

## **터널굴진율이 막장에서의 침투력에 미치는 영향에 관한 연구** **Effect of Tunnel Advance Rate on the Seepage Forces** **Acting on the Tunnel Face**

남석우<sup>1)</sup>, Seok-Woo Nam, 이인모<sup>2)</sup>, In-Mo Lee

<sup>1)</sup> 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 박사후과정, Doctoral Research Fellow, Dept. of Civil Eng., Korea Univ.

<sup>2)</sup> 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Korea Univ.

**SYNOPSIS** : In this study, the effect of tunnel advance rate on the seepage forces acting on the tunnel face was studied. The finite element program to analyze the groundwater flow around a tunnel with the consideration of tunnel advance rate was developed. Using the program, the parametric study for the effect of the tunnel advance rate and hydraulic characteristics of the ground on the seepage forces acting on the tunnel face was studied. From this study, it was concluded that the tunnel advance rate must be taken into consideration as an additional parameter to assess the seepage forces at the tunnel face and a rational design methodology for the assessment of support pressures required for maintaining the stability of the tunnel face was suggested for underwater tunnels.

**Key words** : seepage force, tunnel advance rate, support pressure

### **1. 서론**

지하수가 상존하는 지반에서 터널 굴착이 이루어질 경우, 터널 막장으로는 지하수의 침투가 발생하게 되며, 이에 따라 터널 막장 주변의 전수두는 재분포 되어 궁극적으로 지하수 흐름은 정상류 상태에 도달하게 된다. 그러나 이러한 정상류 상태의 전수두 분포는 굴착 직후에 곧바로 발생하지 않으며, 그 시간은 지반의 투수특성이나 터널 굴진율(advance rate)에 따라 좌우된다. 지반의 투수계수가 작을수록, 그리고 저류율(storativity)이 클수록 터널 굴착에 따른 막장 주변의 지하수 흐름이 정상류 상태에 도달하는데 걸리는 시간은 증가하게 된다. 그리고 투수성이 매우 좋은 지반의 경우 또는 터널 굴진율이 매우 낮은 경우를 제외하고는 터널 굴진율은 막장 주변의 지하수 흐름을 평가하는데 있어서 또 하나의 요소로서 고려되어야 하며, 이는 전수두 분포는 터널 굴진율에 따라 변하기 때문이다(Goodman, 1965). Anagnostou(1993)는 유한요소 해석을 통하여 굴진율이 터널 주변의 수두변화에 미치는 영향에 대해서 연구하였으며, 그 결과 터널 굴진율은 막장에 작용하는 침투력과 밀접한 관계가 있으며, 따라서 터널 막장의 안정성을 평가하는데 있어서 반드시 고려하여야 할 요소임을 언급하였다. 이와 관련하여, 본 연구에서는 터널 굴진율을 고려한 침투해석을 실시할 수 있는 유한요소 프로그램을 자체 개발하였으며, 매개변수 분석을 통하여 터널 굴진율이 터널 막장에 작용하는 침투력에 미치는 영향을 보다 자세하게 정량적으로 분석하고자 하였다.

## 2. 터널 굴진율을 고려한 수치해석 모델링

Anagnostou(1993)는 터널 굴진율이 터널 주변의 수두 변화에 미치는 영향에 대해서 연구하였으며, 지하수 흐름의 수정된 지배방정식을 제안하였다. 연속적으로 굴착되는 터널 주변의 지하수 흐름에 대한 방정식은 기존의 지하수 흐름방정식을 그림 1에서 보인 바와 같이 터널 막장에 고정된 참고축(face fixed frame of reference) 내에서 재산정함으로써 얻을 수 있다.

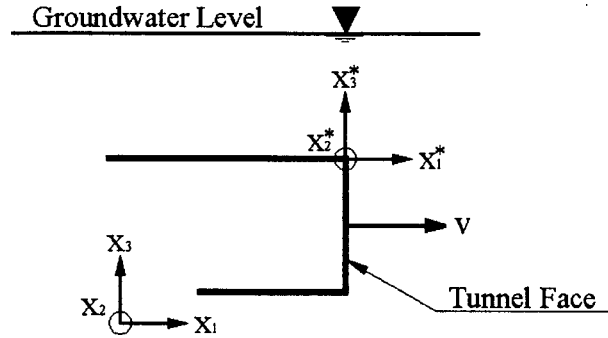


그림 1. 터널 막장에 고정된 참고축의 개념도

기존의 지하수 흐름방정식은 다음의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$s \frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

여기서,  $s$ 는 비저류계수(specific storage coefficient),  $k$ 는 투수계수이며,  $h$ 는 전수두를 나타낸다. 본 방정식은 유한요소해석을 이용하여 풀 수 있으며, weighted residual Galerkin method를 이용하면 식 (2)에서와 같은 상미분 방정식을 얻을 수 있다 (Istok, 1989).

$$[C] \frac{\partial}{\partial t} \{h\} + [K] \{h\} = \{F\} \quad (2)$$

여기서,  $[C]$ 는 global capacitance matrix,  $[K]$ 는 global conductance matrix, 그리고  $\{F\}$ 는 global specified flow matrix이다.

Anagnostou(1993)는 터널의 연속적인 굴착에 따른 터널 주변의 수두변화를 예측하기 위하여 상기 지하수 흐름방정식을 터널 막장면에 고정된 참고축 내에서 재산정하였으며, 그 개념은 그림 1에서 보인 바와 같다. 막장에 고정된 참고축을 기준으로 한 임의의 점에서의 위치벡터  $x_k^*$ 는 식 (3)에서와 같이 나타낼 수 있다.

$$x_k^* = x_k - x_k^{(f)}(t) \quad (3)$$

여기서,  $x_k^{(f)}(t)$ 와  $x_k$ 는 각각 공간적으로 고정된 좌표계에서 터널 막장 및 임의의 점에서의 위치벡터를 나타낸다. 식 (3)으로부터 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\left. \frac{\partial x_k^*}{\partial x_m} \right|_t = \delta_{km} \quad (4)$$

$$\left. \frac{\partial x_k^*}{\partial t} \right|_{x_m} = -\frac{\partial x_k^{(f)}}{\partial t} = v_k \quad (5)$$

여기서,  $\delta_{km}$ 은 Kronecker's delta이며,  $v_k$ 는 굴진율 벡터(advance rate vector)로서  $v_k = v \delta_{1k}$ 이다. 다음으로 전수두 함수를  $A(x, t)$ 라고 한다면 막장에 고정된 참고축에서의 전수두 함수  $A^*$ 와는 다음과 같은

관계가 성립한다.

$$A^*(x^*, t) = A(x, t) \quad (6)$$

여기서,  $x^*$ 는 공간적으로 고정된 좌표계에서의  $x$ 와 식 (3)에서의 관계가 성립한다. 식 (4) 및 식 (5)를 고려하여 식 (6)을 미분하면 식 (7) 및 식 (8)의 관계를 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial A}{\partial x_k} \Big|_t = \frac{\partial A^*}{\partial x_k^*} \quad (7)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} \Big|_{x_k} = -v_m \frac{\partial A^*}{\partial x_k^*} + \frac{\partial A^*}{\partial t} \quad (8)$$

식 (7)에서 보인 바와 같이 공간적으로 고정된 좌표계에서  $A$ 의 공간에 따른 변화율은 막장에 고정된 참고축에서의 변화율과 같지만 식 (8)에서 보인 바와 같이 함수  $A$ 의 시간에 따른 변화율은 매우 다름을 알 수 있다. 터널이 연속적으로 굴착될 경우에 수두계는 식 (7)에서와 같이 의사 정상류상태 (quasi-steady state)에 이르게 되는데, 이는 막장에 고정된 참고축을 기준으로 정상류 상태임을 의미한다. 즉,

$$\frac{\partial A^*}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

따라서, 식 (8)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -v_m \frac{\partial A^*}{\partial x_m^*} \quad (10)$$

식 (7)과 식 (8)을 고려하여 식 (1)을 재산정하면 다음과 같은 관계가 도출된다.

$$s \frac{\partial h^*}{\partial t} - sv_m \frac{\partial h^*}{\partial x_m^*} = \frac{\partial}{\partial x_i^*} \left( k \frac{\partial h^*}{\partial x_i^*} \right) \quad (11)$$

의사 정상류상태에서 식 (11)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-\frac{\partial}{\partial x_m^*} k \frac{\partial h^*}{\partial x_m^*} + sv \frac{\partial h^*}{\partial x_1^*} = 0 \quad (12)$$

여기서,  $x_1^*$ 은 터널 축과 평행한 좌표축을 의미한다. 식 (11)은 유한요소법에 의하여 그 해를 산출할 수 있으며, weighted residual Galerkin method를 적용하면 다음과 같은 방정식이 산출된다.

$$[C] \frac{\partial}{\partial t} \{h\} + [K - V] \{h\} = \{F\} \quad (13)$$

여기서,  $[V]$ 는 global advance rate matrix로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[V] = \sum_{e=1}^n \int_{V_e} \begin{bmatrix} N_1^{(e)} \\ \vdots \\ N_n^{(e)} \end{bmatrix} [S_s^{(e)}] [v_{kx} \ v_{ky} \ v_{kz}] \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_n^{(e)}}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial y} & \dots & \frac{\partial N_n^{(e)}}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial z} & \dots & \frac{\partial N_n^{(e)}}{\partial z} \end{bmatrix} dV \quad (14)$$

여기서,  $v_{kx}, v_{ky}, v_{kz}$ 은 각각  $x, y$  및  $z$ 축에 평행한 터널 굴진율을 의미한다. 의사 정상류상태에서 식 (13)의 시간에 따른 미분항은 사라지며, 결과적으로 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$[K - V] \{h\} = \{F\} \quad (15)$$

식 (15)를 이용함으로써 연속적인 터널 굴착이 이루어질 경우 터널 주변의 의사 정상류상태에서의 전수 두 변화를 시간에 따른 반복계산 없이 산출할 수 있게 된다. 식 (15)를 유한요소법에 의하여 해석하기 위하여 본 연구에서는 정상류 상태의 지하수 흐름을 계산하는 프로그램인 GW1 (Istok, 1989)에서

global conductance matrix,  $[K]$ 를 터널굴진율을 고려한 matrix인  $[K-V]$ 로 수정하여 새로이 프로그램을 개발하였으며, 이를 'GACET (Groundwater Analysis for Continuously Excavated Tunnel)'이라 명명하였다. 프로그램 'GACET'은 식 (12)에 의거하여 터널 굴진율을 고려한 의사정상류 상태의 지하수 흐름을 해석하는 3차원 해석 프로그램이다.

### 3. 매개변수 분석

#### 3.1 해석조건

터널 굴진율이 터널 막장에 작용하는 침투력에 미치는 영향을 분석하기 위하여 그림 2에서 보인 바와 같은 해석단면을 설정하였다. 터널은 직경 5.0m의 원형터널로 설정하였으며, 터널의 토파고 및 지하수위는 터널직경의 4배로 설정하였다( $C/D=H/D=4.0$ ). 터널은 배수조건에 따라 배수형식(drainage type) 및 비배수형식(water-proof type)으로 나누었다. 배수형식은 터널 굴착에 따른 지하수의 유입을 터널 막장 및 터널 배면의 굴착면에서도 허용한 경우이며, 비배수형식은 터널 굴착에 따른 지하수의 유입을 터널 막장면으로만 제한한 경우이다.

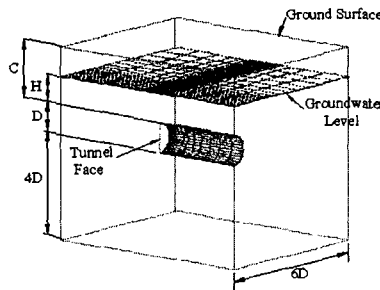


그림 2. 지하수 흐름 해석을 위한 3차원 해석단면

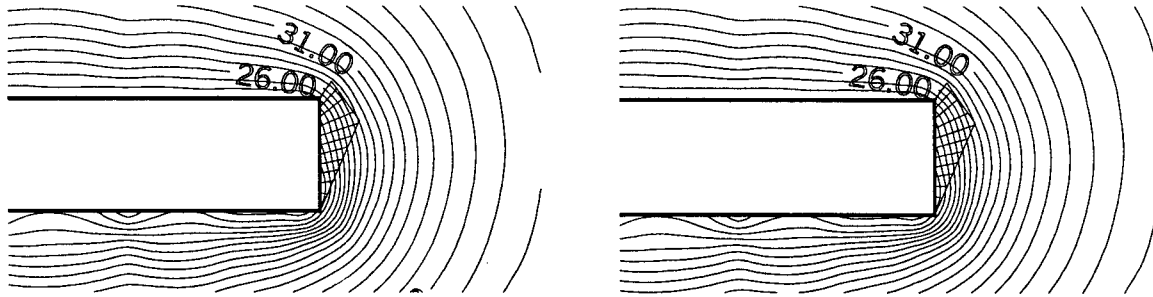
터널 굴진율은 지반조건, 터널직경, 터널의 선형, 터널굴착 방법 등에 따라 그 값의 범위는 광범위하게 나타난다. 지반의 비저류계수( $s$ )는 매우 작으며, 일반적으로  $3 \times 10^{-4}/m$  이하이다. 따라서 프로그램 'GACET'을 이용한 매개변수 분석시 각 변수들의 범위는, 비저류계수( $s$ )의 경우  $5 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-3}/(m)$ , 투수계수( $k$ )의 경우  $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-3}(cm/sec)$ , 그리고 터널 굴진율( $v$ )의 경우,  $0 \sim 20(m/day)$ 의 범위 내에서 변화시켜가면서 배수형 터널의 경우 총 80개의 경우에 대해서 해석을 실시하였다. 비배수형 터널의 경우는 총 35개 경우에 대해서 해석을 실시하였다. 식 (12)에서 보인 바와 같이 의사 정상류상태에서 수 두변화는 비저류계수( $s$ ), 투수계수( $k$ ) 및 터널 굴진율( $v$ )에 의존하는 것을 알 수 있으며, 그 결과 Anagnostou(1993)는 그의 연구에서 무차원계수  $Dsv/k$ 를 사용하였다. 따라서 본 매개변수 분석에서도 무차원계수,  $Dsv/k$ 를 사용하였다.

#### 3.2 결과분석

연속적인 터널 굴착에 의한 터널 막장에 작용하는 침투력의 변화를 예측하기 위하여 배수형 터널의 경우 80개, 비배수형 터널의 경우 35개로 총 115개의 경우에 대해서 지하수 흐름해석을 실시하였다.

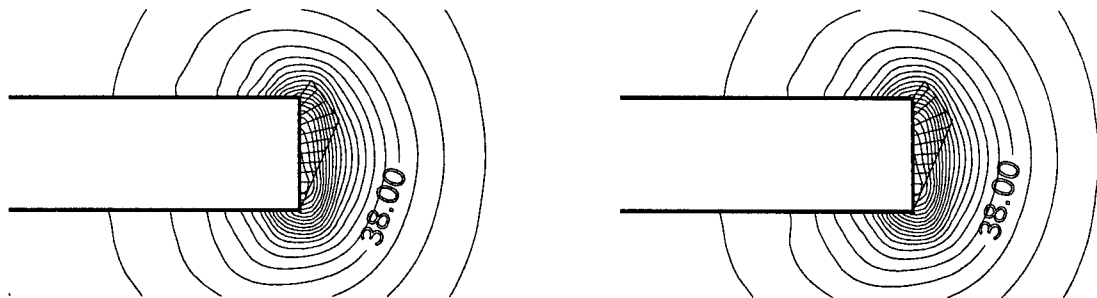
그림 3 및 그림 4는 터널의 배수형식에 따른 의사 정상류상태에서의 터널 막장 주변의 수두분포 및 상한해(upper bound solution)로부터 산출한 막장에서의 파괴면적을 보이고 있다. Leca & Dormieux(1990)는 극한이론(limit theorem)을 통하여 터널 막장에서의 파괴 메카니즘을 규명하였으며, 이 중 상한해가 실제 현상과 잘 일치함을 보여주었다(Chambon & Corte, 1989). 이와 관련하여 Lee & Nam(2000, 2001)

은 침투력을 고려한 터널 막장에서의 지보력을 산출하기 위한 상한해를 제시하였으며, 수치해석 및 터널모형실험을 통하여 이의 타당성을 입증하였다. 따라서 본 연구에서도 터널 막장에서의 침투력 산정시 본 상한해를 적용하였다. 그림 3 및 그림 4에서 보인 바와 같이 의사 정상류상태에서 터널 굴진율이나 지반의 투수특성이 다르더라도 무차원계수,  $Dsv/k$ 가 같은 값을 가질 경우, 터널 주변의 전수두분포는 같음을 알 수 있다. 따라서 터널 굴진율이나 주변지반의 투수특성에 따른 터널 막장의 침투력을 평가하는데 있어서 본 무차원계수,  $Dsv/k$ 는 매우 합리적인 지표임을 알 수 있다.



(a) Case 42:  $v=5\text{m/day}$ ,  $k=1 \times 10^{-4}(\text{cm/sec})$ ,  $s=5 \times 10^{-5}(/m)$  (b) Case 70:  $v=20\text{m/day}$ ,  $k=1 \times 10^{-3}(\text{cm/sec})$ ,  $s=1 \times 10^{-4}(/m)$

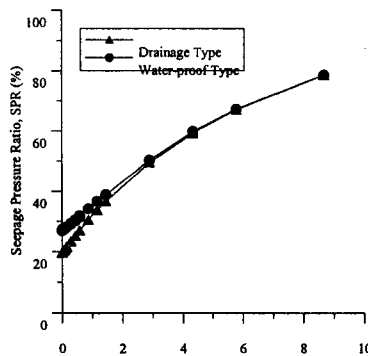
**그림 3. 배수형 터널 주변의 전수두분포 ( $Dsv/k=0.014$ 인 경우)**



(a) Case 55:  $v=20\text{m/day}$ ,  $k=1 \times 10^{-4}(\text{cm/sec})$ ,  $s=5 \times 10^{-4}(/m)$  (b) Case 58:  $v=10\text{m/day}$ ,  $k=1 \times 10^{-4}(\text{cm/sec})$ ,  $s=1 \times 10^{-3}(/m)$

**그림 4. 비배수형 터널 주변의 전수두분포 ( $Dsv/k=0.579$ 인 경우)**

그림 5는 무차원계수,  $Dsv/k$ 와 터널 막장에서의 침투력비(seepage pressure ratio, SPR) 간의 관계를 보여주고 있다. 여기서 침투력비, SPR은 터널 막장 중앙에서의 정수압에 대한 산출된 평균 침투압의 비를 의미한다. 그림에서 보인 바와 같이  $Dsv/k$ 가 증가할수록 터널 막장에서의 침투력은 증가함을 알 수 있다. 터널 굴진율이 0인 경우( $Dsv/k=0$ ), 침투력비는 배수형 터널의 경우에 20%, 비배수형 터널의 경우에 27% 정도가 산출되었으며, 이는 Lee & Nam (2000)이 연구한 정상류 상태의 지하수 흐름시 터널 막장면에 작용하는 침투력과 일치하는 결과이다.



**그림 5.  $Dsv/k$  - 침투력비 (SPR)간의 관계곡선**

그림 6 및 그림 7은 각각 배수형 터널 및 비배수형 터널의 경우에 대한 터널 주변의 전수두 분포를 보인 것이다. 그림에서 보인 바와 같이  $Dsv/k$ 가 커질수록 터널 막장 주변의 수두손실이 커짐을 알 수 있으며, 이는 터널 막장에서의 침투력 또는 막장으로의 지하수 침투속도보다 상대적으로 빠른 굴진율에 의해 발생하는 잔류수압이 증가함을 의미한다. 더욱이 비배수형 터널의 경우 이러한 현상은 배수형 터널의 경우보다 다소 심각함을 알 수 있다. 그러나  $Dsv/k$  값이 2보다 클 경우에 대해서는 그림 5에서 보인 바와 같이 터널의 배수형식이 SPR 값에 미치는 영향은 거의 없음을 알 수 있다.

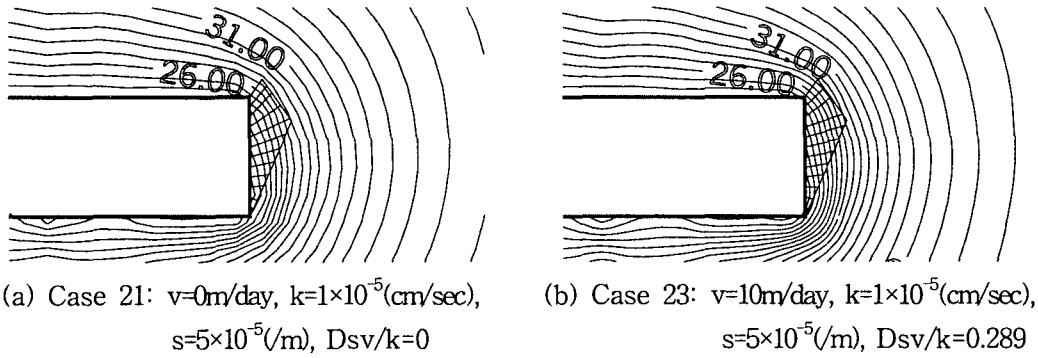


그림 6. 터널 굴진율에 따른 막장 주변의 전수두 분포 (배수형 터널)

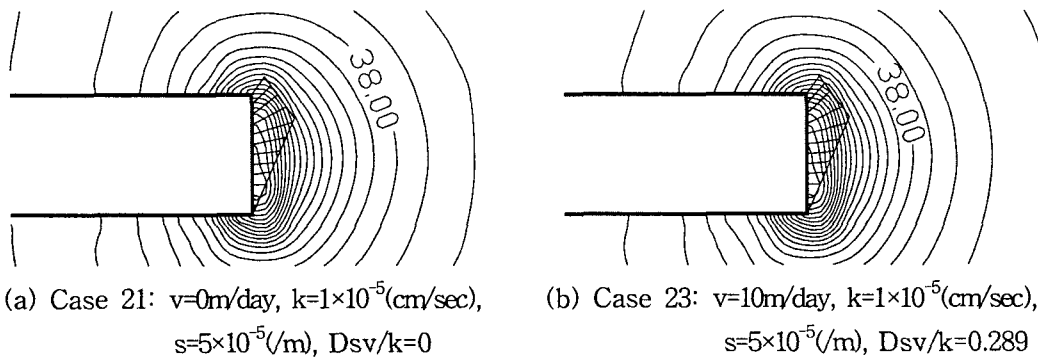


그림 7. 터널 굴진율에 따른 막장 주변의 전수두 분포 (비배수형 터널)

이상에서 보인 바와 같이 터널이 일정한 굴진율을 가지고 연속적으로 굴착될 경우, 터널 막장 주변의 지하수 흐름은 의사 정상류상태를 보이며, 본 경우에 있어서 막장에 작용하는 침투력은 지하수의 정상류 흐름 상태시 발생하는 값보다 커질 수 있다. 또한 지반의 투수특성이나 굴진율에 따라서 지하수의 흐름은 터널 굴착면으로의 완전한 배수가 이루어지지 않을 수 있으며, 이 경우 터널 막장면에서는 잔류수압이 발생할 수 있다. 이러한 현상은 지반의 투수계수가 크거나 저유율이 작을 경우, 즉 무차원계수,  $Dsv/k$ 의 값은 작을 경우에는 터널 막장의 안정성에 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 지반의 투수성이 그리 양호하지 않을 경우에는 터널 굴진율에 따라  $Dsv/k$ 의 값은 매우 증가하며, 궁극적으로 터널 막장에 작용하는 침투력은 정수압 대비 80% 이상까지 도달할 수 있으며, 더욱이  $Dsv/k$  값이 10을 초과하는 경우에는 터널 막장에 작용하는 침투력은 터널 막장에서의 정수압 수준까지 도달할 수 있음을 주지해야 한다.

#### 4. 결론

지하수위 하에서 시공되는 터널의 경우, 터널 막장의 안정성은 지하수 흐름에 따른 침투력에 큰 영향을 받으며, 본 침투력은 터널 굴진율 및 지반의 투수특성에 의하여 달라지게 된다. 본 연구에서는 터널 굴진율 및 지반의 투수특성이 터널 막장에 작용하는 침투력에 미치는 영향을 연구하였으며, 그 결과를

요약하면 다음과 같다.

1. 지하수의 존재는 터널 막장의 안정성에 심각한 영향을 미칠 수 있는데, 이는 터널 막장에서 굴착에 따른 유효이완도압에 추가로 지하수 흐름에 따른 침투압이 작용하기 때문이다.
2. 연속적인 터널 굴착이 이루어질 경우, 터널 굴진율이 막장에서의 침투력에 미치는 영향을 평가하기 위하여 Anagnostou(1993)가 제시한 수정된 지하수 흐름방정식을 적용한 3차원적 지하수 흐름해석 프로그램을 개발하였으며, 본 프로그램을 이용하여 지반의 투수특성 및 터널 굴진율에 대한 매개변수 분석을 실시하였다. 해석결과, 지반의 투수성이 양호한 경우 또는 터널 굴진율이 매우 느린 경우를 제외하고 터널 굴진율은 터널 막장에서의 침투력 및 막장의 안정성을 평가하는데 있어서 중요한 요소로 평가되어야 함을 알 수 있었다.
3. 무차원계수,  $Dsv/k$ 는 터널 굴진율을 고려한 막장에서의 침투력 평가시 훌륭한 지표가 될 수 있으며,  $Dsv/k$ 가 증가할수록 터널 막장에서의 침투력은 증가하며, 투수성이 좋지 않은 지반에서 본 침투력은 정수압의 80%까지도 도달할 수 있다. 결론적으로 지반의 투수계수가  $1 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$  이하인 경우에 대해서는 터널 막장의 안정성 평가시 터널 굴진율은 중요한 요소로 평가되어야 한다.

## 참고문헌

1. Anagnostou, G. (1993), "Modelling seepage flow during tunnel excavation", *Proc. ISRM International Symposium EUROCK 93, Safety and Environmental Issues in Rock Engineering 21-24/06/1993*, Vol. 1, pp.3~10.
2. Chambon, P. and Corté, J. F. (1989), "Stabilité du Front de Taille d'un Tunnel Faiblement enterré: Modélisation en Centrifugeuse", *Proceedings, International Conference, "Tunneling and Microtunneling in Soft Ground: From Field to Theory"*. Paris, France, pp.307~315.
3. Goodman, R. E., Moye, D. G., A. van Schalkwyk and Javandel, I. (1965), "Groundwater Inflows during Tunnel Driving", *Eng. Geology*, Vol. 2, pp.39~56.
4. Istok, J. D. (1989), *Groundwater Modeling by the Finite Element Method*. American Geophysical Union.
5. Leca, E. and Dormieux, L. (1990), "Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material", *Geotechnique*, London, England, 40(4), pp.581~606.
6. Lee, I. M. and Nam, S. W. (2000), "Evaluation of Face Stability with the Consideration of Seepage Forces in Shallow Tunnels", *Proceedings, International Conference on Tunnels and Underground Structures*. Singapore, pp.26~29.
7. Lee, I. M. and Nam, S. W. (2001), "The study of seepage forces acting on the tunnel lining and tunnel face in shallow tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 16, pp.31~40.