

# 복합섬유보강 콘크리트 라이닝 부재의 균열제어를 위한 수치해석적 연구

## Numerical Analysis on the Crack Control of Concrete Lining Reinforced by Composite Fibers

양 우 식\* Yang, Woo-Shik

### ABSTRACT

The concrete lining of a tunnel constructed by NATM used to be regarded as facing material which does not support any load from the surrounding ground. But the recent appraisal of the decrepit tunnels revealed that rockbolts and shotcrete deteriorate with time resulting in loss of supporting capability. Consequently, concrete lining has to support part of the load which used to be supported by rockbolts and shotcrete, and thus should be regarded as the final supporting structure in a tunnel. One of the common, and perhaps the most serious problem in concrete lining is the longitudinal cracks taking place at the tunnel crown. The longitudinal cracks, mostly related to the construction procedures, can be developed by many reasons such as the lack of thickness, wrong materials, bad curing environment, and excessive external forces. Many efforts has been made to control and suppress these cracks but efficient and economic way is yet to be found. For efficient crack control in concrete lining, reinforcement by composite fibers, which is the mixture of steel fiber and nylon fiber, is suggested in this study.

### 요 지

터널 구조물은 다른 사회간접시설과 마찬가지로 시공과정에서부터 사용연한까지 지속적으로 안전성이 확보되어야 한다. 특히, NATM 공법으로 시공되는 터널 콘크리트 라이닝은 터널의 외장재로 취급되어 왔지만, 근년에 와서 노후화된 터널의 콘크리트 라이닝에서 발생하는 심각한 구조적 균열에 대한 문제가 야기되면서 터널의 장기적인 안전성을 유지하는 최종 지보수단인 구조재로 고려되고 있다. 콘크리트 라이닝 천단부의 종방향 균열 발생은 콘크리트 시공방법과 같은 연관관계를 가지고 있다. 콘크리트 라이닝 타설시 강제 거푸짐의 천단부 부터 콘크리트를 주입함으로써 콘크리트가 측벽 쪽으로 유동하면서 충전되어 천단부 라이닝 콘크리트는 마지막으로 콘크리트가 타설되기 때문에 천단부의 상부에 공동이 발생할 우려가 크며, 이로 인해 콘크리트 라이닝의 두께도 부족하게 되는 경우가 발생한다.

본 연구에서는 터널 콘크리트 라이닝에서 여러 요인으로 발생하는 균열을 보다 효율적으로 제어하기 위하여 콘크리트 라이닝에서 발생하는 균열 특성, 기존 강섬유보강 콘크리트 라이닝과 복합섬유보강 콘크리트 라이닝의 수치해석적 접근을 시도하였다. 즉, 터널 라이닝 천단부에 강섬유와 복합섬유의 혼입률에 따른 콘크리트 라이닝 부재의 파괴하중과 변위에 대하여 분석하였다.

**Keywords :** Crack control, Concrete lining, Reinforced by composite fiber, Numerical analysis, Longitudinal crack

### 1. 서 론

전 국토의 약 70%가 산악지대인 우리나라의 실정에서는 국가경제의 성장과 생활수준 향상, 국토의 효율적인 이용을 통한 지역간의 균형있는 발전을 위한 교통수단으로

터널시설의 건설은 더욱 가속화 될 것으로 예상된다.

터널 구조물은 다른 사회간접시설과 마찬가지로 시공 과정에서부터 사용연한까지 지속적으로 안전성이 확보되어야 한다. 특히, NATM 공법으로 시공되는 터널 콘크리트 라이닝(tunnel concrete lining)은 터널의 외장재로 취급

1\* 정희원, 동신대학교 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Dongshin University, E-mail: w1024s@dshu.ac.kr)

되어 왔지만, 터널은 어떠한 형태로든 1차 지보재에 의해 안정되고 내부 콘크리트 라이닝은 터널의 구조적 기능보다는 부수적 기능 유지를 목적으로 하기 때문에 배수형 터널에서는 자중만 견딜 수 있는 구조로 설계된다(김영근 등, 1997). 근년에 와서 노후화된 터널의 콘크리트 라이닝에서 발생하는 심각한 구조적 균열에 대한 문제가 야기되면서 터널의 장기적인 안전성을 유지하는 최종 지보수단인 구조재로 고려되어 지고 있다. 이와 같은 추세에 따라 터널의 안전성을 확보하기 위해서는 콘크리트 라이닝이 구조재로서의 역할을 충분히 발휘할 수 있도록 설계 시공되어야 한다.

더욱이 콘크리트 라이닝의 표면에는 터널에 작용하는 토압, 라이닝, 숏크리트 및 락볼트 등의 지보요소간의 상호작용에 의해 발생된 구조거동이 총체적으로 나타나므로 사용자나 유지관리자가 가시적으로 구조적 결함 등을 관찰할 수 있다. 또한 콘크리트 라이닝은 다른 콘크리트 구조물에 비해서 정확한 계산결과를 얻기 어려우므로 공용중에 발생하는 균열 등과 같은 결함을 추정하거나 터널 주변의 근접공사시 터널에 대한 건전도를 평가하는 경우에도 고도의 기술적 판단이 요구된다.

콘크리트 라이닝 천단부의 종방향 균열 발생은 콘크리트 시공방법과 같은 연관관계를 가지고 있다. 콘크리트 라이닝 타설시에는 설치된 강재 거푸집의 천단부로부터 콘크리트를 주입함으로 자중에 의하여 콘크리트가 측벽 쪽으로 유동하면서 충전된다. 이때 터널 천단부 라이닝 콘크리트는 마지막으로 콘크리트를 타설하기 때문에 천단부의 상부에 공동이 발생할 우려가 크며, 이로 인해 콘크리트 라이닝의 두께도 부족하게 되는 경우가 발생할 수 있다. 특히 NATM 공법으로 시공되는 터널 콘크리트 라이닝에서는 균열발생이 가장 중요한 문제점으로, 그 원인은 콘크리트의 재료, 환경, 시공 그 밖에 지반변동에 의한 외력 등을 들 수 있다(이송 등, 2003).

전중규 등(2006)에 의하면 기존 터널의 효율적인 안전 및 유지관리를 위해서는 터널 콘크리트 라이닝의 역학적 건전도를 평가하는 것이 필수적이라 하였다. 이 연구에서 사용된 콘크리트 라이닝 모형 시험체는 실제 도로터널의 축소모형으로서 단일라이닝으로 구성되어 있으며, 하중조건, 라이닝 두께, 천단부 배면 공동 유무 및 강섬유 혼입률 등과 같은 라이닝 조건에 따른 모형실험을 실시하였다. 터널 모형에 하중을 재하하여 터널 콘크리트 라이닝의 균열 발생하중과 파괴하중, 처짐과 균열 발생 형태를 조사하여

터널 콘크리트 라이닝의 변형 및 역학적 특성을 평가하였다.

유광호 등(2008)은 효과적인 하중조건을 모사할 수 있도록 모형실험의 검증을 위해 3차원 수치해석을 실시하였다. 3차원 수치해석은 터널모형실험과 같은 조건으로 해석하기 위하여 모형실험에서 얻어진 하중이력곡선이 수치해석 시에도 가능하면 동일하게 재현되도록 수행하였다.

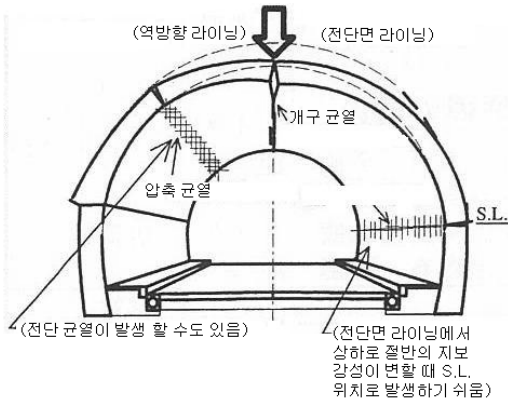
본 연구에서는 터널 콘크리트 라이닝에서 여러 요인으로 발생하는 균열을 보다 효율적으로 제어하기 위하여 먼저 NATM 공법의 터널 콘크리트 라이닝에서 발생하는 균열 특성을 분석하였다. 이러한 분석결과를 기초로 기존 강섬유보강 콘크리트 라이닝과 복합섬유보강 콘크리트 라이닝의 수치해석적 접근을 시도하였다. 복합 섬유보강 콘크리트는 양단 후크형 강섬유와 분산제가 코팅된 유기계 섬유를 혼합한 것으로, 균열제어 효과가 우수함을 검증하기 위하여 기존의 강섬유 및 유기섬유보강 콘크리트와 복합 섬유보강 콘크리트의 재료특성을 이용하여 터널 라이닝 천단부에 강섬유와 복합섬유의 혼입률에 따른 콘크리트 라이닝 부재의 파괴하중과 변위에 대하여 분석하였다.

## 2. 콘크리트 라이닝의 균열 특성

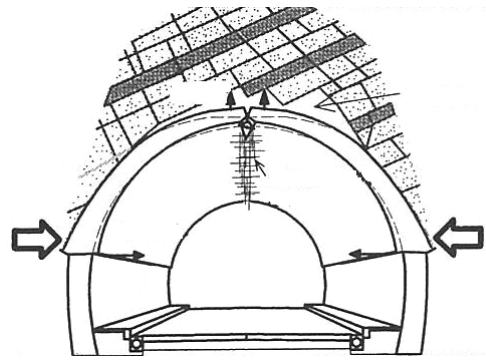
### 2.1 균열발생 원인 및 형태

터널 라이닝 균열은 콘크리트 타설 후 수화열로 인한 균열 및 콘크리트 경화시 건조수축으로 인한 균열들의 재료적인 원인 이외에 여러 가지 다른 원인에 의해서도 나타나고 있다. 특히 여러 개의 라이닝 경간을 가로 지르는 방향으로 발생하는 수십 미터 길이의 종방향 균열, 콘크리트 품질 및 시공불량 이외의 외적인 요인에 의해 발생하는 균열도 보고되고 있다. 만일 1차지보재의 지보능력과 지반응력의 1차 평형상태가 균형을 잃게 되면 지반은 변형에 따라 새로운 안정 상태에 도달하려 하기 때문에 토압 등의 외력이 내부 라이닝에 작용하게 되어 라이닝 균열의 원인이 될 가능성이 있다(김상환 등, 2006).

2차 라이닝 균열의 원인이 역학적인 것이라 하면 그것을 정확하게 파악하기란 매우 어렵다. 그 이유는 라이닝 균열 발생 원인을 정확하게 찾아내는 작업이 곤란하고, 어느 한 가지 이유가 아닌 복합적인 원인들로 인해 발생할 가능성이 크기 때문이다. 터널 라이닝이 외력을 받아 변형될 때 외력의 작용방향에 의하여 라이닝의 변형과 균열 형태는 다양하다. 그림 1은 외력이 작용할 때의 종방향 라이



(a) 소성압 및 수압



(b) 지속적인 연직력

그림 1. 외력에 의한 터널 라이닝의 균열 모식도

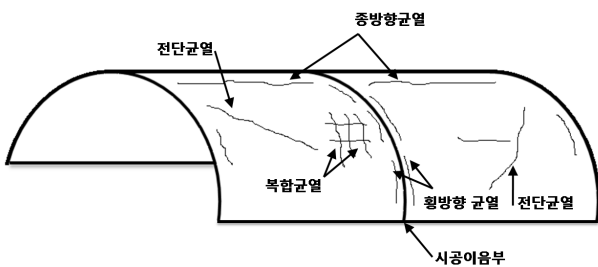


그림 2. 균열 발생 유형

닝 변형을 나타낸 것으로서 그림 1(a)는 라이닝 배면에 공동이 있고 지반 반력이 확보되지 않았을 때에 라이닝 아치가 눌러 위로 올라간 것이고, 그림 1(b)는 지속적인 연직력에 의하여 종방향 균열이 일어난 것을 나타낸 것이다(일본철도종합기술연구소, 1990).

콘크리트 라이닝에서 균열 발생 형태는 종방향 균열, 횡방향 균열, 전단 균열 및 복합 균열로 분류할 수 있으며, 그 형태는 그림 2와 같다.

콘크리트 라이닝의 종방향 균열은 터널중심선과 평행하게 터널 천단과 어깨부에 터널중단 방향으로 발생한 직선상의 균열형태이며, 종방향 균열 대부분이 천단부로부터 30° 범위 내에서 주로 발생하여 균열의 폭이 다른 균열에 비해 크고 균열연장이 길어 구조적인 취약부를 형성한다. 종방향 균열의 원인은 일반적으로 콘크리트의 급속한 타설 및 아치전부의 동일한 위치에서 온도응력이 연속적으로 발생하여 생기기도 한다(일본토목학회, 2002). 또한, 횡방향 균열은 터널 중심선에 직교하여 횡방향으로 발생하는 균열형태이며, 시공 이음부 전 주변장과 터널 어깨부, 천단부에 주로 발생한다.

터널 콘크리트 라이닝의 전단 균열은 터널중심선에 대각선 방향으로 나타나는 균열형태로서 터널 어깨부에 주

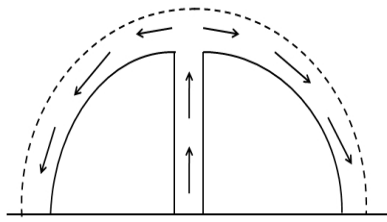
표 1. 콘크리트 라이닝의 균열 발생 사례 분석

구분		균열 발생 빈도(%)		
		종방향	종·횡방향	횡방향
지형	평지	66.7	26.7	6.6
	편경사	67.6	29.7	2.7
	계곡부	20.0	80.0	0.0
	능선부	20.0	80.0	0.0
라이닝 두께 부족		54.0	41.6	4.4
상부 공동		81.0	19.0	0.0
콘크리트 품질 저하		72.4	27.6	0.0

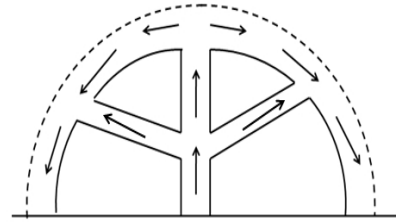
로 발생하며, 콘크리트 라이닝의 복합균열은 터널천단에서 발생한 종방향 균열이 전단 균열의 형태로 진전되거나 종방향 균열이 횡방향 균열과 복합적으로 나타나는 균열을 말한다.

## 2.2 균열 발생 분석 및 제어 방안

NATM 공법으로 시공된 도로터널 5개를 선정하여 콘크리트 라이닝 균열의 원인을 지형 콘크리트 라이닝의 두께부족, 상부 공동 및 콘크리트 품질저하로 분류하고 이에 대한 영향을 분석하였다(이종은 등, 2009). 표 1에 나타난 바와 같이 분류된 모든 경우에 대해서 종방향 균열이 20~80% 내외이고, 종방향 균열에 횡방향 균열이 겹쳐 나오는 현상을 보이는 것이 20~80%로서 대부분의 균열이 종방향 균열을 중심으로 중점적으로 발생하고 있었다. 특히, 위의 두 가지 경우를 하나로 분류하게 된다면 95% 내외로서 콘크리트 라이닝의 균열은 종방향 균열이 지배하는 것으로 나타났다. 횡방향 균열이 단독으로 발생하는 경우는 6% 내외로 조사되었다.

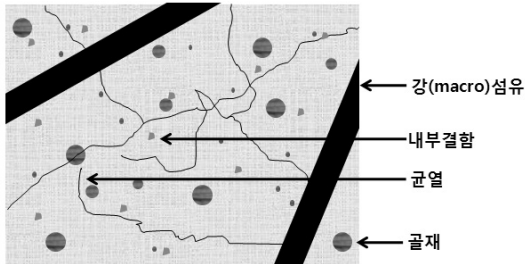


(a) 콘크리트 투입구의 천장부 설치

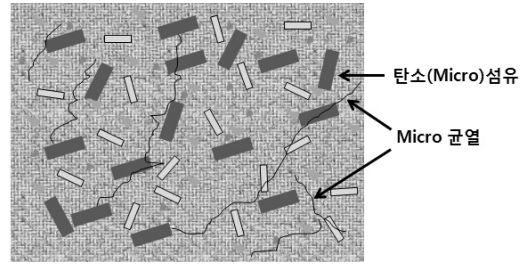


(b) 콘크리트 투입구의 좌우측 추가 설치

그림 3. 콘크리트 타설 방법



(a) 매크로 섬유



(b) 마이크로 섬유

그림 4. 섬유의 역학적 기능

콘크리트 라이닝의 균열을 효과적으로 제어하기 위해서는 첫째, 터널 콘크리트 라이닝 타설시 품질개선을 위해서는 섬유보강재를 투입하거나, 콘크리트 배합시 고성능 AE 감수제를 첨가한다. 둘째, 터널표준시방서의 경우, 콘크리트 압축강도가 3MPa 이상 발현시 거푸집을 제거하도록 하고 있으나 안전성 및 시공성을 고려하여 압축강도가 5MPa 이상일 때 거푸집을 제거한다. 셋째, 현행 터널 라이닝 강제 거푸집은 그림 3(a)와 같이 콘크리트 투입구가 천장부에 위치해 있어 타설되는 콘크리트가 측벽하부까지 흘러가는 낙차 높이가 크기 때문에 재료분리가 발생되어 내구성이 저하될 수 있다. 따라서 콘크리트 투입구를 그림 3(b)와 같이 강제거푸집의 좌우측에 추가 설치하여 측벽과 천장부분을 구분하여 단계별로 타설함으로써 밀실한 콘크리트 시공으로 강도증진 및 내구성능을 향상시킬 수 있다. 넷째, 콘크리트 라이닝 타설 후 양생방법은 습윤양생을 실시하여 초기강도증진 및 균열 발생을 예방하고, 스프링클러를 이용한 습윤양생으로 인력 및 비용을 절감한다. 또한 살수 작업 및 장치이동시 부근에서 작업하는 작업자의 주의를 환기시키기 위한 경고수단을 설치한다. 다섯째, 철근피복 유지용 간격재는 터널갱구부 및 비상주차대 등 철근이 필요한 구간에 사용하며, 원형 파이프를 적정두께로 절단하여 콘크리트 압송관 청소시 발생하는 콘크리트 잔재를 재활용하여 제조한다. 여섯째, 터널 신축이음 시공은 터널 입출구부 50m 이내에서는 20~30m 간격

으로 설치하고, 터널 내부에서는 20~60m 간격으로 설치한다.

일반적으로 1차 지보로 변위속도가 충분히 수렴되어 지반의 안정이 확보된 상태를 계측을 통해 확인한 후 2차 라이닝을 타설하기 때문에 큰 하중이 2차 라이닝에 직접 부과되지 않는다. 또한 슛크리트와 2차 라이닝과는 방수 시트에 의해서 분리되어 있기 때문에 구조적으로 일체화되지 않으며, 반경방향의 축력은 2차 라이닝에 전달되지만 전단력 등은 전달되지 않으므로 재료특성상 취약한 전단력에 대해서는 영향이 적다. 그러나 콘크리트 재료로부터의 건조수축 및 터널 역학적으로 문제 가능성이 있는 하중조건 변화에 대해서는 충분한 검토가 이루어져야한다 (정수매 등, 2009).

### 3. 복합섬유보강 콘크리트 라이닝 부재의 실험 및 해석조건

#### 3.1 콘크리트 라이닝 성능 실험

매크로 섬유와 마이크로 섬유의 역학적인 기능은 그림 4와 같으며, 매크로 섬유는 주균열 등과 같은 큰 균열의 발생과 확장을 제어하면서 지연시키는 역할을 한다. 그러나 미세균열, 또는 섬유 사이에서 발생하는 균열에 대하여서는 그 기능을 발휘하지 못하는 단점을 지니고 있다. 반면

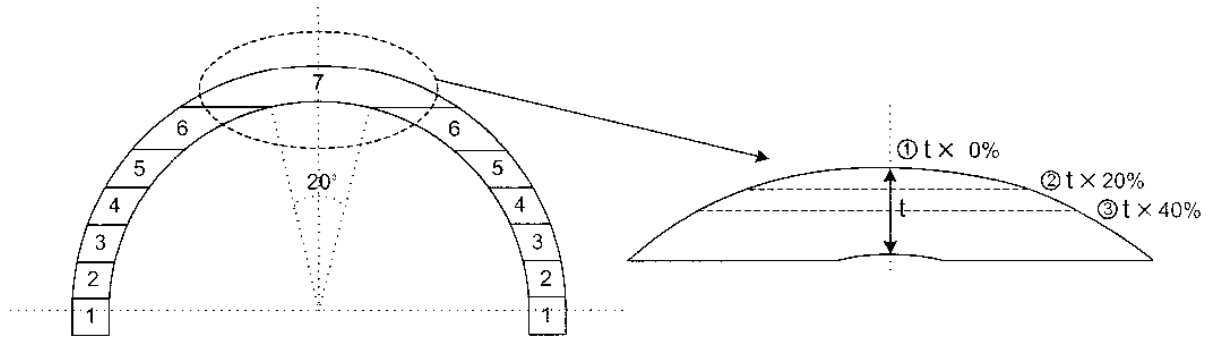


그림 5. 콘크리트 라이닝 시공 방법 및 두께 변화

표 2. 섬유혼입물에 따른 콘크리트 물성 평가 결과

No.	섬유혼입물(kg/m <sup>3</sup> )		콘크리트 물성	
	강섬유	나일론섬유	압축강도(MPa)	탄성계수(×10 <sup>4</sup> MPa)
1	0	0	30.8	2.13
2	25	0	31.9	2.30
3	25	0.6	32.0	2.33
4	30	0	37.9	2.40
5	30	0.6	38.4	2.43

에 마이크로 섬유는 미세균열에 대하여 위에 기술된 역학적인 제어기능을 발휘할 수 있으나, 주균열과 같은 큰 균열에 대하여는 그 성능을 충분히 발휘할 수 없는 결함을 지니고 있다. 그러나 매크로 섬유와 마이크로 섬유를 동시에 혼입하여 사용하는 복합 섬유보강 콘크리트는 서로간의 단점을 보완하는 효과를 발휘한다.

본 연구에서는 터널 콘크리트 라이닝의 균열제어 및 성능 개선을 위하여 보통콘크리트, 보통콘크리트에 강섬유 25kg/m<sup>3</sup>, 30kg/m<sup>3</sup> 보강, 보통콘크리트에 강섬유 25kg/m<sup>3</sup>, 30kg/m<sup>3</sup>와 나일론 섬유를 0.6kg/m<sup>3</sup> 혼합 보강한 복합섬유보강 콘크리트 라이닝의 두께를 각각 40, 60mm로 하여 그림 5에서와 같이 실제 터널 콘크리트 라이닝 부재의 성능평가를 추정하기 위하여 이종은 등(2009)이 발표한 터널라이닝 모형 공시체의 시공순서와 같이 편도 2차선 도로 터널 콘크리트 라이닝의 1/20 크기로 축소, 수치해석 모델링하여 각 시험체의 성능을 평가하였다. 표 2는 강섬유와 나일론 섬유의 혼입률에 따른 콘크리트 물성시험 결과를 나타낸 것이다.

### 3.2 해석조건

본 연구에서의 수치해석은 한국 Intuition Software에서

개발한 Visual FEA 프로그램을 이용하였다. Visual FEA는 지반 및 구조에 대하여 3차원 정해석 및 동해석을 위하여 개발된 유한요소해석 프로그램으로, steady-state 및 비정상 침투류 해석과 열전달 문제를 해석할 수 있는 장점이 있다. 지반요소해석에 대한 소성모델로서는 Mohr-Coulomb, Druker-Prager, Modified-Cam Clay 등을 사용할 수 있으며, 탄성해석에서 완전소성해석에 이르는 범위까지 해석이 가능하다. 수치모형화 과정으로 일반적으로 가장 많이 사용하는 Mohr-Coulomb Model을 사용하여 모사하였으며, 8절점 고체요소를 사용하였고, 터널라이닝은 Shell 요소를 사용하였다. 또한 해석단면을 X, Y 평면으로 지정하고 Z 방향으로 투영하여 3차원으로 모델링하였다. 해석 입력변수는 표 2에 나타난 섬유 혼입률에 따른 콘크리트 물성 결과를 모든 수치해석 조건에 동일하게 적용하였다.

그림 6과 표 3은 각각 수치해석에서 이용된 해석단면의 격자요소망과 초기응력상태, 해석조건을 나타낸 것으로서 3차원 수치해석은 터널모형실험과 같은 조건으로 해석하기 위하여 모형실험에서 얻어진 하중이력곡선이 수치해석 시에도 가능하면 동일하게 재현되도록 수행하였다. 수치해석을 통해 터널모형실험의 하중-변위를 비교적 유사하게 모사할 수 있었지만 이는 터널모형에 콘크리트라이닝의 변위거동에 중점을 맞춘 결과로서 본 연구의 콘크리트

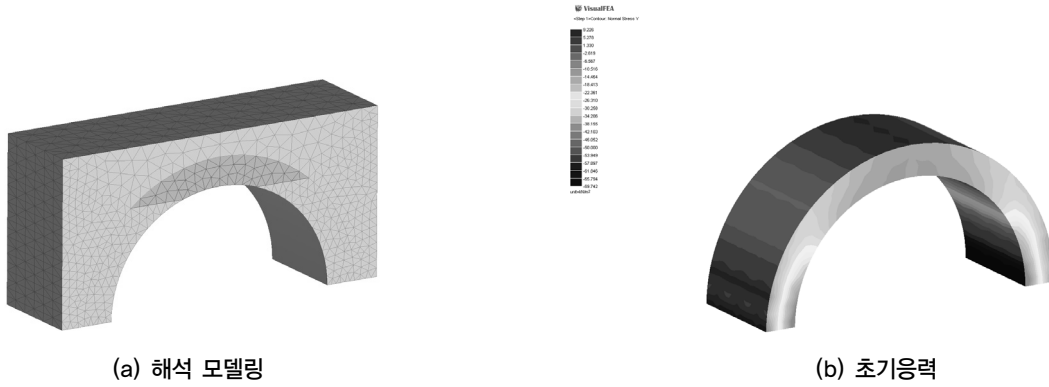


그림 6. 수치해석 모델링 및 초기 응력

표 3. 해석조건

해석 NO.	섬유보강 부위	라이닝 두께 (mm)	섬유혼입률(kg/m <sup>3</sup> )	
			강섬유	나일론섬유
CASE-1	천단부 보강 (20°)	60	0	0
CASE-2			25	0
CASE-3			25	0.6
CASE-4			30	0
CASE-5			30	0.6
CASE-6	전단면 보강	60	25	0
CASE-7			25	0.6
CASE-8			30	0
CASE-9			30	0.6
CASE-10			0	0
CASE-11		40	25	0
CASE-12			25	0.6
CASE-13			30	0
CASE-14			30	0.6

라이닝에 작용하는 응력을 연구한 것과는 차이가 있다.

#### 4. 해석 결과 및 분석

##### 4.1 무근 콘크리트 라이닝 부재의 연직변위

그림 7은 라이닝 두께를 각각 60mm(CASE 1)와 40mm(CASE 10)로 달리한 터널 콘크리트 라이닝 모형 부재의 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 전중규 등(2006)이 제시한 모형시험체 결과와 같이 무근콘크리트 라이닝 부재에 하중을 가했을 때 하중-변위 곡선은 무근 콘크리트 라이닝에 하중 재하가 시작되면서 약 20kN 정도에서 라이닝 천단부에 초기균열이 발생되며, 하중증가에 따른 균열은 커지게 된다. 이후 하중 증가에 따라 콘크리트 라이닝에 발생된 균열이 증립축 이상으로 확대되면서 하중 증가

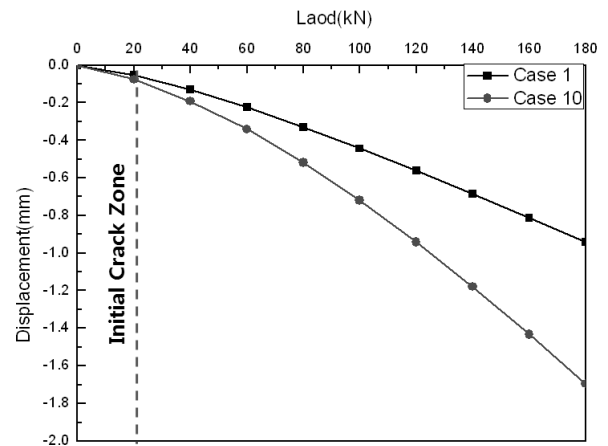


그림 7. 무근 콘크리트 라이닝 부재의 하중-변위 곡선

에 따른 처짐이 급격히 발생되어 인장을 받는 부재로써 능력을 상실하게 되고, 계속해서 하중을 증가시키면 콘크리트 라이닝은 아칭역할을 하면서 축력이 발생되며, 하중

대한 처짐도 어느 정도 회복되고 최대 하중시 파괴가 일어나는 과정으로 하중-변위 곡선이 형성된다.

## 4.2 천단부 보강 콘크리트 라이닝 부재

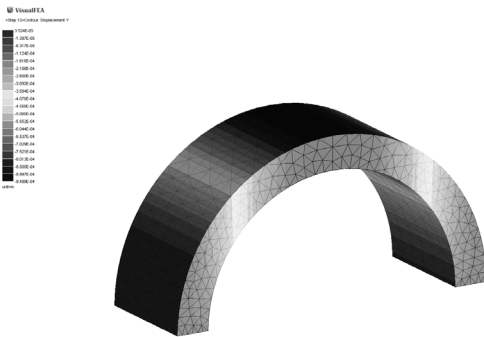
터널 콘크리트 라이닝 부재의 천단부에서 발생하는 균열을 저감시키고, 구조적 성능을 향상시킬 목적으로 콘크리트 라이닝 천단부 20° 범위에 강섬유, 강섬유와 나일론 섬유를 조합한 콘크리트 라이닝 부재에 대하여 해석하였다.

그림 8은 3종류(CASE 1, 2, 3) 콘크리트 라이닝 부재의 극한하중 상태까지 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 섬유

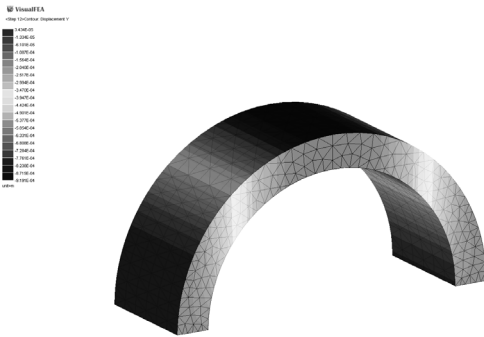
를 보강하지 않은 콘크리트 라이닝 부재의 연직변위는 동일한 하중재하시 약 0.942mm 정도로 나타났다. 한편, 강섬유 25kg/m<sup>3</sup>과 나일론 섬유 0.6kg/m<sup>3</sup>를 조합한 콘크리트 부재의 변위는 0.805mm 정도로 무근콘크리트 라이닝 부재와 비교하여 약 14% 정도 감소된 결과를 나타내었다.

또한, 그림 9는 강섬유 혼입량 30kg/m<sup>3</sup>에 대하여 나타낸 결과로써 강섬유와 나일론 섬유를 조합한 콘크리트 라이닝 부재의 연직변위는 0.791mm 정도로 무근콘크리트 라이닝 부재와 비교하여 약 16% 정도 감소된 결과를 나타내었다.

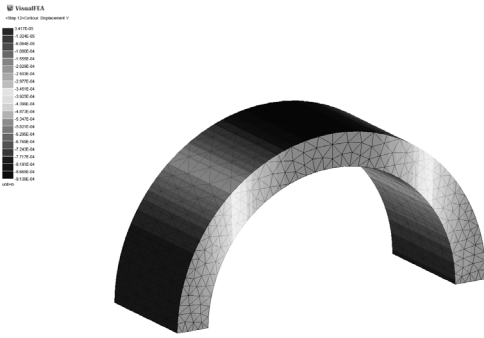
즉, 콘크리트 라이닝 부재의 균열제어를 위하여 천단부 일부에만 보강을 할 경우에는 강섬유와 나일론 섬유를 조합하여 사용하는 것이 균열제어 효과가 뚜렷하며, 이와 같이 복합 섬유보강의 경우 강섬유의 혼입량 25kg/m<sup>3</sup>, 30kg/m<sup>3</sup>에는 역학적 특성 차이가 거의 없었다. 따라서 천단부만 섬유보강한 라이닝 부재의 분석결과는 기존 연구 결과와 같이 섬유보강 콘크리트의 특징인 파괴에너지의 흡수를 도모하며, 콘크리트의 연성과 인성을 증가시키는 내용과 유사한 결과를 나타내었다(Goparatnam et al., 1991).



(a) CASE 1

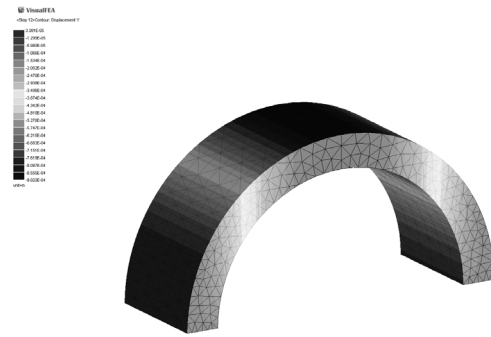


(b) CASE 2

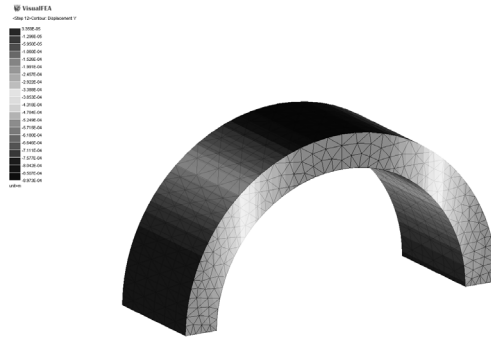


(c) CASE 3

그림 8. 천단부 보강 콘크리트 라이닝 부재의 연직변위(강섬유 혼입량 25kg/m<sup>3</sup>)



(a) CASE 4



(b) CASE 5

그림 9. 천단부 보강 콘크리트 라이닝 부재의 연직변위(강섬유 혼입량 30kg/m<sup>3</sup>)

### 4.3 전단면 보강 콘크리트 라이닝 부재

터널 콘크리트 라이닝 부재의 경우, 콘크리트 라이닝 두께부족, 상부 공동현상 및 지반변동에 따른 국부적인 하중 등 여러 가지 요인으로 성능이 저하되고 있어, 이와 같은 현상을 저감시키기 위하여 콘크리트 라이닝 전단면에 섬유보강재를 혼입하여 해석을 수행하였다.

그림 10은 무보강 콘크리트 라이닝 부재(CASE 1)와 4 종류의 전단면 섬유보강된 두께 60mm 콘크리트 라이닝 (CASE 6, 7, 8, 9) 부재에 대하여 극한하중 상태까지의 연직변위를 나타낸 것이다. 하중 180kN 재하시 변위를 살펴보면, 무보강 부재는 0.942mm, 전단면 보강된 부재는 각각 0.880, 0.756, 0.750, 0.653mm를 나타내었으며, 강섬유와 나일론 섬유를 조합한 콘크리트 라이닝 부재의 변위가 적다는 결과를 얻었다.

콘크리트 라이닝 부재의 전단부에만 섬유보강재를 혼입한 경우와는 달리 전단면에 복합섬유보강재를 혼입한 경우에는 강섬유의 혼입량이 증가할수록 부재의 성능 차이가 크게 발생하였다. 또한 콘크리트 라이닝 부재에 강섬유만 보강한 경우 및 강섬유와 나일론 섬유를 조합한 경우를 비교하면, 강섬유에 나일론 섬유를 조합한 콘크리트 라이닝 부재가 연직변위가 적다는 결과를 나타내었다.

따라서 터널 콘크리트 라이닝은 일차적으로 시공방법상 콘크리트 두께 부족, 상부 공동 등의 결함이 발생할 가능성이 높고, 이러한 구조적 취약부에 2차적으로 숏크리트와 접촉하게 되면 콘크리트 라이닝은 비교적 작은 하중이나 변형에도 쉽게 균열이 발생하게 된다. 이러한 문제점

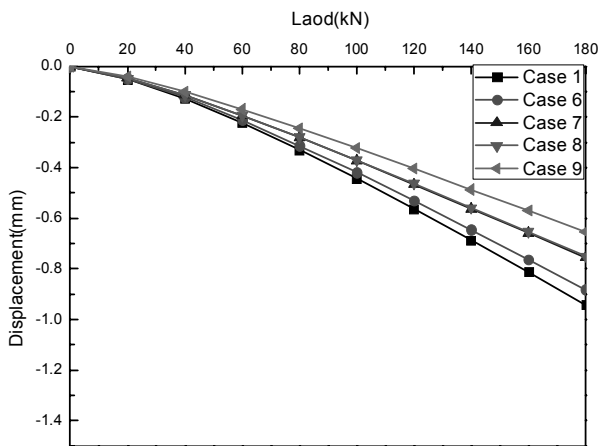


그림 10. 전단면 보강 콘크리트 라이닝 부재의 연직변위(라이닝 두께 60mm)

을 보완하기 위해서는 본 연구에서 제시한 강섬유 또는 강섬유와 나일론 섬유보강 콘크리트를 활용하여 콘크리트 라이닝 부재의 물리적, 역학적 성능 및 내구성을 향상시키고, 구조물의 안전성 및 신뢰성을 확보해야 할 것이다. 아울러 터널 콘크리트 라이닝 전단면 섬유 보강 콘크리트 적용은 경제성 측면에서 상당히 불리함으로 일반적으로 시공되는 콘크리트 라이닝 부재의 설계 두께를 감소시켜 경제성과 더불어 콘크리트 라이닝 부재의 역학적 특성에 대하여 검토해야 할 것이다.

### 4.4 복합섬유 보강 콘크리트 라이닝의 균열제어

그림 11은 무보강 콘크리트 라이닝 부재(CASE 1)와 4 종류의 전단면 보강된 두께 40mm 콘크리트 라이닝(CASE 11, 12, 13, 14) 부재에 대하여 극한하중 상태까지 부재에 발생하는 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 콘크리트 라이닝 부재에 하중 180kN 재하시 연직변위는 무보강 콘크리트 라이닝 부재 0.942mm와 전단면 섬유 보강된 4종류의 라이닝 부재는 각각 1.376mm, 1.270mm, 1.110mm, 0.883mm를 나타내었으며, 강섬유 30kg/m<sup>3</sup>와 나일론 섬유 0.6 kg/m<sup>3</sup>를 조합한 콘크리트 라이닝 부재가 가장 좋은 결과를 얻었다. 따라서, 본 연구에서 터널 콘크리트 라이닝 설계에 있어서, 전단면 복합 섬유보강한 콘크리트 라이닝 두께를 감소시킬 경우에는 실제 벽면에 타설된 강섬유의 혼입량 30kg/m<sup>3</sup> 이상을 사용하는 것이 적절한 것으로 판단된다. 또한 터널 콘크리트 라이닝 부재 해석결과, 나일론 섬유를 강섬유와 조합함으로써 콘크리트 라이닝 부재의

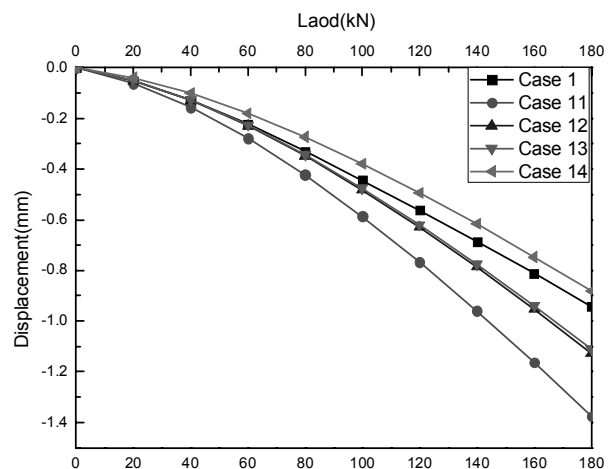
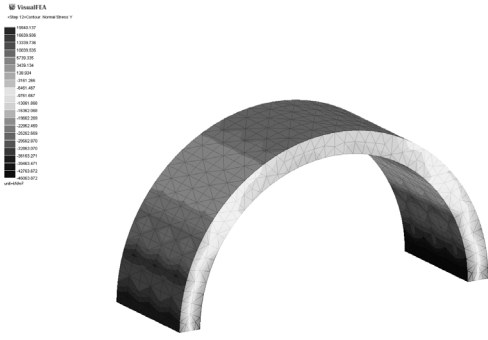
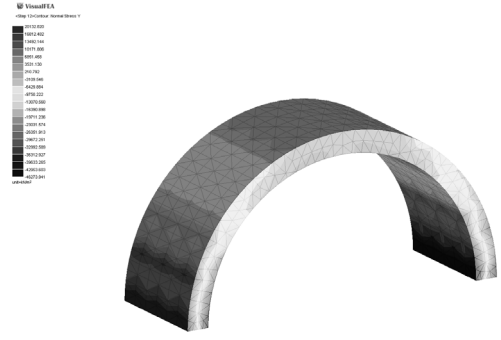


그림 11. 전단면 보강 콘크리트 라이닝 부재의 연직변위(라이닝 두께 40mm)

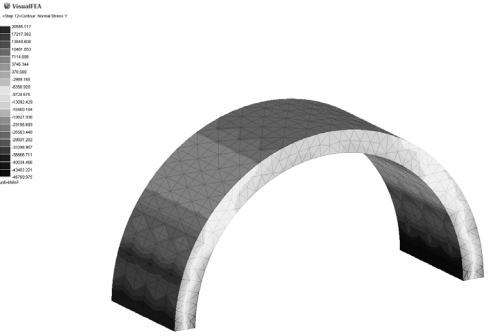




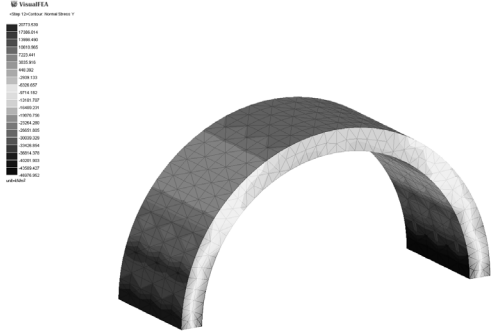
(a) CASE 11



(b) CASE 12



(a) CASE 13



(b) CASE 14

그림 12. 전단면 보강 콘크리트 라이닝 부재의 수직응력 분포

하중재하시 변위 및 변형률 등 성능 개선이 가능한 것으로 나타났다. 이 때 나일론 섬유 혼입량은  $0.6\text{kg/m}^3$  이상으로 하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

보통 콘크리트의 경우, 극한하중에서 콘크리트 단면의 인장측은 인장응력에 대한 저항이 없는 것으로 간주하나, 강섬유와 나일론 섬유를 조합한 콘크리트의 경우는 콘크리트내 섬유의 균열제어 작용과 큰 균열을 연결하는 섬유의 교량효과에 의하여 인장강도가 증가할 뿐만 아니라 휨인성도 증가하게 된다. 따라서 강섬유와 나일론 섬유를 조합한 콘크리트의 경우 극한하중에 이를때라도 단면의 인장측에는 어느 정도 섬유의 인장응력에 대한 저항력이 있게 된다.

그림 12는 전단면 보강 콘크리트 라이닝 부재의 수직응력분포를 나타낸 것이다. 하중이 재하 되었을 때 콘크리트 라이닝 부재 측벽 안쪽에 발생하는 압축응력에도 상당한 역할을 하는 것으로 판단된다. 압축응력시 콘크리트내 섬유는 압축응력 직각방향에 의해 발생하는 미세균열을 제어함과 동시에 콘크리트를 구속하는 역할을 한다. 따라서, 강섬유와 나일론 섬유를 조합한 콘크리트 라이닝은 에너지 흡수능력과 최대 압축응력시 변형률을 크게 감소시켜

압축강도를 증진시킨다.

## 5. 결론

본 연구에서는 터널 콘크리트 라이닝에서 여러 요인으로 발생하는 균열을 보다 효율적으로 제어하기 위하여 콘크리트 라이닝에서 발생하는 균열 특성, 기존 강섬유보강 콘크리트 라이닝과 복합섬유보강 콘크리트 라이닝의 천단부와 전단면에 강섬유와 복합섬유의 혼입률에 따른 콘크리트 라이닝 부재의 파괴하중과 변위에 대하여 수치해석을 수행하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

콘크리트 라이닝 부재의 균열제어를 위하여 천단부 일부에만 보강을 할 경우에는 강섬유와 나일론 섬유를 조합하여 사용하는 것이 균열제어 효과가 뚜렷하며, 이와 같이 복합 섬유보강의 경우 강섬유의 혼입량  $25\text{kg/m}^3$ ,  $30\text{kg/m}^3$ 에는 역학적 특성 차이가 거의 없었다. 따라서 천단부만 섬유보강한 라이닝 부재의 분석결과는 기존 연구결과와 같이 섬유보강 콘크리트의 특징인 파괴에너지의 흡수률도 모호하며, 콘크리트의 연성과 인성을 증가시키는 내용과 유사한 결과를 나타내었다.

또한, 콘크리트 라이닝 부재의 천단부에만 섬유보강재를 혼입한 경우와는 달리 전단면에 복합섬유보강재를 혼입한 경우에는 강섬유의 혼입량이 증가할수록 부재의 성능 차이가 크게 발생하였다. 또한 콘크리트 라이닝 부재에 강섬유만 보강한 경우 및 강섬유와 나일론 섬유를 조합한 경우를 비교하면, 강섬유에 나일론 섬유를 조합한 콘크리트 라이닝 부재가 연직변위가 적다는 결과를 나타내었다.

보통 콘크리트의 경우, 극한하중에서 콘크리트 단면의 인장측은 인장응력에 대한 저항이 없는 것으로 간주하나, 강섬유와 나일론 섬유를 조합한 콘크리트의 경우는 콘크리트내 섬유의 균열제어 작용과 큰 균열을 연결하는 섬유의 교량효과에 의하여 인장강도가 증가할 뿐만 아니라 휨인성도 증가하게 된다. 따라서 강섬유와 나일론 섬유를 조합한 콘크리트의 경우 극한하중에 이를때라도 단면의 인장측에는 어느 정도 섬유의 인장응력에 대한 저항력이 있게 된다.

### 감사의 글

이 논문은 2007년도 교원연구년제 시행에 따른 연구결과 논문임.

### 참고문헌

1. 김상환, 나경우, 고성일 (2006), “대단면 터널 라이닝 콘크리트 타설 기법 개선에 관한 연구”, *한국터널공학회논문집*, 제8권, 제1호, pp.77-86.
2. 김영근, 김유석, 이대혁, 정한중 (1997), “모델시험에 의한 콘크리트 라이닝의 역학적 거동 평가”, *대한토목학회 학술발표회논문집*, pp.373-376.
3. 유광호, 정지성, 박연준 (2008), “강섬유보강 슛크리트의 터널모형실험 및 수치해석적 검증”, *한국암반공학회논문집*, Vol.18, No.2, pp.107-117.
4. 이송, 안태훈, 유오식 (2003), “터널 라이닝의 역학적 거동에 관한 연구”, *대한토목학회 학술발표회논문집*, pp.4641-4646.
5. 이종은, 김태원, 김수만, 전중규 (2009), “유무기 섬유 혼입 터널 라이닝 콘크리트 부재의 성능 평가”, *한국구조물진단유지관리공학회논문집*, 제13권, 제3호, pp.1-9
6. 전중규, 전찬기, 김낙영, 김수만, 이종은 (2006), “모형실험에 의한 터널 콘크리트 라이닝의 천단부 균열 제어에 관한 연구”, *한국터널공학회 논문집*, Vol.8, No.3, pp.227-235.
7. 정수매, 박인준(2009), “NATM 터널라이닝 종방향 균열 제어공법”, *한국터널공학회논문집*, 제11권, 제4호, pp.437-447.
8. Goparaltnam, V. S., Gordon, S. P. and Criswell, B. B. (1991), “Fracture toughness of fiber reinforced concrete”, *ACI Materials Journal*, Vol.88, No.4, pp.339-353.
9. 日本土木學會 (2002), *1/2山岳トンネル覆工の現と策*.
10. 鐵道綜合技術研究所 (1990), *トンネル補強・補修マニュアル I*.

(논문접수일 2010. 4. 7, 심사완료일 2010. 6. 21)