

공학석사 학위논문

터널 천단부 균열 현상 및 원인에 대한 연구

지도교수 이 영 대

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2002년 8월

부경대학교 산업대학원

건설공학과

임종현

임종현의 공학석사 학위논문으로 인준함

2002년 6월 14일

주 심 공 학 박 사 이 종 출



위 원 공 학 박 사 정 두 회



위 원 농 공 학 박 사 이 영 대



<목 차>

1. 서	론	1
1.1	연구배경	1
1.2	연구동향	2
2. 사례 터널 균열 조사		3
2.1	조사방법	3
2.1.1	외관조사	3
2.1.2	사례 터널 자료	7
3. 균열의 원인		30
3.1	콘크리트 균열의 원인	30
3.1.1	굳지 않은 콘크리트(경화 전)의 균열	30
3.1.2	굳은 콘크리트(경화 후)에서 발생하는 균열	34
3.2	라이닝 콘크리트의 원인	41
3.2.1	라이닝 콘크리트의 균열 발생에 미치는 요인	42
3.2.2	균열의 종류	42
4. 결과 및 고찰		49
4.1	결과	47
4.2	고찰	49
4.2.1	균열 원인에 대한 고찰	47
4.2.2	균열 현상에 대한 고찰	51
5. 결	론	62

A Study on Appearance and Causes for Crack on the Crown of Tunnel Lining

Lim, Jong Hyun

**Department of Construction Engineering, Graduate School of Industry
Pukyong National University**

Abstract

This study refers to appearance and causes for crack of tunnel lining. Stress and strain of tunnel lining has a complicated correlation with the physical properties and geometrical types of tunnel.

The conclusion from this study can be summarized as follows:

- 1) Results from this study by analyzing the crack phenomena showed that width of 0.2mm~0.3mm crack consists of 79.3% in longitudinal direction and 92.2% in horizontal direction of all cracks.
- 2) The Clay mineral included between the lining concrete and the base-rock, makes a volume of an original foundation be swelled and this causes the crack in the tunnel lining by the earth pressure.
- 3) The cracks were appeared at the surface because of the mistakes in the quality management of constructing the tunnel lining concrete, and the drying shrinkage resulted from the difference internal and external temperature.

1. 서 론

1.1 연구배경

우리나라 대부분이 산악지형으로 이루어져 있으며, 최근에는 터널이 어느 한 분야에 국한된 것이 아니라 도로공사, 지하철공사, 수로시설 등 여러 분야에 널리 이용되고 있다.

터널의 공용기간이 증가함에 따라 소음, 매연 및 지하수위의 변화 등과 같은 주변환경이 콘크리트에 많은 영향을 주고 있다.

콘크리트 재료는 압축강도는 크고 인장강도가 낮기 때문에 인장응력이 인장강도를 초과하게 되면 콘크리트 구조물에서 균열이 발생하게 된다.

콘크리트 구조물이 어떤 원인에 의해 변형되었을 경우 대부분 균열 발생을 수반하기 때문에 균열을 보고서 구조물의 변형을 알게 되는 경우가 많다.

터널 라이닝 콘크리트 타설후 경화과정을 거치면서 초기단계부터 콘크리트 내부에 많은 미세 균열을 갖게 되는데 이것이 계절적인 온도, 습도, 작용하중 등의 변화를 수반하게 되면 콘크리트 구조물에 균열 등을 유발하는 원인으로 작용하게 된다.

이렇게 발생한 균열들은 그대로 방치할 경우 균열을 통하여 이물질이 침투하여 균열이 점차 커지게 되며, 콘크리트 내구성에 큰 문제를 일으키게 된다.

라이닝 콘크리트의 균열은 초기에 발견하여 조치를 취하는 것이 구조물의 내구성 유지에 중요하며 또한 균열 발생부에 대한 정확한 원인을 찾아서 분석하는 것은 균열 발생을 제어하는데 유용한 자료를 제공 할 수 있다.

본 논문은 사례 터널 천단부에 발생한 균열 현상을 조사하여 그 원인을 검토하는데 목적이 있다.

1.2 연구동향

국내에서 터널 시공은 과거 ASSM(American Steel Support Method)을 위주로 시공이 되어 오다가 80년대에 접어들면서 서울 지하철 현장에서 NATM(New Austrian Tunnelling Method)이 처음 도입되면서 현재 우리나라의 터널 시공에 널리 이용되고 있는 공법이다.

터널 시공의 증가로 많은 문제점들이 나타나고 있으며, 그 중 대표적인 것이 콘크리트 균열이라고 할 수 있으며, 이러한 균열에 대해서 많은 연구가 이루어지고 있다.

홍현표(1997년)는 “수로압력터널 콘크리트 라이닝의 균열발생 원인에 관한 연구” 논문에서 암반과 콘크리트 라이닝이 밀착되는 경우 콘크리트의 건조수축, 밀착되지 않는 경우 콘크리트 응력이 콘크리트 인장강도를 초과하므로 균열이 발생하는 것으로 제안하였다.

강건인(1996년)은 “터널 라이닝 콘크리트의 천단부 종방향 균열에 대한 안정성 검토 및 보강 대책에 관한 연구”에서 종방향 균열의 원인을 경화과정의 소성수축, 소성침하 및 수화열등에 의한 인장응력에 기인한다고 제안하였다.

김영근 외 2명(1998년)은 “터널 콘크리트 라이닝에 발생하는 천단부 종방향 균열에 관한 연구”에서 터널에서 발생하는 균열 중 종방향 균열이 40% 이상 차지하므로 종방향 균열을 억제하기 위해서는 콘크리트 라이닝 타설 시 배면에 그라우팅을 실시하여 라이닝 두께를 확보하거나 지반과 밀착되도록 하여야 한다고 제안하였다.

2. 사례터널 균열조사

2.1 조사방법

2.1.1 균열조사방법

균열조사는 A터널(L=416m), B터널(L=820m), C터널(L=410m)을 대상으로 비교 조사하였다.

사례터널의 균열 원인을 분석하기 위해서 관련 도서를 검토하면서 점검·진단 및 보수·보강 이력을 조사하였다.

외관조사는 그림 2.1.1에서 보여지는 바와 같이 먼저 육안에 의한 1차 개략조사를 실시하였고, 1차 조사를 바탕으로 2차 상세조사는 조명등, 크랙 게이지를 이용해서 측벽부는 도보로, 천단부는 차량을 이용해서 조사하였다.

외관조사 중 특히 터널 콘크리트 라이닝에 대한 육안조사는 내부의 상태를 평가와 다음 단계의 국부적인 정밀안전진단 수행 항목, 절차 및 방법 등을 결정하는데 있어서 매우 중요하다.

표 2.1.1은 터널의 안정성을 평가하는 기준으로 균열폭과 누수, 파손으로 분류해서 나타내고 있으며 여기서 균열조사는 표 2.1.1에서 나타낸 균열폭에 따라 조사하였다.

또한 균열 원인은 하나의 원인에 의해 발생되기도 하지만 2가지 이상의 복합적인 원인에 의해서 발생하는 경우가 있으므로 정확한 조사를 위해서 박리·박락, 누수 등을 조사하였다.

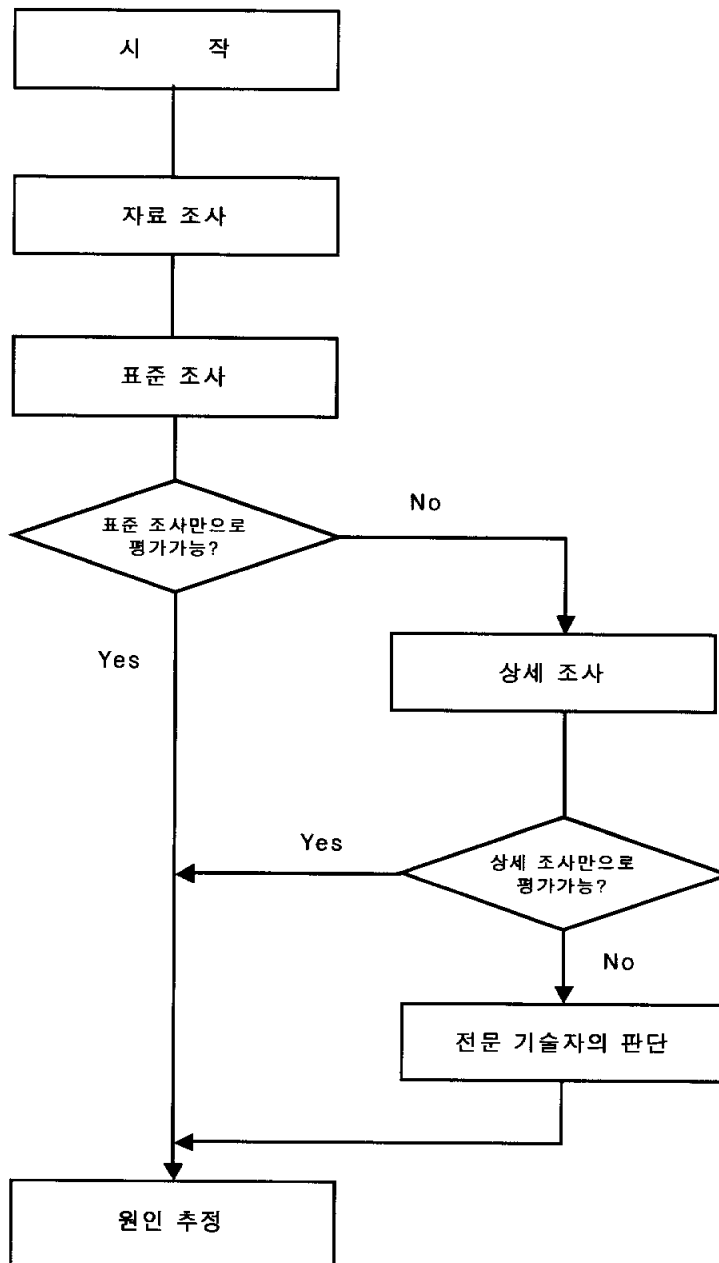


그림 2.1.1 균열 조사 흐름도

표2.1.1 터널의 안정성 평가 기준¹⁾

등급 종류	A	B	C	D	E
균열폭	0.1mm 미만	0.1~0.2mm	0.2~0.3mm	0.3~0.7mm	0.7mm이상
누수	누수 부위가 없는 경우	누수 흔적이 있는 경우	균열사이로 약간의 누수가 있는 상태	균열사이로 누수가 많은 상태	균열사이로 물이 계속 떨어지는 상태
파손	없음	없음	경미한 파손 (10×10cm미만)	파손면적 (10×10~ 30×30cm미만)	파손이 극심하여 즉시 보수를 요하는 경우 (30×30cm이상)

1) 정밀안전진단교육과제, 시설안전기술공단

Tunnel의 균열 조사를 실시하면서 A, B, C 터널의 조사 대상을 그림 2.1.2와 같이 각 터널 천단부를 대상으로 수행하였다.

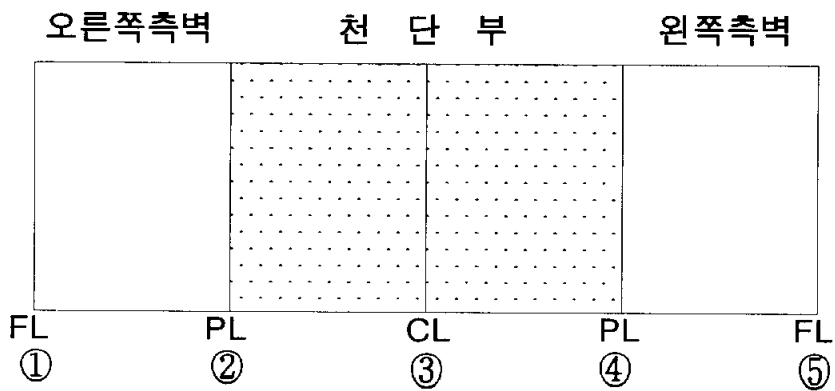
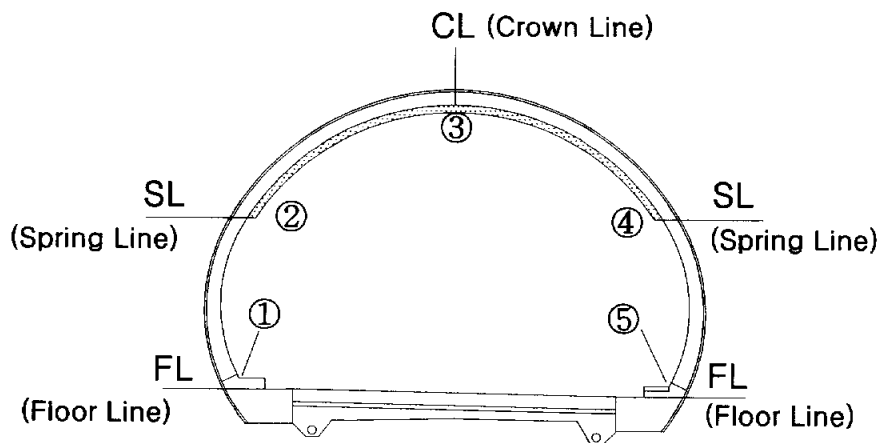


그림 2.1.2 터널 조사 단면도

2.1.2 사례 터널 자료

(1) A터널

1980년 터널의 보수·보강이 이루어졌으며, 당시 터널의 상태는 누수가 심각하고 콘크리트에 열화가 많이 되어 위험 상태였으며, 전구간에 콘크리트 균열이 발생하였고 균열부와 신축이음부에서 누수가 심하였다.

그리고, 손상된 라이닝 콘크리트 배후에서 흙탕물이 흘러내리는 것으로 보아 터널 배면에 암질이 불량한 곳도 있으며, 천단부와 측벽부의 신축이음 위치가 일치하지 않았다.

1차로 시공되었던 무근콘크리트에 균열과 누수가 심하여 철근콘크리트로 유도처리하는 공법으로 PVC 파이프를 2~3m 간격으로 기존 라이닝에 설치하고 철근콘크리트 라이닝을 타설했음을 자료조사에서 알 수 있었다.

외관조사 결과 콘크리트는 비교적 양호한 상태로 나타났으며, 터널 천단부에 주로 종방향 균열, 일부구간에 횡방향 균열, 백화 및 누수현상이 조사되었다.

시공이음부 주변에서 횡방향 균열이 조사되었다.

터널 내에 매연과 결합되어 검게 변색되는 흑화현상이 진행되고 있었고, 박리·박락 등은 나타나지 않았다.

A터널의 제원은 표 2.1.2과 같고 그림 2.1.3은 터널 단면도를 나타내었다.

표 2.1.2 A터널의 현황

터널명	A 터 널		
터널형상	반원형	종류및규격	도로터널 (편도2차선)
연 장	416m	폭	9.6m
천정부재료	철근콘크리트	암석명	안산암질 화산각력암
공 법	ASSM	준공년도	1971년

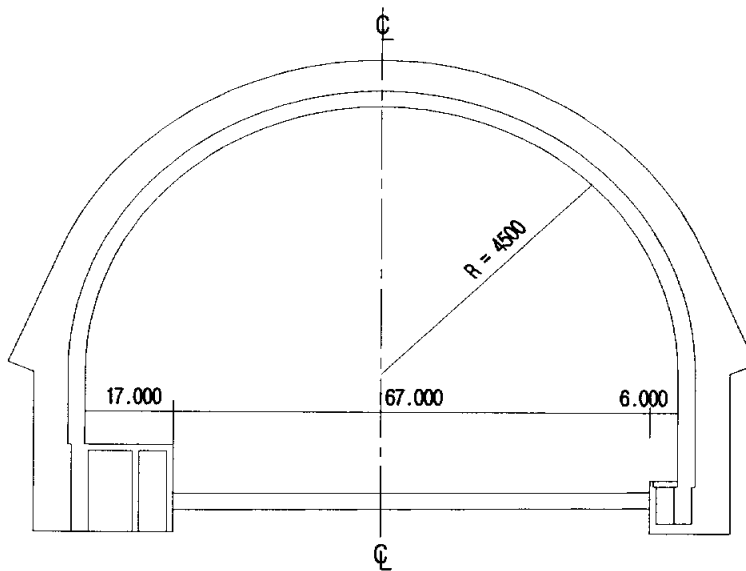


그림 2.1.3 A터널 표준 단면도

균열폭에 따른 종·횡방향 균열 개소와 길이에 따라 나타내면 표 2.1.3, 그림 2.1.4, 그림 2.1.5와 같다.

표 2.1.3 A터널의 균열 현황 (균열폭:mm , 길이:m)

종 방 향 균 열			횡 방 향 균 열		
균열폭	균열개소	균열길이	균열폭	균열개소	균열길이
0.1	1	3.0			
0.2	10	30.0	0.2	11	14.8
0.3	1	2.0	0.3	1	1.6
0.4	4	9.6			
1.1	2	7.0			

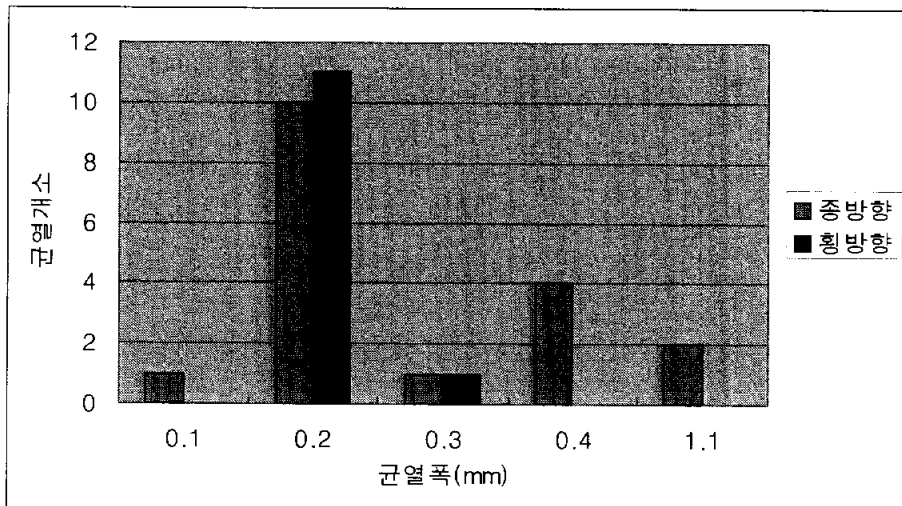


그림 2.1.4 A터널의 균열폭과 개소 현황

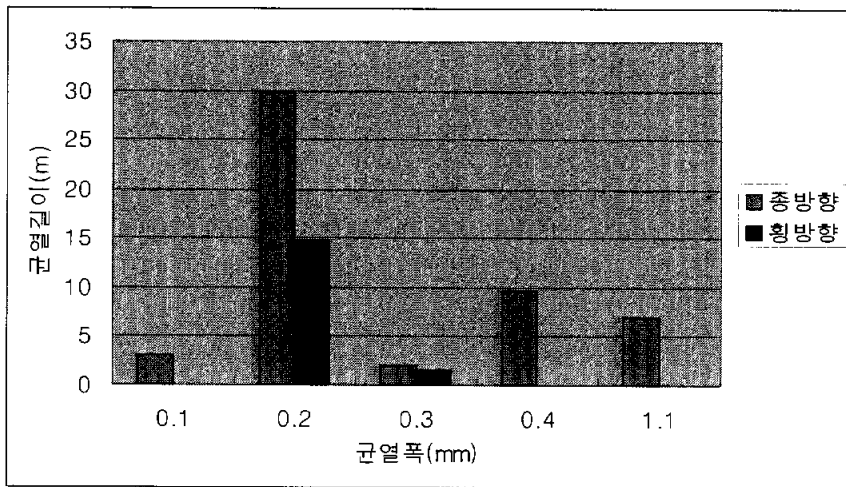


그림 2.1.5 A터널의 균열폭과 길이 현황

A터널의 외관 조사도를 그림 2.1.6에 나타내었다.

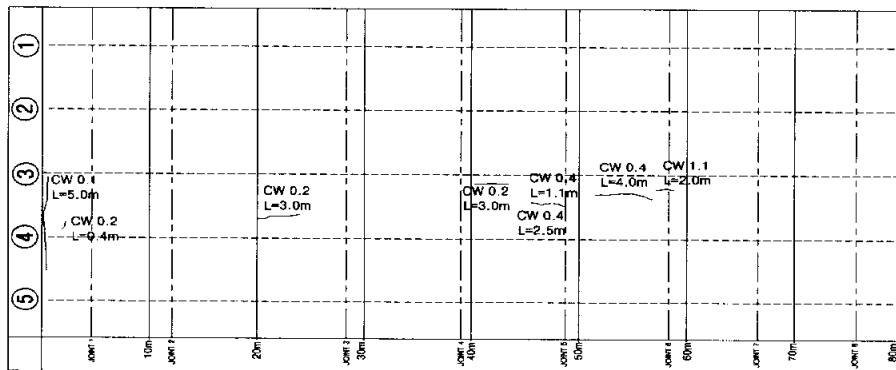


그림 2.1.6(a) A터널의 외관 조사도(계속)

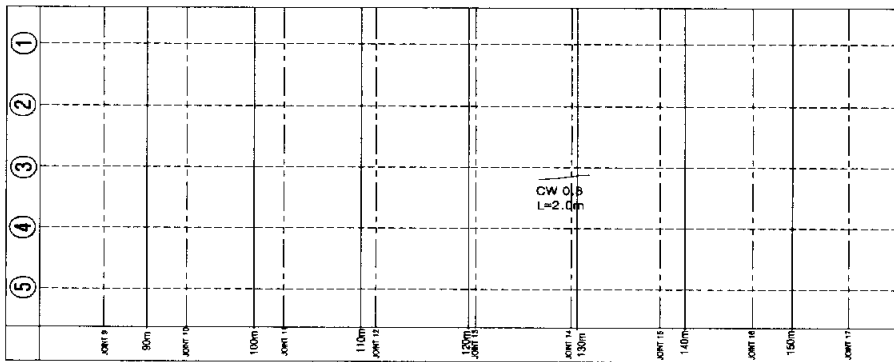


그림 2.1.6(b) A터널의 외관 조사도(계속)

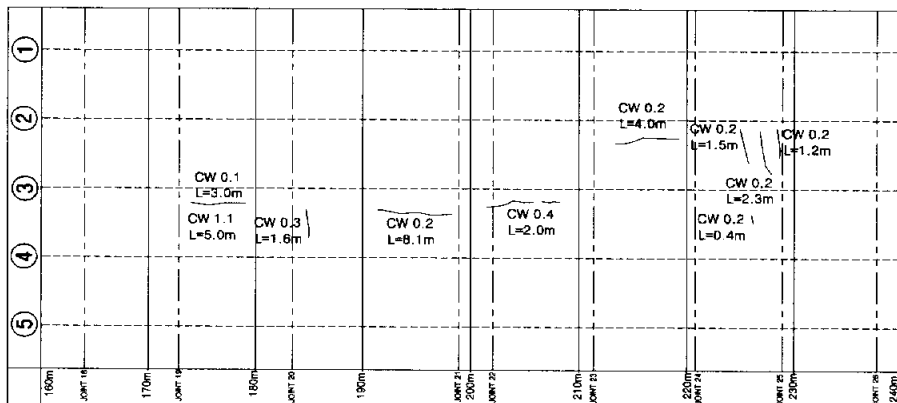


그림 2.1.6(c) A터널의 외관 조사도(계속)

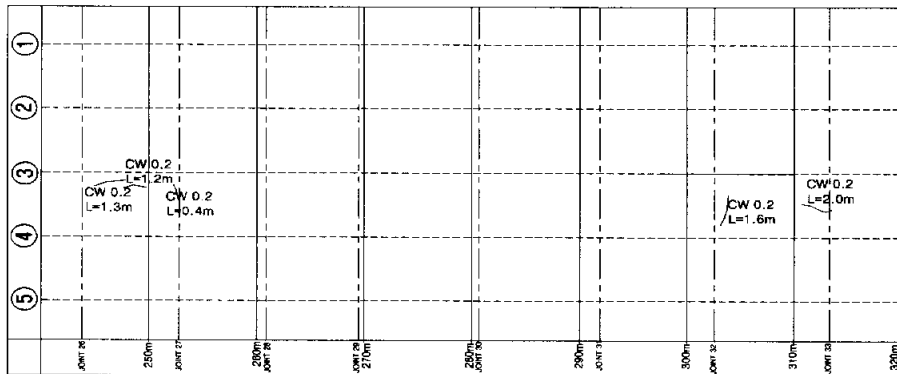


그림 2.1.6(d) A터널의 외관 조사도(계속)

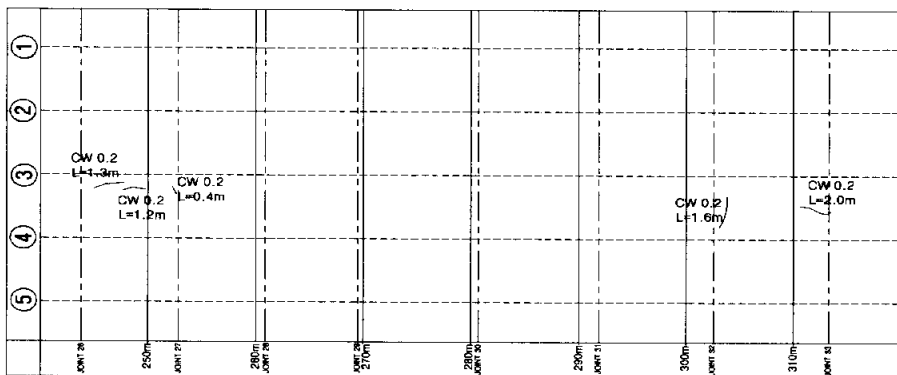


그림 2.1.6(e) A터널의 외관 조사도(계속)

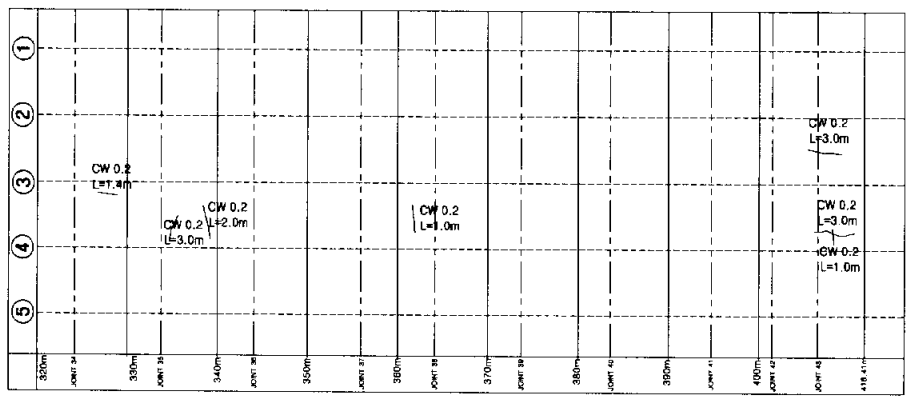


그림 2.1.6(f) A터널의 외관 조사도

(2)B터널

1995년 터널 천단부 및 측벽부에 누수 및 콘크리트 중성화 등의 여러가지 문제로 2차 라이닝 콘크리트 타설시 방수시트를 설치 후 라이닝을 시공하였고, 신축이음을 설치하지 않았음을 자료조사에서 알 수 있었다.

외관조사에서 천단부를 중심으로 다수의 종·횡방향 균열이 조사되었다.

누수량은 작지만 누수가 있는 곳도 있었다.

시공이음이 일정한 간격으로 시공되어 있으며 강제 거푸집 폼의 설치 잘못으로 콘크리트 타설시 부분적으로 단차가 있었다.

B터널의 제원은 표 2.1.2와 같고 그림 2.1.7은 터널 단면도를 나타내었다.

표 2.1.4 B터널의 현황

터널명	B 터널		
터널형상	반원형	종류및규격	도로터널 (왕복2차선)
연장	820m	폭	8.5m
천정부재료	철근콘크리트	암석명	흑운모 화강암
공법	ASSM	준공년도	1973년

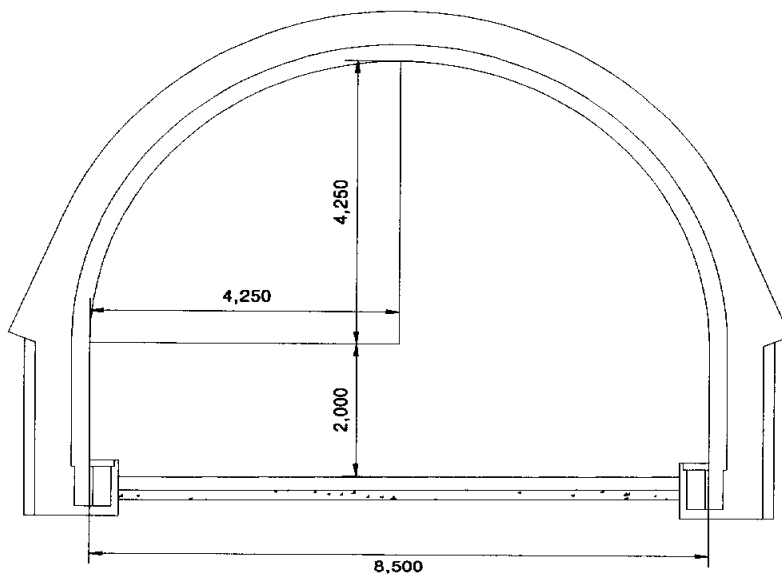


그림 2.1.7 B터널 표준 단면도

균열폭에 따른 종·횡방향 균열 개소와 길이에 따라 나타내면 표 2.1.5와 그림 2.1.8, 그림 2.1.9과 같다.

표 2.1.5 B터널 균열 조사표 (균열폭:mm , 길이:m)

종 방 향 균 열			횡 방 향 균 열		
균열폭	균열개소	균열길이	균열폭	균열개소	균열길이
0.1	5	9.0	0.1	18	39.7
0.2	70	212.3	0.2	155	477.0
0.3	42	119.9	0.3	110	310.8
0.4	5	11.9	0.4	31	85.7
0.5	6	22.2	0.5	16	46.2
0.6	1	7.0	0.6	3	11.5
0.7	2	4.2	0.7	8	13.0
0.8	5	23.1	0.8	1	1.2
0.9	3	10.3	0.9	1	4.0
1.0	3	11.2	1.0	2	6.3
1.1	1	1.8	1.1		
1.2	3	13.0	1.2		
1.5			1.5	1	3.3

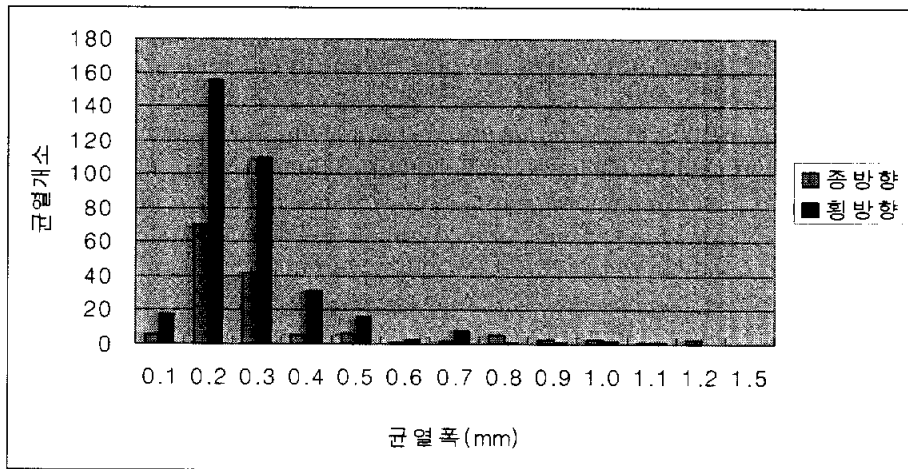


그림 2.1.8 B터널의 균열폭과 개소 현황

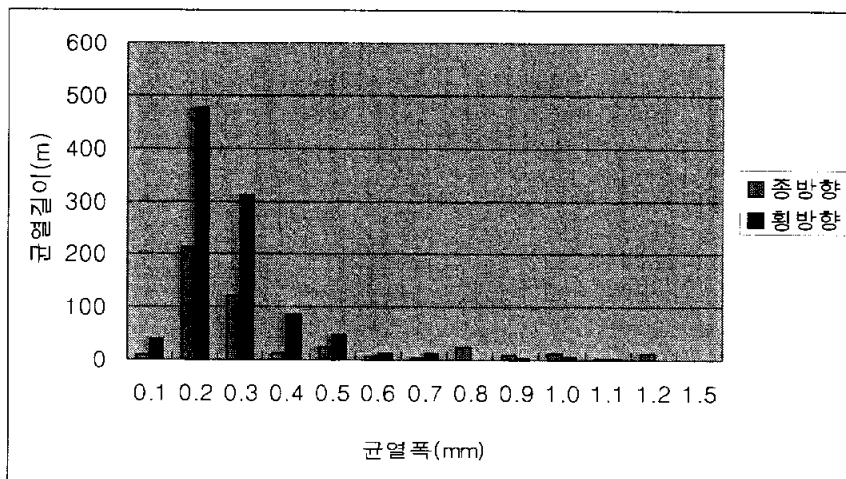


그림 2.1.9 B터널의 균열폭과 길이 현황

B터널의 외관 조사도를 그림 2.1.10에 나타내었다.

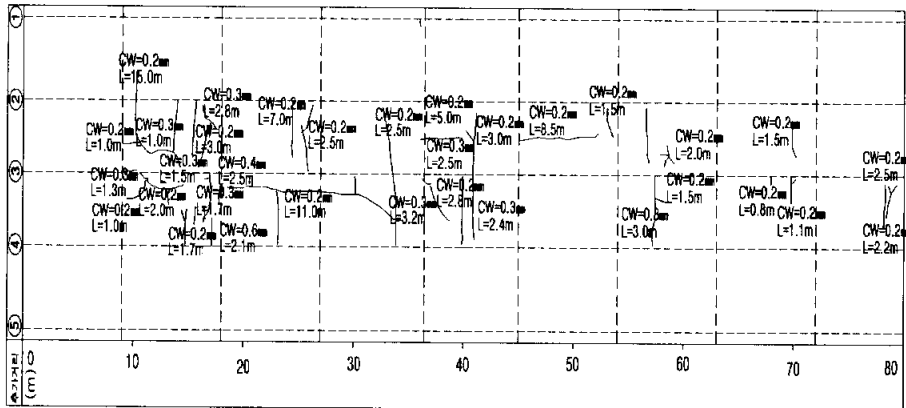


그림 2.1.10(a) B터널의 외관 조사도(계속)

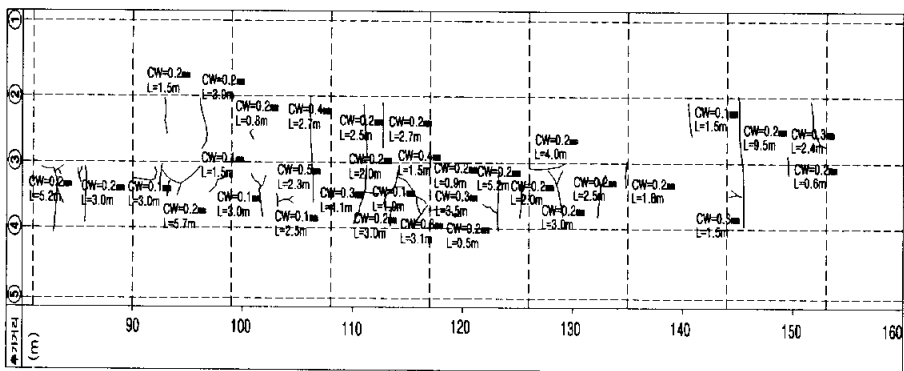


그림 2.1.10(b) B터널의 외관 조사도(계속)

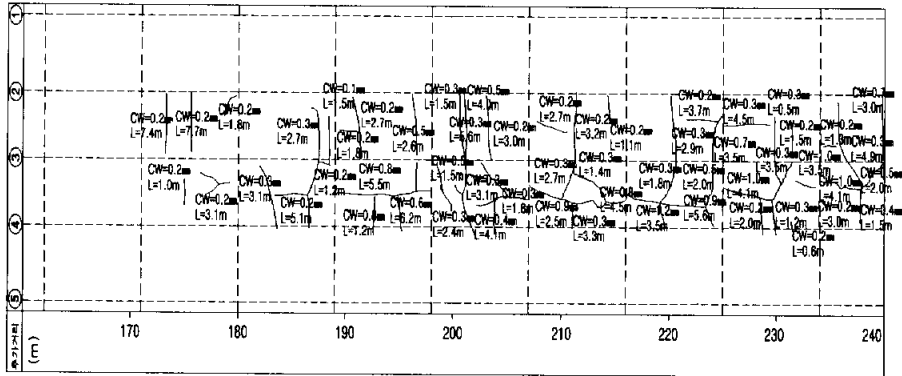


그림 2.1.10(c) B터널의 외관 조사도(계속)

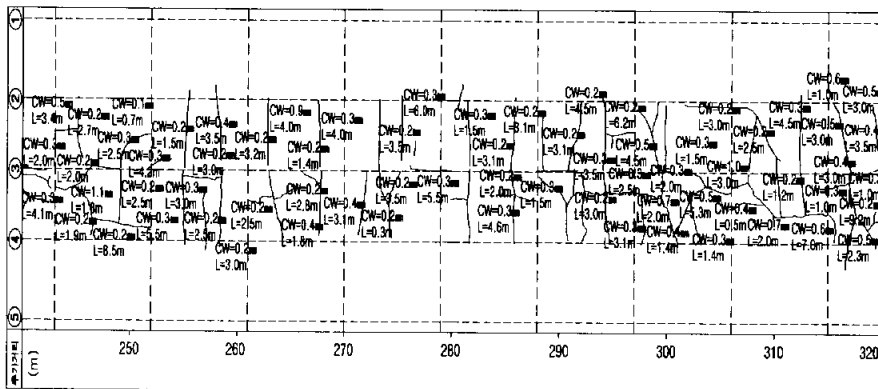


그림 2.1.10(d) B터널의 외관 조사도(계속)

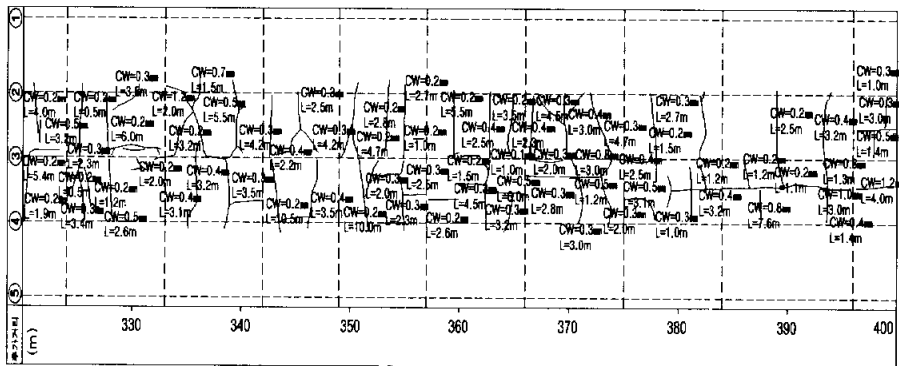


그림 2.1.10(e) B터널의 외관 조사도(계속)

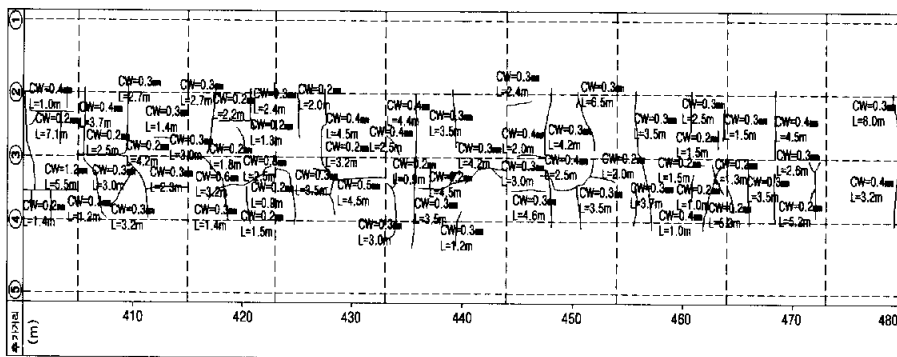


그림 2.1.10(f) B터널의 외관 조사도(계속)

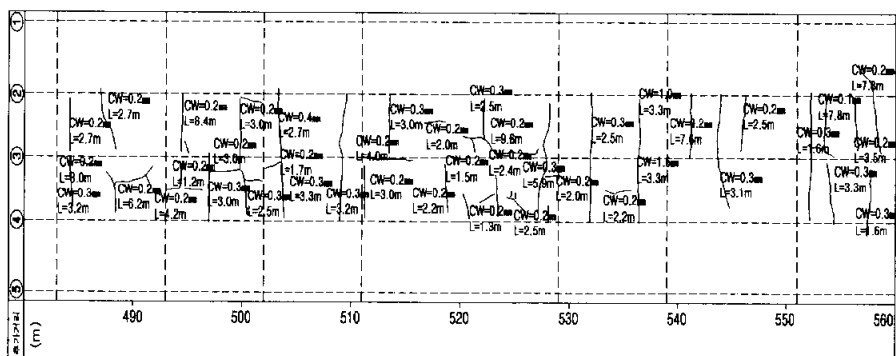


그림 2.1.10(g) B터널의 외관 조사도(계속)

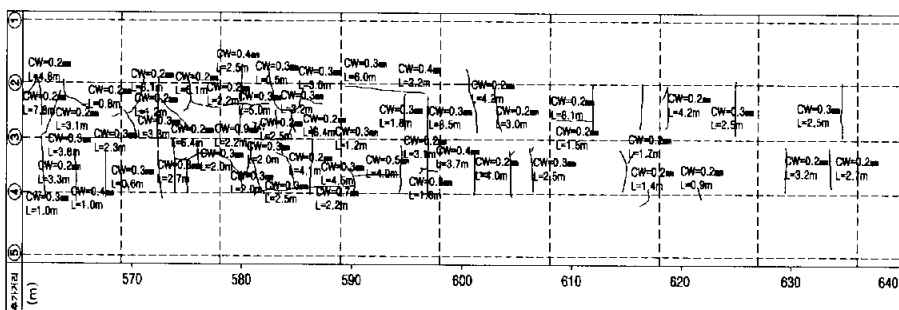


그림 2.1.10(h) B터널의 외관 조사도(계속)

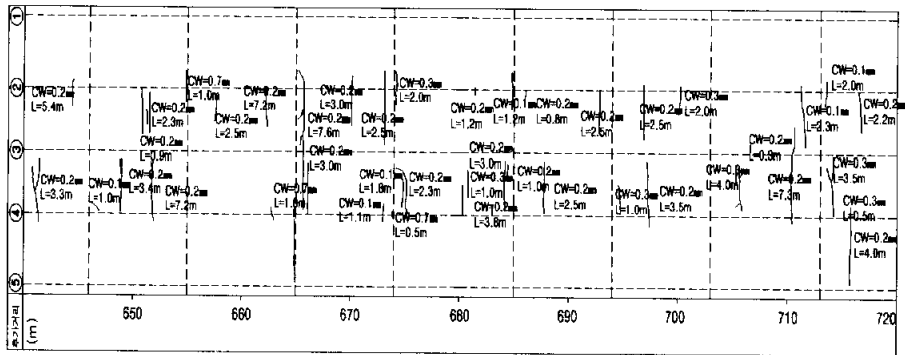


그림 2.1.10(i) B터널의 외관 조사도(계속)

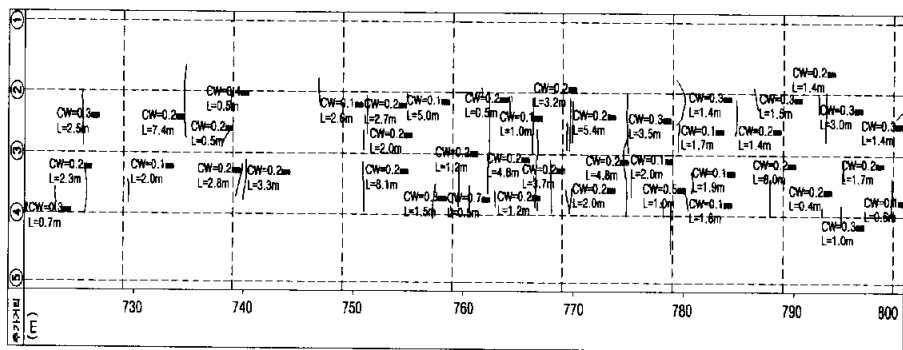


그림 2.1.10(j) B터널의 외관 조사도(계속)

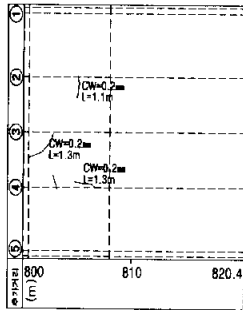


그림 2.1.10(k) B터널의 외관 조사도

(3) C터널

C터널은 1996년 준공 후, 1997년 천단부에 종방향 균열로 1차 보수, 1998년 보수부에 다시 균열 발생으로 2차 보수가 이루어졌다.

0~40m까지의 구간은 상재토 하중으로 천단부 종방향 균열이 다수 발생으로, 상부에 토사 제거를 하였음을 자료 조사에서 알 수 있었다.

외관조사에서 보수가 이루어진 일부구간에서 에폭시 주입이 제대로 되지 않은 곳이 조사되었다.

터널의 천단부에 종·횡방향 균열이 조사되었다.

대체로 횡방향 균열보다 종방향 균열이 많음을 알 수 있었고, 일부구간에서 타일탈락 및 신축이음부 변형이 조사되었다.

C터널의 제원은 표 2.1.6과 같고 그림 2.1.11은 터널 단면도를 나타내었다.

표 2.1.6 C터널의 현황

터널명	C 터 널		
터널형상	반원형	종류및규격	도로터널 (편도3차선)
연 장	410m	폭	13m
천정부재료	철근콘크리트	암석명	대정리각섬석 화강암
공 법	TBM+NATM	준공년도	1996년

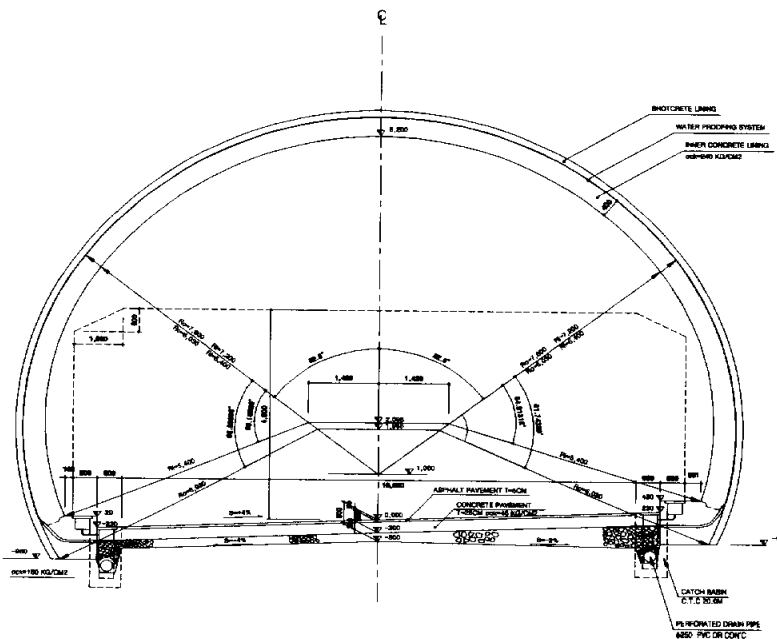


그림 2.1.11 C터널 표준 단면도

균열폭에 따른 종·방향 균열 개소와 길이에 따라 나타내면 표 2.1.6과 그림 2.1.12, 그림 2.1.13과 같다.

표 2.1.7 C터널 균열 조사표 (균열폭:mm , 길이:m)

종방향균열			횡방향균열		
균열폭	균열개소	균열길이	균열폭	균열개소	균열길이
0.2	25	213	0.2	6	12.3
0.3	9	68.8	0.3	1	2.0

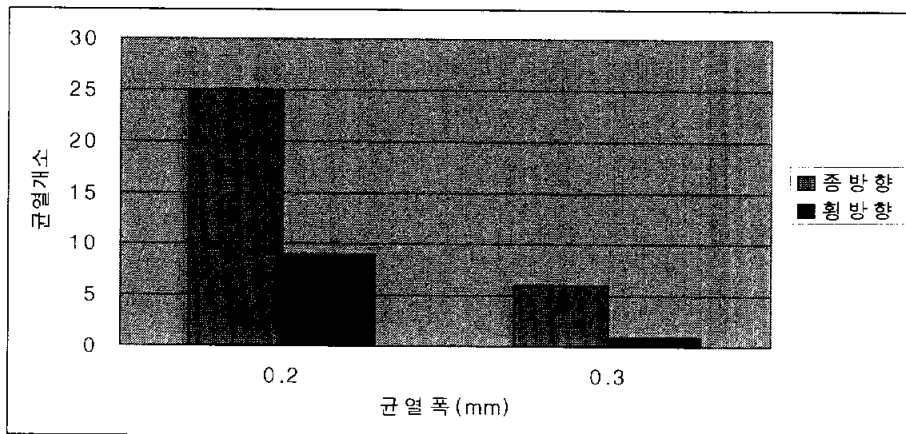


그림 2.1.12 C터널의 균열폭과 개소 현황

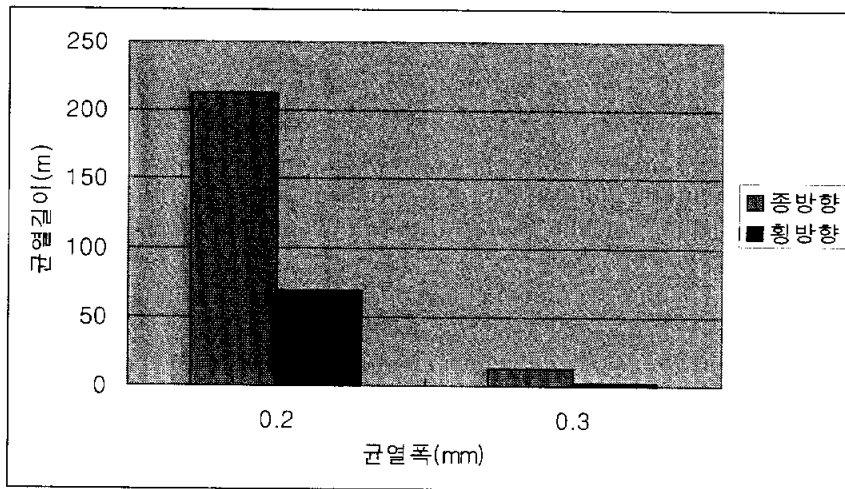


그림 2.1.13 C터널의 균열폭과 길이 현황

외관 조사도는 그림 2.1.14에 나타내었다.

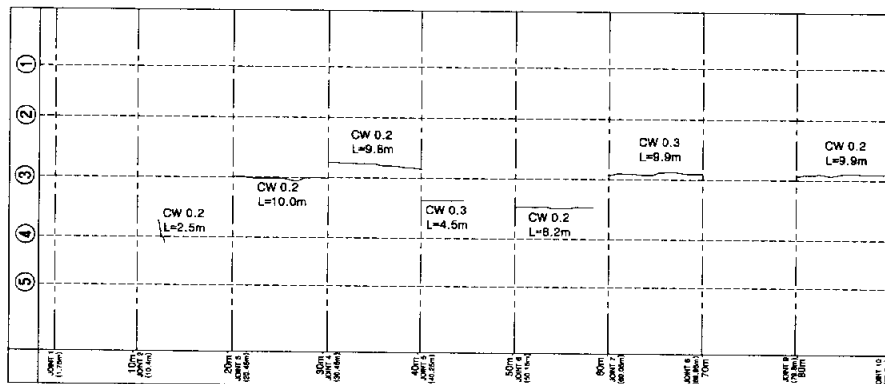


그림 2.1.14(a) C터널의 외관 조사도(계속)

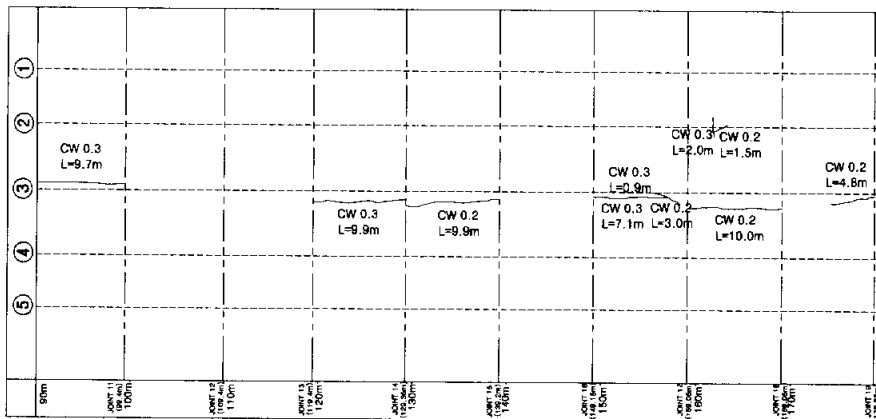


그림 2.1.14(b) C터널의 외관 조사도(계속)

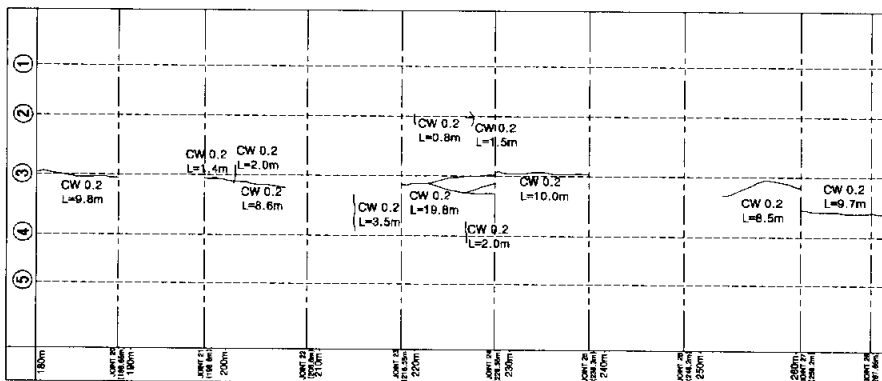


그림 2.1.14(c) C터널의 외관 조사도(계속)

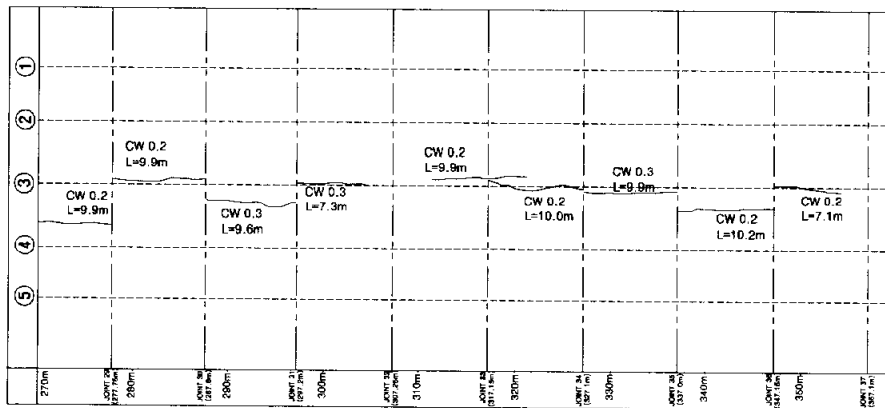


그림 2.1.14(d) C터널의 외관 조사도(계속)

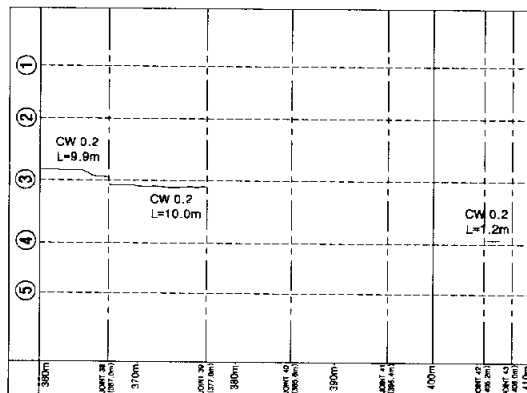


그림 2.1.14(e) C터널의 외관 조사도

3. 균열의 원인

3.1 콘크리트 균열의 원인

콘크리트 구조물에 발생하는 균열 원인은 재료 조건, 시공 조건, 사용·환경 조건, 구조·외력 조건에 의해서 분류할 수 있다.

균열은 단일 원인에 의한 것도 있지만 대부분 복합적인 원인에 의한 것으로 정확한 원인을 규명하기는 매우 어렵다.

그러나 정확한 원인을 규명해야 합리적인 안정성 검토, 균열 보수·보강 대책을 강구할 수 있다.

일반적으로 콘크리트에 발생하는 균열은 굳지 않은 상태의 콘크리트(경화 전)에 발생하는 균열과 굳은 콘크리트(경화 후)에 발생하는 균열, 시공시의 균열로 두 가지로 분류할 수 있다.

3.1.1 굳지 않은 콘크리트(경화 전)의 균열

굳지 않은 콘크리트의 균열에는 소성수축균열, 침하균열, 경화열에 의한 균열, 거푸집 침하, 진동 및 충격, support 등에 의한 균열, 사용재료에 의한 균열 등을 들 수 있다.

(1) 소성수축균열(Plastic Shrinkage Crack)

콘크리트 치기 후 슬래브나 판에서 갑자기 낮은 온도의 대기나 바람에 노출됨으로써 발생하는 과정은 콘크리트 노출면에서의 급격한 수분증발이 치기된 콘크리트의 블리딩보다 빠르게 일어날 경우 표면이 수축하게 되고 이것은 표면 아래에 있는 콘크리트 구속으로 인하여 표면에 인장응력을 유발하게 된다. 이런 균열의 방향성은 불규칙하며, 균열의 폭도 작은 형태로 나타난다.

결국 이러한 인장력으로 인해 콘크리트 표면에 얇은 깊이의 균열이 발생되고 그 길이는 수 cm ~ 수 m까지 진행이되며 간격도 이와 비슷하게 발

생된다. 벽체나 기둥과 같이 부피가 큰 곳에 콘크리트를 새로 타설한 후 몇시간 후면 표면 상부가 가라앉는 것을 관찰할 수가 있다. 또한 이러한 현상은 짧은 수평방향 균열로서 그 영향을 파악할 수 있다. 이러한 새로 타설된 콘크리트의 부피 감소는 사전경화(prehardening) 또는 소성건조수축으로 알려져 있는데 그 이유는 콘크리트가 소성상태에 있을 때 건조수축이 발생하기 때문이다.

사전경화 건조수축의 결과 균일한 침하를 방해하는 곳에 균열이 발생한다. 즉 철근의 위치나 큰 골재 입자 위치에 균열이 발생하며 새로 타설한 슬래브의 경우 콘크리트 표면에서의 수분손실이 수분필요량을 초과할 때 소성건조수축이 발생한다. 표면 부근의 콘크리트가 어느정도 굳고 구속된 건조수축으로 인한 인장력을 견디기에 충분한 강도를 갖고 있지 않을 경우 균열이 발생한다. 일반적으로 소성건조수축들은 서로 평행하게 0.3~1m 간격으로 발생하며 그 깊이는 25~50mm 깊이로 발생한다. 그림 3.1.1은 소성수축균열의 대표적인 현상을 나타내고 있다.

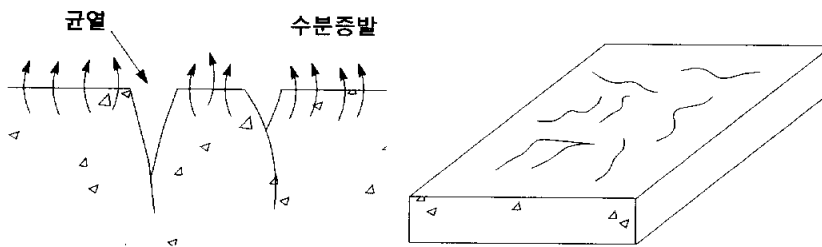


그림 3.1.1 콘크리트 소성수축균열

(2) 침하균열

콘크리트치기를 하고 다짐하여 마감작업을 한 이후에도 콘크리트는 계속 하여 압밀되려는 경향을 보인다. 이러한 압밀현상은 거푸집이나 철근배치 등에 의하여 영향을 받게 되는 등 철근직경이 클수록, 슬럼프가 클수록, 콘크리트 덮개가 작을수록 침하균열은 증가한다.

부재의 두께가 다르거나 콘크리트의 타설 높이에 차이가 있으면, 타설높이의 증가에 따라 침하량이 크게 되고 그 차이에 따라서 경계면상에 침하균열이 발생한다.

그림 3.1.1에서 보이는 침하균열을 예방하는 가장 좋은 방법은 작업에 적합한 타설 높이를 확보하고 작업시 충분한 시간적 여유를 가지고 다짐을 하므로 해서 충분히 예방할 수 있다.

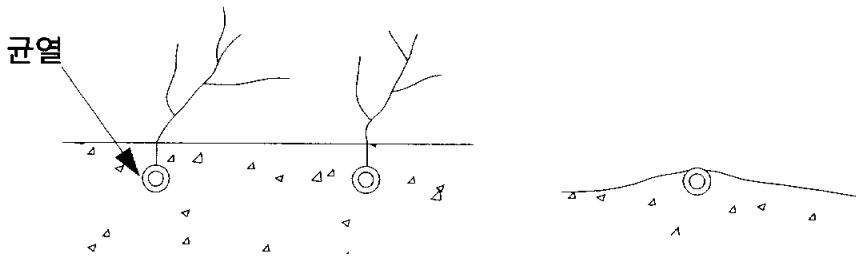


그림 3.1.2 콘크리트의 침하균열

(3)경화열에 의한 균열

시멘트가 수화하고 경화할 때에 수화열이 발생하기 때문에 콘크리트 내부 온도가 상승팽창하지만, 경화의 진행에 따라 차츰 냉각되어 수축균열이 생긴다. 미리 치기한 콘크리트에 접하여 새로운 콘크리트를 치기할 경우에는 새로운 콘크리트가 경화열에 따라 팽창한 것이 수축할 때, 그 수축이 미리 치기한 콘크리트에 의해서 구속되어 치기한 이음부에 균열이 생긴다.

아래의 그림 3.1.3에서 보는 바와 같이 연속 타설이 어려울 때 시공이음을 주므로 해서 발생할 수 있는 현상으로 콘크리트 치기를 할 때 시간관리가 중요하다.

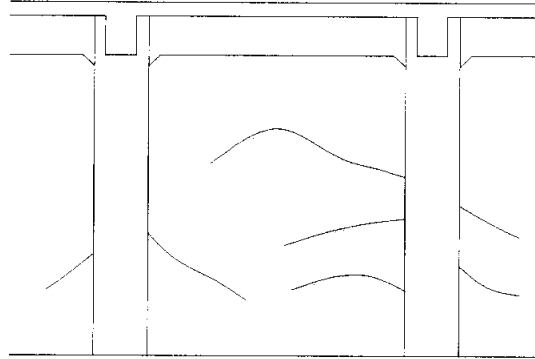


그림 3.1.3 콘크리트의 경화열에 의한 균열

(4) 거푸집 침하, 진동 및 충격, support 등에 의한 균열

콘크리트 경화과정에서 support나 거푸집이 침하하거나 진동이나 충격을 받은 경우에 발생한다. 일반적으로 이 균열은 폭이 커서 구조물의 내력이나 내구성에 문제를 남기는 수가 많다.

아래의 그림 3.1.4에서 보이는 바와 같이 거푸집이 콘크리트의 축압을 버티지 못한 경우 발생한다.

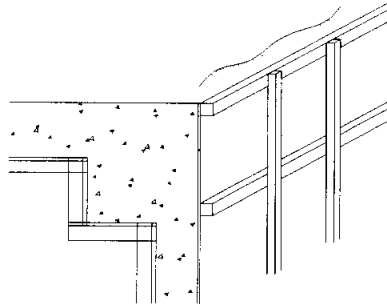


그림 3.1.4 콘크리트의 거푸집에 기인한 균열

(5) 사용재료에 의한 균열

콘크리트 재료 중 체적변화를 일으키는 것이 있을 경우이다. 알칼리골재 반응을 일으키는 골재를 사용한 경우나 팽창재를 과다하게 사용한 경우 등에 균열이 생긴다.

3.1.2 굳은 콘크리트(경화 후)에서 발생하는 균열

굳은 콘크리트의 균열에는 건조수축, 온도변화, 건조습윤의 반복 등에 의한 균열, 수화열에 의한 균열, 알칼리-골재반응의 화학적 반응으로 인한 균열, 동결융해로 인한 균열등을 들 수 있다.

(1) 건조수축에 의한 균열

건조수축은 콘크리트에 있어서 균열을 일으키는 가장 커다란 원인 중 하나이다. 콘크리트는 외부와 접하면서 건조하기 시작하고 건조된 외부는 줄어들게 된다. 그러나 콘크리트의 내부는 수분을 많이 함유하고 있으므로 외부의 수축작용을 구속하게 된다. 따라서 외부표면에는 인장력이 발생하게 되며 이 인장응력이 콘크리트의 인장강도를 초과하게 되면 균열이 발생하게 된다. 즉 표면장력에 기인하는 물의 모세관 장력에 따라 공극

내부측으로 인장을 주게 되어 재료적으로 수축이 발생하는 균열을 건조수축균열이라 하며 단위수량이 클수록 크게 발생한다. 초기에 표면에서 얇게 발생한 건조수축균열은 시간이 경과함에 따라 균열깊이가 깊어진다.

콘크리트의 건조수축 속도는 부재의 크기에 따라 달라지지만, 시공체에서는 거의 그림 3.1.5 에서와 같이, 최초의 4주간에 전 수축량의 50%, 6주에 60%, 8주에 70% 수축이 진전된다.

건조수축은 항상 콘크리트 표면부근에서 더 크며, 시간의 경과에 따라 콘크리트속으로 더욱 깊어진다.

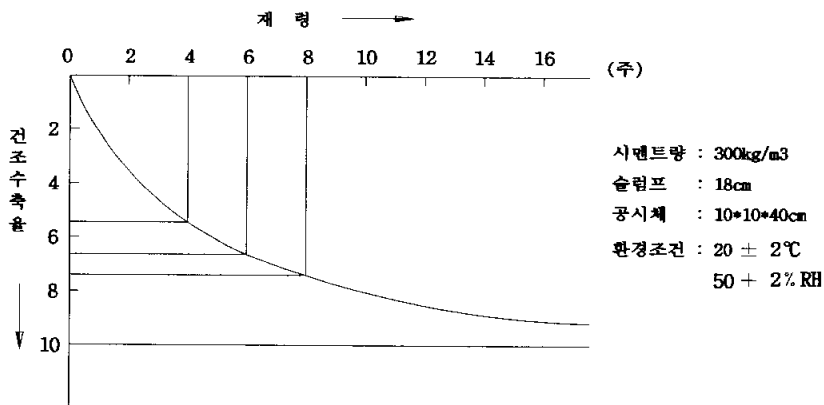


그림 3.1.5 콘크리트의 건조수축의 예

또한 건조수축에 영향을 미치는 인자는 온도, 골재의 양 및 형태, 상대습도, 바람의 속도, 시편의 크기와 형태 등이 있다.

그림 3.1.6은 구속에 의해 콘크리트의 수축·팽창으로 발생한 건조수축의 균열 형태를 보이고 있다.

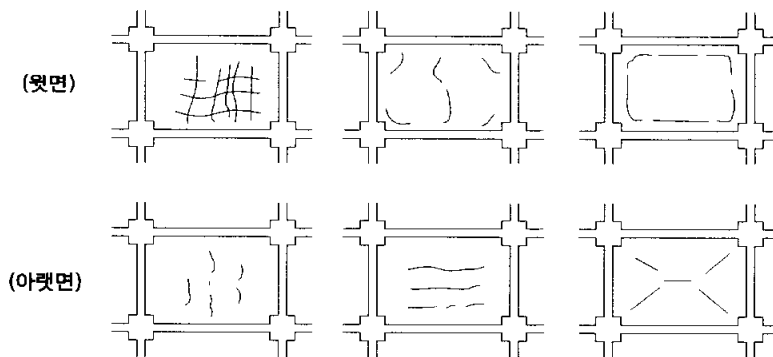


그림 3.1.6 콘크리트의 건조수축균열

(2) 알칼리-골재반응의 화학적 반응으로 인한 균열

알칼리-골재반응(Alkali-aggregate reaction)이란 콘크리트의 수산화알칼리를 주성분으로 하는 세공용액(알칼리 금속이온 Na^+ , K^+ , 수산화이온 OH^- 가 용출되어 있음)이 골재중의 알칼리 반응성 광물과 반응하는 화학 반응을 말한다. 알칼리-골재반응은 반응생성물(알칼리 실리카겔 Alkali silicate gel)의 생성과 흡수에 동반되는 부피팽창에 의하여 콘크리트에 균열이 발생하는 현상을 포함한다.

알칼리 반응성 광물을 함유한 골재를 반응성골재(Reactive aggregate)라 한다.

이러한 생성물을 만드는 알칼리-골재반응은 결과적으로 알칼리-실리카겔이 형성되고 골재경계의 변화를 초래하는데 이 겔은 극한팽창형태(ultimate swelling type)로 이는 수분을 흡수하고 체적을 증가시키는 성향을 갖는다. 이 알칼리-실리카겔은 주위의 시멘트 경화체에 둘러 쌓여 내부압력을 유발하고 결국 시멘트 경화체의 팽창, 균열, 탈락(Expansion, crack, pop-outs)을 초래한다.

팽창은 삼투장(Osmotic potential)을 통하여 나타난 정수압(Hydraulic pressure)에 기인하며 알칼리-실리카반응에서 생성되는 고형물질의 팽창압력에 의해 발생한다. 따라서 이런 부피팽창은 콘크리트 구조물에 치명적인 손상을 입힐 수 있다. 상대적으로 부드러운 겔의 일부분은 물간극수에 용해되어 골재의 팽창에 의해 발생한 균열에 침전되기도 한다.

그림 3.1.7에서 보이는 현상은 콘크리트 재료에 기인한 알칼리-골재반응을 타나내고 있다.

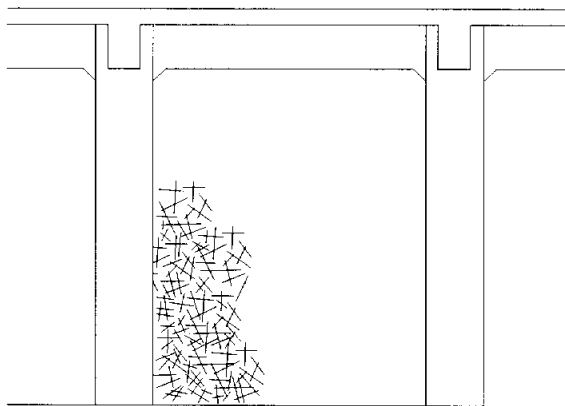


그림 3.1.7 콘크리트의 알칼리-골재반응에 의한 균열

(3) 온도변화에 의한 균열

콘크리트 구조물에 발생하는 온도차이에는 시멘트 수화작용으로 인한 발열과 대기중의 온도변화에 의한 경우로 구별할 수 있다. 이러한 온도차이는 부등의 체적변화를 발생시키며, 이로 인해 인장변형이 발생되고, 이 인장변형률이 콘크리트의 허용 변형률을 초과하게 되어 균열이 생긴다.

이러한 콘크리트 수화작용의 발열로 인한 온도차이 균열은 주로 댐, 기초, 교각, 기둥 등의 매스콘크리트에서 일어나는데 반해, 대기의 온도 차이에 의한 구조물의 온도영향은 모든 형태의 구조물에서도 발생될 수 있다.

콘크리트 수화작용의 발열로 인한 균열은 먼저 시멘트가 수화함에 따라 수화열이 발생하고 이로 인해 내부온도가 상승된다. 초기 양생후 온도가 하강하며 강도가 증가되고 이와 함께 수축작용도 발생한다. 이러한 수축작용이 구속될 경우 인장응력은 온도의 변화에 비례하며 열팽창계수와 유효탄성계수, 구속의 정도에 따라서도 영향을 받게 되며, 구조물의 체적이 클수록 온도변화에 의한 영향이 크다.

각종 시멘트는 종류별로 차이는 있지만 수화작용시 수화열을 발생하고, 이 열을 뺀 결과로서 일어나기 때문에 온도균열을 제어하는데 있어서 시멘트 수화에 의한 콘크리트 발열량을 아는 것은 매우 중요하다.

그림 3.1.8에서 보이는 현상은 구조물에 콘크리트를 타설 한 후 콘크리트 내부의 온도와 외부의 온도의 차에 의해서 발생하는 것으로 저온 혹은 건조한 쪽에서 발생한다.

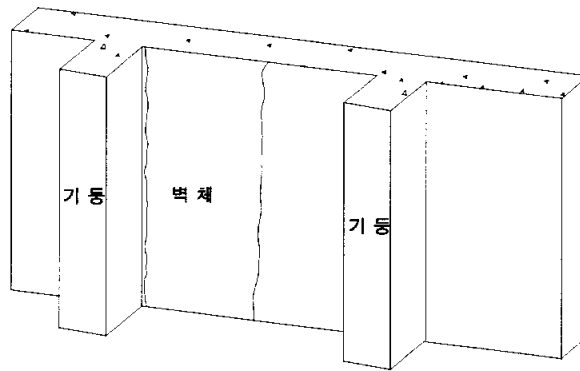


그림 3.1.8 콘크리트의 온도 변화에 의한 균열

(4) 동결융해로 인한 균열

콘크리트 구조물이 동결융해 작용을 받아 콘크리트의 팽창압력이 인장강도를 넘었을 때 콘크리트에 손상이 가해지고 콘크리트 구조물의 성능저하가 발생하게 된다. 손상의 정도는 표면의 층분리로부터 시작되어 구조물 두께로 진전되는 얼음 층에 의하여 콘크리트 구조물에 국부적인 응력 집중을 유발하거나 구조물의 완전한 붕락까지 다양한 형태의 손상을 일으킨다.

그리고, 동결융해 작용으로 인한 콘크리트 염화작용, 즉 골재나 시멘트풀속의 물이 동결과정에서 팽창하여 균열이 발생한다.

아래 그림 3.1.9는 습기에 노출이 심한 부재의 모서리 부분에 망상 균열이나, 박리·박락등의 현상을 보여주고 있다.

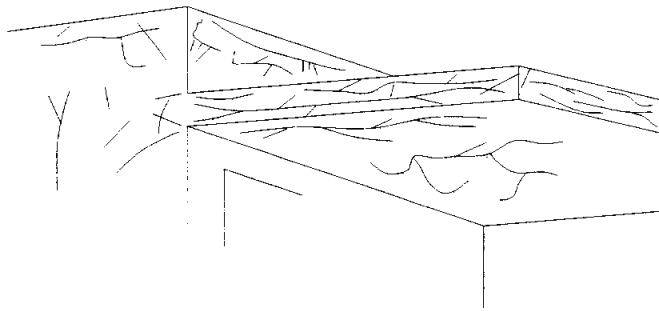


그림 3.1.9 콘크리트의 동결융해에 의한 균열

(5) 시공 불량으로 인한 균열

콘크리트 구조물의 시공을 적절히 수행하지 못하므로써 균열을 일으키게 되는 경우가 있다. 가장 좋은 예는 콘크리트의 워커빌리티를 증가시키기 위하여 물을 추가로 넣는 경우인데, 이렇게 물을 추가할 경우 콘크리트의 강도가 저하되는 것은 물론 건조 수축을 증가시켜 결국 균열의 원인을 초래할 수 있다.

배합수의 증가는 콘크리트 부재의 내부와 외부간의 온도차이를 크게 하여

열응력을 증가시킬 수 있다. 양생을 제대로 수행하지 않거나, 양생을 일찍 끝내는 경우에는 강도 저하와 함께 건조수축의 증가를 가져온다. 시공 문제로 균열을 유발할 수 있는 또 다른 요인으로는 거푸집을 제대로 지지하지 못하거나 다짐이 불충분한 경우 콘크리트가 침하를 일으켜 실제강도가 발휘되기 전에 균열을 유발할 우려가 있다.

(6) 시공시의 초과 하중으로 인한 균열

콘크리트 구조물의 시공 중에 유발되는 하중은 실제 사용시에 작용하는 사용 하중(service load)보다도 더 클 수가 있다. 이러한 큰 하중이 작용할 경우 시공 중에는 구조물이 완전하지 못하므로 손상을 받을 우려가 크다.

특히, 프리 캐스트 부재를 운반 사용할 경우 운반중 도로 사정으로 인하여 부재에 충격이나 비틀림은 받지 않은 것인가 등에 대한 특별한 고려가 필요하다. 운반하여 설치할 경우 들어 올리는 과정에서 갑자기 멈춘다든지 하는 경우에도 충격을 받아 손상을 받을 수 있다. 양생과정에서 증기 양생을 실시할 경우 온도 상승률이나 온도 강하율이 허용 규정치를 초과할 경우 열로 인한 충격으로 균열의 원인을 초래할 수 있다.

빠른 온도 강하는 부재의 표면에 균열을 유발하고 이것이 건조수축등과 겹치게 되면 손상이 커질 수 있다. 현장 타설 콘크리트인 경우에도 시공 중에 재료의 과적이나 건설 장비의 가동으로 부재에 손상을 줄 수 있다. 겨울에 시공할 경우 구조물 내부에서 심한 온도 상승을 시키면 부재의 팽창과 수축 차이로 문제를 야기할 수 있다. 따라서 설계자는 시공시에 구조물에 걸리는 건설 하중을 고려하여야 하며 건설 하중의 제한 사항도 명기하여야 한다.

(7) 설계 잘못으로 인한 균열

구조물에 대한 설계나 설계 상세의 잘못으로부터 균열이 야기될 수도 있다. 철근의 상세오류, 수축조인트의 결여 기초의 설계오류등 여러 가지 예

를 들 수 있다. 부재의 각이 진 코너 부분에서는 응력의 집중현상이 존재하므로 균열발생 가능성이 아주 높다. 구조물의 기초를 제대로 설계하지 않을 경우 부등침하의 원인이 되고 이것은 균열 발생의 원인을 제공하게 된다. 균열이 구조물의 사용성에 중요한 역할을 하는 경우에는 확실한 설계는 물론 건설 기간 동안 조심스런 검사를 하여야 한다.

(8) 외부작용 하중으로 인한 균열

콘크리트 부재의 시공이 완료되어 사용 상태에 들어가면 하중을 받게 된다. 이러한 하중은 부재에 인장응력을 유발하게 되고 균열을 일으키는 원인이 될 수 있다. 하중에 의해 발생하는 균열을 해석에 의해 예측한다는 것이 어려운 일이기 때문에 그 동안 주로 실험 자료에 근거를 두어 균열 폭등을 제한하여 왔다. 지금까지의 연구결과를 종합하면 균열폭(crack width)은 인장철근의 응력이 증가하는데 따라 증가하는 것으로 보인다.

3.2 라이닝 콘크리트의 균열

일반적으로 라이닝 콘크리트의 균열은 작용 하중으로 인한 응력에 의해 발생하는 것보다 건조수축, 온도변화, 변위구속 등의 2차적인 효과에 의하여 주로 발생한다. 이러한 2차적인 효과로 인한 콘크리트 인장응력이 콘크리트 인장강도와 같아질 때 균열이 발생한다. 철근보강 등을 하더라도 균열이 전혀 발생하지 않도록 할 수는 없지만 적절히 철근을 보강한다면 균열의 폭과 균열의 분포를 통제할 수는 있다. 그러므로 철근콘크리트 구조물을 위한 설계기준으로 사용 철근량과 강도뿐만 아니라 철근 배근간격, 철근보강 등을 하더라도 균열이 전혀 발생하지 않도록 할 수는 없지만 적절히 철근을 보강한다면 균열의 폭과 균열의 분포를 통제할 수는 있다. 그러므로 철근콘크리트 구조물을 위한 설계 기준에서 사용 철근량과 강도뿐만 아니라 철근 배근간격, 철근 크기 및 기타 상세 사항들을 규정하여야 한다.

라이닝에서의 균열은 앞에서 언급한 여러 가지 균열원인에서 나타난 몇 가지가 복합적으로 작용하여 발생한 것으로 판단되나, 특히 화학적 반응 및 기상작용이 가장 큰 원인으로 판단된다.

균열 발생은 구조물의 규격에도 영향이 있으며 일반적으로 규격이 클수록 벽체의 두께가 커서 수화열에 의한 온도응력에 따른 구속균열, 건조수축에 의한 균열이 발생한다.

3.2.1 콘크리트의 균열 발생에 미치는 요인

수화열, 건조수축, 초기강도 증가(조강재 사용)등은 균열 발생에 영향을 미치는 주요 요인들이다.

콘크리트 수화열은 콘크리트 단면에 온도차(Temperature Gradient)를 유발시켜 콘크리트의 응결 및 초기 경화 동안 건조수축과 함께 구조물 내부에 부등 변형을 일으켜 균열을 초래한다.

라이닝 콘크리트의 두께가 균일하지 않을 경우에도 거의 유사한 효과로 인하여 균열이 발생하게 된다.

3.2.2 균열의 종류

라이닝 콘크리트에 발생하는 전형적인 균열 형태는 다음 (1), (2), (3)으로 분류할 수 있다.

(1)인버트 슬라브와 터널 아치간 시공 이음부에서 종방향 온도변화와 건조수축으로 인하여 측벽 하부에 중앙부에서 발생하는 수직 균열이 발생한다.

(2)종방향 균열은 횡방향 온도 변화 및 건조수축으로 인하여 터널 천단부의 중심선을 따라 주로 발생한다.

(3)콘크리트 라이닝의 두께가 균일하지 않을 경우 불규칙한 균열이 발생한다. 터널의 내부 라이닝 콘크리트에서 발생하는 균열을 표3.3과 같이 정리하였다.

3.3(a) 터널에서 나타나는 균열(계속)

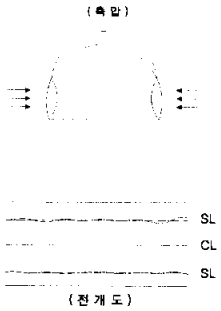
(1) 콘크리트 재료 특성에 의한 균열	
아치부에 종방향 균열이 전구간에 걸쳐 발생하고 시공 이음부를 경계로 어긋나면서 발생되며, 균열폭은 0.1~0.8mm정도이며 일부는 관통균열을 보인다. 원인으로는 건조수축 등 콘크리트의 재료적인 특성에 따른 환경조건변화와 시공 조건에 따른 원인이 복합적으로 작용하여 발생된 초기균열이 수년에 걸쳐 발달된 것이 많다. 대책으로는 표면처리공법(0.3mm 미만)과 주입공법(0.3mm 이상)이 적용되고 있다.	
(2) 동상압에 의한 균열	
	아치의 하부부터 측벽까지의 영역(주동압 영역)에 의해 터널 단면이 위로 돌출되며 아치의 천단(수동영역)이 노면을 들어 올라오는 현상으로 나타나며 융해시 반대로 노면을 침하되는 경향을 보인다. 지하수의 결빙에 따른 동상압이 주된 원인이다. 대책으로 에어모르터, 에어밀크, 그라우트 스토퍼 등의 주입공으로 보수가 필요하다.
(3) 편토압 및 팽창성 토압에 의한 균열	
	측벽의 아치 양어깨부에 복잡한 수평균열이 생기고, 아치와 측벽 사이에 이음부가 있는 경우는 단차가 발생하며 인버트가 없는 경우 지반 부풀음이 발생하며 상부 슬래브 하면의 종방향 균열 또는 측벽 수평균열이 발생한다. 원인은 풍화된 원지반에 점토광물이 있으면서 이로 인해 원지반의 체적이 팽창되고 소성변형을 수반되면서 발생된다. 대책으로 에어모르터, 에어밀크, 그라우트 스토퍼 등의 주입공이나 록볼트, 그라우트 앵커공, 인버트공으로 보수. 지반침하에 의한 모멘트 철근고려, 시공줄눈, 신축줄눈의 정밀시공을 요한다.

표 3.3(b) 터널에서 나타나는 균열(계속)

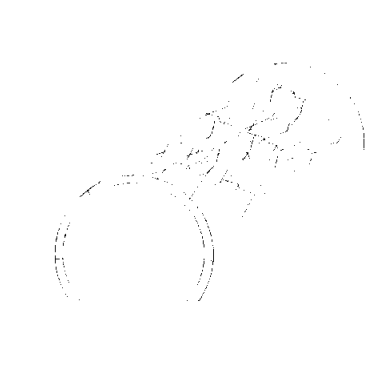
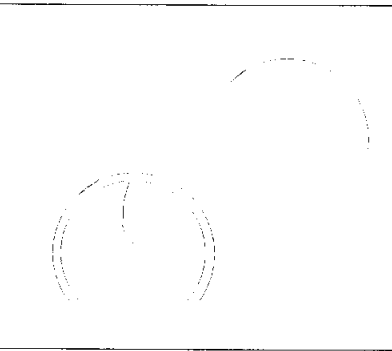
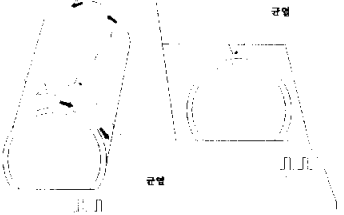
(4)동해에 의해 한냉지의 터널라이닝에 나타나는 균열	
전형적인 pop-out 현상이나 모르타나 콘크리트부의 스케일링의 현상수반하며, 콘크리트 중의 수분의 동결 및 융해에 따른 팽창압이 주된 원인이다. 방호네트의 설치 슛크리트공법 또는 내부 라이닝 콘크리트 등으로 보수하는 것이 적당하다.	
(5)온도차에 의한 터널 내부의 균열	
	위에서 아래로의 터널 내부의 수직방향의 균열이 나타난다. 건조수축 및 외기와 원지반의 온도차에 의한 원인이다. 동결상태가 비교적 소규모로 한냉의 정도가 적은 경우는 U-cut 단열재 삽입공법이 쓰이고 동결이 면상으로 내공단면에 여유가 있는 경우는 표면 단열재 공법이 쓰인다.
(6)수압에 의한 균열	
	수압작용으로 인한 라이닝 측벽부의 종방향 균열로서 수압을 고려하지 않은 설계 및 방수층 배면에 불완전한 유도배수층의 형성으로 인한 방수층 전면에 포켓형 수압발생으로 발생된다. 록볼트 공법이나 유도배수공법에 의한 보수·보강이 필요하다.
(7)계곡부의 지표수 및 지하수 유입에 의한 균열 및 누수	
갱문, 측벽, 포장노면에 균열로 인한 누수가 발생하며 배면지반의 수직절리 발달로 인한 계곡부의 지표수 및 지하수 유입이 원인이다. 계곡부 수로정비, 록볼트, 지반보강 그라우팅, 모르타 스프레이공법, 유도배수공법으로 보수·보강이 필요하다.	

표 3.3(c) 터널에서 나타나는 균열(계속)

(8)댐 및 계곡수로에 의한 지하수 유입에 따른 균열 및 누수	
여수로 유입부의 균열 및 시공이음부에서의 누수 과다하게 발생되며 이로 인한 균열의 진전, 철근부식, 콘크리트의 열화가 진전된다. 인접한 댐 및 계곡수로에서의 지하수 유입이 주된 원인으로 주변지반의 절리 및 파쇄대층 형성으로 인하여 발생되며 전면 그라우팅 공법으로 보강이 필요하다.	
(9)중성화에 의한 균열	
	콘크리트 표면에 요철이 있고 균열, 재료분리, 박리 및 박탈이 발생한다. 통과차량의 매연 등으로 오염물질이 두껍게 덮여있으며 터널의 청소가 곤란할 경우에 많이 발생되며, 타일 개량 압착 붙임 공법을 적용하는 것이 유리하다.
(10)콘크리트 부식에 의한 균열	
라이닝면에 적색을 띤 산성수가 면위로 누수되고 있으며 심한 박락이 일어난다. 황상이온의 농도가 높은 산성 지하수의 유입으로 라이닝 두께의 부족, 보강라이닝 콘크리트의 수밀성 부족이 원인이면 내황상 시멘트 그라우팅 공법이나 유도배수공의 적용이 필요하다.	
(11)수화열에 의한 균열	
	측벽의 수직균열로서 심한 경우 관통균열이 나타나며 시공중의 구속 또는 수화열에 의한 온도 응력의 차이로서 건조수축과 맞물려 균열의 증가하게 된다. 온도철근의 증가, 시멘트 종류 및 배합의 개선, 타설길이와 타설높이의 조정등의 대책이 필요하다.

표 3.3(d) 터널에서 나타나는 균열²⁾

(12)환경의 변화의 천이영역에 따른 균열	
	기체의 흐름이 달라지는 영역에서 발생하는 균열로서 아치나 벽체에 횡방향 균열이 발생한다. 타설길이와 타설높이에 비해 급속한 타설을 하여 신·구 콘크리트간의 불일치로 야기되는 응력이 원인이며, 에폭시주입으로 인한 균열의 충전, 배면 그라우트 공법, 온도철근 및 배력철근의 증가, 신축이음을 설치하므로서 균열을 억제할 수 있다.
(13)원지반의 노화 및 변동에 따른 균열	
	갱구부의 측벽이 침하하여 균열이 발생한다. 터널의 좌우에서 지반의 암석종류가 달라 풍화, 변질이 서로 비대칭으로 균열이 발생한다. 배면 그라우트공 또는 내부 터널의 내력증가를 위해 콘크리트 라이닝공, 주입공 또는 록볼트 공을 통한 내력을 증가 시킬 필요가 있다.

2)콘크리트 구조물의 균열·누수, 보수·보강, 전문시방서
건설교통부·시설안전기술공단

4. 결과 및 고찰

4.1 결과

A터널의 외관조사에서 천단부에 발생한 균열 30개소(68.0m) 중 종방향 균열이 18개소(51.6m), 횡방향 균열이 12개소(16.4m)로 조사되었다.

B터널의 외관조사 결과 천단부에 발생한 균열 492개소(1,444.6m) 중 종방향 균열 146개소(445.9m), 횡방향 균열 346개소(998.7m)로 조사되었다.

C터널의 외관조사 결과 천단부에 발생한 균열 41개소(296.1m) 중 종방향 균열 34개소(281.8m), 횡방향 균열 7개소(14.3m)로 조사되었다.

A터널 천단부에 발생한 균열 개소 중 종방향 균열이 60.0%, 횡방향 균열이 40.0%, B터널의 경우 종방향 균열이 29.7%, 횡방향 균열이 70.3%, C터널의 경우 종방향 균열이 83.0%, 횡방향 균열이 17.0%로 조사되었다.

A터널 천단부에 발생한 균열 길이 중 종방향 균열이 75.9%, 횡방향 균열이 24.1%, B터널의 경우 종방향 균열이 30.9%, 횡방향 균열이 69.1%, C터널의 경우 종방향 균열이 95.2%, 횡방향 균열이 4.8%로 조사되었다.

표 4.1.1 사례 터널의 천단부 종 · 횡방향 균열 빈도

	A터널	B터널	C터널
종방향	60.0%	29.7%	83.0%
횡방향	40.0%	70.3%	17.0%

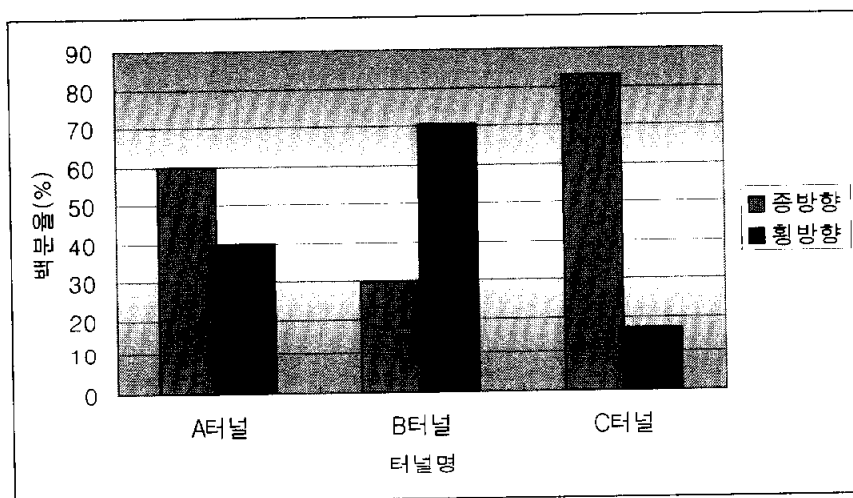


그림 4.1.1 사례 터널의 천단부 종 · 횡방향 균열 빈도

4.2 고찰

4.2.1 균열 원인에 대한 고찰

(1) A터널

균열부에 발생되고 있는 누수현상은 배수 유도관의 시공 불량 때문에 계속적인 누수가 발생되고 있으며, 콘크리트의 재료적 특성과 내·외부의 온도차에 의한 건조수축에 기인한 균열로 판단된다.

시공이음부에서 발생한 균열은 라이닝 콘크리트 시공시 품질관리의 잘 못 때문에 콘크리트의 재료적인 특성과 건조수축에 기인한 균열로 판단된다.

표 4.2.2 A터널 균열 발생 원인

균열 발생	균열 원인
균열부 누수 현상.	품질관리 불량. 콘크리트의 건조수축. 콘크리트 재료 특성.
천단부 종·횡방향 균열.	
시공 이음부 횡방향 균열.	

(2) B터널

외관조사에서 나타난 균열 형태로 보아 미세한 균열들로 라이닝 콘크리트 시공시 품질관리의 잘 못 때문에 콘크리트의 재료적 특성과 건조수축 및 콘크리트 내·외부의 온도차에 의한 균열로 판단된다.

신축이음부 미설치도 건조수축 균열의 원인으로 작용한 것으로 판단된다.

표 4.2.3 B터널 균열 발생 원인

균열 발생	균열 원인
천단부 종·횡방향 균열	콘크리트의 건조수축, 콘크리트 재료 특성, 품질관리불량.
시공 이음부 종·횡방향 균열.	
신축 이음부 미설치	

(3) C터널

천단부에 발생된 균열과 타일 탈락, 시공이음부의 변형 등의 균열 발생으로 보아 암반 사이에 포함하고 있는 점토광물이 팽창하면서 라이닝 콘크리트에 균열이 발생한 것으로 판단되며, 콘크리트의 재료적인 특성, 환경조건 변화와 건조수축이 균열의 원인으로 판단된다.

표 4.2.4 C터널 균열 발생 원인

균열 발생	균열 원인
천단부 종·횡방향 균열	콘크리트의 건조수축, 팽창성 토압. 콘크리트 재료 특성.
시공 이음부 변형.	

4.2.2 균열 현상에 대한 고찰

(1) A터널

표 4.2.5에서는 A터널의 종·횡방향 균열폭에 대한 균열개소와 길이와의 관계를 백분율로 나타내었다.

종방향 균열에서 균열폭이 0.2mm 55.6%, 0.4mm 22.2%, 1.1mm 11.1%로 나타났다.

횡방향 균열에서 균열폭의 경우 0.2mm 90.2%로 나타나고 있다.

균열의 형태를 개소와 길이에 대하여 백분율로 나타내면 그림 4.2.1, 그림 4.2.2와 같다.

표 4.2.5 A터널의 천단부 균열 빈도 분석 (균열폭:mm, 길이:m)

균열폭 (mm)	종방향(개소)		횡방향(개소)		종방향(길이)		횡방향(길이)	
	종방향	백분율	횡방향	백분율	종방향	백분율	횡방향	백분율
0.1	1	5.6%			3	5.8%		
0.2	10	55.6%	11	91.7%	30	58.1%	14.8	90.2%
0.3	1	5.6%	1	8.3%	2	3.9%	1.6	9.8%
0.4	4	22.2%			9.6	18.6%		
1.1	2	11.1%			7	13.6%		

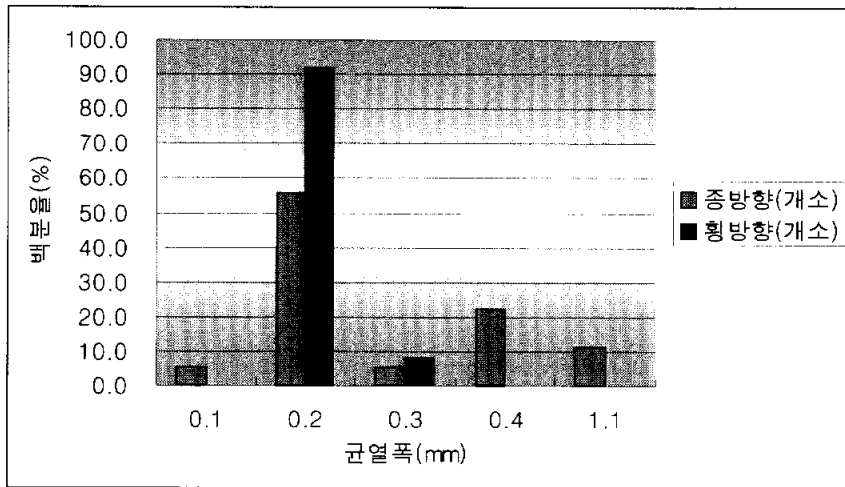


그림 4.2.1 A터널의 천단부 균열 개소에 대한 분석

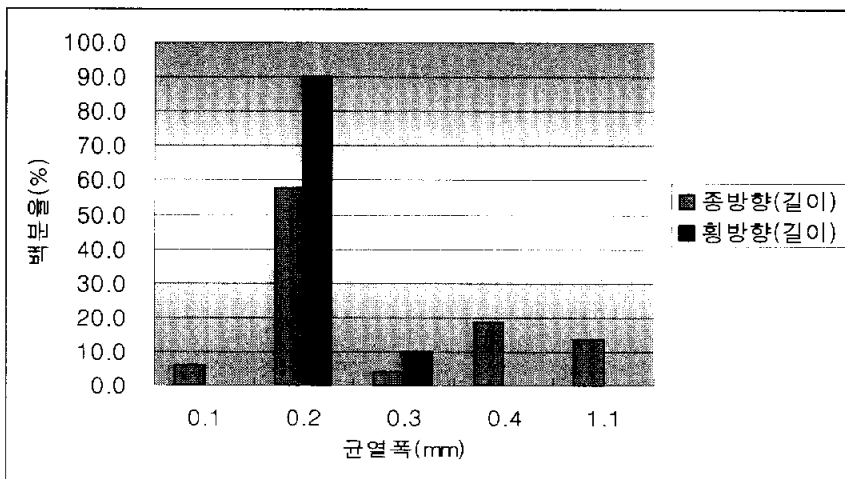


그림 4.2.2 A터널의 천단부 균열 길이에 대한 분석

표 4.2.6에서는 종·횡방향 균열에 개소와 길이에 대해서 비교해서 나타내었다.

종방향 균열이 전체 균열의 60%~76%, 횡방향 균열이 24%~40%로 나타났다.

표 4.2.6 A터널의 종·횡방향 균열 빈도 분석(길이:m)

	종방향	횡방향		종방향	횡방향
개 소	18	12	길 이	51.6	16.4
백분율	60.0%	40.0%	백분율	75.9%	24.1%

(2)B터널

표 4.2.7에서 B터널의 종·횡방향 균열폭에 대한 균열개소와 길이와의 관계를 백분율로 나타내었다.

종방향 균열의 균열폭이 0.2mm 47.9%, 0.3mm 28.8%로 나타났다.

횡방향 균열의 균열폭이 0.2mm 44.8%, 0.3mm 31.8%로 나타났다.

균열의 형태를 개소와 길이에 대하여 백분율로 나타내면 그림 4.2.3, 그림 4.2.4와 같다.

표 4.2.7 B터널의 천단부 균열 빈도 분석 (균열폭:mm, 길이:m)

균열폭 (mm)	종방향(개소)		횡방향(개소)		종방향(길이)		횡방향(길이)	
	종방향	백분율	횡방향	백분율	종방향	백분율	횡방향	백분율
0.1	5	3.4%	18	5.2%	9	2.0%	39.7	4.0%
0.2	70	47.9%	155	44.8%	212.3	47.6%	477	47.8%
0.3	42	28.8%	110	31.8%	119.9	26.9%	310.8	31.1%
0.4	5	3.4%	31	9.0%	11.9	2.7%	85.7	8.6%
0.5	6	4.1%	16	4.6%	22.2	5.0%	46.2	4.6%
0.6	1	0.7%	3	0.9%	7	1.6%	11.5	1.2%
0.7	2	1.4%	8	2.3%	4.2	0.9%	13	1.3%
0.8	5	3.4%	1	0.3%	23.1	5.2%	1.2	0.1%
0.9	3	2.1%	1	0.3%	10.3	2.3%	4	0.4%
1.0	3	2.1%	2	0.6%	11.2	2.5%	6.3	0.6%
1.1	1	0.7%			1.8	0.4%		
1.2	3	2.1%			13	2.9%		
1.5			1	0.3%			3.3	0.3%

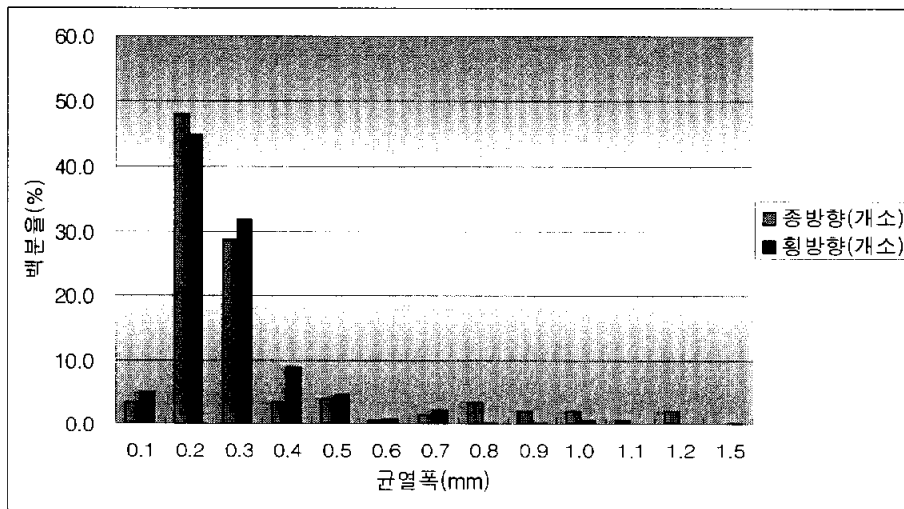


그림 4.2.3 B터널의 천단부 균열 개소에 대한 분석

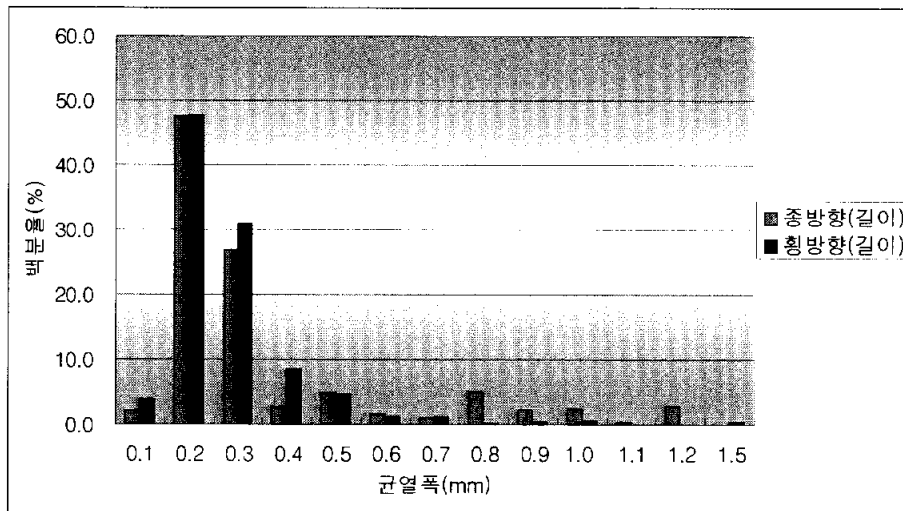


그림 4.2.4 B터널의 천단부 균열 길이에 대한 분석

표 4.2.8에서는 종·횡방향 균열에 개소와 길이에 대해서 비교해서 나타내었다.

종방향 균열이 전체 균열의 29.7%~30.9%, 횡방향 균열이 70.3%~69.1%로 나타났다.

표 4.2.8 B터널의 종·횡방향 균열 빈도 분석 (길이:m)

	종방향	횡방향		종방향	횡방향
개소	146	346	길이	445.9	998.7
백분율	29.7%	70.3%	백분율	30.9%	69.1%

(3)C터널

표 4.2.9에서는 C터널의 종·횡방향 균열폭에 대한 균열개소와 길이와의 관계를 백분율로 나타내었다.

종방향 균열에서 균열폭이 0.2mm 73.5%, 0.3mm 26.5%로 나타났다.

횡방향 균열에서 균열폭이 0.2mm 86.0%, 0.3mm 14.0%로 나타났다.

균열의 형태를 개소와 길이에 대하여 백분율로 나타내면 그림 4.2.5, 그림 4.2.6과 같다.

표 4.2.9 C터널의 천단부 균열 빈도 분석 (균열폭:mm, 길이:m)

균열폭 (mm)	종방향(개소)		횡방향(개소)		종방향(길이)		횡방향(길이)	
	종방향	백분율	횡방향	백분율	종방향	백분율	횡방향	백분율
0.2	25	73.5%	6	85.7%	213	75.6%	12.3	86.0%
0.3	9	26.5%	1	14.3%	68.8	24.4%	2	14.0%

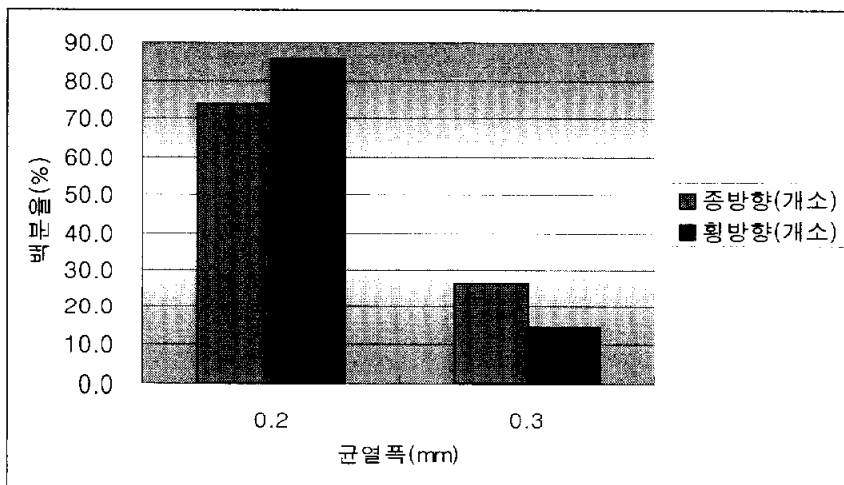


그림 4.2.5 C터널의 천단부 균열 개소에 대한 분석

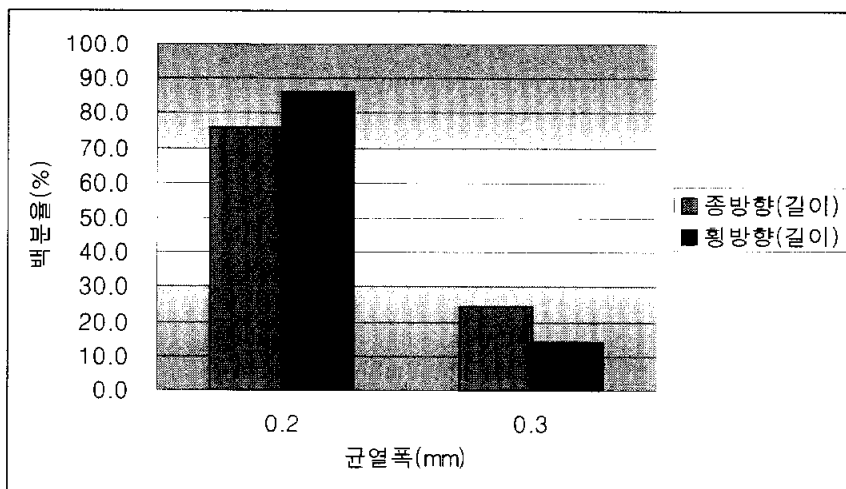


그림 4.2.6 C터널의 천단부 균열 길이에 대한 분석

표 4.2.10에서는 종·횡방향 균열에 개소와 길이에 대해서 비교해서 나타내었다.

종방향 균열이 전체 균열의 82.9%~95.2%, 횡방향 균열이 17.1%~4.8%로 나타났다.

표 4.2.10 C터널의 종·횡방향 균열 빈도 분석 (길이:m)

	종방향	횡방향		종방향	횡방향
개소	34	7	길이	281.8	14.3
백분율	82.9%	17.1%	백분율	95.2%	4.8%

표 4.2.11과 그림 4.2.7에서 보여지는 것과 같이 A터널에서 균열폭 0.2~0.4mm 균열이 전체 균열의 83.4%로 나타났다.

B터널에서 균열폭 0.2~0.3mm 균열이 전체 균열의 76.7%로 나타났다.

C터널에서 균열폭 0.2~0.3mm 균열만이 나타났다.

사례터널에서 발생한 종방향 균열의 균열폭이 0.2~0.3mm 균열로 나타났다.

사례터널에서 발생한 횡방향 균열의 경우 표 4.2.12에서 보여지는 것과 같이 횡방향 균열의 균열폭이 0.2~0.3mm 균열로 나타났다.

A터널에서 균열폭 0.2~0.3mm 균열만이 나타났고, B터널에서는 0.2~0.3mm 균열이 전체 균열의 76.6%로 나타났으며, C터널에서 균열폭 0.2~0.3mm 균열만이 나타났다.

사례터널에서 발생한 횡방향 균열도 종방향 균열처럼 균열폭이 0.2~0.3mm 균열 형태로 나타났다.

표 4.2.11 사례터널의 종방향 균열폭 비교 분석 (균열폭:mm)

균열폭 (mm)	A터널 종방향		B터널 종방향		C터널 종방향	
	개소	백분율	개소	백분율	개소	백분율
0.1	1	5.6%	5	3.4%	25	73.5%
0.2	10	55.6%	70	47.9%	9	26.5%
0.3	1	5.6%	42	28.8%	0	0%
0.4	4	22.2%	5	3.4%	0	0%
0.5	0	0%	6	4.1%	0	0%
0.6	0	0%	1	0.7%	0	0%
0.7	0	0%	2	1.4%	0	0%
0.8	0	0%	5	3.4%	0	0%
0.9	0	0%	3	2.1%	0	0%
1.0	0	0%	3	2.1%	0	0%
1.1	2	11.1%	1	0.7%	0	0%
1.2	0	0%	3	2.1%	0	0%
1.5	0	0%	0	0%	0	0%

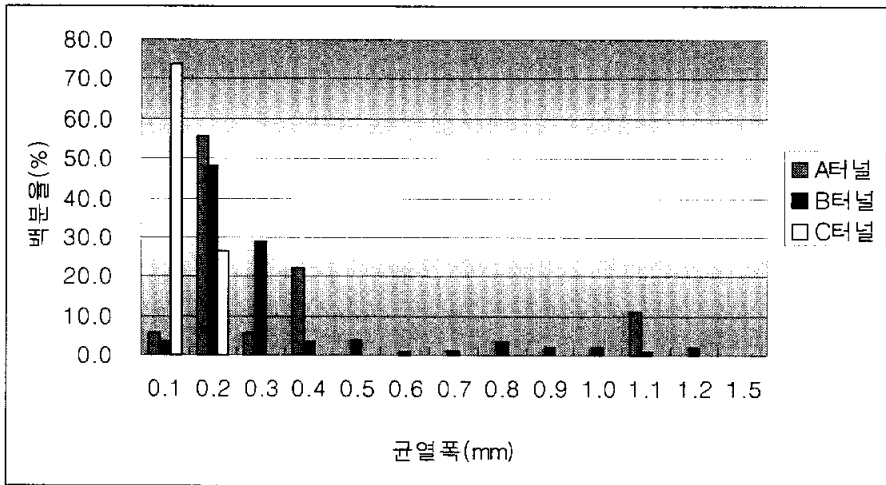


그림 4.2.7 사례터널의 종방향 균열폭 비교 분석

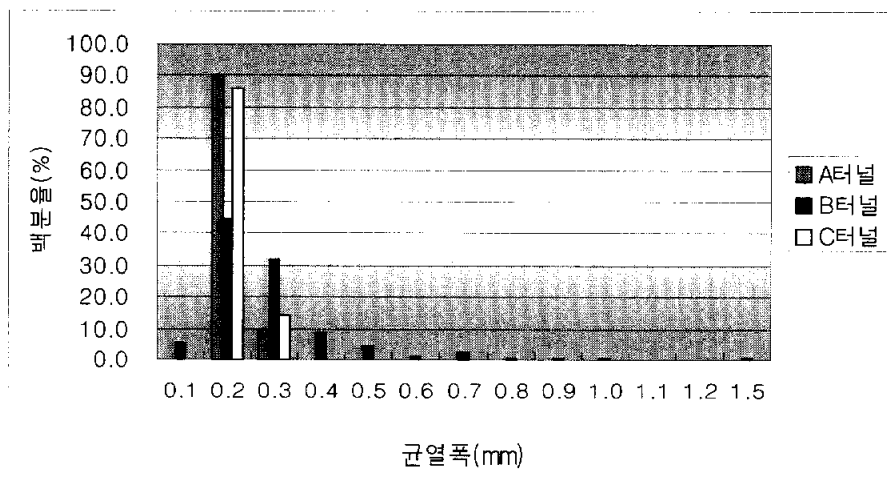


그림 4.2.8 사례터널의 횡방향 균열폭 비교 분석

표 4.2.12 사례터널의 횡방향 균열폭 비교 분석 (균열폭:mm)

균열폭 (mm)	A터널 횡방향		B터널 횡방향		C터널 횡방향	
	개소	백분율	개소	백분율	개소	백분율
0.1	0	0%	18	5.2%	0	0%
0.2	14.8	90.2%	155	44.8%	12.3	86.0%
0.3	1.6	9.8%	110	31.8%	2	14.0%
0.4	0	0%	31	9.0%	0	0%
0.5	0	0%	16	4.6%	0	0%
0.6	0	0%	3	0.9%	0	0%
0.7	0	0%	8	2.3%	0	0%
0.8	0	0%	1	0.3%	0	0%
0.9	0	0%	1	0.3%	0	0%
1.0	0	0%	2	0.6%	0	0%
1.1	0	0%	0	0%	0	0%
1.2	0	0%	0	0%	0	0%
1.5	0	0%	1	0.3%	0	0%

5. 결 론

본 연구에서 터널 천단부 균열 현상 및 원인에 대한 조사 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구 대상 터널에서 균열 현상 분석 결과 균열 중 0.2mm~0.3mm의 균열폭이 차지하는 비율은 종방향에서 79.3% , 횡방향에서는 92.2%로 나타났다, 균열 현상의 대부분이 0.2mm~0.3mm가 됨을 알 수 있었다.

2. 라이닝 콘크리트와 원지반의 암반사이에 포함되어 있는 점토광물이 원지반의 체적을 증가시켜 팽창성 토압에 의한 균열이 발생하였다.

3. 라이닝 콘크리트 시공시 내·외부의 온도차 및 건조수축에 의해 면상에 균열이 발생하였다.