

# 배수기능 열화에 따른 지하수-터널 수리상호작용 연구

글 | 박동인 | 토목기술부 사원 || 전화 : 02-3433-7769 || E-mail : dipark@ssyenc.com

## 1. 서론

국내 터널의 역사를 살펴보면 1980년대 초반부터 NATM터널의 건설이 본격적으로 시작되어 현재 운영 중인 터널의 경과 년 수는 대부분 30년 이하에 해당하며, 불가피한 경우를 제외하고는 대부분 배수식 형태로 건설되었다.

배수형 터널은 누수발생시 보수가 용이하고 시공비가 적지만 배수 기능이 적절히 확보되지 못하거나 우기시 지하수위 상승으로 이상 수압을 받는 경우 붕락·박락사고를 야기할 수 있다. 특히 1990년 이전에 건설된 터널은 무근 콘크리트 라이닝을 사용하여 배수장애로 인한 잔류수압을 받는 경우 터널구조물의 손상이 예견되며 이는 시민의 안전과 터널기능 유지에 큰 우려가 되고 있다.

배수형 터널의 붕락·박락사고는 장기적으로 배수재의 압착 또는 폐색 그리고 배수시스템의 열화에 의한, 설계시 고려되지 않은 간극수압의 발달이 주원인으로 보고되고 있다. 간극수압의 증가는 누수의 가속화 및 터널의 구조적 손상을 유발하므로 이에 대한 근본적인 대책수립이 필요하며 이에 앞서 배수시스템의 기능장애에 따른 라이닝 및 지반의 거동 메커니즘에 대한 이해가 필요하다.

## 2. 배수형 터널 수치해석 모델링 고찰

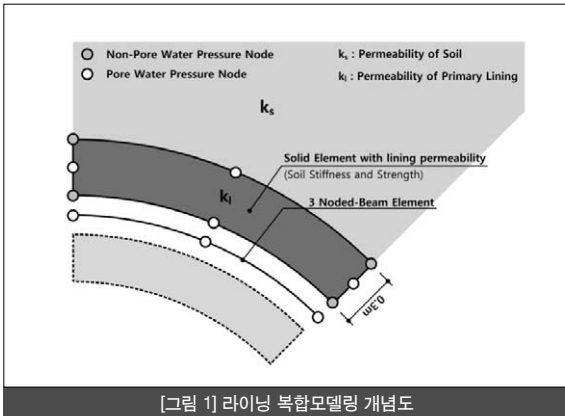
Ward & Pender(1981)는 대부분의 터널은 배수구처럼 거동한다고 보고하였다. 그러나 슛크리트 라이닝의 투수계수가 지반보다 작거나 터널의 배수기능이 적절히 확보되지 못하는 경우 라이닝에 작용하는 간극수압은 완전배수조건으로 간주할 수 없으며, 위 조건을 만족하지 않는 터널의 거동은 반드시 라이닝에 작용하는 간극

수압의 특성을 포함하여 고려되어야 한다.

Shin et al.(2002)은 '지반-스�크리트 라이닝'의 거동은 상호간 투수 계수비에 따라 뚜렷한 차이를 보이나 슛크리트 라이닝에 작용하는 전응력은 크게 증가하지 않는 것으로 보고하였다(Shin et al., 2005). 하지만 배수시스템의 열화에 의한 배수재의 압착과 막힘이 발생한다면 이는 원활한 배수를 방해하여 복공라이닝에 작용하는 간극수압의 상승을 야기한다.

즉 배수재의 투수성이 슛크리트 라이닝보다 작아지는 경우에 발생하는 간극수압은 방수막으로 덮혀 있는 복공라이닝에 작용하게 된다. 많은 사고 사례에서 복공라이닝의 수압손상에도 불구하고 슛크리트 라이닝의 구조적 문제가 크게 발견되지 않는 특징은 이 개념에 의하여 잘 설명된다.

이러한 사실을 바탕으로 본 연구에서는 배수시스템 열화에 따른 라이닝 거동 특성을 Coupled 유한요소 해석을 적용하여 살펴보기로 한다. 기능저하가 발생한 배수시스템은 열화발생구간의 라이닝 투수계수를 감소시키는 것으로 대체하여 모델링 하였다. 이를 위한 전제조건으로, 유한요소 해석 시 라이닝은 구조적 거동 이외에도 수리 거동을 표현할 수 있어야 한다. 하지만 일반적으로 유한요소법을 사용한 터널해석에서 라이닝은 Beam 요소로 구성되며 이는 투수성을 가질 수 없다. 따라서 라이닝의 수리거동을 모델링하기 위하여 약간의 설정이 필요하며(Shin et al., 2002), 라이닝을 [그림 1]과 같이 구조적 거동을 나타내는 Beam 요소와 투수거동을 나타내는 고체요소로 복합 모델링함으로써 이러한 제약을 극복할 수 있다.



[그림 1] 라이닝 복합모델링 개념도

### 3. 해석모델 및 해석 Cases

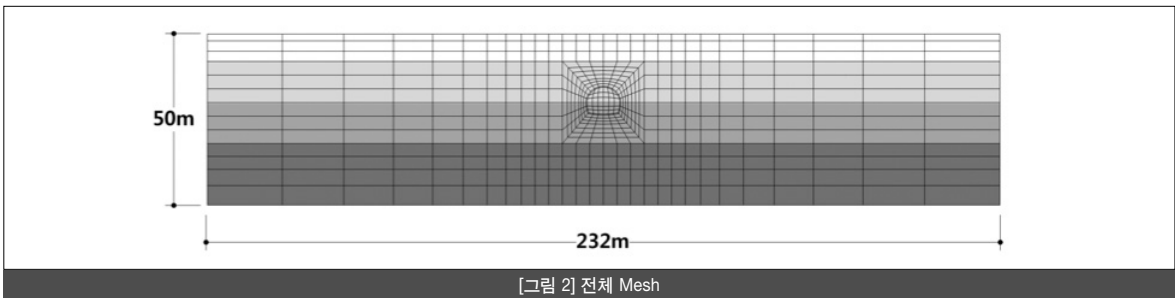
#### 3-1. 해석모델

터널건설은 터널경계부에서 많은 응력변화 및 변위를 수반하고 시공공정 및 현장조건에 따라 수리조건을 달리하므로 이러한 현상을 적절히 표현하는 해석모델이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 Biot's equation을 기초로 하는 연계해석을 수행하여 터널라이닝과 지하수간의 수리상호작용을 고찰하였다. 모델링은 4개의 지층으로 이루어진 화강암 및 화강풍화토 지반에

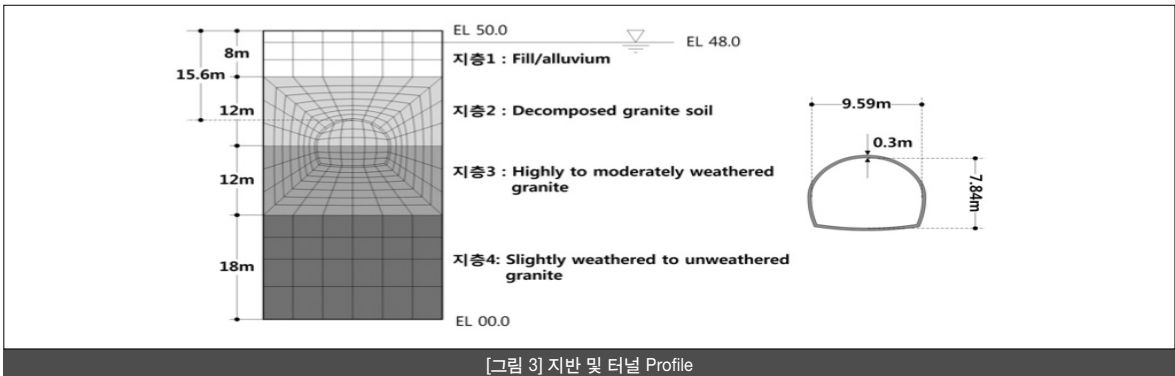
굴착되는 터널을 가정하였다. 터널은 지름 폭 9.59m, 높이 7.84m의 마제형터널이며 라이닝의 두께는 0.3m로 설정하였다. 경계조건에 의한 영향을 배제하기 위하여 모델링의 폭은 터널 지름의 약 25배인 232m로 산정하였다.

탄소성 해석모델은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였으며 터널이 위치하는 두 지반은 Jardin(1985)이 제시한 Small Strain 비선형 탄성 모델을 적용하였다. [그림 2]는 해석모델의 전체 형상을 보인 것이며 [그림 3]은 터널 단면 및 지층구성을 나타낸 것이다.

모델의 좌·우측 경계는 횡방향 변위를 구속한 롤러로 구성하였고 모델의 바닥은 수직변위를 구속하였다. Dasrai et al.(1996)은 현장 계측 및 수치해석 결과를 바탕으로 라이닝의 설치시기는 지반의 Volume Loss 및 라이닝 최대 축력에 영향을 미치는 것으로 보고하였다. 따라서 본 해석에서는 일반적인 NATM 터널조건에 대한 지반 응답곡선을 고려하여 라이닝은 하중분담률 40%에 설치하였으며 라이닝의 탄성계수는 재령 28일의 값인  $2.0 \times 10^7$ (kPa)을 적용하였다. Vaughan(1989)은 지반수리거동 해석에 있어 투수계수의 다양성이 유발하는 부정확성을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 실제 수리현상을 적절하게 표현하는 투수계수 선정이 중요하다. 이미 널리 알려져 있듯이 흙의 투수성은 유효응력과 간극비에 따라 변화하는 비선형 형태를 보인다(Lambe and Whitman, 1969;



[그림 2] 전체 Mesh



[그림 3] 지반 및 터널 Profile

Vaughan, 1989). Vaughan(1989)은 선형 투수계수가 실제 현상과 동떨어진 결과를 보인다는 점을 지적하고 유효응력의 변화가 투수 계수의 현저한 변화를 수반한다는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 Vaughan(1989)이 제시한 비선형 투수모델을 적용하였으며, 특히 터널건설은 터널 경계부에 많은 변형을 수반한다는 점을 고려하였을 때 비선형 투수계수 모델의 선정이 보다 타당한 것으로 판단된다. <표 1 ~ 4>는 해석에 사용된 지반의 세부 물성치를 보인 것이다.

<표 1> 항복전 구성모델

Soil Constitutive Models (pre-yield)									
Isotropic Linear Elastic									
	탄성계수(kPa)	포아송비	축압계수	단위중량(kN/m <sup>3</sup> )					
지층1	$1.47 \times 10^4$	0.35	$k_0=0.54$	15.7					
지층4	$1.00 \times 10^3 + 1.06 \times 10^2 z$	0.28	$k_0=0.35$	24.5					
지층2			$k_0=0.42$	21.5					
지층3			$k_0=0.35$	24.5					
Small Strain Nonlinear Elastic									
지층2	A	B	C(%)	$\alpha$	$\gamma$	$E_{dmin}$ (%)	$E_{dmax}$ (%)	$G_{min}$ (kPa)	
	1,515	1,485	$2 \times 10^{-4}$	0.955	0.818	$9 \times 10^{-3}$	0.35	9,706	
지층3	R	S	T(%)	$\delta$	$\lambda$	$\epsilon_{smin}$ (%)	$\epsilon_{smax}$ (%)	$K_{min}$ (%)	
	475	465	$2 \times 10^{-4}$	0.848	0.872	$5 \times 10^{-3}$	0.50	6,438	

<표 2> 항복후 구성모델

Soil Constitutive Models (post-yield)			
Mohr-Coulomb Yield Parameters			
	점착력(kPa)	내부마찰각 (degree)	Angle of dilatancy (degree)
지층1	Linear Elastic		
지층2	$2 + 0.667z$	31.0	15.5
지층3	$10 + 7.500z$	42.0	21.0
지층4	$100 + 500z$	56.0	28.0

<표 3> 투수계수 모델

Permeability Models					
Isotropic Permeability (spatially varying, m/s)					
지층1	$2.0 \times 10^{-4}$				
지층4	$3.5 \times 10^{-7} - 0.139 \times 10^{-7} z$				
Nonlinear permeability( $k = k_0 e^{Bp}$ )					
	$k_0$ (m/s)	$\beta$	$p'_1$	$p'_2$	R ( $K_{max}/K_{min}$ )
지층2	$1.9 \times 10^{-6}$	0.0043	5	50	100
지층3	$1.9 \times 10^{-6}$	0.0043	5	50	100

<표 4> 라이닝 재료특성

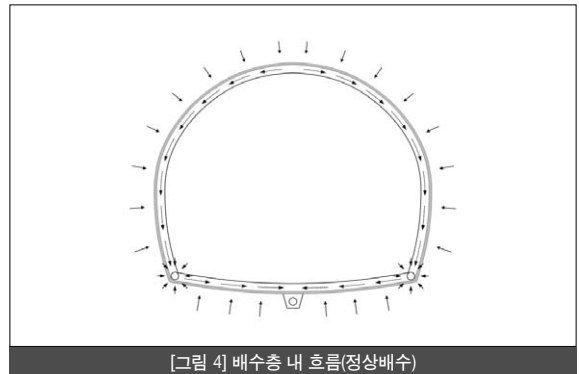
Lining Properties					
	Area(m <sup>2</sup> )	l(m)	E(kPa)	$\mu$	k(m/s)
Lining	0.3	0.00225	$2.0 \times 10^7$	0.2	$3.4 \times 10^{-6} \sim 3.4 \times 10^{-9}$

### 3-2. 해석 Cases

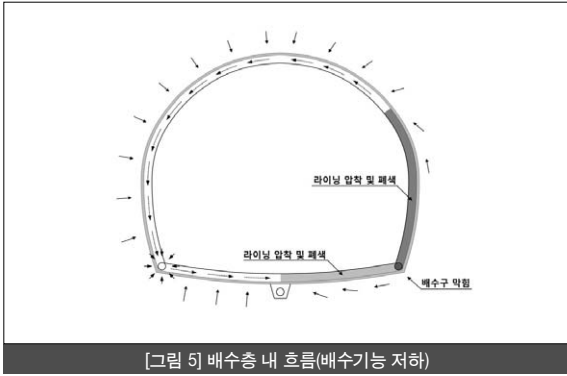
배수시스템의 전반열화에 따른 거동을 알아보기 위하여 5가지의 해석 Cases를 설정하였으며, 라이닝은 지반에 대한 투수계수비에 따라 그 거동을 달리하므로(Shin et al., 2005) 라이닝의 투수계수를 지반의 1/10, 1/100, 1/1,000로 각각 감소시켜 해석을 수행하였다. 또한 기준 설정을 위하여 원전배수 조건( $k_s=k$ )과 완전비배수 조건( $\Delta q = 0$ )을 추가하여 비교·검토하였다. 라이닝의 투수계수 결정을 위한 지반의 초기투수계수는  $k_0=3.4 \times 10^{-6}$ m/s로 터널 인버트부의 유효응력을 기준으로 산정하였다.

[그림 4, 5]는 터널 배수층 내의 흐름을 보인 그림이다. [그림 4]는 배수시스템이 원활한 경우 터널로 유입되는 지하수의 방향 및 배수 경로를 나타내고 있다. 일반적으로 터널로 유입된 지하수는 측벽과 인버트의 경계에 위치한 유공배수관을 통하여 유도배수가 이루어지고 있으며 중앙배수로를 통해 집수정으로 이동하게 된다.

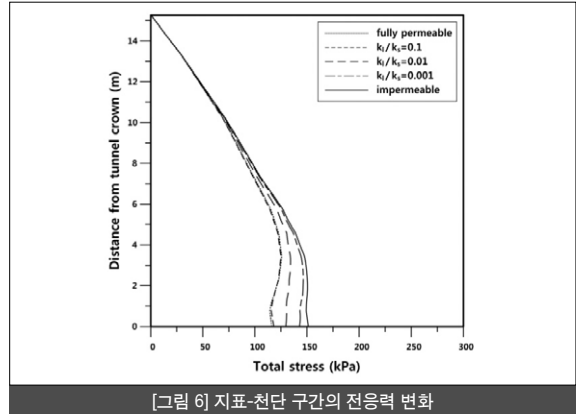
[그림 5]는 라이닝의 배수시스템이 원활하지 못한 경우 터널로 유입되는 지하수의 방향 및 배수 경로를 나타내고 있다. 라이닝 배수 기능 열화에 따른 붕락 및 박락 사고는 주로 스프링라인에서 발생하는 것으로 보고되고 있으며, 이러한 사실과 위에 언급된 터널배수 시스템의 구조적 설계를 바탕으로 2개의 비대칭 투수기능 저하 조건을 설정하였다. 거동의 양상을 확연히 파악할 수 있도록 배수 기능 열화부의 투수계수는 지반의 1/1,000으로 감소시켜 해석을 수행하였으며 열화부를 제외한 나머지 배수시스템은 기능저하가 없는 것으로 가정하였다. <표 5>는 배수시스템 열화해석의 Cases를 나타낸 것이다.



[그림 4] 배수층 내 흐름(정상배수)



[그림 5] 배수층 내 흐름(배수기능 저하)

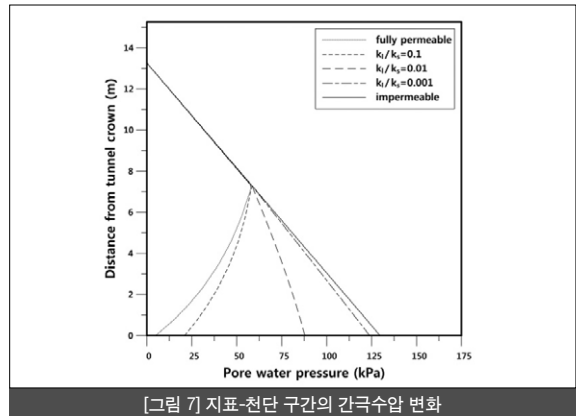


[그림 6] 지표-천단 구간의 전응력 변화

(표 5) 해석 Cases

열화특성	Symbol	단면	라이닝 투수계수(m/s)	
전반	FP		Fully permeable	
	LPSK1		$k_t/10$	$3.4 \times 10^{-7}$
	LPSK2		$k_t/100$	$3.4 \times 10^{-8}$
	LPSK3		$k_t/1000$	$3.4 \times 10^{-9}$
	IM		Impermeable	
국부	LPPR1		Fully permeable	
			1/1000	$3.4 \times 10^{-9}$
	LPPR2		Fully permeable	
			1/1000	$3.4 \times 10^{-9}$

: 배수기능 저하구간



[그림 7] 지표-천단 구간의 간극수압 변화

## 4. 해석결과 및 분석

### 4-1. 배수기능 전반열화에 따른 거동

#### 1) 지표-천단 구간의 전응력 및 간극수압 변화

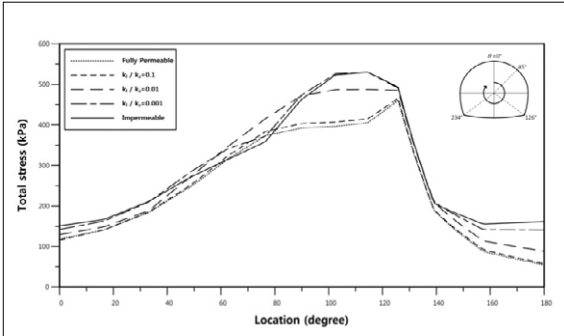
[그림 6]과 [그림 7]은 지표-천단 사이의 전응력과 간극수압을 각각 도식화한 것이다. 라이닝의 투수계수가 낮아질수록 지표-천단 구간의 응력분포 양상은 비배수 거동에 가까워짐을 확인할 수 있다. 특이한 점은 터널 천단부에서의 간극수압은 배수기능 저하가 심화됨에 따라 큰 폭으로 증가한 반면, 전응력은 비배수 조건의 경우 완전배수조건 대비 약 28%만 증가하였다는 사실이다.

전응력을 슛크리트 라이닝에 작용하는 하중으로, 간극수압을 복공 라이닝에 작용하는 하중으로 고려하였을 때 배수기능 저하에 의한 터널구조물의 손상발생확률은 무관 복공라이닝이 슛크리트 라이닝보다 높다는 점을 예측할 수 있다.

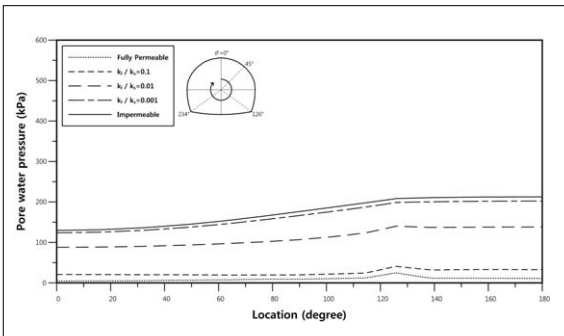
#### 2) 전응력 및 간극수압 변화

[그림 8]은 해석조건별 라이닝에 작용하는 전응력을 나타낸 것으로 이는 일차적으로 슛크리트 라이닝에 작용하는 토압을 의미한다. 최대응력은 스프링라인과 우각부 사이에서 발생하며 투수성이 작아질수록 최대응력 발생지점은 우각부에서 스프링 라인으로 이동하는 것으로 나타났다. 비배수 조건의 전응력은 천단부와 스프링 라인, 인버트부에서 완전배수조건을 기준으로 최대 28%, 32%, 195% 증가하는 것으로 나타났다.

[그림 9]는 터널주변지반의 간극수압을 나타낸 것이며 배수기능 저하시 복공라이닝에 작용하는 간극수압을 의미한다. 배수기능이 저하될수록 복공라이닝에 작용하는 간극수압은 정수압에 가까워지며, 터널저면에서는 유효응력이 줄어들고 간극수압이 늘어나 궁극적으로 수압만 받는 상태가 됨을 보였다. 완전배수조건의 경우  $\theta = 126^\circ$ 에서 나타나는 국부적인 간극수압의 상승은 터널 모델의 모서리에서 라이닝 Mesh의 두께 증가에 따른 해석상의 문제인 것으로 판단된다.

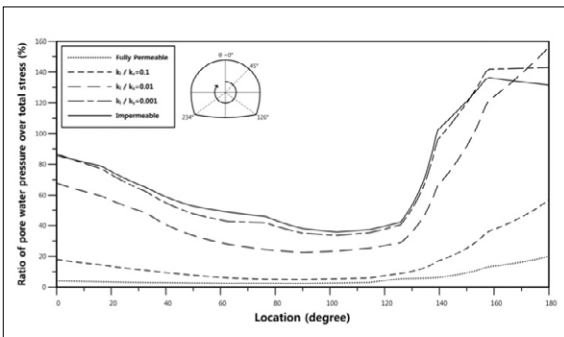


[그림 8] 터널주변 지반의 전응력 변화



[그림 9] 터널주변 지반의 간극수압 변화

[그림 10]은 간극수압을 전응력으로 정규화한 것이다. 터널이 비배수거동에 가까워질수록 간극수압이 전응력에서 차지하는 비중이 커짐을 알 수 있다. 인버트 부분에서 간극수압의 비율이 100%가 넘는 구간이 발생하는데 이는 라이닝 순작용압력으로 수압만 존재함을 의미한다. 즉, 라이닝이 비배수에 가까울수록 터널은 마치 물에 떠서 부력을 받는 구조가 됨을 의미한다. 본 해석결과 라이닝 투수계수가 1/100 이하인 경우에 이러한 현상이 발생함을 보였다.

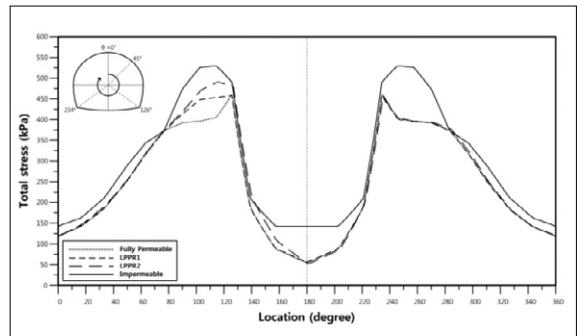


[그림 10] 전응력에서 간극수압이 차지하는 비율

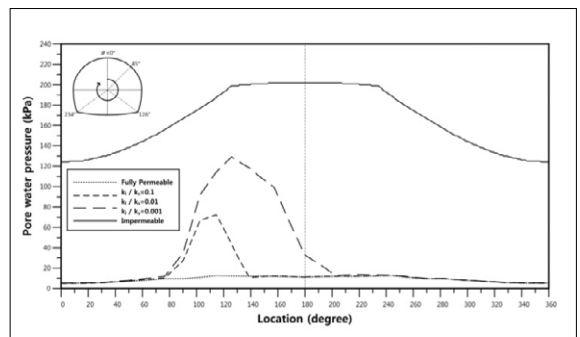
#### 4-2. 배수기능 국부열화에 따른 거동

[그림 11, 12]는 국부적인 배수기능 열화의 Case에 대한 전응력과 간극수압의 변화를 완전배수 및 비배수조건과 비교하여 나타낸 것이다. 해석결과 전응력, 특히 간극수압이 터널라이닝을 따라 심한 비대칭 형태로 분포하였다. 전응력 및 간극수압의 증가는 배수기능 저하가 발생한 위치에서 두드러지게 나타나고 있으며 LPPR1의 경우 전응력 및 간극수압은 각각 최대 52kN, 60kN의 증가량을 보였고, LPPR2의 경우 전응력 및 간극수압은 각각 최대 24kN, 106kN의 증가량을 나타내었다.

이는 배수기능 저하가 발생한다면 LPPR2의 경우 최대 106kN의 추가간극수압이 복공라이닝에 작용할 수 있음을 의미한다. 또한 배수기능 저하 영역이 확대될수록 간극수압의 증가량 및 증가범위 가 큰 폭으로 커지는 것을 알 수 있다.



[그림 11] 터널 주변 지반의 전응력



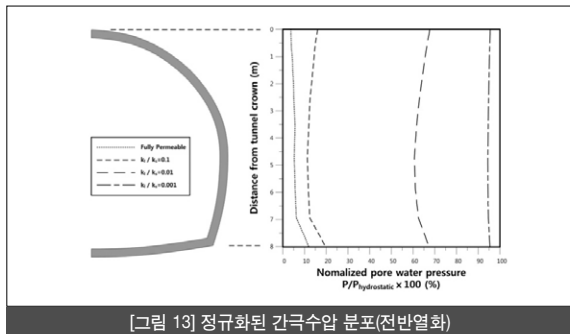
[그림 12] 터널 주변 지반의 간극수압

#### 5. 간극수압 설계기준 고찰

앞 절에서 배수기능의 저하가 전응력의 증가에는 큰 영향을 미치지 않지만, 간극수압의 크기를 현저히 증가시켜 전응력의 구성비

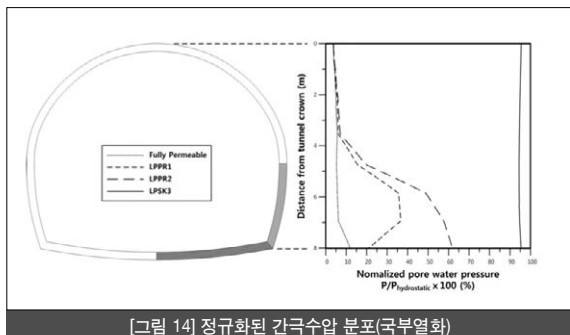
를 상승시킴을 고찰하였다. 전응력의 크기에 지배되는 1차라이닝은 비교적 배수기능 저하에 의한 영향을 받지 않을 것이나, 간극수압의 직접적인 영향을 받는 복공라이닝의 경우 배수기능의 저하는 터널의 장기안정과 관련하여 중요한 의미를 갖는다. 따라서 복공라이닝의 설계하중을 결정하기 위하여 배수재의 배수기능저하에 따른 간극수압의 크기를 산정해보는 것이 의미있을 것이다.

[그림 13, 14]는 <표 5>에 언급된 각 Case별 측벽 주변에 작용하는 간극수압을 정수압으로 정규화한 것이다. [그림 13]은 배수기능 저하가 터널 전반에 걸쳐 나타나는 경우, [그림 14]는 투수계수 저하가 국부적으로 나타나는 경우를 각각 도식화한 것이다. 배수시스템의 배수성능이 지반투수성의 1/10, 1/100, 1/1,000로 저하된다면 복공라이닝에 작용하는 간극수압의 크기는 정수압의 약 20%, 67%, 95% 정도인 것으로 나타났다.



[그림 13] 정규화된 간극수압 분포(전반열화)

국부적인 배수성능의 저하가 발생하는 경우 복공라이닝에 작용하는 간극수압의 크기는 배수성능 저하부위에 집중적으로 증가함을 확인할 수 있었다. 배수시스템의 기능저하가 라이닝 전반에 걸쳐 발생하는 경우 간극수압의 분포형상은 정수압을 일정한 비율로 감소시킨 형태로 나타나고 있지만 국부적인 투수계수 저하는 불규칙적이고 다소 복잡한 형태의 분포를 보였다.



[그림 14] 정규화된 간극수압 분포(국부열화)

## 6. 결론

본 연구에서는 배수형 터널의 배수기능 저하에 따른 터널거동 메커니즘을 비선형 투수모델 및 Coupled-analysis를 적용한 유한요소법을 사용하여 살펴보았다. 다양한 수치해석 결과를 토대로 터널 거동의 변화 특성을 다음과 같이 확인하였다.

- 1) 라이닝의 투수계수가 낮아질수록 터널의 거동은 비배수 거동에 가까워지며 라이닝의 투수계수가 지반의 1/1,000 이하가 되면 터널은 비배수와 흡사한 거동을 한다.
- 2) 라이닝 주변 지반에 작용하는 비배수 조건의 전응력은 배수 조건에 비해 소폭 증가한 반면 간극수압은 큰 폭으로 증가하는 양상을 보인다.
- 3) 터널 배수시스템의 부분적인 배수능력 저하는 복공라이닝에 집중적인 간극수압의 증가를 유발하며 배수기능 저하영역이 확대될수록 간극수압의 증가량 및 증가범위는 급격히 증가한다. **SS**

## 참고문헌

1. 신중호, 안상로, 신용석(2005), "배수형터널의 수압작용메카니즘과 지속가능한 터널설계", 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.2943~2950
2. Jardine, R.J.(1985), "Investigations of pile-soil behaviour with special reference to the foundations of offshore structures", PhD thesis, Imperial College, University of London.
3. Lambe, T.W, and Whitman, R.V.(1969), "Soil Mechanics, John Wiley & Sons, New York"
4. Shin, J.H., Addenbrooke, T.J and 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
5. Vaughan, P.R.(1989), "Non-linearity in seepage problems-Theory and field observation", De Mello Volume, Sao Paulo, pp.501~516
6. Ward, W.H, and Pender, M.J.(1981), "Tunnelling in soft ground-general report", Proc. the 10th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Vol.4, pp.261~275