

# 수치해석을 이용한 세그먼트라이닝의 수리거동과 누수제어 연구

신중호<sup>1\*</sup>, 신용석<sup>2</sup>, 박동인<sup>3</sup>, 채성은<sup>4</sup>, 최규훈<sup>5</sup>

## A study on hydraulic behaviour and leakage control of segment linings using the numerical method

Jong-Ho Shin, Yong-Suk Shin, Dong-In Park, Sung-Eun Chae, Kyu-Hoon Choi

**Abstract** It has been repeatedly reported that a drainage system of a drained tunnel is deteriorated. And consequently the water pressure on the lining increases with time. However, little research on the watertight tunnel was found in the literatures. According to field measurements, leakage of the undrained tunnel has increased with time, which is completely opposite to the behavior of the drained tunnel. It is evident that the hydraulic deterioration of the tunnel lining changes the water pressure on the lining and the amount of leakage, thus the design concept in terms of groundwater is not maintained tightly throughout the life time of the tunnel. The Segment lining is generally constructed as watertight. However, it is frequently reported that the leakage in the segment tunnel increases with time. It is also reported that the leakage is generally concentrated at the joints of the segments. In this study structural and hydraulic interaction of the segment lining due to the hydraulic deterioration of the segments and the joints is investigated using the numerical modeling method. An electric utility tunnel below groundwater table is considered for the analyses. The effects of hydraulic deterioration of the segment lining are identified in terms of ground loading, water pressure and lining behavior. A remedial grouting measure for leakage is also numerically simulated, and its appropriateness is evaluated.

**Keywords:** Tunnel, groundwater, hydraulic interaction, lining, shield-tunnel segment lining

**요 지** 쉴드 터널의 세그먼트라이닝은 일반적으로 배수시스템을 채용한 재래식 터널과 달리, 비배수 방식을 채택하여 건설된다. 하지만 비배수 터널로 건설된 경우 시간의 경과에 따른 열화의 진행으로 누수가 증가하여, 장기적으로는 설계 시 적용된 비배수 개념이 유지되지 않는다. 세그먼트 터널에서 이음부는 변위와 누수가 주로 발생하는 부분으로, 특히 누수는 이음부를 통하여 일어나는 경우가 대부분이다. 이에 본 논문에서는 전력구 터널을 모델로 선정하여 라이닝 이음부의 열화로 인한 누수가 터널의 세그먼트 라이닝에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 라이닝 전반열화 조건과 이음부의 전반 열화 및 국부 열화 조건으로 설정하여 수치해석을 수행하였으며, 라이닝 이음부의 열화로 인한 누수가 기준량 초과 시 그라우트 주입구를 이용하여 재주입시 누수제어가 가능한지 여부를 수치해석을 통하여 조사하였다. 해석결과 세그먼트 라이닝 및 이음부의 누수로 인한 터널과 지반 간 수리 상호작용 메커니즘을 알 수 있었으며, 시공 중 라이닝 투수성 품질관리, 운영 중 누수관리의 기준을 설정하는데 활용할 수 있음을 확인하였다.

**주요어:** 터널, 지하수, 수리상호작용, 라이닝, 쉴드터널 세그먼트 라이닝

### 1. 서 론

배수 개념 설계에 의한 NATM 터널의 경우 라이닝 배면으로 배수시스템을 설치하여 굴착면으로의 유입을 최대한 허용하여 라이닝 배면으로 수압이 발생하지 않도록 설계하는 터널이다. 하지만 부직포의 막힘(clogging)과 압착(squeezing)으로 인한 배수시스템의 수리기능저

하(이인모 등, 2001)로 유입량은 줄고, 수압은 증가하여 비배수 터널의 거동경향으로 접근한다. 쉴드터널은 NATM 터널과 달리 일반적으로 비배수 설계개념으로 건설된다. 비배수 터널은 라이닝 주변을 완전 방수처리하여 라이닝 내부로 지하수가 침투하지 못하도록 설계하고 터널 라이닝에 발생하는 수압을 정수압으로 보고 설계하지만 구조물의 열화로 인해 누수량이 증가하고 이에 상응하게 수압이 감소하는 현상을 나타낸다.

세그먼트 라이닝의 거동은 NATM 라이닝과 비교하여 두 가지 관점에서 다른 특성을 보인다. 첫째는 당초 비배수로 건설되나 열화에 따라 라이닝의 투수성이 증

<sup>1</sup>정회원, 건국대학교 토목공학과 부교수, 공학박사

<sup>2</sup>정회원, 한국시설안전기술공단 진단계획 팀장, 공학박사

<sup>3</sup>쌍용건설(주) 토목기술부 사원

<sup>4</sup>건국대학교 토목공학과 석사과정

<sup>5</sup>건국대학교 토목공학과 석사과정

\*교신저자: 신중호 (E-mail: jhshin@konkuk.ac.kr)

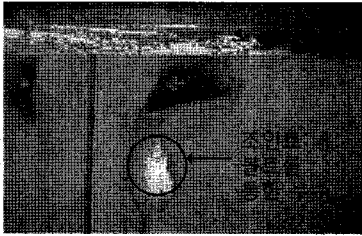
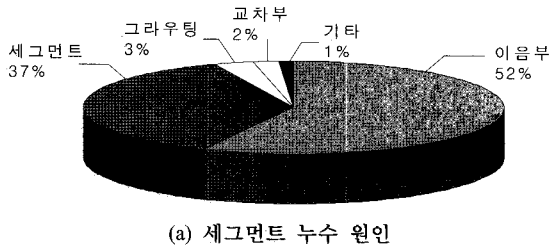


그림 1. 세그먼트 누수

가하는 특성이며, 둘째는 세그먼트 라이닝이 주로 단일 구조 라이닝으로 건설되는 특성이다. 비배수 터널은 시간경과와 함께 누수량이 증가하여 시공상 완전한 비배수 터널을 건설하기란 거의 불가능하므로, 통상 허용누수량을 규정함으로써 시공상의 오차를 고려하고 있다(신중호 등, 2006). 일반적인 쉘터널의 세그먼트 방수설계는 이음부 방수, 뒷채움 주입공 방수, 코킹방수, 볼트공 방수 등으로 구성된다(동아지질 등, 1997).

그림 1은 세그먼트 누수를 나타낸 것으로 그림 1(a)는 사단법인 일본터널기술협회(社團法人 日本トンネル技術協会, 1985)의 조사 결과, 세그먼트의 누수량의 약 57%가 세그먼트 이음부에서 발생하여 가장 큰 비중을 차지하였다. 세그먼트 라이닝의 경우, 거동에 따른 누수 및 변형은 세그먼트와 세그먼트의 이음부에서 주로 발생하며 그림 1(b)와 같이 조인트에서도 누수가 발생한다.

그림 2는 세그먼트 라이닝의 이음부 거동을 보인 것이다. 이음부에서 대부분의 누수가 발생하므로 세그먼트 라이닝을 모델링 할 경우, 구조적으로나 수리적으로 이러한 거동특성을 모두 고려할 수 있어야 한다.

현재까지 세그먼트 라이닝에 의한 공사는 그 역사상 상대적으로 짧은 세그먼트에 대한 수리 상호작용 연구는 거의 이루어진 바 없는 실정이다. 본 논문에서는 세

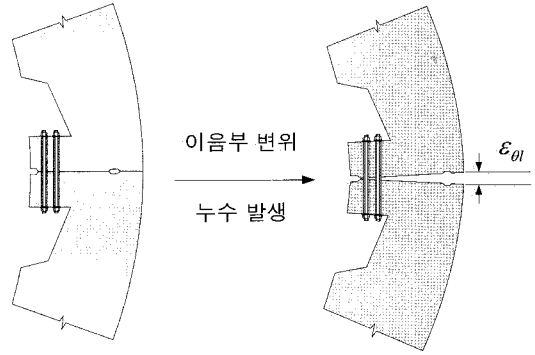


그림 2. 세그먼트 라이닝의 이음부 거동

그먼트 라이닝의 수리 상호작용을 수치 해석적인 방법으로 모델링하여 열화 특성에 따른 유입량 및 터널 거동을 조사하고자 하였다.

## 2. 세그먼트 라이닝의 구조 - 수리 상호 거동

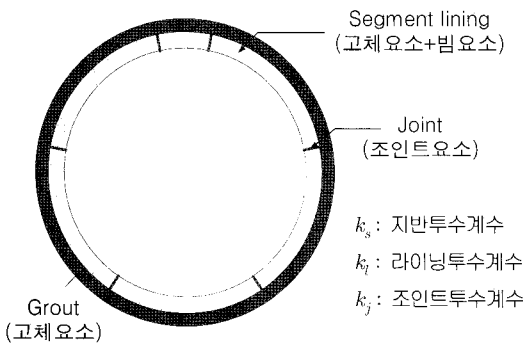
본 연구에서는 세그먼트 라이닝을 모델링하기 위하여 세 가지 가정 및 단순화 방법을 채택하였다. 첫 번째로 운영 중 터널의 장기거동을 해석하는 목적으로 하였으며, 수리적 거동에 중점을 두어 2차원 해석법을 적용하였다. 두 번째로 장대터널임을 감안하여 세그먼트의 교번 배치구조는 평면변형조건을 가정하여 표준단면을 대상으로 하였다. 세 번째로 라이닝의 연결구조는 3차원적이거나 이음부의 힌지 거동을 고려한 2차원 거동으로 모사하였다. 세그먼트를 이용한 터널의 모델링 요소는 그림 3(a)에 보인바와 같이 세그먼트, 이음부, 그라우트 영역으로 나타내었다. 이 중 이음부는 누수가 집중되며 변위가 발생하는 영역이므로 모델링에 포함되어야 하며, 그라우트 영역은 지하수의 침투성을 결정하므로 수리거동을 모델링하는 중요한 요소가 된다.

이음부의 구조적 거동을 나타내기 위한 라이닝 이음부 모델은 라이닝의 구조적 거동은 모사 할 수 있지만 수리적 거동을 포함 할 수는 없기 때문에 그라우트 영역과 이음부의 수리적 거동을 포함하는 복합 모델링이 요구된다. 이에 따라 본 연구에서는 구조적 거동을 나타내는 빔 모델, 이음부와 라이닝, 그라우트의 수리적 거동을 표현하기 위한 Potts와 Addenbrooke(1996)가 개발한

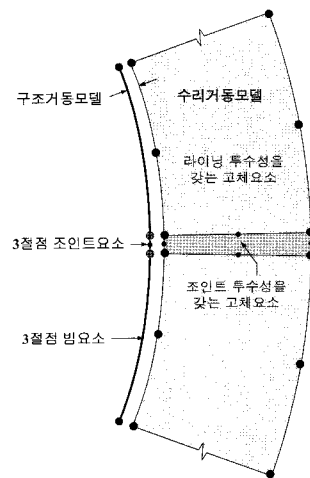
미소 보 요소 세그먼트 라이닝 모델을 채택하였고 그림 3(b)에 본 해석에서 사용된 세그먼트 모델을 나타내었다. 긴 3절점 보 요소 사이에 미소 보요소를 설치하여 이음부에서 열리고 닫힘을 모사하였다. 세그먼트 라이닝의 수리 거동은 매우 작은 투수계수를 설정함으로써 모사가 가능하고, 그라우트나 이음부에 대해서는 상대적으로 큰 투수성을 설정함으로써 이음부를 통한 수리 작용을 모사하였다. 이러한 모델을 사용함으로써 재료의 실제 투수계수를 사용한 상대투수성에 따른 수리 상호작용이 고려되도록 하였다. 미소요소는 이음부의 제약조건인 모멘트 한계 및 축력조건을 만족하도록 설정되어 이에 필요한 거동이 정의될 수 있도록 입력 파라미

터가 지정되어야 한다.

세그먼트 라이닝은 볼트 연결부에 순수 인장력이 작용할 경우 볼트가 늘어나 이음부가 벌어지는 거동을 보이기 때문에 모델링 시 이러한 거동을 모사할 수 있어야 한다. 볼트가 없다고 가정하면 세그먼트 접촉부에 발생하는 휨 모멘트(M)과 축력(N)은 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 본 해석 프로그램으로는 ICFEP(Imperial College Finite Element Program)이 사용되었다. ICFEP은 Imperial college의 Potts에 의해 개발되었고 지반-구조물 상호작용 문제에서 이미 신뢰할 수 있는 결과를 보여주었다 (Potts and Zdravkovic, 1999).

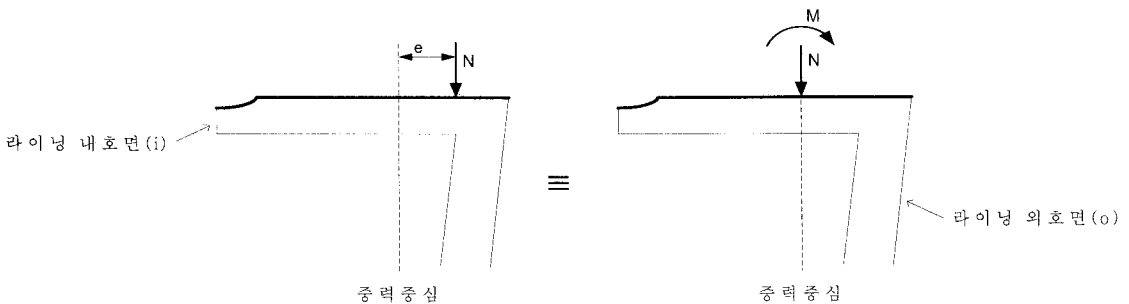


(a) 모델링 요소



(b) 미소 보 요소 라이닝 모델

그림 3. 세그먼트 라이닝의 모델링 요소



\* e : N이 작용할 때 M을 발생시키는 편심거리

그림 4. 세그먼트 라이닝 이음부에서의 휨 모멘트와 축력의 평형

### 3. 해석모델

#### 3.1 모델터널 및 지반파라미터

본 연구의 해석대상은 전력구 터널을 모델로 선정하였으며 본 해석에 사용된 모델은 그림 5와 같다. 지하수의 영향이 지반변위의 영향보다 광범위하게 미치는 특성을 고려하기 위하여 터널 좌우 150 m 범위를 모델링 영역으로 하였고, 지하수는 지표로부터 1.0 m 아래로 선정하였다. 터널은 TBM으로 굴착되고, 키 세그먼트를 포함하여 8개로 이루어진 세그먼트 라이닝으로 계획되었으며 허용 누수량을 설정한 비배수 터널로서 외경 6.88 m로 토피 30 m를 갖고 풍화암중에 위치한다. 터널이 위치하는 지역의 지반조사 결과로부터 얻어진 파라미터를 선형탄성 모델과 Mohr-Coulomb 모델을 사용하여 지반의 응력변형 거동 모델을 나타내었고, 지반의 투수성은 등방, 선형 조건으로 단순화하였으며, 해석파라미터는 서울 지하철 3, 4호선 지반조사보고서(1982)를 참조하여 설정하였다.

라이닝의 구조적 거동은 탄성 범으로 가정하여 나타내었고, 세그먼트 라이닝의 볼트 체결부 거동 모사를 위해 중립축간 거리 및 연결부에서의 최대압축응력을 설정하였다. 표 1은 세그먼트 라이닝의 모델 파라미터를 보인 것이다.

콘크리트 라이닝 투수계수는 시공균열, 시공 이음부 등을 모두 포함한 '제체 투수성'으로 정의되며, 본 해석에 사용된 세그먼트 라이닝의 투수계수는  $3.2 \times 10^{-6} \sim 7.68 \times 10^{-11}$  m/sec, 지반투수계수  $k_s = 3.2 \times 10^{-6}$  m/sec이다. 위 세그먼트 라이닝의 투수계수는 El-Dieb(1995)과 Neville(1995)의 연구결과에 비해 크지만, 유량을 기준으로 역산한 실제 콘크리트의 제체 투수성의 범주인 것으로 판단된다. 한편, 세그먼트 라이닝의 경우 누수는 이음부에 집중되므로 이음부의 투수성은 라이닝자체보다 현저히 클 수 있다. 본 연구에서 다양한 수리조건에 대하여 검토하고자 하였다. 라이닝 전반 열화의 경우 상대적으로  $k_l/k_s$ 의 값이 0.00001~1까지 라이닝 및 접합부의 투수성이 10만배 증가할 때의 상대투수 조건을 검토해 보았다. 또

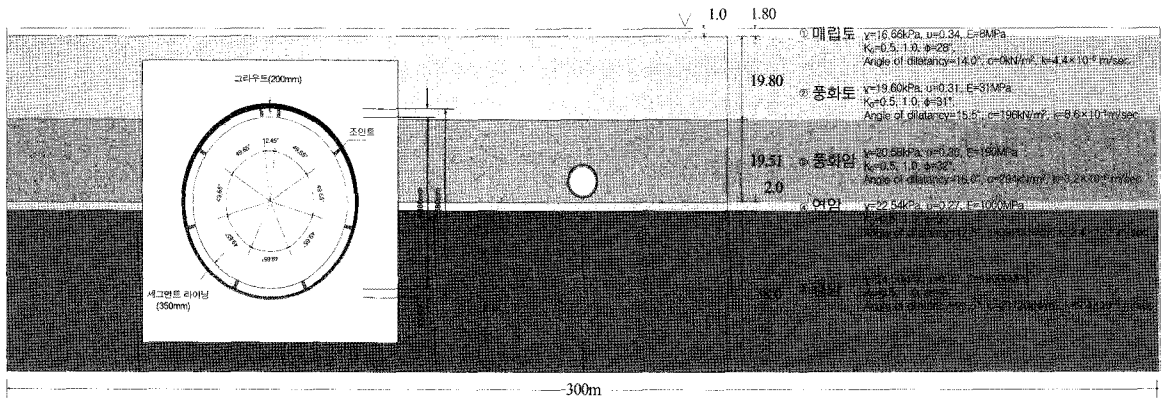


그림 5. 해석 단면

표 1. 세그먼트 라이닝 파라미터

Lining properties					
세그먼트 라이닝	Area (m <sup>2</sup> )	l (m <sup>4</sup> )	E (KN/m <sup>2</sup> )	$\nu$	$k_l$ (m/sec)
	0.35	0.003573	$2.94 \times 10^8$	0.2	$3.2 \times 10^{-6} \sim 3.2 \times 10^{-11}$
이음부 (Joint)	$\sigma_f$ (KN/m <sup>2</sup> )	y+ (mm)	y- (mm)	마찰각 (degree)	$k_j$ (m/sec)
	4,500	46.08	303.92	-	$3.2 \times 10^{-6} \sim 3.2 \times 10^{-11}$
그라우트	-	-	-	마찰각 (degree)	$k_g$ (m/sec)
	-	-	-	30	$3.2 \times 10^{-6} \sim 4.48 \times 10^{-13}$

주)  $\sigma_f$  : 최대 허용 압축응력, y+ : 라이닝 내측으로부터 중립축까지의 거리, y- : 라이닝 외측으로부터 중립축까지의 거리

한, 이음부 열화에 따른 누수특성(전반국부열화)의 경우 이음부의 라이닝 투수계수  $k_l=7.68 \times 10^{-11}$  m/sec로 하였을 때  $k_l/k_s$ 의 값이 0.000024일 때의 상대투수조건을 검토하였다.

### 3.2 해석 케이스

본 해석은 장기거동 해석에 속하므로 건설 당시의 내재적인 응력상태가 초기응력 및 변형 상태가 된다. 따라서 실제 건설과정을 포함한 해석을 먼저 수행함으로써 본 해석의 초기조건으로 설정하였다. 건설 중 굴착경계는 배수조건으로 하여 굴착속도를 고려하였고, 배수가 제어되도록 하기위해 라이닝 설치 후 라이닝 투수계수를 설정하였다. 8개의 세그먼트 터널을 대표단면으로 설정, 다양한 경우의 해석조건에 유입특성 및 누수특성을 고려하여 수리 상호작용에 대하여 조사하였다.

세그먼트 라이닝 해석은 라이닝 전반 열화와 이음부 열화(전반열화, 국부열화)에 따른 누수특성, 그라우트 보강 조건의 3가지 케이스로 나누어 해석하였다.  $k_s$ 는 지반 투수계수,  $k_l$ 은 라이닝 투수계수,  $k_g$ 는 그라우트 투수계수,  $k_j$ 는 이음부에서의 투수계수를 의미한다. 지반 투수계수는  $k_s=3.2 \times 10^{-6}$  m/sec로 설정하였고 라이닝 전반 열화에 따른 누수특성의 경우 라이닝 투수계수  $k_l$ 과 지반 투수계수  $k_s$ 의 비  $k_l/k_s$ 는 0.00001 ~ 1로 하여 라이닝 및 접합부의 투수성이 10만 배까지 증가할 때의 상대투수성을 해석하였다. 이음부 열화에 따른 누수특성은  $k_l/k_s$ 는  $1.4 \times 10^{-7}$  m/sec,  $k_j/k_l$ 의 상대투수성은 1 ~ 1000로 하여 상대투수성의 해석범위를 정하였다. 그라우트 보강 조건에 따른 해석의  $k_g/k_j$ 는 0.001 ~ 1 범위의 상대투수성 해석 범위를 설정하였다.

라이닝 전반열화조건은 전체의 배수기능이 저하되는 개념으로 실제 상황에서는 일어나기 어려운 경우이나 NATM 라이닝의 거동과 비교하기 위하여 고려되었다. 이음부 누수 조건은 이음부에 누수가 집중되는 경우로 가장 일반적인 누수형태에 해당한다. 그라우트 보강 조건은 열화 후 그라우트를 통해 누수제어 가능성을 모사하기 위하여 고려되었다.

## 4. 해석결과

전반열화해석은 라이닝의 열화현상이 일어남에 따른 토압, 간극수압, 휨 모멘트와 축력의 관점에서 분석·기

술하였고, 부분열화해석은 이음부에서의 누수조건, 즉, 이음부 전체열화와 한 지점에서의 국부열화에 대한 해석결과를 기술하였다. 마지막으로 그라우트 보강에 의한 유량제어 시뮬레이션 해석결과를 기술하였다.

### 4.1 라이닝 전반 및 국부 열화에 따른 거동 특성

그림 6은 세그먼트 라이닝의 열화로 인한 토압의 변화를 보인 것이다. 초기응력의 영향으로 터널 천단에서 인버트에 걸쳐 지반하중이 증가했음을 알 수 있다. 열화(투수성 증가)는 시간에 따른 변화를 의미하므로  $k_l/k_s$ 의 증가는 시간개념으로도 이해할 수 있다. 천단에서 인버트로 갈수록 토압은 증가하며 열화로 인하여 천단과 인버트에서는 토압이 약간 감소한 반면, 스프링라인에서는 약간 증가하는 경향을 보였다.

그림 7은 열화에 따른 간극수압의 분포를 보인 것이다. 열화현상이 진행되어 투수성이 증가됨에 따라 간극수압이 현저하게 줄어들음을 보인다. 이러한 해석결과는

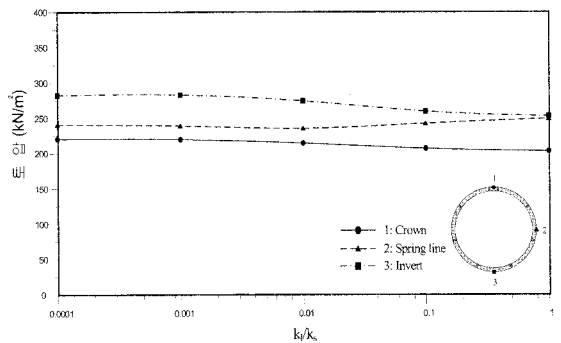


그림 6. 라이닝 전반 수리 열화에 따른 토압의 변화

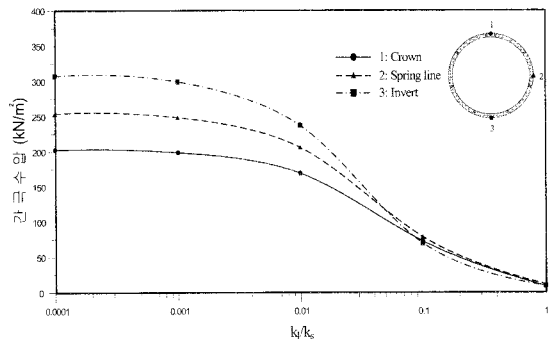
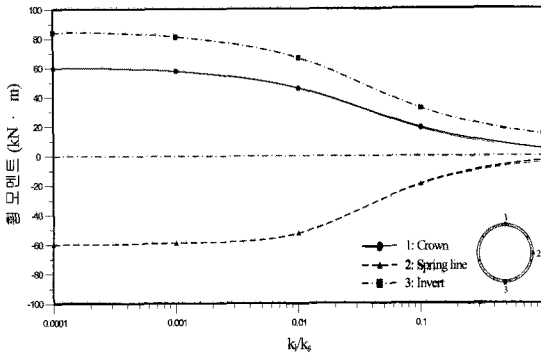
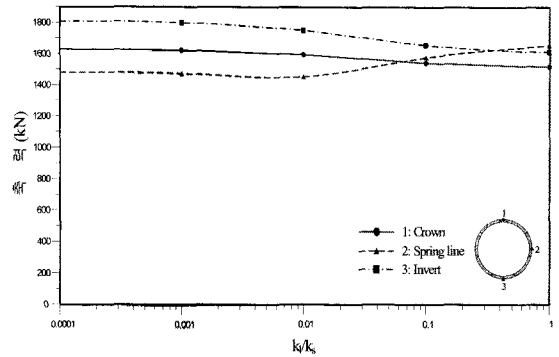


그림 7. 라이닝 전반 수리 열화에 따른 간극수압의 변화



(a) 열화에 따른 휨 모멘트의 변화



(b) 열화에 따른 축력의 변화

그림 8. 전반 수리 열화에 따른 라이닝 거동

시간에 따라 수리능력이 열화 되어 수압이 증가하는 NATM 해석결과(신중호 등, 2006)와 반대양상이며 이는 배수, 비배수 터널의 열화개념이 서로 상반되므로 해석결과와의 의미는 서로 잘 부합한다고 할 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 상대 투수계수비가  $1/1000 \sim 1/10$ 의 범위에서 수압 저하율이 현저하게 일어남을 보였으며 상대투수성이  $1/1000$  이하일 경우 수압에 미치는 영향은 무시할만하다.

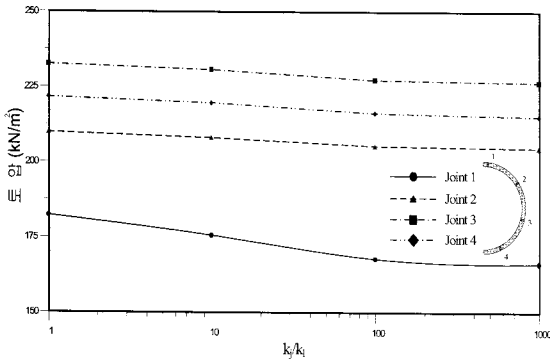
이 결과를 그림 6의 해석결과와 종합하면 간극수압이 감소한 만큼 유효응력이 증가하여 토압은 큰 변화가 없음을 확인할 수 있다.

그림 8(a)는 세 위치에서 열화에 따른 휨 모멘트 크기 변화를 나타낸 것이다. 모멘트 절대값의 크기는 ‘인버트 > 천단 > 스프링라인’ 순서로 나타났다. 천단과 인버트에서 휨 모멘트 크기는 감소하였지만 스프링라인에서는 모멘트가  $0.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 에서  $-60.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 까지 현저하게 변화하였음을 보였다. 해석결과 열화(투수성 증가)가 진행되면서 라이닝 전반의 구조적 부담이 다소 감소함을 보였다. 그림 8(b)는 세 위치에서의 축력변화를 보인 것이다. 천단과 인버트의 축력은 감소하나 스프링라인에서는 다소 증가함을 보였다. 라이닝에 발생한 응력은 휨 모멘트 응력과 축 응력의 합이다. 휨 모멘트로 증가되는 인장 축 응력은 압축응력에 의해 다소 줄어들 수 있으나 압축부의 응력은 축 응력만큼 더해지는데 이는 수리적 영향이라기보다는 초기응력의 차이에서 오는 것으로 이해된다.

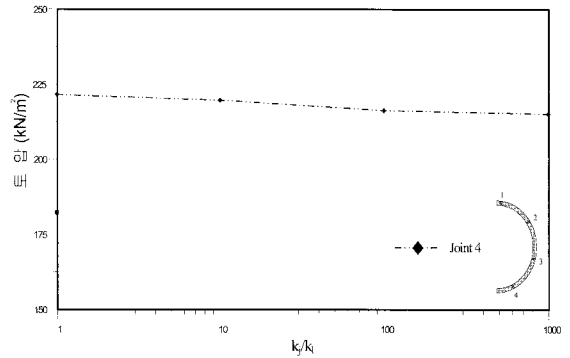
#### 4.2 이음부 전반 및 국부 열화에 따른 거동 특성

이음부에서의 열화특성은 두 개의 케이스로 나누어 해석하였다. 첫 번째로 8개 세그먼트 터널에 대하여 이음부를 포함한 8개 이음부의 전반열화(투수성 증가) 및 대칭열화를 모사하였는데 라이닝 전체 투수계수가 균일하게 변화하는 것으로 고려하였다. 두 번째는 1개의 이음부(Joint 4)에서만 열화가 발생하는 경우로서 국부열화 및 비대칭 열화조건을 모사한 것으로 8개 세그먼트 터널에 대하여 축력 하부 1개 이음부에서 투수계수가 증가(열화)하는 것으로 모사하였다. 상대투수계수 비  $k_1/k_0$ 는  $1.4 \times 10^{-5}$ 로 설정하였으며(라이닝 불투수 조건에 해당), 상대투수성( $k_1/k_0$ )의 범위는 이음부 투수계수가 라이닝의 1.0배에서 1000배까지 변화하는 것으로 고려하였다. 초기응력상태는  $K_0 = 0.5$ 로 설정하였고 건설 시 라이닝의 하중 분담율은 60%로 하였다. 해석결과는 연계해석으로써 동일한 조건에서 투수계수를 달리하여 수리적 정상상태에 이를 때까지 해석을 수행하였다.

그림 9는 이음부에서 열화(투수성 증가)에 따른 토압의 변화를 보인 것이다. 열화는 시간에 따른 변화를 의미하므로  $k_1/k_0$ 의 증가는 시간개념으로 이해할 수 있다. 그림 9(a)는 이음부 전반열화 해석결과로 터널 천단에서 토압은 가장 작게 나타났고, 라이닝 투수성이 증가함에 따라 천단, 스프링라인, 인버트 전 주면에서 약간 감소하는 경향을 보였다. 그림 9(b)는 이음부 국부열화 해석결과로 토압은 큰 변화는 없으나 약간 감소하는 경향을 보였다. 위 해설 결과를 통해 이음부 열화가 일어나도 토압의 변화는 거의 없음을 나타내었다.

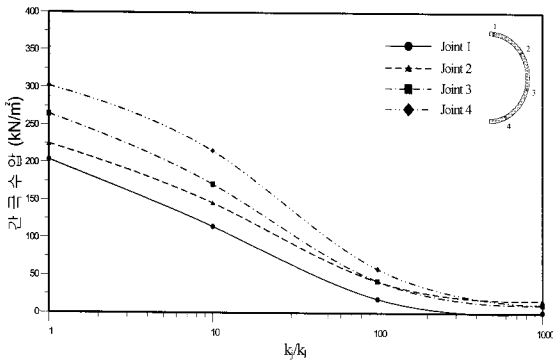


(a) 이음부 전반 열화

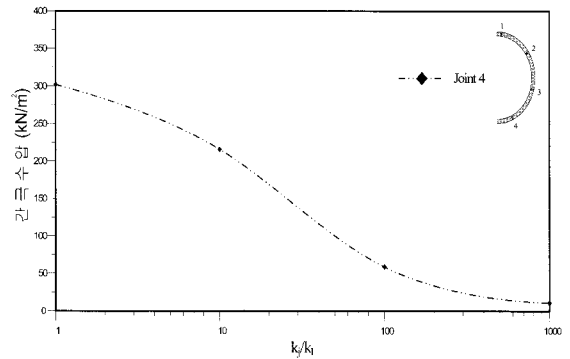


(b) 이음부 국부 열화(Joint 4)

그림 9. 이음부 전반 및 국부 열화에 따른 토압의 변화



(a) 이음부 전반 열화



(b) 이음부 국부 열화(Joint 4)

그림 10. 이음부 전반 및 국부 열화에 따른 간극수압의 변화

그림 10은 열화(시간)에 따른 간극수압의 변화를 보인 것이다. 이음부의 투수성 증가(열화)에 따라 모든 이음부에서 간극수압이 현저하게 줄어들음을 보인다. 터널 천단에서 인버트로 갈수록 간극수압은 증가하며 이음부 전반 열화와 국부 열화 모두 상대 투수 계수비( $k_g/k_l$ )가 10에서 100인 구간에서 수압이 현저히 감소하며 상대 투수 계수비( $k_g/k_l$ )가 1000일때 거의 0에 가까워졌다. 해석결과 비배수 터널은 열화로 인하여 투수성 증가로 터널 내 유입량이 증가함을 확인할 수 있었다.

#### 4.3 누수제어 그라우트 보강의 수치시뮬레이션

터널 시공 후 시간이 경과하여 세그먼트 라이닝 이음부의 전반 열화로 누수가 허용규정을 초과하여 그라우트 재 주입을 실시하였을 때 누수제어가 가능한지의 여

부를 시뮬레이션 하였다. 이는 그라우트 영역의 투수계수를 저감시키는 연계해석으로 모사가 가능하다. 그라우트 주입으로 인한 유량제어 시뮬레이션은 연계해석을 이용하여 일정기간동안 라이닝 투수계수를 증가시켜 열화 시킨 후, 주입에 따른 투수성 감소는  $k_g/k_l$ 를 1에서 0.001까지 케이스를 4단계로 감소시키며 해석을 수행하였다. 투수성의 저감이 보강수준 혹은 주입 압의 증가와 상관되므로 각 해석 케이스는 주입시공의 진행과정으로도 이해할 수 있으며, 추가 시간해석을 수행함으로써 차수보강의 수리적 영향을 고려하였다.

그림 11은 이음부 전반열화 후 그라우트 재 주입을 시뮬레이션 한 결과를 보인 것으로 자연로그 그래프에서 투수계수가 감소함에 따라, 유량은 2차 포물선형으로 감소함을 보였다. 차수 보강 전( $k_g/k_l = 0.1$ ) 단위 유입

량이  $5 \ell/m^2/100 \text{ m/day}$  이었지만 보강 후  $k_g/k_f$ 는 0.1에서 2.0으로,  $k_g/k_f$ 는 0.01에서 0.6으로 감소함을 보임에 따라 지수 혹은 차수 그라우트의 효용성을 시뮬레이션 할 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 12는 라이닝 설치 후 열화와 그라우트 주입의 1회 반복주기에 대한 수치해석결과를 보인 것이다. 터널 라이닝 설치 후 유입량은 감소하지만 시간이 지남에 따라 이음부 누수와 같은 구조물의 열화가 진행되어 유입량은 다시 증가하였다. 그러나 그라우트 재 주입 시 유입량은 크게 감소함을 볼 수 있다. 이와같은 해석결과 비배수 터널의 열화는 투수성의 증가로써, 주입은 투수성의 감소로써 연계해석을 통한 수치적 모사가 가능함을 보였다.

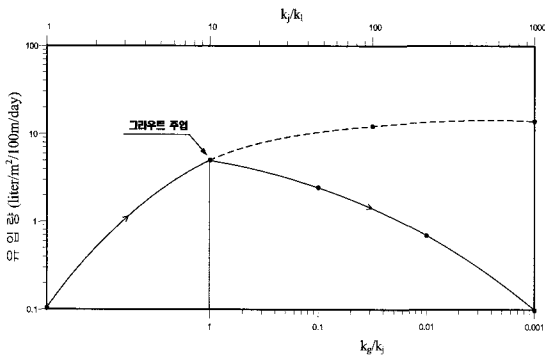


그림 11. 그라우트 효과의 시뮬레이션

## 5. 수치해석 결과의 지반공학적 의의 고찰

세그먼트 터널은 일반적으로 허용누수량을 설정한 비배수 터널로 건설되며, 비배수 터널의 허용 누수기준은  $1 \ell/m^2/100 \text{ m/day}$ 이다. 허용누수량 기준을 만족하기 위하여 ‘그라우트-라이닝-이음부’의 평균투수계수는 안전을 미 고려 시 약  $1 \times 10^{-11} \text{ m/sec}$  이하로, 안전율을 3으로 고려 할 경우 약  $2.56 \times 10^{-11} \text{ m/sec}$  이하로 제어되어야 함을 의미한다. 콘크리트의 일반적인 투수계수 범위는  $1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-11} \text{ m/sec}$  이며(Neville, 1995), 라이닝 투수계수는 품질관리를 통해 저감이 가능하므로 이에 대한 품질관리 기준을 설정하여 운영 가능하다.

또한 이 해석 결과를 통해 라이닝 이음부가 외부로 벌어지는 인장거동에 대비한 세그먼트 조립, 모서리 파손 시 세그먼트 교체시공 및 그라우트 밀실주입 등의 품질관리 기준으로도 활용 가능하다. 특히, 그라우트와 투수계수 관계 파악을 위한 시험시공을 실시하면 그라우트 보완 시공 시 허용누수량 기준에 부합하는 투수계수를 설정하여 시공관리에 활용할 수 있다.

Fernandez(1994)의 라이닝 균열폭과 라이닝 평균투수계수 관계식을 이용하여 누수량-균열의 점선변형을 관계 파악이 가능하다. 그가 제시한 관계식은 다음과 같다.

$$k_l = \alpha \cdot \epsilon_{\theta_l}^3 \quad (1)$$

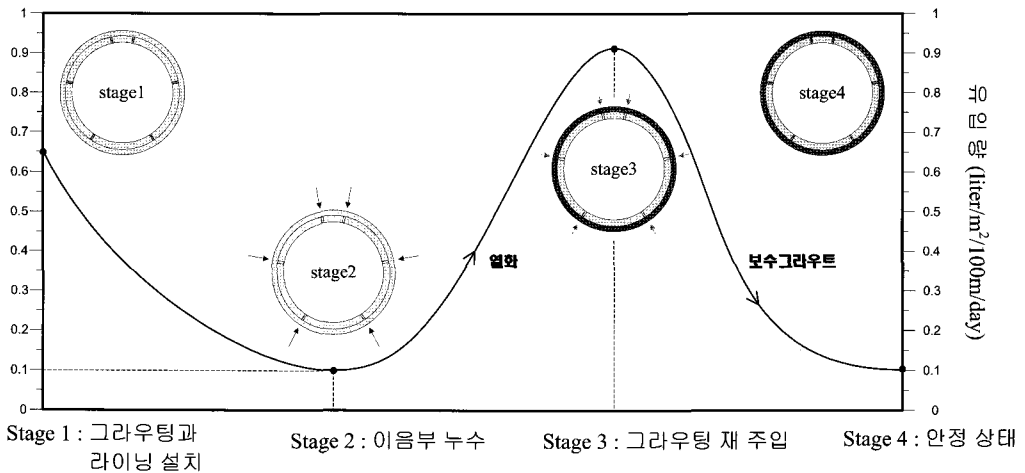


그림 12. 수리 열화와 그라우트 재 주입 사이클(log scale)



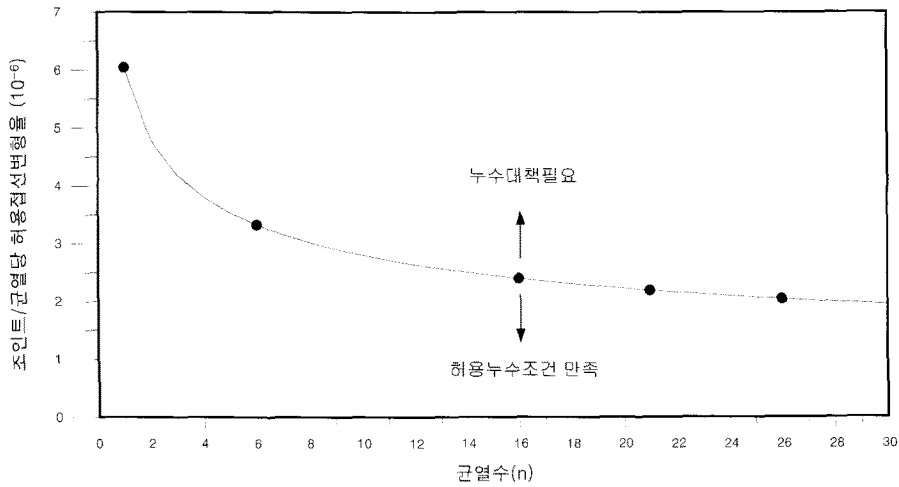


그림 13. 이음부 균열수의 변화에 따른 허용 누수량

$$\alpha = \frac{\gamma_w}{12\mu} S^2 \quad (2)$$

식 (1)과 (2)는 투수계수와 점선변형을 관계를 나타낸 식으로 여기서  $\gamma_w$  : 물의 단위중량,  $\mu$  : 물의 동 점성계수( $1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ ),  $S$  : 균열 간 평균 간격,  $\epsilon_{\theta l}$  : 라이닝 점선변형율,  $k_f$  : 라이닝 투수계수를 나타낸다. 세그먼트 자체의 균열은 무시 가능하므로 근사적으로 세그먼트 간격을 균열 폭으로 한다. 라이닝 세그먼트는 완전 비배수조건을 만족하고 누수량-투수계수-점선변형률 관계로부터 변형률 산정이 가능하며 허용누수량 기준을 만족하는 라이닝 평균투수계수가  $2.56 \times 10^{-11} \text{ m/sec}$  일 때의 이음부 및 균열 1곳 당 허용 점선변형율은  $\epsilon_{\theta l}$ 로 나타낼 수 있다.

이음부를 제외한 라이닝이 비배수 조건에 가깝다면 이음부 1곳 당 허용 점선 변형율이  $\epsilon_{\theta l}$  이상이 되면 누수 제어 대책이 필요하다. 그러므로 변형율이 파악되면 이음부 및 균열 발생부에 변형계이지 등을 부착, 측정하여 허용 점선변형율을 초과하는 경우 유입량 사전예측 및 보완 그라우트 여부를 판정 가능할 수 있다. 수치해석결과를 이용하여 균열 개수와 허용 점선변형률의 관계를 도시하면 그림 13과 같이 반비례 관계로 나타내어진다. 만약 이음부 균열수에 대해 점선변형률 값이 그래프 아래 위치한다면 허용누수조건보다 낮아 허용누수조건을

만족한다. 그것은 누수 조절의 관점에서 보면 터널 운영의 안전율을 만족하고, 점선변형률 값이 그래프 위에 위치한다면 누수대책이 필요하다는 것을 의미한다.

## 6. 결론 및 고찰

본 연구에서는 세그먼트 라이닝의 수리 상호작용을 조사하였다. 해석결과로 세그먼트 터널과 지반 간 수리 상호작용 메커니즘을 확인하였을 뿐 아니라 시공 중 라이닝 투수성 품질관리 및 운영 중 누수관리의 기준을 설정하는데 활용할 수 있음을 보였다.

본 연구에 대한 주요 결론은 다음과 같다.

1. 이음부 열화는 토압을 미소하게 감소시키며, 열화가 진행됨에 따라 이음부에서 유입량이 크게 증가하고 간극수압은 현저히 감소하였다.
2. 이음부 열화 시 라이닝의 이음부가 외부로 벌어지는 인장변형 상태에서 누수 집중되었으며, 이음부의 인장거동에 대비한 세그먼트 조립 시 품질관리 및 그라우트 밀실 주입이 필요하다.
3. 그라우트 재주입시 투수계수가 감소함에 따라 유량은 자연로그 그래프에서 2차 포물선형으로 감소하였다.
4. 누수량-투수계수-점선변형률 관계로부터 허용 변형률을 만족하는 변형률기준이 산정 가능하며, 이를 계

측하여 라이닝의 누수제어 및 라이닝의 열화 정도를 파악 가능하다.

5. 허용누수량기준을 만족하기 위하여 ‘그라우트-라이닝-이음부’의 평균투수계수는  $1.5 \times 10^{-11}$  m/sec 이하로 제어되어야 한다.
6. 상대 투수계수비와 유입량 관계를 이용하여 라이닝의 품질관리 및 배수시스템 용량 산정의 정확도를 높일 수 있으며, 진단 시 수치 해석적 시뮬레이션으로 적절한 보수·보강 방안을 선정할 수 있다.

## 감사의 글

본 논문은 한국과학재단의 지반-구조물-지하수 상호작용 이론에 기초한 지속가능한 스마트(smart) 지반배수시스템 연구(R01-2008-000-20109-0)로 연구되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 동아지질 반석건설 한국에스이씨(주) (1997), “SEGMENT”, 토목기술자를 위한 실드 기술자료(4).
2. 신중호, 권오엽, 양유홍, 주은정 (2006), “배수시스템 수리기능저하가 터널구조물에 미치는 영향에 대한 실험적 연구”, 한국지반공학회 정기학술대회 논문집, pp. 970-979.
3. 신중호, 신용석, 안상로, 박동인 (2006), “지하수-터널 수리상호작용에 따른 터널의 장기거동 연구”, 한국지반공학회 정기학술대회 논문집, pp. 239-248.
4. 이인모, 박영진, 최상순 (2001), “물리적 폐색으로 인한 흙 필터의 투수능 저하”, 한국지반공학회 논문집, 제 17권, 제 1호, pp. 15-24.
5. 社團法人 日本トンネル技術協会 (1985), 鐵道シールドトンネルの漏水對策に關する調査研究報告書.
6. El-Dieb, A. S. (1995), “Water-permeability measurement of high performance concrete using a high-pressure triaxial cell”, Cement and Concrete Research, Volume 25, Issue 6, August 1995, Pages 1199-1208.
7. Fernandez, G. (1994), “Behavior of Pressure tunnels and guidelines for liner design”, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 10, pp. 1768-1778.
8. Neville, (1995), Properties of Concrete, 4th edition, Longman (publ).
9. Potts, D. M. and Addenbrooke, T. I. (1996), “Twin tunnel construction - ground movements and lining behaviour”, Int. Sym. on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, London, pp. 441-446.
10. Potts, D. M. and Zdravkovic (1999), “Finite element analysis in geotechnical engineering: Theory”, Thomas Telford, London.
11. Seoul Metro Corporation (1982), Geological and Geotechnical Site Investigation Report for the Seoul Subway Lines 3 and 4.

접수일(2009.5.7), 수정일(1차: 2009.5.11), 게재확정일(2009.5.15)