

지하수 영향을 받는 터널에서의 막장전면그라우팅 설계기법에 관한 연구 A Study of Grouting Design Method in Tunnel Under Groundwater

안성율¹⁾, Sung-Yul, Ahn안경철²⁾, Kyung-Chul, Ahn, 강세구³⁾, Se-Gu Kang,

¹⁾ (주)사이텍이엔씨 대표이사, CEO, SYTEC EnC Co.,Ltd

²⁾ (주)태조엔지니어링 지반터널부 상무, Executive Director, TESO Engineering Co., Ltd

³⁾ (주)태조엔지니어링 지반터널부 차장, Manager, TESO Engineering Co., Ltd

SYNOPSIS : This Paper present design parameters of grouting by reviewing several published equations and the results of coupled analysis considering the difference of permeability between soil and grouted zone.

Also, the feasibility of coupled analysis in the design of grouting is studied for seeping water quantity into tunnel, displacement of tunnel face , drawing down of ground water table, settlement of ground and stress of tunnel supports.

Key words : Coupled Analysis, Grouting, Groundwater

1. 서론

지반공학에서 지하수의 흐름은 히빙, 파이핑, 분사 등을 유발하여 유효응력을 감소시킴으로써 지반구조물을 불안정하게 만드는 요인으로 다루어야 할 중요한 문제이다. 터널을 시공할 때, 막장면을 통해서 흐르는 물이 지반의 투수상태에 따라서는 막장면을 불안정하게 하여, 이의 붕괴를 초래할 수도 있다. 이 경우에 터널내부로 유입하는 지하수의 흐름을 차단하거나 또는 감소시켜서 작업성을 높이고, 침투수압을 감소시켜서 막장면의 안정성을 확보하기 위해 일반적으로 막장 전방에 그라우팅을 시공한다.

본 연구에서는 이와 관련하여 지하수 흐름을 고려한 막장의 수리-역학 연동해석 방법을 제시하고, 실제적인 수치 분석을 바탕으로 그라우팅 설치로 인한 터널 막장면의 거동 원리를 고찰하고, 최적의 원지반/그라우팅 투수계수비와 그라우팅 두께의 결정 인자를 도출하였다. 또한 수치해석 결과와 실험식을 이용한 계산 결과의 비교 분석을 통해서 기존의 해석 방법과 이 연구에서 제시한 방법의 유사성과 적정성을 검토하였다.

2. 흐름을 고려한 유효응력

2.1 유효응력

흐름이 없는 경우에 있어서 유효응력은 흙입자를 통해서 전달되는 힘을 전체면적으로 나눈 값으로, 흙입자간 순수하게 작용되는 응력이며, 일반적으로 전응력에서 간극수압을 뺀값을 나타내며 식(1), (2)와 같다.

$$\bar{\sigma} = \sigma - u, \quad \bar{\sigma}_v = \sigma_v - u, \quad \bar{\sigma}_h = \sigma_h - u \quad (1)$$

$$K = \frac{\bar{\sigma}_h}{\bar{\sigma}_v} \quad (2)$$

여기서, σ : 유효응력, σ : 전응력, u : 간극수압, σ_v : 유효수직응력, σ_h : 유효수평응력,
 K : 수평토압계수

2.2 유효 수직력, 수평력

지하수가 있는 지반에 구조물이 놓이는 경우 작용하는 힘은 식(3), (4)와 같다.

$$N_v = (\bar{\sigma}_v + u)A \quad (3)$$

$$N_h = (\bar{\sigma}_h + u)A \quad (4)$$

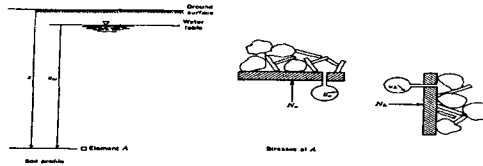


그림 1. 지반내 응력

2.3 흐름이 있는 지반에서의 유효응력

지하수가 흐르는 경우 물은 토립자에 흐르는 방향으로 물과 흙과의 마찰력으로 인하여 어떤 힘을 가하게 되는데, 지반공학에서는 이를 침투수력이라고 한다. 이는 공학적으로 다시 정리하면, 전수두의 손실에 해당하는 압력이 간극수압에서 유효응력으로 전이되는 것이라 설명할 수 있다. 따라서, 침투수력은 전수두차에 의한 압력에 면적을 곱한 식(5)와 같과 같다.

$$J = hA\gamma_w \quad (5)$$

여기서, J : 침투수력, h : 전두수차, A : 침투수력이 작용되는 면적, γ_w : 물의 단위중량
 이것을 단위 부피당 침투수력으로 표시하면 다음과 같다.

$$j = hA \frac{\gamma_w}{LA} = i\gamma_w \quad (6)$$

여기서, L : 침투수력 작용 높이, i : 침투수력 작용 높이에 대한 동수경사

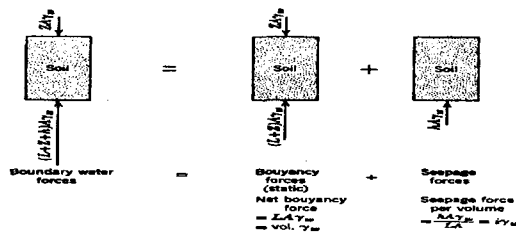


그림 2. 침투수력이 작용되는 경우의 유효응력

3. 그라우팅 두께에 따른 이론적 고찰

3.1. 시공중 막장면에서의 유량 및 지하수위저하의 관계

지하수위 아래에 있는 터널을 굴착하게 되면, 막장면으로는 물이 유입되고, 지하수위면은 하강하게 될 것이다. 많은 설계에서 이부분의 정량적인 값을 구하기 위하여 유선망을 작도하여 개략적으로 구하거나, 수치해석을 이용하여 구한다. 그러나 유선망의 경우 터널막장면에 대해서는 3차원적인면, 시간이 경과함에 따라 막장이 진행되는 점 등을 고려할 수는 없다.

다음의 몇가지 가정으로부터 터널내 유입되는 유량과 그로 인한 지하수위면 저하량을 산출할수 있는 식을 제안하고자, 변수두 투수시험 장치의 원리와 유사성을 이용한 식을 제안하면 다음과 같다.

- ① 지반의 지하수 흐름은 Darcy's Law을 따른다.
- ② 터널내 유입은 막장면(A₁)과, 터널주변(A₂)에서만 이루어지고, 터널주변은 막장면으로부터 1D내에서만 이루어진다고 가정한다.
- ③ 그라우트 경계면과 터널내 경계면과의 평균수두차는 H로 한다.
- ④ 유량산출시 유선길이 L₁, L₂는 그라우트 두께와 투수계수비(K_r)에 따라 각각 L₁ = L_f + 2D/K_r, L₂ = L_c + 2D/K_r,로 가정 한다.
- ⑤ 지하수위 저하 영역 반경 R은 터널중심에서 수위면 높이 H와 같다고 가정한다(R=H).
- ⑥ 터널내로 유입되는 유량과 영향범위 R에서의 감소유량은 같다.

위의 가정으로부터 터널내 유입량(q)는 식(7)과 같고, 지하수위면 저하속도(q')은 식(8)과 같다. 식(7)과 식(8)에서 지하수위 저하량(h)는 식(9)와 같이 구할 수 있다.

$$q = K \left(\frac{H}{L_1} A_1 + \frac{H}{L_2} A_2 \right) = K \cdot H \cdot \pi D^2 \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{4L_2} \right) \quad (7)$$

$$q' = -a \frac{dh}{dt} = -n \cdot A_3 \frac{dh}{dt} = -n \cdot \pi R^2 \frac{dh}{dt} = -n \cdot \pi H^2 \frac{dh}{dt} \quad (8)$$

$$h = H \cdot (e^p - 1) \cdot N_s \quad (9)$$

$$p = \left(\frac{K \cdot D^2 \cdot \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{4L_2} \right) \cdot t}{n \cdot H^2} \right)$$

여기서, K : 투수계수, H : 지하수위면 높이, D : 터널직경, t : 1막장 지연시간, h : 지하수위 저하, N_s : 굴착시공단계, n : 간극율 L₁ : 막장전방 유효 유선길이(L₁ = L_f + 2D/K_r), L₂ : 터널주변 유효 유선길이(L₂ = L_c + 2D/K_r)

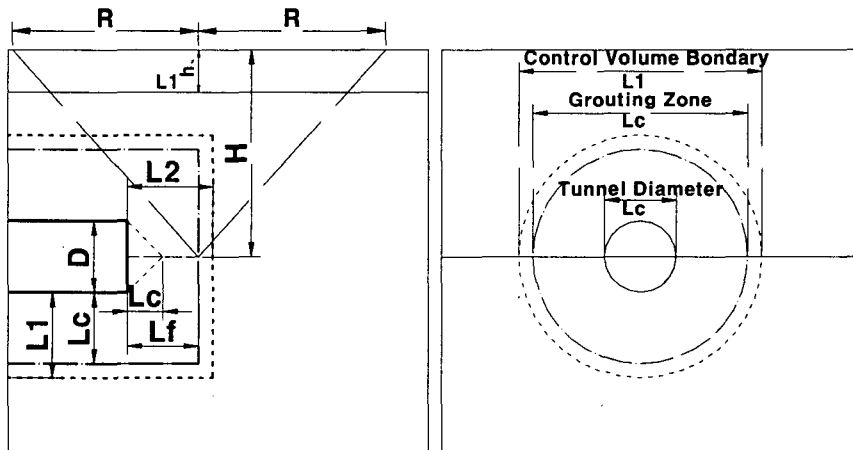


그림 3. 막장진행에 대한 시공개념도

3.2 막장면에서의 침투수압의 영향

1) 외국의 침투수압 적용 사례검토

해저터널중 영국과 프랑스를 연결하는 영불 Channel Tunnel과 일본의 세이칸 터널에 대해 설계 시 지하수압을 어떻게 반영하였는지 각 설계방법을 조사한 결과 다음과 같다.

영불 Channel Tunnel은 일부 구간에서 지질구조가 비교적 안정되고 투수성이 작고 터널내 배수를 허용하더라도 그 양이 작아 배수형 터널로 설계하였는데, 해석방법으로 유효응력+침투수력, 유효응력+라이닝수압, 전응력 해석방법 3가지로 검토하였으며 그림 4. a), b) c)와 같다.

세이칸 터널은 해저터널로 지질구조가 지표하 100m, 수위선은 지표로부터 140m의 악조건의 배수터널로 영불Channel Tunnel과 다른점은 지질구조가 좋지 않아 터널 주위로 차수 및 변위억제 목적으로 한 그라우팅을 설치한 것이다. 만약 수압 240 tonf/m²을 전부 지지하도록 설계하기란 거의 불가능한 일이다. 따라서 터널주위에 그라우팅을 설치하여 수압을 그라우팅이 설치된 지반으로 전이시켜 라이닝에 작용되는 하중을 감소시키는 방법으로 설계되었다(그림 4. d)).

세이칸 터널에서 특징할만한 것은 지반의 투수계수와 그라우팅 투수계수와 의 비가 1/100으로 컨트롤 불륨이 그라우팅 경계면이라 할수 있으며, 경계면에 수압이 작용되는 것처럼 가정하여 계산한 결과에서 터널내 유입량 측면에서는 그라우팅 두께 3m지반, 터널 내공변위 측면에서는 지보압에 따라, 3m, 4m, 10m가 필요한 것으로 분석하였다.

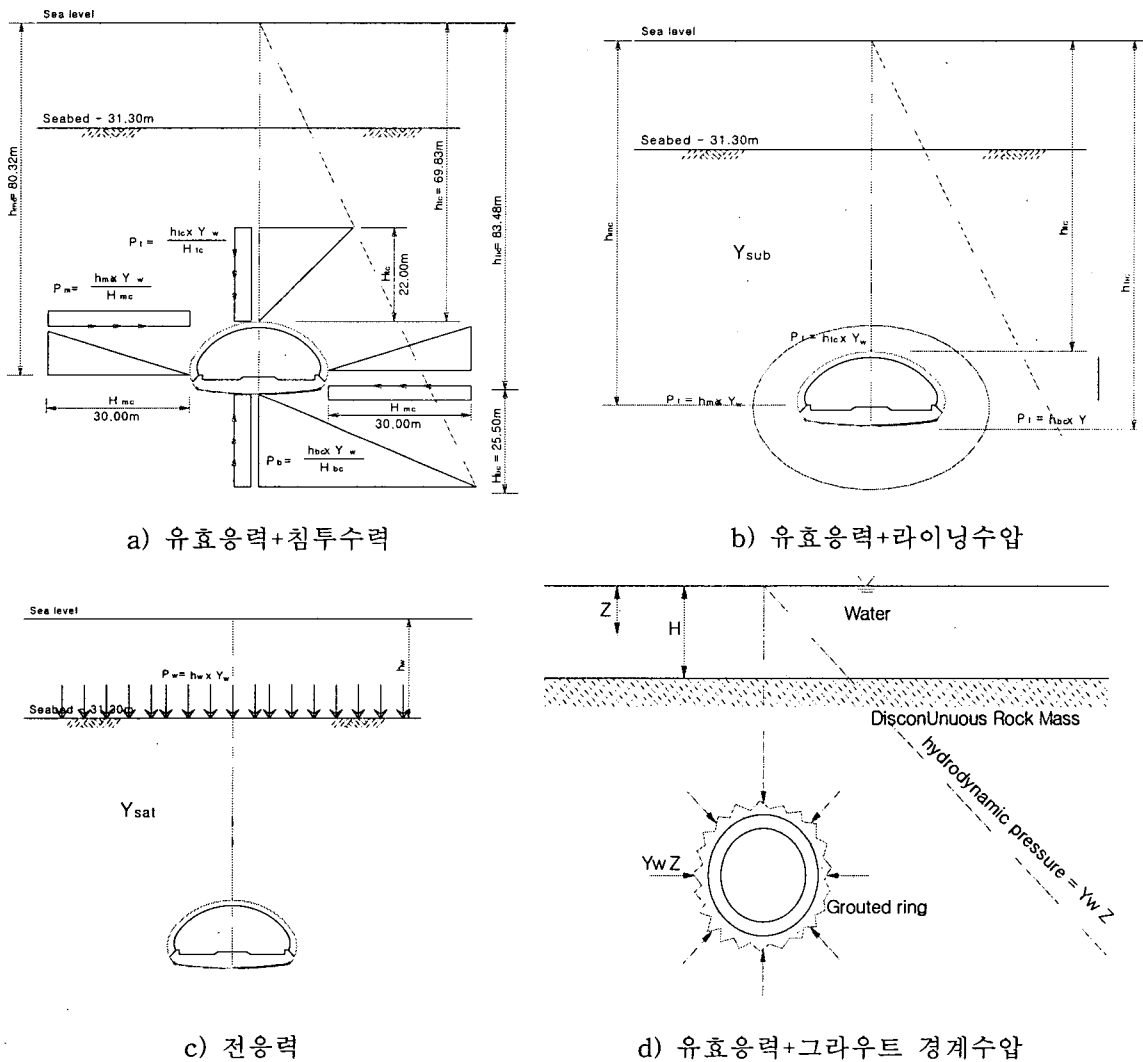


그림 4. 외국의 침투수압 적용예

2) 원지반/그라우트 투수계수비가 작은 경우

세이칸 터널과, 영불 Channel Tunnel에에서, 침투수압의 설계적용방법은 크게 두가지로 분류할 수 있는데 그 한가지는 원지반/그라우트 투수계수비가 작거나 그라우트가 없는 경우(영불 Channel Tunnel)의 예에서처럼 터널주변에 응력은 유효응력+침투수력으로 작용된다는 것이다.

그림 5.에서 막장전방 B점에서 응력상태를 예측해보면, 막장진행에 따라 최대주응력($\sigma_{11} \rightarrow \sigma_{12}$)은 다소 증가하고 최소 주응력($\sigma_{31} \rightarrow \sigma_{32} \rightarrow \sigma_{33}$)은 감소하게 되어 L_B 가 0에 이르고, 여기에 침투수력이 터널 방향으로 작용한다면 막장면 주변에서는 인장력이 발생하게 될것이다.

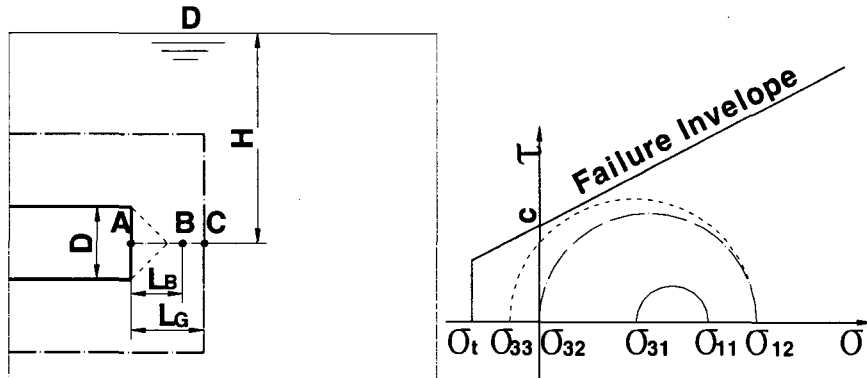


그림 5. 막장면에서의 응력개념도

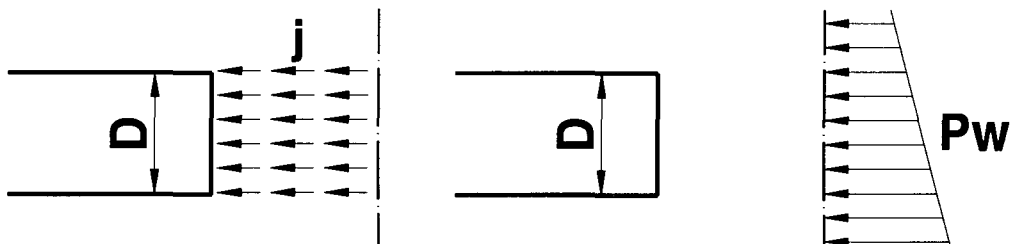
터널막장면부에서의 침투수력은 그림 5.에서 점A와 C사이의 동수경사가 동일하다가 가정한다면, 두점 사이의 전수두차(H')에 의하여 식(10)과 같게 될 것이며, 점A와 C사이에서 물체력으로 작용되어 점A로 갈수록 인장력이 크게 작용될 것이다. 투수계수비가 작기 때문에 C에서의 압력수두는 지하수위면 높이 H보다 작을 것이다.

$$\Delta p = \frac{H'}{L_G} \cdot \gamma_w \quad (10)$$

여기서, Δp : 막장면부에서의 침투수력, L_G : 그라우트 두께, H' : A와 C사이의 전수두차

3) 원지반/그라우트 투수계수비가 큰 경우

원지반/그라우팅의 투수계수비가 큰 경우, 세이칸 터널의 예에서 짐작할 수 있듯이, 그라우팅 경계면에서 수압으로 작용될 것이다. 점 C에서의 수압($P_c = H \cdot \gamma_w$)으로 점A와 C사이에 작용되는 침투수력의 총합과 같음을 알수 있다. 즉, 투수계수비가 큰 경우는 그라우트부에 물이 거의 흐르지 않는 것과 같아 그라우트층이 하나의 벽처럼 작용하여 경계면에서 수압으로 작용되는 것이라 생각할수 있다. 설계에서 이런 경우 세이칸 터널과 같이 “유효응력+그라우트 경계면 수압”으로 하는 것이 타당할 것으로 생각한다.



a) 그라우트부에 침투수력으로 작용 b) 그라우트 경계부에 수압으로 작용

그림 6. 막장전방부의 수압작용의 종류

4. 수리-역학 연동해석

4.1 해석방법

그라우팅의 두께변화, 투수계수비를 인자로 하여 수리해석, 침투수력을 고려한 역학해석을 수행하여 상호관계를 분석하고자, 유한요소법을 이용하여 다음 조건으로 해석을 수행하였다.

터널직경 $D=10\text{m}$ 로 하였으며, 굴진길이 1.0m 총 굴착단계 19단계로 그라우팅 종방향 설치길이 20m 에서 최종 2m 는 남도록 하였다. 그라우팅 두께는 $2.0D, 1.0D, 0.5D, 0.2D$ 에 대하여 수행하였으며, 투수계수비(K_s/K_g)는 1, 2, 5, 10, 100으로 각각의 그라우팅 두께에 대하여 모두 동일한 조건으로 해석하였다(표 1). 터널의 경계영역은 상부, 하부 터널 중심에서 60m , 측면 100m , 후방 60m 로 하여 유한경계영역 조건에서 발생될수 있는 경계영역의 영향을 최소화 하였다(그림 7). 요소는 프리즘 또는 육면체 형상의 Solid 요소를 사용하였으며, 형상함수가 1차함수인 1차요소를 사용하였고, 적분점은 프리즘 요소는 2×3 , 육면체 요소는 $2 \times 2 \times 2$ 를 적용하였다. 재료모델은 Mohr-Coulomb의 파괴모델을 적용하였으며, 흐름 법칙은 연합모델(Associated Rule)로 하였으며, 하중 증분단계는 3단계로 하였다. 슛크리트는 Shell 요소를 이용하여 굴착후 다음 단계에 설치하는 것으로 하였다. 침투 모델은 시공단계별 Transient 해석을 수행하여 시간의 변화에 대한 지하수 유동을 검토 하였다. 해석 조건은 매 시공단계에서 초기조건은 전 시공단계의 최종단계의 상태로 하였으며, 12시간 간격으로 4 Step, 즉 1막장 굴진에 48시간 소요되는 것으로 모델링 하였다.

지반의 재료 특성은 원지반 투수계수 $0.01\text{m}/\text{hour}$, 단위질량 $2.0 \text{ ton}/\text{m}^3$, 탄성계수 $1.0 \text{ MN}/\text{m}^2$, 프와송비 0.3, 점착력 $0.3 \text{ MN}/\text{m}^2$, 인장력 $0.15\text{MN}/\text{m}^2$, 내부마찰각 30° , $K_o=1.0$, 슛크리트 탄성계수 $15.0\text{MN}/\text{m}^2$, 프와송비 0.18, 두께 20cm 로 하였다.

표 1. 그라우팅 두께 및 투수계수비

차수두께	$K_s/K_g=1$	$K_s/K_g=2$	$K_s/K_g=4$	$K_s/K_g=10$	$K_s/K_g=100$
2.0D	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5
1.0D		CASE-6	CASE-7	CASE-8	CASE-9
0.5D		CASE-10	CASE-11	CASE-12	CASE-13
0.2D		CASE-14	CASE-15	CASE-16	CASE-17

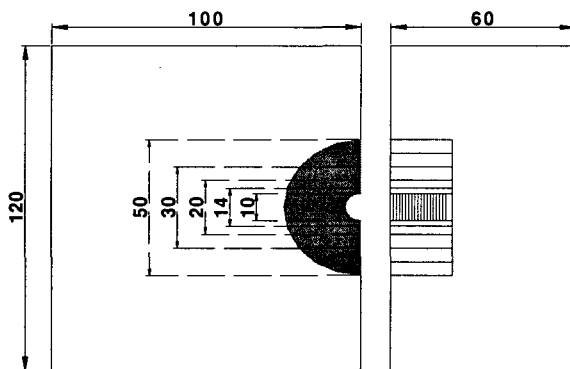


그림 7. 해석단면

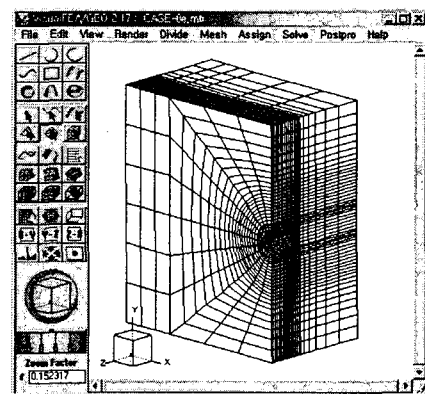


그림 8. 역학해석모델

역학모델에서 경계조건은 그림 8에서 보는 바와 같이 측면(1)은 x 고정, 바닥면(2)는 y 고정, 전방 및 후방(4)는 z 고정으로 하였으며, 3, 5, 6, 7은 중첩의 원리가 적용되도록 하였다(그림 9). 수리해석 모델에서는 초기지하수위는 터널중심으로부터 60m 인 곳에 위치하도록 하였으며, 전면과 터널 중심선 측면은

유입량이 없는 것(Q=0)으로 경계조건을 설정하였으며, 터널내부 경계면에서는 압력수두가 0이 되도록 하였다.

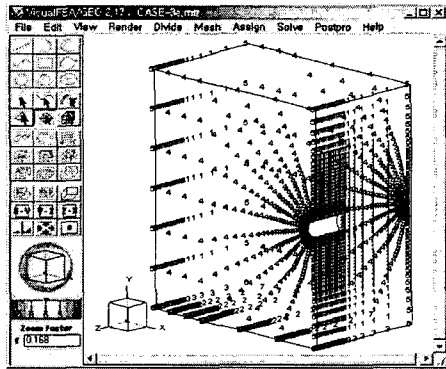


그림 9. 경계조건

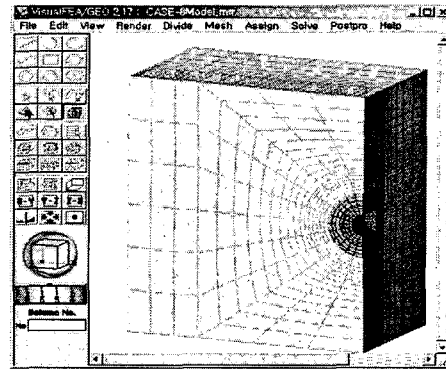


그림 10. 수치해석 모델

4.2 지하수 유동 분석

그라우팅 설치에 대한 1차적 효과는 투수계수의 감소로 인한 터널내 유입량을 작게 하는 것이다. 외국사례에 적용된 투수계수비를 보면, Oslo 터널 $K_s/K_g=25\sim100$, 세이칸 터널 $K_s/K_g=100$, Sau Paulo $K_s/K_g=12\sim17$ 로 적용하였다(이인모, 터널의 지반 공학적 원리).

본 검토에서 원지반 투수계수 0.01 m/hour로 적용하여 그라우팅의 투수계수를 감소시키면서 검토한 결과 K_s/K_g 가 증가할수록 막장면에서의 유입량과 지하수위면 지하량은 감소하였다(그림 11, 그림 12).

유한요소해석에서 산출된 유입량과 지하수 지하량을 제안식에 의한 방법으로 산출된 것과 비교하면 제안식에 의한 것이 그라우트 두께가 작아질수록 다소 큰값으로 산정되었으며, 두께가 감소할수록 유입량과 지하수 지하량은 증가하였다(그림 13~그림 16).

유한요소해석에서 차수두계의 영향 보다는 투수계수비 영향이 차수효과 측면에서 지배적으로 나타났는데 이것은 제안식에서는 그라우트부의 동수경사가 동일하다는 조건인 반면 수치해석은 굴착진행에 따라 막장면으로부터 멀어질수록, 시간이 흐를수록 동수경사가 감소하여 제안식보다 작게 나타난 것으로 생각한다. 이러한 현상은 투수계수비(K_s/K_g)가 작아질수록 더욱 그러하다는 것을 그림 13~그림 16에서 확인 할수 있다.

막장면의 동수경사는 막장면에 침투수력을 가하게 하는 인자로, 막장면 역학거동에 중요한 요소이다. 해석결과 막장면의 동수경사는 차수두계 0.5D가 되는 시점에서 급격한 증가를 보였으며, 특히 투수계수비가 큰 경우 동수경사의 변화는 막장진행에 따라 급격히 증가하는 현상을 보였다(그림 17, 그림 18).

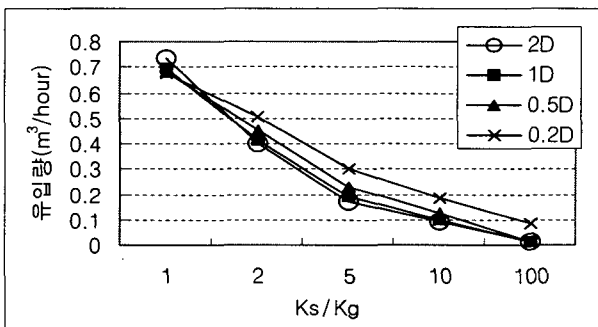


그림 11. 투수계수비에 증가에 따른 유입량

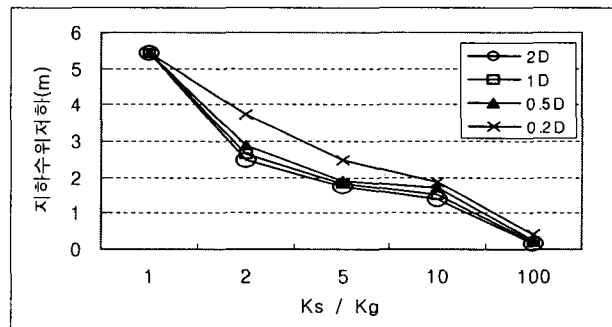


그림 12. 투수계수비에 따른 지하수저하

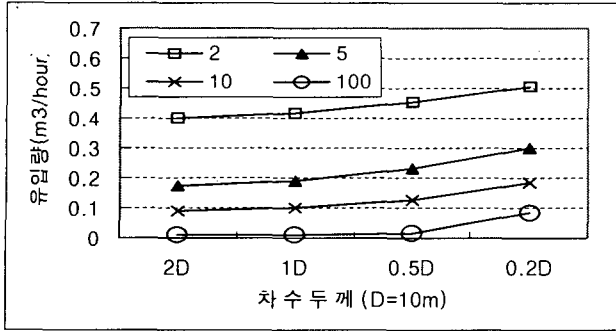


그림 13. 수치해석에 의한 유입량

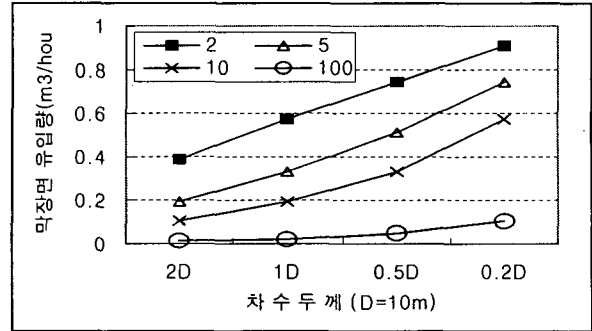


그림 14. 제안식에 의한 유입량

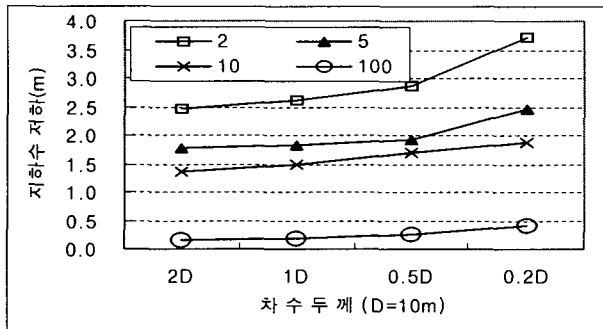


그림 15. 수치해석에 의한 지하수저하

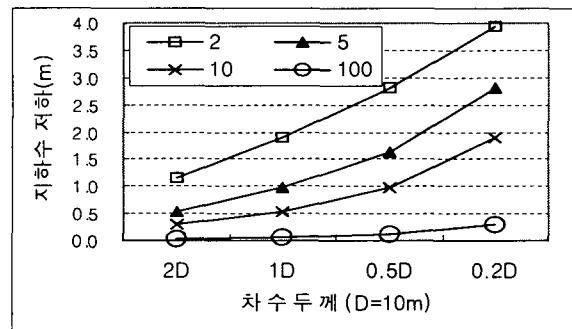


그림 16. 제안식에 의한 지하수저하

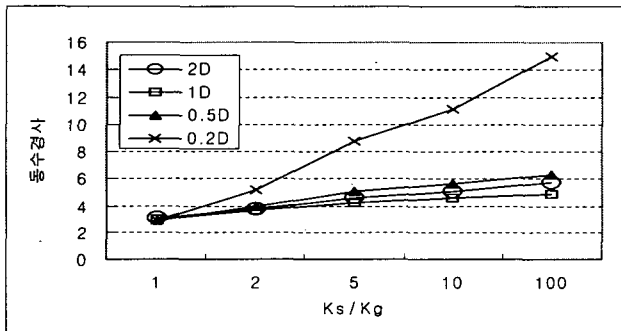


그림 17. 투수계수비에 따른 막장동수경사

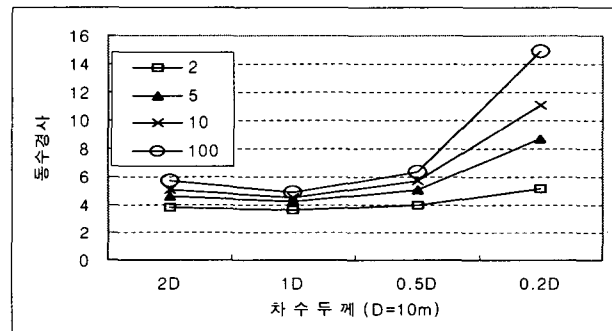


그림 18. 그라우팅 두께에 따른 막장동수경사

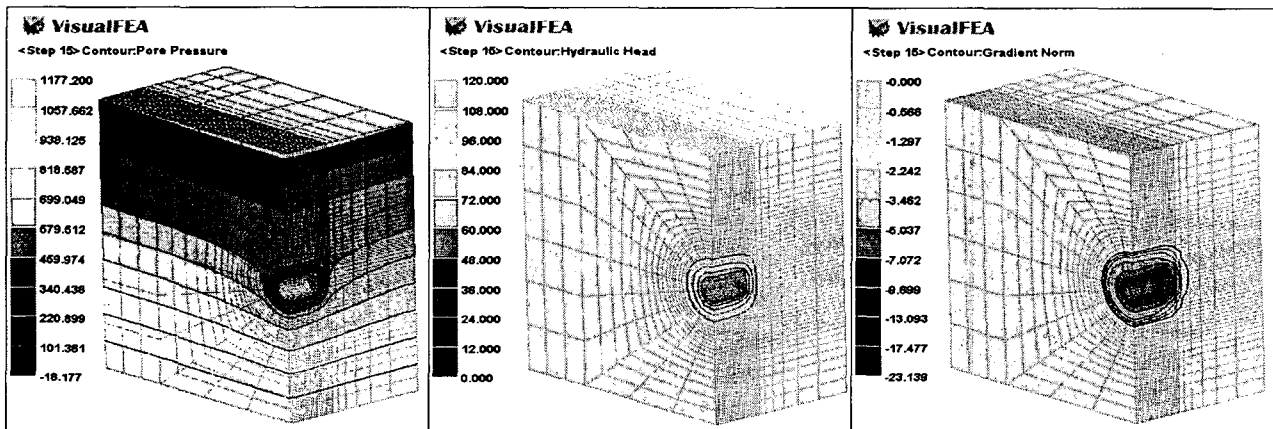


그림 19. 1D, Ks/Kg=2인 경우 수압,전수두,동수경사(CASE-7)

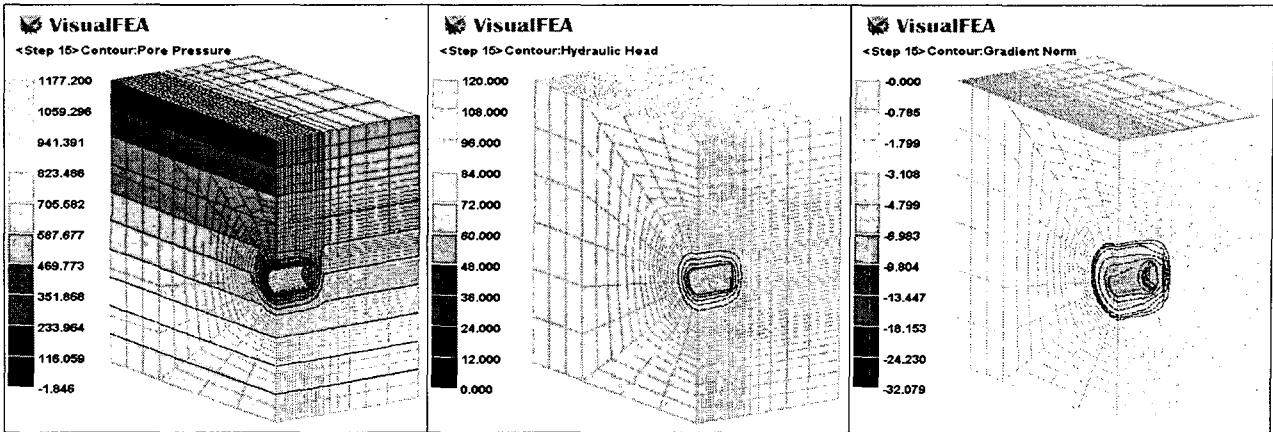


그림 20. 1D, $K_s/K_g=10$ 인 경우 수압,전수두,동수경사(CASE-9)

4.3 유효응력 + 침투수력을 이용한 역학적 거동 분석

그라우팅의 설치 목적에는 차수기능 뿐만 아니라, 안정성 증대도 포함된다. 본 해석에서는 지반의 강도 및 강성은 변화시키지 않고, 침투수압을 고려한 수리-역학 연동해석을 수행하여, 그라우팅의 역학적 안정성 증대에 대한 효과를 검토하고자 투수계수비, 차수두께에 따른 막장면의 변위, 지표면 침하, 터널 주변의 파괴율, 슛크리트 부재력 등을 검토하였다.

투수계수비에 따른 막장면의 변위는 투수계수비(K_s/K_g)의 증가에 따라 증가하는데, 차수두께 0.5D를 기점으로 급격히 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 반면에 지표면 침하는 차수기능이 작은 경우에 크게 발생하는 것으로 나타났다. 즉 차수기능의 효과를 높이기 위하여 그라우팅 성능을 키우게 되면 막장진행시 0.5D근접하는 시점부터 침투수력에 의한 막장전방부에 인장력이 발생하여 변위가 증가하게 된다.

그림 21~그림 24는 굴착 진행에 대한 변위를 표시한 것으로 투수계수비가 $K_s/K_g=2$ 인 경우 막장의 변위 뿐만 아니라 지표면의 침하도 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 투수계수비가 $K_s/K_g=100$ 인 경우 지표면의 침하 보다는 막장면의 변위가 크게 나타나는 것을 볼수가 있다.

그림 25, 그림 26은 굴착직후 슛크리트 부재응력을 표시한 것인데, 투수계수비(K_s/K_g)가 10, 100인 경우는 차수두께가 감소할 수록 증가하는 것을 보였으며, 0.5D, 0.2D인 경우 크게 증가하는 것을 보였다.

그림 29, 그림 30은 막장 진행에 따라 파괴율을 표시한 것인데, 터널 막장면에 0.5D 범위내까지 소성영역이 형성되는 것을 알수 있으며, 만약 지반이 인장에 대한 저항이 없는 경우라면, 안정성을 확보하기 위하여 막장면에 대한 강도증진 보강 공법을 고려하여야 할 것으로 생각한다.

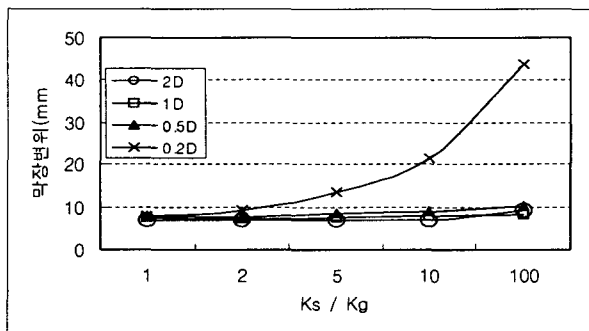


그림 21. 투수계수비에 따른 막장변위

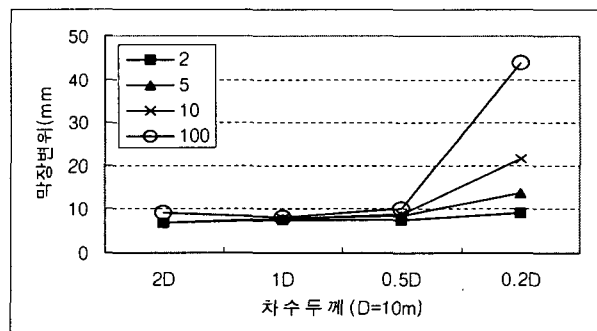


그림 22. 그라우팅 두께에 따른 막장변위

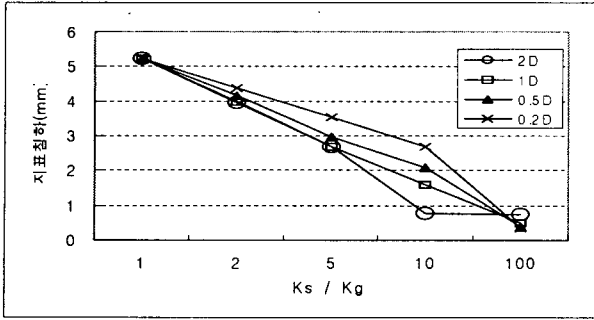


그림 23. 투수계수비에 따른 지표침하

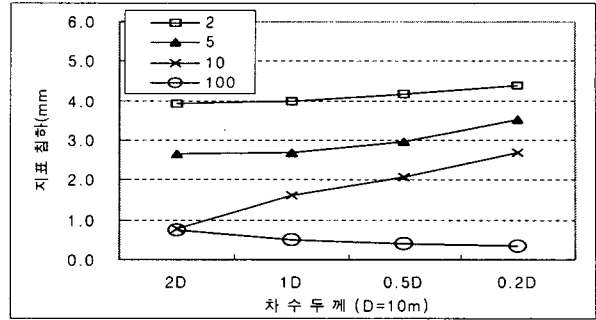


그림 24. 그라우팅 두께에 따른 지표침하

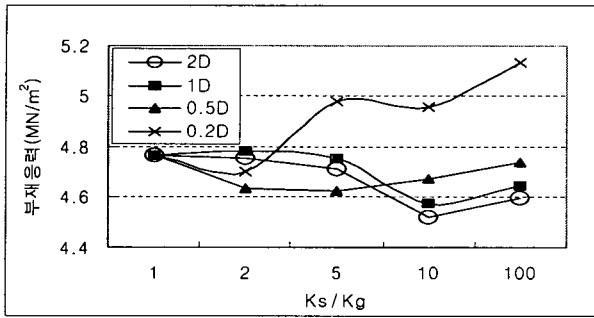


그림 25. 투수계수비에 따른 부재응력

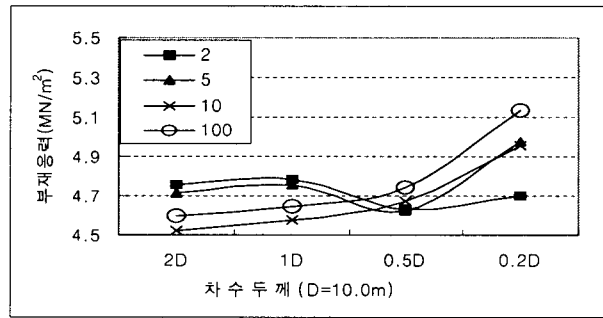


그림 26. 그라우팅 두께에 따른 부재응력

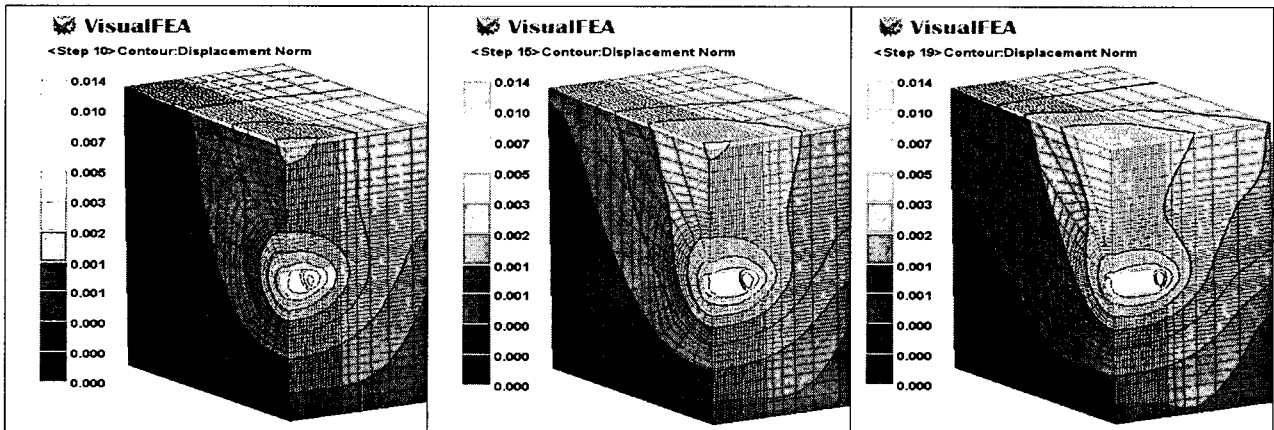


그림 27. 1D, Ks/Kg=2인 경우 변위(CASE-7)

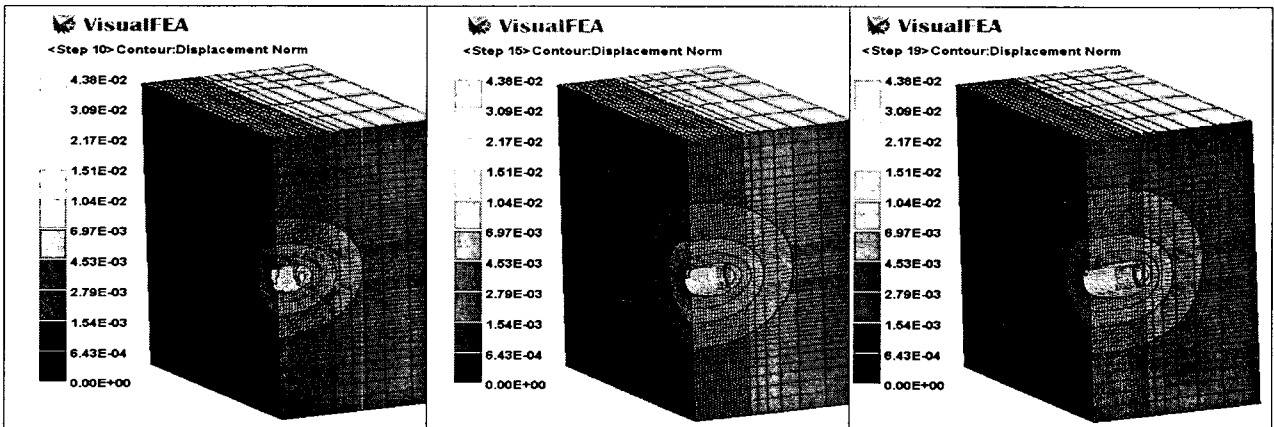


그림 28. 1D, Ks/Kg=10인 경우 변위(CASE-9)

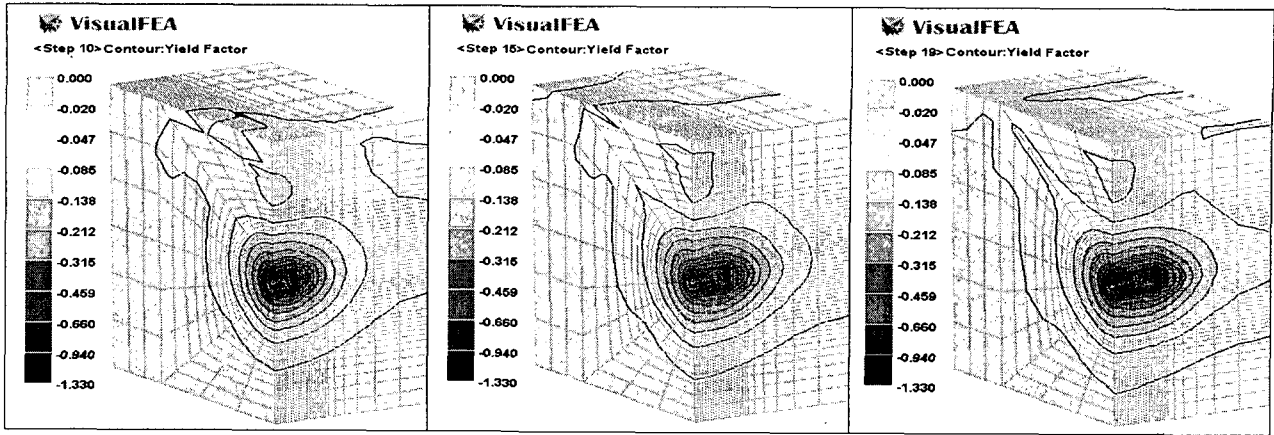


그림 29. 1D, $K_s/K_g=2$ 인 경우 Yield Factor(CASE-7)

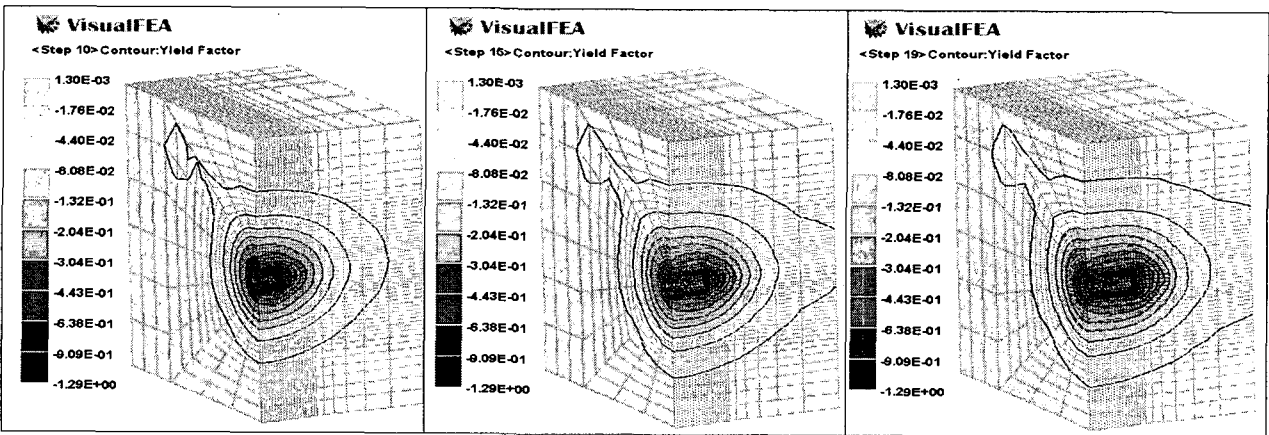


그림 30. 1D, $K_s/K_g=10$ 인 경우 Yield Factor(CASE-9)

5. 결론

지하수의 영향을 받는 터널시공에서 그라우팅 두께와 투수계수비의 영향은 수리적 측면 뿐만 아니라 역학적 측면에도 중요한 설계인자임을 많은 연구 및 설계사례에서 짐작할수 있다. 그라우팅 설계조건에 따라 수리-역학 연동해석을 실시하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 터널내 유입량은 제안식에 의한 것과 유한요소법에 의한 것과 유사성을 나타냈다. 투수계수비 증가에 따라 유입량은 크게 감소 하였으며, 그라우트 두께가 감소할수록 유입량은 증가하였는데 수치해석에 의한 방법 보다는 제안식에 의한 방법이 뚜렷하게 증가하였다. 그것은 제안식에서는 그라우트부의 동수경사가 동일하다는 조건이고, 또한 시간변화에 대한 동수경사 변화를 고려하지 않기 때문인 것으로 생각한다. 그러한 현상은 두가지 분석에서 투수계수비가 작을 수록 차이가 크다는 것에서 확인할수 있다.

2) 지하수위면의 감소는 상부구조물이나, 지반의 침하를 크게 하는 요인이 된다. 제안식과 유한요소법에 의한 것의 경향은 유입량과 유사하게 나타났으며, 제안식에서 알수 있듯이 원지반의 간극율과 지하수위면 저하영역을 얼마로 가정하는 것에 따라 차이가 날수 있으며, 실제 설계에 적용하기 위해서는 이에 대한 평가가 있어야 할 것으로 생각한다.

3) 막장면에 작용되는 침투수력은 이론적 고찰에서 예측하였듯이 막장면과 그라우팅 경계면에서의 전수두 차에 의하여 결정되며, 투수계수비에 따라 그라우트 부에 침투수력으로 작용되거나 그라우트 경계면에 수압으로 작용된다고 볼 수 있다. 유한요소해석에서 투수계수비가 큰 경우에 막장진행에 따라, 즉 그라우트 두께가 감소할수록 막장변위가 크게 발생한 것은 그라우트 경계부에 작용되는 수압이 침투수력($H \cdot \gamma_w$)으로 작용되기 때문이라 볼 수 있다. 투수계수가 작은 경우는 굴진과정에서 수두손실이 발생하여 막장면에서 동수경사가 감소하여 침투수력이 작게 작용하기 때문이라 생각한다.

4) 터널 굴진에 따라 그라우팅 두께가 점점 감소하여 동수경사가 증가하게 되면, 터널막장면에 침투수력이 크게 증가하여 인장력을 유발하게 되고, 지반의 인장강도보다 크게 증가할 경우 별도의 막장면 강도증진 공법을 병행하여야 할 것이며, 0.5D~1.0D 범위에서 소성변형이 발생하는 것으로 판단한다면 그라우트 두께가 이 범위에 들어오지 않도록 계획하여야 할 것으로 생각한다.

참고문헌

1. 유충식(2004), 응력-간극수압 3차원 연계해석을 통한 터널굴착과 지하수의 상호작용 고찰, 한국지반공학회 논문집, Vol.20, No.3, pp.33-46
2. 김영민(2004), 강도 감소법에 의한 지하수위를 고려한 FEM 사면안정해석, 한국지반공학회 논문집, Vol.20, No.8, pp.97-102
3. 남석우, 이인모(2002), 터널굴진율을 고려한 막장에서의 침투력에 관한 연구, 한국지반공학회 논문집, Vol.18, No.5, pp.221-228
4. 이인모, 김용진, 이명재, 남석우(1993), 터널 설계시 지하수의 고려방안, 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집
5. Barton, N.(2002), Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 39, pp.185-216
6. Benson, R. P. (1989), Design of unlined and lined pressure tunnels, Tunnelling and Underground Space Tech, Vol. 4, No.2, pp.155-170
7. Karlsrud, K.(2002), Control of water leakage when tunnelling under areas in the Oslo region (Chap. 4), Water Control in Norwegian Tunnelling, No. 12, Norwegian Tunnelling Society.
8. Zhang, L. and Franklin, J. A(1993), Prediction of water flow into rock tunnels : an analytical solution assuming an hydraulic conductivity gradient, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 30, No. 1, pp.37-46
9. Das, B.M, Advanced Soil Mechanics, Mc Graw-Hill International Editions, 1983.
10. Lambe, T.W. and R.V. Whitman(1969). Soil Mechanics, New York., John Wiley and Sons.
11. 김상규(1991), 토질역학 -이론과실무-, 한국, 청문각
12. 이인모(2004), 터널의 지반공학적 원리, 한국, 세론, pp120-205
13. 안성울(2005), 유한요소해석을 이용한 지반공학 문제풀이, (주)사이텍이엔씨
14. 김명모, 김수일, 이재훈(2004), VisualFEA 검증 보고서, 한국지반공학회