KGS Spring Conference 2006 / March 24~25, 2006 / Seoul / Korea

# NATM 터널의 응력-간극수압 연계 유한요소모델링
# Stress-Pore Pressure Coupled Finite Element Modeling of NATM Tunneling

유충식[1], Chungsik Yoo, 김선빈[2], Sunbin Kim

[1] 성균관대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ
[2] 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student. Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.

**SYNOPSIS** : This paper concerns the finite element (FE) modeling approach for NATM tunneling in water bearing ground within the framework of stress-pore pressure coupled analysis. Fundamental interaction mechanism of ground and groundwater lowering was first examined and a number of influencing factors on the results of coupled FE analysis were identified. A parametric study was then conducted on the influencing factors such as soil-water characteristics, location of hydraulic boundary conditions, the way of modeling drainage flow, among others. The results indicate that the soil-water characteristics plays the most important role in the tunneling-induced settlement characteristics. Based on the results, modeling guidelines were suggested for stress-pore prssure coupled finite element modeling of NATM tunneling.

**Key words** : Tunneling, Groundwater, Coupled analysis, Finite-element method, NTAM

## 1. 서 론

최근의 들어 사회기반시설 확장의 필요성에 의해 고속철도, 지하철, 그리고 각종 도로 터널의 시공이 늘고 있다. 특히 도심지에서 시공되는 터널공사의 경우 불량한 지반 하에서의 시공이 증가하는 추세에 있으며 지하수위가 높은 지반조건에서도 불가피하게 터널이 계획되는 것을 종종 찾아볼 수 있다. 이러한 터널시공으로 고산습지 생태환경 영향과 인근 마을의 지하수 고갈, 도심지의 지표침하 발생의 피해사례들이 계속적으로 보고되고 있으며, 터널과 지하수의 문제가 국내 환경영향평가 대상으로도 포함되리만큼 그 중요성이 나날이 강조되고 있다.

지하수위가 높은 지반에서 터널을 시공하는 경우에는 터널-지하수의 상호작용으로 인하여 터널주변 지반의 하중지지력 저하로 인해 변위 및 응력이 크게 발생하고 특히 막장부 안정성 확보가 매우 중요한 이슈로 대두되며, 지하수 저하시 지반침하가 동반되어 시공상 문제가 발생할 소지가 있으므로 설계와 시공단계에서 이에 대한 고려가 필요하다. 설계단계에서는 터널시공조건을 고려하여 계획된 지보패턴 및 굴착공법의 타당성을 검토하게 되는데 이때 일반적으로 유한차분법 혹은 유한요소법 등의 수치해석적인 기법이 주로 사용되다. 따라서 터널-지하수 상호작용이 발생되는 시공조건에 대한 수치해석에서는 터널과 지하수의 상호작용의 모사가 가능하도록 역학적 측면과 수리적 측면이 모두 반영된 응력-간극수압 연계해석(stress-pore presure coupled analysis)을 수행하여야 한다(Yoo 2005). 그러나 현재 실무에서 적용하고 있는 각종 터널해석 프로그램의 연계해석 기능의 제한성 및 해석 모델링시 지반공학적인 문제를 반영하는데 있어서의 각종 해석 모델링에 대한 경험부족으로 응력-간극수압 연계해석을 설계에 적절하게 반영한 예는 많지 않은 실정이다.

지하수위 하에서 터널을 시공하는 경우에 대한 영향을 분석하기 위하여 수치적인 기법을 이용한 연구로는 Gunn & Taylor(1984), Atawa & Leca(1994), Pottler 등(1994), 그리고 Schweiger 등(1999)이 수행하였으나 정상류 조건인 경우에 국한되거나 전응력 해석에 침투해석 결과를 반영하는 정도여서 터널시공과 지하수의 상호작용을 정확히 모델링하지는 못하였다고 할 수 있다. 보다 진보된 형태로는 Shin 등(2002, 2005)이 터널의 장기거동 측면에서 지하수 유동과 라이닝에 작용하는 간극수압의 영향을 연구하기 위하여 평면변형과 축대칭 유한요소모델을 이용하여 연계해석을 수행한 바 있으며, Yoo (2003, 2005)는 3차원 응력-간극수압 연계해석을 통해 터널굴착시 지하수 유동에 따른 막장거동 및 지표변위 특성을 고찰하였으며 터널-지하수 상호작용 관점에서 지반/라이닝 투수성에 따른 숏크리트 라이닝 응력 발생 경향에 대한 결과를 보고한 바 있다. 선행 연구결과에 의하면 터널-지하수 상호작용 및 이로 인한 지하수 저하는 지표침하량 및 터널 변위를 증가시키며 라이닝 배면수압과 라이닝 축력 등 전반적인 터널의 거동에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있어 응력-간극수압 연계해석이 적절히 구현되지 않을 경우 터널 및 주변 영향에 대한 안정성이 과소평가될 소지가 있으므로 연계해석의 현실적인 적용이 무엇보다 중요하다.

본 연구에서는 터널-지하수 상호작용이 발생하는 시공조건에 대한 응력-간극수압 연계해석의 적절한 적용을 위한 모델링 기준을 제시하고자 연계해석 모델링 측면에서 해석결과에 영향을 미칠 수 있는 다양한 인자들에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 본 논문에서는 그 결과를 토대로 연계해석 모델링시 고려되어야 할 각종 영향인자 중 해석결과에 미치는 영향이 지대한 불포화토 특성 반영여부에 대한 내용을 다루었다.

## 2. 응력-간극수압 연계해석의 모델링

유한요소해석에서 지배방정식은 해석대상 조건에 대한 경계조건과 초기조건을 부여하여 해를 얻게 된다. 응력해석에서 변위에 대한 경계조건을 부여하는 것과 같은 개념으로 연계해석시 해석영역에 대해 유입과 유출에 관한 경계조건을 부여하여야 한다. 이러한 유입과 유출은 수두 (Head difference), 유량 (Flux), 혹은 간극수압(Porewater pressure)으로 지정할 수 있으며, 해석시 사용하는 프로그램에서 지원하는 형태에 부합되는 형식으로 모델링을 수행하면 된다. 실제 터널시공시 굴착면을 통해서 지하수가 유출이 되므로 굴착면에서의 간극수압은 "0"으로 고려할 수 있으며, 따라서 굴착과 동시에 굴착면의 해당 절점들에 간극수압을 "0"으로 부여하여 지하수의 유출에 대한 모델링을 할 수 있다. 또한 굴착면 요소의 간극수압이 부의 간극수압에 도달할 때까지 배수가 되도록 하여 모델링 할 수도 있다. 지하수 유입에 대한 모사는 시공중의 단기문제인지 운영중 장기문제를 대상으로 하는지에 따라 구분할 수 있다. 시공중 단기문제로 국한하는 경우 강우와 같은 수문특성을 시공과정에서 굳이 고려할 필요가 없이 원거리 측면경계부를 통하여 초기조건으로 부여한 수압이 일정하게 유지되도록 하여 지하수 유입을 모델링 하면 된다. 그러나 운영중 장기문제를 대상으로 하는 경우 강우와 같은 수문특성을 반영하여야 현실적인 결과를 얻을 수 있으므로 측면경계로부터의 지하수 유입과 아울러 강우의 일부가 지표로부터 유입이 되도록 모델링 하여야 한다. 구체적으로 먼저 대상지역의 수문특성을 조사하여 연강수량 및 지표로 유입되는 양을 정리한 후 이를 해석기간으로 환산하여 지표에 간극수압으로 부여하여 강우의 일부가 지표로 유입되도록 모델링 한다.

한편, 2차원 해석시 일반적으로 라이닝은 Beam 요소로 모델링하게 되는데 이 경우 Beam 요소가 연계해석이 가능하지 않으므로 라이닝의 수리적 특성을 반영하기 어렵게 된다. 이를 해석에서 반영하기 위하여 Beam 요소에 접해 있는 외부 Solid 요소를 라이닝 두께로 설정하고, 역학적 특성은 해당 지반의 물성으로 사용하되 수리적 특성은 라이닝의 물성을 사용하여 모델링할 수 있다. 이러한 번거로움을 제거하기 위하여 라이닝을 Beam 요소로 모델링하지 않고 해당 두께를 가진 Solid 요소로 모델링할 수도 있다.

아울러 터널굴착으로 인하여 지하수위가 저하되는 조건에서는 포화상태의 지반이 불포화 상태로 전이되어 초기상태와는 다른 불포화토의 특성을 갖게 된다. 지하수가 유출되면서 생긴 간극에 공기가 유입되면 물과 공기사이의 압력차로 부의 간극수압을 갖는 모관흡수력(matric suction)이 발생하게 되며, 지

반의 투수계수도 모관흡수력에 따라 변하는 불포화 투수계수가 된다. 이 경우 포화도에 따른 부의 간극수압과 불포화 투수계수가 지반의 유효응력 및 지하수 흐름에 지대한 영향을 미치게 된다. 따라서 지하수위 저하시 나타나는 불포화토의 특성을 재료 모델링에 반영하여야 현실에 근접한 결과를 얻을 수 있다. 불포화토의 특성은 흙-물 특성 곡선(soil water characteristic curve, SWCC)와 투수계수함수(permeability function)를 이용하여 표현된다. 불포화토의 기본적인 내용은 본 논문의 범위를 벗어나며 관심있는 독자는 Lu & Likos (2004)를 참조하기 바란다.

## 3. 유한요소해석 매개변수 연구

### 3.1 해석 대상 시공조건

본 연구에서는 직경(D) 12m의 터널이 지표면으로부터 30m 하부에 시공되는 경우를 고려하였으며, 해석대상 지반은 철도터널 ○-○공구 현장의 지반조건을 고려하였다. 즉 그림 1에서 보이는 바와 같이 터널의 springline 상부 지층은 풍화토로 구성되어 있으며 그 하부에는 연암이 위치하는 것으로 가정하였다. 주 지보재로는 두께 30cm의 숏크리트가 시공되며 4m 길이의 록볼트가 1.5m 간격으로 설치되는 것으로 간주하였다.

본 연구에서 계획한 연계해석 모델링 측면에서 영향인자들에 대한 검토를 위해 연계해석시 불포화토 특성에 대한 고려여부에 따른 연구를 수행하였다. 표 1은 본 연구에서 수행한 해석조건에 대하여 정리하여 보이고 있다.

표 1. 해석조건

| 해석조건 | 불포화토 특성 | 측면경계범위(L) | 라이닝 모델링 | 배수 모델링 |
|---|---|---|---|---|
| 내 용 | 고려/미고려 | 20D | Solid 요소 | 굴착면 간극수압 "0" |

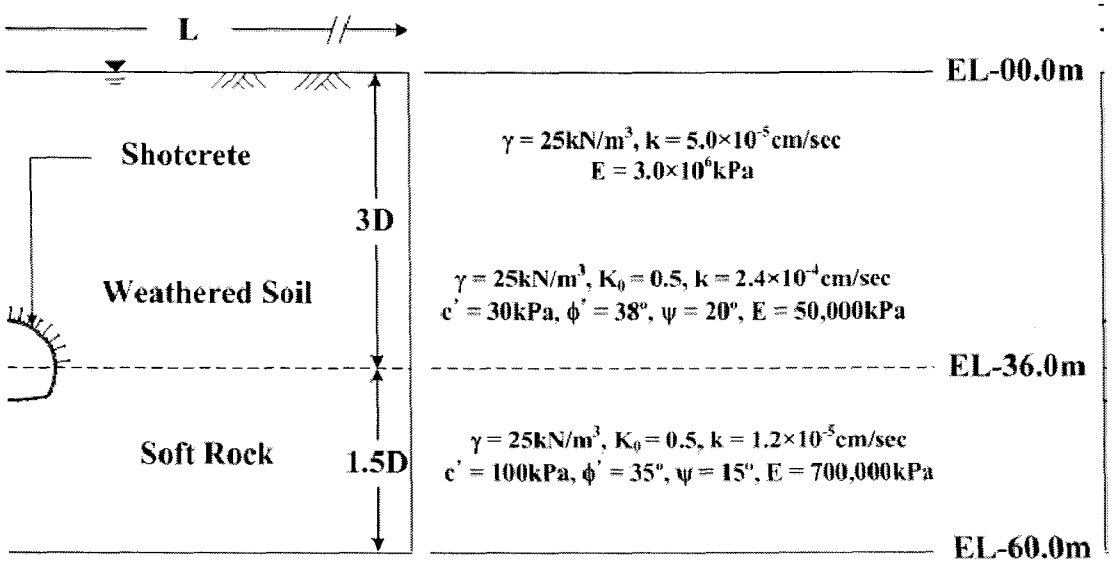



그림 1. 해석 조건

## 3.2 해석 모델링

### 3.2.1 사용 프로그램

해석 프로그램은 범용 유한요소 해석 패키지인 ABAQUS 6.4-2를 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.

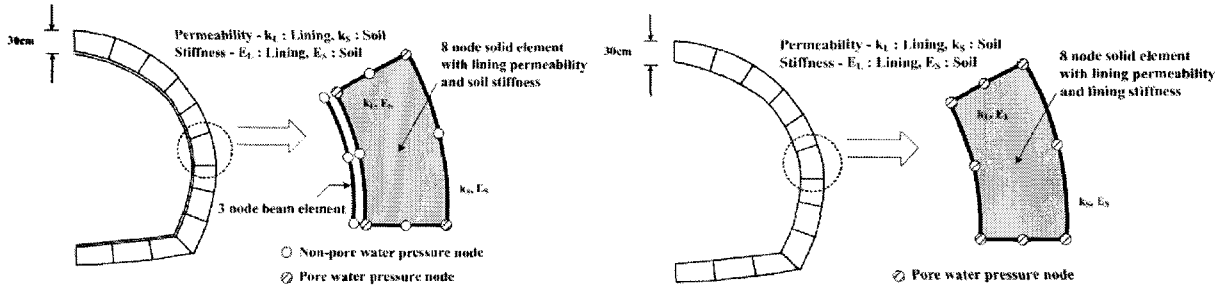
### 3.2.2 변위경계 및 수리경계

터널 굴착의 모델링에 있어서 해석의 편의상 전단면 굴착으로 시공되는 것으로 가정하였으며 터널 중심축으로부터 좌우 대칭인점을 감안하여 우측 반단면에 대한 해석을 수행하였다. 한편, 터널 중심으로부터 5D~20D(D=터널직경)의 거리에 측면 경계면을 위치시켜 수평방향으로의 변위를 구속하였으며 터널 바닥으로부터 약 1.5D 하부에 하부 경계를 위치시키고 롤러를 설치하여 연직방향의 변위를 구속하였다.

수리적 경계조건으로 측면경계와 하부경계에는 초기조건으로 부여한 수압이 일정하게 유지되도록 하였다. 아울러 연계해석 과정에서 원 지하수위 위치에 no-flow 경계를 부여하여 지하수의 터널내부로의 유입은 연직 및 하부경계를 통해서만 이루어지도록 하였으며, 터널 내부로 지하수가 배수되는 과정을 모사하기 위해서는 터널 라이닝 내벽을 따라 각 절점에 간극수압 "0"의 경계조건을 부여하는 방법으로 모델링하였다.

### 3.2.3 지반 및 지보재 모델링

지반 및 지보재의 이산화에 있어 지반은 8절점 가감적분 응력-간극수압 연계고체요소(CPE8RP)를 적용하였으며, 록볼트는 트러스 요소(T3D2)를 이용하여 모델링 하였다. 숏크리트 라이닝의 모델링에 있어서 Beam 요소 적용시 그림 2와 같이 라이닝의 수리적 특성을 고려하기 위하여 Beam 요소에 접해 있는 외부 Solid 요소를 라이닝 두께로 설정하고, 역학적 특성은 해당 지반의 물성으로 사용하되 수리적 특성은 라이닝의 물성을 사용하여 모델링하여야 하는데 이러한 번거로움을 피하기 위하여 라이닝을 Solid 요소로 모델링하여 라이닝 두께에 해당하는 크기로 요소 크기를 설정하여 8절점 가감적분 응력-간극수압 연계고체요소(CPE8RP)를 사용하였다. 그림 3은 해석에 적용된 유한요소모델을 보여주고 있다.




(a) Beam+Solid 요소 모델링 (b) Sloid 요소 모델링

그림 2. 라이닝의 투수성을 고려한 모델링

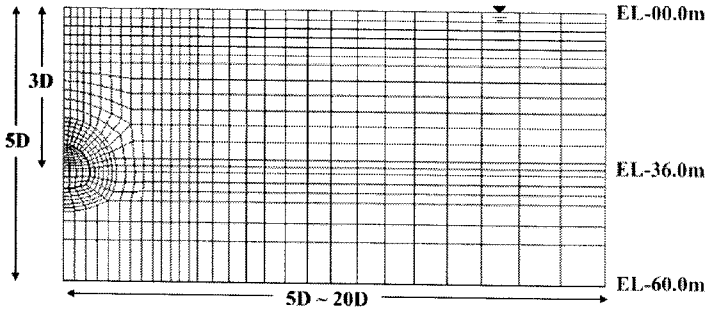



그림 3. 해석에 적용된 유한요소망

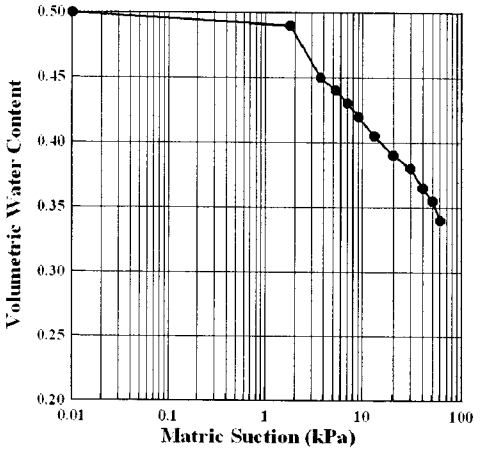



그림 4. 풍화토에 적용된 SWCC

### 3.2.4 재료 모델링

재료 모델링에 있어 해석 대상 지반은 Mohr-Coulomb 항복규준을 따르는 비연계(non-associated) 탄소성 재료로 가정하였으며 숏크리트 라이닝과 록볼트는 탄성재료로 가정하였다. 지하수 저하시 불포화구간 불포화토 특성은 그림 4에서의 SWCC를 고려하였으며, 불포화 투수계수는 포화투수계수($k_s$)와 포화도와 식 (1)과 같은 관계가 있는 것으로 가정하였다(ABAQUS users manual 2005).

$$k = k_s \times s^3 \qquad (1)$$

### 3.2.5 시공과정의 모델링

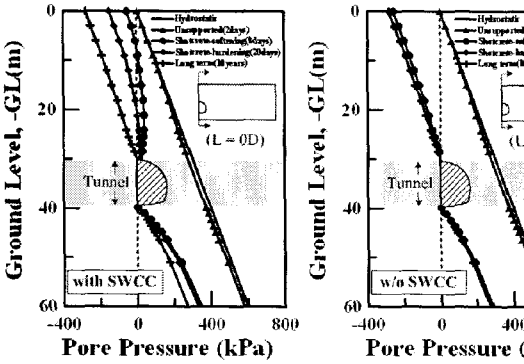
일반적으로 2차원 해석에서는 3차원적 터널 시공과정을 현실적으로 모델링하기 위해 하중분배 개념을 도입하여 해석을 수행한다. 다만 지하수위 하부 지반에서 시공되는 터널의 하중분담율에 관한 내용은 매우 중요한 또 다른 주제이며 따라서 심도 있는 연구가 필요하나 재료 및 기타 모델링 이슈에 국한하여 본 해석에서는 굴착단계, 연한 숏크리트 단계, 강한 숏크리트 단계의 하중분담율을 50%-25%-25%로 적용하였으며 각 굴착하중을 유사한 시공환경에서의 자료를 고려하여 무지보 굴착단계 2일, 숏크리트 연화단계 8일, 숏크리트 경화단계 20일 가량이 소요되는 것으로 가정하였다. 한편, 해석조건에 대한 장기거동측면에서의 비교를 위해 시공 후 10년에 걸친 부정류 해석을 수행하였으며 측면 경계에서의 지하수위는 초기 지하수위가 유지되는 것으로 가정하여 측면부에서 지하수 유입이 이루어지는 것으로 가정하였다.

## 4. 해석결과 분석

### 4.1 간극수압 분포 및 유효응력, 지하수 저하량

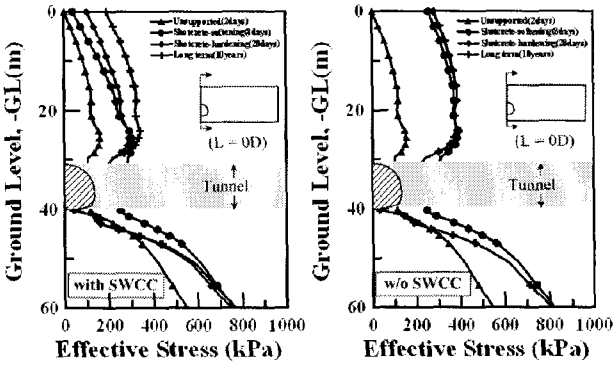
지하수위 하에서 터널이 시공되는 경우 수두차로 인한 지하수 유동이 발생하므로 지하수위가 저하된다. 이때 지하수위가 저하된 구간에서는 포화상태의 지반이 불포화 상태로 전이됨에 따라 부의 간극수압이 발생하게 되며 따라서 유효응력은 물론 지반내 체적변형이 포화상태의 지반과는 상이하게 나타날

수 있다. 그림 5와 그림 6은 불포화토 특성인 SWCC에 대한 고려 여부에 따라 터널 중심축에서의 간극수압 분포와 유효응력 분포를 시공단계별로 보이고 있다. 그림 5를 관찰하면 불포화토의 특성을 반영하지 않은 경우 지반내 간극수압이 급격히 소산되어 불포화 영역이 확대된 것을 볼 수 있다. 이는 지반의 투수계수가 불포화토의 모관흡수력에 따라 변하는 불포화 투수계수를 따르는 반면 이를 고려하지 않는 경우 초기포화상태의 투수계수가 지속적으로 유지되어 지하수 유출 속도가 실제 조건보다 크게 되며 따라서 지반내 간극수압이 급격하게 소산된 것으로 파악된다. 이에따라 시공경과에 따라 지반내 유효응력이 그림 6에서 나타낸 바와 같이 간극수압이 소산됨에 따라 증가하는 것으로 나타나 불포화토 특성 미고려시에는 유효응력이 급격히 증가하는 경향을 볼 수가 있다.




(a) 불포화토 특성 고려 (b) 불포화토 특성 미고려

그림 5. 터널 중심축의 간극수압 분포




(a) 불포화토 특성 고려 (b) 불포화토 특성 미고려

그림 6.터널 중심축의 유효응력 분포

그림 7은 불포화토 특성을 고려한 경우에 대하여 시공단계별로 터널중심축에서 0D, 2D, 4D 이격된 단면에서의 포화도를 도시하고 있다. 불포화토의 특성을 고려하지 않은 경우 부의 간극수압에 대한 포화도 곡선인 SWCC를 반영하지 못하므로 지하수위가 저하되더라도 전 지반에 걸쳐 포화도가 100%로 나타나지만 불포화토의 특성을 반영한 경우는 그림에서 보는 바와 같이 간극수압 변화에 따라 부의 간극수압이 발생한 구간에서는 포화도가 100% 이내로 나타나 지하수위 저하 정도를 현실적으로 평가하는 것이 가능하다. 이러한 결과는 지하수위하의 터널시공조건에서 수위가 저하되는 경우에 대해 연계해석을 통한 검토를 위해서는 불포화토의 특성을 해석에 반영하는 것이 중요함을 보여주는 것이라 하겠다.

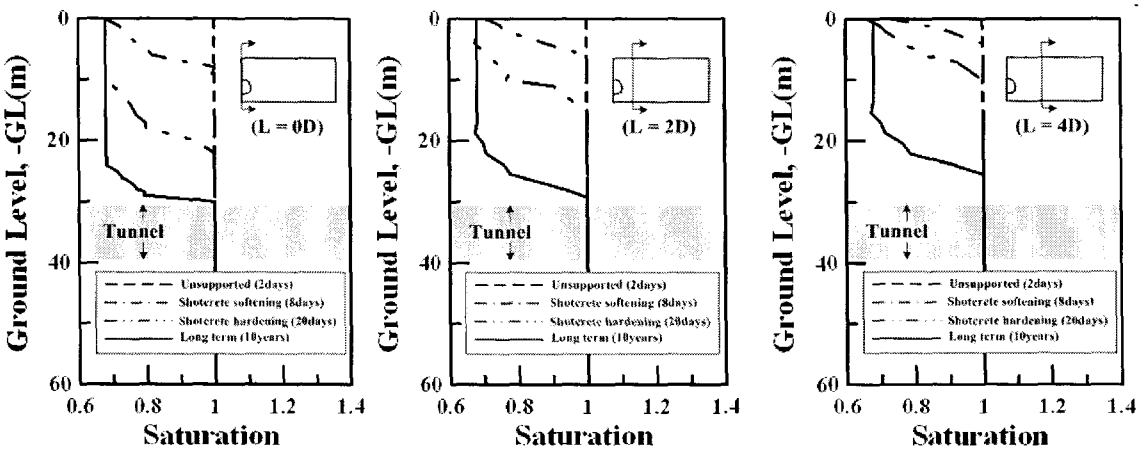
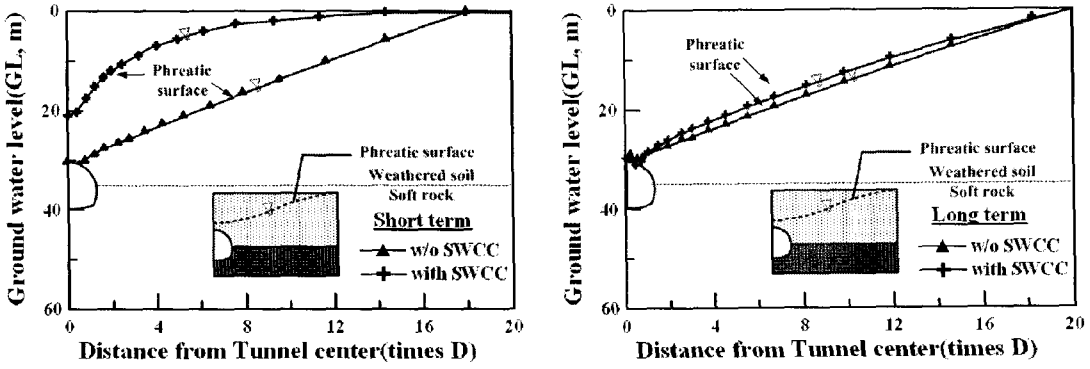



그림 7. 불포화토 특성 고려시 시공단계별 지반내 포화도

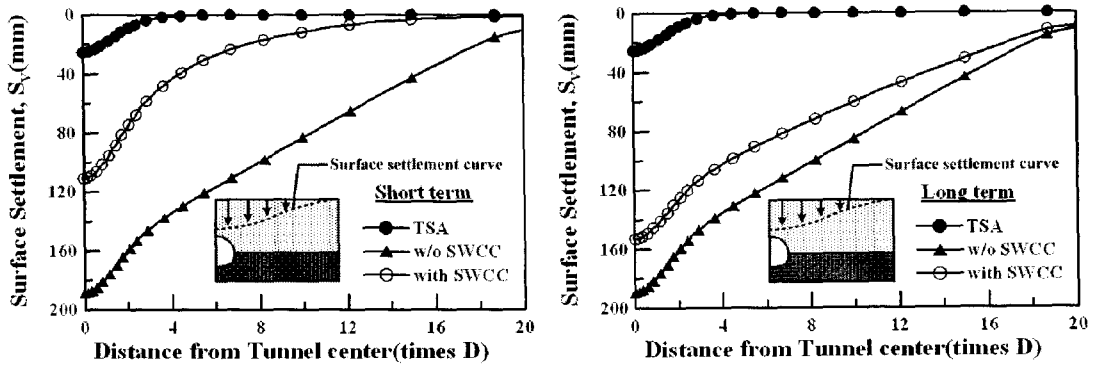
지반내 간극수압 분포로부터 간극수압이 "0"인 지점을 연결한 선을 지하수위면으로 간주하여 도시한 그림 8은 불포화토 특성 고려여부에 대한 지하수위 저하량을 비교하고 있다. 그림을 관찰하면 불포화토 특성 고려여부에 따라 현저한 차이를 보여 불포화토 특성 미고려시 결과는 시공직후 터널 천단위치까지 저하되는 것으로 나타나 있다. 이는 앞서 기술된 바대로 지반이 포화상태에서 불포화상태로 전이되면 투수계수 역시 모관흡수력에 따라 변하는 불포화 투수계수로 사용되어야 하나 이를 고려치 않아 터널내부로의 지하수 유출 속도가 실제 조건보다 크게 나타난 것에 기인한 것으로 판단된다.




(a) 시공직후 (b) Long term 시

그림 8. 불포화토 특성 고려여부에 따른 지하수위 저하곡선

그림 9는 지하수를 고려하지 않은 전응력 해석조건과 불포화토 특성 고려 여부에 대한 연계해석조건에서의 터널굴착으로 인한 지표침하곡선을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 전응력 해석결과는 최대 25mm 가량의 지표침하가 발생하고 있으며, 불포화토 특성을 고려하지 않은 연계해석시 지표침하는 최대 190mm를 나타내고 있다. 불포화토의 특성을 고려한 경우의 침하는 시공직후 110mm, 지하수 흐름이 정상류 상태에 도달시 155mm 가량이 발생하는 것으로 나타나고 있다. 전응력 해석의 경우 지하수위 저하로 인한 지반내 체적변형이 반영되지 못하므로 지표침하를 과소평가하는 것이며, 연계해석을 수행하는 경우에서 불포화토의 특성을 반영하지 않을시에는 불포화 투수계수를 반영하지 못하여 지하수가 급격히 저하되고 체적변형이 크게 증가하여 지표침하 역시 과대평가하는 것이다.

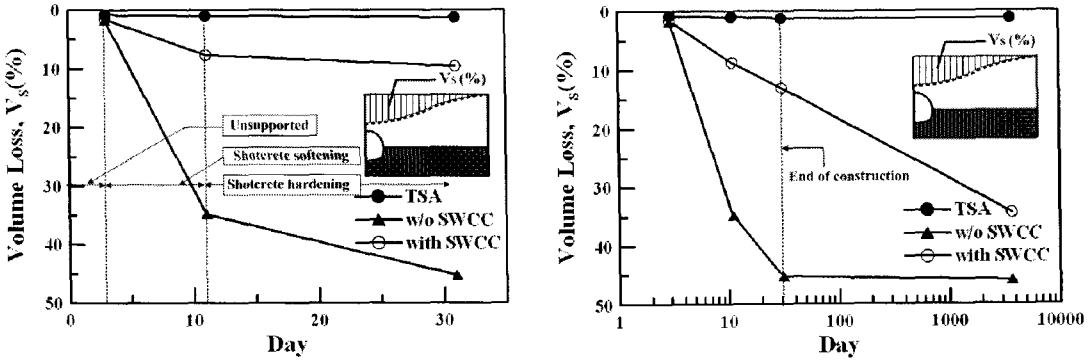



(a) 시공직후 (b) Long term 시

그림 9. 불포화토 특성 고려여부에 따른 지표침하곡선

각 해석조건별 터널굴착으로 인한 시공경과일수별 지반손실율(%)을 보이고 있는 그림 10을 보면 지반의 불포화 특성을 고려한 연계해석결과 시공직후 약 10%의 지반손실이 발생한 후 향후 10년여에 걸쳐 35%까지 유발되는 것으로 나타나고 있다. 전응력 해석시 지반손실율은 2~3% 내외인 범위에서 나

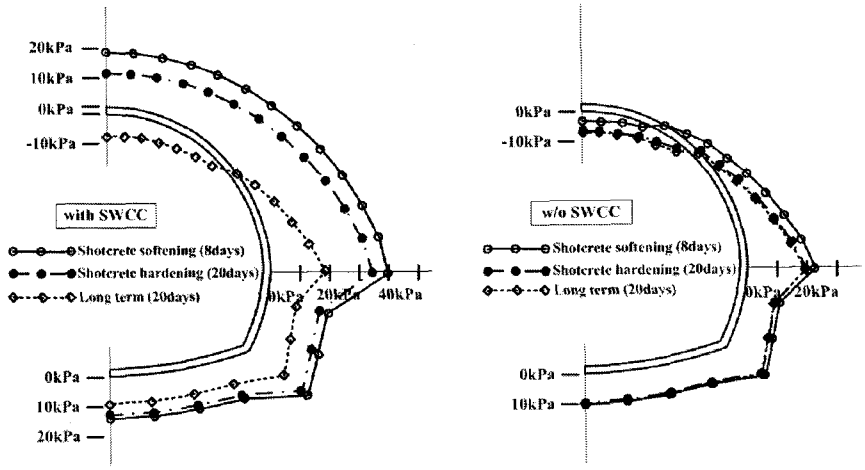
타나고 있어 매우 작게 평가하며, 불포화 특성을 고려치 않은 연계해석결과는 시공직후 이미 45% 가량의 지반손실이 발생하는 것으로 나타나 매우 과대평가하는 것으로 검토되었다. 지하수의 유동을 고려하지 못하는 전응력 해석의 경우 지하수 저하로 인한 지반의 체적변형을 반영하지 못하므로 지표침하 및 지반손실을 과소평가하게 된다. 또한 연계해석을 수행하는 경우에 있어서도 불포화 특성을 반영하지 않을 시에는 지반내 불포화토의 투수계수를 반영하지 못하여 지하수위가 급격히 저하되며, 이로 인한 지반의 체적감소가 실제보다 크게 나타나 지표침하 및 지반손실을 과대평가 할 수 있다.




(a) 시공중 (b) Long term 시

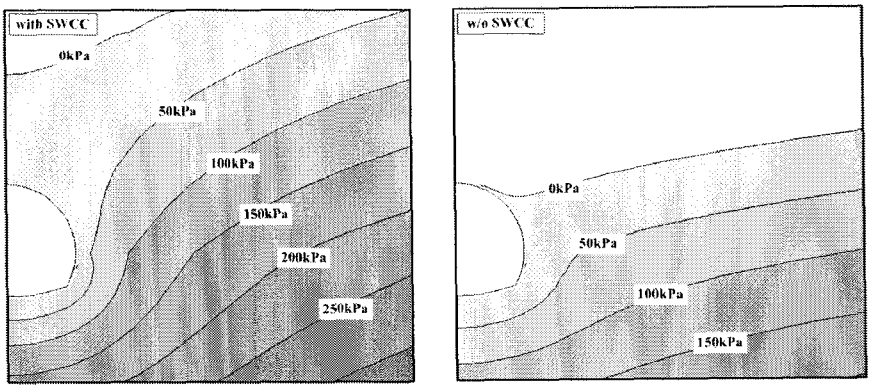
그림 10. 불포화토 특성 고려여부에 따른 지반손실율

앞서 언급한 바와 같이 터널굴착에 따른 지하수위 저하는 지반침하 뿐만 아니라 터널 및 터널 주변지반의 간극수압 및 응력상태에 영향을 미치게 된다. 불포화토 특성 고려여부에 따른 라이닝 배면수압을 시공단계별로 나타내고 있는 그림 11를 관찰할 때 정상류 상태에 도달한 후 간극수압은 비교적 동일한 수압분포를 보이고 있으나 시공중 부정류 상태에서는 풍화토에 위치하고 있는 라이닝 천단~측벽간 라이닝 배면수압이 불포화토 특성 고려여부에 따라 2배 이상의 급격한 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 시공 직후 터널 주변 간극수압을 보여주고 있는 그림 12에서 잘 관찰 할 수 있는데, 이는 불포화토 특성에 따라 동일 시간조건에서 터널 상부에서의 지하수위 저하량이 다르기 때문이며, 불포화토 특성을 반영하지 않을 경우 지하수위가 급격히 저하되므로 배면수압이 작게 발생하는 것이다.




(a) 불포화토 특성 고려 (b) 불포화토 특성 미고려

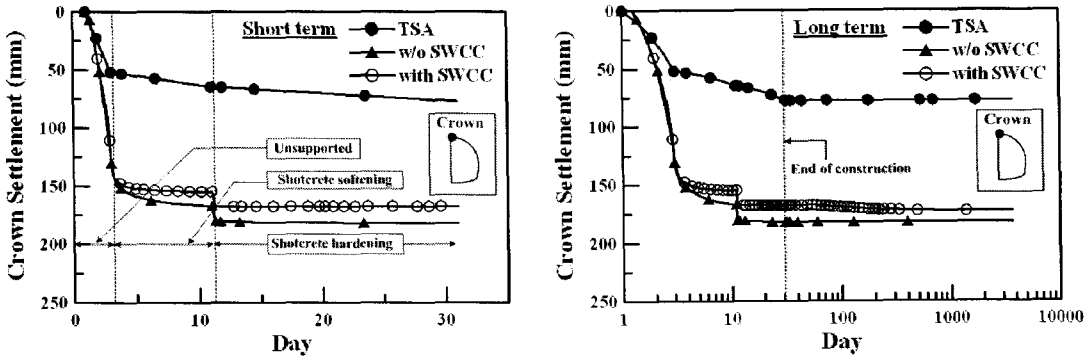
그림 11. 불포화토 특성 고려여부에 따른 라이닝 배면수압




(a) 불포화토 특성 고려 (b) 불포화토 특성 미고려

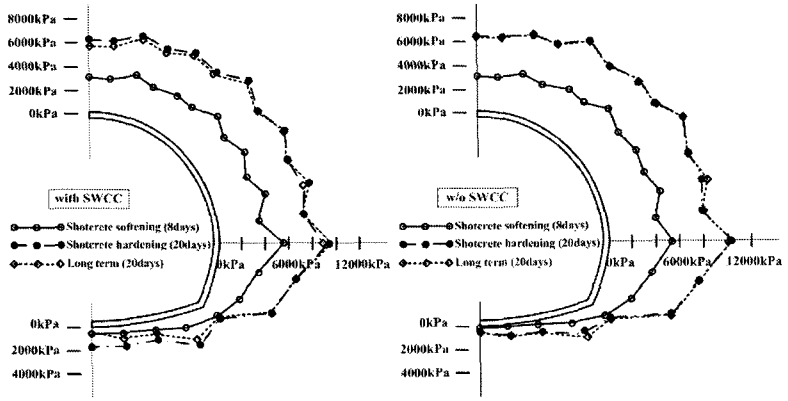
그림 12. 불포화토 특성 고려여부에 따른 시공직후 라이닝 주변 간극수압

한편 터널주변의 간극수압이 소산이 되면 지반내 유효응력이 증가되어 터널 굴착시 터널주변지반의 하중지지력이 감소하며 라이닝에 작용하는 하중이 증가하게 된다. 그림 13과 그림 14의 터널 천단변위와 라이닝 압축응력을 관찰하면 불포화토 특성 미고려시의 터널 천단변위와 라이닝 압축응력이 5~10% 가량 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이는 터널주변 간극수압이 불포화토 특성을 반영한 경우보다 불포화토 특성을 반영하지 않은 경우 빨리 소산되기 때문이며, 이로 인하여 터널주변의 유효응력이 보다 증가하였기 때문이다.




(a) 시공중 (b) Long term 시

그림 13. 불포화토 특성 고려여부에 따른 시공단계별 터널천단변위




(a) 불포화토 특성 고려 (b) 불포화토 특성 미고려

그림 14. 불포화토 특성 고려여부에 따른 라이닝 압축응력

## 7. 결 론

본 논문에서는 응력-간극수압 연계해석시 터널의 거동 및 주변지반에 미치는 영향인자를 모델링 측면에서 고찰하였다. 이를 위해 철도터널 ○-○공구 현장의 지반조건을 대상으로 연계해석 측면에서 해석결과에 영향을 미칠 수 있는 다양한 인자들 중 불포화토 특성 반영여부에 대한 결과를 비교·분석하였다. 터널굴착으로 인하여 지하수 유동이 발생하여 지하수위가 저하되는 시공조건에서는 포화상태의 지반이 불포화 상태로 전이되며 지반내 부의 간극수압이 발생하므로 연계해석 모델링시 불포화토 특성을 반영하여야 하나 불포화토 특성을 반영하지 않은 경우 분석결과 시공직후의 지하수위 저하는 물론 지표침하, 라이닝 압축응력을 과대평가 할 수 있으며, 라이닝 배면수압 및 터널내 유입수량은 과소평가 할 수 있는 것으로 나타났다.

## 감사의글

본 연구는 2005년 건설교통부가 출현한 한국형 싱글쉘 터널공법 메카니즘 이론 정립 및 설계/해석 요소기술 개발(과제번호 : C103A1000026-04A0200-02320)과 IT 기반의 지하공간 지보시스템 설계기술 개발(과제번호 : C104A1010001-05A0501-00220)에 의한 것이며 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 유충식 (2003), "지하수와 터널굴착 - 3차원 연계해석을 통한 고찰", 한국터널공학회 봄 정기 학술발표회 논문집, pp. 127-138.
2. 유충식 (2005), "응력-간극수압 3차원 연계해석을 이용한 터널시공과 지하수의 상호작용으로 인한 라이닝 거동특성 연구", 한국지반공학회 학술발표회 논문집, pp. 465-474.
3. 유충식 (2005), "터널시공과 지하수의 상호작용이 터널의 거동에 미치는 영향", 한국터널공학회 논문집, pp. 97-108.
4. Atawa, M., and Leca, E.(1984). "Analysis of groundwater seepage into tunnels." *Proc., Int. Congress on Tunneling and Ground Conditions*, Cairo, Egypt, 303-310.
5. Gunn, M. J., and Taylor, R. N. (1984). "Discussion on Atkinson and Mair(1983)." *Geotechnique*, 35(1), 73-75.
6. *ABAQUS users manual, Version 6.5. (2005).* Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc., Pawtucket, Providence, R.I.
7. Lu, N and Likos W. (2004). *Unsatruated soil mechanics*, Wiely, USA.
8. Pottler, R., Hagemeister, A., Schweiger, H. F., and Faust, P. (1994). "Influence of tunnel drive on groundwater level." *Proc., 8th Conf. of the Int. Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Morgantown, 1249-1258.
9. Schweiger, H. F., Schuller, H., and Pottler, R. (1999). "Some remarks on 2D models for numerical simulation of underground construction with complex cross-section." *Proc., 8th Conf. of the Int. Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Wuhan, China, 1303-1308.
10. 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.
11. 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.
12. Shin, J.H., Potts, D.M., and Zdravkovic, L. (2005), "The effect of pore-water pressure on NATM tunnel lining in decomposed granite soil", Can. *Geotech. J.* Vol. 42, pp. 1585-1599.
13. Yoo, C.(2005), "Interaction between Tunneling and Groundwater-Numerical Investigation Using Three Dimensional Stress-Pore Pressure Coupled Analysis", *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No.2, pp.240-250.