한국지반공학회논문집 제20권 3호 2004년 4월 pp. 33 ~ 46

응력-간극수압 3차원 연계해석을 통한 터널굴착과 지하수의 상호작용 고찰

Investigation on Tunneling and Groundwater Interaction Using a 3D Stress-pore Pressure Coupled Analysis

유 충 식[1] Yoo, Chung-Sik

Abstract

This paper presents the effect of groundwater on tunnel excavation. Fundamental issues in tunneling under high groundwater table are discussed and the effect of groundwater on tunnel excavation was examined using a 3D stress-pore pressure coupled finite-element analysis. Based on the results the interaction mechanism between the tunnelling and groundwater is identified for cases having different lining permeabilities. Examined items include pore pressures around lining and lining stresses. Face deformation behavior as well as ground surface movement patterns was also examined. Besides, the effect of grouting pattern was investigated. The results indicated that the effect of groundwater on tunnel excavation increases lining stresses as well as ground movements, and that the tunnel excavation and groundwater interaction can only be captured through a fully coupled analysis. Implementations of the findings from this study are discussed in great detail.

요 지

본 논문에서는 지하수가 터널굴착에 미치는 영향을 고찰하였다. 먼저 지하수위 아래에서의 터널시공시 발생하는 기본 메카니즘을 알아보았으며 가상의 시공조건에 대해 유한요소해석 기반의 3차원 응력-간극수압 연계해석을 수행하고 그 결과를 토대로 라이닝 작용하중 및 유발응력, 막장안정성, 지표침하 등 지하수와 터널굴착의 상호관계를 고찰하였다. 한편, 다양한 라이닝 투수성 및 그라우팅 패턴에 대한 해석을 수행하고 전반적인 터널 및 주변지반의 거동을 분석하였다. 해석 결과 터널굴착과 지하수의 상호작용은 라이닝 응력과 지반거동을 증가시키며 이러한 지하수가 터널굴착에 미치는 영향은 연계해석을 통해서 만이 이해가 가능하며 전응력해석을 수행할 경우 지하수의 영향을 과소평가할 수 있는 것으로 나타났다. 한편, 본 해석에서 얻어지는 결과를 실무적 측면에서 다각도로 고찰하였다.

Keywords : Coupled analysis, Finite-element analysis, Groundwater, Grouting, Tunneling

1. 서 론

터널 설계/시공에서 "지하수 조절"은 터널시공 계획을 좌우하는 매우 중요한 인자로 간주된다. 지하수위 아래에서 시공되는 도심지 터널경우 시공 중 안정성 확보를 목적으로 지하수를 터널 인버트 하부 이하로 강제 저하시키는 경우가 많았으나 지하수 저하로 발생하는 지반침하나 환경적 요인을 고려하여 이제는 지하수 저하를 되도록이면 억제하는 방향으로의 시공계획이 요구되고 있다. 아울러서 도심지역이 아닌 산간이나 농촌지역에서의 철도 혹은 도로 터널 시공시 터널이 인근 하천이나 저수지 등을 인접하여 통과하는 시공조

1 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil &Environ. Engrg., Sungkyunkwan Univ., csyoo@skku.edu)

건에서는 터널내부로의 유입수를 조절하지 않을 경우 주변 관정이 고갈되고 인근 저수지 수위가 저하되어 주변 물수지 변화에 대한 각종 민원이 발생할 소지가 있으므로 설계시 이에 대한 종합적인 검토가 매우 중요한 설계항목으로 대두되고 있다.

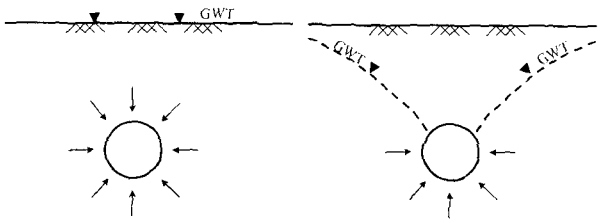
지하수위 아래에서 터널 굴착으로 발생하는 지반 내 응력변화는 터널 주변의 간극수압의 변화를 동반하여 지반내 유효응력장의 변화를 가져와 터널주변 지반의 하중지지능력을 감소시키고 아울러서 흙의 체적변화로 인한 지반변형을 증가시킨다. 따라서 이러한 경우에 있어서의 터널 및 주변지반의 거동은 역학적(mechanical) 측면과 수리학적(hydraulic) 측면이 고려된 응력-간극수압 연계해석이 필요하다. 이러한 연계해석에서는 터널 시공 중 발생하는 지하수위 저하 문제나 터널시공 후 터널라이닝의 균열이나 시공조인트 등을 통한 누수현상으로 인한 지하수위 저하 문제는 시간개념이 도입된 부정류 해석(transient analysis)이 도입되어야 한다. 그러나 현재 실무에서 적용하고 있는 각종 터널해석 프로그램의 연계해석 기능의 제한성 및 해석 모델링에서의 기술적인 어려움 등으로 인해 터널굴착과 지하수의 상호작용이 고려된 응력-간극수압 연계해석을 설계에 적절하게 반영한 예는 그다지 많지 않다.

이러한 측면에서 본 논문에서는 터널굴착과 지하수의 상호관계에 대한 기본 메카니즘을 알아보고 응력-간극수압 연계해석에 대한 수치모델링의 기본 이론을 제시하였다. 아울러서 3차원 유한요소해석 기법을 도입하여 지하수위 아래에서 시공되는 터널의 거동 메카니즘을 고찰하였으며 지하수억제 및 터널안정성 확보 차원에서 수행되는 차수 그라우팅이 터널의 거동에 미치는 영향을 정성 정량적으로 고찰하였다.

2. 터널굴착과 지하수의 상호관계 - 이론적 고찰

2.1 기본 메카니즘

터널굴착은 지반/암반내의 배수구를 설치하는 것과 같은 맥락이며 따라서 대상 지반/암반의 투수성에 따라 정도의 차이는 있으나 터널 내부로의 지하수 유입을 야기 시킨다. 이러한 터널내 지하수 유입은 주변 수리학적 조건에 따라 그림 1(a)와 같이 하상에 시공되는 터널의 경와 같이 터널내로의 지하수 유입이 발생하더라도 주변에서 지속적인 지하수 유입조건이 성립될 경우에는



(a) 지하수위 유지 조건 (b) 지하수위 저하 조건

그림 1. 터널 문제에서의 지하수위 조건

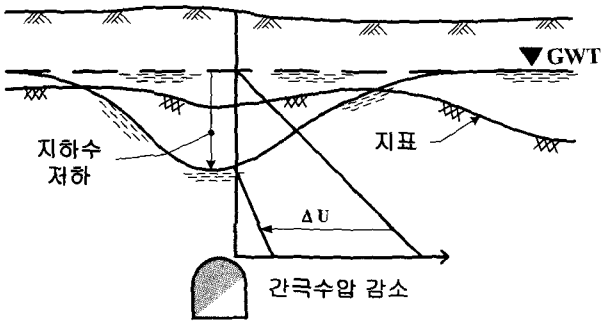


그림 2. 지반침하 메카니즘

지하수위가 일정하게 유지되나 그림 1(b)와 같이 지하수위 유입이 지속적으로 이루어지지 않을 경우에는 지하수위가 저하된다. 도심지 터널 설계의 관점에서 지반침하 등 *지하수의 영향이 터널시공에 미치는* 영향을 고려할 때 그림 1(b)와 같이 터널굴착으로 지하수위가 저하하는 시공조건이 보다 중요하게 다루어져야 한다. 즉, 그림 2에서와 같이 터널내부로의 지하수 유입시에는 주변 지하수위가 저하되며 지반내 간극수압의 저하는 결국 유효응력의 증가로 이어지게 되어 지반 침하가 발생하게 된다.

2.2 지반침하 평가 및 라이닝 작용 수압

터널 시공시 지하수위 저하로 인한 지반침하는 결국 지하수위 저하량, 즉 터널굴착으로 인한 지하수위 저하로 인한 간극수압 감소량 ΔU_R과 밀접한 관계가 있으며, 터널설계 단계에서는 대상 조건에 대해서 ΔU_R과 침하량의 관계를 설정하여 설계에 반영하는 것이 필요하다. 일반적으로 지하수위 저하를 동반하는 터널시공 조건에서의 지반침하 특성은 지표침하가 광범위하게 발생하는 것으로 알려져 있으며 따라서 지반침하로 인한 주변 구조물의 피해 영역 또한 광범위하다고 할 수 있다.

지하수위 아래에서 터널을 시공할 경우 설계관점에

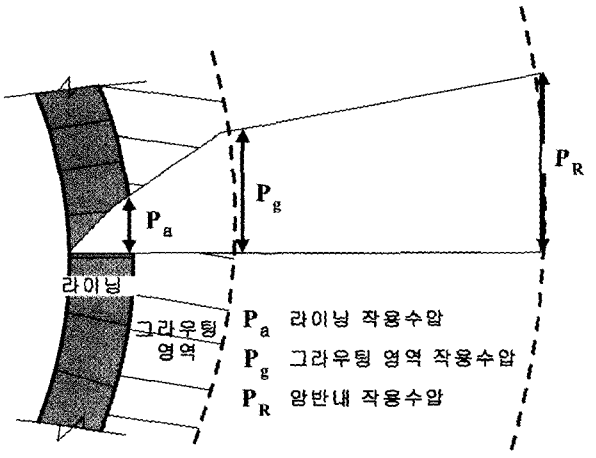


그림 3. 터널주변 수압분포 개념

서 지반침하 이외의 또 다른 이슈는 라이닝에 작용하는 수압에 관련된 내용이라고 할 수 있다. 일반적으로 터널 라이닝 설계시에는 라이닝 외부에 상부 지하수위에 해당하는 수두를 수압으로 가정하기도 하는데 이러한 가정은 일반적인 시공조건에서 매우 보수적이며 엄밀히 말해 라이닝이 100% 수밀도를 갖는 경우에만 타당하다고 할 수 있다. 그러나 콘크리트 라이닝은 콘크리트 자체가 갖고 있는 투수성과 시공조인트 혹은 건조수축에 의한 균열 등으로 인해 어느 정도의 투수성을 지닌다고 할 수 있다. 따라서 정도의 차이는 있으나 터널 내부로의 침투로 인해 수압의 일부가 해방되므로 라이닝에 작용하는 수압은 지하수위의 전수두보다는 작게 형성된다고 할 수 있으며 이와 아울러서 대상 지반/암반의 투수성에 따라 라이닝 외부수압 또한 달라진다 (KOWACO 1997). 그림 3은 라이닝 작용 수압의 개념도를 보여주고 있다.

3. 터널거동에 대한 응력-간극수압 연계해석 모델링

3.1 기본이론

지하수위 아래에서 시공되는 터널의 역학적 거동은 터널 주변지반의 유효응력에 지배되므로 응력과 간극수압이 연계된 해석(stress-pore pressure coupled analysis)을 수행하여야만 현실적인 평가가 가능하다.

응력-간극수압의 연계해석에서는 지반을 다상재료(multiphase material)로 간주하고 유효응력 개념을 적용하여 거동을 표현한다. 응력-간극수압 연계해석에서 사용되는 지배방정식은 Biot(1941, 1955)과 Zienkiewicz와 Shiomi(1984)이 제안한 기본적인 완전 연계 유효응력 과정을 토대로 유도되며 선형 운동량의 평형 및 질량 보존의 법칙과 같은 물리적 법칙을 토대로 식 (1) 및 (2)와 같이 정식화 된다.

$$\sigma_{ij,j} - \rho b_j = -\rho \ddot{u}_i \tag{1}$$

$$n(v_{i,i} + \dot{\varepsilon}_{vwc}) + \dot{u}_{i,i} = 0 \tag{2}$$

식 (1)에서 $\sigma_{ij,j}$=전응력; ρ=흙의 밀도; b_j=물체력; u_i=흙입자의 변위이며 식 (2)에서 v=침투속도; ε_{vwc}=흙의 압축발생시 간극수의 체적 변형률; 그리고 n=간극률로 정의된다. 식 (1)은 정·동적 문제에서의 평형(지배)방정식이며 정적문제에서 관성력항($\rho \ddot{u}_i$)은 누락된다. 식 (2)는 질량 보존의 법칙을 의미하는 방정식으로서 정적문제에서 변위속도항($\dot{u}_{i,i}$)은 누락되며 Cartesian 좌표계로 작성하면 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{z} = -\frac{1}{1+e_o}\frac{\partial e}{\partial t} \tag{3}$$

여기서 v_x, v_y, v_z는 각각 x, y, z 방향의 유속이며 e_o는 초기 간극비, e는 간극비를 의미한다. 식 (1)과 (2)로 정의되는 물리적 법칙이 흙입자, 간극수, 침투에 대한 구성법칙과 연계되는 과정을 토대로 유도되는 지배 방정식은 해석 대상 영역에 대한 경계조건 및 초기조건을 토대로 해를 찾게 된다.

3.2 정상류 및 부정류 해석

응력-간극수압 연계해석은 시간개념의 적용여부를 토대로 정상류(steady state) 해석과 부정류(transient) 해석으로 구분된다. 정상류해석은 외부환경 변화에 의해 침투가 발생하여 평형상태에 도달한 후에 대한 해석으로서 평형상태에 도달하는 과정에 대한 결과는 얻을 수 없다. 터널해석적 측면에서 정상류 조건에 대한 해석은 터널굴착으로 지하수위가 어느 정도 저하되고 주변 지반변형에 어느 정도 영향을 미치는지를 평가하는 경우 적용할 수 있다. 반면에 부정류 해석은 시간개념이 도입된 것으로서 터널굴착으로 침투가 발생하는 시점에서 평형상태에 도달하는 시점까지 임의의 시간에서의 해를 얻을 수 있다. 즉, 부정류 해석을 수행함으로써 터널굴착 후 시간에 따른 지하수위 저하 경향과 이에 따른

터널 및 주변지반의 거동을 파악할 수 있다. 따라서, 연계해석에서는 해석으로부터 도출하고자하는 결과가 어떤 것이냐에 따라 정상류 혹은 부정류 해석 여부를 결정하여야 한다.

3.3 경계조건

수치해석에 있어서 지배방정식은 해석대상 조건에 대한 경계조건과 초기조건을 부여하여 해를 얻게 된다. 즉, 응력-간극수압 연계해석에서는 응력해석에서 변위에 대한 경계조건을 부여하는 것과 같은 개념으로 해석영역에 대해 수압에 대한 경계조건을 부여하여야 한다. 응력해석에서의 경계조건과 마찬가지로 연계해석에서의 경계조건은 해석결과에 지대한 영향을 미치는 모델링 측면에서 매우 중요한 경계조건이라고 할 수 있다.

일반적으로 하저터널이나 주변으로부터 지하수가 지속적으로 유입되어 터널 내부로의 지하수 유입에도 불구하고 지하수위가 저하되지 않는 경우[그림 1(a)]는 "지하수위 유지조건"에 대한 해석이 타당하며 따라서 이때 초기 지하수위면은 해석과정에서 일정하게 유지되는 "일정수위 경계"의 경계조건을 부여하여야 한다. 그 밖의 "지하수위 저하조건"이 성립되는 경우[그림 1(b)]에는 "원거리 경계부(far field boundary)"에 "일정수위 경계조건"을 부여하여야 한다.

4. 매개변수의 상호관계 연구

4.1 해석조건

본 연구에서는 직경 10m의 터널이 지표면으로부터 30m 하부에 시공되는 경우를 고려하였으며 해석대상 지반은 서울 도심 지역에서 일반적으로 나타나는 지반조건을 고려하였다(Shin 등 2002). 즉 그림 4에서 보이는 바와 같이 해석 대상지반의 상부 5m는 실트질 모래로 이루어진 매립층 및 충적층으로 구성되어 있으며 그 하부에는 두께 10m의 화강 풍화토층이 화강 풍화암 상부에 위치하는 것으로 가정하였다. 따라서 터널은 화강 풍화암층에 시공되는 것으로 가정하였다. 주 지보재로 두께 30cm의 숏크리트가 시공되며 하루당 2m의 굴진속도로 시공되는 것으로 간주하였다(Shin 등 2002). 해석의 편의상 록볼트는 모델링에서 제외하였다.

본 연구의 주안점은 지하수와 터널굴착의 상호작용 메카니즘과 지하수 저위 저하량, 즉 간극수압 감소량 ΔU_R에 따른 터널 및 주변지반의 거동에 두었으며 따라

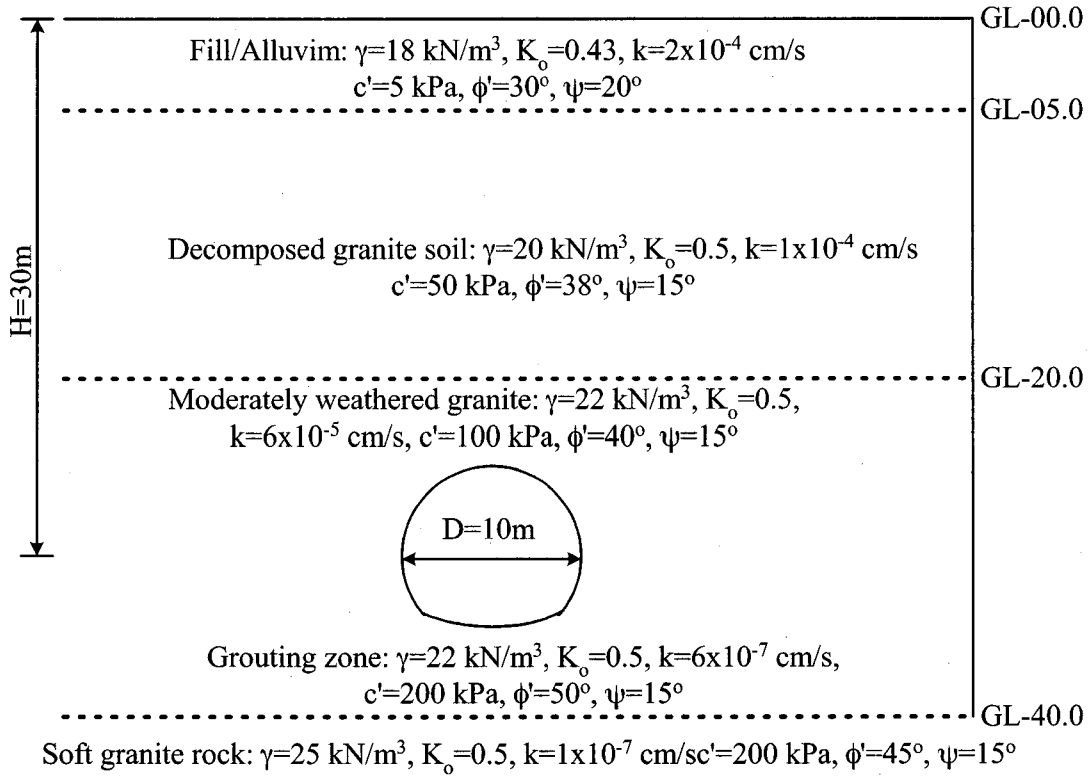


그림 4. 해석대상 지반조건

표 1. 해석조건

해석조건		비 고
연계해석 (유효응력해석)	No-Grouting(NOG)	• k_L/k_S=0.0, 0.02, 1.0
	Grouting(GR)	• 종방향 보강폭 0.4D • 막장전방 보강폭 0.4D
전응력해석(TSA)		• 그라우팅 적용 되지 않음 • 지반의 단위중량은 포화단위중량으로 적용

서 라이닝의 투수성을 달리하는 세 가지 경우에 대한 해석을 수행하였으며 여기서 라이닝의 투수성은 라이닝과 주변지반의 투수계수의 비, k_L/k_S로 표현하였다. 이와 같은 유효응력해석과 아울러서 동일한 조건에 대해 전응력 해석(total stress analysis, TSA)을 수행하여 유효응력해석 결과와 비교하였다. 한편, 연계해석에 있어서 터널 주변 그라우팅이 미치는 영향에 대한 고찰을 위해 폭 4m의 그라우팅이 적용되는 경우에 대한 유효응력해석을 수행하였다. 한편, 연계해석을 수행하는데 있어 터널시공 중 지표에서의 지하수 유입량이 그다지 크지 않은 것으로 가정하여 "수위저하조건"에 대한 해석을 수행하였다.

4.2 해석 모델링

4.2.1 적용 프로그램 및 이산화

해석에서는 범용 유한요소해석 패키지인 ABAQUS 6.3을 사용하였다. ABAQUS는 토목 및 기계 등 다양한 분야에 적용되는 프로그램으로서 특히 지반공학분야에서 다양한 흙의 구성모델을 제공하고 소성거동 모사에 대한 알고리즘이 효율적이어서 지반구조물의 항복 후 거동 평가에 효율적임과 아울러서 효율적인 응력-간극수압 연계해석 알고리즘을 채택하고 있다는 장점이 있다.

터널 굴착의 모델링에 있어서 해석의 편의상 전단면 굴착으로 시공되는 것으로 가정하였으며 터널 중심축으로부터 좌우 대칭인 점을 고려하여 우측 반단면에 대한 해석을 수행하였다. 한편, 터널 중심으로부터 약 8D (D=터널직경)의 거리에 측면 경계면을 위치시켜 수평방향으로의 변위를 구속하였으며 터널 바닥으로부터 약 2D 하부에 하부 경계를 위치시키고 롤러를 설치하여 연직방향의 변위를 구속하였다. 종방향 해석 영역 역시 터널이 시작되는 지점으로부터 8D까지 설정하였다.

지반 및 지보재의 이산화에 있어서 지반은 8절점 가감 적분 응력-간극수압 연계 고체요소(C3D8RP)를 적용하였으며 숏크리트는 4절점 가감적분 쉘요소를 이용하여 모델링 하였다. 그림 5는 해석에 적용된 유한요소모델을 보여주고 있다.

한편, 해석 대상 지반은 Extended Drucker-Prager 항복규준과 비관련 소성흐름법칙(nonassociated flow rule)을 따르는 재료로 가정하였다. Extended Drucker-Prager 모델은 기존의 Drucker-Prager 모델(Drucker 1952)의 개선된 형태로서 그림 6에서와 같이 $t-p$ 평면에서의 항복면을 선형, 쌍곡선 혹은 지수함수의 형태로 지정할 수 있다. 항복면의 형태는 대상재료의 종류 및 해석 중 발생하는 응력수준 등에 따라 결정하여야 하나 일반적으로 선형 항복면 모델은 흙과 같이 점착력과 내부마찰각의 파라메타로 강도특성이 표현되는 재료에 간편하게

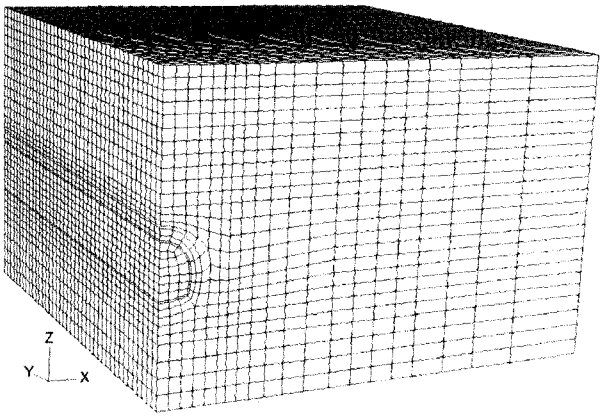


그림 5. 해석에 적용된 유한요소망

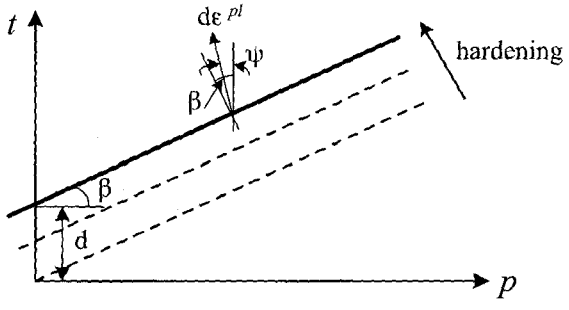


그림 6. Extended Drucker-Prager Model

적용될 수 있다는 장점이 있으며 쌍곡선 항복면 모델은 암반이나 콘크리트와 같은 취성재료에 적합한 것으로 알려져 있다. 한편, 지수형태의 항복면 모델은 가장 일반화된 형태라고 할 수 있으나 해석 대상 재료에 대한 시험을 통해 입력 파라메타를 결정하여야 한다는 어려움이 있다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 선형 항복면 모델을 채택하였다. 선형 Drucker-Prager 항복규준은 식 (3)과 같이 정의된다.

$$F = t - p\tan\beta - d = 0 \tag{3}$$

여기서, $t = \frac{1}{2}q\left(1+\frac{1}{K}-\left(1-\frac{1}{K}\right)\left(\frac{r}{q}\right)^3\right)$이며 $p = -\frac{1}{3}trace(\sigma)$ (equivalent pressure stress), $q = \sqrt{\frac{3}{2}(S:S)}$ (Mises equivalent stress), $S = \sigma + p\,I$ (stress deviator), $r = \left(\frac{9}{2}S\cdot S:S\right)^{\frac{1}{3}}$ (third invariant of deviatoric stress) 이다. 한편, β는 $t-p$ 응력평면에서의 항복면의 기울기, 그리고 d는 점착력을 나타내며 K는 삼축 인장 상태의 항복 응력과 삼축 압축 상태의 항복 응력의 비로서 항복면의 중간주응력에의 의존도를 나타내며 K=1의 경우 von Mises 모형으로 일반화 된다. 한편, 앞서 언급한 바와 같이 소성 흐름은 비관련 흐름법칙을 적용하여 흐름벡터가 Π-평면에는 수직이나 $t-p$ 평면의 t축에는 팽창각(Ψ) 만큼 기울어져 발생하도록 하였다.

4.2.2 경계조건 및 굴착과정의 모사

응력-간극수압 연계해석에서는 해석 영역에 대해 변위에 대한 경계조건을 부여함과 아울러서 수리적 경계조건을 부여하여야 한다. 먼저 터널의 횡단면 중심축과 일치하는 단면(x=0)과 터널굴착 시점(y=0)에는 no-flow의 경계조건을 부여하였으며 그 밖의 측면경계와 하부경계에는 초기조건으로 부여한 수압이 일정하게 유지되도록 하였다. 아울러서, 연계해석 과정에서 원 지하수위 위치에 no-flow 경계를 부여하여 지하수의 터널내부로의 유입은 연직 및 하부경계를 통해서만 이루어지도록 하였다.

터널 굴착이 시작되면서 터널 굴착면 주위에서의 응력해방과 함께 지하수가 터널 내부로 유입되고 터널의 거동은 지반내 유효응력에 좌우된다. 터널굴착과 함께 발생하는 지하수의 유입은 터널굴착면을 따라 간극수압 u=0의 경계조건을 부여하는 방법으로 모사하였다. 한편, 숏크리트 라이닝이 타설 후 터널내부로의 지하수위 유입량은 결국 숏크리트의 투수성에 좌우된다. 따라

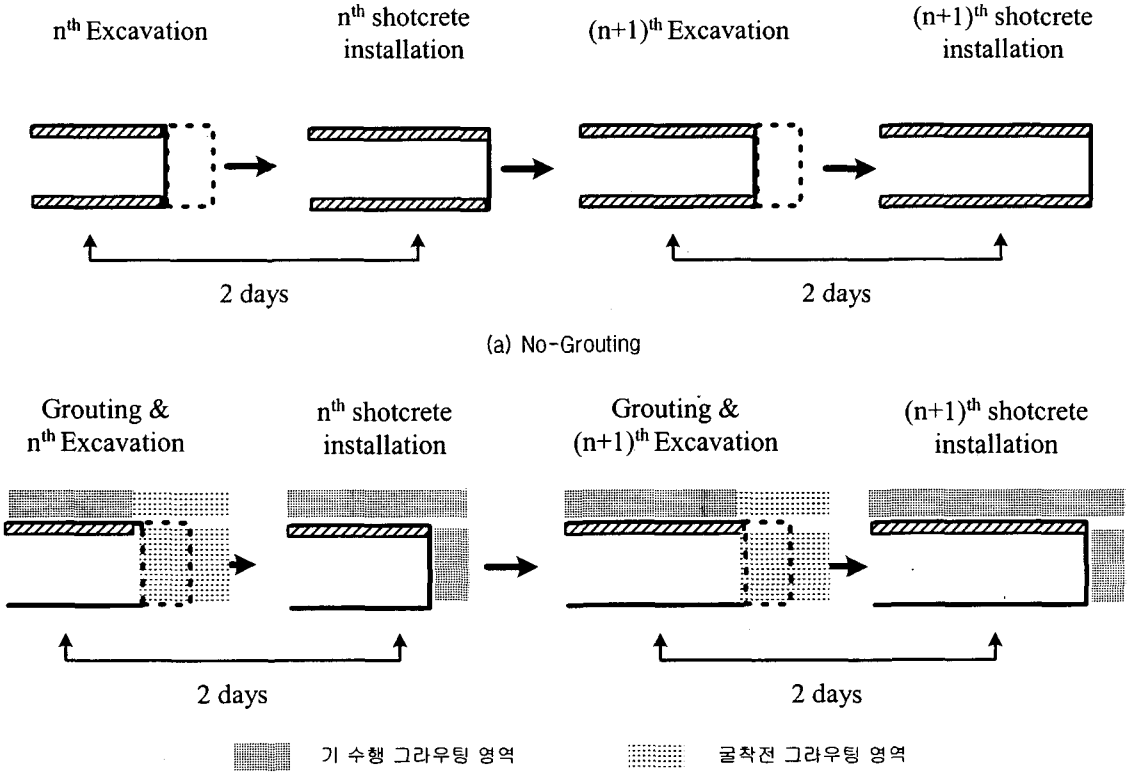


그림 7. 굴진과정의 모사

서 라이닝의 차수효과에 대한 모델링은 Shin 등(2002)이 제시한 모델링 기법을 적용하여 즉 터널 굴착면에 설치되는 라이닝은 구조요소인 쉘요소를 이용하여 모사하였으며 쉘요소의 특성상 연계해석이 수행되지 않는 점을 감안하여 주변에 30cm 두께의 고체요소를 형성하고 라이닝의 투수계수를 해석조건에 따라 k_L/k_S를 근거로 하여 부여하여 라이닝 설치에 따른 유입량 억제 효과를 모사하였다.

터널 굴착과정의 모사는 현장 시공공정을 최대한 반영하도록 하여, 기존의 시공자료 및 연구결과를 토대로 1일 굴진장을 2m로 설정하였으며 굴착 후 숏크리트 라이닝은 비교적 짧은 시간에 설치되는 것으로 가정하였다. 본 해석에서 채택한 굴진과정에 대한 개요도가 그림 7에 나타나 있다.

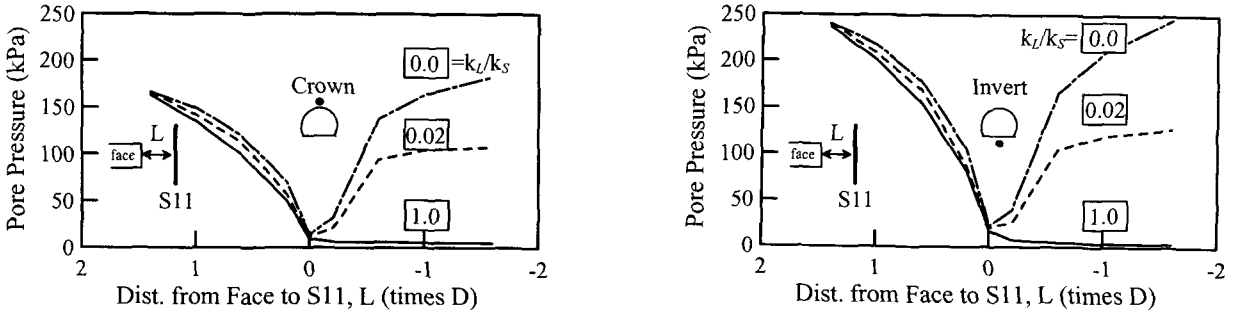
5. 해석결과 및 고찰

해석결과는 터널굴진에 따른 터널주변 및 숏크리트 라이닝 응력, 간극수압, 지반침하 변화 경향을 고찰할 수 있도록 굴진과정에 따른 분석을 수행하였다. 또한 라이닝/지반 투수계수비 k_L/k_S가 상기 항목에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 고찰이 가능하도록 해석결과를 정리·분석하였다. 본 장에서는 이에 대한 내용을 언급하였다.

5.1 터널주변 응력 및 숏크리트 라이닝 응력 분포

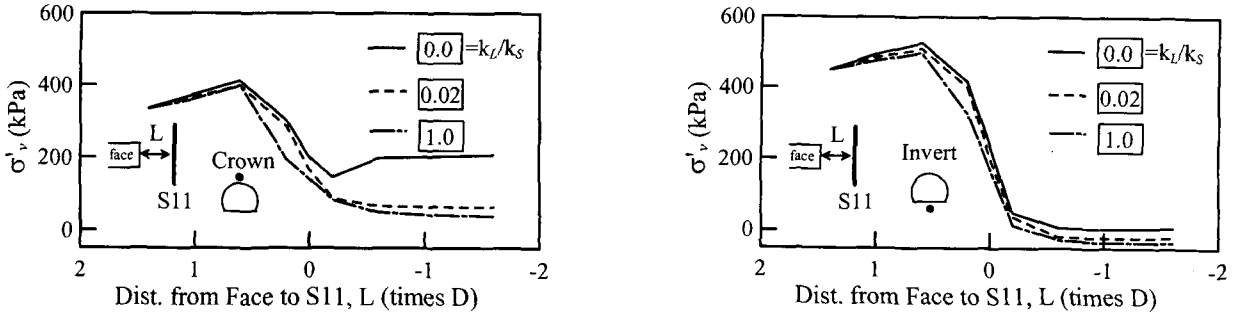
앞서 언급한 바와 같이 터널굴착에 따른 지하수위 저하는 지반내 간극수압의 감소를 가져오며 이는 곧 유효응력의 증가로 이어져 지반의 침하를 야기시킬 뿐만 아니라 터널 주변지반의 응력상태를 불리하게 만들 수 있다. 따라서, 터널시공에 따른 터널주변 간극수압 및 유효응력 분포, 그리고 이에 따른 숏크리트 라이닝의 거동에 대한 이해가 선행되어야 한다.

그림 8과 9는 터널굴착 시점에서 2.2D 전방에 위치한 단면 S11에 대해 터널굴진과정에서의 터널 천단부 및 인버트부에서의 수압 및 유효응력 변화 경향을 도시하고 있다. 먼저 터널굴진에 과정에 있어서 터널 주변 간극수압 변화 경향을 세 가지의 라이닝/지반 투수계수비, 즉 k_L/k_S=0.0, 0.02, 1.0에 대해 나타내고 있는 그림 8을 관찰하면 보이는 바와 같이 전반적으로 터널 주변의 간극수압은 터널막장이 도달하기 훨씬 이전부



(a) Crown (b) Invert

그림 8. 굴착단계에 따른 간극수압(단면 S11)



(a) Crown (b) Invert

그림 9. 굴착단계에 따른 유효응력(단면 S11)

터, L<1.5D, 점진적으로 감소하는 경향을 관찰할 수 있으며 굴착과 동시에 거의 "영"에 가까운 수치로 감소됨을 알 수 있다. 한편, 굴착 후 k_L/k_S=1.0의 경우를 제외하고는 라이닝 타설 후 다시 급격히 증가하여 k_L/k_S=0.02의 경우에는 굴착이전 수압의 약 40%정도를 그리고 k_L/k_S=0.0의 경우에는 약 70%로 회복되는 경향을 보여주고 있다. 이러한 경향은 본 연구에서 고려한 지반조건과 유사한 경우 임의단면의 수위는 터널 막장이 도달하기 이전부터 저하됨을 의미하며 지하수위 저하를 효율적으로 억제하기 위해서는 터널막장 전방 1.0D이상의 영역에 프리 그라우팅을 수행할 필요가 있다는 것을 의미한다고 알 수 있다. 한편, 앞에서도 언급한 바와 같이 일반적인 경우라고 할 수 있는 k_L/k_S=0.02의 경우를 토대로 할 때 숏크리트 라이닝 배면에는 타설 직후부터 수압이 증가하기 시작하여 막장과의 거리가 1.0D 정도일 때 굴착이전의 약 40%정도에 해당하는 수압이 작용하는 것으로 나타났으며 정상류 상태에 도달한 후의 지하수위 대비 약 70%가 라이닝 외부 수압으로 작용하는 것으로 나타났다. 한편, 라이닝 수밀도가 100%일 경우는 지하수위 대비 약 100%가 외부 수압으로 작용하는 것으로 나타나 역시 라이닝 배면 작용 수압은 라이닝의 수밀성(투수성)과 직접적인 관련이 있으므로 설계시 이에 대한 충분한 고려가 있어야 할 것으로 판단된다.

단면 S11의 터널 천단 및 인버트 지점에 대해 굴착단계에 따른 유효연직응력 변화 경향을 보여주고 있는 그림 9를 관찰하면 보이는 바와 같이 막장이 도달하기 이전 L>0.5D 까지는 간극수압의 감소에 따라 유효연직응력이 다소 증가하는 경향을 보여주고 있으며 막장이 점차 접근함에 따라 급격히 감소하여 막장 통과 후 수렴하는 경향을 보여주고 있다. 특히 k_L/k_S=0.02 및 1.0의 경우 인버트 부분에서는 유효응력이 "영"이하로 감소되어 액상화 현상이 발생하는 경향을 관찰할 수 있는데 이는 굴착에 따른 응력해방 이외에도 그림 8에서 관찰한 바와 같이 잔류수압으로 인한 유효응력($\sigma' = \sigma - u$)의 감소에 따른 것으로 사료된다. 따라서 이러한 경향으로부터 지하수위 아래에서 시공되는 터널의 경우 라이닝 타설 후 인버트의 관리가 특히 중요함을 알 수 있으며 이는 문헌에서 제시된 시공경험(Norwegian Urban Tunneling 1995)과 일치하는 것으로 나타났다.

그림 10과 11은 터널 막장 후방 1.5D에 위치하는 단면에 타설된 숏크리트 라이닝 배면 수압 및 라이닝 축력 분포를 다양한 라이닝/지반 투수계수비 k_L/k_S에 대해 나타내고 있다. 먼저 라이닝 배면 수압분포 경향을 나타내는 그림 10에서는 k_L/k_S=0.02 조건의 경우 약 105~145kPa 정도의 수압이 작용하는 것으로 나타났는데 이는 터널 굴착 후 정상류 상태의 수두의 약 60~70%에 해당하는 수치로서 이러한 경향은 앞서 언급한 바와 같이 숏크리트 라이닝의 투수성에 기인한다고 할 수 있다. 한편, 터널 굴착후 정상류 상태의 수두 대비 라이닝 배면 수압은 k_L/k_S가 감소할수록 증가하여 100%의 수밀성에 해당하는 k_L/k_S=0.0의 경우는 정상류 상태의 수두에 100%에 육박하는 것으로 나타났다.

숏크리트 배면 수압 발생 경향은 숏크리트에 유발되는 축력분포를 나타내주고 있는 그림 11과 잘 일치하고 있는데 보이는 바와 같이 숏크리트 축력은 스프링라인 이상에서는 k_L/k_S에 따라 별다른 차이를 보이고 있지 않으나 스프링라인 이하에서는 k_L/k_S가 감소할수록 증가하는 경향을 관찰할 수 있으며 그 차이는 인버트에서 가장 크게 나타나고 있다. 이러한 경향은 본 해석조건과 같이 터널 벽면으로의 지하수 유입을 억제 할 경우 스프링라인 이하에서의 수압증가에 따른 것으로서 지

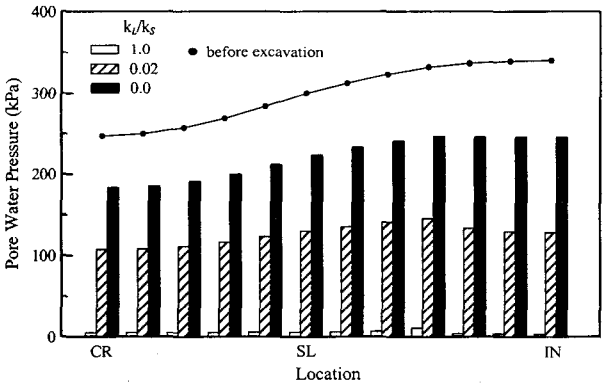


그림 10. 숏크리트 라이닝 주변 간극수압

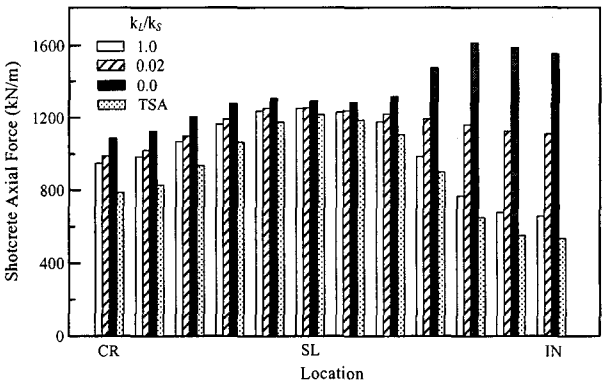


그림 11. 숏크리트 라이닝 축력

하수위 아래에서의 터널굴착시 인버트 관리의 중요성을 보여준다고 할 수 있다. 이러한 경향을 종합할 때 결국 수압에 의한 터널 라이닝 작용하중은 결국 라이닝의 투수성에 좌우되며 따라서 보다 경제적인 라이닝 설계를 위해서는 라이닝의 투수성에 대한 보다 종합적인 연구가 뒤따라야 할 것으로 판단된다. 한편, 그림 11에서는 전응력해석과 연계해석 결과의 직접적인 비교가 가능한데 보이는 바와 같이 전응력해석이 연계해석 보다 현저히 낮게 평가하는 것으로 나타나 지하수위가 높은 조건에서의 터널문제에서는 연계해석이 반드시 수행되어야 함을 보여준다고 할 수 있다.

5.2 지하수위 저하경향 및 응력 경로

그림 12와 13은 각각 k_L/k_S=0.0 및 1.0의 조건에 대해 단면 S11의 막장과의 거리 L에 따른 간극수압 분포를 보여주고 있다. 이 그림에서는 앞에서 제시된 터널 주변의 간극수압 변화 경향에서 관찰된 내용과 더불어 터널 시공에 따른 지하수위의 변화경향을 뚜렷하게 관찰할 수 있는데 보이는 바와 같이 두 경우 모두 터널막장이 대상단면에 도달하기 훨씬 이전부터(>1.5D) 6m 이상의 지하수위가 저하되는 경향을 보이고 있으며 이러한 경향은 지하수위 저하 억제를 위해 그라우팅을 적용하는데 있어 프리 그라우팅의 중요성을 단적으로 보여주는 결과라고 하겠다. 또한, k_L/k_S=0.0의 경우는 굴착 후 숏크리트 라이닝 타설이 지하수 유입을 완전히 차단하는 경우로서 보이는 바와 같이 지하수가 약 8m 정도 저하하는 것으로 나타났으며 라이닝의 차수효과가 없는 k_L/k_S=1.0에 비해 지하수저하량이 현저히 적은 것으로 나타났다. 그러나 굴착 후 터널내부로의 지하수 유입을 완벽히 차단하였음에도 불구하고 8m 가량의 지하수 저하가 발생한다는 결과는 본 연구에서 고려한 지반조건의 경우 굴착 후 시도하는 차수 노력은 지하수위 저하억제에 그다지 효율적이지 않음을 보여주고 있다.

한편, 그림 13에서와 같이 k_L/k_S가 큰 경우에는 막장통과 후 지하수위가 지속적으로 감소하는 경향을 보이고 있으나 k_L/k_S가 매우 작은 경우, 즉 라이닝의 차

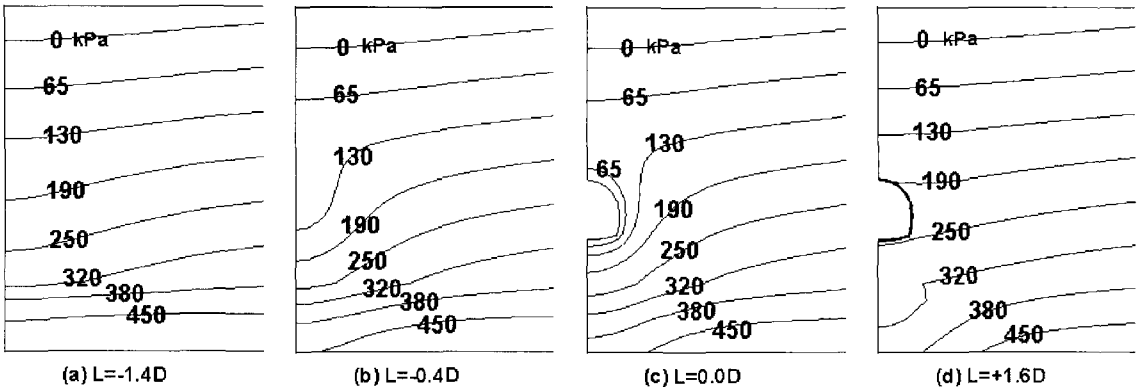


그림 12. 굴착과정에 따른 간극수압 분포(k_L/k_S=0.0)

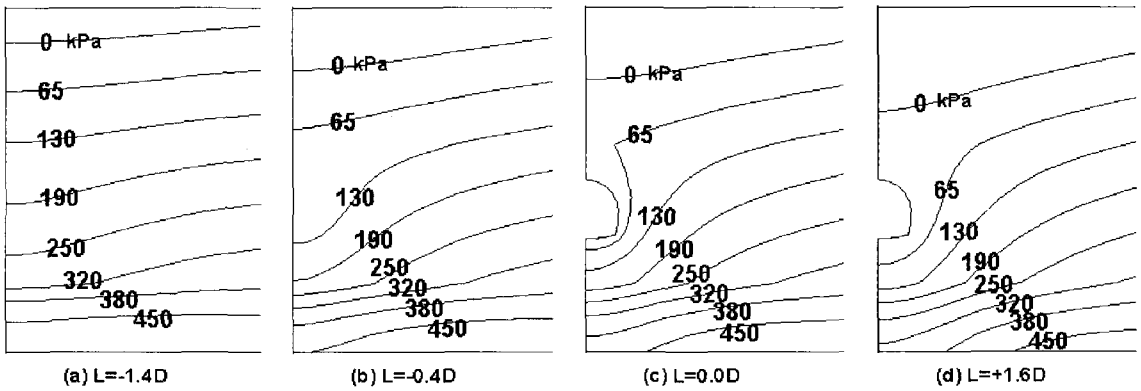
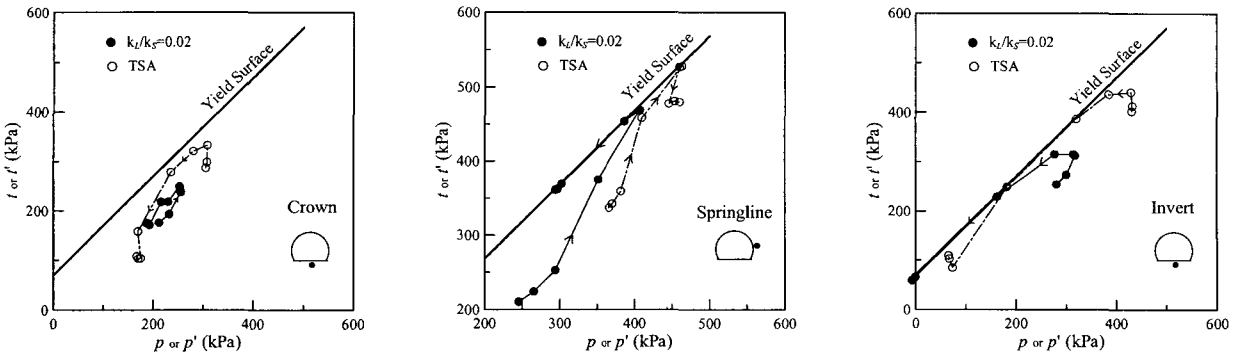


그림 13. 굴착과정에 따른 간극수압 분포(k_L/k_S=1.0)



(a) Crown (b) Springline (c) Invert

그림 14. 터널주변 응력경로

수효과가 클 경우에는 굴착 후 지하수위의 회복량은 그다지 크지 않으나 터널 주변의 간극수압은 상당한 양이 다시 회복되는 경향을 보여주고 있는데 이러한 경향은 앞서 언급한 바와 같이 숏크리트 라이닝의 차수로 인한 지하수위 회복에 그 원인이 있다고 하겠다. 한편, 터널 굴착 후 지하수위가 인버트 하부로 저하되지 않는 경우에 있어서 정상류 상태에 도달한 후 침투수압이 지속적으로 작용할 수 있다는 것을 의미하며 숏크리트 라이닝 설계시 이에 대한 고려가 필요하다는 점을 보여준다고 할 수 있다.

그림 14는 단면 S11의 터널 천단, 스프링라인, 인버트 지점의 터널굴착에 따른 응력경로를 $t-p$ 평면에서 보여주고 있는데 연계해석의 경우(k_L/k_S=0.02) 유효응력으로 그리고 전응력해석의 경우에는 전응력으로 표현하였다. 보이는 바와 같이 천단부의 경우 터널막장이 근접함에 따라 p와 t가 동시에 감소하는 경향을 보이고 있으며 항복면에는 도달하지 않는 것으로 나타났다. 한편, 스프링라인과 인버트부의 경우 터널막장이 근접함에 따라 초기에는 p와 t가 동시에 증가하다 굴착과 동시에 항복면에 도달한 후 항복면을 따라 다시 감소하는 양상을 보여주고 있는데 이는 라이닝 타설에 따른 축차응력의 감소에 따른 것이며 연계해석의 경우 p'이 "영"이하로 감소하여 액상화 현상이 발생하는 것으로 나타나 지하수위 하래에서의 터널 시공시에는 인버트부가 응력적으로 매우 취약한 부분임을 나타내고 있다. 전반적으로 연계해석과 전응력해석의 응력경로는 전반적으로 유사한 것으로 나타났다. 한편, 관찰할 수 있는 바와 같이 지하수위 아래에서 터널을 시공할 경우 흙/암반의 응력-변형율-강도 관계를 좌우하는 유효응력의 수준이 간극수압으로 인해 현저히 낮아지는데 이러한 경향은 연계해석을 수행하여야만 정확히 모사할 수 있어 터널설계단계에서 수행되는 해석에서 연계해석의 도입이 절대적으로 필요하다고 하겠다.

5.3 터널 및 주변 지반 변위거동

터널 시공시 터널의 안정성은 막장의 안정성과 매우 밀접한 관계가 있다. 특히 지하수위가 높은 경우 지하수위 아래에서 터널을 시공할 경우 막장의 안정성 확보여부가 전반적인 터널시공의 성공여부와 밀접한 관계가 있다고 하겠다. 그림 15는 다양한 k_L/k_S에 대한 연계해석의 결과와 전응력해석에서 얻어진 터널막장 전방에서의 수평변위를 비교하고 있다. 먼저, 보이는 바와 같이 막장에서의 최대변위를 비교할 경우 연계해석의 결과가 전응력해석의 결과에 비해 약 두 배 이상 큰 것으로 나타나고 있는데 이러한 경향은 막장에서의 침투수압에 기인한 것으로 지하수 아래에서의 터널굴착에 있어서 역시 막장의 안정성 확보가 관건이 됨을 단적으로 보여주고 있다. 한편, 이러한 경향은 전응력해석으로는

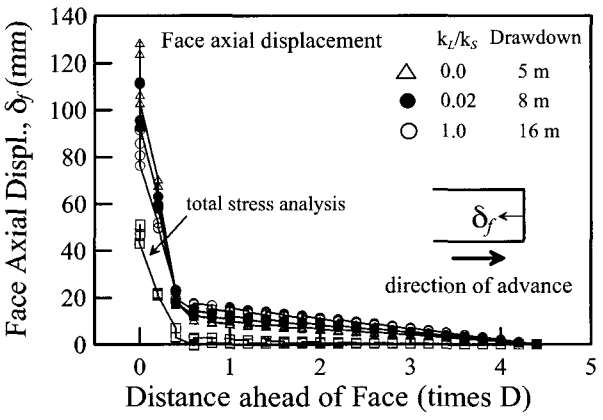


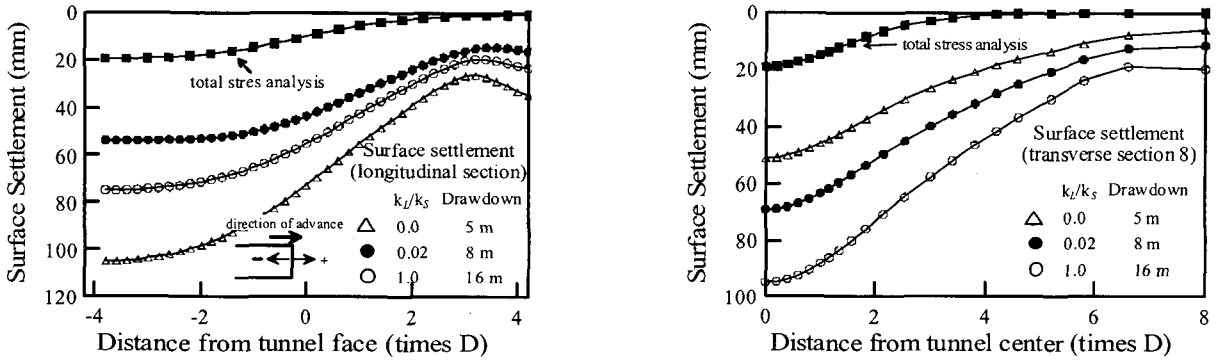
그림 15. 막장 전방 수평변위 비교

터널의 안정성 검토가 부적절하게 이루어질 수 있음을 보여주는 것으로서 터널문제에 있어 응력-간극수압 연계해석의 중요성을 반영한다고 할 수 있다.

한편, 라이닝의 투수성에 따른 막장수평변위 경향을 비교할 경우 앞서 제시된 결과에서는 k_L/k_S에 따라 수위 저하량이 달라지는 것으로 나타났는데 이 그림에서 보이는 바와 같이 막장의 수평변위에 있어서는 다소의 차이는 있으나 k_L/k_S에 따라 그다지 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이러한 경향은 굴착 후 그라우팅 등을 수행하여 터널벽면으로의 지하수유입을 억제할 경우 지하수위 저하는 어느 정도 감소시킬 수는 있으나 막장으로의 지하수 유입으로 인한 막장 불안정의 문제는 해결하지 못한다는 것을 단적으로 보여주는 것으로서 터널의 안정성 확보와 아울러서 지하수위 저하억제를 동시에 확보하여야 할 경우에는 막장으로의 지하수 유입을 억제하기 위한 막장 그라우팅이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

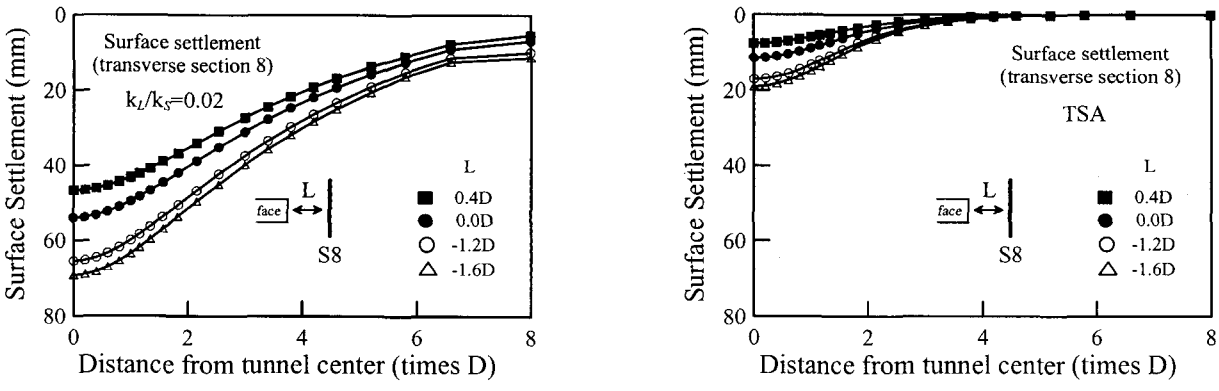
앞서 언급한 바와 같이 굴착이나 기타 원인으로 의해 지하수가 저하 될 경우 유효응력의 증가로 인해 지반의 변형이 증가하므로 터널굴착으로 인해 지하수가 저하될 경우 주변지반의 침하는 크게 증가하게 된다. 그림 16은 각각 횡·종단면상에서 터널 굴착으로 인한 지표침하 양상을 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 연계해석의 결과가 전반적으로 전응력해석 결과에 비해 월등히 큰 것으로 나타났으며 횡단면의 지표손실량을 고려할 때 일반적인 라이닝의 투수성을 고려한 k_L/k_S=0.02의 경우 4.6%로서 0.6%정도를 보이고 있는 전응력해석에 비해 약 7배 이상으로 나타나 지하수 저하를 허용할 경우 과다한 지반침하로 인해 주변 구조물에 막대한 영향을 미칠 수 있음을 보여주고 있다. 한편, 지하수위 저하량에 따라 지표침하량이 상당한 차이를 보이고 있어 지하수위 아래에서의 터널굴착시 지반침하를 억제하기 위해서는 지하수위 저하량 조절이 중요함을 보여주고 있다.

그림 17은 연계해석(k_L/k_S=0.02)과 전응력 해석으로부터 얻어진 단면 S8의 굴착과정에 따른 횡단면 침하곡



(a) Longitudial section(x=0)　　(b) Transverse section 8

그림 16. 지표침하 경향



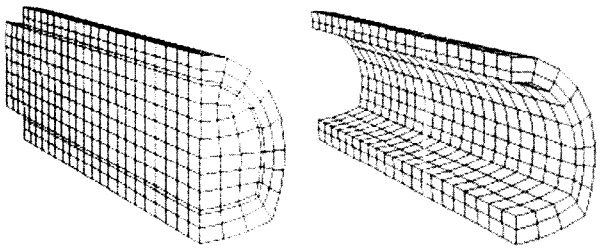
(a) Coupled analysis　　(b) Total stress analysis

그림 17. 시공과정에 따른 침하곡선 변화 경향

선을 비교 하고 있다. 보이는 바와 같이 터널막장과의 거리에 따른 경향을 고찰하면 연계해석의 결과에서는 막장이 대상단면 0.4D 후방에 도달할 때 이미 최종침하량의 60%정도가 발생한 것으로 나타났는데 이러한 경향은 앞서 언급한 바와 같이 지하수위 저하에 따른 간극수압의 감소로 인한 유효응력의 증가에 기인하는 것으로서 터널시공으로 지하수위가 저하되는 조건에 있어서는 지반침하의 평가와 대책마련이 중요한 설계 주안점임을 강조하는 것이라고 하겠다. 또한 전응력 해석 결과에서는 같은 굴착단계(L=0.4D)에서 최종 침하량의 30%에 해당하는 침하가 발생하는 것으로 나타나 연계해석의 결과와 큰 차이를 보이고 있어 침하검토에 있어서 연계해석의 중요성의 일면을 보여주고 있다.

5.4 그라우팅의 효과

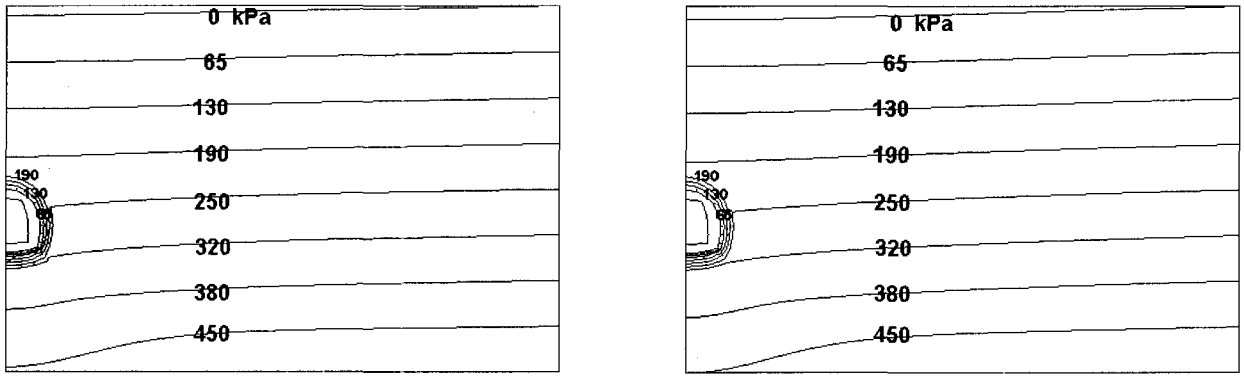
터널굴착시 터널내부로의 지하수 유입을 억제하고 터널의 안정성을 확보하기 위해 수행되는 그라우팅에 있어서의 주 설계항목은 주입범위라고 할 수 있다. 그라우팅의 주입범위는 결국 터널의 안정성 확보와 지하수위 억제라는 두 가지를 조건을 만족시키도록 결정하여야 한다. 본 절에서는 그라우팅 패턴이 터널 및 주변지반의 전반적인 거동에 미치는 영향을 고찰하기위해 그림 18에서와 같은 두 가지 그라우팅 조건(C1 & C2)에 대한 해석을 수행하고 결과를 고찰하였다. 그라우팅 영역의 역학적 특성은 그림 2에 제시되어 있으며 기존의 문헌을 참조하여 설정하였다. 해석에서는 프리 그라우팅이 적용되는 것으로 가정하였으며 C1과 C2의 두 경우 모두 터널 횡단면상의 그라우팅 범위는 터널 벽면에서 0.4D이며 C1의 경우에는 막장전방 0.4D에 프리 그라우팅이 수행된다(그림 18).



(a) C1 (b) C2

그림 18. 그라우팅 패턴

그림 19~21은 해석 결과를 보여주고 있는데 먼저 지하수위 분포를 보여주고 있는 그림 19와 20을 관찰하면 프리 그라우팅을 수행할 경우 지하수위 저하량이 현저히 감소됨을 알 수 있어 프리 그라우팅의 중요성을 잘 반영한다고 하겠다. 한편, C1과 C2를 비교하면 막장에 대한 그라우팅이 수행되는 C1의 경우 막장 전방에서의 지하수위 저하를 상당히 억제할 수 있는 것으로 나타났다. 그림 21은 그라우팅 조건에 따른 막장변위 및 지표침하 변화경향을 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 프리 그라우팅을 수행할 경우 터널 막장의 안정성 확보는 물론 지표침하 또한 현저히 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 그라우팅이 수행된 경우 물론 그라우팅 영역의 응력-변형율-강도 특성의 향상 또한 변위감소에 기여를 하였을 것으로 판단되나, 그라우팅으로 인한 터널내 유입량 감소에 따른 지하수위 저하 억제 효과가 큰 역할을 한 것으로 판단된다. 한편, 그라우팅 조건에 따른 경향을 비교하면 막장전방에의 그라우팅이 수행되는 C1의 경우에 있어 막장의 변위를 현저히 억제할 수 있으며 지표 침하량 또한 C2보다 억제효과가 있는 것으로 나타나 막장전방의 그라우팅이 막장의 안정성 확보와 지표



(a) C1 (b) C2

그림 19. 간극수압 분포(횡단면, y=0)

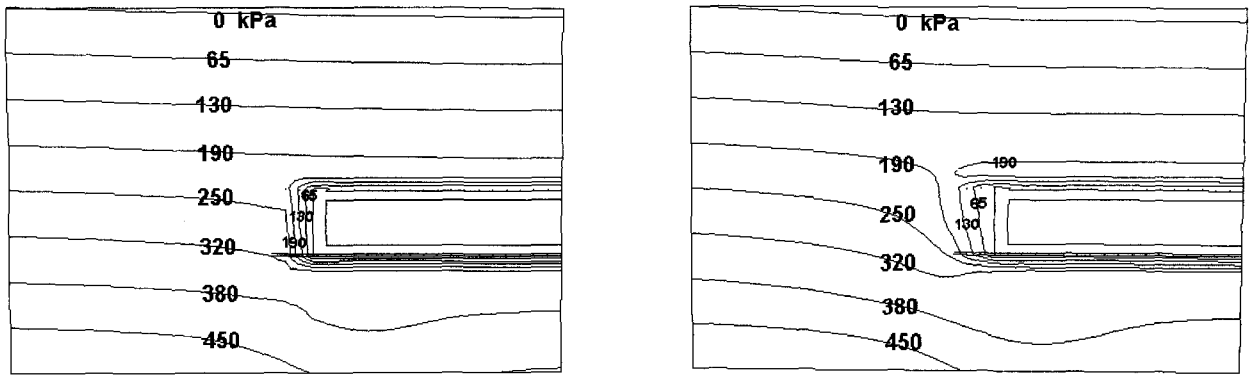


그림 20. 간극수압 분포(횡단면, x=0)

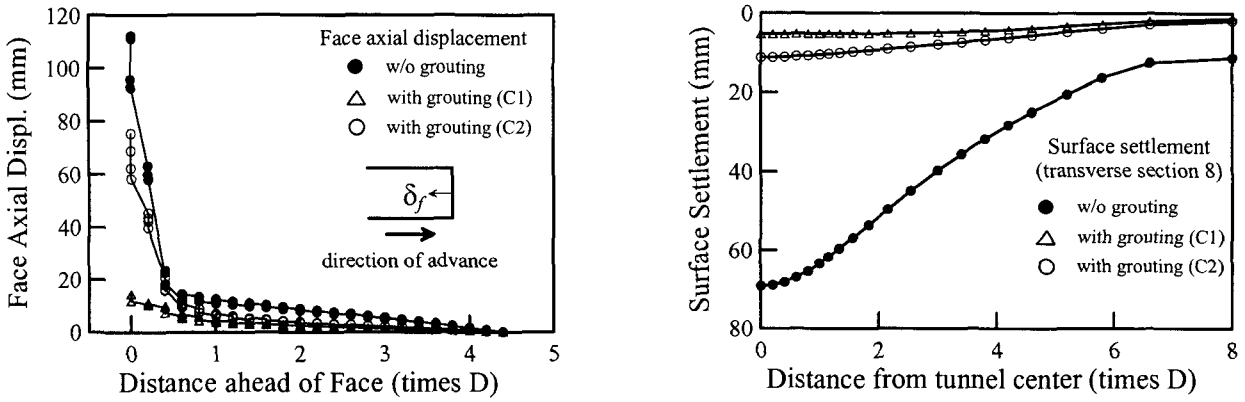


그림 21. 그라우팅 조건에 따른 막장변위 및 지표침하 변화경향

침하 억제 측면에서 매우 중요함 보여주고 있다.

이러한 경향을 종합적으로 판단할 때 본 연구에서 고려한 지하수위가 높은 조건에서의 터널시공에 있어서 터널의 안정성을 확보하고 지반침하를 최소화시키기 위해서는 프리 그라우팅을 적극적으로 수행하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 논문에서는 터널굴착과 지하수의 상호작용이 터널 및 주변지반의 전반적인 거동에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 종합적인 분석을 위해 지하수위 아래에서 터널이 시공될 경우에 대한 전반적인 메카니즘을 분석해 보았으며 아울러서 3차원 유한요소 연계해석 기법을 도입하여 지하수위 아래에서 시공되는 터널의 장·단기 거동 메카니즘을 유효응력 개념에서 고찰하였다. 이와 아울러 지하수억제 및 터널안정성 확보 차원에서 수행되는 그라우팅이 터널의 거동에 미치는 영향을 정성정량적으로 고찰하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과는 다음과 같이 요약된다.

(1) 터널시공에 따라 지하수 유동이 발생하는 지반조건에 있어서 유효응력개념에 근거한 연계해석의 결과는 터널의 거동 및 주변지반의 거동 측면에서 전응력 해석에 비해 불리한 결과를 주는 것으로 나타나 본 연구에서 고려한 경우와 유사한 시공조건에서 보다 현실적인 해석결과를 얻기 위해서는 연계해석을 수행하여야 한다.

(2) 터널시공시 지하수는 막장이 도달하기 이전(1.5D)부터 저하되기 시작하여 막장 통과 후 다시 회복하는 경향을 보이며 회복 정도는 라이닝과 지반의 상대적인 투수성에 좌우되는 것으로 나타나 막장통과 후 숏크리트 라이닝에 작용하는 수압산정시 라이닝과 지반의 상대 투수성을 고려하여야 한다.

(3) 본 연구에서 고려된 터널 시공조건에서 숏크리트 라이닝이 인버트까지 타설 되는 경우 인버트 하부지반에서 수압증가가 두드러져 유효응력이 거의 '0'으로 감소되는 현상이 발생하는 것으로 나타나 시공시

인버트 수압저감이 터널의 안정성 확보에 매우 중요한 것으로 나타났다.

(4) 터널굴착 후 숏크리트 라이닝이 타설되는 Drill & Blast 시공법의 경우 막장에서의 수압증가로 막장변위가 현저히 크게 발생할 수 있으므로 시공중 안정성을 확보하기 위해서는 막장의 수압을 저감시킬 수 있는 수발공을 설치하거나 막장전면에의 그라우팅을 수행하는 것이 바람직하다.

(5) 터널 굴착 이전에 '프리 그라우팅'이 수행될 경우 상당 부분의 지하수 저하를 억제할 수 있으며 터널 및 주변 지반의 거동을 최소화 할 수 있는 것으로 나타나 지하수위가 높고 본 연구에서 고려한 지반조건과 유사한 터널시공 조건에 있어서 터널의 안정성을 확보하고 지반침하를 최소화시키기 위해서는 프리 그라우팅을 적극적으로 수행하는 것이 바람직하다.

참 고 문 헌

1. Biot, M.A. (1941), "General theory of three dimensional consolidation", *J. Appl. Phys.*, Vol.12, pp.155-164.
2. Biot, M.A. (1955), "Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid", *J. Appl. Phys.*, Vol.26, No.2, pp.182-185.
3. Drucker, J.M and Prager, W. (1952), "Soil Mechanics and Plastic Analysis in Limit Design", *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol.10, No.2, pp.157-165.
4. 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 Undgerground Sapce Technology*, Vol.16, pp.31-40.
5. Norwegian Urban Tunnelling (1995), Norwegian Soil and Rock Engineering Association, Publication No.10.
6. Report on design issues of the concrete lining of the waterway tunnel (1997), KOWACO.
7. Shin, J.H., Addenbrooke, T.I., and Potts, D.M. (2002), "A numerical study of the effect of groundwater movement on long-term tunnel behavior", *Geotechnique*, Vol.52, No.6, pp.391-403.
8. Shin, J.H., Potts, D.M., and Zdravkovic, L. (2002), "Three-dimensional modelling of NATM tunnelling in decomposed granite soil", *Geotechnique*, Vol.52, No.3, pp.187-200.
9. Zienkiewicz, O.C. and Shiomi, T. (1984), "Dynamic behavior of saturated porous media: The generalized Biot formulation and its numerical solution", *Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech.*, Vol.8, pp.71-96.

(접수일자 2003. 7. 16, 심사완료일 2004. 1. 10)