

# NATM 터널라이닝 종방향 균열 제어공법

정수매<sup>1</sup>, 박인준<sup>2\*</sup>

## The control method for axial cracks on NATM tunnel linings

Xiu-Mei Zheng, Inn-Joon Park

**Abstract** It is easily found by several references of NATM that the cracks on the lining concrete of NATM are more developed than those of the conventional tunnel methods. Based on the results of research, the new method is proposed to control and protect the axial cracks on the tunnel linings. Also, the efficiency of proposed method is evaluated using the Distinct Element Method.

**Keywords:** Axial crack, NATM, lining concrete, distinct element method

**요 지** 국내외의 수많은 NATM 터널시공 보고서 및 연구로부터 라이닝 콘크리트에서 재래공법 보다 많은 균열이 발생한다는 것을 쉽게 찾을 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 터널 라이닝의 종방향 균열 제어 및 방지를 위하여 새로운 공법을 제안 하였으며 제안공법의 효율성을 판단하기 위하여 개별요소법을 이용하여 분석하였다.

**주요어:** 종방향 균열, NATM, 라이닝 콘크리트, 개별요소법

### 1. 서 론

1980년대 초반이후 국내 터널 라이닝은 원지반의 강성을 최대한으로 활용하는 NATM 개념을 적용하여 역학적 구조체가 아닌 유지관리와 미관확보의 목적으로 설계 및 시공되었다. 하지만 장기적인 관점에서 보면 1차 지보재가 부담하던 지반하중이 콘크리트 라이닝으로 전이될 가능성이 있다. NATM 개념에서 터널라이닝은 터널 굴착과 동시에 지보재가 설치되고 변위가 완전히 수렴하여 충분한 안정성이 확보된 것을 확인한 후, 평균 두께 30 cm의 콘크리트 라이닝을 현장타설 한다. 그런데 최근에 설계 및 시공 상의 문제로 인해 과도한 균열이 발생되어, 2차적인 누수, 박락, 공동발생 뿐만 아니라 터널 라이닝 자체의 내력저하를 유발하여 구조적인 안정성까지 영향을 미치게 되는 경우가 빈번하게 발생하고 있다. 이러한 문제점을 해결하고 터널 안정성을 향상시킬 수 있는 새로운 터널 라이닝 품질향상을 위한 균열방지용 거푸집 개발 및 도입이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 따라서 라이닝 콘크리트 균열원인을 정리한 기존 자료들을 이용하는 방법을 통해 2차 라이닝 콘

크리트에 발생하는 응력의 증감 및 인장응력 발생 유무를 확인하여 정성적으로 각 요인별로 구분하여 주요 원인을 분석하였다. 그리고 그 분석결과를 토대로 라이닝에 일어나는 종방향 균열 제어 방법을 연구 하였으며 제안방법의 효율성 검증을 위해 수치해석을 통해 비교 분석 하였다.

### 2. 종방향 균열의 원인 분석

국내의 NATM 터널공법은 적용 사례에 비해 많은 균열이 발생하고 있으며, 그 주원인은 1차 지보재(shotcrete, 강지보재, 록 볼트)의 내구성이다. 토피가 얇은 토사라고 해도 터널에서 1차 지보재가 영구한 안정성을 확보해 줄지 의문이다. 또한, 대부분 터널은 도심지 혹은 그 외곽에 다양한 형태로 존재하고 있으며 도시 기능 집약 현상이 현저한 국내 실정으로 보면 터널 인근에 공사를 진행하거나 토피가 얇은 상부 층에 공사 하는 경우가 많다. 이런 것은 터널하중조건 또는 지하수조건 등을 변화시키지만 합리적인 터널 안정성평가가 없이 시공되고 있는 실정이다.

만일 1차지보재의 지보 능력과 지반응력의 1차 평형상태가 균형을 잃게 되면 지반은 변형에 따라 새로운

<sup>1</sup>한서대학교 토목공학과 석사과정

<sup>2</sup>정회원, 한서대학교 토목공학과 교수

\*교신저자: 박인준 (E-mail: geotech@hanseo.ac.kr)

안정 상태에 도달하려 하기 때문에 토압 등의 외력이 내부 라이닝에 작용하게 되어 라이닝 균열의 원인이 될 가능성이 있다 (김상환 외, 2006).

2차 라이닝 균열의 원인이 역학적인 것이라 하면 그것을 정확하게 파악하기란 매우 어렵다. 그 이유는 라이닝 균열 발생 원인을 분명하게 그리고 정확하게 찾아내는 작업이 곤란하고, 어느 한 가지 이유가 아닌 복합적인 원인들로 인해 발생할 가능성이 크기 때문이다.

## 2.1 균열의 특징

NATM 터널공법이 우리나라에 도입되고 보급된 배경은 내구적이고 경제적인 터널 건설에 유용하다는 판단에서였다. 도입 초기에는 1차 라이닝과 지보이론에 관한 연구 위주로 진행 되었다. 그 결과 NATM 터널공법을 재래공법과 비교 할 때 시공법이나 지보재만 약간 다르다는 개념과 달리, Convergence - Confinement Method라 칭할 수 있는 지반과 지보 부재간의 상호작용을 이용하여 주변 지반 내에 지지 Ring을 형성시키는 총체적인 System공법이라는 점을 인식하게 되었다. 그리고 완성된 터널의 실태를 조사한 결과 누수· 변형이 의외로 많다는 점을 인식하게 되었다.

최근에는 보다 수밀성· 내구성을 갖춘 터널의 건설이 요구되고 있으며, 완전 방수나 전단면 라이닝 NATM 터널공법이 주목받고 있다. 그러나 2차 라이닝은 주요 부재로서 취급될 기회가 없었으며 외장재이므로 얇아도 된다는 점만 강조 되고 있었다. 하지만 그림 1과 같이 지속적인 압력에 의하여 NATM터널 2차라이닝에 종방향 균열이 일어나는 경우가 많다.

종방향 균열의 원인은 일반적으로 콘크리트의 급속한 타설로 인한 콘크리트의 침강에 의하여 발생하며 아치 건부의 동일한 위치에서 온도응력이 연속적으로 발생하여 생기기도 한다(일본토목학회, 2002). 표 1에 표시한 것은 최근 국내외에서 NATM 터널공법으로 시공된 터널 중 10개 도로 터널의 사례이다.

국내외의 수많은 NATM 터널공법 시공 실적을 보면 라이닝 콘크리트에서 재래공법 보다 많은 균열이 발견된다는 점은 명확하다(시설안전공단, 1997). 따라서 라이닝 콘크리트와 방수공에 대한 연구와 조사가 필요하다는 점에서 공감하고 있으나, 라이닝 콘크리트의 역할, 설계 방법, 타설 시기, 품질관리, 균열의 발생 시기와 특징 등 많은 문제점 때문에 국외나 우리나라 모두 통일된 견해는 아직 없다.

표 1. 조사대상터널

시설명	연 장(m)	폭원(m)	차선수	공 법	준공년도
GC터널 상행선	660	9.357	2	NATM	1992.11
	하행선	740	9.657	2	"
WO터널 상행선	350	9.357	2	NATM	1992.11
	하행선	400	9.357	2	"
NN터널 상행선	1050	13.400	2	NATM	1994.11
	하행선	1049	13.400	2	"
GN터널 상행선	502	7.200	2	NATM	1991.12
	하생선	495	7.200	2	"
BW터널 상행선	286	7.200	2	NATM	1991.12
	하행선	358	7.200	2	"
GA터널 상행선	752	7.200	2	NATM	1991.12
	하행선	743	7.200	2	"
GH터널 상행선	423	11.464	2	NATM	1989.12
	하행선	468	11.464	2	"
S C 터널	920	9.000	2	NATM	1993.12
B H 터널	330	8.900	2	NATM	-
일본도로 터널	504		2	NATM	미상
O A 터널	920	9.000	2	NATM	-

## 2.2 균열상태 분석

터널 라이닝이 외력을 받아 변형될 때 외력의 작용방향에 의하여 라이닝의 변형과 균열 형태는 다양하다. 외력이 작용할 때의 종방향 라이닝 변형을 그림 2부터 그림 4까지 정리하여 도식하였다(일본철도종합기술연구소, 1990). 그림 2에서는 라이닝 배면에 공동이 있고 지반 반력이 확보되지 않았을 때에 라이닝 아치가 눌러 위로 올라가게 됨을 나타냈다.

그림 3은 지속적인 연직력에 의하여 종방향 균열이 일어난 것을 표시하였다.

그림 4에서 표시한 것처럼 라이닝 배면에 공동이 생기면 상부 암반 덩어리가 퇴적하여 라이닝에 국부적인 하중이 작용하며 경우에 따라서 라이닝이 갑자기 붕괴될 때도 있다.

NATM 터널 공법으로 시공된 터널에 대해 조사한 결과 균열의 발생 시기는 콘크리트 타설 후 3~7일경 또는

수 주후 발생하는 경우가 많다.

터널의 철근보강 구간을 제외한 전 구간에 종방향 균열이 천정 부근 아치부에 발달 되어있으며 대부분 시공 이음부를 경계로 균열의 시종점이 어긋나 있고 균열 폭이 최대 1~2 mm 정도까지 된다.

횡방향 균열은 시공 이음부 전체적으로 발생되어 있으며 일부 span에 종방향 균열과 관련하여 발생하거나 횡방향균열만 존재하는 경우가 있다. 또한 천단부 시공 이음부에는 반원형 균열이 지름 1~2 m정도로 발생되어 있으며 이는 시공시 발생된 것으로 라이닝 두께를 관통한 것으로 판단된다.

라이닝 균열 발생 형태는 터널에 따라 구분할 수 있으며 이는 터널형상, 지질상태, 시공방법, 콘크리트 배합 등에 영향을 받는다. 특히 토질에 따라서 균열 발생률이 상이하지만 대부분 토사지반터널> 연암지반터널> 경암지반터널 순으로 발생률이 높다.

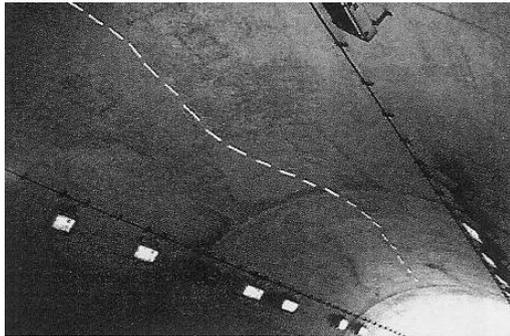


그림 1. 2차라이닝에 발생한 종방향 균열

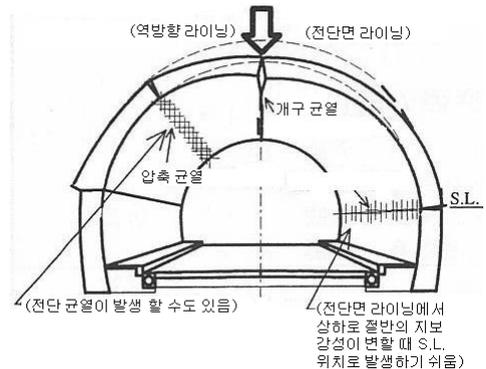


그림 3. 지속적인 연직력 (1)

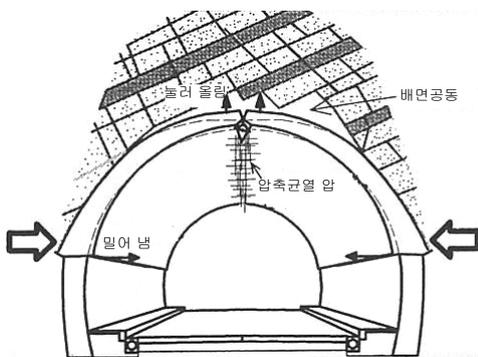


그림 2. 소성압, 수압 동상압

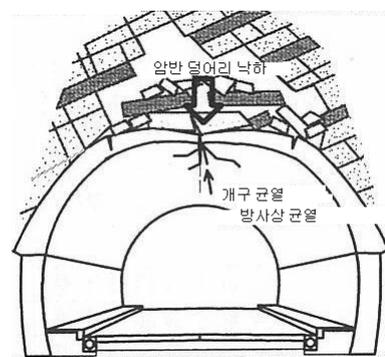


그림 4. 지속적인 연직력 (2)

토사지반터널의 경우에는 조사대상 터널 거의 대부분에서 균열이 다수 발생되어 지반이 불량할수록 균열이 발생하기 쉽다는 결론으로부터 지반상태가 중요한 균열 발생 원인의 하나라는 것을 알 수 있다(고경석 등, 2005).

### 2.3 균열 원인 검토

2.1절에서는 2차라이닝의 기능 및 역할 그리고 균열 상태를 기존의 연구실적과 현장실태 조사를 토대로 살펴보았다. 시공 완료된 터널 또는 사용 중인 터널에서 2차 라이닝의 보수 또는 보강은 여러 가지를 종합해 볼 때 매우 곤란하며 2차 라이닝의 기능을 상실한 경우에는 사회적으로 큰 문제를 발생시킬 수 있으므로 반영구적으로 그 기능이 유지되도록 설계에 반영하는 것이 대단히 중요하다.

전술한 바와 같이 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 전술한 바와 같이 슛크리트와 2차 라이닝과는 방수시트에 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 이루어져야 한다.

## 3. 라이닝 콘크리트 종방향 균열 제어 공법

2장에서 NATM터널에 대해 알아보았고 그 변형과 균

열에 대해서 알아보았다. 2장에서 정리한 바와 같이 NATM터널에서 종방향 균열이 많이 일어나며 균열이 일어나면 터널의 내구성에 영향을 줄 뿐만 아니라 미관적인 효과에도 영향주어 사용자로 하여금 불안감이 생기게 할 수 있다. 그러므로 종방향 균열 제어 공법을 연구하는 것은 터널공학에서 필수적이다 고 할 수 있다. 터널 종방향 균열의 문제점을 해결하는 방법으로 보수 및 보강 공법에 대한 연구는 다수 있었지만 그 제어방법 연구에 대해서는 아직 미흡하다. 그리하여 본 장에서는 그 제어 방법을 연구 하였고 실험 및 수치해석을 통해 그 제어 방법을 검증하였다.

### 3.1 종방향 균열 제어 연구

본 연구에서 말하는 제어는 콘크리트 구조물 균열 제어방법 및 그 구조에 관한 것이다. 더욱 구체적으로 품질시공이 어려워 발생하는 콘크리트 균열을 보다 쉽게 제어할 수 있도록 인위적인 응력집중 홈을 형성시켜 구조물의 품질 및 유지관리가 용이하도록 할 수 있는 콘크리트 구조물 균열 제어방법이다. 그림 5와 같이 터널은 다양한 방법으로 지중을 관통하도록 형성된 콘크리트 구조물이라고 할 수 있는데, 보통 설계도면에 계획된 방향 및 단면적을 가지도록 지중을 굴착하고, 이러한 굴착 내면에 라이닝 콘크리트를 소정의 두께로 형성시켜 굴착에 의한 터널붕괴를 방지하고, 굴착 내부 공간에 차도등을 형성시키는 방식으로 시공된다.

라이닝 콘크리트는 발파 등으로 형성된 굴착내면으로부터 이격되어 설치된 라이닝 거푸집을 설치하고, 라이닝 거푸집에 콘크리트를 채워, 콘크리트가 양생되면 라이닝 거푸집을 해체하여 최종 시공되도록 하는 것이 일

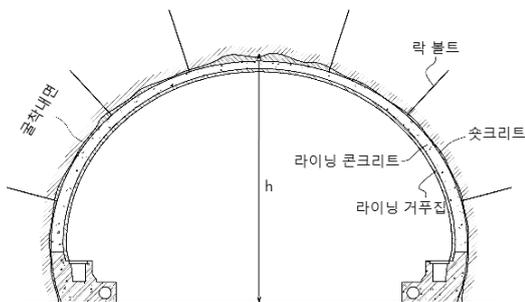


그림 5. 터널 단면

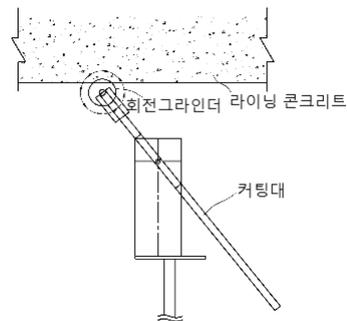


그림 6. 줄눈을 주기 위한 회전그라인더와 커팅대

반적이다 (정준화, 2001). 하지만 라이닝 콘크리트 타설 및 양생 초기에는 발견할 수 없었던 균열이 터널 종방향으로 발생하게 되고, 균열을 따라 누수가 발생하게 되며, 시간이 경과함에 따라 균열의 폭이 확대되어 터널에 있어 하자보수가 요구된다.

이러한 균열은 다양한 요인에 의하여 발생할 수 있지만, 본 연구에서는 시공 상 품질관리 하자에 기인한다고 가정하였다. 즉, NATM공법에 의한 터널시공방법을 기준으로 살펴보면 먼저, 그림 5와 같이 1차적으로 발파에 의한 터널단면이 형성된 이후, 곧 바로 숏크리트로 굴착 단면을 안정화시키게 되며, 락 볼트를 시공하고, 숏크리트가 형성된 터널단면에 라이닝 콘크리트를 형성시키기 위한 라이닝 거푸집을 설치하게 된다. 이러한 라이닝 거푸집은 굴착단면의 형상에 맞추어 보통 강재패널로 제작하게 되는데 라이닝 콘크리트가 소정의 두께를 가지도록 굴착단면으로부터 이격되어 설치된다. 이때 터널 단면 높이(h)가 커지면 커질수록 라이닝 거푸집 내측에 타설되는 콘크리트 주입 높이가 커질 수밖에 없으며, 그 높이가 1.5 m보다 커지게 되면 콘크리트 재료분리 현상 때문에 타설 위치 및 타설 횟수를 변경 또는 추가해야 요구하는 시공 및 품질관리가 가능하게 된다(김낙영 외, 2005).

### 3.1.1 종방향 균열 제어 방법

그림 6은 본 연구와 관련하여 최종 라이닝 콘크리트가 완성되면, 종방향으로 줄눈을 주기 위하여 커팅대와 회

전그라인더를 이용한 기존 종방향 균열제어 방법의 예를 도식화한 것이다. 회전그라인더에 의하여 최종 라이닝 콘크리트의 내측면에 인위적으로 줄눈을 형성시켜 일종의 흡인 줄눈에 의하여 종방향 균열이 유도되도록 한 것이다.

그러나, 커팅대와 회전그라인더를 이용할 경우에는, 그림 7과 같이 대규모 기계적 설비가 필요하기 때문에 다소 비경제적일 수 있다는 문제점이 있다. 또한 라이닝 콘크리트에 의도하지 않은 균열로인해 강도저감 현상이 일어날 가능성도 있다.

그러므로 본 연구에서는 터널, 암거 등과 같은 지중구조물에 있어 거푸집을 이용하여 종방향으로 연속 시공하는 콘크리트 구조물에 발생하는 균열을 효과적으로 제어할 수 있도록 함으로써 시공 및 품질관리에 유리한 콘크리트 구조물 균열 제어방법 및 그 구조를 제공하는 것이다. 본 연구는 거푸집을 이용하여 콘크리트를 타설 함으로써 구조물을 시공하는 방법에 있어서, 인위적으로 균열이 집중되는 홈을 형성시키고, 상기 형성된 홈에 집중된 균열을 보수하는 방법으로 콘크리트 구조물의 균열 제어가 가능하도록 하였다.

터널용 콘크리트 구조물에 응력 집중 홈을 형성시키기 위하여 거푸집 상부 내주면에 응력 집중 홈에 대응하는 응력 집중 홈 형성구가 돌출형성 되도록 하였다. 콘크리트 타설 시, 상기 응력 집중 홈 형성구가 차지하는 공간에 의하여 응력 집중 홈이 거푸집 해체될 경우 자연스럽게 형성되도록 한 것이다.

본 연구를 보다 명확하고 용이하게 설명하기 위해서



그림 7. 줄눈형성 기계 설비

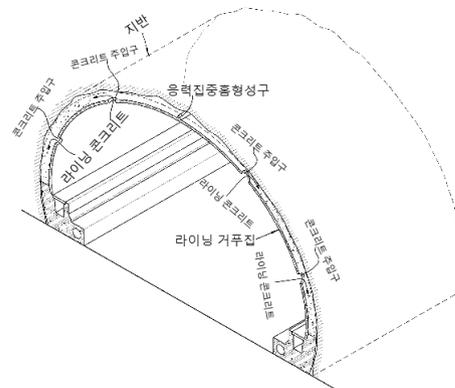


그림 8. 실제 터널에 응력집중 홈 적용한 예

최선의 실시 예를 그림 8, 그림 9에 설명하였다. 그림 8 및 그림 9는 지중구조물인 터널 구조물에 적용한 예로써 터널단면도 및 터널용 라이닝 거푸집을 간략하게 나타낸 것이다.

그림 8의 라이닝 거푸집은 그림 9(a)와 같이 터널 단면의 형상에 따라 강재를 가공하여 패널 형태로 제작하게 되며, 다수의 세그먼트 패널거푸집을 서로 볼트 및 너트에 의한 기계적 체결수단으로 터널 단면의 형상에 대응하도록 제작한다. 종방향은 10 m 이내로 하고, 터널단면의 크기 및 형태에 따라 세그먼트 패널거푸집을 다수 연결하는 방식으로 설치할 수 있다.

그림 9(a) 및 그림 9(b)와 같이 본 연구에서는 터널 단면의 천장부에 적어도 1개 이상의 응력집중 홈 형성구가 형성되도록 한다.

응력집중 홈 형성구의 형성 위치는 콘크리트 타설 시 재료분리에 의한 균열이 특히 많이 발생할 것이라고 예측되는 부위인 터널 천장부이다. 그 이유는 터널 천장부가 높아질 경우 그 천장부는 콘크리트 주입이 사실상 쉽지 않고, 가능하다 하더라도 라이닝 거푸집을 따라 콘크리트가 충전되는 과정에서 그 재료분리 현상이 더 발생할 수 있기 때문이다.

그림 9는 터널의 천장부에 대응하여 배치되는 라이닝 거푸집에 삼각단면 형태의 돌출부가 형성되도록 하여 상기 응력집중 홈 형성구가 형성되게 하였다. 즉, 응력집중 홈 형성구를 라이닝 거푸집에 인위적으로 형성되도록 하여,

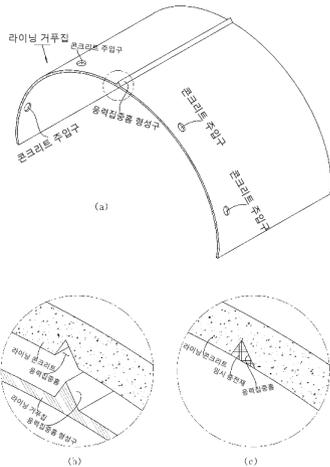


그림 9. 응력집중 홈을 적용한 라이닝 거푸집

록 하여, 상기 응력집중 홈 형성구의 크기, 형상에 따라, 추후 타설되는 라이닝 콘크리트가 배제되도록 하여 라이닝 거푸집 해체 시, 그림 9(c)와 같이 자연스럽게 응력집중 홈 형성되도록 한 것이다. 이러한 응력집중 홈의 작용원리는 완성된 콘크리트에 작용하는 하중은 그 하중에 대한 저항능력이 약한 쪽으로 집중된다는 역학적 원리를 이용한 것이라 할 수 있다. 즉, 균질하게 재료가 분포된 콘크리트 부재에 있어 하중이 작용하면 콘크리트 부재 전체가 하중에 대하여 대응할 수 있게 되지만, 콘크리트 부재의 특정 부위에 균열 또는 홈 등과 같은 하자 발생 부위가 형성되어 있다면 작용 하중은 상기 부위에 집중되어 더욱 더 하자발생부위가 확장된다는 역학적 원리를 이용하여, 본 연구는 인위적으로 콘크리트 구조물인 라이닝 콘크리트에 작용 하중이 집중할 수 있는 응력집중 홈을 형성 시킨 것이다. 이에 암거 구조물과 같이 지중에 종방향으로 연속적으로 설치되는 콘크리트 구조물도 동일하게 본 연구에 의한 응력집중 홈을 형성시킬 수 있다.

### 3.1.2 종방향 균열제어 공법의 시공순서

본 연구와 관련하여 터널 구조물에 응력집중 홈을 형성시키는 방법을 살펴보면 다음과 같다.

- ① 터널 굴착 공정: 굴착공정은 기계적 장치를 이용하되 NATM공법은 발파에 의한 방법이 이용 된다.
- ② 라이닝 거푸집 설치 공정: 연구에서는 터널 단면의 천장부에 응력집중 홈이 자연스럽게 형성될 수 있도록 그림 9와 같이 응력집중 홈 형성구가 형성된 라이닝 거푸집을 이용한다.
- ③ 라이닝 콘크리트 충전 공정: 콘크리트 주입구로 라이닝 콘크리트를 주입시켜 타설하게 되면, 라이닝 거푸집 내부로 상기 라이닝 콘크리트가 충전되게 된다.
- ④ 라이닝 거푸집 해체 공정: 충전 작업에 의하여 라이닝 콘크리트 거푸집 내측에 충전된 후 양생되면, 라이닝 거푸집을 해체한다.
- ⑤ 임시 충전재 충전 공정: 응력 집중 홈은 터널 내부에 있어 그대로 노출되기 때문에 추후 용이하게 응력 집중 홈으로부터 분리할 수 있도록 모르타르와 같은 임시충전재를 충전시켜 마감하고, 미관도 고려한다.
- ⑥ 균열 보수 공정: 균열은 응력집중 홈 및 그 부위에

집중되도록 유도되어 있기 때문에, 응력집중 흡에 충전된 임시충전재를 제거하여 균열 발생을 최종 확인하고, 이러한 균열에 보수용 모르타르와 같은 균열보수재를 침투시켜 균열이 더 확장되지 않도록 하는 등의 보수작업이 이루어진다.

- ⑦ 임시충전재 재 충전 공정: 보수 작업이 최종 완성되면 응력집중 흡을 원래의 형태를 가지도록 마감하고, 임시충전재를 재 충전시켜 응력집중 흡이 다시 재생될 수 있도록 하여 추후 보수가 가능하도록 하게 된다.

시공순서를 간략하게 표시하면 그림 10과 같다.

### 3.2 콘크리트 종방향 균열 2차원 입자유동해석

본 연구에서는 종방향 응력 집중 흡의 최적 형상비(유도균열비)를 결정하기 위하여 콘크리트 입자유동해석이 가능한 개별요소해석법(DEM, Distinct Element Method)을 근간으로 하고 있는 사용PFC프로그램을 사용 하였다.

개별요소해석법은 1971년 Dr. Cundall 에 의하여 개발되었다. 개별요소해석법은 해석 대상의 구조체를 입자 형상의 요소에서 집합체로 모델화하고 각 요소의 이동, 회전을 시간 영역에서 해석하는 방법이다. 현재까지 개별요소해석법은 암석과 같이 균열이 생기는 비연속체의 정적, 동적 거동과 박리, 비산이 생기는 콘크리트의

충격 문제의 해석법에 주로 적용되었다. DEM요소간에 여러 조건을 부가함에 따라서 마찰과 미끄럼, 균열, 박리 등의 현상을 표현 가능하게 되었다. DEM에서는 입자 상호작용이 내력균형(Internal Force Balance)을 유지하기 위하여 평형 상태로 유지하고자 하는 동적인 과정을 해석한다. 입자의 접촉력(Contact Force)과 변위는 개개 입자의 변위를 추적하여 결정되고 체적력(Body Force), 입자유동, 벽(Wall) 요소의 변위 등으로 인하여 전체 시스템의 불균형력이 전파된다. PFC에서는 개별요소해석법(DEM)을 이용하여 강체인 원형입자 조합의 응력과 변위의 상호작용을 모델링한다. 입자의 강성은 접촉점에서의 법선방향 및 접선방향 스프링 계수에 의하여 표현되고, 입자간의 접촉력은 접촉점에서 가정한 스프링으로부터 계산할 수 있다. 그림 11에서는 DEM의 접촉모델을 표시 하였다.

일반적인 의미의 개별요소해석법에서는 변형 가능한 다각형 요소의 해석이므로 PFC는 DEM의 간편한 적용법이라 할 수 있고 개별요소해석법도 기본적으로는 뉴턴의 제 2 운동법칙을 따르며 힘-변위 관계식은 간단히 정리하면 아래와 같다

- 접촉력(힘)은 상대변위와 요소의 강성도로부터 계산하며 법선성분 및 전단성분으로 분해됨
- 상대변위는 두 요소의 중첩되는 거리임
- 단위접선벡터:  $n_i = \frac{x_i^{[B]} - x_i^{[A]}}{d}$
- 입자간 거리:  $d = |x_i^{[B]} - x_i^{[A]}| = \sqrt{(x_i^{[B]} - x_i^{[A]})(x_i^{[B]} - x_i^{[A]})}$
- 입자간 중첩량:  $U^n = R^{[A]} + R^{[B]} - d$
- 접촉력:

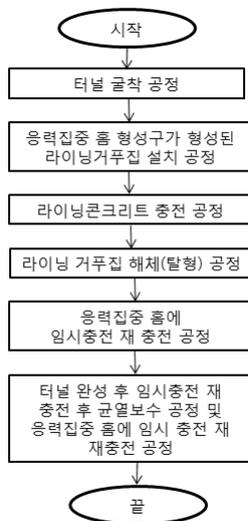


그림 10. 응력집중 흡을 적용한 터널 시공 순서도

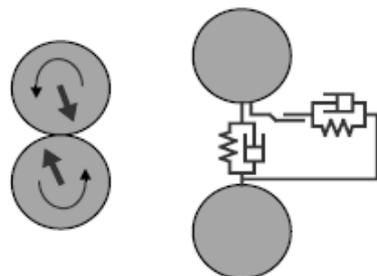


그림 11. DEM의 접촉모델

$F_i = F_i^m + F_i^s$ ,  $F_i^m = K^n U^n n_i$ ,  $\Delta F_i^s = -k^2 \Delta U_i^s$   
 여기서,  $K^n$  = 총 변위 - 힘 관계에서의 할선계수  
 $k^s$  = 각 계산단계의 변위증분-힘 관계에서의  
 접선계수

### 3.2.1 해석 개요

콘크리트 라이닝을 유한한 입자의 접촉으로 구성된 개별요소의 집합체라 간주하고 개별요소법을 적용하여 라이닝 유도균열의 영향에 대한 2차원 입자유동해석 수행한다. 유도균열 형상(썩기형)에 대한 Case Study를 수행하여 균열 및 응력집중에 가장 유리한 형상을 결정한다. 표 2에 그 검토 방법을 표시 하였다.

#### 1) 입자유동해석 개요

PFC(Particle Flow Code)는 원형 입자의 유동과 상호작용을 개별요소해석법(Distinct Element Method)에 의하여 수치적으로 해석하는 프로그램이고 입자의 운동방정식과 접촉점에서의 힘-변위 관계식을 적용하여 입자의 거동을 산정하게 되며, 다음과 같은 과정에 따른다.

- ① 입자 요소와 벽 요소의 위치 좌표로부터 접촉상태 점검
- ② 힘-변위 관계식으로부터 각 접촉점의 접촉력 계산
- ③ 운동방정식을 이용하여 외력, 모멘트, 속도, 위치 계산
- ④ 계산 단계마다 반복수행

PFC의 힘-변위 관계도를 개략적으로 나타내면 그림 12와 같다.

여기서 변형은 접촉점에서만 발생하는 것으로 가정하

표 2. 검토 방법

검토내용	검토방법 및 적용 프로그램
입자유동해석	2차원 입자유동해석 프로그램 → PFC2D(Ver. 3.1)

표 3. Case별 해석 조건

Case	해석 조건
0	유도균열 없음
1	균열높이(h)/균열하부폭(d) = 0.5, h=5 cm
2	균열높이(h)/균열하부폭(d) = 1.0, h=5 cm
3	균열높이(h)/균열하부폭(d) = 1.5, h=5 cm

고 접촉 강성도는 접촉 모델에 따라 선형 또는 비선형으로 나타내며 PFC에서는 선형접촉모델 또는 Hertz-Mindlin 비선형 접촉모델 구현가능하다. PFC 모델은 기본적으로 Ball과 Wall로 구성되고, 상호 접촉작용 및 운동방정식에 따른 변위는 Ball 요소에서 발생하고 경계조건은 Wall에서 설정된다.

#### 2) PFC 모델의 가정조건

- ① 모델을 구성하는 개개의 입자요소의 형태는 구형
- ② 각 입자는 강성체임
- ③ 각 입자간의 접촉 형태는 극히 작은 면적으로 가정
- ④ 강성입자들은 접촉점에서 미소한 정도의 중첩을 허용
- ⑤ 중첩양은 접촉력과 힘-변위 관계에 의하여 결정되며, 중첩양은 입자 크기에 비하여 미소함
- ⑥ 접촉 입자간의 파괴 여부는 결합 강도로 규정됨

### 3.2.2 수치해석 및 결과

수치 해석방법은 개별요소해석인 DEM으로 진행 하였으며 적정 간극 비를 가지는 입자로 구성된 영역을 구성한 후 외력 재하로 정적해석을 수행 하였다. 해석지반모델은 목표 간극비가 0.10~0.14인 선형접촉 모델(Parallel Bond Model)을 적용 했다. 본 제안 방법의 검증을 위하여 상용 DEM 프로그램인 PFC2D(VER 3.1)를 해석프로그램으로 사용하였으며, 좌우 및 바닥 고정변위조건(Fixed Boundary)을 경계조건으로 하여 변형을 제어방식으로 라이닝에 일정속도 변위(1.0 cm/sec)를 가하는 것을 하중조건으로 하였다. 본 논문에서는 유도균열 높이와 균열 하부폭을 4가지 경우로 나누었고 각 해석조건별 정리는 표 3과 같다.

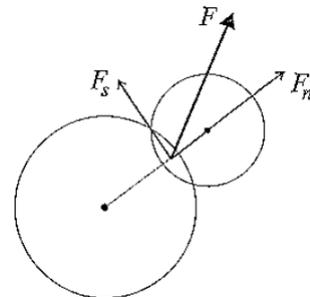


그림 12. PFC의 입자거동 힘-변위 관계도

즉 2차원 입자유동해석으로 콘크리트 라이닝에 유도 균열을 반영하여 Case Study 해석을 수행하려고 한 것이다. 그림 13(a)부터 그림 13(d)까지는 Case0부터 Case3 까지의 수치모델링 결과를 나타낸 것이다.

그림 14(a)부터 그림 14(d)까지는 Case0부터 Case3까지의 접촉 결합력 분포도와 접촉 전단력 분포도를 정리한 것이다.

위의 분포도를 면밀하게 분석하면 아래와 같은 결과를 얻을 수 있다.

1. 유도균열비(h/d) 값에 상관없이 균열이 있는 경우와 없는 경우는 내부 접촉응력의 발생 경향이 현저히 상이하게 발생하였다.
2. 유도균열비값이 증가함에 따라 균열 주위로 응력집중 현상이 뚜렷하게 발생하였으며 접촉 전단력도 균열 상부로 집중되는 경향을 보인다.

3. h/d=1.5인 경우, 접촉 결합력 및 전단력 집중으로 인하여 균열주위를 제외한 나머지 부분의 응력전이가 제어됨을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 터널 라이닝의 종방향 균열제어를 위하여 새로운 공법을 제안 하였으며 제안공법의 효율성을 판단하기 위하여 개별요소법을 이용하여 분석하였다. 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 기존 연구를 기초로 발생 가능한 라이닝균열을 제어하기 위한 방법으로는 유도균열의 설치가 비교적 효과적이며 경제적이라고 판단된다.
2. 본 연구결과 응력 집중 흡의 형상비는 유도균열비가 1.5를 유지하도록 시공하여야 한다.

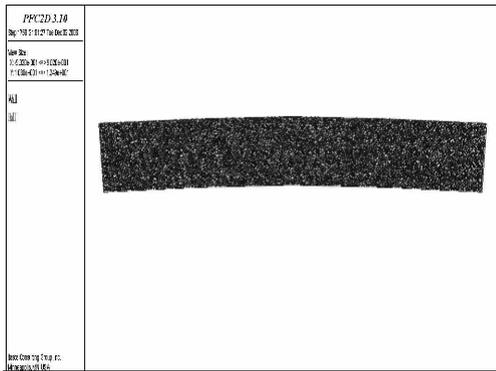


그림 13(a). Case0의 모델링 결과

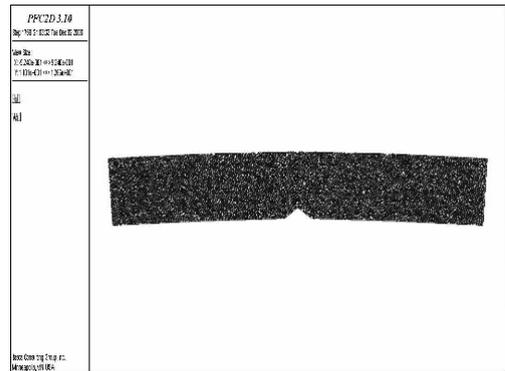


그림 13(b). Case1의 모델링 결과

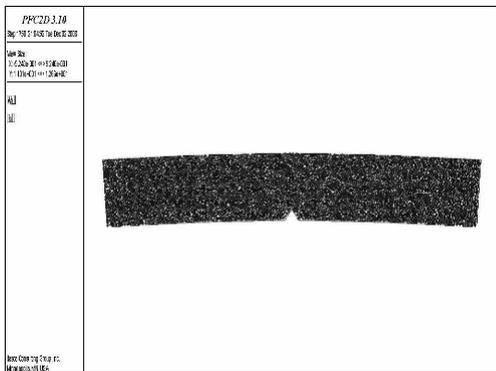


그림 13(c). Case2의 모델링 결과

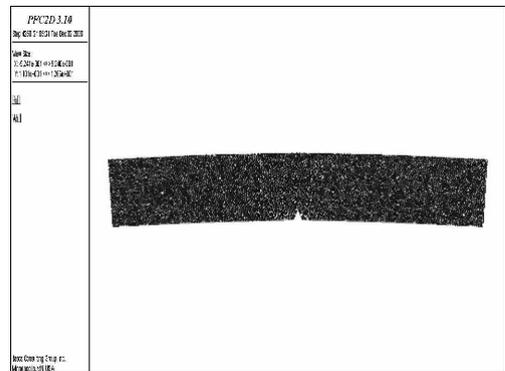


그림 13(d). Case3의 모델링 결과

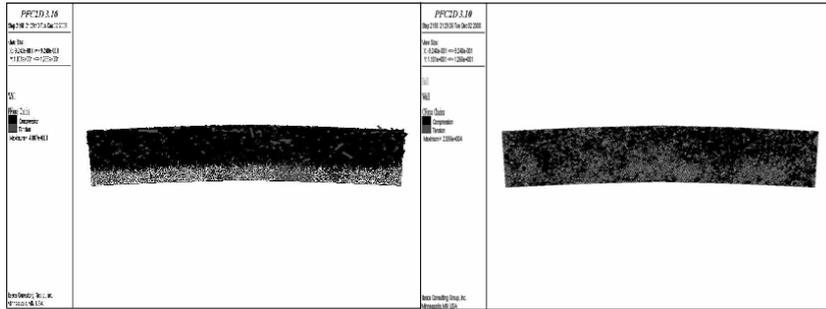


그림 14(a). Case0의 접촉결합력 분포도와 접촉전단력 분포도

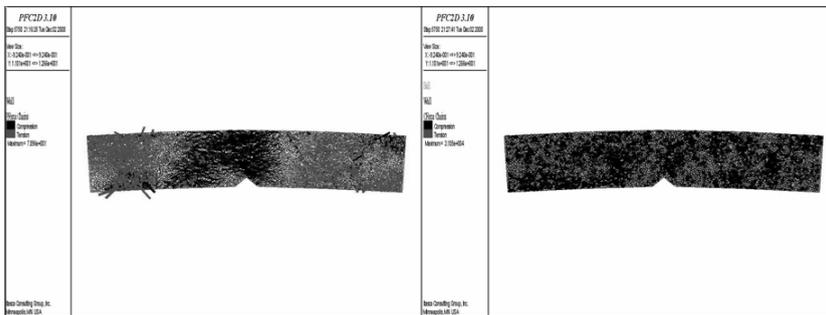


그림 14(b). Case1의 접촉결합력 분포도와 접촉전단력 분포도

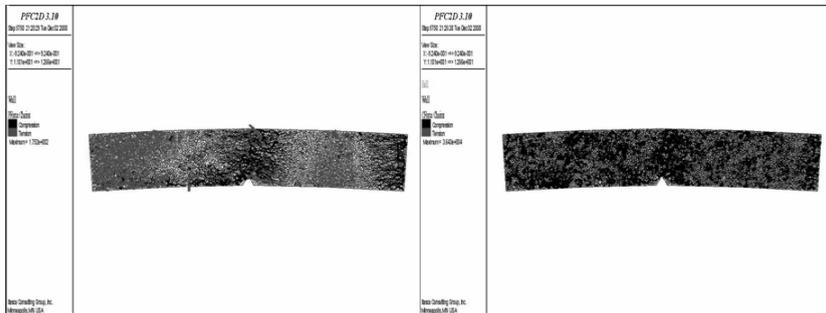


그림 14(c). Case2의 접촉결합력 분포도와 접촉전단력 분포도

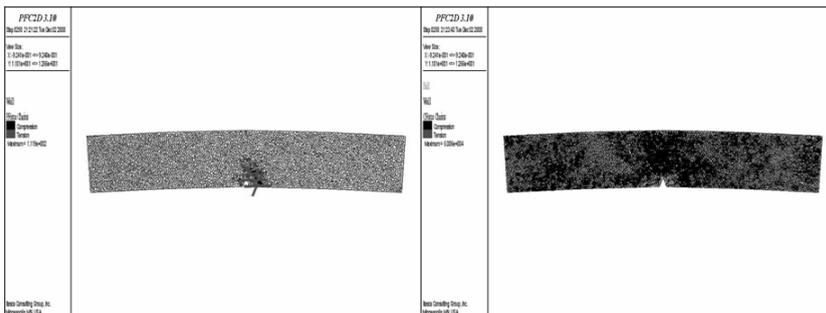


그림 14(d). Case3의 접촉결합력 분포도와 접촉전단력 분포도

www.kci.go.kr

3. 본 연구에서 제안한 방법으로 종방향 균열을 제어함으로써 종방향균열로 인한 내구성 문제를 해결할 수 있고 시각적으로 주는 불쾌감도 해결할 수 있음을 알 수 있었다.
4. 본 연구는 제한된 변수를 이용하여 수행한 Parameter Study 이므로 향후 더 많은 조건을 고려한 해석 및 현장적용을 통하여 최적 균열비를 결정할 수 있을 것으로 예상되고, 라이닝 두께에 비하여 균열높이가 클 경우, 균열상부 응력집중으로 인한 파괴가 발생할 수 있으므로 적정 균열높이에 대한 연구도 차후 수행되어야 한다.

### 감사의 글

“이 논문은 08년도 한서대학교 교비 학술연구 지원 사업과 삼성건설의 연구비 지원에 의하여 연구되었음”에 심심한 사의를 표합니다.

### 참고문헌

1. 고경석, 박준현, 김성민, 김승조, 김양균, 안형준, 유진오, 유정훈 (2005), “계룡터널 발파-구조물 병행시공을 위한 실험 연구”, 코오롱건설(주).
2. 김낙영, 심재원, 심종성, 원종필 (2005), “터널 콘크리트 라이닝 폭열 방지를 위한 폴리프로필렌 섬유 혼입을 분석 연구”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제7권, 제4호, pp. 323-333.
3. 김상환, 나경웅, 고성일 (2006), “대단면 터널 라이닝 콘크리트 타설 기법 개선에 관한 연구”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제8권, 제1호, pp. 77-86.
4. 시설안전기술공단 (1997), “NATM터널(도로)의 종방향 균열 원인 분석과 보수·보강공법연구”.
5. 정준화 (2001), “대단면 터널의 지보 및 라이닝 CONC. 시공”, 제1회 터널 시공기술 향상 대토론회, pp. 63-78.
6. 鐵道綜合技術研究所 (1990), “トンネル補強・補修マニュアル I”.
7. 日本土木學會 (2002), “山岳トンネル覆工の現状と対策”.

접수일(2009.9.24), 수정일(2009.10.15), 게재확정일(2009.10.20)