

# 숏크리트 라이닝 층간 부착성이 라이닝의 하중지지력에 미치는 영향

## Effect of Shotcrete Lining Adherence on Load Carrying Capacity of Lining

유충식<sup>1</sup>, 김선빈<sup>2</sup>, 배규진<sup>3</sup>, 신희성<sup>4</sup>

Yoo, Chung-Sik • Kim, Sun-Bin • Bae, Gyu-Jin • Shin, Hyu-Soung

### Abstract

This paper concerns the effect of lining interface adherence on the lining's load carrying capacity. A series of reduced scale laboratory tests and finite element analyses were carried out with the aim of gaining insight into the effect of shotcrete lining adherence on the load carrying capacity of double shell lining. The results indicated among other things that the load carrying capacity of a double shell tunnel is significantly affected by the adherence between layers. Also revealed was that for cases with low lining layer adherence stress concentration may occur due to relative movement between the lining layers with this trend being more pronounced with increasing tunnel cover depth. Practical implications from the results of this study are discussed in great detail.

**Keywords:** Tunneling, shotcrete lining, reduced-scale laboratory model test, adherence, finite-element analysis

### 요지

본 논문에서는 숏크리트 라이닝 층간 부착성이 숏크리트 라이닝의 하중지지력에 미치는 영향에 대한 내용을 다루었다. 이를 위해 축소 모형시험과 유한요소해석을 병행하여 더블쉘 터널 시공시 숏크리트 층간 부착성과 숏크리트 라이닝의 하중지지 특성과의 관계를 알아보았다. 연구결과 NATM의 더블쉘 구조와 같이 라이닝 층간 부착이 확보되지 않는 경우에는 이완하중 작용시 응력이 집중되는 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 토파고 증가에 따라 그 차이가 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구결과를 종합하여 설계와 시공시 고려하여야 할 주안점을 제시하였다.

**주요어:** 터널시공, 숏크리트 라이닝, 축소모형실험, 부착성, 유한요소해석

### 1. 서론

현재 적용되고 있는 NATM 공법에서는 숏크리트 라이

닝과 2차 라이닝 사이에 포설되는 방수막 때문에 부착성이 확보되지 않아 더블쉘 개념의 구조를 가지고 있으며 주 지보재인 숏크리트 라이닝과 롤볼트에 대해서는 내구성에 관한 기준이 없고 영구 지보재로서의 역할을 기대

\*1 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수 (csyoo@skku.edu)

2 비회원, 성균관대학교 토목환경공학과, 대학원

3 정회원, 한국건설기술연구원, 지반연구부 연구위원

4 비회원, 한국건설기술연구원, 지반연구부 선임연구원

하는 것은 어렵다. 이러한 관점에서 NATM에서는 혼장타설 콘크리트 라이닝을 추가로 설치하고 필요시 철근보강까지 시행하므로 솗크리트와 록볼트는 임시지보재로, 2차 복공인 콘크리트 라이닝을 구조체로 보는 것보다 타당하다는 견해가 일반적이다. 즉, 기존 NATM에 있어서의 솗크리트 및 록볼트 등의 지보는 재료의 불균질성이나 부식 등의 불안한 요인을 지니고 있어 영구 구조물로서의 신뢰성이 불확실하다는 전제하에 콘크리트 라이닝의 2차 복공이 설치되고 있다(Kovari, K., 1995).

1980년대 유럽을 중심으로 고품질의 솗크리트와 록볼트를 터널의 영구 지보재로 활용하여 별도의 2차 라이닝을 타설하지 않는 싱글쉘 터널 공법의 개념이 적용되고 있다. 싱글쉘 터널은 고성능, 고내구성의 지보재를 활용함과 아울러 솗크리트를 다층으로 타설하고 지보재와 지반을 일체화시킴으로써 솗크리트 라이닝(이하 라이닝이라 칭함) 층간 상호간에 전단력이 전달될 수 있게 하여 역학적으로 유리한 구조를 확보하는데 그 초점이 맞추어져 있다. 이와 같이 싱글쉘 터널과 같이 전단력이 전달되는 단일구조는 역학적으로 유리하며 더블쉘 터널에서 적용되고 있는 2차 라이닝을 생략할 수 있으므로 시공비를 절감할 수 있다는 장점이 있는 것으로 알려져 있다. 즉, 싱글쉘 터널에서 다층의 라이닝은 임시지보재가 아니라 영구 지보재로 활용하는데 기존의 더블쉘 터널과 가장 큰 차별성이 있다고 할 수 있다. 우리나라에서도 싱글쉘 터널 공법의 도입을 위해 솗크리트 재료적 관점에서 그리고 공법 도입을 위한 기초 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다.

싱글쉘 터널 공법에서는 앞서 언급한 바와 같이 지보 및 복공의 부재로서 고성능(고강도 및 고내구성) 솗크리트 등이 시공되고, 라이닝 층에 방수시트 등을 설치하지 않음으로써 이완하중 발생시 라이닝 층이 일체화된 구조체로서 거동하도록 하는데 그 기본적인 개념을 두고 있다. 따라서 싱글쉘 구조 역시 솗크리트 라이닝은 다층으로 시공되나 솗크리트의 고강도화, 섬유에 의한 보강 등에 의해 고품질화를 꾀하고 휨에 대한 저항과 동결 윤해 저항성 등을 향상시키며 급결제의 첨가량을 최소한으로 억제하여 솗크리트의 장기 내구성 확보 및 솗크리트 각 층의 층간 부착력을 확보함으로써 각층을 일체구조로 하는 것이 매우 중요하다. 또한 싱글쉘 구조의 라이닝 구조체는 임시지보재가 아니라 영구지보재로 간주한다는데 기존의 더블쉘 터널 공법과 가장 큰 차별성이 있다고 할 수 있으며, 이는 솗크리트 라이닝과 록볼트의 고성능화가 전제되어야 한다(Norwegian Urban Tunnelling, 1995). 그림 1에서 더블쉘 구조 NATM 터널과 싱글쉘 터널의 구조를 비교하여 보이고 있다.

본 논문에서는 싱글쉘 터널 공법의 적용성 검토를 위한 기초 연구로서 솗크리트 라이닝(이하 라이닝이라 칭함) 간의 부착성 확보여부가 라이닝의 하중지지력에 미치는 영향에 대해 고찰하고자 하였으며, 이를 위하여 실내 축소모형실험과 유한요소해석을 수행하였다. 실내 축소모형실험에서는 라이닝간 부착성 확보여부에 따른 라이닝 하중지지력 변화에 대한 정성·정량적인 경향을 도출하였다. 한편, 검증된 유한요소해석모델을 이용하여 다양한 조건에 대한 매개변수연구를 수행하였다.

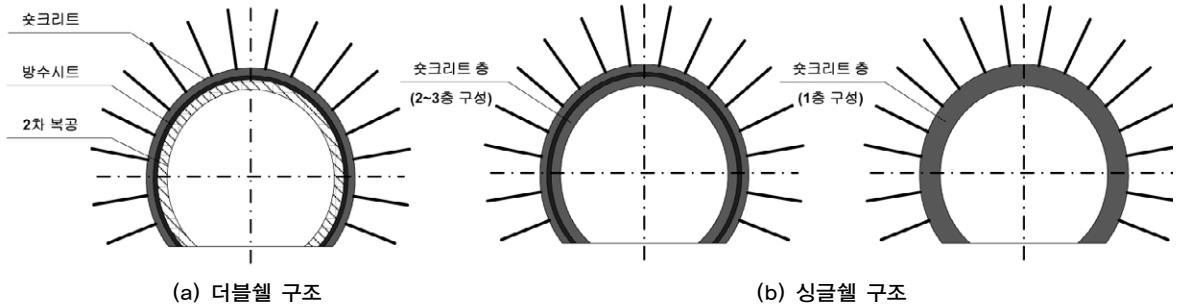


그림 1.1 싱글쉘 vs. 더블쉘 터널

## 2. 실내 축소모형실험

### 2.1 모형실험장치 및 방법

그림 2.1~2.3에서는 본 연구에서 사용한 터널모형 실험장치를 보여주고 있다. 그림 2.1에서 보이는 바와 같이 사용한 토조는 1,800mm □ 780mm □, 200mm (가로□세로□높이)의 크기로서 토조내 지반조성 및 상재하중 재하

시 측면 변형 (배부름)이 없도록 30mm 두께의 아크릴판으로 제작하였으며 터널전면판과 상부 반력판에는 프레임을 설치하여 벽체의 흡연형이 억제될 수 있도록 하였다.

한편, 본 실험에서는 터널 측벽부 하부에 경암 이상의 견고한 암반이 형성되어 있으며 반원의 직경 200mm의 터널이 시공되는 경우를 고려하였다. 본 연구에서는 라이닝이 1, 2차로 나누어 타설되는 경우를 고려하여 외경 200mm의 원통형 아크릴을 이용하여 총 두께  $t=10\text{mm}$

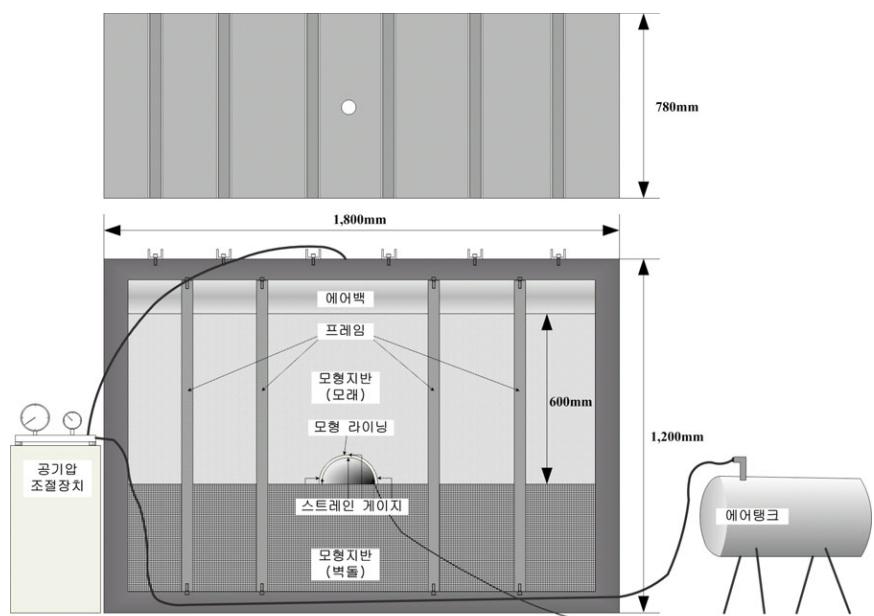


그림 2.1 축소 모형실험장치 개념도

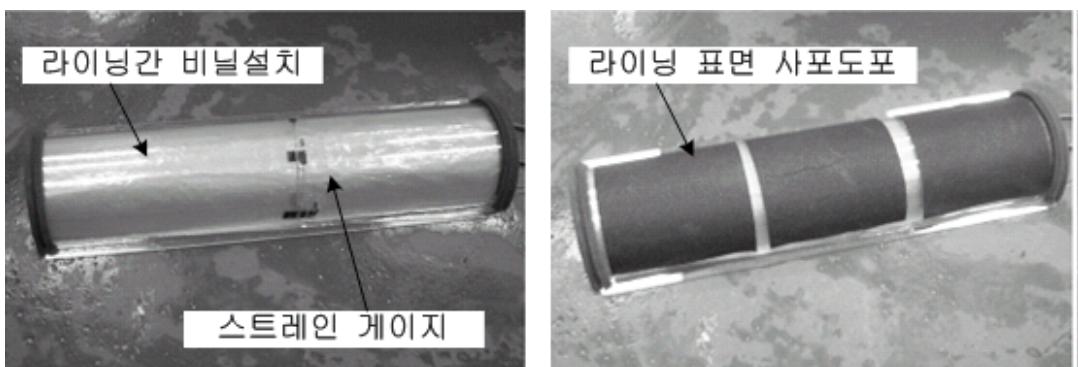


그림 2.2 스트레이인게이지가 부착된 모형 터널라이닝(라이닝간 부착 미확보)

라이닝을 모사하였으며 라이닝의 부착성은 ‘완전부착’과 ‘완전분리’의 두 가지 조건을 고려하여 완전분리조건에서는  $t=5\text{mm}$ 의 모형라이닝 사이에 멤브레인을 설치하였으며, 완전부착조건에서는 두께  $10\text{mm}$ 의 일체화된 모형라이닝을 사용하여 모사하였다.

본 실험은 시공 완료후 이완하중 작용시 라이닝 부착성의 영향을 관찰하기 위해 모래로 조성된 두께  $600\text{mm}$  모형지반 상부에 에어백(공압)으로 상재하중 작용시켰으며 터널 하부지반은 견고한 암반으로 간주하여 벽돌을 쌓아 아크릴판으로 바닥부 처리를 하였다. 한편, 모형지반과 라이닝 외벽사이에는 부착이 충분히 확보된 것으로 간주하여 라이닝 외부의 마찰을 크게 하기 위하여 사포로 표면처리를 하였다. 아울러, 터널 라이닝의 평면변형 상태를 유지하기 위하여 벽체와 라이닝 사이에는 마찰을 최소화하도록 건설 마감재료인 문풍지를 설치하여 모래

의 유실을 방지하되 충분한 미끄러짐이 가능하도록 하였다(그림 2.2).

실험중 계측은 하중재하시 라이닝 천단, 좌 우측벽 내외부에 스트레이인게이지(AP-11-S80N-120-EL, gage length :  $8\text{mm}$ , resistance :  $120\text{ohm}$ )를 부착하여 라이닝에 유발되는 변형율을 측정하였다(그림 2.2). 그림 2.3은 모형터널 시공 완료후 공압재하 직전의 모습을 보여주고 있으며 그림 2.4는 축소 모형실험의 과정에 대하여 정리하고 있다.

## 2.3 결과 분석

그림 2.5~2.9는 상재하중  $10\text{kPa} \sim 30\text{kPa}$  재하 단계에서의 각 실험조건에 대해 라이닝의 지점별 변형률을 나타내고 있다. 여기서 완전부착의 경우 라이닝이 일체

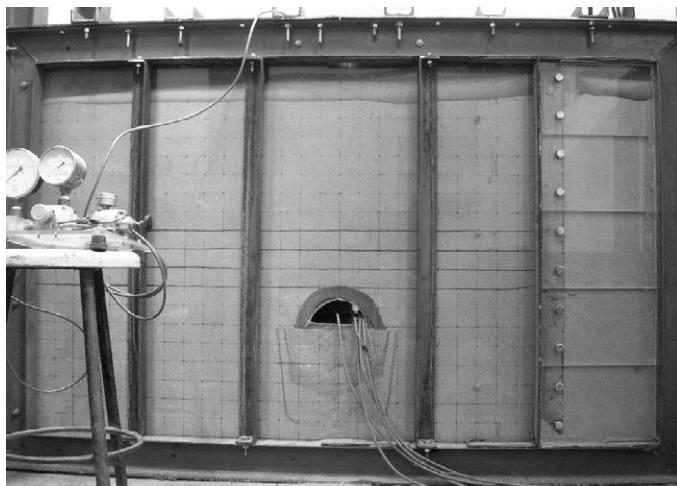


그림 2.3 축소 모형실험장치 전경

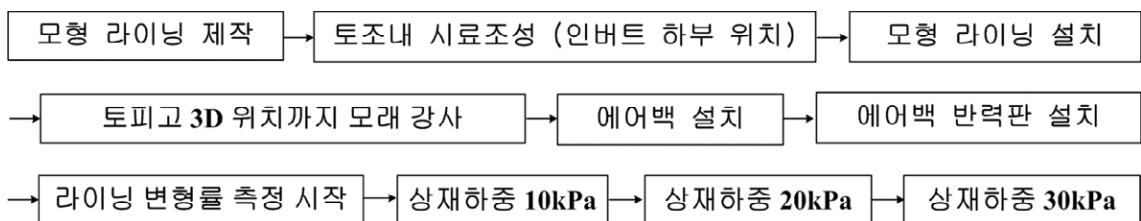


그림 2.4 축소모형 실험 과정

화되어 있어 1차층의 라이닝의 변형률은 외벽에 설치된 스트레인케이지로부터, 2차층 라이닝의 변형율은 내벽에 설치된 스트레인케이지로부터 계측을 수행하여 정리한 것이다.

이 그림에서 관찰할 수 있는 몇 가지 특이사항은 다음과 같이 요약된다. 먼저, 완전분리조건, 즉 라이닝 층간의 부착성이 확보되지 못한 경우 위치에 관계없이 1, 2차층 라이닝 전반에 걸쳐 임의 하중에 있어서 부착성이 확보된 완전부착조건보다 변형율이 최대 20%이상 크게 발생하는 것으로 나타났다. 한편, 부착성이 확보된 경우는 천단 및 측벽부 변형율이 유사하게 나타나고 있어 응력분배가 효율적으로 이루어짐을 알 수 있으나 완전분리의 경우 천단부에 비해 측벽부에서 변형율이 최대 두 배 이

상 크게 발생하는 것을 알 수 있어 라이닝 층간 부착성 확보여부는 하중 분배에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 즉, 완전부착의 경우 1차층과 2차층에서는 천단과 측벽 모든 지점에서의 변형률이 거의 유사한 것으로 나타나 라이닝에 작용하는 하중이 라이닝 각 지점에 균일하게 전달이 된 것으로 파악할 수 있으나, 완전분리의 경우 경우의 라이닝 변형률은 재하하중이 10kPa인 경우에서도 천단과 측벽에서의 변형률 차이가 2~3배 정도까지 발생하는 것으로 나타났다. 특히 완전분리의 경우 2차층의 라이닝 변형률이 각 지점별로 현저하게 차이가 나타나고 있으며, 측벽부에서 보이듯이 특정지점에서 라이닝 응력이 집중되고 있음을 볼 수 있다.

따라서 실험결과에서 나타나는 현상은 라이닝 층간 부

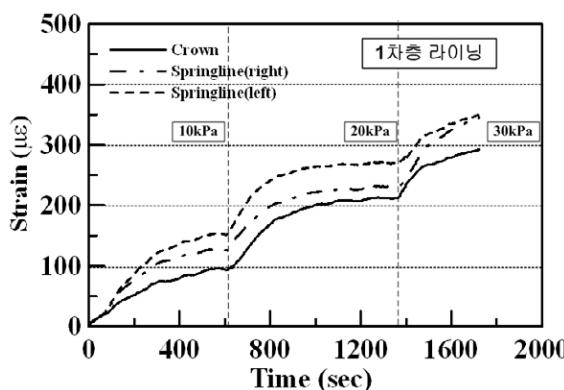


그림 2.5 라이닝 지점별 변형률-완전분리조건

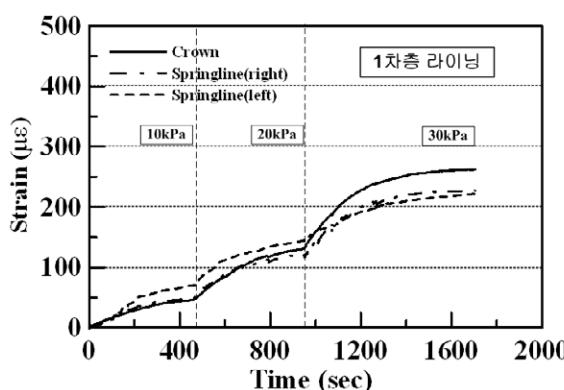
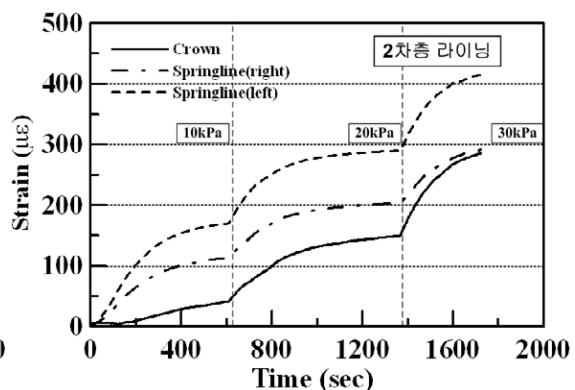
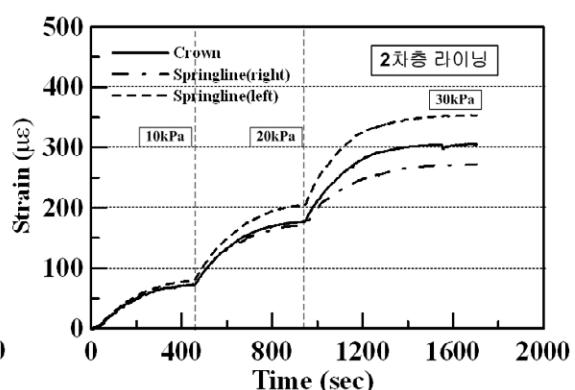
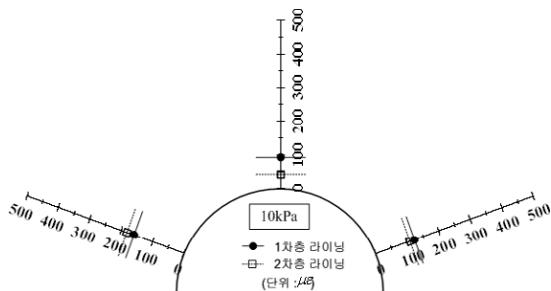


그림 2.6 싱글쉘 라이닝 지점별 변형률-완전부착조건

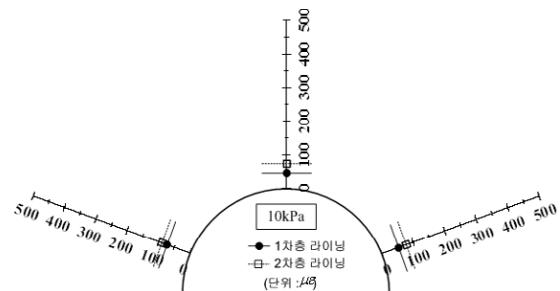


착성이 확보되지 못할 경우 라이닝 각 층간 전단력이 제대로 전달되지 못하여 하중분배가 비효율적으로 이루어져 특정부위에 응력이 집중되었기 때문에 판단된다. 이에 근거할 때 라이닝 부착성 확보여부가 라이닝의 하

중지지 능력에 매우 큰 영향을 미치는 중요한 인자인 것으로 판단되며 따라서 싱글쉘 공법의 적용시 라이닝 층간 부착성 확보를 위한 시공관리가 매우 중요할 것으로 판단된다.

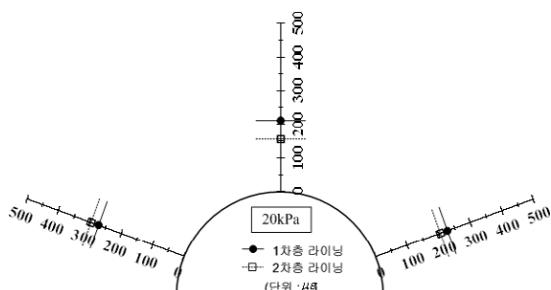


(a) 완전분리

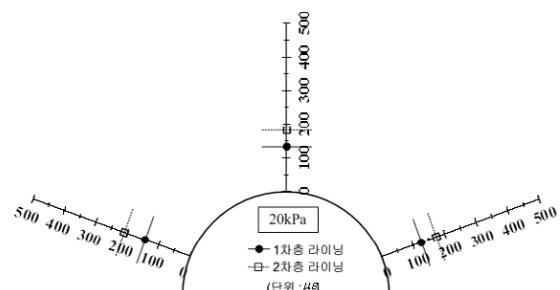


(b) 완전부착

그림 2.7 라이닝 지점별 변형률 (하중재하 10kPa)

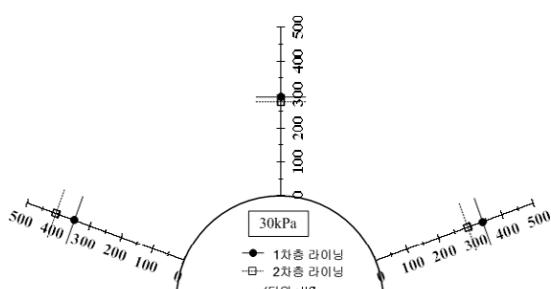


(a) 완전분리

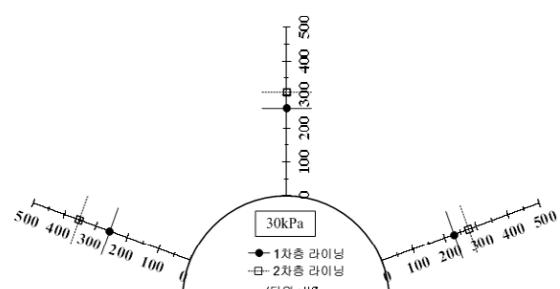


(b) 완전부착

그림 2.8 라이닝 지점별 변형률 (하중재하 20kPa)



(a) 완전분리



(b) 완전부착

그림 2.9 라이닝 지점별 변형률 (하중재하 30kPa)

### 3. 유한요소해석

유한요소해석은 실내모형실험에서 관찰된 내용을 토대로 보다 다양한 지반/암반 조건에서의 라이닝 층간 부착성의 영향을 고찰하기 위해 가상의 시공조건에 대한 매개변수 연구를 수행하였다.

#### 3.1 해석조건

본 해석에서는 그림 3.1에서 보이는 바와 같이 직경 10m의 터널을 고려하였으며 토피고 3D와 7D인 시공조건을 대상으로 하였다. 해석대상 암반은 RMR값을 기준으로 분류한 암반등급 III, IV, V인 조건을 설정하였으며, 아울러 각 암반등급의 역학적 특성치는 각종 터널설

계 사례를 토대로 평균적인 수치를 적용하였다 (표 3.1)

숏크리트 라이닝은 유럽 및 일본에서 위 조건과 유사한 지반조건에서 싱글쉘 터널 공법이 적용되는 경우 지보재 선정 사례조사 결과를 토대로 두께 10cm인 숏크리트가 1, 2차에 나누어 시공되고 4m 길이의 록볼트가 1.5m 간격으로 설치되는 것으로 간주하였다(N.R. Barton, 1998). 본 해석에 있어서도 1, 2차 라이닝의 완전부착 및 완전분리 두 가지 조건을 고려하여 시공 완료 후 이완하중 작용시 라이닝 부착성에 따른 하중지지력 비교에 주안점을 두고 해석을 수행하였다.

#### 3.2 해석 모델링

본 해석에서는 범용 유한요소해석 패키지인 ABAQUS 6.5를 사용하였으며 (ABAQUS users manual 2005), 앞서 언급한 바와 같이 해석조건은 터널 시공후 이완하중 작용시를 대상으로 하였으며 대상 모델이 터널 중심축으로부터 좌우 대칭인 점을 고려하여 우측 반단면에 대한 모델링을 수행하였다. 경계조건의 설정에 있어서 터널 중심으로부터 약 6D (D=터널직경)의 거리에 측면 경계면을 위치시켜 수평방향으로의 변위를 구속하였으며 터널 바닥으로부터 약 1.0D 하부에 하부 경계를 위치시키고 롤러를 설치하여 연직방향의 변위를 구속하였다.

재료 모델링에 있어 해석 대상 지반은 Mohr-Coulomb 항복규준을 따르는 비연계 (non-associated) 탄소성 재료로 간주하였으며 숏크리트 라이닝과 록볼트는 탄성 재료로 가정하였다. 지반 및 지보재의 이산화에 있어서 지반과 라이닝은 4절점 고체요소 (CPE4)를 적용하였다. 라이닝 층간의 부착성에 대한 모사는 ABAQUS 6.4에서

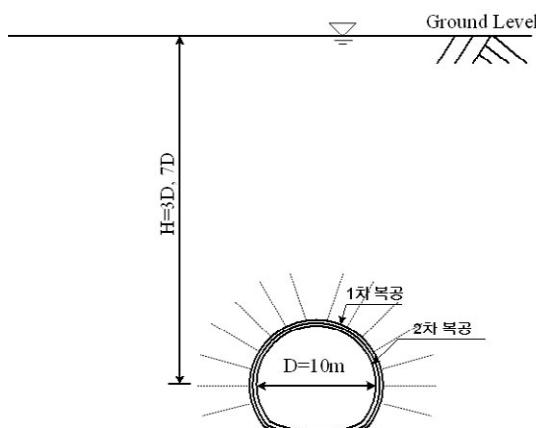


그림 3.1 해석 조건

표 3.1 해석에 고려된 지반 및 지보재 역학적 특성

구 분	점착력 $c'$ (kPa)	내부마찰각 $\phi'$ (deg)	팽창각 $\psi$ (deg)	단위중량 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	변형계수 $E$ (GPa)
암반등급 III	100	35	6	25	0.5
암반등급 IV	150	38	6	25	1.0
암반등급 V	200	40	6	25	2.5
숏크리트	-	-	-	25	15.0
록볼트	-	-	-	-	200.0

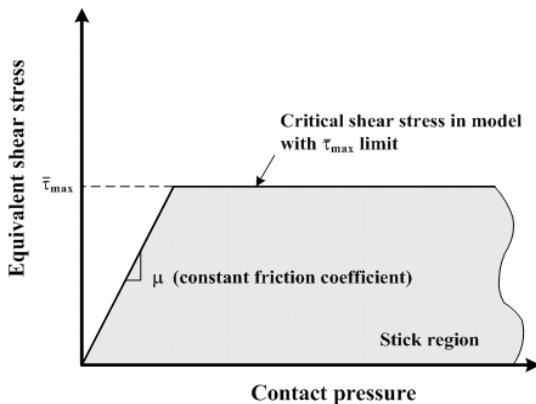


그림 3.2 Coulomb Friction 모델 개념도

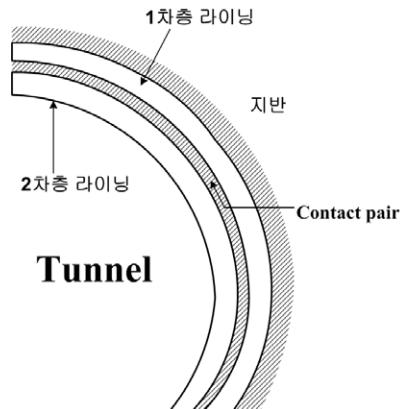


그림 3.4 지반-1차 복공-2차 복공모델링 상세도

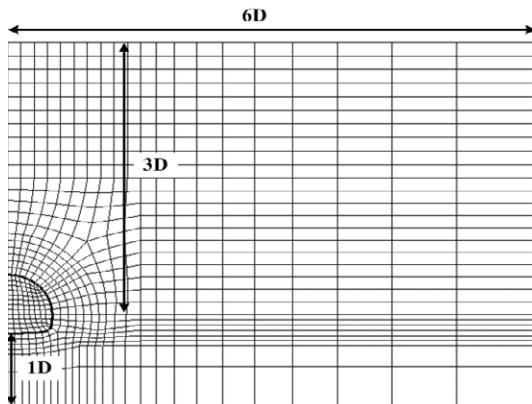


그림 3.3 해석에 적용된 유한요소망(토피고=3D)

지원하는 Contact pair를 적용하여 모델링 하였다. Contact Pair는 Thin-layer-type이나 Desai-type의 인터페이스 요소에 근거한 모델링은 이질층간의 미끄러짐(slip)과 분리(separation)를 요소면(surface) 혹은 절점(node)으로 정의되는 ‘면’ 기반의 모델링 방법이다. 이질층간의 거동은 일반적으로 Coulomb Friction 모델을 이용하여 모사하는데 여기서는 최대 허용 마찰응력과 Contact 접촉면사이의 접지압(contact pressure)을 이용하여 접촉면에서의 거동을 모사한다. 즉, 가장 기본적인 Coulomb Friction 모델에서는 접촉면의 전단응력  $\tau$ 가 접지압( $p$ )의 일부로 표현되는 임계전단응력  $\tau_{crit} = \mu \cdot p$  (여기서  $\mu$ =마찰계수)을 초과할

경우 미끄러짐 현상이 발생하는 것으로 간주하며 한계전단응력( $\tau_{max}$ )을 지정하여 모사할 수도 있다. 그림 3.2는 Coulomb Friction 모델에서 적용하는 파괴포락선을 보여주고 있다. Contact pair에 대한 상세한 내용은 ABAQUS users manual (2005)에 나타나 있다.

그림 3.3과 그림 3.4는 해석에 적용된 지반-1차층 라이닝-2차층 라이닝 모델링 상세도와 유한요소모델을 보여주고 있다. Contact Pair를 이용하여 부착성을 모사하는데 있어 완전부착의 경우에는 Contact Pair에서 지원하는 완전부착 옵션을 사용하였으며 완전분리의 경우 매우 작은 마찰계수를 적용하여 작은 전단응력에서도 미끄러짐 현상이 발생하도록 하였다. 앞서 언급한 바와 같이 시공 후 이완하중 작용시 라이닝 하중지지력에 주안점을 두고 터널굴착과 동시에 굴착하중이 라이닝에 직접 작용하도록 모델링하였다.

### 3.3 결과분석

#### 1) 터널 변위

그림 3.5는 암반등급별 라이닝 부착성에 따른 터널 천단 및 내공변위 결과를 나타내고 있다. 암반등급은 표 3.1에서 정리한 바와 같이 암반의 변형계수( $E_m$ )에 따라 구분하였다. 그림 3.5에서 관찰할 수 있는 바와 같이 터널변위는 라이닝층간의 부착성에 거의 영향을 받지 않는

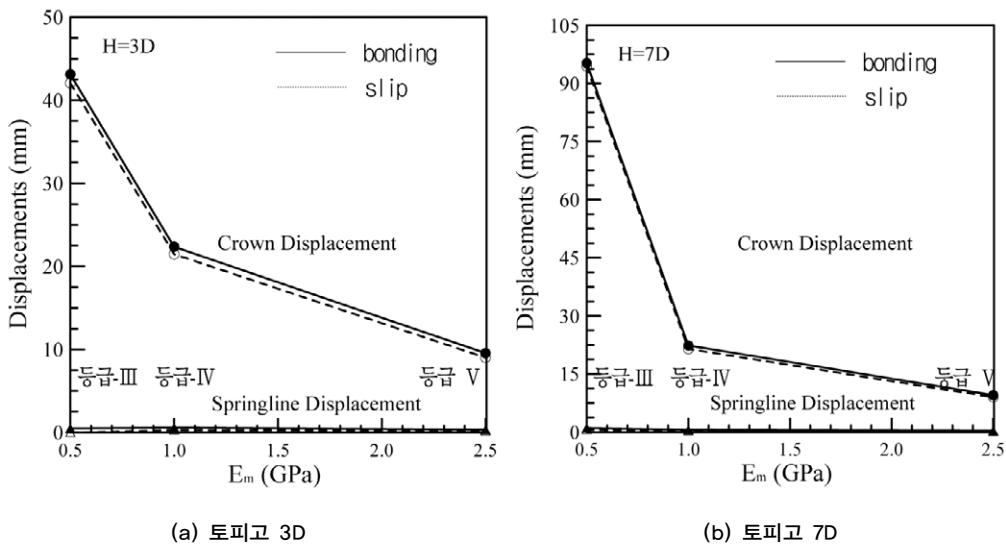


그림 3.5 암반등급별 싱글쉘과 더블쉘의 터널변위

것으로 나타났는데 이는 기존의 연구결과 (GeoFrontiers 2000)와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

## 2) 라이닝 응력

그림 3.6에서는 암반등급별로 라이닝 유발되는 압축응력을 보여주고 있으며, 몇가지 특이한 사항은 다음과 같이 정리된다. 먼저 임의의 암반등급 및 토피고에서 라이닝 부착성이 확보된 경우에는 1, 2차층 라이닝에서 거의 동일한 응력이 발생하는 것으로 나타났으나 라이닝의 부착성이 확보되지 않은 경우 2차층 라이닝에서 두 배 이상 큰 응력이 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 앞서 제시한 축소모형실험 결과 잘 부합되는 결과로서 부착성 미 확보시 라이닝 층간 하중분배가 효율적으로 이루어지지 않고 이완하중이 1차층을 거쳐 2차층에 집중됨에 따른 결과라 판단된다. 한편, 예상할 수 있는 바와 같이 암반이 좋은 경우 라이닝 부착성의 영향이 다소 감소하는 경향을 전반적으로 관찰할 수 있다.

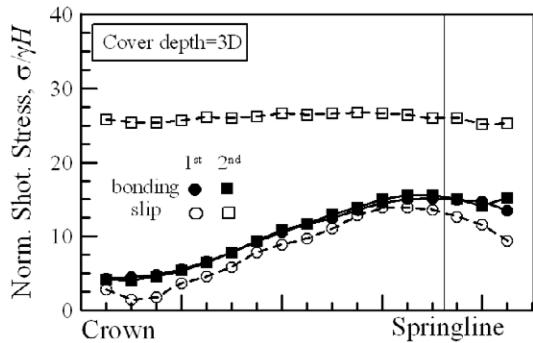
한편 토피고가 3D에서 7D로 증가한 경우 싱글쉘에서는 라이닝에 유발되는 응력분포 경향에서는 그다지 차이를 보이지 않으나 아침효과로 인해 토피고 증가로 인한 상재하중의 영향이 라이닝 응력을 전반적으로 증가시키지는 않는 것으로 나타났다. 또한 전반적으로 부착성의

영향은 3D 및 7D 모든 조건에서 관찰할 수 있으나 전반적으로 저토피고에서 상대적으로 큰 것으로 나타나, 토피고가 그다지 크지 않고 암질이 그다지 좋지 않은 터널 시공조건에서 싱글쉘 터널 공법을 적용할 경우 라이닝 층간의 부착성 확보가 매우 중요하다는 점을 암시한다고 하겠다.

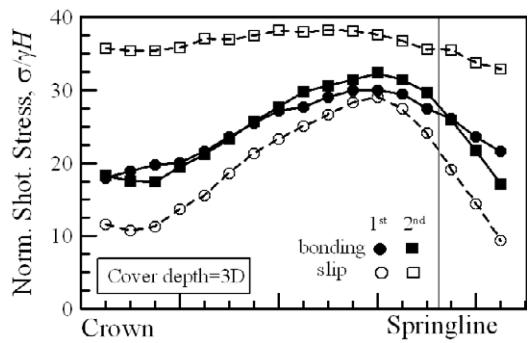
그림 3.7은 2차층 라이닝의 지점 (천단, 측벽)별 라이닝 응력을 암반조건 및 토피고에 따라 정리하고 있다. 보이는 바와 같이, 전반적으로 라이닝 부착성의 영향에 따른 라이닝 유발응력의 차이는 토피고에 관계없이 측벽부 보다는 천단부에서 크게 발생하며 부착성을 확보하지 못함에 따라 최대 1.7배 정도의 큰 응력이 발생하는 것으로 나타났다.

## 5. 결론

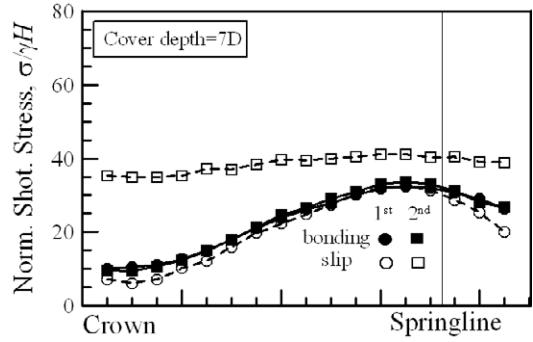
본 논문에서는 라이닝 부착성이 라이닝의 하중지지력에 미치는 영향에 대한 고찰을 위해 수행한 축소모형실험과 유한요소해석 결과를 다루었다. 실내 축소모형실험 결과로부터 라이닝간 부착성 확보여부에 따른 라이닝의 하중지지력에 대한 경향을 확인할 수 있었으며 실제 현



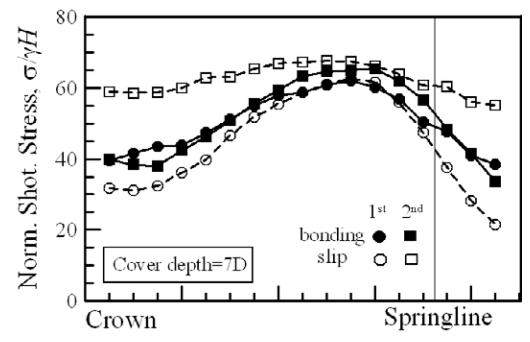
(a) 암반등급 III (토피고=3D)



(b) 암반등급 V (토피고=3D)

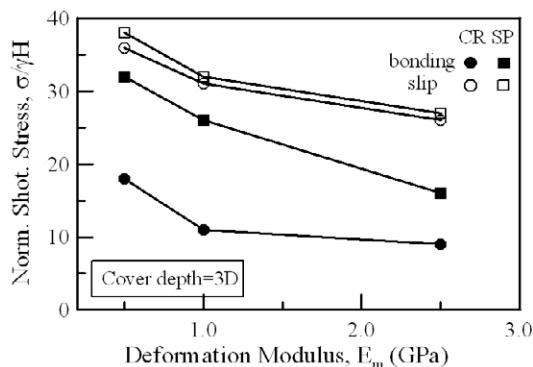


(c) 암반등급 III (토피고=7D)

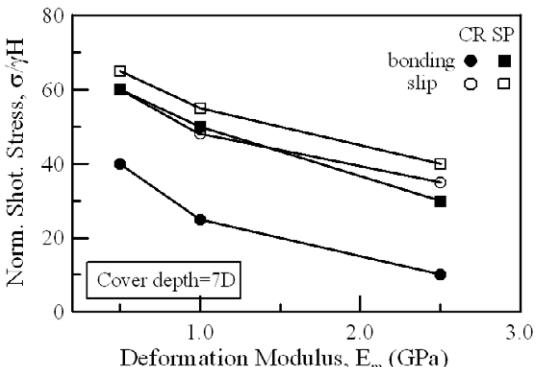


(d) 암반등급 V (토피고=7D)

그림 3.6 라이닝 부착성에 따른 솝크리트 라이닝 유발응력



(a) 토피고=3D



(b) 토피고=7D

그림 3.7 라이닝 부착성에 따른 솝크리트 라이닝 지점별 유발응력

장터널 조건을 고려한 유한요소해석 모델을 이용하여 다양한 조건에 대한 매개변수연구를 수행하여 라이닝 부착성이 라이닝의 하중지지력에 미치는 영향에 대하여 검토하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과는 다음과 같이 요약된다.

1. 축소모형실험을 수행한 결과 라이닝 층간 부착성이 확보되지 못할 경우 라이닝 각 층간 전단력이 제대로 전달되지 못하여 하중분배가 비효율적으로 이루어짐으로 인해 2차충에 응력이 집중현상이 발생하는 것으로 나타났다.
2. 전반적으로 터널변위는 라이닝층간의 부착성에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났는데 이는 기존의 연구결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.
3. 전반적으로 라이닝 부착성의 영향에 따른 라이닝 유발응력의 차이는 토피고에 관계없이 측벽부 보다는 천단부에서 크게 발생하는 것으로 나타났다.
4. 전반적으로 부착성의 영향은 토피고에 관계없이 라이닝의 하중지지력에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며 전반적으로 저토피고에서 상대적으로 큰 것으로 나타나 토피가 그다지 크지 않고 암질이 그다지 좋지 않은 터널 시공조건에 싱글쉘 터널 공법을 적용할 경우 라이닝 층간의 부착성 확보가 매우 중요한 것으로 나타났다.

### 유충식

성균관대학교 토목환경공학과 교수  
csyoo@yurim.skku.ac.kr



### 배규진

한국건설기술연구원, 지반연구부  
연구위원  
gjbae@kict.re.kr



### 감사의글

본 연구는 2005년 건설교통부가 출현한 한국형 싱글쉘 터널공법 메카니즘 이론 정립 및 설계/해석 요소기술 개발 (과제번호 : C103A1000026-04A0200-02320) 과 IT 기반의 지하공간 지보시스템 설계기술 개발 (과제 번호 : C104A1010001-05A0501-00220) 연구비 지원에 의해 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. ABAQUS users manual, Version 6.5. (2005). Hibbit, Karlsson, and Sorensen, Inc., Pawtucket, Providence, R.I.
2. Geo-Front 연구회 (2000), “숏크리트 복공에 의한 Single Shell의 설계에 관한 검토 보고서”
3. Kovari, K., 1995, “NATM概念の誤った考え方”, トンネルと地下, 第26券 第11号, pp. 65–76.
4. Norwegian Urban Tunnelling (1995), Norwegian Soil and Rock Engineering Association, Publication, No. 10.
5. Barton, N. R. (1998), “NMT support concepts for tunnels in weak”, World Tunnel Congress '98 on Metropolises Brazil, pp. 273–279.

### 김선빈

성균관대학교 토목환경공학과  
대학원  
ksb9677@empal.com



### 신우성

한국건설기술연구원, 지반연구부  
선임  
hyushin@kict.re.kr

