

# NATM 터널에서의 균열원인과 대책

Why the crack was occurred and how to care in the NATM

최 영 돈\*

Choi, Young Don

## 목 차

- I. 서 론
- II. NATM에서의 균열특징
- III. 균열의 발생원인
  - 1. 외부구속
  - 2. 수축변형의 발생원인
- IV. 라이닝 콘크리트의 변형 및 온도축정 사례
- V. 균열의 방지대책
- VI. 다우에른 터널의 균열대책

## I. 서 론

과거 몇년간 우리나라에서는 국토의 효율적 관리의 일환으로 지하공간에 대한 활발한 논의가 이루어져 왔으며 최근 들어서는 산악 터널, 도심지하철 등에서 지하공간에 대한 다양한 이용이 시도되어지고 있다.

특히, 도심지하철에서는 개착식으로 시공할 경우 차량소통 및 주변환경 등의 문제가 야기되므로 터널식에 의한 시공이 지하철을 중심으로 광범위하게 이루어지고 있다.

도심지하철의 터널의 시공은 NATM(New Austrian Tunnelling Method)의 도입이후 시공 경험의 축적과 더불어 다양하고 광범위하게 적용되고 있

다.

이러한 NATM의 기본개념은, 재래식 터널공법과는 달리, 터널을 지지하는 가장 주요한 지보재를 터널의 주변 원지반으로 보고, 이 주변 원지반이 보유하고 있는 지보기능을 최대한 활용하는 것이다. 그리고 원지반을 지보재로 사용하기 위하여 보조적으로 Shotcrete, Rock Bolt가 사용되고 있다.

Shotcrete의 주요 역할은 굴착면을 덮어찌워 원지반의 움직임의 구속 및 침식을 방지하고, 굴착면의 요철을 줄여 응력의 집중방지 및 콘크리트 아치로 작용하여 하중을 분담하여 암반의 균열을 보강하여 주는 것이다. 또한 Rock Bolt는 지반을 봉합시켜 줌으로서 원지반의 내공변위에 저항하고 인발의 발생을 억제함으로써 원지반의 전단활동면의 움직임에 저항하는 역할을 하고 있다.

이러한 NATM의 과거 몇년간의 시공실적을 통하여 보며 최근들어 다양한 문제가 제기되고 있으며, 그중에서도 라이닝 콘크리트의 균열에 대한 문제가 가장 많이 제기되고 있다.

라이닝 콘크리트의 균열 발생원인은 지반의 조건, NATM의 시공방법, 재료 등 다양한 요인이 복합된 것으로 연구결과가 보고되어지고 있으나, 원칙적으로 NATM터널의 설계개념이 라이닝 콘크리트 응력을 받지 않는 것으로 보기 때문에 이에 대한 정확한 원인분석의 필요성이 절실하게 대두되고 있다.

그래서 이러한 터널 라이닝의 균열에 대한 고찰을 일본 및 오스트리아 사례를 중심으로 이 글에서 소개하고자 한다.

\* 大林産業(토목설계연구부 과장)

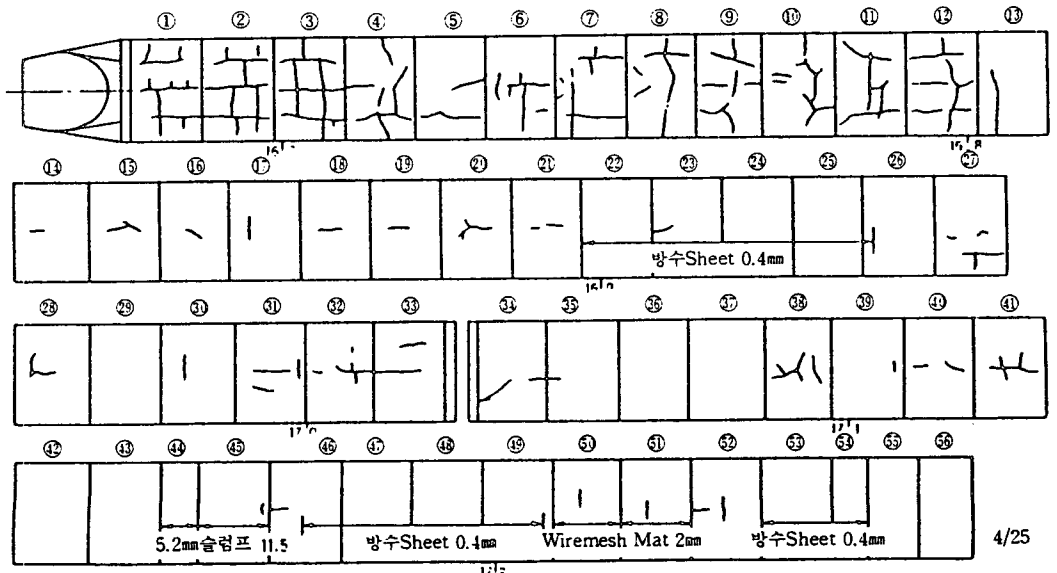
## II. NATM에서의 균열특징

지질성상(지압)·콘크리트 재료·콘크리트 시공법 및 환경조건에 기인하여 터널복공 콘크리트에 균열이 발생하는 사례가 종종 나타나고 있다. 근래 NATM 보급과 함께 복공 콘크리트에 균열이 발생하는 사례가 재래공법에서 보다 많다고 하며, 사례 보고도 있다.

NATM 구간중 방수 sheet를 시공한 구간에서는 균열이 없거나 타구간보다 적다는 점은 명확한 것으로 나타나고 있다. NATM에서의 균열특징은 콘크리트 타설 후 수일내에 발생이 시작되며, 한랭기(혹한기)에 발생하기도 한다. 터널의 종단과 횡단 양방향으로 폭이 미세한 균열이 발전되며, 그물망 형상을 나타내는 경우가 많다.(〈표 1, 2, 3〉, [그림 1])

〈표 1〉 NATM과 재래공법의 균열의 특징

항 목	N A T M	재 래 공 법
발생시기	콘크리트 타설후 수일(재령 3일경)에 발생하기 시작한다. 재령의 경과에 따라 점차 증가한다. 또한, 한랭기에 급히 발생한다.	좌동. 단, 발생하지않을 때도 있다.
발생상태	터널 종·횡단방향으로 발생하여 그물망 형상으로 보인다.	주로 터널 횡방향으로 발생한다. 1 span(10.5~12m)에 1~2개소
균열의 길이나 폭	그물망 형상이 되기 위하여 갈라짐이 생기지만 균열의 총연장은 길어진다. 개소소가 많으므로 균열폭은 작다. (1mm이하)	터널 횡단방향으로 전체둘레에 발생하는 경우가 많다.(측벽과 아취부 타설시 시공요인트가 있는 경우는 이음부에서 발생한다.) 1span에 1~2개소의 균열이 생기므로 균열개소가 적어 균열폭은 크다.(1mm이상)







### Ⅲ. 균열의 발생원인

콘크리트에 균열이 발생하는 요인은 [그림 2]에 도시한 바와 같이 종류가 많으며, 각 요인에 따라 균열의 발생시기·진행방향·균열의 폭 등에 특징이 있다.

NATM 구간과 재래공법구간과 동시에 콘크리트를 동일조건하에서 시공하여도 NATM구간만 유독 균열이 발생한다는 점으로 부터, 재래공법의 복공 콘크리트의 차이점을 검토한다.

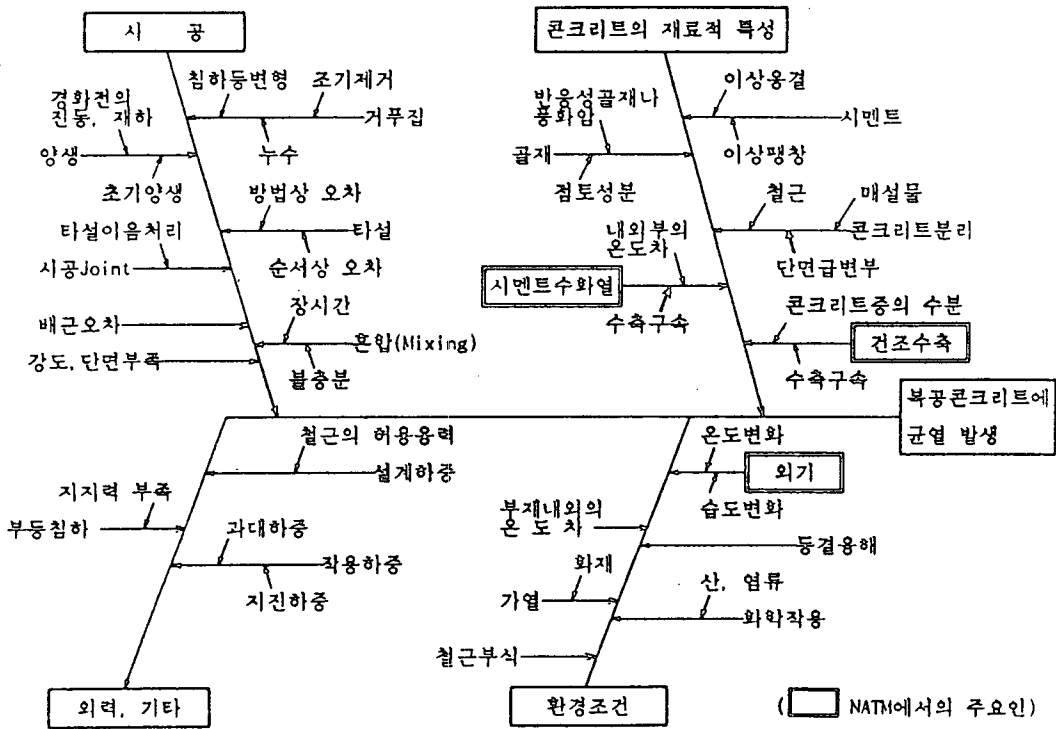
주된 차이점은 다음과 같다.

① 라이닝의 두께는 일반적으로 NATM이 얇다.

② NATM에서는 지반과 밀착된 Shotcrete와 라이닝 콘크리트가 접하고 있다.

③ NATM에서는 일반적으로 터널의 변형이 수렴된 후 2차 복공을 시공한다.

다음으로 NATM구간에서도 방수sheet를 shotcrete와의 사이에 삽입한 구간에는 균열의 발생이 작은 경향임에 따라 상기 차이점중 「② shotcrete와 접하고 있다는 점(외부구속)」이 균열의 주된 발생원이라고 추정된다.



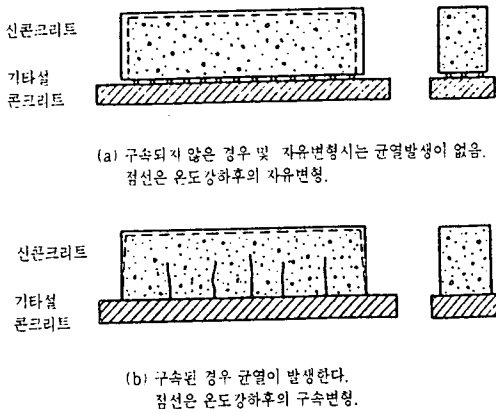
[그림 2] 복공콘크리트의 균열발생과 특성요인도

#### 1. 외부구속

콘크리트는 온도저하와 건조에 따라 수축하며, 수축을 경계면(shotcrete 복공면)에서 구속하게 되면 콘크리트가 수축할 때 부족한 수축변형에 상응

하는 인장응력이 발생한다. 발생한 인장응력이 그 시점에서의 (재형)인장강도보다 큰 경우에는 구속면측을 따라 균열이 발생한다.[그림 3]

이러한 외부구속이 작용하는 경우의 인장응력은 일반적으로 다음 식으로 표시한다.



[그림 3] 온도균열의 발생 메카니즘

$\sigma_i = K_R \cdot E_C \cdot \epsilon_s$   
 여기서,  
 $\sigma_i$  : 인장응력 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $E_C$  : Creep 효과를 고려한 각 재령에서의 콘크리트 탄성계수  
 $\epsilon_s$  : 각 재령에서의 수축변형  
 $K_R$  : 구속도

- 구속되지 않은 경우  $K_R = 0 \therefore \sigma_i = 0$
- 완전구속인 경우  $K_R = 1 \therefore \sigma_i = E_C \cdot \epsilon_s$
- $K_R$ 이 큰 쪽이 균열이 발생하기 쉽다.

○ 온도수축의 경우에는  $\epsilon_s = \alpha \cdot \theta$ 가 된다.

$\alpha$  : 열팽창계수 ( $7 \sim 13 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )  
 $\theta$  : 온도강하량 ( $^\circ\text{C}$ )

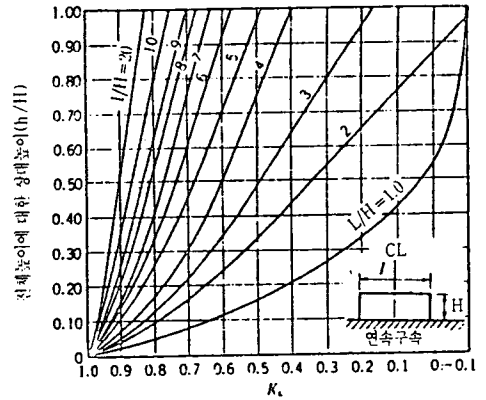
○ 건조수축에 대해서는 어느 정도 계산식이 제안되어 있지만 상당히 복잡하므로 생략하였다.

구속도  $K_R$ 은 부재의 형상 등에 따라 변화하기 때문에 정확한 평가는 곤란하다. 구속물체가 완전 강성체인 경우의 구속도의 추정도는 [그림 4]과 같다.

실제의 구속물체도 탄성체이므로 다음식에 의거 수정계수  $M$ 을 [그림 4]의  $K_R$ 에 곱하여 구속도를 저감시킨다.

$$M = \frac{1}{1 + \frac{A_C \cdot E_C}{A_F \cdot E_F}}$$

여기서,



[그림 4] 중앙단면에 대한 구속도

$A_C$  : 콘크리트의 단면적 (cm<sup>2</sup>)  
 $A_F$  : 구속물체의 단면적 (cm<sup>2</sup>)  
 $E_F$  : 구속물체의 Young계수 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 단, 암반과 같이 단면적이 무한대인 구속물체에서는  $A_F/A_C = 2.5$  (최대치)가 된다.

상기한 [그림]과 (식)에 따라 라이닝의 구속도를 Shotcrete면의 요철상태, Shotcrete의 두께, 밀착상태(간극의 정도), 암반의 경도(Young 계수)와 라이닝의 두께에 따라 변함으로 추정한다.

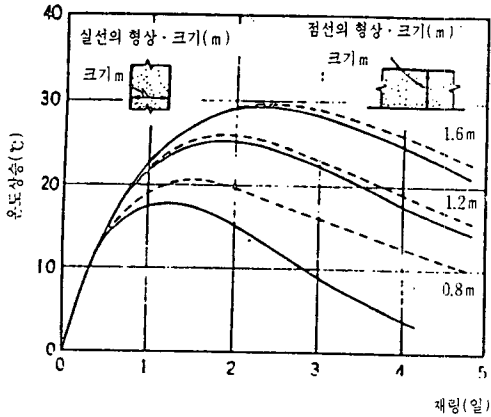
## 2. 수축변형의 발생원인

콘크리트에 수축변형이 발생하는 주된 원인은 다음과 같다.

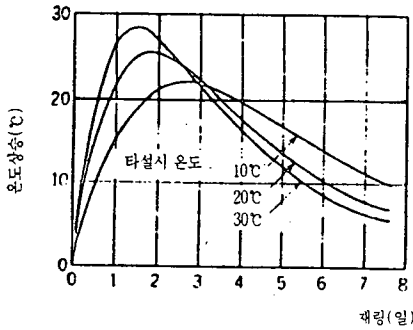
가. 경화온도의 강하에 따른 온도수축

시멘트는 물과 반응하여 수화열을 발생하며 경화한다. 콘크리트 타설 후 수화열에 의해 온도가 상승한 후 외기온도까지 강하한다. 온도상승은 시멘트의 종류, 단위시멘트량, 타설온도, 부재의 형상 및 크기, 열의 발산조건에 따라 상당히 다르다. [그림 5]

NATM 라이닝에는 타설 후 약 1일에 최대온도 (15 $^\circ\text{C}$  정도 상승)를 보이다 점차 온도가 하강한다. 타설 후 3일 전후에 10 $^\circ\text{C}$  정도 떨어지며, 균열이 발생하기 시작한다. 즉 이러한 요인에 의한 균열은 균열발생이 콘크리트 타설 후 3일 전후에 나타나는 특징이 있다.



(a) 부재의 온도상승(형상·크기의 영향)  
(보통시멘트, 단위시멘트량 320kg/m<sup>3</sup>,  
타설시 온도 20℃)



(b) 부재의 온도상승(타설시 온도의 영향)  
(보통시멘트 단위시멘트량 300kg/m<sup>3</sup>,  
1.2m 벽체인 경우)

[그림 5] 콘크리트 부재의 수화열에 의한 온도상승

#### 나. 외기온도 저하에 의한 온도수축

기후변화나 터널의 관통에 따른 갱내온도가 저하한 경우에는 콘크리트의 온도도 저하하여 수축이 된다. 이러한 요인에 의한 균열은 하절기에 타설된 콘크리트는 혹한기가 되면 급격히 균열이 발생하며, 터널관통후 급격히 발생하는 특징이 있다.

#### 다. 건조수축

시멘트 페이스트는 건조하면 수축한다. 콘크리트의 건조수축량은 단위시멘트량, 단위수량 및 단위골재량 등에 따라 변화한다. 앞의 2개 항목은 시멘트 페이스트의 수축량을 결정하며, 일반적으로 단

위시멘트량, 단위수량이 크면 수축량이 크다. 골재는 이러한 수축을 구속하는 역할을 한다. 이러한 건조수축의 Mechanism은 복잡하며, 여러가지로 설명되고 있기는 하나 정설은 없다고 본다.

이러한 요인에 의한 균열은 습도가 높은 갱내조 건하에서는 발생치 않는다. 그러나 갱구부근과 같이 습도가 낮은 구간이나 터널통과후 통기상태가 좋게 되어 습도가 낮아지면 발생하기 쉽다. 콘크리트의 건조는 표면에서부터 점차 내부로 진행되기 때문에 급격한 습도변화시에는 내외부면의 수축량의 차이로 인해 콘크리트 표면에 균열이 발생한다. 장기간에 걸친 건조수축의 경우에는 Shotcrete면의 외부구속에 의한 균열발생도 생각할 수 있다.

이상의 3가지 요인이 라이닝 콘크리트에 수축을 발생시키는 주된 요인이라고 추정할 수 있으며, 이중 2가지 이상의 요인이 중첩작용하는 경우가 있다. 이러한 경우에는 균열이 보다 발생하기 쉬우며, 발생시기도 앞당겨진다.

현재 균열발생 요인은 거의 규명되어 가고 있지만, 콘크리트 재료·시공조건·환경조건 등에 따라 수축량의 차이 및 라이닝 콘크리트의 형태, 암반성상, 두께, 타설방법 등에 따라 구속도가 차이가 나므로 터널마다 균열발생 상황이 달라지게 된다. 따라서 일후 보다 많은 터널에서 균열의 실태조사, 계측데이터 등을 비교검토하여 보다 정밀한 원인을 조사할 필요가 있다는 생각이다.

## IV. 라이닝 콘크리트의 변형 및 온도측정 사례

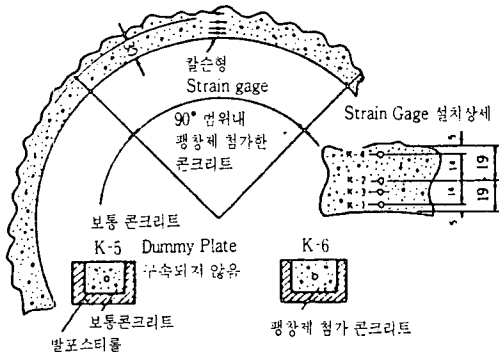
균열의 발생원인을 정량적으로 파악키 위해서는 콘크리트의 온도와 변형, 갱내온도와 습도의 측정이 중요하다. NATM의 라이닝 콘크리트에서의 측정 데이터는 아주 적지만 그 일례를 도시하였다.

이 터널의 데이터에서는 다음과 같은 점이 규명되었다.

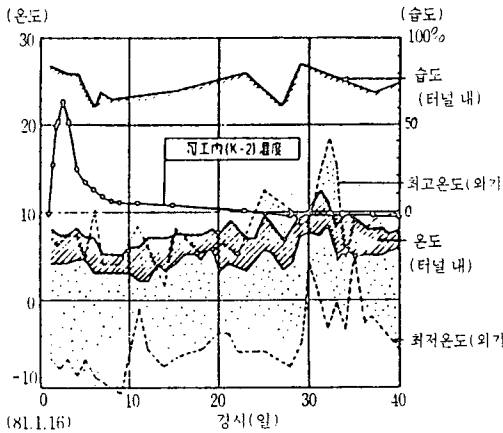
#### 가. 온도변화[그림 7]

콘크리트의 온도는 타설후 약 2일에 최대가 되고 7~10일까지 급격한 하강을 나타내었으며, 갱내온도가 같아지는데 1개월 이상이 소요되었다. 혹한기에 타설하였으므로 수화열에 의한 온도상승이 최

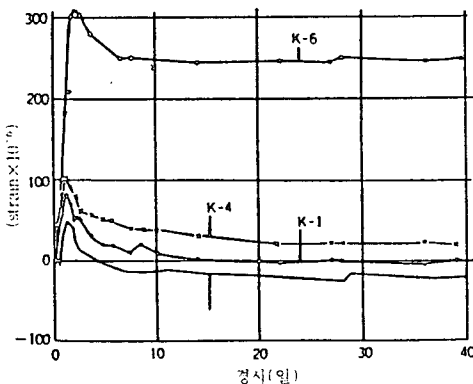
대 13°C로 비교적 낮았다. 터널내부(갱구로부터 200m)에서는 외기온도의 영향이 미미하였으며, 평균 6°C, 최고-최저 온도차는 5°C 정도로 안정되어 있었다.



[그림 6] 계측 개요도



[그림 7] 환경온도 등



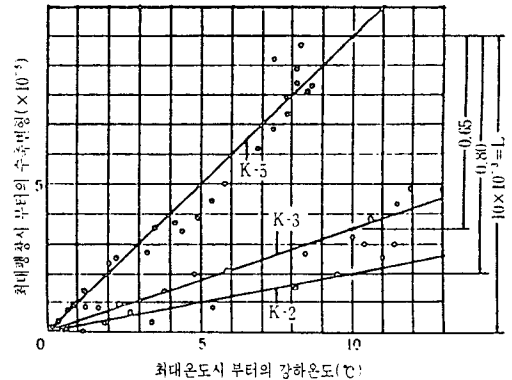
[그림 8] 변위량

나. 구속도 [그림 9]

[그림 9]은 콘크리트의 최고 온도점을 기준으로 한 온도강화과정에서의 강화온도와 수축변형의 관계를 도시한 것이다. K-5는 구속되지 않은 경우이며, 이 데이터로부터 열팽창계수  $\alpha=10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 를 얻었다. K-2는 터널 단면방향, K-3는 터널의 축방향 변형이다. 어느 경우이든 배면구속된 상태이므로 무구속인 K-5보다 수축변형이 작았다.

구속도  $K_R$ 은 단면방향(K-2)에서 0.8, 축방향(K-3)에서 0.65이었으며, 터널 단면방향의 구속량이 축방향보다 컸다. 이러한 점은 균열분포가 단면 방향의 균열이 적고, 축방향 균열이 많은 경향과 일치하고 있다.

여기서, 이 Span에서는 흑한기 시공이란 유리한 시공조건이었다는 점과 팽창제의 효과가 있었다는 점 때문에 균열이 발생치 않았다.



[그림 9] 구속도

## V. 균열의 방지대책

라이닝 콘크리트의 수축에 기인한 균열은 어느정도 허용할 수 있으나 터널의 사용목적·사용조건·라이닝 콘크리트의 개념에 따라 차이가 있으므로 논의가 분분하다. 참고로 기존의 연구에 의하면 콘크리트의 수밀성·내구성에 따라 허용 균열폭은 다음의 <표 4>와 <표 5>와 같다.



〈표 4〉 수밀성에 대한 허용균열폭(연구자료)

연구자명	허용균열폭 (mm)	비 고	문 헌
狩野春一외	0.06	수년간의 연구에 의하면 12cm 두께의 슬라브에서 균열이 0.04mm 일때 강우시 누수가 없었다. 0.06mm 전후가 위험도 약 20% 정도의 누수한계폭이라 판단된다. 단 수압이 큰 경우에는 당연히 작은 폭 일지라도 위험하다.	콘크리트 기술사전 (1968)
任入豊和	0.05	두께 10cm의 콘크리트 공시체에 대해 수압 100kg/cm <sup>2</sup> (풍속 50m/sec시의 풍압에 해당)에서 연속 1시간의 투수시험을 실시하여 균열폭이 0.05mm 이하에서는 거의 투수가 되지 않았다고 예시하고 있다. 또한 실제의 RC구조물에서 균열폭과 누수의 유무를 조사하여, 실용적으로 방수에 지장이 없는 균열폭은 0.05mm라고 하였다.	학위논문 (1961)
浜田稔	0.03	균열폭과 강우의 관계를 실제의 abutment에서 조사한 결과, 당초에는 0.06mm가 강우에 견디는 한계폭이라고 하였으나 최근에는 0.03mm에서도 강우의 영향을받을 수 있다고 한다.	건축자료 (1961.1) 건축재료학 (1964)
向井毅	0.06	5×10×30cm 몰탈, 수두 10cm 에서의 시험결과는 균열폭이 0.06mm 이하에서는 0.03mm와 마찬가지로 시험체 배면이 습해지지 않았으며, 0.07mm에서도 거의 볼 수 없었다. 그러나 그 이상의 균열폭에서는 명확한 누수현상이 있었다.	건축학회 관동지부 제38회 (1968)
神山辛弘 石川廣三	(0.06 이하)	벽체가 포화상태인 경우 무풍 또는 미풍시 누수가 발생치 않는 최소 균열폭은 0.06~0.08mm 부근이다.	건축학회대회 호(1969.8)
重倉祐光	(0.12 이하)	φ15×4cm몰탈, 수두 30cm(0.03kg/cm <sup>2</sup> )에서 시험결과 균열폭 0.12mm(이 이하의 시험은 실시치 않음)에서 투수가 거의 zero 였다.	콘크리트저널 (1973.9)
松下清夫외	(0.08 이하)	폭이 0.08mm와 0.3mm의 수평균열을 갖는 두께 15cm의 몰탈 시공체에서 가능쪽부터 장시간 살수한 경우 1분에서 미세하게 발생, 5.5분에서 기포발생, 10분에서 흐르기 시작, 그 반대에서는 0분에서 발생, 8.5분에서 흐르기 시작하였다.	건축학회대회 호(1969.8)
石川廣三	(0.15 이하)	기건상태의 콘크리트 공시체, 두께 8cm, 압력차 20kg/m <sup>2</sup> , 실험 시간 : 원칙적으로 3시간에서는 균열폭이 0.15mm 이하에서는 균열의 주변부에 습기가 생기는 정도이고 누수는 없다.	건축학회대회 호(1976. 10)

균열방지 대책으로는 수축이 작은 콘크리트 배합을 사용하거나 배면구속을 제거하는 등의 방법을 생각할 수 있다. 그러나 현재의 상황은 시험단계로서, 이후 시험시공·계측 등의 실적에 따라 시공성·경제성 측면에서 방지대책을 검토해야 할 것이다.

현재의 주된 방지대책과 효과는 다음과 같다.

가. 콘크리트 배합설계의 변경

1) 팽창성 혼화재

콘크리트의 체적팽창과 수화열 억제란 2가지 효

〈표 5〉 내구성 측면에서의 허용최대 균열폭의 예 (ACI 224 위원회)

예1)

조 건	허용최대 균열폭(mm)
건조공기중 또는 보호층이 있는 경우	0.40
습한 공기중, 땅속	0.30
동경방지제와 접하는 경우	0.175
해수·조공에 의한 건습이 반복되는 경우	0.15
수밀 구조부재	0.10

예2)

[CEB·FIP]

조 건	허용 최대 균열폭(mm)	
	영구하중과 장기간 작용하는 변동하중	영구하중과 변동하중이 불리한 조합이 아닌 경우
유해조건에 노출된 부재	0.1	0.2
보호되지 않은 부재	0.2	0.3
보호된 부재	0.3	미관상 점검

예3)

[허용 최대 균열폭의 규격치의 예]

국 명	제 안 자	허용 최대 균열폭(mm)
일 본	운 수 성	항만구조물 0.2
	일 본 공업규격	원심력 철근콘크리트 설계하중시 0.25
		설계휨모멘트의 작용시 설계하중, 설계휨모멘트 개방시 0.05
프 랑 스	Brocard	0.4
미 국	ACI 건축기준	옥내부재 0.38
		옥외부재 0.25
소 련	철근콘크리트기준	0.2
유 럽	유 럽 콘크리트위원회	상당히 침식작용을 받는 구조물의 부재 0.1
		방호공이 없는 보통의 구조물 부재 0.2
		방호공이 있는 보통의 구조물 부재 0.3

파를 얻기 위해 인장응력을 저하시킬 목적으로 팽창성 혼화재를 사용한다. 이 방법은 팽창 지속기간과 수축시기가 일치하지 않으면 효과가 감소한다. 균열의 발생시기가 지연되어 균열의 수·폭 등이 감소하였다는 보고와 어느 정도 효과가 있었다는 보고가 있었지만, 방지효과는 시공조건·환경조건 등에 따라 상당한 차이가 있을 수 밖에 없다.

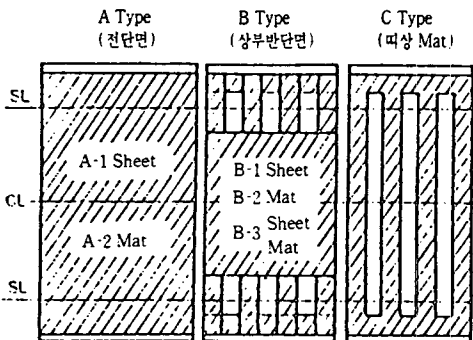
## 2) 감수제

단위시멘트량 감소에 의한 수화열의 억제와 단위수량 감소에 의한 건조수축 저감을 목적으로 감수제를 사용한다. 이 방법으로는 기대할 만한 효과가 없을 수도 있다.

### 나. 배면 구속의 제거(절연재)

#### 1) Sheet·Mat 종류

방수 Sheet(두께 0.4mm 이상)를 Shotcrete면에 부착하여 라이닝 콘크리트와 절연시킨 경우에는 많은 실적으로 부터 그 유효성이 인정되고 있다. 용수구간 등에서는 방수공으로서 방수 Sheet를 이용할 파퓰가 있으므로 균열의 문제는 동시에 해결된다. 용수가 거의 없는 구간(방수공이 필요치 않는 구간)에서는 방수용 Sheet를 사용하면 비경제적이 된다. 따라서 보다 값싸며 시공성을 갖춘 재료를 균열방지용으로 최소한의 범위에 사용토록 한다. 시험에 의하면 부직포(Mat)나 얇은 Sheet 종류를 아취부에 설치하거나 측벽에 부설하여 그 유효성이 인정된 사례도 있다.[그림 10]



[그림 10] Sheet·Mat종류별 균열방지 대책 예

## 2) Shotcrete재료

Shotcrete면에 강도가 약한 발포성 몰탈을 뿜어 붙이면 라이닝 콘크리트의 배면구속을 저감할 수 있다.

이 방법은 역시 시험단계로서 Sheet·Mat 종류와 비슷한 효과가 인정된 사례도 있다. 발포 몰탈의 뿜어 붙이기는 시공성은 좋으나 발포배율·두께 조정 등의 기술이 필요하다.

기타의 불임성 재료로는 아스팔트에멀존이나 암면 등도 검토되었으며, 도포장비·재료의 개량에 따라 보다 값싸며 절연효과가 우수한 쪽을 이용할 수 있을 것이다.

### 다. 습윤양생

건조수축의 억제목적으로 탈형후 살수양생 및 양생제 도포 등을 실시한 예도 있다. 효과가 적어서 없고 근본적인 대책은 되지 못하였다.

## VI. 다우에른 터널의 균열대책

오스트리아의 다우에른 터널에서는 라이닝 콘크리트를 다음과 같이 계획하였다.

- 설계두께 25~30cm(불량지반구간 40cm)
- 설계강도 일반 부  $300\text{kg/cm}^2$ (b-300)  
용수구간  $500\text{kg/cm}^2$ (b-300)
- 배 합 보통포틀랜드 시멘트  
물시멘트비  $W/C \leq 0.5$   
세골재율  $S/A \approx 55\%$   
(세골재는 8mm이하)  
최대골재치수  $D_{\max} \approx 30\text{mm}$

- 1회 타설장 6~8m

수축에 의한 균열방지 대책으로는 일반적으로 배근을 하지만 라이닝이 얇은 경우에는 다음의 취약점을 갖게 된다.

- 콘크리트 타설이 상당히 어렵다.
- 균열의 방지효과가 충분치 않다.

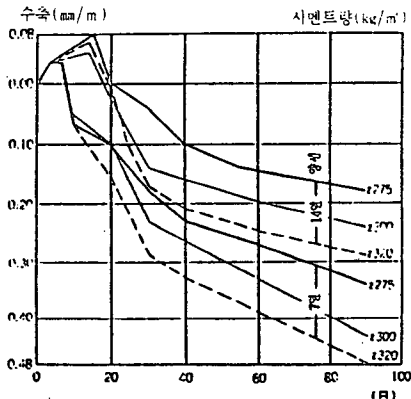
○ 아취부에 콘크리트의 분리를 발생시켜 균열을 조장한다.

○ 진동에 의한 다짐을 방해한다.(다짐작업이 곤란하다)

○ 방수 Sheet가 있는 경우 Sheet가 손상될 우려가 있다.

라이닝 콘크리트를 신속히 진행시키기 위해 1회 타설길이를 12m로 하였기 때문에 수축방지를 위한 배근을 상기한 단점을 보완할 목적으로 계획을 변경하였다. 이때 콘크리트의 골재입도·단위시멘트량·혼화재·양생조건을 변경시키며 배합을 구하였다. 이 결과의 예는 다음의 [그림 11, 12]이며, [그림 11]은 단위시멘트량과 양생방법별 수축의 경시변화를 도시한 것이며, [그림 12]는 수축과 온도응력에 의한 균열발생 가능성을 검토한 것이다.

1회 타설길이가 12m인 경우 갱내온도가 11℃인 조건하에서 약 4mm의 수축이 발생하였으며, 약 3개월 후에 균열이 발생할 가능성이 컸다.



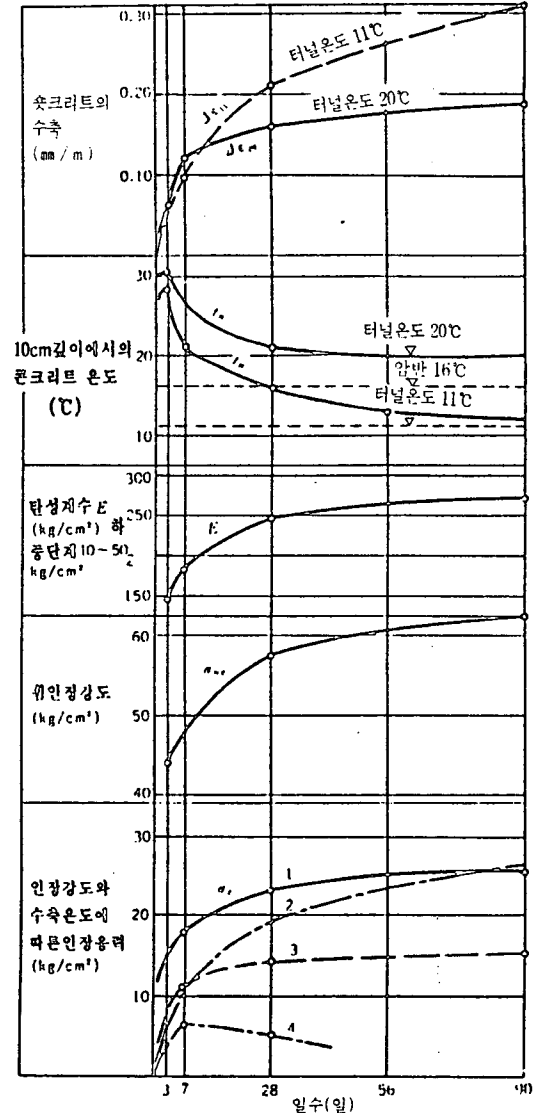
- 양 생 : 습도 35%에서 7일과 14일 2Case
- 시멘트량 : 275, 300, 320kg/m<sup>3</sup>의 3Case
- 터널온도 : 여름 20℃, 겨울 11℃  
9℃에 대한 수축 0.13mm/m

[그림 11] 시멘트량·양생방법별 시편 (20cm×20cm×60cm)의 수축측정

다우에른 터널(北)의 Shotcrete

B300 시멘트량 280kg/m<sup>2</sup>

혼화재 : AE제 PLASTOCRETE



2. 터널온도 11℃에서의 한쪽 구속상태의 Shotcrete의 인장응력
3. 20℃에서의 인장응력
4. 20℃에서의 미구속상태의 Shotcrete의 인장응력

[그림 12] 수축과 온도응력에 의한 균열에 대한 안정성 판정