

# 해저터널의 그라우팅 최적 설계를 위한 수치해석적 연구

주은정<sup>1</sup>, 김용기<sup>2</sup>, 신종호<sup>3</sup>, 권오엽<sup>4\*</sup>

## Numerical study for the optimum grouting design of subsea tunnels

Eun-Jung Joo, Yong-Kye Kim, Jong-Ho Shin, Oh-Yeob Kwon

**Abstract** In the long-term, most tunnels suffer from the increase in ground water inflow and in pore water pressure on the lining. To reduce such hydraulic effect, generally grouting methods are adopted. In this paper effective grouting design is proposed based on numerical simulation. To investigate the optimal grouting layout, factors such as relative permeability, grouting thickness, and distance from the lining are considered. The results are analysed in terms of pore water pressure, inflow rate, and earth pressure. It is revealed that the pore water pressure has increased with a decrease in grout permeability, an increase in grouting thickness and an increase in grouting distance. Meanwhile the inflow rate has decreased with a decrease in grout permeability and is inversely proportional to grouting thickness. Effective grouting design guideline are proposed based on this study.

**Keywords:** Ground water, lining, grouting, ground loading, flow rate, relative permeability

**요 지** 대부분의 터널은 시간이 지남에 따라 유입량 증가, 작용수압의 변화 등 지하수의 영향을 받는다. 이러한 수리영향에 대응하기 위하여 터널 시공 시 지하수의 유입과 라이닝의 간극수압을 줄이기 위한 그라우팅을 적용한다. 본 연구에서는 효과적인 그라우팅을 위해 수치 해석결과를 바탕으로 다양한 그라우팅 조건에 대한 영향을 분석하였다. 그라우팅 영향 특성을 분석하기 위하여 그라우팅의 상대 투수계수 해석, 그라우팅의 두께, 그라우팅의 거리 등을 영향요소로 다르게 하였다. 해석결과는 지반하중, 수압, 라이닝 위치에 따른 수압, 라이닝 주변 수압분포, 유입량으로 나누어서 고찰하였다. 라이닝의 작용하는 지반 하중은 모든 조건에서 거의 동일했으며, 라이닝에 작용하는 수압은 그라우팅의 투수계수가 감소할수록, 두께가 증가할수록, 그라우팅 영역 거리가 가까울수록 감소하였다. 유입량은 그라우팅 투수계수가 작을수록 감소하며, 그라우팅 두께와는 반비례한다. 본 그라우팅 영향 평가를 활용하여 지반 조건에 따른 그라우팅의 효과적인 적용을 할 수 있다.

**주요어:** 지하수, 라이닝, 그라우팅, 지반하중, 유입량, 상대 투수계수

### 1. 서 론

지상 공간 활용의 한계로 지하 공간 활용에 대한 관심이 높아지고 있다. 지하 공간 활용의 대부분은 터널이다. 터널의 특성상 안전이 우선시 되어야하는데 1990년대 전반기 이전 배수터널들은 라이닝에 작용하는 수압의 영향을 고려하지 않고 시공 되어졌다(권오엽 등, 2006). 시간이 지남에 따라 배수재의 기능은 압착과 폐색이 일어나 배수능력이 저하된다. 이로 인해 라이닝의 열화가 진행되며 고려하지 않았던 간극 수압이 발생되고 배수 시스템의 기능 저하로 터널내 유입량이 줄어들게 된다.

(Shin et al. 2002), (Lee et al. 2002). 신종호 등(2009)은 실제 연구를 통하여 배수 장애가 발생 할 경우 수압 증가로 인해 라이닝에 심각한 영향이 미칠 수 있음을 보였다. 특히 해저터널의 경우 유입량, 라이닝에 작용하는 수압 등이 주요 설계 고려사항이다. 일본의 세이칸 터널의 경우, 방수터널로 건설될 경우 최대 240 t/m<sup>2</sup>까지 이르는 수압이 라이닝에 작용하게 되므로 터널 주위로 그라우팅을 하여 터널내로 유입되는 지하수 양을 저하시키고, 최후로 유입되는 양만 집중정에 모아서 유출시키는 배수형 터널로 건설되었다.(Ikuma, 2005) 지반 조건에 따른 그라우팅재의 효과적인 적용을 위해 그라우팅으로 인한 라이닝 작용수압 및 누수량 등은 설계에 있어 중요한 결정요소이다. 이에 본 논문에서는 수치 해석결과를 바탕으로 다양한 그라우팅 두께, 라이닝으로부터의 그라우팅 거리, 지반과 그라우팅영역의 투수조건 등에 대한 영향을 분석하여 최적 그라우팅 조건을

<sup>1</sup>(주)삼안 철도구조부

<sup>2</sup>건국대학교 토목공학과 석사과정

<sup>3</sup>정회원, 건국대학교 토목공학과 교수(대통령실 국토해양 비서관, 공학박사)

<sup>4</sup>정회원, 건국대학교 토목공학과 교수, 공학박사

\*교신저자: 권오엽 (E-mail: oykwon@konkuk.ac.kr)

제시하고자 하였다.

## 2. 해석모델 및 해석 cases

### 2.1 터널 수리-구조적 거동의 수치 해석적 모델링

수치 해석 기법은 연속체 모델(continuum model), 불연속체 모델(dis-continuum model), 지반 반력 모델(sub-grade reaction model)이 있다. 일반적으로 화강토는 한계 체적이 터널구조물에 비하여 극히 작아 연속체로 고려할 수 있으므로 연속체 모델을 택하였다. 연속체 모델은 구성 방정식의 해를 구하는 방법에 따라 유한요소법(Finite Element Method), 유한차분법(Finite Difference Method), 경계요소법(Boundary Element Method)으로 구분한다. 본 연구는 복잡한 지반이나 구조체의 특

성을 고려해야하며, 시간의 흐름에 따른 해석도 가능해야한다. 또한 터널이 지하에 위치하기 때문에 지반 및 지하수의 거동은 복잡하고 비선형적이다. 이런 조건에 가장 적합하게 표현할 수 있는 유한요소법을 수치 해석 도구로 택하였다. 수리거동을 포함하고 있기 때문에 Biot's equation을 기초로 하는 변위-간극수압 연계해석을 수행하였다. 유한요소해석은 응력-변형을 관계를 간극수압과 연계하여 지배방정식을 구성하였다. 해석 프로그램으로는 Imperial College의 D.M. Potts에 의해 개발되었고 지반-구조물 상호작용 문제에서 신뢰할 수 있는 ICFEP(Imperial College Finite Element Program)을 사용하였다. 해석 파라미터는 그림 1에 나타내었다.

### 2.2 해석 모델 및 cases

해석지반은 크게 충적층, 풍화대, 연암, 경암의 4가지 지층으로 이루어진 지반이다. 해석모델의 물성치는 세이칸 터널이 건설된 피복두께(Ikuma, 2005)와 한강 하저터널의 지반 조사 보고서(삼부토건 주식회사, 1996)를 참고하고 구성하여 표 1에 나타내었다. 표 1(a)에서  $z$ 는 깊이를 의미하며, 수심은 60 m로 하였고 지반 내 터널은 고심도인 심도 100 m에 위치한  $D = 7.16$  m인 원형터널이며 라이닝의 두께는 0.7 m로 설정하였다. 신종호 등(2007)은 수평경계조건의 영향을 배제할 수 있는 모델링 폭이 지름의 50배임을 확인하였다. 따라서 모델링 폭은 터널 지름의 약 50배인 400 m로 하였다. 해석모델의 전체 형상 및 터널과 지층구성은 그림 2에 나타내었다.

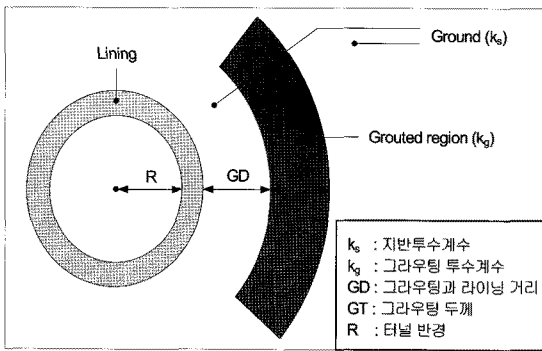


그림 1. 해석 파라미터

표 1. 수치해석에 사용된 물성

(a) 지반

지층		충적층	풍화대	연암	경암
구분	단위				
단위중량	$kN/m^3$	20	22	22	25
축압계수	-	0.54	0.67	0.67	0.35
탄성계수	$kN/m^2$	25,000	$100,000+12724.2z$	400,000	1000,000
포아송비	-	0.35	0.40	0.40	0.28
내부마찰각( $\phi$ )	Degree	35	35	40	56
점착력(C)	$kN/m^2$	30	$150+14.845z$	500	1,000
Angle of dilatancy	Degree	12.5	17.5	20	28
투수계수	m/sec	$1.37 \times 10^{-7}$	$1.37 \times 10^{-7} + 4.7881 \times 10^{-9}z$	$2.5 \times 10^{-7} - 0.35 \times 10^{-7}z$	$1.5 \times 10^{-8}$

표 1. 수치해석에 사용된 물성(계속)

(b) 지보재

구분	단위	Shotcrete
단위중량	$\text{kN/m}^3$	25
두께	m	0.7
탄성계수	$\text{kN/m}^2$	$2.0 \times 10^7$
포아송비	-	0.2
Shear correction factor	-	0.8
투수계수	m/sec	$1.5 \times 10^{-11}$

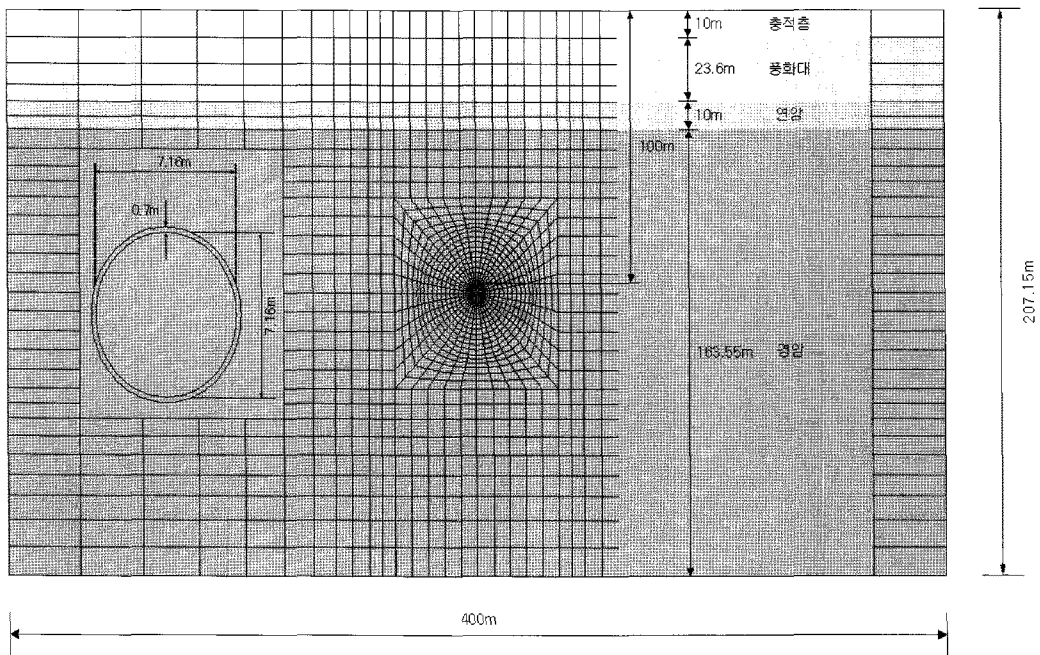


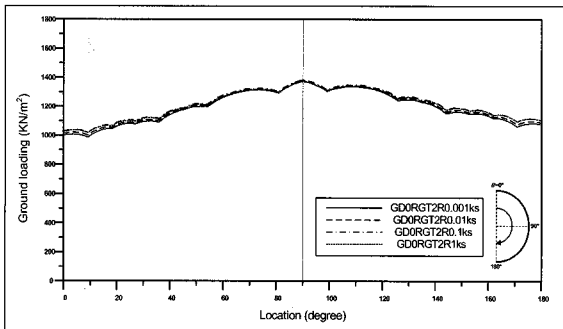
그림 2. 해석모델 및 지층구성

신중호 등(2008b)은 수심, 심도, 수리경계조건(라이닝-지반의 상대 투수계수 비)를 변화하여 라이닝-지반의 수리작용이 터널에 미치는 영향을 분석하였다. 본 논문은 더 나아가 기존의 연구에서 그라우팅을 고려하여 수치해석적 연구를 하였다. 그라우팅의 두께(GT)변화, 라이닝과 그라우팅의 거리에 따른 영향분석을 위한 라이닝으로부터의 그라우팅 설치거리(GD)를 변화시켰으며, 그라우팅영역의 열화를 표현하기위해서 투수계수( $k_s$ )를 달리하여 해석을 실시하였다. 첫 번째로 그라우팅 투

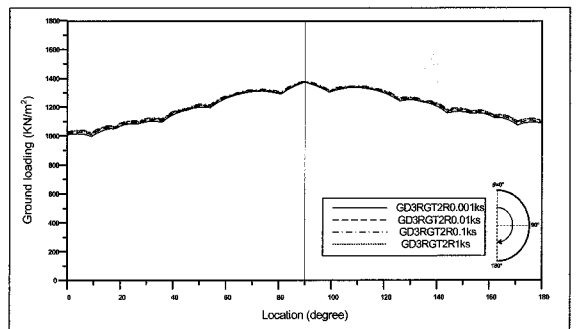
수계수 및 라이닝과 그라우팅 거리의 영향을 분석 하기 위하여 그라우팅 거리를 0~3R, 그라우팅 투수계수를 0.001~ $1k_s$ 로 1/10비로 변화하여 총 20가지 cases에 대하여 모델링하였다. 그라우팅 영역의 두께는 2R로 고정하여 해석하였다. 두 번째는 그라우팅 두께 영향을 분석 하기 위하여 그라우팅 거리를 0~2R, 그라우팅 두께를 2~3R로 변화하여 총 12가지 cases를 설정하였다. 그라우팅의 투수계수는 0.01 $k_s$ 로 고정하여 해석을 실시하였다. 해석 cases는 표 2에 나타내었다.

표 2. 해석 cases

			그라우팅과 라이닝의 거리(GD)				
			0R	0.5R	1R	2R	3R
그라우팅 두께고정 (2R)	그라우팅 투수계수 ( $k_g$ )	0.001	0R, $0.001k_s$	0.5R, $0.001k_s$	1R, $0.001k_s$	2R, $0.001k_s$	3R, $0.001k_s$
		0.01	0R, $0.01k_s$	0.5R, $0.01k_s$	1R, $0.01k_s$	2R, $0.01k_s$	3R, $0.01k_s$
		0.1	0R, $0.1k_s$	0.5R, $0.1k_s$	1R, $0.1k_s$	2R, $0.1k_s$	3R, $0.1k_s$
		1	0R, $1k_s$	0.5R, $1k_s$	1R, $1k_s$	2R, $1k_s$	3R, $1k_s$
그라우팅 투수계수 고정 ( $k_g=0.01k_s$ )	그라우팅 두께 (GT)	2R	0R, 2R	0.5R, 2R	1R, 2R	2R, 2R	.
		2.5R	0R, 2.5R	0.5R, 2.5R	1R, 2.5R	2R, 2.5R	.
		3R	0R, 3R	0.5R, 3R	1R, 3R	2R, 3R	.



(a) 그라우팅 거리 0R, 그라우팅 두께 2R



(b) 그라우팅 거리 3R, 그라우팅 두께 2R

그림 3. 그라우팅영역의 투수계수변화에 따른 지반하중

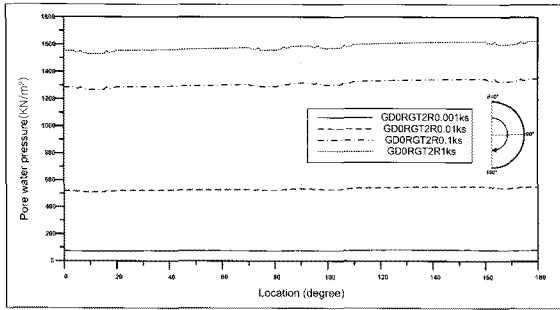
### 3. 해석 결과

#### 3.1 그라우팅 투수계수 및 거리 영향 해석

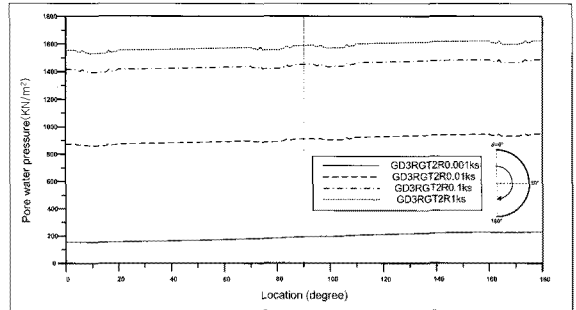
그라우팅 두께를 2R로 고정 하고 그라우팅 거리와 투수계수를 변화 하는 조건으로 해석하였다. 지반하중은 라이닝에 작용하는 전체하중을 의미하는데, 그림 3은 그라우팅 실시영역과 라이닝과의 거리에 따라 작용하는 지반하중을 나타낸 것이다. 해석한 모든 케이스에서 그라우팅 영역의 투수계수와 거리에 관계없이 라이닝에 작용하는 지반하중은 동일함을 나타냈다. 또한 그라우팅의 거리와 투수계수와 관계없이 터널의 스프링라인에 최대하중이 작용함을 알 수 있다.

그림 4는 그라우팅 투수계수의 변화에 의한 라이닝작용 수압의 변화를 나타낸 것인데 그라우팅영역의 투수계수가 감소할수록 라이닝작용수압이 감소하였다. 즉,

그라우팅의 차수성 및 수밀성이 증가할수록 수압이 감소하며, 최대 수압은 인버트에서 발생하는 것을 확인 하였다. 그라우팅 거리의 영향은 그림 4의 (a)와 (b)의 그래프를 비교해보면 알 수 있는데 라이닝으로부터 그라우팅 영역의 거리가 멀어질수록 라이닝에 작용하는 수압은 대체로 증가하였다. 또한 그라우팅 투수계수가  $0.001k_s$ 에서  $0.01k_s$ 로 증가하면 라이닝과 그라우팅과의 거리 차에 의한 수압변화가 크게 나타났으나,  $0.1k_s$ 로 증가하면 라이닝과 그라우팅과의 거리증가에 따른 수압증가현상은 감소하여 차이가 거의 일정함을 나타내었다. 터널 설계 시 지반 하중은 그라우팅 거리나 투수계수에 큰 영향이 없으므로 최대 수압이 작용하는 인버트부분을 고려하여 그라우팅을 적용해야 하며, 그라우팅의 투수계수를 작게 하여 라이닝의 작용하는 수압을 감소 시켜야 한다. 또한 그라우팅영역과 라이닝의 거리

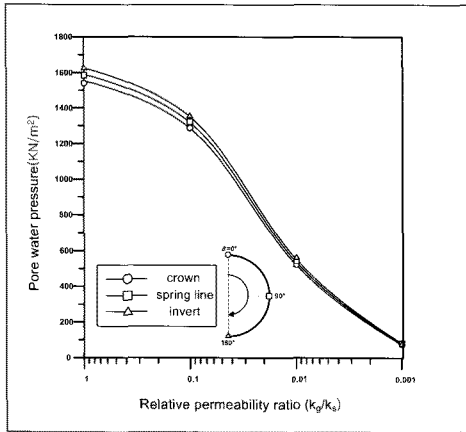


(a) 그라우팅 거리 0R, 그라우팅 두께 2R

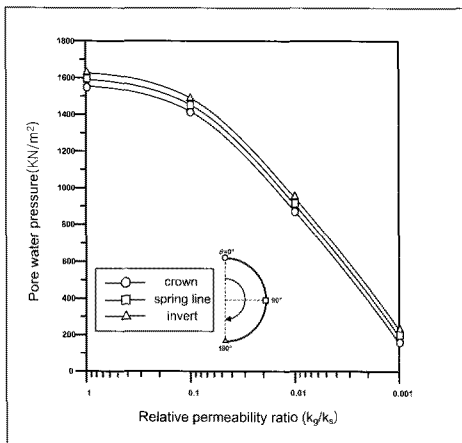


(b) 그라우팅 거리 3R, 그라우팅 두께 2R

그림 4. 그라우팅 영역의 투수계수변화에 따른 라이닝에 작용하는 수압변화



(a) 그라우팅 거리 0R, 그라우팅 두께 2R



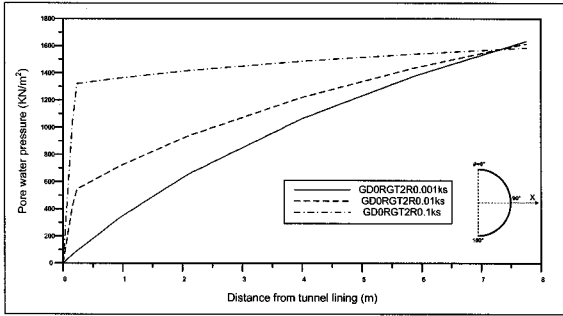
(b) 그라우팅 거리 3R, 그라우팅 두께 2R

그림 5. 그라우팅 영역의 투수계수변화에 따른 라이닝 위치 수압 변화

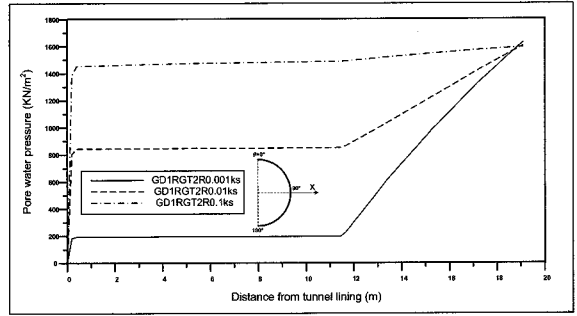
가 멀수록, 투수계수비가 작을수록 수압의 작용이 증가하기 때문에 공학적으로 그라우팅과 라이닝의 거리를 가깝게, 투수계수비를  $0.1k_s$  이하로 하여 설계하는 것이 적절하다.

그라우팅영역의 투수계수변화로 인한 터널의 라이닝 위치에 따른 수압의 변화를 그림 5로 나타내었다. 그라우팅 투수계수가 감소할수록 라이닝에 작용하는 수압이 감소하며 터널의 인버트부에 최대 수압이 발생하였다. 또한 라이닝으로부터 그라우팅 실시영역의 거리가 멀어질수록 그라우팅으로 인한 수압감소효과가 줄어들었음을 확인할 수 있다. 그림 6은 그라우팅영역의 거리변화에 따른 수압의 분포를 나타낸 것이다. 이로부터 그라우팅 실시영역에서 수압감소현상이 발생하며, 같은 투수계수에서 그라우팅 영역과 라이닝과의 거리가 멀어질수록 작용수압이 증가함을 알 수 있다.

그라우팅영역 투수계수가 지반투수계수의  $1/10(0.1k_s)$ 로 감소함에 따른 유입량을 나타낸 그림 7을 보면 투수계수비가 감소함에 따라 유입량이 조금씩 감소하나,  $0.1k_s$  이하가 되는 경우 유입량이 급격히 감소하였다. 또한 라이닝으로부터 그라우팅영역까지의 거리가 멀어질수록 유입량이 증가함을 나타내었다. 신중호 등(2008a)은 라이닝/지반 투수계수비와 정규화간극수압의 그래프를 나타내었으며 유입량과 간극수압이 선형 반비례관계를 보였다. 그림 8의 라이닝/지반 투수계수비와 정규화간극수압의 그래프와 그림 7의 그래프를 비교해 보면 유입량과 간극수압이 선형 반비례 관계임을 알 수 있다. 그라우팅 실시영역이 멀어질수록 라이닝에 작용하는 수압이 증가하므로 터널설계 시 그라우팅 거리를 가깝게 하여



(a) 그라우팅 거리 0R, 그라우팅 두께 2R



(b) 그라우팅 거리 3R, 그라우팅 두께 2R

그림 6. 그라우팅영역의 투수계수변화에 따른 라이닝 주변 수압분포

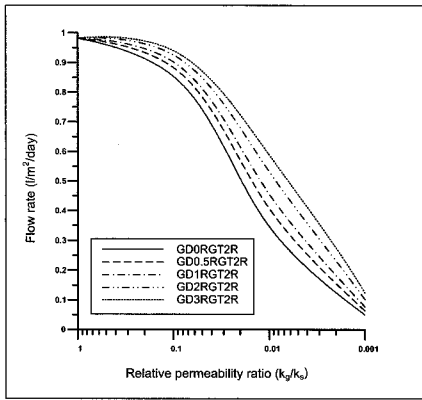
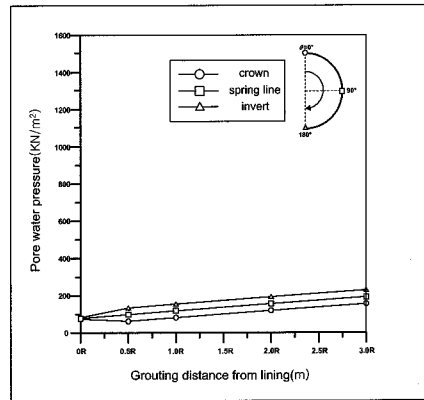


그림 7. 그라우팅영역의 투수계수변화에 따른 유입량변화



(a) 그라우팅 두께 2.0R, 그라우팅 투수계수 0.001 $k_s$

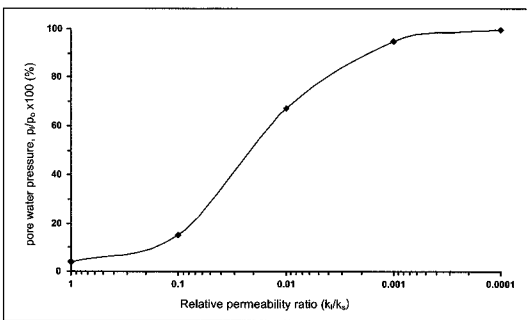
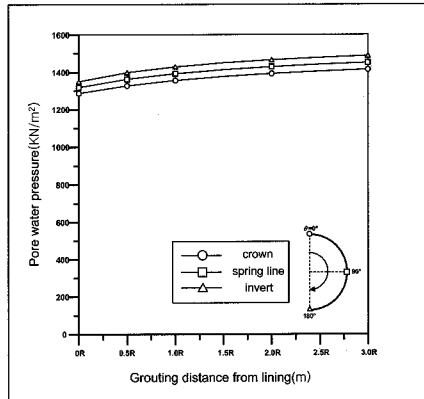


그림 8. 터널의 수리가능 저하에 따른 정규화 간극수압 분포 곡선(신종호 등, 2008a)



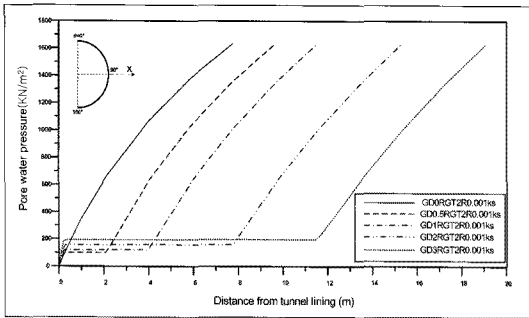
(b) 그라우팅 두께 2.0R, 그라우팅 투수계수 0.1 $k_s$

작용수압을 줄어뜨리게 해야 하며, 유입량 감소를 위해 그라우팅/지반 투수계수비를 0.1 $k_s$  이하가 되도록 설계 해야 한다.

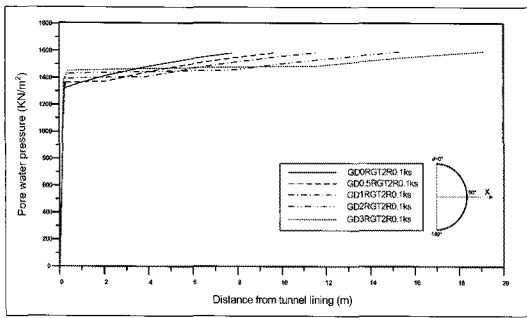
그라우팅 거리 영향에 따른 라이닝 위치에서의 수압

그림 9. 그라우팅 거리변화와 라이닝 위치에 따른 수압변화

의 변화를 그림 9에 나타내었다. 해석결과 일반적으로 그라우팅 거리가 증가 할수록 라이닝에 작용하는 수압



(a) 그라우팅 두께 2.0R, 그라우팅 투수계수 0.001  $k_s$



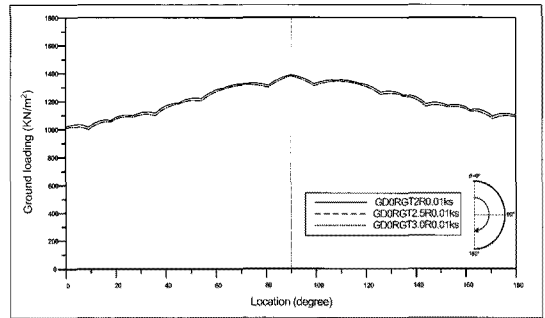
(b) 그라우팅 두께 2.0R, 그라우팅 투수계수 0.1  $k_s$

그림 10. 그라우팅 거리변화에 따른 라이닝 주변 수압분포

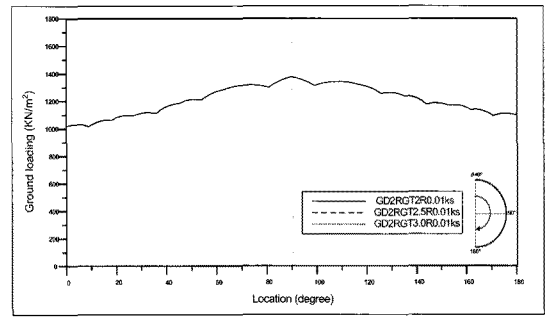
은 선형으로 증가하며, 터널의 인버트부에 최대수압이 작용하였다. 그라우팅영역의 거리 변화에 따른 라이닝 주변의 수압의 분포를 그림 10에 나타내었다. 해석결과 그라우팅 거리가 작을수록 라이닝에 작용하는 수압이 감소하였으며, 특히 (b)에서는 그라우팅 거리에 관계없이 터널의 라이닝 근처에서 급격한 수압의 증가를 보였다.

### 3.2 그라우팅 두께 영향 해석

그라우팅 두께의 영향 분석은 그라우팅의 투수계수를 0.01  $k_s$ 로 고정 하였고 그라우팅 거리와 그라우팅 두께를 변화 하는 조건으로 해석하였다. 이러한 조건에 따른 지반하중의 변화를 그림 11에 나타내었다. 지반하중은 그라우팅 두께와 상관없이 각 라이닝의 위치마다 거의 일정한 값을 나타내었다. 그라우팅의 두께를 변화시켜 라이닝에 작용하는 수압의 변화를 그림 12에 나타내었다. 그라우팅의 두께가 증가함에 따라 라이닝 작용수압은 감소하였으며, 라이닝으로부터 그라우팅영역까지의 거리에 상관없이 그라우팅 두께 증가에 따른 라이닝의

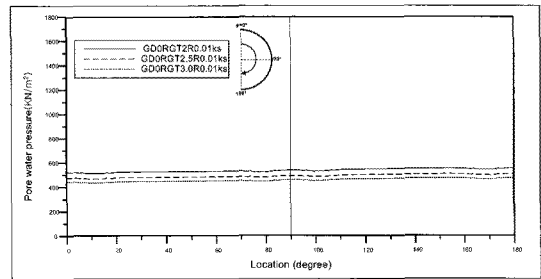


(a) 그라우팅 거리 0R, 그라우팅 투수계수 0.01  $k_s$

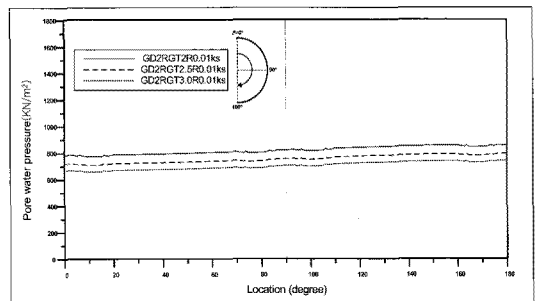


(b) 그라우팅 거리 2R, 그라우팅 투수계수 0.01  $k_s$

그림 11. 그라우팅 두께에 따른 지반하중

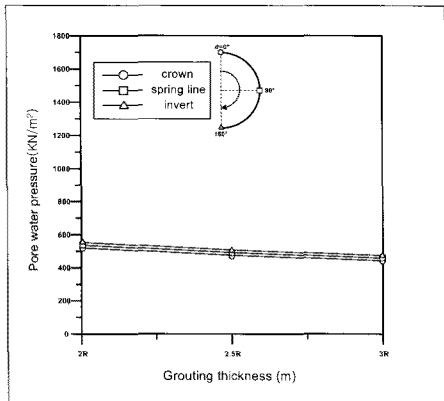


(a) 그라우팅 거리 0R, 그라우팅 투수계수 0.01  $k_s$

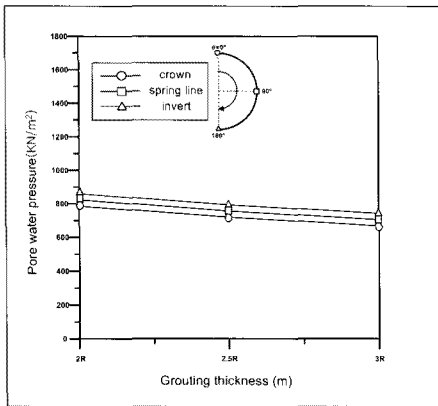


(b) 그라우팅 거리 2R, 그라우팅 투수계수 0.01  $k_s$

그림 12. 그라우팅 두께에 따른 라이닝에 작용하는 수압변화



(a) 그라우팅 거리 0R, 그라우팅 투수계수  $0.01k_s$

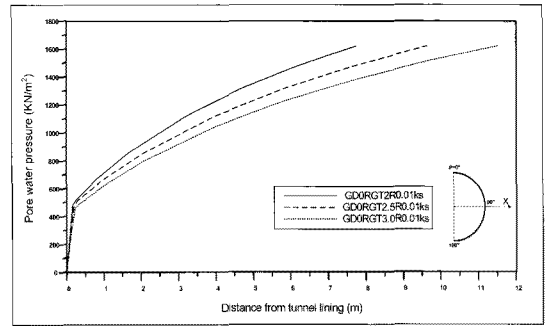


(b) 그라우팅 거리 2R, 그라우팅 투수계수  $0.01k_s$

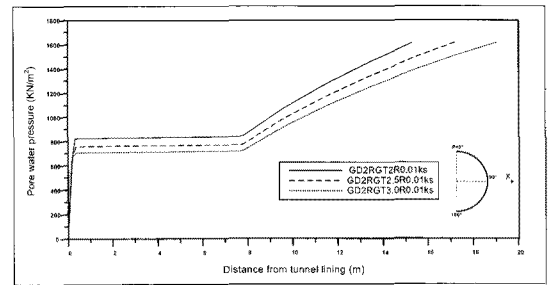
그림 13. 그라우팅 두께와 라이닝 위치에 따른 수압변화

수압감소 비율은 거의 일정하였다. 그라우팅 두께변화에 따른 라이닝 위치의 수압변화를 그림 13에 나타내었는데 그라우팅 두께 증가에 따라 거의 선형적으로 수압이 감소하였다. 그라우팅 두께에 상관없이 터널의 인버트부에 최대 수압이 발생하였으며, 라이닝으로부터 그라우팅 실시영역의 거리가 멀어질수록 그라우팅 두께에 따른 라이닝 위치별 간극수압차이가 증가함을 확인하였다. 지하하중은 그라우팅 두께와 상관없이 라이닝에 작용하는 수압은 두께가 두꺼울수록 감소한다. 하지만 굴착에 의해 발생하는 소성영역보다 크면 그 효과가 크지 않으므로 비경제적인 시공이 될 수가 있어 터널 설계 시 이를 고려하여야 한다.

그라우팅영역 두께 변화에 따른 수압의 분포를 그림 14에 나타내었다. 그림에서 보면 그라우팅 두께가 증가



(a) 그라우팅 거리 0R, 그라우팅 투수계수  $0.01k_s$



(b) 그라우팅 거리 2R, 그라우팅 투수계수  $0.01k_s$

그림 14. 그라우팅 두께변화에 따른 라이닝 주변 수압분포

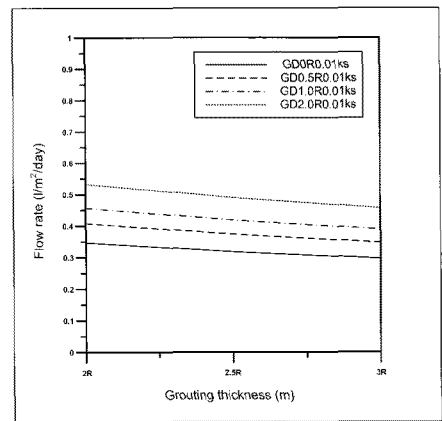


그림 15. 그라우팅 두께변화에 따른 유입량변화

하면 라이닝에 발생하는 수압은 감소하였다. 그러나 그림 11과 비교할 때, 라이닝 작용수압이 감소하여도 라이닝 주변지반에 작용하는 침투력이 증가하여 지하하중에는 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 그라우팅 두께와 그라우팅 거리의 변화에 따른 유입량의 변화를 그림 15에 나타내었는데 해석한 결과 그라우팅 두께가 증가함에



따라 유입량은 선형으로 감소하였으며 그라우팅 거리에 따른 유입량의 차이는 거의 일정함을 볼 수 있다.

### 3.3 최적 그라우팅 제안

본 논문의 해석 결과를 바탕으로 터널 설계 시 고려 사항들은 다음과 같다. 지반 하중은 그라우팅 거리나 투수계수, 그라우팅 두께와 큰 영향이 없으므로 최대 수압이 작용하는 인버트부분을 고려하여 그라우팅을 적용해야 한다. 라이닝에 작용하는 간극 수압을 줄이기 위해서는 그라우팅의 투수계수비를 작게 하며 그라우팅 두께를 두껍게 한다. 또한 터널 내의 유입량 감소를 위해 그라우팅/지반 투수계수비를  $0.1k_s$  이하가 되도록 설계를 해야 하며, 투수계수비가 작을수록 수압의 작용이 감소하기 때문에 공학적으로 그라우팅과 라이닝의 거리를 가깝게 설계하는 것이 적절하다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 수치해석기법을 이용하여 다양한 그라우팅 조건에 대한 터널에 작용하는 지반하중과 수압, 그리고 유입량을 조사하였다. 그라우팅의 두께, 라이닝과 그라우팅영역과의 거리, 그리고 투수계수 조건을 설계 요소로 설정하여 최적 설계조건을 도출하고자 하였다. 해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 그라우팅 투수계수와 두께, 그리고 그라우팅 설치거리와 상관없이 라이닝에 작용하는 지반하중 모두 거의 동일하다. 즉, 그라우팅 영역의 투수계수가 감소하여 라이닝 작용수압이 작아지더라도, 침투력의 작용으로 인하여 지반하중은 일정함을 보였다. 또한 라이닝 주변 수압분포는 그라우팅의 투수계수의 감소와 두께 증가에 따라 감소하며, 라이닝에서 그라우팅 영역의 거리가 멀어질수록 증가한다.
2. 그라우팅의 투수계수가 감소할수록, 두께가 증가할수록, 그라우팅 영역의 거리가 가까울수록 라이닝에 작용하는 수압 크기는 감소하며, 그라우팅 두께 증가에 따른 수압감소비율은 거의 일정하다. 최대 수압은 인버트부에서 발생한다. 또한 그라우팅영역의 투수계수가  $0.01k_s$  일 경우, 수압변화가 커지나  $0.1k_s$  로 증가 시 수압증가현상은 감소한다.
3. 유입량은 그라우팅 영역의 투수계수가 지반투수계수보다 작을수록 감소하며, 1/10 이하로 될 때 급속히 감소한다. 그라우팅의 두께와 유입량은 반비례하며 라이닝과 그라우팅 시공간격이 증가 할수록 유입량은 증가한다. 투수계수가 지반의 1/100일 때 증가량이 가장 크게 나타났다.
4. 최적 그라우팅 설계는 다음과 같다. 최대 수압이 작용하는 인버트부분을 고려하여 그라우팅 설계를 적용해야하며, 그라우팅의 투수계수비를 작게, 그라우팅 두께를 두껍게 하여 라이닝에 작용하는 수압을 줄여야한다. 지하수 유입의 감소를 위해 그라우팅/지반 투수계수비를  $0.1k_s$  이하로 설계, 그라우팅과 라이닝의 거리를 가깝게 한다.

## 감사의 글

본 논문은 한국연구재단의 지반-구조물-지하수 상호작용 이론에 기초한 지속가능한 스마트(smart) 지반배수시스템 연구(R01-2008-000-20109-0) 및 건설교통부의 건설핵심기술연구개발사업인 “해저 시설물 차폐기술 개발”(과제번호: C105A1 080001-05A0508-00330) 연구의 일환으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 권오엽, 신종호, 양유홍, 주은정 (2006) “배수시스템 수리기능 저하가 터널구조물에 미치는 영향에 대한 실험적 연구”, 한국지반공학회 2006 춘계 학술발표회, pp. 970-979.
2. 신종호, 최민구, 강소라 (2007) “터널건설에 따른 지하수 모델링 영향 특성 평가”, 한국지반공학회 2007 춘계 학술발표회 논문집, pp. 49-57.
3. 신종호, 신용석, 최규철 (2008a) “운행 중 터널에 작용하는 간극수압 평가기법”, 한국터널공학회논문집 제10권 제4호, pp. 361-369.
4. 신종호, 박동인, 주은정 (2008b) “라이닝-지반 수리상호작용이 해저터널에 미치는 영향”, 한국터널공학회논문집 제10권 제1호, pp. 49-57.
5. 신종호, 남택수, 채성은, 윤재웅 (2009) “이중구조 라이닝의 배수공 막힘에 따른 수리-역학적 상호작용”, 한국터널공학회논문집 제11권 203호, pp. 243-254.

- 
6. 삼부토건 주식회사 (1996) “한강 하저터널 지반 분석 및 보강 공법”
  7. 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, DOI: 10.1520/GTJ11299J
  8. Ikuma, M. (2005) “Maintenance of the undersea section of the Seikan Tunnel”, *Tunnelling and Underground Space Technology*. Vol. 20, pp. 143-149.
  9. 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.
- 
- 접수일(2010.6.4), 수정일(2010.7.26), 게재확정일(2010.8.12)