

터널 라이닝에 작용하는 합리적인 잔류수압 적용방안 검토

정국영¹, 김지엽², 김지훈³, 문훈기^{4*}

A study for application plan of rational residual water pressure on the tunnel linings

Kuk-Young Jung, Ji-Yeop Kim, Ji-Hun Kim, Hoon-Ki Moon

ABSTRACT Control of ground water is one of the most important factors for long-term operation of tunnel because most tunnels are located under the ground water level. In case of a drainage tunnel, there is no pore water pressure on the lining when the drainage system is properly working. After long-term operation, however, residual pore water pressure can be developed on the lining due to the deterioration of the drainage system. In this study, the water pressure distribution under obstruction condition of drainage material and conduit on the tunnel is numerically investigated using the ICFEP program and compared with the current value being applied to the residual water pressure for rational application plan of residual water pressure on the tunnel linings.

Keywords: Drainage tunnel, residual pore water pressure, obstruction condition, numerical analysis

요약 지중에 건설되는 터널은 대부분 지하수위 하부에 위치하므로 지하수 처리문제는 터널의 장기운영에 있어 매우 중요하다. 배수형 터널의 경우 수리기능이 원활하면 라이닝에 수압이 작용하지 않으나 장기 운영으로 인해 배수시스템의 열화가 진행되면서 라이닝 배면에 잔류수압이 작용할 수 있다. 본 연구에서는 배수재 및 배수공 폐색 조건에 따른 터널에 작용하는 수압분포를 ICFEP 프로그램을 활용하여 수치해석적으로 고찰하고 현재 적용중인 잔류수압과의 비교 분석을 통해 라이닝에 작용하는 합리적인 잔류수압 적용 방안을 검토하였다.

주요어: 배수형터널, 간극수압, 잔류간극수압, 폐색조건, 수치해석

접수일(2011.10.19), 수정일(2011.10.27), 게재확정일(2011.11.8)

¹한국도로공사 팀장

²한국도로공사 차장

³한국도로공사 과장

⁴정회원, (주)용마엔지니어링 지반터널부 상무

*교신저자: 문훈기 (E-mail: mhk@ymeng.co.kr)

1. 서론

지중에 건설되는 터널은 대부분 지하수위 하부에 건설되기 때문에 건설과정 및 유지관리 측면에서 지하수 처리문제는 매우 중요하다. 특히 터널의 배수형식에 따라 지하수 흐름에 미치는 영향은 터널의 장기 거동에 중요성이 매우 높다.

일반적으로 터널은 배수형 터널과 비배수형 터널로 분류되는데, 터널 내 지하수 유입을 최대한 허용하고, 라이닝에 작용하는 수압을 영으로 가정하여 설계하는 터널을 배수형 터널이라고 하고, 터널 내 지하수 유입을 허용하지 않고, 정수압 하중을 견딜 수 있게 설계하는 터널을 비배수형 터널이라고 한다. 하지만, 비배수 조건으로 터널을 설계하더라도 장기적 시간경과에 따라 누수가 발생하여 대부분의 터널은 배수구(conduit)처럼 거동한다고 하였다(Ward and Pender, 1981). 한편, 배수형 터널의 경우도 배수재의 압착, 토립자 유동 및 폐색으로 인하여 장기적으로 수리 기능의 저하가 발생하고, 이로 인해 터널 내 유입 및 배수가 원활히 이루어지지 않아 라이닝 구조체를 손상 시키는 등의 문제가 발생한다(Lee et al., 2002).

본 연구에서는 배수터널에서 배수재 및 배수공 폐색 조건에 따른 터널에 작용하는 수압분포형태를 ICFEP 프로그램을 활용하여 수치해석적으로 고찰하고, 현재 적용중인 잔류 수압과의 비교 분석을 통해 각각의 CASE별로 터널 라이닝에 작용하는 합리적인 잔류수압 적용 방안을 마련하고자 한다. ICFEP은 Imperial College의 D.M. Potts에 의해 개발된 유한요소법(FEM) 수치해석 프로그램으로 깊은 굴착, 제방, 사면, 터널 등 지반공학적 문제의 분석 조사를 위해 널리 사용되고 있다. ICFEP은 2차원 평면 변형, 응력, 축대칭, Full 3D(Conventional and Fourier series aided)분석, 배수, 비배수, Fully coupled consolidation(rate of loading effects on pore pressure generation), Large displacement, Cyclic, 부분포화, Dynamics 해석 등을 해석 가능한 프로그램으로 지반-구조물 상호 작용 문제에서 이미 신뢰할 수 있는 결과를 보여주었다(Potts and Zdravkovic, 1999).

2. 이론적 배경

본 연구는 수리거동을 포함하고 있기 때문에 Biot 방정식을 기초로 하는 연계 FEM해석을 연구 도구로 선정하였다. 수리거동을 포함하는 FEM 해석은 응력-변형률 관계를 간극수압과 연계하여 지배방정식을 구성한다. Biot의 지배방정식은 크게 4개의 방정식으로 구성되며 지배방정식은 다음 식 (1)부터 (4)와 같다.

① 평형방정식(equation of equilibrium)

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} - f_i = 0 \quad (1)$$

② 유효응력의 원리(effective stress principle)

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - p\delta_{ij} = D_{ijkl}\epsilon_{kl} \quad (2)$$

③ 연속방정식

$$-\frac{\partial v_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \epsilon_V}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

④ Darcy의 법칙

$$v_i = -k \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad (4)$$

여기서, σ_{ij} 는 전 응력 텐서, f_i 는 물체력 텐서, σ'_{ij} 은 유효응력 텐서, p 는 간극수압, δ_{ij} 는 Kronecker delta, D_{ijkl} 은 응력 - 변형률 텐서, ϵ_{kl} 은 변형률 텐서, v_i 는 표면 유속 벡터, ϵ_V 는 체적 변형률, t 는 시간, h 는 전 수두이다.

연계해석은 위의 기본방정식을 토대로 변형방정식과 연속방정식을 유도하고, 이를 결합하여 유한요소방정식으로 나타낸다. 먼저 변형방정식을 최소 포텐셜 에너지의 원리를 이용하여 유도하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} [K_G]\{\Delta d_{nG}\} + [L_G]\{\Delta u_{nG}\} &= \{\Delta R_G\} \\ [K_G] &= \sum_{i=1}^N \left(\int_V [B]^T [D'] [B] dV \right)_i \\ [L_G] &= \sum_{i=1}^N \left(\int_V \{mRIGHT\} [B]^T \{N_P\} dV \right)_i \\ \{\Delta R_G\} &= \sum_{i=1}^N \left[\left(\int_V \{N\}^T \{\Delta F\} dV \right)_i + \left(\int_S \{N\}^T \{\Delta T\} dS \right)_i \right] \\ \{m\}^T &= \{1, 1, 1, 0, 0, 0\} \end{aligned} \quad (5)$$

연속방정식은 유입량과 유출량의 차이가 시간에 따른 체적변형률과 같다는 식으로부터 유도되어 식 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 β 는 적분 근사치 해법을 위한 수치 파라미터이며 0.5이상이 적절한 것으로 보고되었다 (Booker and Small, 1975).

본 해석에 사용된 β 는 0.55로 가정하였다.

$$[L_G]^T \{\Delta d\}_{nG} - \beta \Delta t [\Phi_G] \{\Delta p\}_{nG} = \{n_G\} \Delta t + Q \cdot \Delta t + [\Phi_G] \{p\}_{nG}^T \cdot \Delta t \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)을 결합하면 식 7과 같이 표현할 수 있으며 이를 통해 변위-간극수압 연계해석이 가능하게 된다.

$$\begin{bmatrix} [K_G] & [L_G] \\ [L_G]^T & -\beta \Delta t \cdot [\Phi_G] \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\Delta d\}_{nG} \\ \{\Delta p\}_{nG} \end{Bmatrix} \left\{ \begin{array}{l} \{\Delta R_G\} \\ (\{n_G\} + Q + [\Phi_G] \{p\}_{nG}^T) \cdot \Delta t \end{array} \right\} \quad (7)$$

흙 입자 거동을 강제거동으로 가정한다면 변위가 발생하지 않기 때문에 침투해석이 가능해진다. 따라서 연계방정식은 식 (8)과 같이 단순화 할 수 있으며 이는 침투 유한요소방정식과 같음을 알 수 있다.

$$-\beta [\Phi_G] \{p\}_{nG} = \{n_G\} + Q + [\phi_G] \{p\}_{nG}^T \quad (8)$$

여기서, $[K_G]$ 는 전체 강성행렬, $[L_G]$ 는 변위와 간극수압의 연계행렬, $[R_G]$ 은 Right hand side 하중 벡터, $[B]$ 는 요소 변형률-변위 행렬, $[D]$ 는 구성행렬, $\{m\}$ 은 단위 열벡터, $\{N_p\}$ 은 간극수압 형상함수, $\{N\}$ 은 변형 형상함수, $\{\Delta F\}$ 는 물 체적 벡터, $\{\Delta T\}$ 는 표면력 벡터, β 는 수치 파라미터, $[\Phi_G]$ 은 흐름 행렬, $\{n_G\}$, $\{Q\}$ 은 flow rate 벡터이다.

3. 수리·역학 거동 모델링

3.1 개요

일반적으로 배수형 터널의 굴착경계면 수리경계조건은 설계나 시공과정에서 완전배수조건으로 고려되고 있으며 Ward & Pender(1981)는 대부분의 터널은 배수구처럼 거동한다고 보고하였다. 그

러나 라이닝의 투수계수가 지반보다 작거나 터널의 배수기능이 적절히 확보되지 못하는 경우, 라이닝에 작용하는 간극수압은 완전배수조건으로 볼 수 없다. 즉 완전배수조건은 라이닝의 투수성이 지반보다 좋다는 조건에서만 만족된다. 위 조건을 만족하지 않는 터널의 거동은 반드시 라이닝에 작용하는 간극수압의 특성을 포함하여 고려되어야 한다.

Shin et al.(2002)은 ‘지반-숏크리트 라이닝’의 거동이 두 재료의 투수계수비에 따라 뚜렷한 차이를 보임을 확인하였다. 또한 간극수압의 상승은 라이닝 작용수압의 구성비를 유효응력에서 간극수압으로 전이시키기 때문에 라이닝 투수성의 저하는 1차 라이닝에 작용하는 간극수압의 큰 변화만을 초래할 뿐 1차 라이닝 작용압력은 크게 증가하지 않는 것으로 보고하였다(Shin et al., 2005). 하지만 이와 같은 결과는 배수시스템이 설계 개념대로 원활히 작동하여 흐름저항이 없고, 따라서 간극수압의 영향이 무시할 만큼 작은 경우를 전제한 것이다. 만약 Lee et al.(2002)의 연구에서와 같이 배수시스템의 열화에 의한 배수재의 압착과 막힘이 발생한다면 이는 원활한 배수를 방해하여 간극수압의 상승을 야기한다. 그림 1은 배수기능이 열화된 상황에 대한 ‘1차 라이닝-배수재’간 수리상호작용을 개념적으로 보인 것이다(Shin et al., 2005). 배수재 투수성이 1차 라이닝보다 작아지는 경우 이때 발생하는 간극수압은 배수재 즉, 방수막으로 덮여 있는 2차 라이닝에 작용하게 된다. 많은 수압사고 사례에서 2차 라이닝의 수압손상에도 불구하고 1차 라이닝에 구조적 문제가 없는 특징은 이 개념에 의해 잘 설명된다. 배수재의 막힘으로 원활한 배수가 되지 않는다는 것은 배수재 투수계수, k_f 가 1차 라이닝 투수계수 k_l 보다 작다는 의미로 해석될 수 있다.

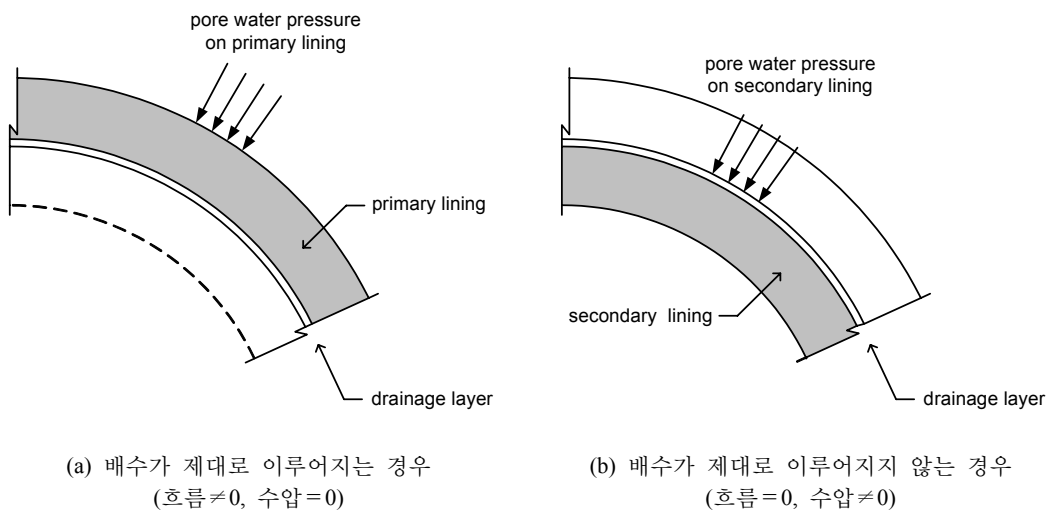


그림 1. 배수재 기능저하에 따른 수압 작용 메카니즘(Shin et al., 2005)

3.2 라이닝 수리-구조 거동의 모델링

Coupled 유한요소 해석을 가능케 하기 위하여 라이닝은 구조적 거동 이외에도 수리 거동을 표현할 수 있어야 한다. 하지만 일반적으로 유한 요소법을 사용한 터널 해석에서 라이닝은 Beam 요소로 구성되며 이는 투수성을 가질 수 없다. 따라서 라이닝의 수리거동을 모델링하기 위하여 약간의 설정이 필요하다(Shin et al., 2002). 본 연구에 사용될 라이닝 모델은 그림 2와 같이 구조적 거동을 나타내는 Beam 요소와 투수거동을 나타내는 고체요소로 구성된 복합요소로 구성되어 있다. 1차 라이닝의 구조적거동을 나타내는 Beam 요소와 투수거동을 나타내는 Solid 요소의 결합모델에 2차 라이닝의 거동과 배수재의 투수성을 나타내는 요소를 추가함으로써 1, 2차 라이닝의 상호작용을 통한 거동을 조사 할 수 있다.

연계 FEM 해석을 가능케 하기 위하여 라이닝의 구조적 거동 이외에도 수리 거동을 표현할 수 있어야 한다. 일반적으로 유한 요소법을 사용한 터널 해석에서 라이닝은 빔 요소로 구성되며 라이닝의 수리거동을 모델링하기 위하여 수리기능과 구조기능을 구분하되 복합적으로 다룰 수 있는 모델링 기법이 필요하다. 본 해석에서는 라이닝의 구조적 거동을 나타내는 빔 요소와 투수거동을 나타내는 고체요소로 구성된 복합요소로 표현하는 기법을 사용하였다. 완전 배수조건외의 라이닝 투수계수 k_l 은 지반의 투수계수 k_s 와 같거나 크게 취함으로써 고려할 수 있으며, 배수 시스템 열화에 따른 라이닝 투수계수 감소는 k_l 을 지반의 투수계수 k_s 보다 작게 설정하는 것으로 모델링 할 수 있다. 라이닝은 선형탄성의 3절점 빔 요소를 사용하였으며 간극수압은 직선분포 특성을 감안하여 4절점 요소로 모델링 하여 고체요소의 중간절점에서는 간극수압을 고려하지 않았다. 본 연구와 이전

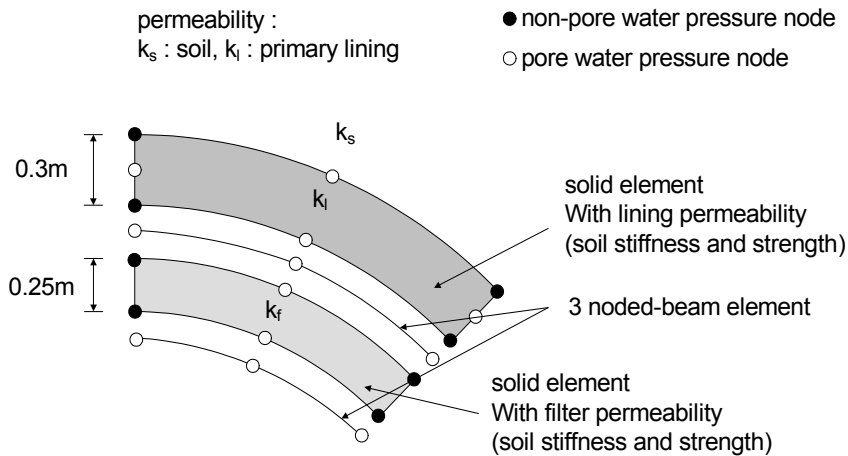


그림 2. 라이닝 및 배수재 모델링 개념

의 단일구조 라이닝과의 차이는 배수재와 2차 라이닝을 모델에 포함한 것이다. 1차 라이닝의 구조적 거동을 나타내는 빔 요소와 투수거동을 나타내는 고체 요소의 결합모델에 2차 라이닝의 거동과 배수재의 투수성을 나타내는 요소를 추가함으로써 1, 2차 라이닝의 상호작용을 통한 거동을 조사 하고자 하였다. 배수 조건은 1차 라이닝 설치 후부터 2차 라이닝 설치 전까지는 굴착경계의 완전배수 조건 ($p=0$)으로 설정하였으며, 2차 라이닝 설치 후 굴착경계에 실제 터널 구조물과 동일하도록 비배수 ($q=0$) 조건을 설정하였다. 배수공은 좌·우측, 중앙 각각의 절점에 $p=0$ 조건을 도입하여 모사하였다.

해석단계는 실제 시공 상황을 거의 그대로 모사하였다. 우선 굴착을 2차 라이닝이 설치될 부분까지 수행하고, 다음단계로 지중에 1차 라이닝 빔 요소를 설치함과 동시에, 1차 라이닝 고체 요소를 활성화하였다. 이 후, 2차 라이닝의 빔 요소와 배수재의 고체 요소를 설치하는 것으로 터널 시공 순서를 고려하였다. 또한 배수재의 탄성계수는 원래 탄성계수보다 현저히 작은 2,000 kPa, 선형 탄성재료로 설정하여 라이닝 빔 요소의 탄성계수(2.0×10^7 kPa)와의 상호작용에 발생할 수 있는 문제를 예방하였다.

3.3 수리경계조건

중전의 연구에서는 주로 지하수위 조건을 단순하게 유지하는 해석조건을 사용하였다. 굴착과정의 굴착경계면 수리 경계조건을 비배수 조건으로 두고 굴착 후 라이닝의 설치에 따라 지하수위가 하강하는 것으로 가정하였다. 본 연구에는 굴착경계면 수리 경계조건을 배수조건으로 설정하여 라이닝의 설치 및 투수기능 저하에 따라 수리 경계조건에 의해 지하수위가 상승하는 실제 현상을 고려하였다. 굴착과정의 라이닝 투수계수는 지반의 투수계수와 같게 설정하였다. 굴착이 완료된 후 라이닝 배수시스템 열화부에 해당하는 요소의 투수계수는 지반에서 라이닝의 실제 투수계수로 변경함으로써 열화과정을 고려하였으며, 터널 라이닝에 해당하는 지반의 내측 경계부의 간극수압을 0으로 하여 배수조건을 가정하였다. 해석모델의 경계는 충분히 크게 잡아 모델의 좌·우측 경계 및 모델 바닥의 수리 경계조건은 간극수압의 변화가 없는 것으로 설정하였으며 풍화가 크게 진행되지 않은 지반은 압밀의 효과가 없는 것으로 간주하였다. 자유수면은 지반의 투수성이 충분히 크고 터널 내 지하수 유입량이 일정한 조건의 구속흐름을 가정하였다.

4. 해석모델 및 해석 케이스

4.1 해석모델

수치해석을 통하여 신뢰할 수 있는 결과를 얻기 위해서는 실제 건설과정 및 건설과정에서 발생하

는 여러 조건들이 실제와 동일하게 고려되어야 한다. 실제 터널 건설은 3차원의 복잡한 활동으로 이루어지며, 이는 수치해석 모델링에서 고려되어야 한다. 이러한 점을 고려하면 터널은 3차원으로 고려하는 것이 타당하지만, 3차원 해석의 복잡한 모델링 작업은 입력 파라미터의 평가과정에서 부정확성과 에러를 유발할 수 있고, 또한 많은 양의 시스템 자원을 필요로 하여 다양한 조건의 수치해석을 수행하기에는 유용하지 않다. 또한 모든 조건과 파라미터를 세부적으로 시뮬레이션 하는 것은 가능하지 않고 유용하지도 않다고 할 수 있다. 이와 같은 상황을 전제로 본 연구에서는 평면변형 조건을 가정한 단순화된 2차원 모델링을 수행하였다. 다른 많은 연구 및 실무 결과에서 확인되었듯이 터널의 2차원 모델링을 통하여 실제 터널 거동의 예측이 가능하며, 설계 및 유지·관리 문제에 유용하게 사용할 수 있다. 특히 운영 중의 터널모델링은 2차원 가정에 무리가 없으며, 국부적 수리 경계조건의 경우도 열화의 범위가 터널 축 방향으로 터널 주변장 이상이면 가정상 문제가 없을 것이다. 터널 단면은 그림 3의 한국도로공사 표준단면(기계환기)을 선정하였으며, 터널은 폭 12.72 m, 높이 7.33 m의 터널로 경계조건에 의한 영향을 배제하기 위하여 모델링의 폭은 터널폭의 약 25배인 320 m로 하였다.

탄소성해석 모델은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다. 그림 4는 해석모델의 전체 형상 및 터널 profile을 나타낸다. 모델의 좌·우측 경계는 횡방향 변위를 구속한 롤러로 구성하였고 모델의 바닥은 수직변위를 구속하였다.

표 1은 해석에 사용된 지반의 세부 물성치를 보인 것이다. 전체 지반을 암반등급IV로 하였다.

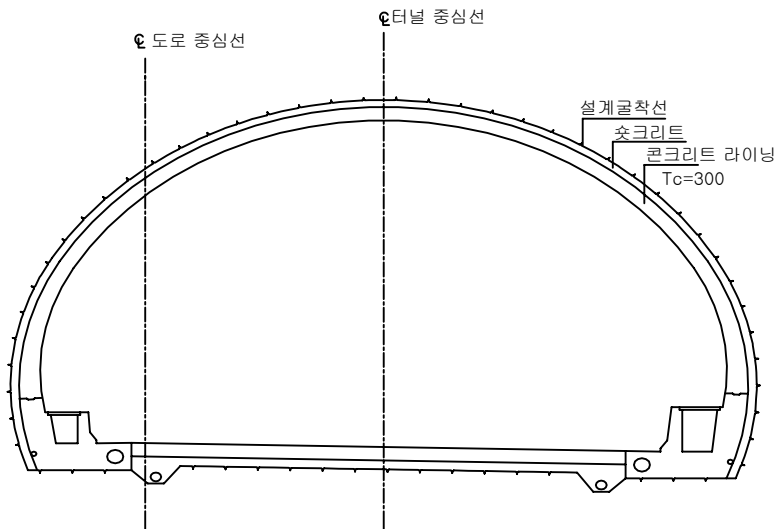


그림 3. 한국도로공사 표준단면

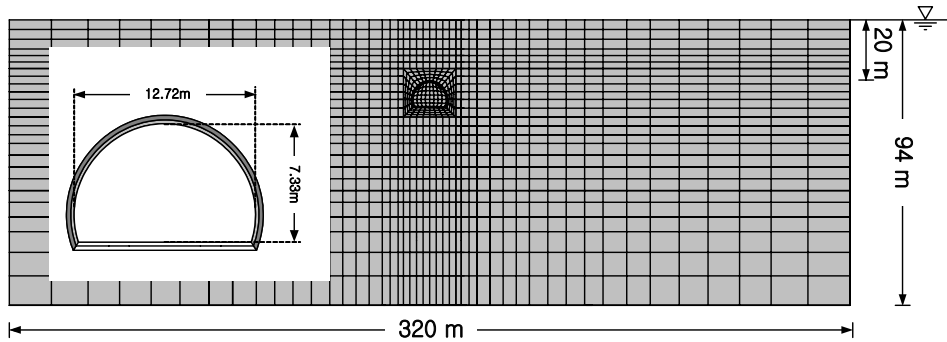


그림 4. 해석 전체 mesh 및 터널 profile

표 1. 입력파라미터

a. 지반물성치

구분	단위중량 (γ_s , kN/m ³)	점착력 (c , kPa)	내부 마찰각 (ϕ , °)	변형계수 (MPa)	팽창각 (ψ , °)	포아송비 (ν)	투수계수 (k_s , cm/sec)
암반등급IV	23.0	300.0	35	2,000	15	0.28	9.1×10^{-5}

b. 라이닝 재료 특성

구분	Area (m ²)	I (m ⁴)	E (kPa)	μ	k_l (m/s)
Shotcrete	0.3	0.00225	2.0×10^7	0.2	9.1×10^{-6}

4.2 해석케이스

배수시스템의 열화는 전반 열화와 부분 열화로 구분하여 고려하였다. 전반 열화는 배수층 전체의 투수성이 감소하는 현상을 모사한 것이며, 부분열화는 집수공의 배수가 원활하지 못함을 모사한 것이다. 배수재 전반 열화의 경우는 배수재의 투수계수를 변화시킴으로써 해석을 실시하였으며, 부분 열화의 경우 라이닝 완전배수 조건과 비교 검토를 위해 $k_l=0.1 k_s$, $k_f/k_l=fully permeable$ 를 기본 해석조건으로 해석을 수행하였다.

터널의 배수시스템의 기능열화는 1차 라이닝(슛크리트)의 투수성만이 아닌, 배수재의 투수성에 의해서도 나타날 수 있다. 이러한 영향 고찰을 위해 1차 라이닝 투수성을 지반의 1/10배($k_l=0.1 k_s$)로 설정한 후 배수재의 투수성을 1차 라이닝 투수계수에 비해 fully permeable, 100, 10, 1, 0.1, 0.01배로 변화시키며 해석을 실시할 계획이다. 모두 배수공을 통하여 배수가 일어나는 것으로 모사할 계획이다.

실제 터널의 배수문제에서 침전물의 배수공 퇴적 등에 의한 배수공의 배수 성능 저하에 따른 배수 불능문제가 발생하는 경우가 많다. 부분열화 모델링의 경우 배수재의 성능은 기본 해석조건 ($k_l=0.1 k_s$, $k_f/k_l=fully\ permeable$)과 동일하게 설정하고 배수공을 폐색함으로써 배수공 막힘 현상을 모델링 하였으며 그림 5와 같이 총 4곳의 배수공을 설치하여 $p=0$ 의 조건을 부여함으로써 배수공의 막힘의 다양한 조건을 모사하였다. 배수장애는 $p=0$ 조건을 $q=0$ 조건으로 변경함으로써 모델링 하였다. 해석 케이스는 표 2와 같다.

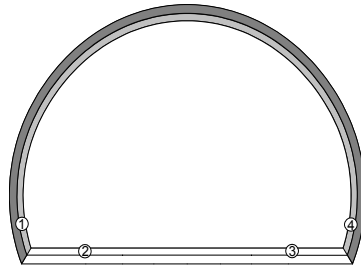
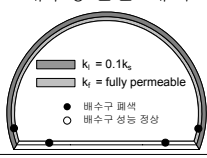
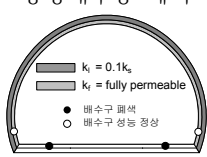
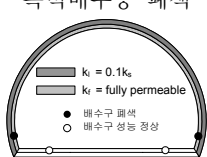


그림 5. 배수공 위치

표 2. 해석 케이스

구 분		k_s-k_l	상대투수조건	비고
배수재 전반 열화	배수공 기능정상이나, 배수재 수리 기능저하	$k_l/k_s = 0.1$	$k_f/k_l = \text{fully permeable}$	
			$k_f/k_l = 100.0$	
			$k_f/k_l = 10.0$	
			$k_f/k_l = 1.0$	
			$k_f/k_l = 0.1$	
			$k_f/k_l = 0.01$	
배수공 열화 (clogging)	배수공전반 폐색 	$k_l/k_s = 0.1$	$k_s : k_l : k_f$ = 1 : 0.1 : fully permeable	k_s : 지반 k_l : 라이닝 k_f : 배수재 $k_s = 9.1 \times 10^{-5}$ cm/sec
	중앙배수공 폐색 	$k_l/k_s = 0.1$	$k_s : k_l : k_f$ = 1 : 0.1 : fully permeable	
	측벽배수공 폐색 	$k_l/k_s = 0.1$	$k_s : k_l : k_f$ = 1 : 0.1 : fully permeable	

5. 해석결과

5.1 배수재 전반 열화

5.1.1 개요

해석결과는 흐름관점과 라이닝 거동의 두 가지 측면에서 고찰하였다. 본 해석에서 중점 고찰한 거동은 다음과 같다.

- ① 간극수압 분포
- ② 유속벡터
- ③ 지반하중
- ④ 라이닝 모멘트
- ⑤ 라이닝 축력
- ⑥ 라이닝 변형

라이닝 모델링 개념에 따르면 1차 라이닝에 작용하는 순 수압은 그림 6에 보인바와 같이 라이닝 내외 수압의 차, 즉 라이닝 외면 수압과 배수재내 수압의 차이로 정의된다.

5.1.2 배수재 전반 수리기능 저하에 따른 터널 거동

지반투수성이 라이닝에 미치는 영향의 분석기능을 설정하기 위하여 배수공 정상기능을 전제로 한 배수재 전반열화 조건으로 $k_l/k_s = 0.1$ 의 경우라 하여 해석을 진행하였다.

(1) 터널주변 간극수압 분포

그림 7은 터널 2차 라이닝 열화에 대한 터널주변 간극수압 분포를 나타낸다. 배수재의 투수성이 작

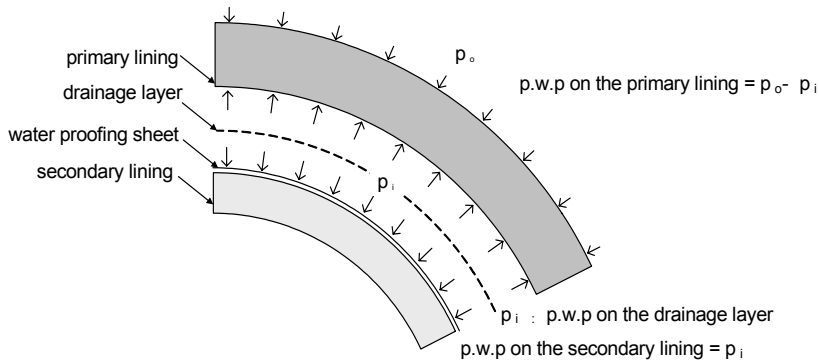


그림 6. 1차 라이닝에 작용하는 순 간극수압

아질수록 터널 주변 간극수압이 상승하는 특성을 나타내었다. 그림 7(a)의 경우 터널 주변 간극수압이 50 kPa 정도 작용하는데 반해 그림 7(f)에서는 터널 주변 간극수압이 100 kPa 작용함을 보였다. 상대투수계수비가 $k_f/k_l=1.0$ 이하인 경우에서부터 터널 주변 간극수압 양상이 거의 비슷하게 나타났다.

(2) 터널주변 유속 분포

그림 8는 배수시스템 투수성능저하에 따른 터널 주변의 장기 정상상태의 유속 벡터를 나타낸 것이다. 흐름벡터는 흐름의 방향과 상대적 크기를 나타낸다. 그림 8(d)인 $k_f/k_l=1.0$ 이하의 유속벡터의 흐름은 거의 비슷하게 나타났다.

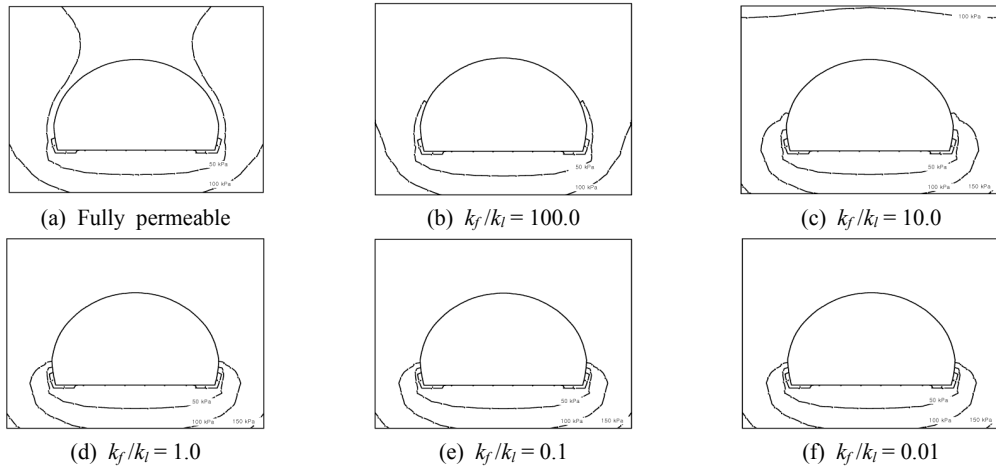


그림 7. 배수재 전반 열화에 대한 간극수압분포

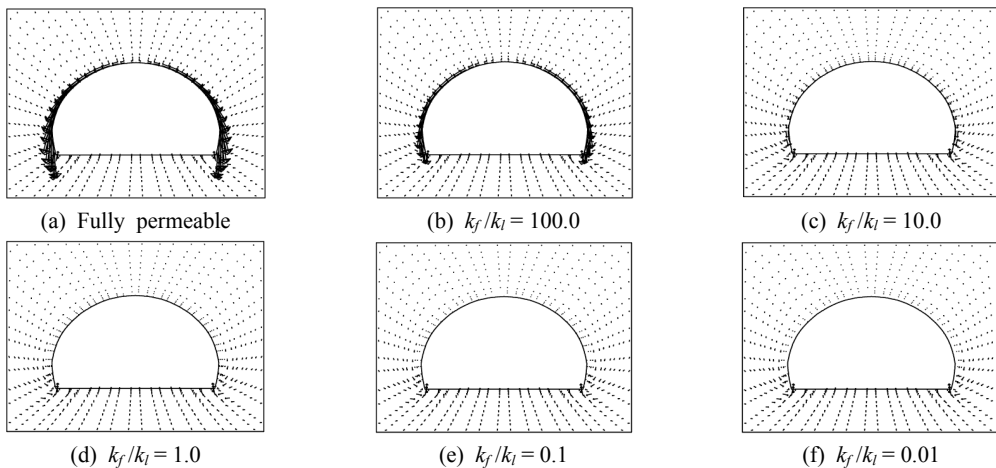
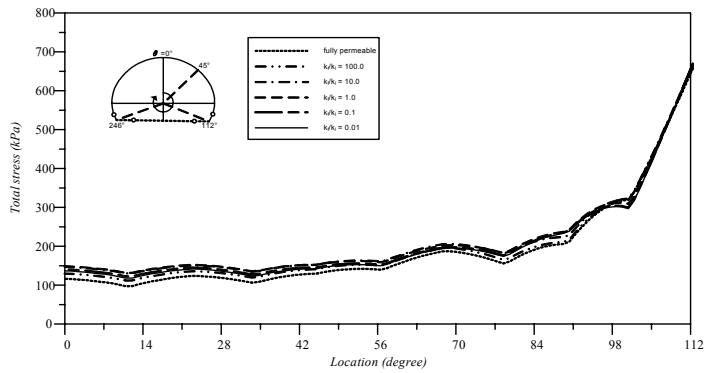


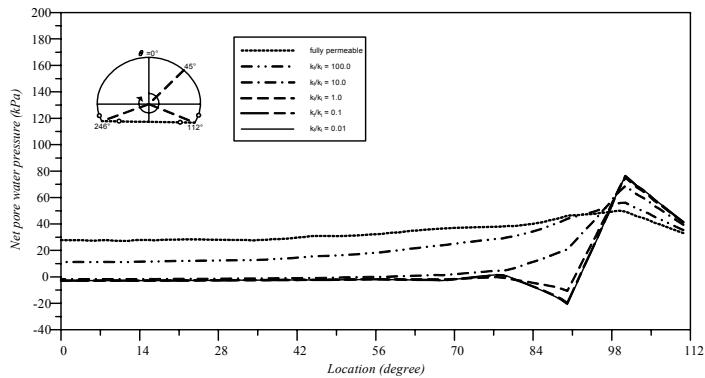
그림 8. 배수재 전반 열화에 대한 유속분포

(3) 라이닝에 작용하는 지반하중 및 간극수압

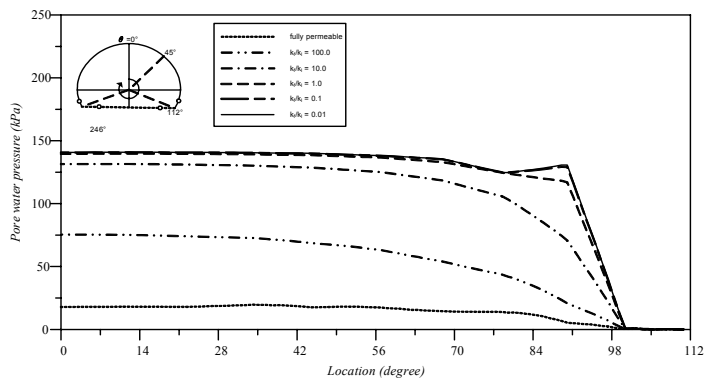
그림 9(a)의 지반하중은 전 응력이며, 2차 라이닝에 작용하는 전 응력은 1차 라이닝에서 지반하중을 지지하므로 간극수압만 작용하는 것으로 볼 수 있다. 1차 라이닝 지반하중(전 응력)은 모서리에서 최대값을 나타내며 전 응력의 최대값은 약 671 kPa로 나타났다.



(a) 1차 라이닝에 작용하는 지반하중



(b) 1차 라이닝에 작용하는 순 간극수압



(c) 2차 라이닝에 작용하는 간극수압

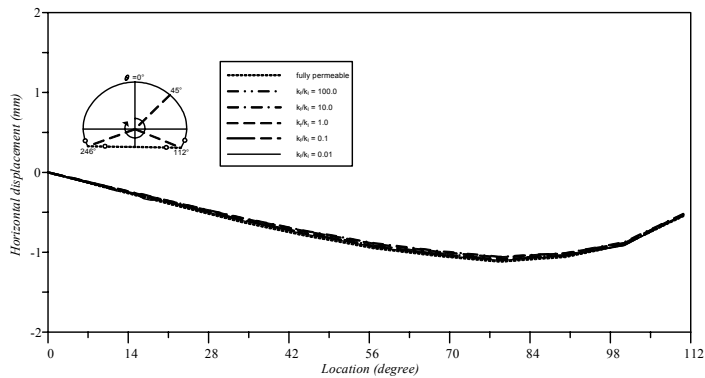
그림 9. 지반하중과 간극수압

그림 9(b)의 순 간극수압은 라이닝 내외의 수압의 차로 구할 수 있다. 배수재의 투수성이 1차 라이닝보다 10배 이상 투수성이 큰 경우에는 최대 순 간극수압이 현저히 감소하는 경향을 보이며, fully permeable 조건일 경우에는 거의 일정한 값을 보였다.

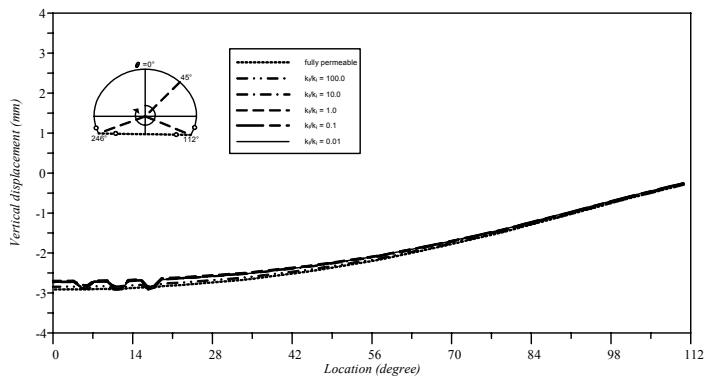
그림 9(c)는 2차 라이닝에 작용하는 간극수압을 보인 것이다. 터널 천단부에서 라이닝 상대투수 계수비가(k_r/k_i) 0.01인 경우 간극수압은 140.7 kPa로 fully permeable 조건일 경우인 17.9 kPa 보다 약 7.9배 크게 나타났다. 배수재의 투수성이 1차 라이닝의 100배 이상이 되면, 2차 라이닝에 작용하는 간극수압은 급격히 낮아짐을 나타냈다.

(4) 라이닝 변위

그림 10, 11는 라이닝의 변위를 보인 것이다. 터널 천단부에서 1차 라이닝은 fully permeable에서 터널 내측으로 변형이 가장 크게 발생하였으며, 2차 라이닝은 $k_r/k_i=0.01$ 에서 터널 내측으로 변형이 가장 크게 발생하였다.

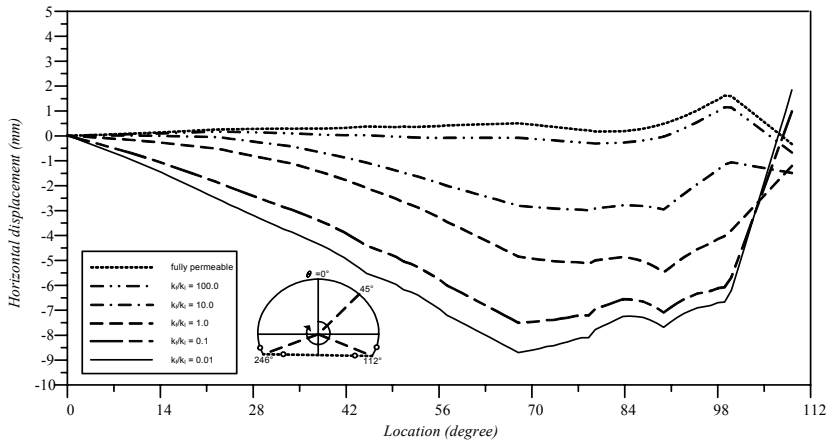


(a) 수평 변위

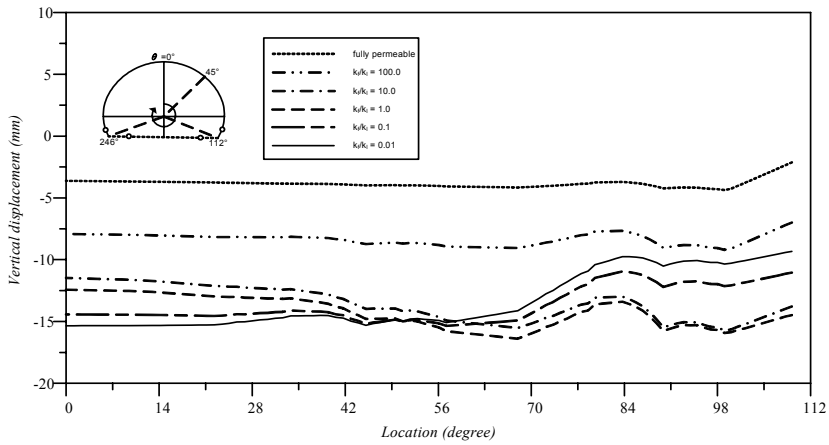


(b) 수직 변위

그림 10. 1차 라이닝 변위



(a) 수평 변위



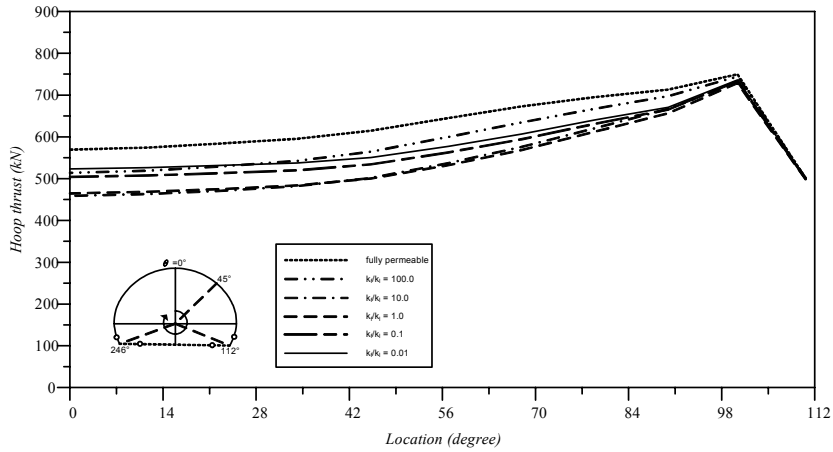
(b) 수직 변위

그림 11. 2차 라이닝 변위

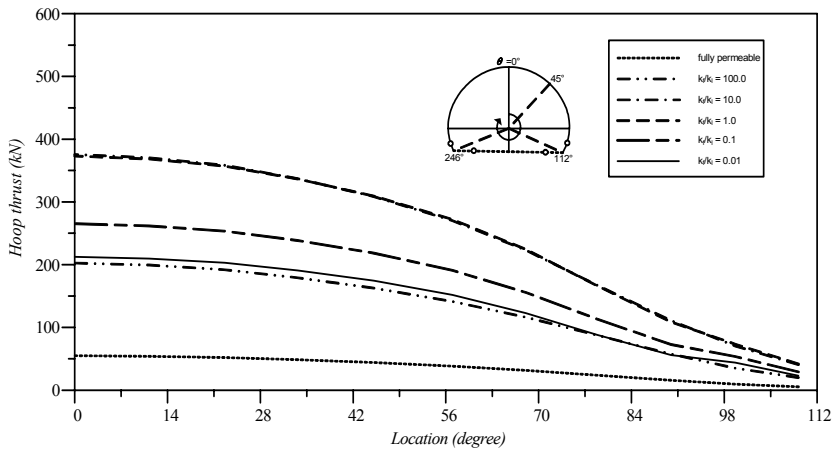
(5) 라이닝 축력 및 모멘트

그림 12은 라이닝에 작용하는 축력을 나타낸 것이다. 1차 라이닝 축력은 100배 이하에서 작은 값으로 분포하는 경향이 보이며, 2차 라이닝에 작용하는 축력은 1차 라이닝에 작용하는 축력 양상과 반대의 양상을 나타내며, permeability ratio에 따른 축력 값의 차이가 크게 나타났다. 터널 천단부에서 배수재 투수성능이 100 배 이하에서 크게 걸리는 것으로 나타났다. 2차 라이닝에 걸리는 최대 축력은 375.57 kN으로 나타났다.

그림 13는 1, 2차 라이닝에 작용하는 모멘트를 나타낸 것이다. 1차 라이닝의 경우 배수재의 성능에 상관없이 거의 일정한 모멘트 값을 나타낸다. 2차 라이닝은 1차 라이닝에 비해 상당히 큰 모멘트 값을 나타낸다. 배수재의 투수성이 fully permeable 일 경우 모멘트가 거의 0에 접근함 보였다.



(a) 1차 라이닝



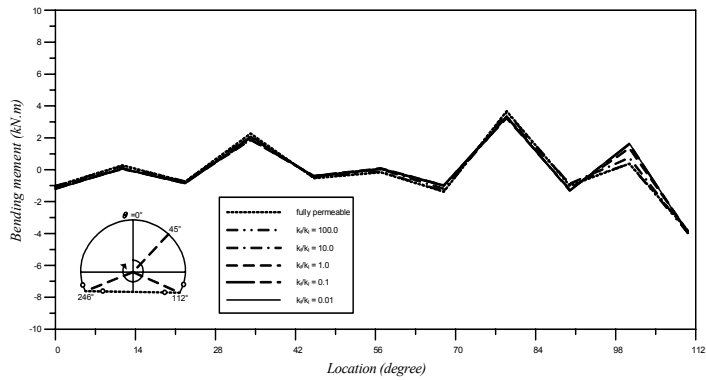
(b) 2차 라이닝

그림 12. 라이닝 축력

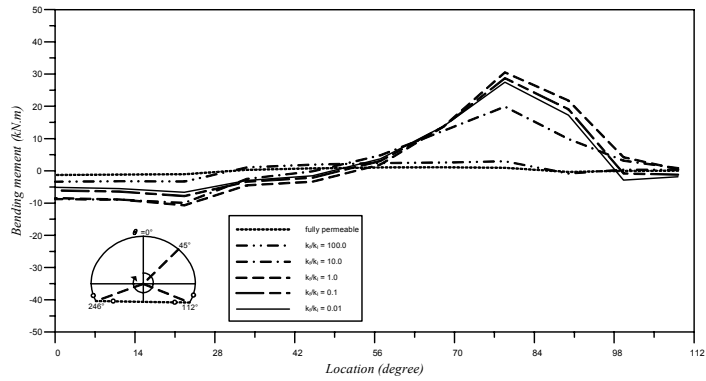
5.1.3 배수재 전반 수리가능 저하에 따른 2차 라이닝에 작용하는 간극수압 결과 일반화

(1) 개요

2차 라이닝에 작용하는 하중을 normalized 하기위해서 위선 정수위 기준을 그림 14와 같이 세가지 경우로 설정하여 2차 라이닝에 작용하는 간극수압을 정수압으로 나누어 일반화 하였다. 정수위는 터널 천단(crown)을 기준으로 한 경우를 h_{oc} , 터널 중심부(springline)를 기준으로 한 경우 h_{os} , 라이닝에 작용하는 정수압 위치를 수위에 따라 달라지게 하는 경우 h_{oa} 으로 하였다.



(a) 1차 라이닝



(b) 2차 라이닝

그림 13. 라이닝 모멘트

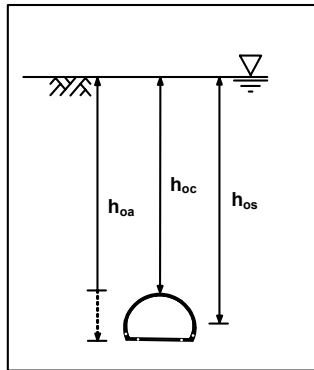


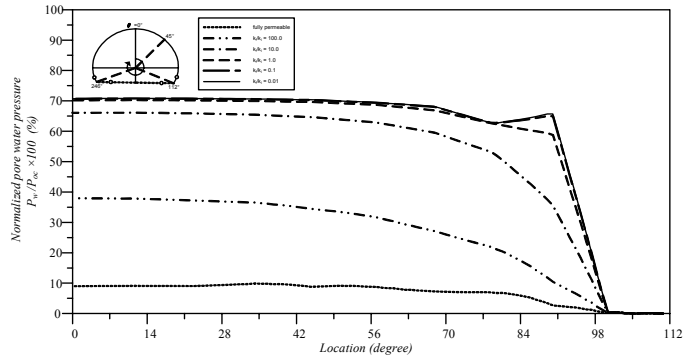
그림 14. 터널에 작용하는 정수위 기준

위의 정수위를 기준으로 정수압을 계산하면 식 9와 같다. (γ_w : 물의 단위중량)

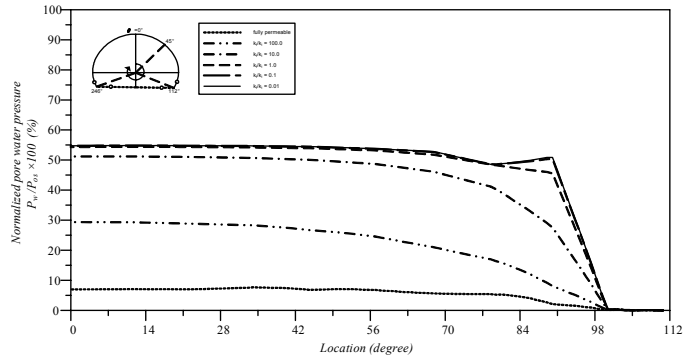
$$P_{oc} = h_{oc} \times \gamma_w, \quad P_{os} = h_{os} \times \gamma_w, \quad P_{oa} = h_{oa} \times \gamma_w \quad (9)$$

(2) 2차 라이닝에 작용하는 정규화 간극수압

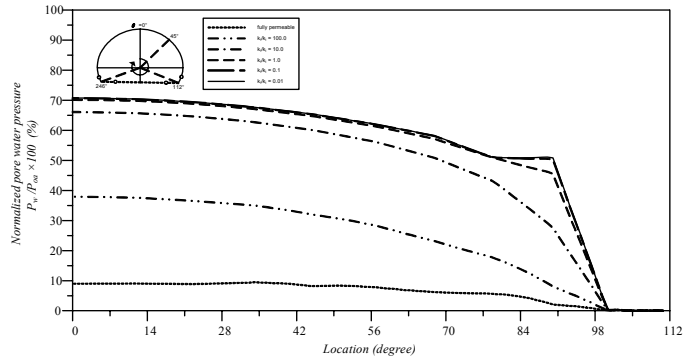
수치해석에서 산출된 2차 라이닝에 작용하는 간극수압(P_w)을 식 9의 세가지 정수압으로 나누어 나타내면 그림 15과 같다. 그림 15(a), (b), (c)는 각각 터널 천단(crown), 터널 중심부(springline) 및 라이닝에 작용하는 정수압 위치를 수위에 따라 달라지게 하는 경우에 대한 2차 라이닝에 작용하는 간극수압을 나타낸다.



(a) Crown 간극수압으로 정규화 (P_w/P_{oc})



(b) Springline 간극수압으로 정규화 (P_w/P_{oc})



(c) 터널위치에 따른 간극수압으로 정규화 (P_w/P_{oc})

그림 15. 2차 라이닝 간극수압 정규화

5.1.4 배수재 전반 수리기능 저하에 따른 2차 라이닝에 작용하는 잔류수압 평가

(1) 개요

앞에서 해석한 결과를 보다 구체적으로 분석하여 수리열화에 따른 2차 라이닝 수압하중을 평가하기로 한다. 상대투수계수가 $k_f/k_l < 1$ 경우는 실제에서 일어나기 어려운 현상이므로 본 연구에서는 $k_f/k_l = \text{fully permeable} \sim 1$ 까지의 Case에 대한 잔류수압 평가 방법을 제시하고자 한다.

(2) 수리 열화에 따른 잔류수압 평가

Crown을 기준(P_w/P_{oc})으로 2차 라이닝을 normalized 한 경우 2차 라이닝에 작용하는 잔류수압이 다른 조건 보다 크므로 이를 기준으로 잔류수압을 평가하고자 한다. 우선 그림 16과 같이 터널의 위치(α_i)를 배수공의 위치(α_d)를 기준으로 하여 나누어(α_i/α_d) 일반화시켜 나타내면 그림 17과 같다.

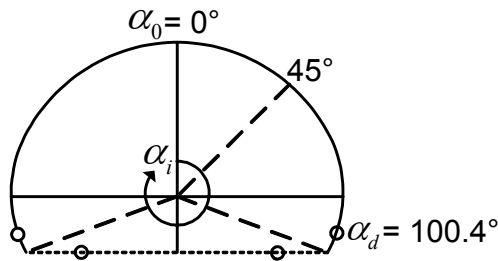


그림 16. 터널 작용 위치

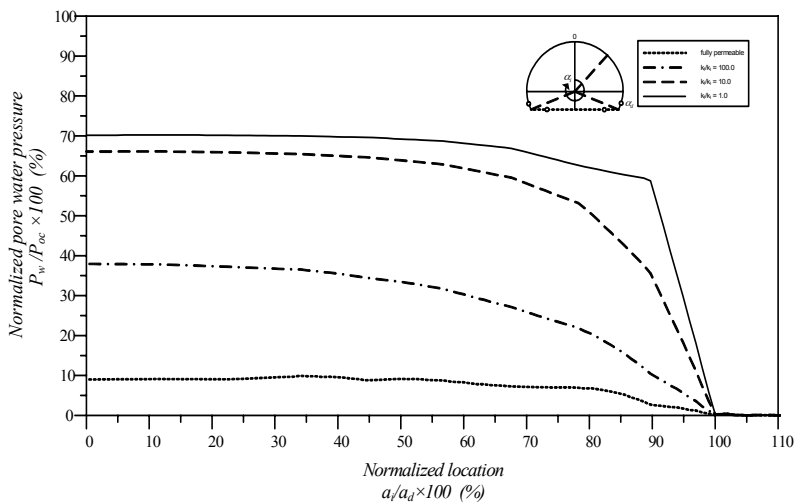


그림 17. 2차 라이닝에 작용하는 잔류수압 정규화 (location normalized)

① 완전 배수 조건

그림 18에서 상대 투수계수 계수(k_f/k_l)가 fully permeable 일 때의 2차 라이닝에 작용하는 간극수압을 Grapher 프로그램을 사용하여 곡선을 2등분으로 나누고 식을 추정하는 방식을 사용하여 직선으로 나타내었다. 설계 적용상의 편의를 위해 $P_{f(1)}$ 은 2차 라이닝에 걸리는 간극수압의 최대값을 상수로 하는 직선식으로, $P'_{f(2)}$ 은 원래 간극수압 곡선의 변곡점에서 배수공 위치를 종점으로 하여 추정한 직선식으로 나타냈다.

그림 18를 통해 fully permeable에서의 잔류수압 평가식을 나타내면 식 (10)과 같다.

$$P_{f(1)} = 9.94$$

$$P'_{f(2)} = -0.26 \times \alpha + 26.09 \quad (10)$$

여기서, $\alpha = \alpha_i / \alpha_d \times 100$ 이다.

② $k_f/k_l = 100.0$ 조건

그림 19에서 상대 투수계수 계수(k_f/k_l)가 100.0 일 때의 2차 라이닝에 작용하는 간극수압을 Grapher 프로그램을 사용하여 곡선을 2등분으로 나누고 추정하는 방식을 사용하여 직선으로 나타내었다. 설계 적용상의 편의를 위해 $P_{100.0(1)}$ 은 2차 라이닝에 걸리는 간극수압의 최대값을 상수로 하는 직선식으로, $P'_{100.0(2)}$ 은 원래 간극수압 곡선의 변곡점에서 배수공 위치를 종점으로 하여 추정한 직선식으로 나타냈다.

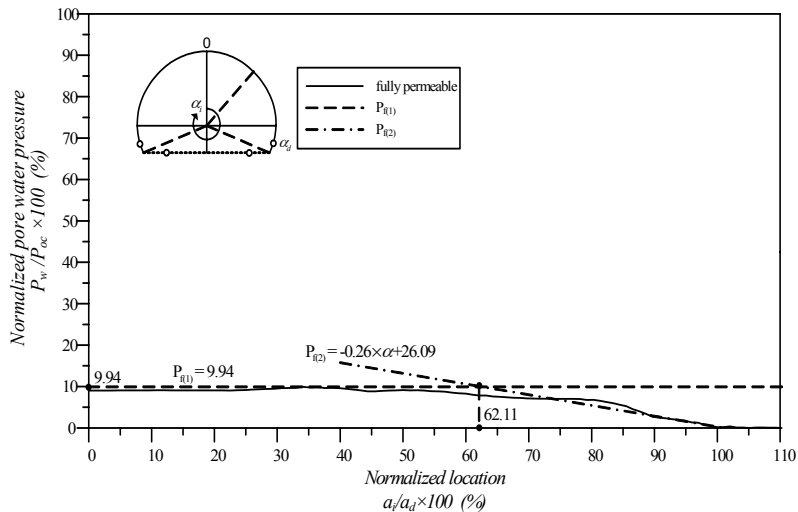


그림 18. Fully permeable에서의 잔류수압 평가

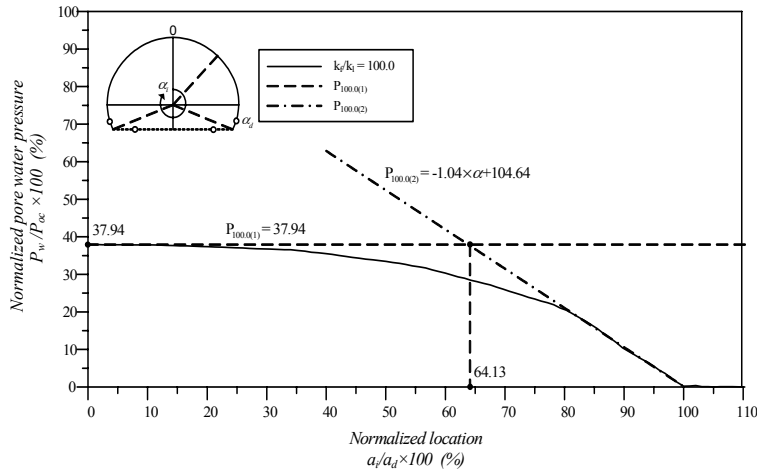


그림 19. $k_f/k_l=100.0$ 에서의 잔류수압 평가

그림 19을 통해 $k_f/k_l=100.0$ 에서의 잔류수압 평가식을 나타내면 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned}
 P_{100.0(1)} &= 37.94 \\
 P'_{100.0(2)} &= -1.04 \times \alpha + 104.64
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

여기서, $\alpha = \alpha_i/\alpha_d \times 100$ 이다.

③ $k_f/k_l=10.0$ 조건

그림 20은 상대 투수계수 계수(k_f/k_l)이 10.0 일 때의 2차 라이닝에 작용하는 간극수압을 Grapher 프로그램을 사용하여 곡선을 2등분으로 나누고 추정하는 방식을 사용하여 직선으로 나타내었다. 설계 적용상의 편의를 위해 $P_{10.0(1)}$ 은 2차 라이닝에 걸리는 간극수압의 최대값을 상수로 하는 직선 식으로, $P'_{10.0(2)}$ 은 원래 간극수압 곡선의 변곡점에서 배수공 위치를 종점으로 하여 추정한 직선식으로 나타냈다.

그림 20을 통해 $k_f/k_l=10.0$ 에서의 잔류수압 평가식을 나타내면 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned}
 P_{10.0(1)} &= 66.13 \\
 P'_{10.0(2)} &= -3.46 \times \alpha + 346.51
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

여기서, $\alpha = \alpha_i/\alpha_d \times 100$ 이다.

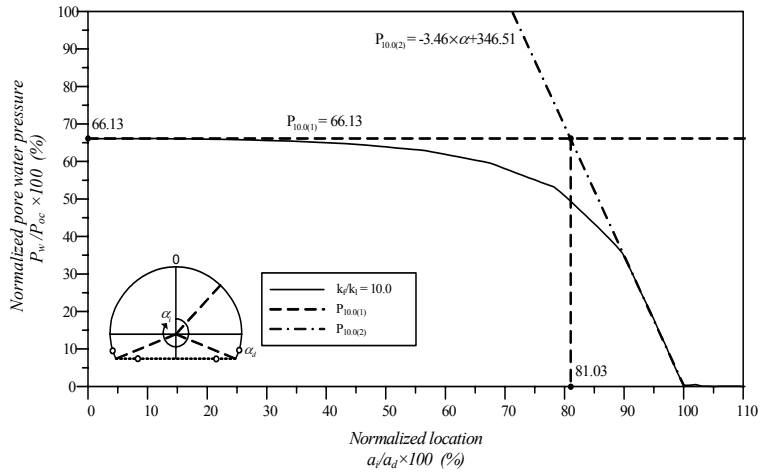


그림 20. $k_f/k_i=10.0$ 에서의 잔류수압 평가

④ $k_f/k_i = 1.0$ 조건

그림 21에서 상대 투수계수 계수(k_f/k_i)가 1.0 일 때의 2차 라이닝에 작용하는 간극수압을 Grapher 프로그램을 사용하여 곡선을 2등분으로 나누고 추정하는 방식을 사용하여 직선으로 나타내었다. 설계 적용상의 편의를 위해 $P_{1.0(1)}$ 은 2차 라이닝에 걸리는 간극수압의 최대값을 상수로 하는 직선식으로, $P'_{1.0(2)}$ 은 원래 간극수압 곡선의 변곡점에서 배수공 위치를 중점으로 하여 추정한 직선식으로 나타냈다.

그림 21를 통해 $k_f/k_i = 1.0$ 에서의 잔류수압 평가식을 나타내면 식 (13)과 같다.

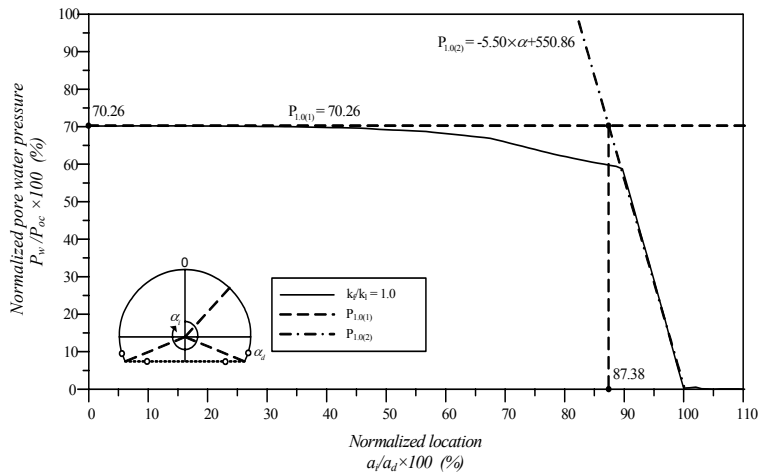


그림 21. $k_f/k_i=1.0$ 에서의 잔류수압 평가

$$P_{1.0(1)} = 70.26$$

$$P'_{1.0(2)} = -5.50 \times \alpha + 550.86 \quad (13)$$

여기서, $\alpha = \alpha_i / \alpha_d \times 100$ 이다.

(3) 수압식 종합 및 정리

그림 22은 2차 라이닝 상대투수계수(k_f/k_i)에 따른 터널 위치별 잔류수압 평가 방법을 나타낸다. 그림 22과 표 3의 식을 활용하여 2차 라이닝에 걸리는 잔류수압을 개략적으로 평가할 수 있다.

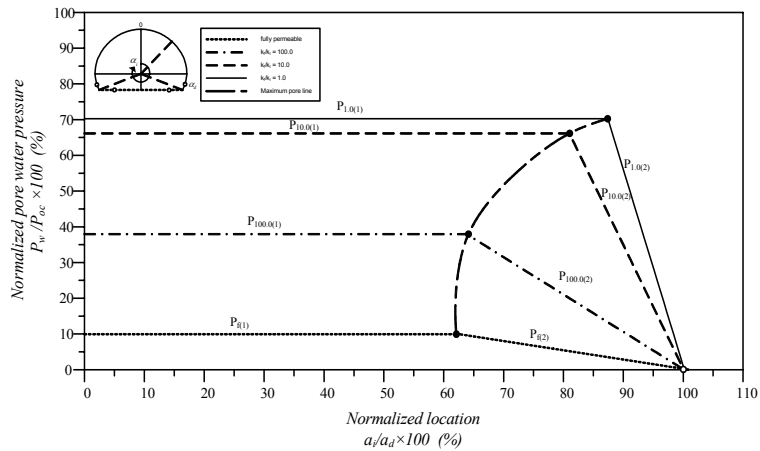


그림 22. 2차 라이닝 상대투수계수(k_f/k_i)에 따른 터널 잔류수압

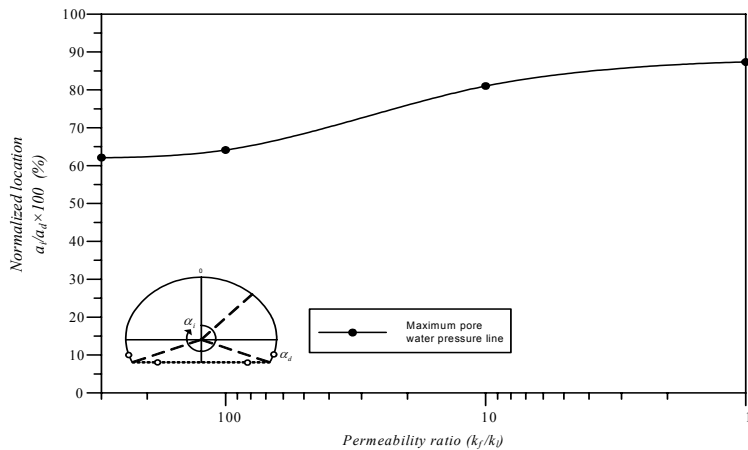


그림 23. Permeability ratio에 따른 최대 잔류 수압 작용 위치

그림 23, 24는 그림 22의 2차 라이닝 상대투수계수(k_f/k_l)에 $P_{(1)}$ 직선과 $P_{(2)}$ 직선의 교차점 위치와 잔류수압을 permeability ratio에 따라 각각 나타낸 것이다. 이를 이용하면 상대투수계수비(k_f/k_l)에 따른 라이닝에 걸리는 잔류수압의 크기와 그 위치를 개략적으로 파악 할 수 있으며, 이를 토대로 $P_{(1)}$ 직선과 $P_{(2)}$ 직선의 교차점을 확인 할 수 있다. 그러므로 지정된 상대투수계수비(k_f/k_l)에 대한 개략적인 직선식을 추론해 낼 수 있다.

표 3의 잔류수압 추정식을 터널 모형으로 적용하여 잔류수압 분포형태를 나타내 보면 그림 25와 같다. 배수재의 투수성능이 저하 될수록 라이닝에 걸리는 잔류수압이 커지는 것을 나타내었다.

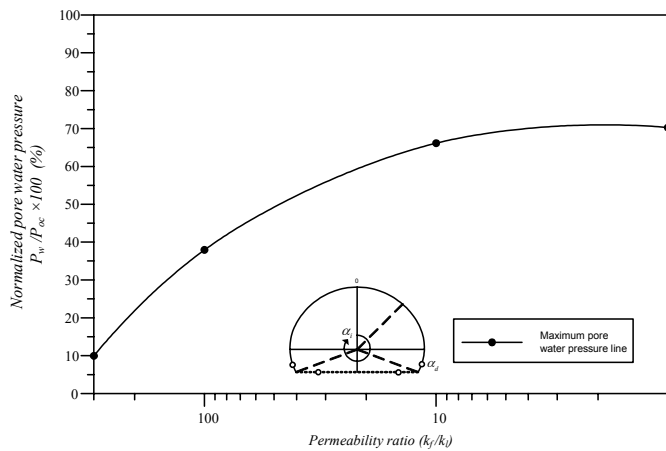


그림 24. Permeability ratio에 따른 최대 잔류 수압

표 3. 상대투수계수(k_f/k_l)에 따른 터널 잔류수압 추정식

구 분	상대투수조건	적용조건	잔류수압 추정식	비고
배수재 전반 열화	$k_f/k_l = \text{fully permeable}$	$0 \leq \alpha \leq 62.11$	$P_{w\{f(1)\}} = 0.099 \times P_{oc}$	* $k_l/k_s = 0.1$ * P_{oc} = 터널 천단에서의 정수압 * $\alpha = \alpha_i / \alpha_d \times 100$ α_i = 터널 천단에서임의의 각 α_d = 터널천단에서 배수공까지의 각
		$62.11 < \alpha \leq \text{corner}$	$P_{w\{f(2)\}} = \frac{P_{oc}}{100} (-0.26 \times \alpha + 26.09)$	
	$k_f/k_l = 100.0$	$0 \leq \alpha \leq 64.13$	$P_{w\{100.0(1)\}} = 0.38 \times P_{oc}$	
		$64.13 < \alpha \leq \text{corner}$	$P_{w\{100.0(2)\}} = \frac{P_{oc}}{100} (-1.04 \times \alpha + 104.64)$	
	$k_f/k_l = 10.0$	$0 \leq \alpha \leq 81.03$	$P_{w\{10.0(1)\}} = 0.66 \times P_{oc}$	
		$81.03 < \alpha \leq \text{corner}$	$P_{w\{10.0(2)\}} = \frac{P_{oc}}{100} (-3.46 \times \alpha + 346.51)$	
	$k_f/k_l = 1.0$	$0 \leq \alpha \leq 87.38$	$P_{w\{1.0(1)\}} = 0.70 \times P_{oc}$	
		$87.38 \leq \alpha \leq \text{corner}$	$P_{w\{1.0(2)\}} = \frac{P_{oc}}{100} (-5.50 \times \alpha + 550.86)$	

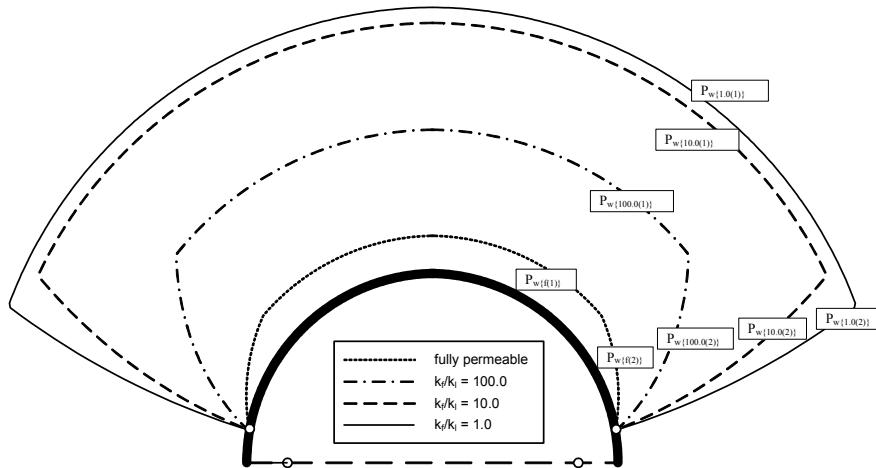


그림 25. 배수재 열화에 대한 수치해석적으로 제시된 잔류수압 분포 형태 ($k_i/k_s = 0.1$)

5.2 배수공 열화 해석 결과

5.2.1 개요

배수 터널의 배수시스템 구조는 상부에서 배수재를 통해 모아진 물을 측벽 배수공에서 집수하여 일정간격마다 중앙배수공으로 배출하게 된다. 터널 배수공은 주로 유실된 토사입자가 배수공에 퇴적되어 일어나며, 배수공의 폐색은 배수터널을 비배수 터널로 만드는 영향을 초래할 수 있다.

터널 배수시스템의 열화는 배수공을 중심으로 부분적으로 발생할 가능성이 크므로 이런 사실에 착안하여 터널 배수시스템 중 배수공이 부분 또는 정체 폐색되어 나타나는 현상을 수치해석을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 본 절에서는 배수공의 폐색영향을 수치 해석적으로 조사하였다. 상대적 거동의 차이를 확인하기 위해 앞장에서 언급했던 실제 잔류수압 적용 케이스인 배수재 상대투수계수비(k_f/k_i)가 fully permeable조건으로 높고 배수공 전반 폐색, 중앙배수공 폐색, 측면 배수공 폐색 3가지 경우로 해석을 진행하였다.

5.2.2 해석결과

(1) 터널주변 간극수압 분포

그림 26은 터널 주변 간극수압 분포를 나타낸 것이다. 전체 배수공이 폐색 될 경우 터널 주변간극수압이 가장 크게 걸리는 것으로 나타났지만 그 차이는 다른 경우와 크게 차이가 나지 않는다. 또한 중앙 배수공이 폐색 된 경우보다 측면 배수공이 폐색 되었을 경우 터널 주변에 작용하는 간극수압이 크게 나타났다.

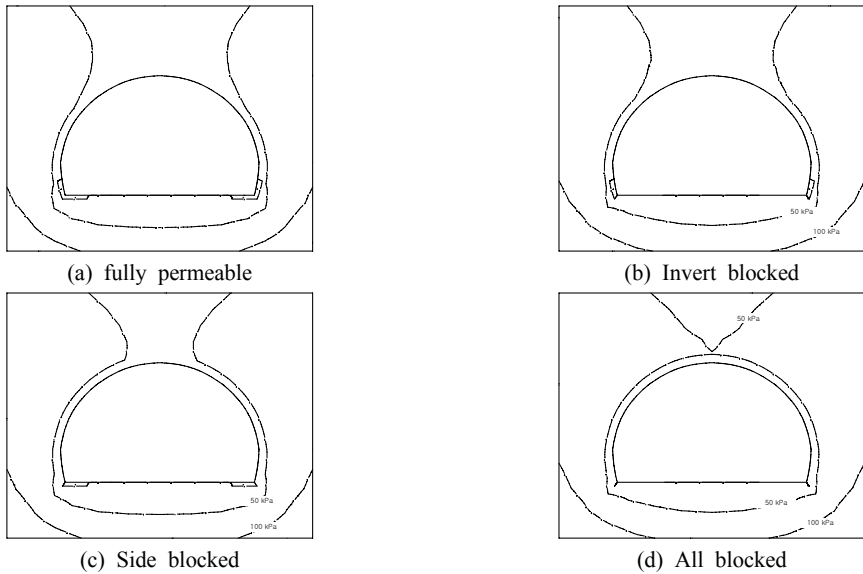


그림 26. 배수공 막힘에 대한 간극수압 분포 ($k_i/k_1 = \text{fully permeable}$)

(2) 터널주변 유속 분포

전체 배수공이 폐쇄된 경우, 유속 흐름이 지반부로 더욱 집중되어 발생되는 것으로 나타났다. 중앙 배수공이 폐쇄되는 경우 측면 배수공측으로, 측면 배수공이 폐쇄된 경우 중앙배수공 쪽으로 흐름이 집중되는 것을 알 수 있다.

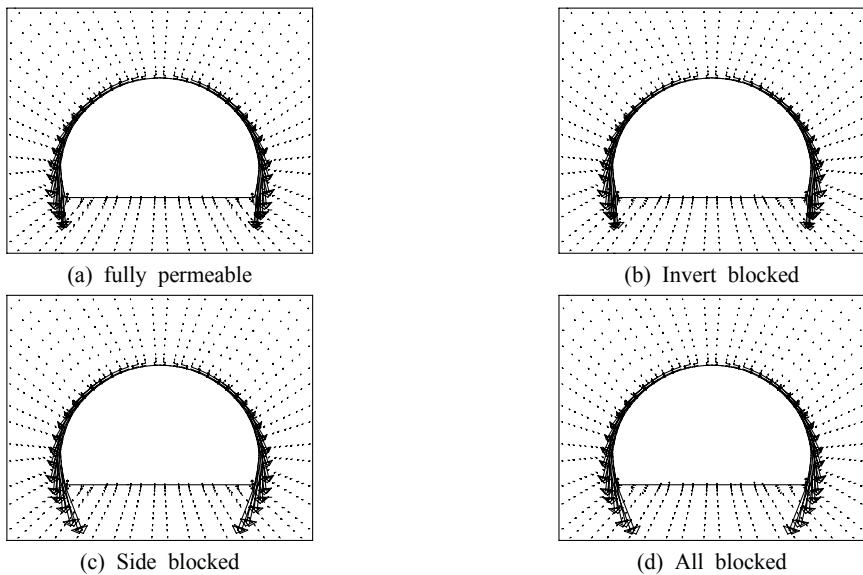
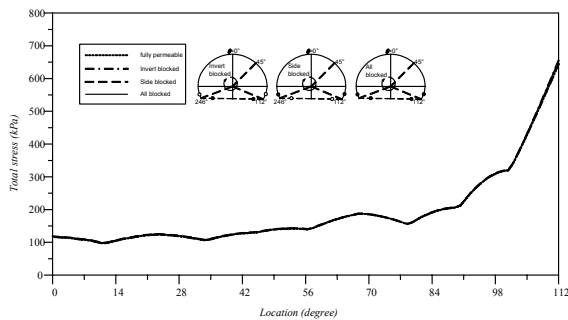


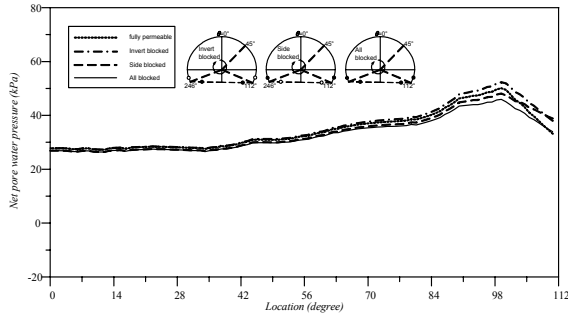
그림 27. 배수공 막힘에 대한 유속분포

(3) 라이닝에 작용하는 지반하중 및 간극수압

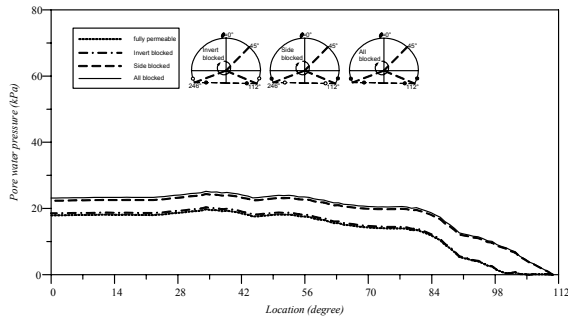
그림 28는 배수공 폐색에 따른 지반하중 및 순 간극수압, 2차 라이닝에 걸리는 간극수압을 나타낸 것이다. 2차 라이닝에 걸리는 간극수압은 측면 배수공과 전체 배수공이 폐색 되었을 때 중앙 배수공 폐색인 경우보다 더 크게 간극수압을 받았다. 천단에서 2차 라이닝의 간극수압은 fully permeable 조건에서 약 17.9 kPa이며, 중앙배수공 폐색인 경우 약 18.5 kPa, 측면배수공 폐색인 경우 22.3 kPa, 전체 배수공 폐색인 경우 약 23.1 kPa이다. 중앙 배수공이 폐색된 경우 fully permeable 조건과 측면배수공 폐색과 전체배수공 폐색과 비슷한 결과가 나타났다.



(a) 1차 라이닝에 작용하는 지반하중



(b) 1차 라이닝에 작용하는 순 간극수압



(c) 2차 라이닝에 작용하는 간극수압

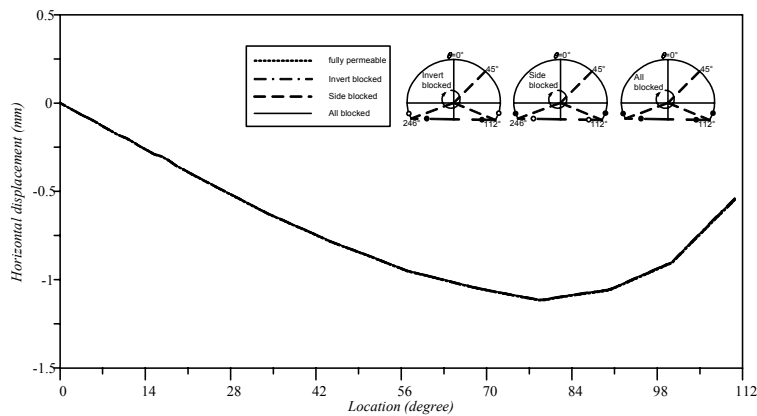
그림 28. 배수공 막힘에 대한 유속분포

(4) 라이닝 변형

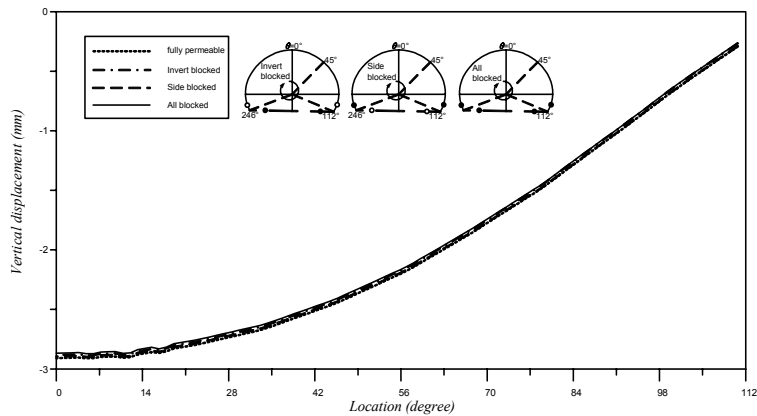
그림 29, 30은 라이닝의 변위를 나타낸다. 1차 라이닝의 수평변위는 배수공 폐색의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났으나 2차 라이닝 수평변위는 전반 배수공이 폐색되었을 경우 터널 내측으로 최대 1.11 mm 변위가 발생하였다.

(5) 라이닝 축력 및 모멘트

그림 31는 라이닝에 작용하는 축력을 나타낸다. 1차 라이닝에 작용하는 축력은 배수공 위치에서 가장 크게 나타나며, 2차 라이닝 축력은 터널 천단에서 가장 크게 나타난다. 그림 32은 라이닝에 작용하는 모멘트를 나타내며 1차 라이닝에 걸리는 모멘트는 배수공이 폐색 되어도 거의 변화가 없지만 2차 라이닝의 모멘트는 배수공 폐색에 따라 모멘트가 크게 변하는 것으로 나타났다.

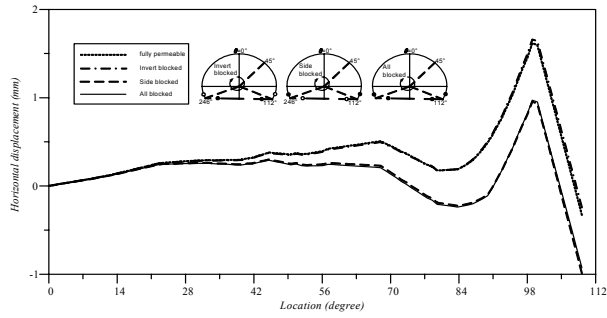


(a) 수평 변위

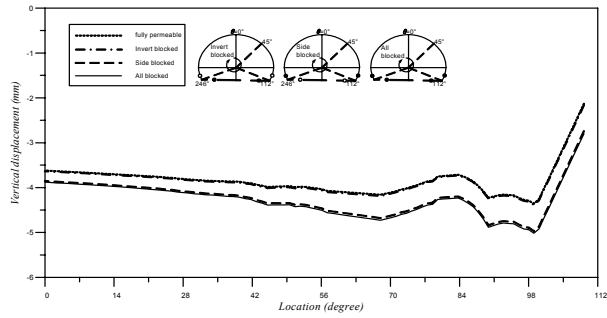


(b) 수직 변위

그림 29. 1차 라이닝 변위

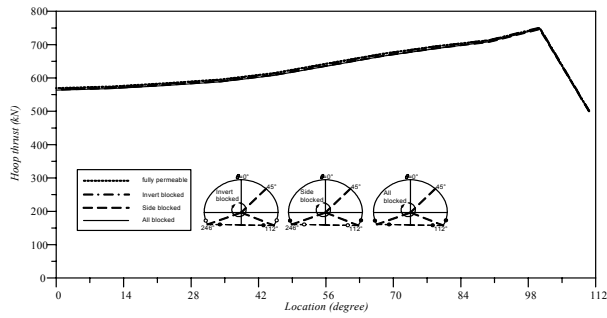


(a) 수평 변위

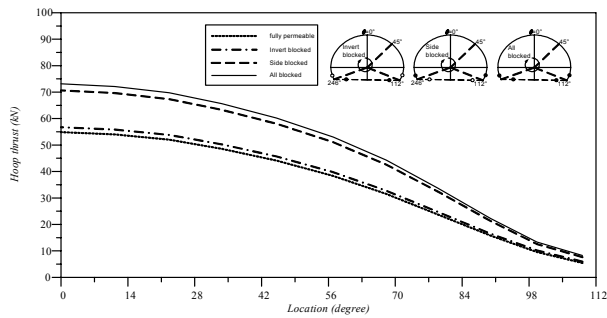


(b) 수직 변위

그림 30. 2차 라이닝 변위

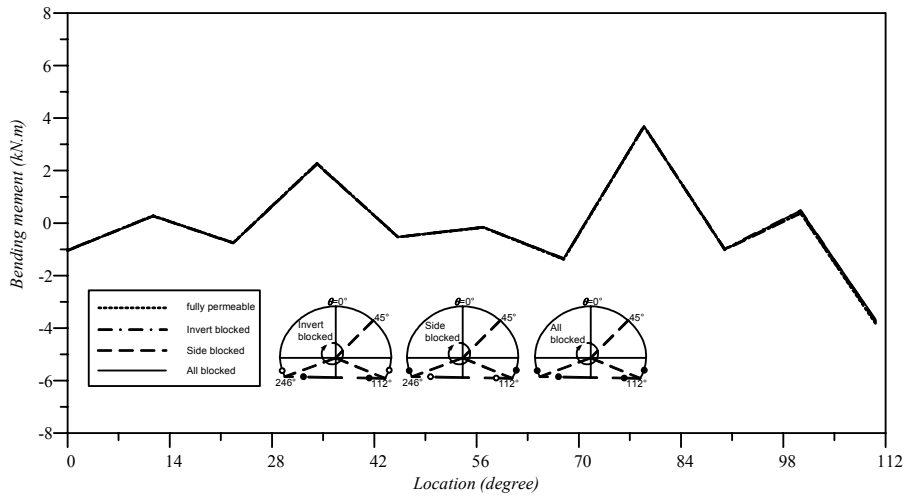


(a) 1차 라이닝

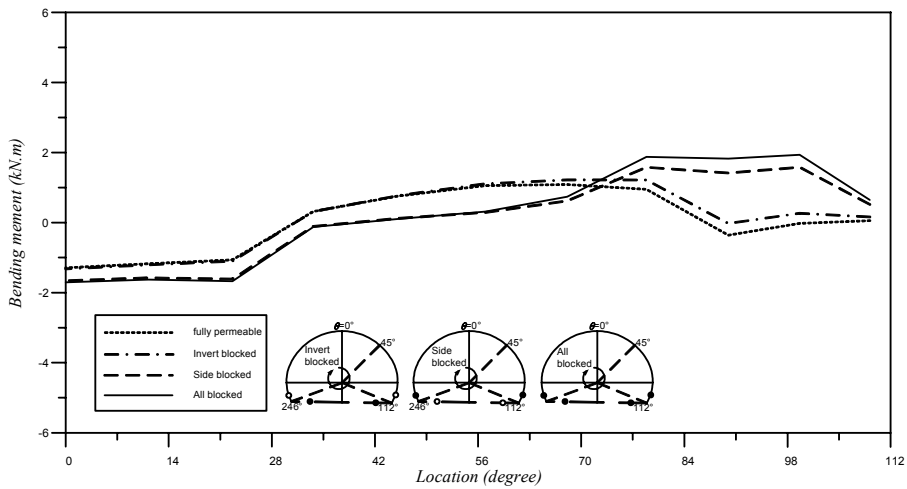


(b) 2차 라이닝

그림 31. 라이닝 축력



(a) 1차 라이닝



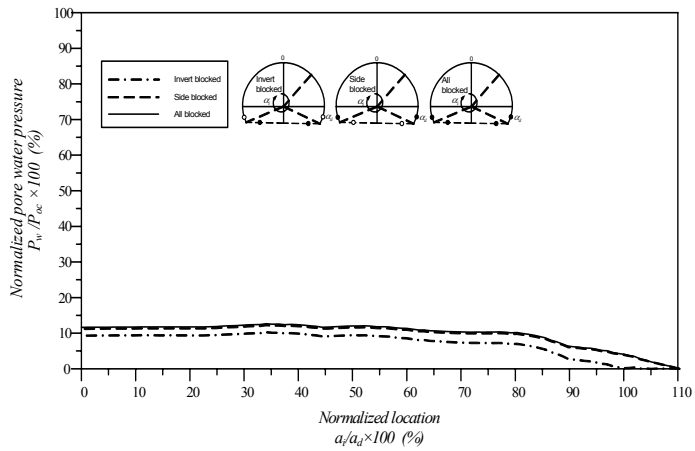
(b) 2차 라이닝

그림 32. 라이닝 모멘트

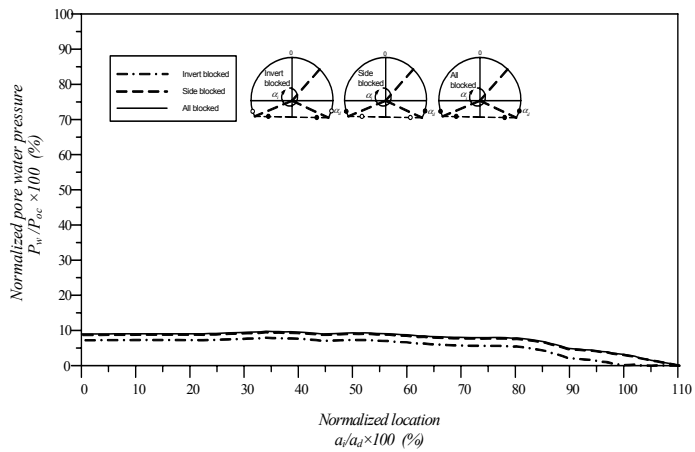
5.2.3 배수공 수리가능 저하에 따른 잔류수압 평가

(1) 개요

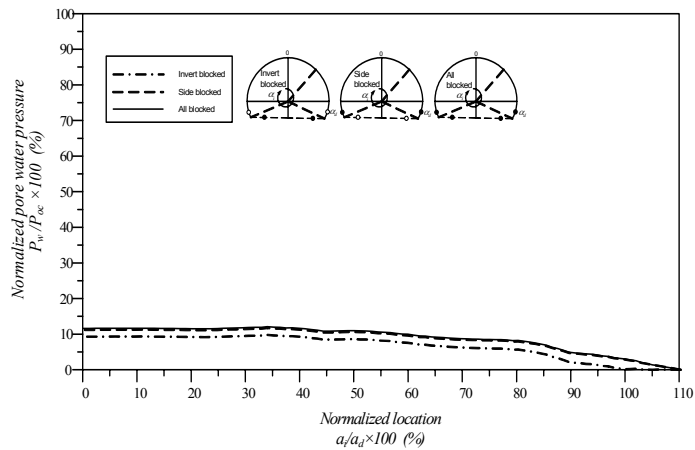
전 절과 마찬가지로 Crown 기준(P_w/P_{oc}), Springline 기준(P_w/P_{os}), 전반 기준(P_w/P_{od})과 터널의 위치(α_i)를 배수공의 위치(α_d)를 기준으로 하여 나누어(α_i/α_d) 일반화시켜 나타내면 그림 33과 같다.



(a) Crown (P_w/P_{oc})



(b) Springline (P_w/P_{os})



(c) All (P_w/P_{oa})

그림 33. 2차 라이닝에 작용하는 간극수압 정규화트

(2) 평가방법

Crown을 기준(P_w/P_{oc})으로 2차 라이닝을 정규화 한 경우 2차 라이닝에 작용하는 잔류수압이 다른 조건보다 크므로 이를 기준으로 배수공 폐색에 따른 잔류수압을 평가하고자 한다.

① All Blocked

그림 34에서 전반 배수공 폐색일 경우 간극수압을 Grapher 프로그램을 사용하여 곡선을 2등분으로 나누어 직선으로 나타내었다. 설계 적용상의 편의를 위해 $P_{a(1)}$ 은 2차 라이닝에 걸리는 간극수압의 최대값을 상수로 하는 직선식이로, $P'_{a(2)}$ 식은 라이닝 모서리(corner)와 $P_{a(1)}$ 의 교차점을 이은 직선식으로 나타내었다. $P'_{a(2)}$ 식의 기울기는 배수공의 위치에 따라 변하지 않지만, $P_{a(1)}$ 과의 교차점이 달라지므로 라이닝 모서리(corner)의 normalized location인 $\alpha_c = \alpha_{coner} / \alpha_d \times 100$ 로 하여 $P_{a(2)}$ 식으로 나타내었다. α_{coner} 는 라이닝 coner의 Location(degree) 값이다.

$$\begin{aligned}
 P_{a(1)} &= 12.66 \\
 P'_{a(2)} &= -0.33 \times \alpha + 36.53 \\
 P_{a(2)} &= -0.33 \times \alpha + 0.33 \alpha_c
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

여기서, $\alpha = \alpha_i / \alpha_d \times 100$, $\alpha_c = \alpha_{coner} / \alpha_d \times 100$ 이다.

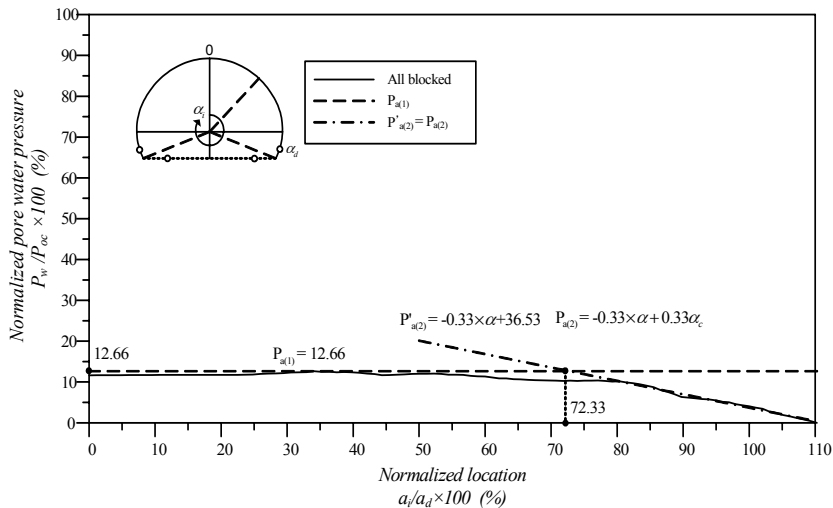


그림 34. 전체 배수공 폐색에서의 잔류수압 평가

② Side Blocked

그림 35에서 측면 배수공 폐색일 경우 간극수압을 Grapher 프로그램을 사용하여 곡선을 2등분으로 나누어 직선으로 나타내었다. 설계 적용상의 편의를 위해 $P_{s(1)}$ 은 2차 라이닝에 걸리는 간극수압의 최대값을 상수로 하는 직선식으로, $P'_{s(2)}$ 식은 라이닝 모서리(corner)와 $P_{s(1)}$ 의 교차점을 이은 직선식으로 나타내었다. $P'_{s(2)}$ 식의 기울기는 배수공의 위치에 따라 변하지 않지만, $P_{s(1)}$ 과의 교차점이 달라지므로 라이닝 모서리(corner)의 normalized location인 $\alpha_c = \alpha_{corner} / \alpha_d \times 100$ 로 하여 $P_{s(2)}$ 식으로 나타내었다. α_{corner} 는 라이닝 corner의 Location(degree) 값이다.

$$\begin{aligned}
 P_{s(1)} &= 12.26 \\
 P'_{s(2)} &= -0.32 \times \alpha + 35.18 \\
 P_{s(2)} &= -0.33 \times \alpha + 0.33 \alpha_c
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

여기서, $\alpha = \alpha_i / \alpha_d \times 100$, $\alpha_c = \alpha_{corner} / \alpha_d \times 100$ 이다.

③ Invert Block

그림 36에서 전반 배수공 폐색일 경우 간극수압을 Grapher 프로그램을 사용하여 곡선을 2등분으로 나누어 직선으로 나타내었다. 설계 적용상의 편의를 위해 $P'_{i(2)}$ 은 원래 간극수압 곡선의 변곡점

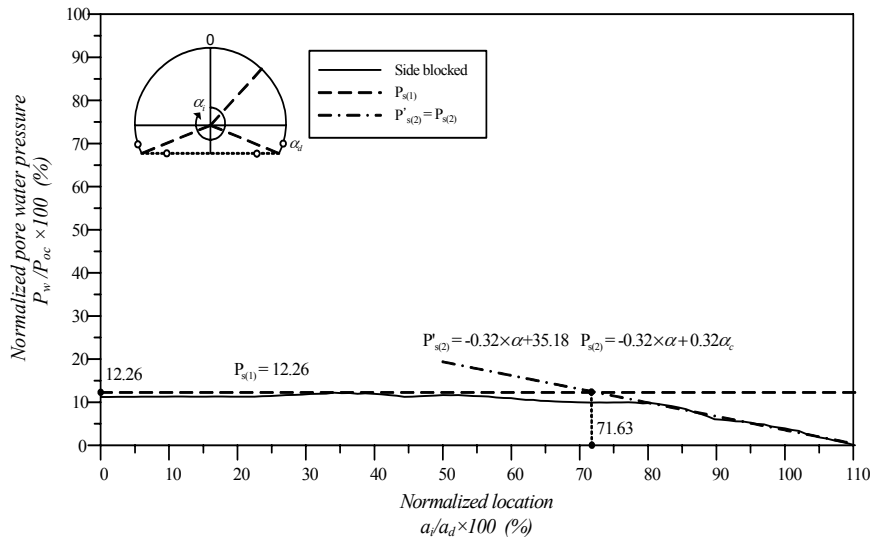


그림 35. 측면 배수공 측면 폐색에서의 잔류수압 평가

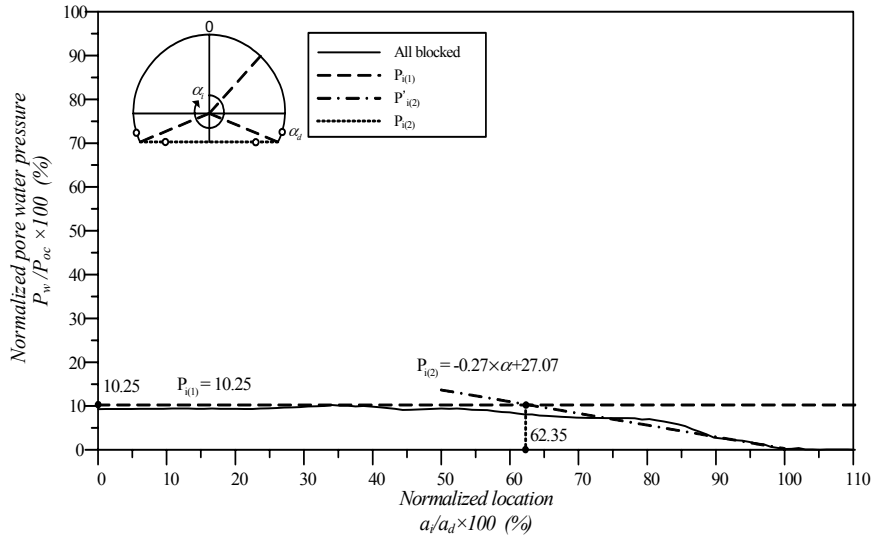


그림 36. 중앙 배수공 폐색에서의 잔류수압 평가

에서 배수공 위치를 종점으로 하여 추정한 식이며, $P_{i(2)}$ 식은 라이닝 모서리(coner)와 $P_{i(1)}$ 와 $P'_{i(2)}$ 의 교차점을 이은 직선식이다. $P_{i(2)}$ 식의 기울기는 배수공의 위치에 따라 달라지므로 라이닝 모서리(coner)의 normalized location인 $\alpha_c = \alpha_{coner} / \alpha_d \times 100$ 로 하여 식으로 나타내었다. α_{coner} 는 라이닝 coner의 Location(degree) 값이다.

$$\begin{aligned}
 P_{i(1)} &= 10.25 \\
 P'_{i(2)} &= -0.27 \times \alpha + 27.07
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

여기서, $\alpha = \alpha_i / \alpha_d \times 100$ 이다.

(3) 결과종합

그림 37은 2차 라이닝 배수공 폐색에 따른 터널 위치에 따른 잔류수압 평가 방법을 나타낸다. 그림 39과 표 4의 식을 통하여 라이닝에 걸리는 잔류수압을 개략적으로 평가가 가능하다. 그림 38는 수치해석으로 제시된 배수공 막힘에 따른 잔류수압 분포 형태를 나타낸다.

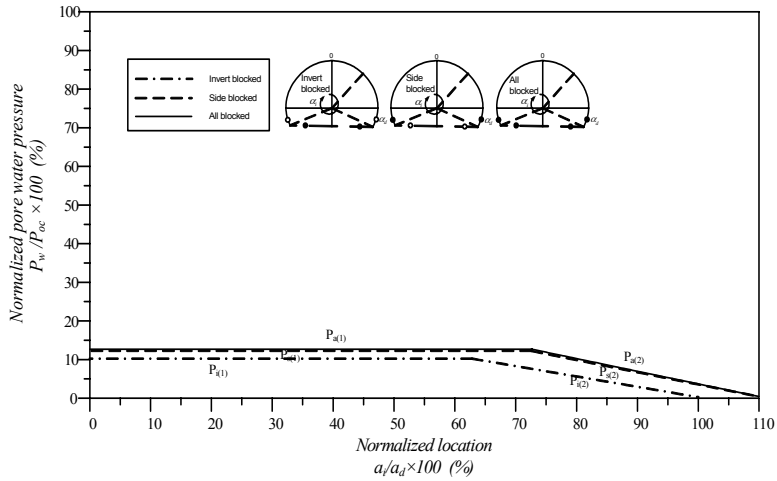


그림 37. 배수공 폐색에 따른 터널 잔류수압

표 4. 배수공 폐색에 따른 터널 잔류수압 추정식

구 분	조건	적용조건	잔류수압 추정식	비고
배수공 폐색에 따른 잔류 수압 분포	All blocked		$P_{w\{a(1)\}} = 0.13 \times P_{oc}$	* $k_l/k_s = 0.1$ $k_l/k_s = \text{fully permeable}$ * $\alpha = \alpha_i / \times 100$ $\alpha_c = \alpha_{corner} / \alpha_d \times 100$ $\alpha_i =$ 터널 천단에서 임의의 각 $\alpha_d =$ 터널 천단에서 배수공까지의 각 $\alpha_{corner} =$ 터널 천단에서 라이닝 끝부분까지의 각
		$P_{w\{a(2)\}} \leq 0.013 \times P_{oc}$	$P_{w\{a(2)\}} = \frac{P_{oc}}{100} (-0.33 \times \alpha + 0.33 \alpha_c)$	
	Side blocked		$P_{w\{s(1)\}} = 0.12 \times P_{oc}$	
		$P_{w\{s(2)\}} \leq 0.012 \times P_{oc}$	$P_{w\{s(2)\}} = \frac{P_{oc}}{100} (-0.32 \times \alpha + 0.32 \alpha_c)$	
	Invert blocked	$0 \leq \alpha \leq 62.30$	$P_{w\{i(1)\}} = 0.10 \times P_{oc}$	
		$62.30 \leq \alpha \leq corner$	$P_{w\{i(2)\}} = \frac{P_{oc}}{100} (-0.27 \times \alpha + 27.07)$	

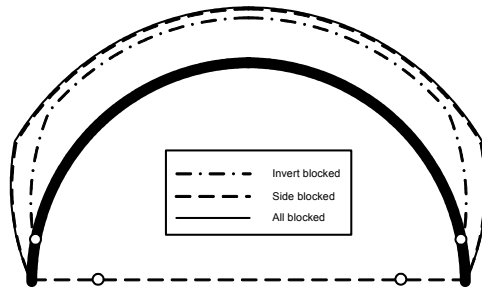


그림 38. 수치해석으로 제시된 배수공 폐색에 따른 잔류수압 분포 형태 ($k_l/k_s=0.1$)

6. 결 론

본 연구에서는 배수형 터널 2차 라이닝에 작용하는 잔류수압을 합리적으로 평가하기 위해 coupled 유한요소 해석이 가능한 ICFEP 프로그램을 활용하여 배수공 막힘 현상을 고려한 경우와 배수재 전반열화 조건을 고려한 경우로 나누어 수치해석을 수행하였다.

1. 배수공 막힘 현상을 고려한 경우는 정면, 측면, 중앙 배수공 열화시 crown 기준으로 normalized된 잔류수압은 13%, 12%, 10%로 배수공 막힘 현상이 없는 경우와 거의 차이가 발생하지 않았으며,
2. 배수재 전반열화 조건을 고려한 경우는 배수재의 열화 조건에 따라 터널 상부 초기 정수위에 해당하는 수압의 10%~70%에 해당되는 잔류수압이 2차 라이닝의 천단과 측벽 일부에 작용하는 것으로 평가되었다 (표 3. 상태투수계수에 따른 터널 잔류수압 추정식 참조).
3. 따라서, 설계시 암질조건이 불량하여 터널 2차 라이닝에 잔류수압 작용이 예상되는 갱구부의 경우 지반조사를 통해 해석위치의 지하수위고를 감안하여 터널 천단부 기준 정수압을 산정하고, 설계자 판단에 기초한 구조물의 중요도에 의해 배수재 폐색조건을 선택하며, 선택된 폐색조건에 따라 터널 천단부 기준 정수압의 10%~70%에 해당하는 잔류수압 추정식을 2차 라이닝 구조 계산에 적용함으로써 합리적이고 안정적인 라이닝 설계를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.
4. 단, 여러 가정에 의한 현상의 단순화, 지하수 침투거리 h 의 과대평가로 인한 투수계수비의 감소 및 간극수압 증가 양상 또는 집수정 측정유량의 오차 등의 요인에 의하여 실제 현상과는 차이가 발생할 수 있으며, 제안한 평가기법의 적용에 있어 특정 지반조건 하의 전반적인 흐름장애에 대한 가정, 부분적인 흐름장애의 경우 그리고 지반강성이 다른 경우의 간극수압 분포 등에 대한 신중한 고려가 요구된다.

참 고 문 헌

1. 신중호, 신용석, 남택수, 최규철(2007), “배수형 터널의 잔류수압 평가기법에 관한 연구”, 한국지반공학회 정기학술대회 논문집, pp. 1130-1137.
2. 신중호, 신용석, 최규철(2008), “운영중 터널에 작용하는 간극수압 평가기법”, 한국터널공학회 논문집, 제 10권, 제4호, pp. 361-369.
3. 신중호, 최민구, 강소라, 남택수(2008), “천층터널 주변의 흐름거동 및 수치해석적 모델링 기법연구”, 한국터널공학회 논문집, 제10권, 제1호, pp. 37-47.

4. 신중호, 남택수, 채성은, 윤재웅(2009), “이중구조 라이닝의 배수공 막힘현상에 따른 수리-역학적 상호작용”, 한국터널공학회 논문집, 제11권, 제3호, pp. 243-254.
5. 한국시설안전기술공단(2007), “잔류수압을 받는 배수형 터널의 안정성 평가 및 보수보강 기술 개발”.
6. Potts, D.M., Zdravkovic, L. (1999), “Finite element analysis in geotechnical engineering: Theory”, Thomas Telford, London
7. Goodman, R.D., Schalwyk, A., Javandal, I. (1965), “Groundwater inflow during tunnel driving”, Engineering Geology, Vol. 2, pp. 39-56.
8. Lee, I.M., Park, Y.J., Reddi, Lakshmi N. (2002), “Particle transport characteristics and filtration of granitic soils from the Korean peninsula”, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 39, pp. 472-482.
9. Lombardi, G. (2002), Private communication.
10. Shin, J.H., Addwnbrooke, T.I., Potts, D.M. (2002), “A numerical study of the effect of groundwater movement on long-term tunnel behaviour”, Geotechnique, Vol. 52, No. 6, pp. 391-403.
11. Shin, J.H., Potts, D.M., Zdravkovic, L. (2005), “The effect of pore-water pressure on NATM tunnel linings in decomposed granite soil”, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 42, pp. 1585-1599.
12. Shin, J.H. (2010), “Analytical and combined numerical methods evaluating pore water pressure on tunnels”, Géotechnique, Vol. 60, No. 2, pp. 141-145.
13. Ward, W.H., Pender, M.J. (1981), “Tunnelling in soft ground-general report”, Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Vol. 4, pp. 261-275.