

운영 중 터널에 작용하는 간극수압 평가기법

신종호^{1*}, 신용석², 최규철³

Evaluation of pore water pressure on the lining during tunnel operation

Jong-Ho Shin, Yong-Suk Shin, Kyu-Cheol Choi

Abstract Control of ground water is one of the most important factors for long-term operation of tunnel because most of tunnel is located in the ground. In case of leakage tunnel, there is no pore water pressure on the lining when the drainage system is properly working. After long-term operation, however, the pore water pressure can be developed on the lining due to the deterioration of the drainage system. The increased pore water pressure on the lining is termed here as 'residual pore water pressure'. Residual pore water pressure can be measured by piezometer, but it is generally not allowed because of damages of drainage system. Therefore, an indirect and nondestructive method is required for evaluating the residual pore water pressure. Moreover, understanding of pore water pressure is needed during healthy operation of the lining. In this study, a new method for evaluation of pore water pressure on the lining during operation is proposed using theoretical and numerical analysis. It is shown that the method is particularly useful for stability investigation of pore water pressure on the lining during operation using theoretical analysis with normalized pore water pressure curve.

Keywords: Leaking tunnel, flow rate, water table, pore water pressure, numerical analysis

요 지 지중터널은 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 설계 시 고려하지 않았던 간극수압이 작용하게 되는데, 이를 잔류수압이라 한다. 잔류수압은 피에조미터로 그 측정이 가능하나 이는 라이닝 및 배수시스템을 훼손할 염려가 있어 부적합하기 때문에 라이닝을 손상시키지 않으면서 작용수압을 평가할 수 있고, 운영 중 라이닝의 건전도 평가(health monitoring) 시 수압상태의 파악이 가능한 비파괴 예측기법이 요구된다. 본 논문에서는 이론적 및 수치해석적 방법을 사용하여 운영 중 터널에 작용하는 간극수압(잔류수압) 예측기법을 제시하였으며, 본 해석방법을 이용하면 비파괴 방법으로 라이닝에 작용하는 간극수압의 파악이 가능하다. 제안된 방법은 이론적 예측기법과 수치해석 결과인 정규화 간극수압 분포곡선과를 병용함으로써 터널 운영단계에서의 잔류수압에 대한 안정성 검토에 유용하게 활용될 수 있다.

주요어: 배수형 터널, 유입량, 지하수위, 간극수압, 수치해석

1. 서 론

지중에 건설되는 터널은 통상적으로 지하수위 하부에 건설되기 때문에 터널의 건설과정 및 유지관리 측면에서 지하수 처리문제는 매우 중요한 위치를 차지한다. 터널 주변의 지하수 흐름은 지반 및 주변조건, 방·배수형식 등 다양한 요소에 의한 영향을 받게 되며, 특히 운영 관점에서 볼 때 방·배수형식이 지하수 흐름에 미치는 영향은 터널의 장기거동과 관련하여 그 중요성이 매우 높다 하겠다.

일반적으로 터널은 배수형 터널과 비배수형 터널로 분류되는데, 터널 내 지하수 유입을 최대한 허용하고, 라이닝에 작용하는 수압을 영으로 가정하여 설계하는 터널을 배수형 터널이라고 하며, 터널 내 유입을 허용하지 않고, 정수압 하중을 견딜 수 있게 설계하는 터널을 비배수형 터널이라 한다. 이러한 배수·비배수 터널의 이점에 대한 논쟁은 현재까지도 지속되고 있는데, Ward and Pender(1981)는 비배수 조건으로 터널을 설계하더라도 장기적 시간경과에 따라 누수가 발생하여 대부분의 터널은 배수구(conduit)처럼 거동한다고 하였다. 한편, Lee et al.(2002)는 배수형터널의 경우에도 배수재의 압착, 토립자 유동 및 폐색으로 인하여 장기적으로 수리기능의 저하가 발생하고, 이로 인해 터널 내 유입 및 배수가 원활히 이루어지지 않아 라이닝 구조체를 손상시

¹정회원, 건국대학교 토목공학과 부교수, 공학박사

²정회원, 한국시설안전기술공단 지하시설실장, 공학박사

³건국대학교 토목공학과 석사과정

*교신저자: 신종호 (jhshin@konkuk.ac.kr)

키는 등의 문제가 발생한다고 보고하였다(한국시설안전 기술공단, 2007). 따라서 배수·비배수 터널은 장기적 운영관점에서 보았을 때 초기 설계개념이 유지되지 않음을 시사한다고 할 수 있다.

보통 지하수위 하부에 건설된 터널은 지하수의 존재에 의하여 라이닝에 수압이 작용하게 되고, 터널 내 유입이 발생하게 되는데, 이러한 라이닝-지반의 수리상호작용에 의해 터널의 운영 상 문제가 발생하게 된다. 따라서 장기적인 터널의 운영에 있어 수압-유입량의 상호 거동에 대한 충분한 이해가 요구되며, 이를 통해 터널의 장기운영이 가능할 것이다. 그러나 현재 터널의 유지관리에 있어 가장 난해한 문제는 라이닝 배면의 수압의 예측이다. 운영 중인 터널의 수리거동 파악을 위하여 직접적으로 피에조미터를 설치하여 측정하기에는 라이닝 및 배수시스템 훼손에 따른 손실이 더 클 것이며, 이는 적절한 유지관리방법이 아닐 뿐만 아니라 설계 피드백 정보를 확보하기도 용이하지 않으므로 기존 터널을 훼손하지 않는 비파괴 평가방법이 요구된다.

그림 1은 터널의 배수시스템의 열화 메카니즘을 예시한 것이다. 작은 입자가 배수층 경계의 흐름을 차단하는 Bridging 혹은 입자가 필터층 내 간극을 막는 Blinding 및 Clogging이 배수열화의 주원인이 된다.

Shin et al.(2002)는 터널 내 지하수의 유입량과 라이닝 작용수압은 라이닝과 터널 주변지반의 상대투수성에 의해 달라지므로 지반 및 라이닝의 투수계수가 매우 중요한 인자라고 보고한바 있다. 또한, 라이닝에 작용하는 간극수압의 크기는 배수재-1차 라이닝-지반의 상대투수성에 좌우된다. 표 1은 지반-라이닝-배수재의 상대투수성에 따른 라이닝 작용수압 특성을 나타낸 것이다(신종호 등, 2005). 배수성능이 원활한 경우 간극수압은 1차 라이닝에 작용하며, 배수성능이 저하된 경우 간극수압은 2차 라이닝에 작용하게 된다. 이와 같이 배수시스템의 열화로 인하여 2차 라이닝에 작용하는 간극수압을 잔류수압이라 하며, 이러한 잔류수압은 라이닝에 구조적 손상을 야기할 수 있으므로 터널의 설계 및 운영에 있어 라이닝-지반의 수리상호작용을 고려하여야 한다.

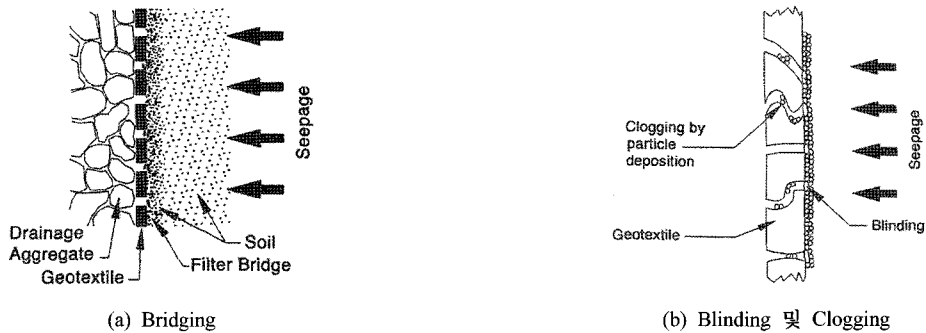


그림 1. 배수시스템의 수리학적 열화 메카니즘

표 1. 투수성 상관관계에 따른 수압작용 메카니즘(신종호 등, 2005)

지반-라이닝	투수계수 상관관계	라이닝 작용수압		비고
		1차 라이닝	2차 라이닝	
$k_s > k_l$	$k_l > k_f$	○	○	
	$k_l < k_f$	○	×	
$k_s < k_l$	$k_l > k_f$	×	○	
	$k_l < k_f$	×	×	

* ○: 수압작용, ×: 수압작용무시 가능

운영 중 터널의 배수시스템은 통상 장기에 걸쳐 열화가 발생한다. 따라서 라이닝에 작용하는 간극수압(잔류수압)의 예측은 터널기능의 유지관리에 있어 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 하지만 앞에서 언급하였듯이 수압 모니터링은 터널 훼손을 유발할 수 있으므로 비파괴 평가기법이 요구된다.

본 논문에서는 운영 중인 터널의 라이닝에 작용하는 간극수압의 크기를 이론적 방법과 수치해석적 방법을 활용한 비파괴 방법을 통해 예측하고자 한다. 또한, 별도로 비배수 조건을 언급하지 않는 한 본 논문에서의 터널은 배수형 터널임을 전제로 한다.

2. 잔류수압의 이론적 평가

2.1 기본개념 및 가정

터널 내 지하수 유입량과 라이닝에 작용하는 간극수압은 라이닝-지반의 상대투수성에 의해 지배된다. 그림 2는 운영 중인 터널 내 지하수 유입특성을 나타낸 것으로, 라이닝 배면에서 흐름저항이 없다면 라이닝 작용수압은 영일 것이나 배수시스템의 열화로 인해 흐름이 원활하지 않다면 유입량의 감소와 함께 투수계수의 차이에 의한 잔류수압이 발생하여 라이닝에 하중으로 작용하게 된다.

본 논문에서는 터널 내 유입량과 수위 등의 인자를 활용하여 라이닝/지반 투수계수비를 산정하고, 이를 통해 라이닝에 작용하는 간극수압을 예측하였다. 본 연구에서 라이닝/지반 투수계수비의 산정을 위하여 이론적인

방법을 고려하였는데, 여기서 지반은 균질 및 등방이고, 1차 라이닝의 투수계수는 주변지반의 투수계수와 같다고 가정하여 결국 운영 중 열화로 인한 라이닝 작용수압은 2차 라이닝에 작용하는 것으로 설정하였다.

2.2 잔류수압(p_r)의 이론적 평가법

터널 라이닝에 작용하는 간극수압을 평가하기 위해서는 터널의 제원, 지하수위, 침수점에서 측정된 터널 내 유입량 등이 필요하다. 터널 내 지하수의 유입은 그림 2에서 나타낸 것과 같이 완전배수 조건과 부분배수 조건으로 구분되며, 본 이론적 평가는 그림 2(b)의 지중터널 조건으로 설정하여 해석하였다. 또한, 지하수의 흐름이 방사형 흐름(radial flow)과 이상화된 균질한 지반, 그리고 원형터널 조건으로 가정하였다. 이러한 가정사항을 전제로 완전배수 조건의 터널 내 유입량 q_0 는 Goodman et al.(1965) 등이 제안하였다. 본 연구에서는 Goodman et al.(1965) 식을 사용하였으며, 이는 식 (1)과 같다.

$$q_0 = \frac{2\pi k_s h_0}{\ln \frac{2h}{r_0}} \tag{1}$$

여기서, h_0 : 터널 중심으로부터 지하수위까지의 수두차 (m), k_s : 지반의 투수계수(m/sec), h : 지중터널(그림 2(b)의 경우)의 지하수 침투거리(m), r_0 : 터널 굴착반경 (m)이다.

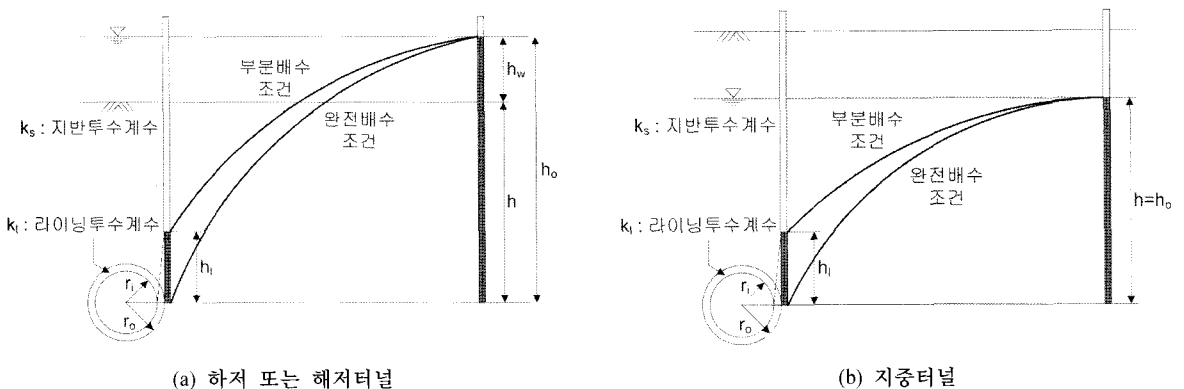


그림 2. 운영 중 터널 내 지하수 유입특성

또한, 부분배수 조건의 터널에서는 주변지반으로부터 터널 내로 지하수가 유입될 때 발생하는 수두손실로 인하여 라이닝에 잔류수압(p_l)이 발생하게 된다. 부분배수 조건에서 2차 라이닝에 작용하는 잔류수두를 h_l 이라 하면 이때의 터널 내 유입량 q_s 는 Goodman et al.(1965)의 제안식으로부터 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q_s = \frac{2\pi k_s (h_o - h_l)}{\ln \frac{2h}{r_o}} \quad (2)$$

내경이 r_i , 외경이 r_o 인 라이닝을 통한 지하수의 유입량 q_l 은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며, 이는 집수정에서의 실측유량과 같다.

$$q_l = \frac{2\pi k_l h_l}{\ln \frac{r_o}{r_i}} \quad (3)$$

상기 이론식 (2)와 (3)은 흐름의 연속성에 의거하여 같으므로 두 식을 수두비인 h_l/h_o 에 관하여 정리하면 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\frac{h_l}{h_o} = \frac{1}{1 + C \frac{k_l}{k_s}}, \quad \text{여기서 } C = \frac{\ln \frac{2h}{r_o}}{\ln \frac{r_o}{r_i}} \quad (4)$$

또한, 식 (1) 및 (3) 그리고 식 (4)의 관계를 활용하면 식 (5)의 유량비(q_l/q_o)의 관계도 다음과 같이 도출할 수 있으며, 이를 통해 라이닝에 작용하는 잔류수압의 예측이 가능하다.

$$\frac{q_l}{q_o} = 1 - \left(\frac{1}{1 + C \frac{k_l}{k_s}} \right) \quad (5)$$

또한, 식 (5)를 라이닝/지반 투수계수비에 관하여 정리하면 식 (6)과 같다.

$$\frac{k_l}{k_s} = \frac{1}{C} \left(\frac{1}{1 - \frac{q_l}{q_o}} - 1 \right) \quad (6)$$

식 (4) 및 식 (5)를 수압과 유입량의 관계로 최종정리하면 식 (7)과 같이 표현된다.

$$p_l = p_o \left(1 - \frac{q_l}{q_o} \right) \quad (7)$$

따라서 터널 내 유입량과 잔류수압은 선형 반비례 관계임을 알 수 있으며, 수두비(h_l/h_o)와 유량비(q_l/q_o)는 결국 터널의 기하학적 제원($2h/r_o$ 및 r_o/r_i)과 라이닝/지반 투수계수비(k_l/k_s)에 의하여 지배됨을 알 수 있다. 여기서, q_l 은 터널 내 유입되는 실측유량과 동일하며, q_o 와 p_o 는 각각 식 (1) 및 정수압을 이용하여 결정할 수 있다.

2.3 잔류수압 이론적 평가법의 예민도 분석

본 절에서는 잔류수압 평가방법 적용에 있어 어떤 요소가 결과에 어떠한 영향을 미치는지를 알기 위하여 라이닝에 작용하는 간극수압의 이론적 예측기법을 활용하여 모의해석을 수행하고자 한다. 본 모의해석은 실제 현장의 데이터는 아니지만 현장조건 및 본 연구의 수치해석 모델과 거의 동일하게 수치를 적용(해석모델은 마제형 단면이나 이론적 방법은 원형터널 가정)함으로써 정해진 심도에 따른 동일단면 터널의 유입량비와 수두비의 변화를 파악하기 위함이다. 모의해석 적용수치는 표 2와 같이 설정하였다. 여기서, 하저 또는 해저터널의 경우에는 $h \neq h_o$ 이나 통상적인 지중터널은 $h = h_o$ 임을 유의하여야 한다(그림 2 참조). 본 모의해석은 지중터널 조건(그림 2(b) 참조)으로 설정하여 $h = h_o$ 로 적용하였다.

표 2. 모의해석 적용수치

파라미터	r_o (터널외경, m)	$h(=h_o)$ (침투거리, m)	$2h/r_o$ (심도비)	r_o/r_i (반경비)	k_l/k_s (투수계수비)
적용수치	5	18	7.2	1.1~1.5	1~0.001

2.3.1 유입량비(q_i/q_o)

표 2에 나타난 수치를 상기 식 (5)에 적용하면 표 3과 같이 정리된다. 표 3은 터널반경에 대한 지하수 침투거리의 비(심도비)를 $2h/r_o = 7.2$ 로 설정한 상태에서 반경비(r_o/r_i) 및 투수계수비(k_i/k_s)를 변화시켜 유입량비(q_i/q_o)의 변동을 나타낸 것이다.

모의해석 결과 동일 단면조건에서는 라이닝/지반 투수계수비가 감소(배수시스템 열화기동 모사)함에 따라 유입량비가 감소함을 알 수 있다. 또한, 동일한 투수계수비 조건에 대하여 터널 반경비가 증가할수록 다시 말해 라이닝 두께가 증가할수록 유입량비가 감소함을 알 수 있다. 이는 터널 내 유입량의 감소량 대비 라이닝 작용수압이 증가하는 것을 의미한다. 이와 같이 운영 중인 터널의 열화정도가 심화됨에 따라 증가하는 잔류수압은 터널 라이닝의 구조적 안정성에 영향을 미치게 된다. 그러므로 본 모의해석을 통해 라이닝의 두께(thickness)와 같은 기하학적 요소와 라이닝/지반 투수계수비(k_i/k_s)와 같은 수리 조건에 의하여 터널 내 유입량이 지배됨을 확인할 수 있다.

2.3.2 수두비(h_i/h_o)

표 2의 적용수치를 유입량비와 같은 조건으로 상기 식

(4)에 적용하면 표 4와 같이 나타낼 수 있다.

표를 통해 알 수 있듯이 라이닝에 작용하게 되는 수두비는 유입량비와 마찬가지로 터널의 반경비(라이닝 두께) 및 라이닝/지반 투수계수비에 의해 지배된다. 또한, 유입량비의 결과와는 선형 반비례 관계임을 알 수 있다. 표 3 및 표 4의 결과를 보다 이해가 용이하도록 하기 위하여 도표화하여 그림 3과 같이 나타내었다.

이와 같은 모의해석을 통해 터널의 심도, 반경 그리고 투수계수비가 터널 내 유입량 및 잔류수두의 거동에 어떤 영향을 미치는지 파악할 수 있었다. 이 결과를 통해 비배수형 터널이 누수방지 및 지반하중(토압+수압하중)을 지지하기 위하여 라이닝을 두껍게 설치하는 것과 원활한 배수를 전제로 하여 수압하중을 배제함으로써 라이닝 두께를 비교적 얇게 설치하는 배수형 터널의 특징이 파악됨을 알 수 있다.

그림 3을 터널 라이닝의 반경비($r_o/r_i = 1.1 \sim 1.5$) 및 라이닝/지반 투수계수비의 변화에 대하여 정수압으로 정규화하면 그림 4와 같이 정규화 유입량 및 정규화 간극수압 분포곡선으로 나타낼 수 있다. 상기 식 (7) 및 그림 4를 통해 정규화 유입량과 정규화 간극수압은 서로 선형 반비례 관계이며, 펼쳐진 S자 형태의 곡선으로 나

표 3. 유입량비 모의해석 결과($2h/r_o = 7.2$)

r_o/r_i (반경비)	$k_i/k_s = 1$	$k_i/k_s = 0.3$	$k_i/k_s = 0.1$	$k_i/k_s = 0.03$	$k_i/k_s = 0.01$	$k_i/k_s = 0.001$
	q_i/q_o					
1.1	0.954	0.861	0.674	0.383	0.172	0.020
1.2	0.915	0.765	0.520	0.245	0.098	0.011
1.3	0.883	0.693	0.429	0.184	0.070	0.007
1.4	0.854	0.638	0.370	0.150	0.055	0.006
1.5	0.830	0.594	0.327	0.127	0.046	0.005

표 4. 수두비 모의해석 결과($2h/r_o = 7.2$)

r_o/r_i (반경비)	$k_i/k_s = 1$	$k_i/k_s = 0.3$	$k_i/k_s = 0.1$	$k_i/k_s = 0.03$	$k_i/k_s = 0.01$	$k_i/k_s = 0.001$
	h_i/h_o					
1.1	0.046	0.139	0.326	0.617	0.828	0.980
1.2	0.084	0.235	0.480	0.755	0.902	0.989
1.3	0.117	0.307	0.570	0.816	0.930	0.993
1.4	0.146	0.362	0.630	0.850	0.945	0.994
1.5	0.170	0.406	0.673	0.873	0.954	0.995

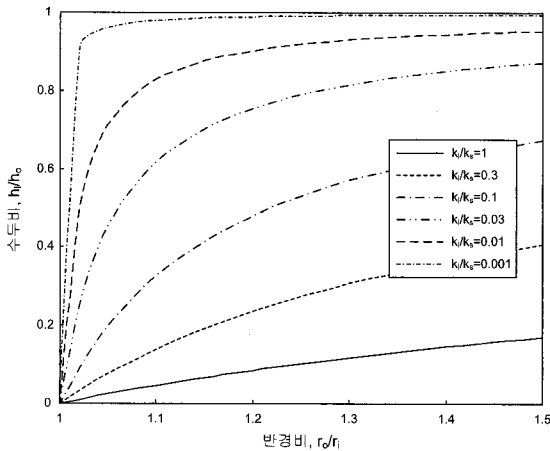


그림 3. 수두비(h_i/h_o)

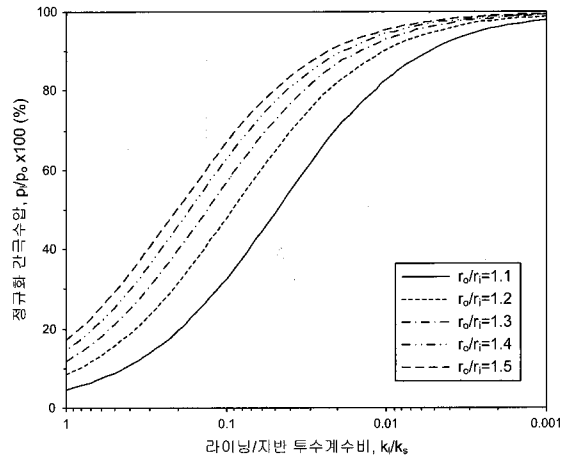


그림 4. 정규화 간극수압 분포

타남을 알 수 있다. 또한, 반경비(라이닝 두께)가 증가할수록 그리고 라이닝/지반투수계수비가 감소할수록 터널 내 유입량은 감소하며, 이에 상응하여 라이닝에 작용하는 간극수압은 큰 폭으로 증가함을 알 수 있다. 이로부터 터널의 두께 및 기하학적 조건이 평가에 미치는 영향을 확인할 수 있다.

3. 잔류수압의 수치해석적 조합평가

3.1 개요

이론적 접근방법의 적용 시 지반의 투수계수와 같은 요소는 실제 현상에서의 구성 및 성질이 매우 복잡하고 일정치 않으며, 약간의 변화에도 큰 물리적 변동특성을 나타낼 수 있다. 또한, 실제 건설되는 터널은 대부분이 비원형인 마제형 단면이나 본 연구에서의 이론적 방법은 현상의 단순화를 위하여 원형단면으로 고려하였기 때문에 이러한 가정을 전제로 단순화한 이론적 평가방법은 개략적인 예비평가로 볼 수 있다. 따라서 정밀한 분석이 요구되는 경우에는 수치해석을 통해 검토하는 것이 바람직하며, 이론적 방법을 통해 산정한 라이닝/지반 투수계수비(k_l/k_s)를 수치해석적 방법과 조합하여 보다 신뢰성 있는 결과를 도출해낼 수 있다.

3.2 수치해석에 의한 $k_l/k_s - p_l/p_o$ 상관관계

운영 중인 터널에 작용하는 간극수압의 주요 지배인

자는 이론적 방법에서도 알 수 있듯이 라이닝/지반 투수계수비이며, 그 관계를 식 (8)과 같이 나타내었다. 이론적 방법으로 고려하기 어려운 터널 구조체에서의 수리경계조건의 영향에 대하여 수치해석을 통한 분석은 다양한 조건을 시뮬레이션 할 수 있기 때문에 유용하게 적용될 수 있다.

$$\frac{p_l}{p_o} = f\left(\frac{k_l}{k_s}\right) \quad (8)$$

그림 5는 해석에 적용된 모델이며, Shin et al.(2007)의 연구에서 사용한 해석모델과 동일하게 4개의 지층으로 구성된 화강토 지반의 터널을 적용하였다. 터널모델의 단면형태는 마제형으로 모의해석에서 가정한 원형단면과는 다르지만 지하수위, 지하수 침투거리(h_o), 심도 및 반경비의 조건은 동일하다. 본 연구는 운영 중 터널의 라이닝에 작용하는 간극수압을 평가하기 위함으므로 해석적용 물성은 그림 4에 나타난 것과 같이 수리거동의 주요인자인 투수계수(지반 및 라이닝)만을 나타내었으며, 경계조건에 의한 영향을 배제하기 위하여 수평거리는 232 m, 수직거리는 50 m로 설정하였다. 또한, 본 해석은 ICPEP(Imperial College Finite Element Program, Potts and Zdravkovic, 1999)을 사용하였으며, 터널의 장기적 수리거동의 고찰을 위하여 굴착완료 시점부터 해석시간을 점진적으로 늘려가면서 정상상태(steady state)가 유지되는 시점까지 해석을 수행하였다.

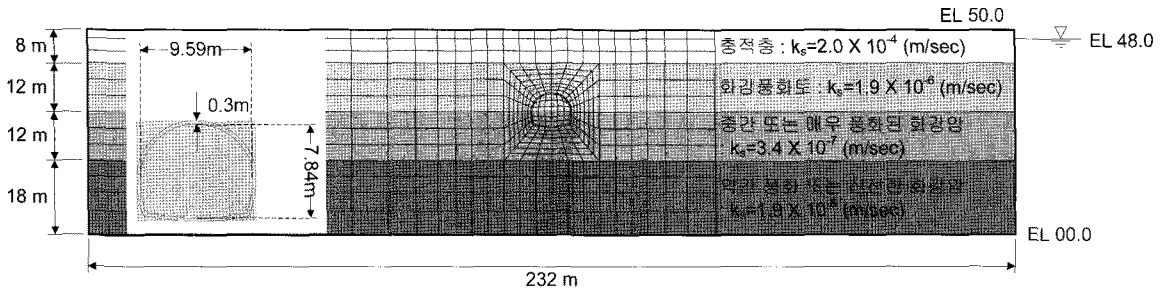


그림 5. 지반 및 터널 Profile

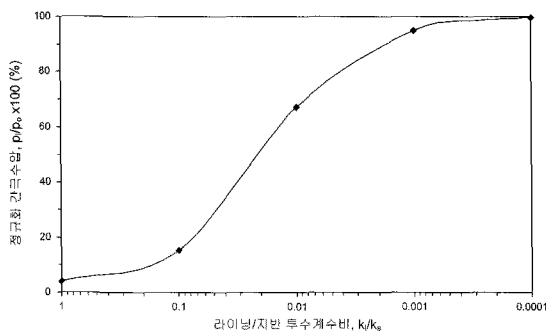


그림 6. 터널의 수리기능 저하에 따른 정규화 간극수압 분포곡선(잔류수압 특성화 곡선)

운영 중 터널의 수리거동을 모사하기 위하여 라이닝/지반 투수계수비를 저하시켜 라이닝에 작용하는 잔류수압을 정수압에 대하여 정규화하여 천단부에 대한 간극수압 분포를 곡선으로 나타내면 그림 6과 같다. 본 해석 모델의 경우 배수성능이 원활한 경우 무시할만한 간극수압이 라이닝에 작용하게 된다. 하지만 시간경과에 따른 배수시스템의 수리기능 저하로 인하여 투수계수비가 점점 감소하게 되면서 라이닝에 작용하는 간극수압은 큰 폭으로 증가하며, 최대 정수압에 근접하는 크기의 잔류수압이 발생한다.

3.3 수치해석적 조합기법

본 해석과정을 통해 얻어진 정규화 간극수압 분포곡선으로부터 배수시스템의 열화로 인한 수리기능 저하, 즉 라이닝/지반 투수계수비의 감소는 터널에 작용하는 간극수압의 증가 양상을 나타내게 되고, 라이닝/지반 투수계수비를 알고 있다면 이를 곡선에 적용함으로써 라이닝에 작용하는 간극수압의 예측이 가능하다는 것을 알 수 있

다. 본 연구는 후자가 중점적으로 고려된 것이다.

수치해석적 조합기법은 이론적 방법으로 투수계수비를 산정하고, 수치해석결과인 잔류수압 특성화 곡선과 조합하여 잔류수압을 평가하는 방법이다. 평가하고자 하는 현장조건에 대하여 식 (6)을 이용하여 k_l/k_g 를 산정하고, 수치 파라미터 해석으로 그림 6과 같은 특성화 곡선을 이용하여 잔류수압을 구하는 방식이다. 일례로, 산정한 k_l/k_g 가 0.01이라고 한다면, 그림 6으로부터 라이닝에 작용하는 간극수압이 정수압의 약 67%로 평가할 수 있다. 터널의 제원 및 지하수위, 집수정 유입량(단위 m 당)을 알고 있다면, 라이닝/지반 투수계수비의 산정이 가능하며, 이를 정규화 간극수압 분포곡선에 적용함으로써 잔류수압의 예측이 가능하다.

4. 잔류수압 예측기법 비교 및 적용성 분석

지금까지의 과정을 통해 운영 중인 터널의 배수성능이 저하하면서 발생하는 수리거동의 변화에 대하여 알아보았다. 본 장에서는 운영 중 터널에 작용하는 간극수압의 이론적 예측기법과 수치해석적 방법을 통해 얻어진 결과에 대하여 비교하고, 최종적으로 잔류수압 평가기법의 일련과정을 제시하고자 한다.

수치해석에 적용된 터널의 조건($r_o/r_i = 1.06$, $2h/r_o = 7.2$)을 이론적 예측기법에 적용하여 그 결과를 상기 정규화 간극수압 분포곡선(잔류수압 특성화 곡선)과 비교하면 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 이론적 방법을 통해 얻어진 곡선과 수치해석을 통해 도출한 곡선 모두 배수시스템 열화정도에 따라 동일한 패턴의 수압증가 양상을 볼 수 있다. 정밀평가로 분류한 수치해석보다 이론식을 활용하여 도출한 예측기법의 결과가 다소 과대

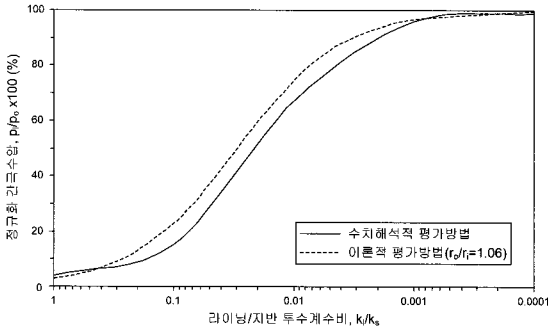


그림 7. 평가법 비교

평가로 나타남을 알 수 있으며, 이는 이론적 예측기법이 여러 가정조건이나 실제현상에서 발생할 수 있는 증발 또는 누수 등에 의해 집수정 실측유량(=라이닝을 통해 유입된 유량, q_i)이 과소평가되면서 그 결과로 라이닝에 작용하는 간극수압이 보다 크게 평가된 것으로 판단된다. 하지만 정성적으로는 동일한 패턴 및 특성을 보이고 있고, 정량적인 측면에서만 그 차이가 최대 약 10% 정도이며, 이는 개략적인 평가방법으로의 활용에 유용함을 보여준다고 할 수 있다. 또한, 앞서도 언급한 것과 같이 이론적 평가방법 및 수치해석적 평가방법의 병용이 운영 중인 터널에 작용하는 간극수압을 평가하는데 매우 유용하게 사용될 수 있음을 나타내는 결과로 볼 수 있다.

이상에서의 과정 및 결과를 통해 운영 중 터널에 작용하는 간극수압의 크기를 예측할 수 있었다. 터널 내로의 지하수 유입량과 지하수위 그리고 터널의 제원을 이론적 예측기법에 적용하여 라이닝/지반 투수계수비를 산정하였다면, 이를 수치해석결과인 정규화 간극수압 분포곡선에 적용함으로써 라이닝에 작용하는 정수압 대비 간극수압의 크기를 예측할 수 있다.

단, 여기서 통상적인 지중터널의 경우에는 지하수 침투 거리(h)가 터널 중심으로부터 수위면까지의 수두차(h_o)와 같으나 하저 또는 해저터널의 경우에는 $h_o = h + h_w$ (그림 2(a) 참조)가 되는 점에 유의가 필요하다. 또한, 실제 지반의 경우 그 성질이 균질하지 않은 층상지반이고, 층간 두께가 매우 불규칙하나 이는 등가투수계수($k_{s(eq)}$)를 사용하거나 터널 주변에 위치하여 지하수 흐름을 지배하는 인접지반의 투수계수를 고려하여야 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 이론적 방법과 수치해석적 방법을 통해 운영 중 터널에 작용하는 간극수압을 간단하게 평가할 수 있는 예측기법을 제안하였다. 터널 운영 중 배수 시스템의 수리기능 저하로 인해 발생하는 잔류수압의 주요영향인자로 터널의 내·외경 및 기하학적 조건, 지하수위 그리고 라이닝/지반 투수계수비가 고려되었다. 본 연구를 통해 도출한 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. 유입량과 간극수압은 선형 반비례 관계로 나타나며, 라이닝 두께가 증가하거나 라이닝/지반 투수계수비가 감소함에 따라 라이닝 작용수압은 큰 폭으로 증가한다.
2. 이론적 방법은 적용초기의 여러 가정사항에 의한 단순화와 터널 내 유입량의 측정오차로 인한 투수계수비의 감소 및 간극수압의 증가양상 등에 의하여 실제 현상과는 차이가 발생할 수 있으므로 이론적 평가는 개략적인 예비평가의 성격으로 구분하여 적용하여야 할 것이다.
3. 따라서 보다 정밀한 결과가 요구될 경우에는 수치해석적 방법을 통해 보완이 가능하며, 실제 현상에 더 근접한 결과를 도출할 수 있을 것이다.
4. 이론적 방법을 통한 개략평가는 수치해석을 활용한 정밀평가에 비해 다소 과대평가되는 경향이 있으나 최대 10% 정도의 오차가 발생함을 확인하였으며, 개략평가로서의 사용은 무리가 없을 것으로 판단되며, 수치해석결과와의 병용이 매우 유용하다 판단된다.
5. 본 연구에서 제안한 간극수압 예측기법은 터널의 운영단계에서 간극수압으로부터의 라이닝 안정성을 신속하게 점검하는데 상당히 유용할 것으로 보인다. 단, 제안한 예측기법의 적용에 있어 특정 지반조건 하의 전반적·부분적인 흐름장애에 대한 경우와 지반강성이 다른 경우의 간극수압분포 등에 대한 신중한 고려가 요구된다.

감사의 글

본 논문은 한국시설안전기술공단이 지원하여 건국대학교와 공동 수행한 “잔류수압을 받는 배수형 터널의

안정성평가 및 보수·보강기술개발” 연구의 일환으로 수행되었으며, 한국시설안전기술공단의 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

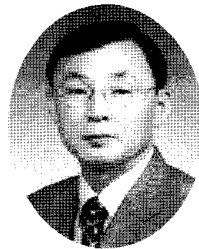
1. 신중호, 안상로, 신용석 (2005), “배수형터널의 수압작용메카니즘과 지속가능한 터널설계, 대한토목학회 정기학술대회 논문집”, pp. 2943-2950.
2. 한국시설안전기술공단 (2007), “잔류수압을 받는 배수형 터널의 안정성평가 및 보수·보강기술개발”.
3. Goodman, R. D., Schalwyk, A. and Javandal, I. (1965), “Ground water inflows during tunnel driving”, Engrg. Geol., Vol. 2, pp. 39-56.
4. Lee, I. M., Kim, J. H. and Reddi, L. N. (2002), “Clogging Phenomena of the residual soil-geotextile filter system”, Geotechnical Testing Journal, Vol. 25, No. 4.
5. Potts, D. M. and Zdravkovic, L. (1999), “Finite element analysis in geotechnical engineering”, Theory, Thomas Telford.
6. Shin, J. H., Addenbrooke, T. I. and Potts, D. M. (2002), “A numerical study of the effect of ground water movement on long-term tunnel behaviour”, Geotechnique, Vol. 52, No. 6, pp. 391-403.
7. Shin, J. H., Shin, Y. S., Kim, S. H. and Shin, H. S. (2007), “Evaluation of residual pore water pressure on linings for undersea tunnels”, Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, Vol. 26, No. 2, pp. 3682-3688.
8. Ward, W. H. and Pender, M. J. (1981), “Tunnelling in soft ground-general report”, Proc. the 10th Intl. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Vol. 4, pp. 261-275.



신 중 호

건국대학교
토목공학과
부교수, 공학박사

E-mail: jhshin@konkuk.ac.kr



신 용 석

한국시설안전기술공단
지하시설
실장, 공학박사

E-mail: sys3281@kistec.or.kr



최 규 철

건국대학교
토목공학과
석사과정

E-mail: hajimemashite@hanmail.net