

## 일체형 터널 라이닝 지보성능에 대한 수치해석적 연구

### A numerical study on support capacity of single-shell tunnel lining

임종진, 신휴성, 이성원(한국건설기술연구원)

#### 1. 서 론

국내에서 1980년대 초 지하철 3·4호선 건설을 시점으로 국내에서 발파를 이용한 굴착과 슛크리트·록볼트를 이용한 주지보재 타설 그리고 2차 콘크리트 라이닝을 타설하는 2층 구조인 NATM(New Austrian Tunnelling Method)공법이 소개되면서 현재까지 대부분의 터널공사에서 적용되고 있다. 기본적인 NATM에서는 2차 콘크리트 라이닝은 하중을 받는 구조체로 고려되지 않으나, 현재 국내의 NATM 개념의 터널링에서는 주지보재의 장기 열화를 고려하여 열화에 의한 추가변위, 주변환경변화에 따른 추가 지반하중 등을 감안하여 2차 콘크리트 라이닝을 영구지보역할을 수행하는 구조체로 설계하는 것이 일반화 되었다. 이는 도심지나 산악터널 등 지반조건과 터널특성을 고려치 않고 모든 터널설계 개념에 적용되고 있으며, 2차 콘크리트 라이닝의 시공은 굴착 및 주지보재 타설이 완료되어야 시공이 가능하므로, 총 굴착기간의 약 30%정도의 기간이 소요된다. 노르웨이[김민규, 2000; 신희순 2001], 일본[JTA, 1988], 독일[Alfred Haack, 1988] 등에서는 보다 경제적인 터널시공을 위하여 싱글셸 터널공법을 도입하여 일체화 터널 라이닝을 적용해오고 있다. 또한, 기존 NATM개념의 터널 라이닝은 주지보재인 슛크리트 층과 콘크리트 라이닝으로 구성되며 중간에 유도배수를 위한 부직포와 방수막이 설치되어 슛크리트와 콘크리트 라이닝 층간의 전달력이 전달되지 않는 지보구조를 갖는다. 반면 싱글셸 라이닝은 기존 NATM개념에서의 슛크리트의 역할과 콘크리트 라이닝의 역할을 함께 수행하면서 균질하지 않은 각 층간에 전달력이 전달되는 구조특성을 갖게 됨으로써 같은 재료 재원으로 총 라이닝 두께를 줄이며 총공사비에 크게 영향을 미치는 공기를 단축시킬 수 있는 여건을 마련할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 싱글셸 터널공법의 국내 도입을 위한 기초단계로 싱글셸 터널 라이닝의 지보성능을 평가하기 위해, 이상화된 2차원 터널모델을 설정하고 단순화된 재료 조건에서 같은 두께의 NATM 더블셸 구조와 싱글셸 구조 라이닝의 지보성능 차이를 정량적으로 고찰하여 보았으며, 전달력이 전달되는 구조특성으로 인해 증가된 라이닝의 지지능력에 상응한 두께를 산정하여 보았다. 또한 동일한 싱글셸 구조 라이닝에서 균질한 강섬유 보강 슛크리트 라이닝과 복합단면 라이닝의 지지능력을 비교/평가하여 보았다.

## 2. 본 론

### 2.1 수치해석 모델

상기에서 언급된 내용의 수치해석적 고찰을 위하여 NATM의 더블셀 라이닝은 일반 슛크리트 10cm와 콘크리트 라이닝 30cm, 그리고 각 라이닝간에 방수막이 설치되어 있는 총 40cm 두께로 설정(모델 DS40)하였으며, 전단력 전달 유무에 의한 효과만을 보기위하여 같은 조건에서 방수막을 제거한 싱글셀의 경우(모델 SS40)를 설정하였다. 또한 균질한 싱글셀 강섬유 보강 슛크리트 라이닝을 20cm에서 40cm까지 두께를 달리하여 5개의 모델로 설정하였으며(모델 F20, F25, F30, F35, F40), 복합단면 싱글셀 라이닝은 10cm 두께의 일반 슛크리트층은 고정시키고 2차 지보 보강층으로 강섬유 슛크리트의 두께를 10cm에서 30cm까지 변화시키며 5개의 모델을 설정하였다(SF20, SF25, SF30, SF35, SF40).

설정된 해석모델에 대한 수치해석을 위하여 그림 1과 같이 2차원 평면변형률 조건에서의 원형 반단면 터널의 대칭모델을 설정하였다. 본 해석의 주요목적은 슛크리트 라이닝에 있으므로 라이닝의 정밀 탄소성 응력해석을 위하여 평면요소를 사용하였으며 다중 라이닝 구조의 각 층의 두께를 직접 구현하였다. 또한 이중구조의 라이닝을 모델링하기 위하여 인터페이스 요소를 적용하고 최소한의 전단강성 적용으로 각 층간에 전단력이 전달되지 않도록 하였다. 사용된 구조해석 프로그램은 FLAC2D이며, 주변 지반과 터널 라이닝에는 일반 Tension cut-off Mohr-Coulomb 소성모델을 적용하여 탄소성 해석을 수행하였다. 매질의 항복이후 매질거동은 완전소성(perfectly plasticity)으로 모델링 하였다.

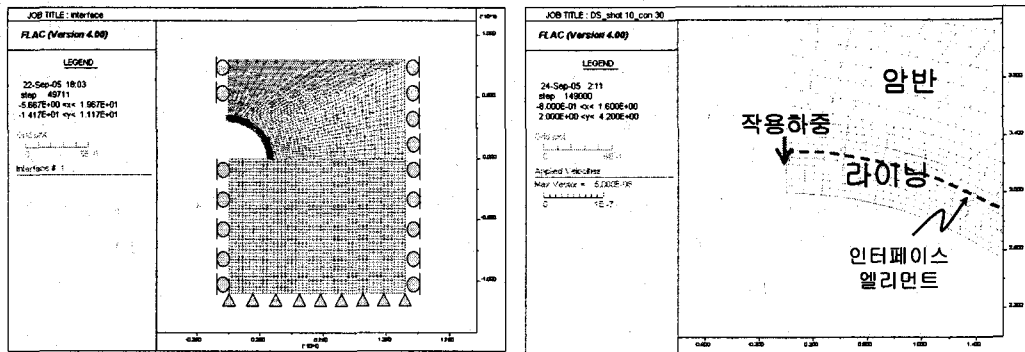


그림 1. 적용된 원형 반단면 터널 모델

적용된 지반 및 슛크리트 라이닝의 물성은 표1과 같다. 지반물성은 연암조건에서 일반적으로 사용되는 물성을 이용하였으며, 압괴하중이 가해지면서 슛크리트 라이닝과 암반이 이격되는 현상을 간접적으로 모사하기 위하여 암반의 인장강도를 일반적으로 알려진 부착면의 허용 부착강도인 1 MPa로 지정하였다. 강섬유 보강 슛크리트는 일반 슛크리트의 탄성물성과 일축압축강도를 그대로 적용하였으며 직접인장강도만을 일반 슛크리트의 2배로 산정하였다. 점착력과 마찰각은 압축강도와 인장강도에서 환산된 값들이며, 단계별 타설에 따른 영향은 고려되지 않았다.

표 1. 수치해석에 적용된 매질 물성

구 분	변형계수(GPa)	포아송비	점착력(MPa)	마찰각	직접인장강도(MPa)
지반(연암)	5.0	0.25	1.32	38	1.0
shotcrete	15.0	0.17	3.058	54	2.0
shotcrete (steel fiber)	15.0	0.17	4.662	43	4.0
concrete	20.0	0.25	3.669	53	2.4

설정된 하중조건은 터널 라이닝 천단부에 국부 압괴하중이 작용하는 상황을 단순화시켜 모델링 하기 위하여 초기에 굴착하중을 가해주어 슛크리트 내부에 응력을 발생시키고, 이후 터널 직 천 단부 라이닝 배면에서 수직하향 방향으로 집중하중을 가해주었다. 탄소성 해석을 통해 발생하는 파괴특성에 관계없이 안정적으로 최대 지지하중을 결정하기 위하여 집중하중을 변위제어 모드로 가해주었으며 가해진 변위와 반력을 이용하여 하중-변위곡선을 결정하고 각 라이닝 경우에서의 최대 지지하중을 산정하였다.

## 2.2 수치해석 결과 분석

### (1) 더블셸 구조와 싱글셸 구조 라이닝의 파괴특성

그림 2는 슛크리트와 콘크리트 라이닝간에 방수막이 설치된 경우인 이중구조 라이닝(DS40)의 초기 파괴진행 양상을 보여주며, 그림 3은 같은 조건에서 방수막이 없는 SS40 모델의 초기 파괴 진행 양상을 보여준다. 그림에서 보듯이 라이닝 상부에서 집중하중이 가해짐에 따라 라이닝의 직 천단부 터널 내측에서부터 인장균열이 발생하여 상부로 균열이 진행되는 전형적인 파괴형상이 나타나고 있다. 여기서 더블셸 구조 라이닝(DS40)에서는 각 층간 전단력이 전달되지 않음에 따라 초기 인장균열이 상부 슛크리트의 하단과 하부 콘크리트 라이닝 하단에서 함께 발생하고, 각 균열은 동시에 상부로 진행하며, 최대 균열 진전 허용길이는 각 층의 두께로 제한되면서 하부 콘크리트 라이닝의 균열이 콘크리트 라이닝 두께만큼 진전됐을 때 상부균열과 연결되어 궁극적으로 라이닝의 지지능력을 상실한다. 반면, 방수막이 제거된 경우(SS40)는 초기 인장균열이 라이닝 하단부에서만 발생하여 상부로 진행되므로 최대 균열 진전 허용길이가 DS40의 경우보다 두꺼운 전체 라이닝 두께이므로 최대 지지하중은 같은 재료적 제원에서 DS40의 경우보다 크게 된다. 표 2에서 보듯이 더블셸(DS40)의 경우 터널 라이닝의 지지능력은 주어진 조건에서 싱글셸(SS40)에 비해 약 12% 정도 저감되는 것으로 해석되었다.

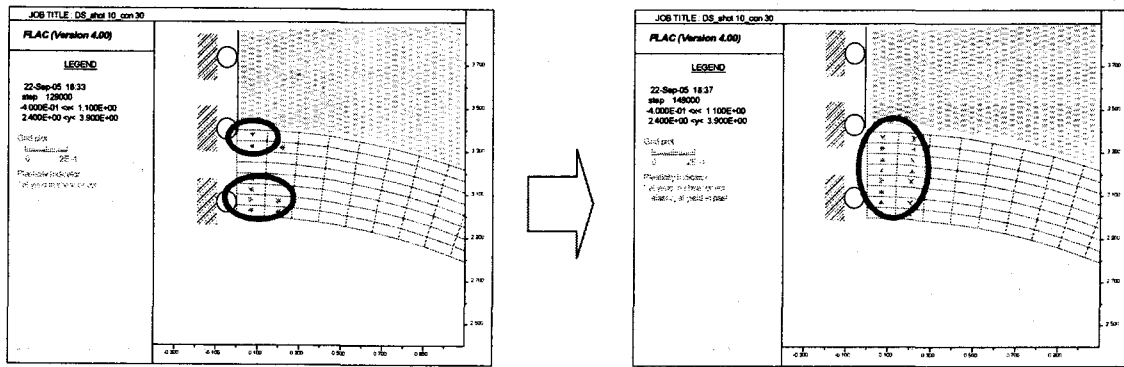


그림 2. 더블셸 구조 라이닝의 초기 균열발생 양상

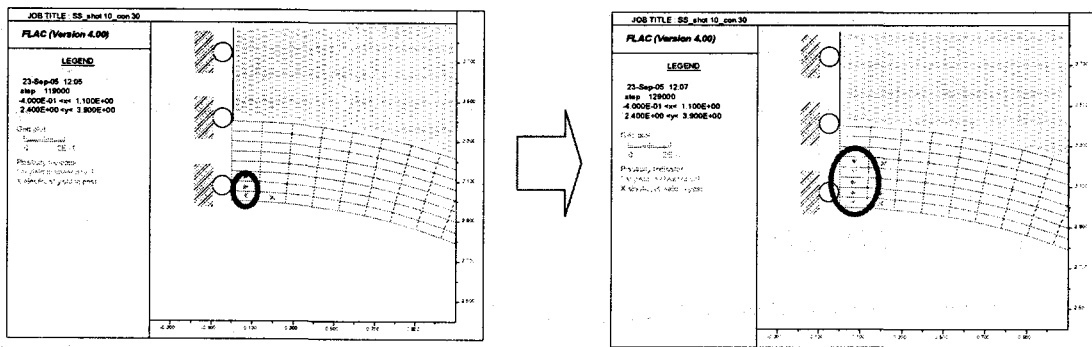


그림 3. 싱글셸 구조 라이닝의 초기 균열발생 양상

### (2) 균질한 싱글셸 강섬유보강 슛크리트 터널 라이닝의 최대 지지하중

표 2에서와 같이 전단력의 전달을 허용하는 싱글셸 라이닝이 강섬유 보강 슛크리트로 구성되었을 때, 주어진 조건에서 DS40과 가장 유사한 최대 지지하중을 갖는 모델은 F30모델인 것으로 해석되었다. 이로부터 방수막을 사용하지 않고, 일반 슛크리트에 다양한 고강도 첨가제를 배제한 인성증진용 강섬유만을 투입한 경우 총 두께 30cm만으로 40cm두께의 이중구조 라이닝의 최대 지지하중을 확보할 수 있는 것을 알 수 있다. 따라서 강섬유 보강 슛크리트로 싱글셸 라이닝을 구성할 시, 약 10cm 정도의 두께, 즉 25%정도의 슛크리트 두께 저감효과를 가져올 수 있는 것으로 해석되었다. 만일 강섬유외에 상용중인 다양한 고성능 첨가재료의 사용과 최적 배합비의 적용을 통하여 인장강도 외의 다양한 물성이 강화된 고성능 슛크리트가 반영된다면 싱글셸 터널 라이닝의 최대 지지하중은 보다 크게 증진될 수 있을 것으로 판단된다.

### (3) 복합단면 싱글셸 슛크리트 터널 라이닝의 최대 지지하중

표 2에서와 같이 강섬유가 포함되지 않은 일반 슛크리트와 강섬유 보강 슛크리트로 싱글셸 터널 라이닝이 구성되었을 때, 주어진 조건에서 DS40과 가장 유사한 최대 지지하중을 갖는 모델은 SF30모델인 것으로 해석되었으며, F30 모델 수준의 각 층별 전단력 전달 허용에 따른 지지하중 증가효과를 확인할 수 있었다. 이로부터 강섬유와 같은 고성능 첨가제가 라이닝 섹션에 작용하는 응력분포 특성을 고려하여 전략적으로 각 타설층별로 달리 투입된다면, 의도된 최대 지지하중을 확보하면서도 큰 재료의 절감효과를 가져올 수 있을 것으로 판단된다.

표 2. 이중구조와 단일구조 라이닝의 최대 지지하중

구분	라이닝 구성	모델명	더블셀 대비
더블셀	shotcrete 10cm+concrete 30cm	DS40	-
싱글셀	shotcrete 10cm+concrete 30cm	SS40	112%
	SF shotcrete 20cm	F20	69%
	SF shotcrete 25cm	F25	86%
	SF shotcrete 30cm	F30	104%
	SF shotcrete 35cm	F35	118%
	SF shotcrete 40cm	F40	136%
	shotcrete 10cm+SF shotcrete 10cm	SF20	60%
	shotcrete 10cm+SF shotcrete 15cm	SF25	82%
	shotcrete 10cm+SF shotcrete 20cm	SF30	99%
	shotcrete 10cm+SF shotcrete 25cm	SF35	112%
	shotcrete 10cm+SF shotcrete 30cm	SF40	129%

- SF shotcrete: steel fibre reinforced shotcrete; shotcrete: normal shotcrete without SF.

### 3. 결론

본 연구에서는 수치해석을 통해 다음과 같이 싱글셀 터널 라이닝의 지보성능과 싱글셀 터널 공법을 적용할 경우 라이닝의 단면 감소 정도를 파악하고, 복합단면 싱글셀 라이닝의 효과를 평가하였다.

1. 라이닝 상부에서 집중하중이 가해질 경우 더블셀의 경우 각 층간 전단력이 전달되지 않아 인장균열이 상부 슛크리트의 하단과 하부 콘크리트 라이닝 하단에서 함께 발생하고, 각 균열은 동시에 상부로 진행하여, 싱글셀에 비해 균열 허용 길이가 짧아져, 싱글셀 라이닝 구조가 더블셀 라이닝 구조에 비해 지보성능이 우수함을 알 수 있다. 본 해석에서는 동일한 조건에서 싱글셀 라이닝이 더블셀 라이닝에 비해 약 12% 정도 지보 성능이 향상되었다.
2. 강섬유 보강 슛크리트로 싱글셀 라이닝을 구성할 시, 본 해석에서는 25%정도의 슛크리트 두께 저감효과를 가져올 수 있는 것으로 해석되었다.
3. shotcrete 10cm, concrete 30cm의 라이닝 구조를 갖는 더블셀 라이닝 구조에 상응하는 지보성능을 갖는 라이닝 구조는 SF shotcrete 30cm의 싱글셀 구조 혹은 shotcrete 10cm, SF shotcrete 20cm의 복합단면 싱글셀 구조로 나타났다.

### 참고문헌

1. 김민규, 2000, 노르웨이의 암석굴착 기술, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제10권, pp. 544~552.

2. 신희순, 2001, NMT공법과 조립식 라이닝, 2001년도 한국암반공학회 터널분과위원회 기술세미나 논문집- 국내 산악 터널링 기술의 현황과 발전방향, pp. 36~52.
3. 한국건설기술연구원, 2005, 한국형 싱글셸 터널공법 개발
4. Alfred Haack, 1988, Single-shell in-situ concrete tunnel lining : Experience in the Federal Republic Germany, Tunneling and Underground Space Technology, Vol 3. No 1, pp. 55~66
5. Japan Tunneling Association, 1988, Single-shell in-situ concrete tunnel lining : Experience in Japan, Tunneling and Underground Space Technology, Vol 3. No 1, pp. 51~54