)는 동수경사의 수평(반경)방향 성분이고 그림 16(b)는 수직방향 성분을 나타낸 것이다. 그림 16을 참조하면, 수평방향 성분과 수직방향 성분은 깊이가 깊어짐에 따라 증가하게 되며, 심도가 깊어짐에 따라 수평방향 흐름의 증가가 수직방향의 증가보다 크게 발생되어 수평방향 성분이 상대적으로 크게 나타난다.

산정된 평균동수경사를 이용하여 표 2의 조건을 가진 원형수직터널의 반경방향 토압계수를 구하면 그림 17과 같다.

침투력이 고려됨에 따라 그림 17에 보이듯이 기존의 제안식에 비하여 큰 토압계수를 산정하게

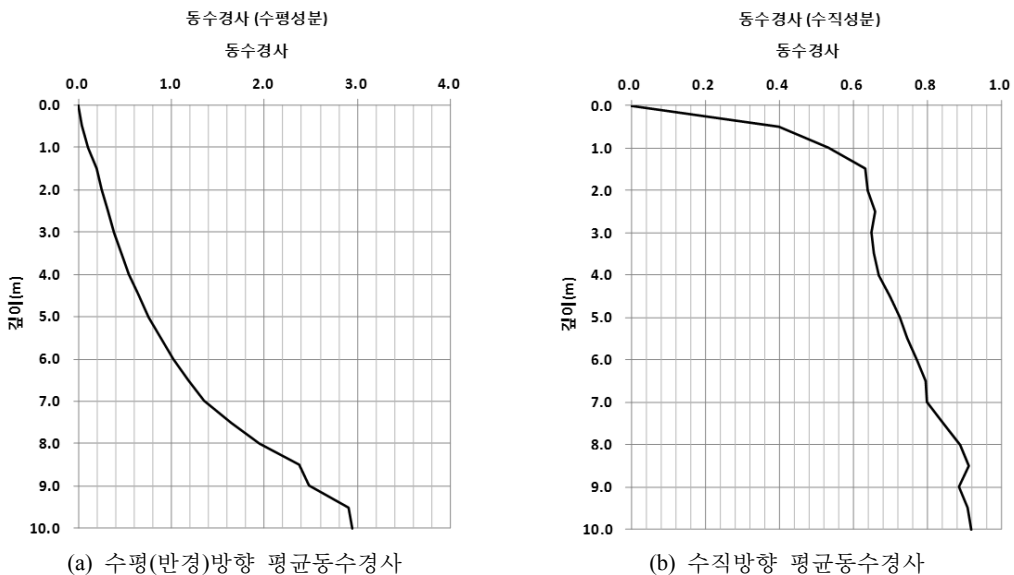


그림 16. 평균동수경사의 발생 경향



된다. 이러한 이유는 원형수직터널의 배수가 벽면에서 발생하여 물의 흐름이 수직성분보다 수평방향의 성분이 크게 나타나 발생된 것이다. 또한, 상부지반에서 토압계수가 크게 산정된 것은 가정된 파괴면의 상부에서 부피가 하부에 비하여 상대적으로 크기 때문에 발생된 것으로 판단된다. 하부에서 토압계수가 작아지는 것도 동일한 현상인 것이다.

침투력이 고려되었을 때에 원형수직터널에 작용하는 응력을 비교하기 위해 다음 표 3과 같은 조건에서 응력을 구하여 비교하였다. 그림 15는 구해진 수직응력과 수평응력을 보인 것이다.

그림 18(a)는 수직방향 응력의 분포를 나타낸 것이고 그림 18(b)는 원형수직터널에 작용하는 응력을 나타낸 것이다. 침투력을 고려한 경우가 가장 큰 응력 분포를 보이며, 각각의 합력은 Case 3의 경우 43 kPa, Case 4의 경우 97 kPa, Case 5의 경우 247 kPa로 산정되었다. Case 4의 경우가 일반적으로 배수 후 지하수위가 감소하였다고 가정하여 설계에서 고려하는 응력이다. 하지만, 지하수위가 증가하여 배수가 진행되어 침투력이 발생하는 경우에는 Case 5의 경우와 같이 침투력에 의한 응력이 지배응력이 됨을 알 수 있다. 따라서 지하수위가 회복될 가능성이 있는 경우 배수구조

표 2. 원형수직터널 및 지반 조건

지반 특성					원형수직터널 특성	
단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	유효단위 중량(kN/m <sup>3</sup> )	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)	벽면마찰각 (°)	반지름 (m)	깊이 (m)
18	8	0	30	0	3	10

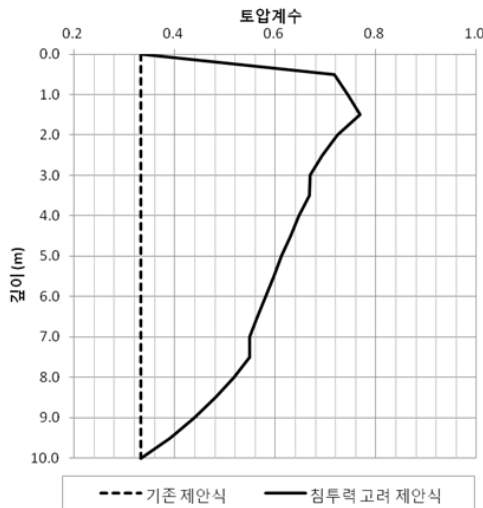
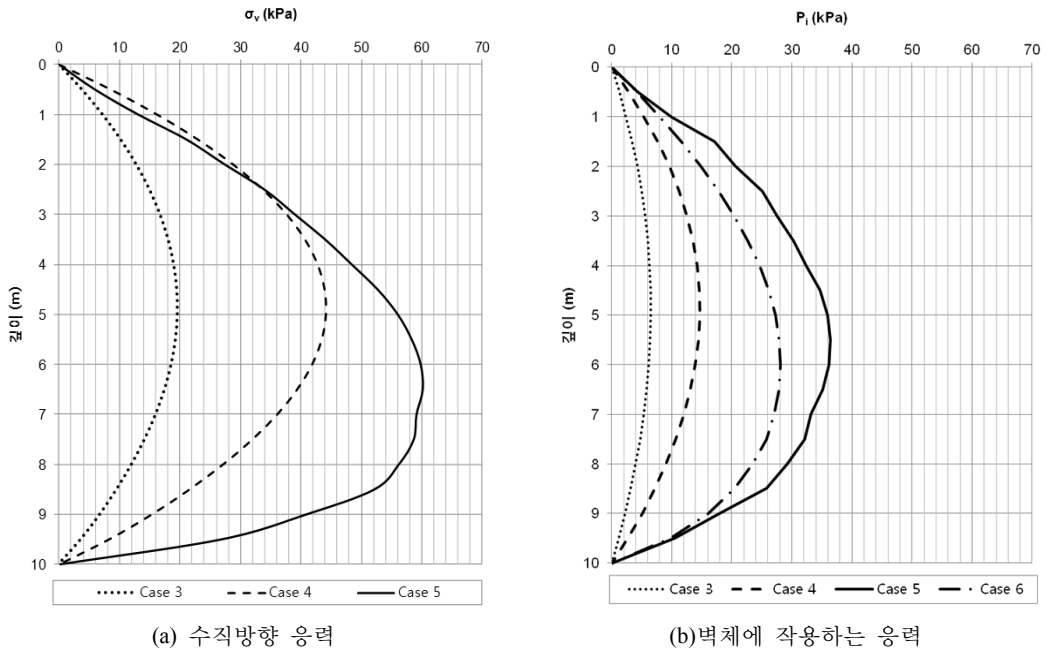


그림 17. 침투력을 고려한 토압계수

**표 3. 원형수직터널 작용 응력 비교 조건**

구분	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
토압계수식	기존 제안식	기존 제안식	침투력 고려 제안식	기존 제안식
토압식	기존 제안식	기존 제안식	침투력 고려 제안식	기존 제안식
단위 중량	유효단위중량	습윤단위중량	유효단위중량	유효단위중량
계산 응력	유효응력	전응력	유효응력+침투력	침투해석결과

물로 설계한 경우라도 침투력의 고려하여 작용응력을 산정하고 이를 통하여 구조물 안정해석을 수행하는 것이 필요하다. 그림 18(b)의 Case 6은 수치해석에서 각 깊이에서 수평으로 변하는 수두차를 이용하여 구한 침투력을 건조한 지반의 제안식에 유효단위중량을 대입하여 구한 유효수평응력에 더한 값을 비교한 것이다. 즉, 수직방향의 흐름을 제외하고 수평흐름만을 가정하여 수두를 산정하고 이를 통해 구한 침투력을 이용하여 ‘유효응력+침투력’의 개념으로 구한 것이다. 결과에서 보이듯이 침투력을 고려한 제안식에 의한 값(Case 5)이 더 큰 값을 나타낸다. 이는 제안식이 수직방향의 침투력을 고려하여 더 큰 응력을 산정하는 것으로 판단된다. 하지만, 응력의 분포가 유사하고 최대 값에서 약  $8kPa$  차이가 발생하여 차이가 크지 않으므로 제안식은 침투력을 고려하여 적절한 결과를 산정하는 것으로 보이며, 제안식이 침투력이 발생되는 지반에서 적용가능할 것으로 판단된다.



**그림 18. 침투력 고려시 응력분포**

## 5. 결 론

본 연구는 침투력을 고려할 시에 원형수직터널의 거동을 파악하기 위해 수행한 것이다. 원형수직터널의 흐름특성을 파악하기 위해 3D 침투해석을 실시하였으며, 침투력을 고려할 경우에 적용 가능한 토압계수식과 벽체에 작용하는 응력 산정식을 제안하였다. 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 원형수직터널이 지하에 설치되는 경우 지하수의 흐름은 일반적인 수평터널과 달리 깊이 방향으로 경사진 흐름이 발생되게 되어, 각 깊이별로 흐름 강도가 달라지게 된다. 또한, 침투해석결과 심도가 깊어짐에 따라 수평방향의 흐름이 강하게 나타나게 된다. 따라서 침투력 고려시 각 깊이에서 흐름의 수직성분과 수평성분을 모두 고려하여야 한다.
2. 침투력을 고려하여 토압계수를 산정하는 경우, 침투력에 의해 작용되는 추가적인 힘으로 인해 수직방향응력과 수평방향응력의 비가 달라짐에 따라 침투력을 고려하지 않은 경우에 비하여 큰 토압계수를 산정하였다. 산정된 토압계수의 분포는 가정된 파괴면과 유사한 경향을 보였다. 이는 침투력이 적용부피에 따라 비례하여 나타나기 때문인 것으로 판단된다.
3. 원형수직터널에 작용되는 응력 해석에서 침투력을 고려한 경우에는 기존의 제안식에 비해 약 2.5배 큰 응력을 산정하였다. 이는 침투력이 작용할 때에는 침투력이 구조물을 지배하는 응력임을 보이는 것이다. 따라서, 원형수직터널을 배수 구조물로 계획하더라도 지하수위의 변화에 따라 침투력의 발생여부를 검토하여야 하는 것으로 판단된다.
4. 침투력을 고려한 제안식의 토압은 침투해석의 결과 중에서 깊이별로 수평의 수두차이로만 구한 전응력에 비하여 1.3배 큰 것으로 계산되었으며, 이는 제안식이 수직방향의 흐름을 고려하기 때문에 발생된 것으로 판단된다. 하지만, 두 가지 경우 모두 발생하는 응력의 분포와 크기는 유사하게 나타나, 제안식이 수직 및 수평성분의 침투력을 적절히 반영하는 것으로 판단된다.

본 연구에서 지하수 흐름이 발생할 시에 지반 강도의 변화는 없는 것으로 가정하였으나, 점착력 중에 걸보기 점착력은 지하수의 유무에 따라 강도가 크게 변화되므로 적용 시 주의가 요구될 것으로 판단된다. 또한, 본 연구는 원형수직터널의 가시설이 배수구조물인 경우를 가정하고 수행된 것으로 침투가 발생되지 않는 조건인 비배수 조건에서는 수압을 적용하여 원형수직터널의 안정성을 검토하여야 한다.

---

## 참 고 문 헌

1. 김도훈, 이대수, 김경렬, 이용희, 이인모(2009), “ $C-\phi$  지반에서의 아칭현상을 고려한 원형수직터널 토압: I. 이론”, 한국터널공학회 논문집, 제11권, 제2호, pp. 117-129.
2. 신영완, 문경선, 강휴택, 이승호(2008), “현장계측을 통한 원형수직구 작용하중 분석”, 한국지반환경공학회 논문집, 제9권, 제4호, pp. 63-76.
3. 신영완, 사공명(2007), “벽체형상비의 영향을 합리적으로 고려한 원형수직구 벽체에 작용하는 토압산정방법”, 한국터널공학회 논문집, 제9권, 제2호, pp. 143-155.
4. 신영진, 김병민, 신종호, 이인모(2007), “침투력을 고려한 터널의 지반반응곡선”, 한국터널공학회 논문집, 제9권, 제2호, pp. 183-204.
5. 이인모(2004), “터널의 지반 공학적 원리”, 도서출판 새문, pp. 157-164.
6. 이인모, 문홍표, 이대수, 김경렬, 조만섭(2007), “다층지반에서의 아칭현상에 의한 수직갱 토압”, 한국터널공학회 논문집, 제9권, 제1호, pp. 49-62.
7. 천병식, 신영완(2003), “사질토 지반의 원형수직구에 설치된 흙막이벽에 작용하는 토압”, 한국지반공학회 논문집, 제19권, 5호, pp. 175-187.
8. Lee, I.M., Nam, S.W. (2001), “The study of seepage forces acting on the tunnelling and tunnel face in shallow tunnels”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 16, pp. 31-40.
9. Lee, S.W., Jung, J.W., Nam, S.W., Lee, I.M. (2007), “The influence of seepage forces on ground reaction curve of circular opening”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 21, pp. 28-38.