

## 공용중인 3-Arch터널의 열화조사 및 원인분석

이유석<sup>1\*</sup>, 박성우<sup>2</sup>, 황인백<sup>3</sup>, 신용석<sup>4</sup>, 김순곤<sup>5</sup>

### Analysis of cause and deterioration about using 3-Arch tunnel

Yu-Seok Lee, Sung-Woo Park, In-Baek Whang, Yong-Suk Shin, Sun-Gon Kim

**Abstract** This paper studied the cause of the deterioration of the four 3-Arch tunnels built in mid-1990. The common deteriorations of the four 3-Arch tunnels were longitudinal cracks, leakage and efflorescence at the same parts of lining concrete. Three fourths of 3-Arch tunnels, there was high percentage longitudinal cracks and a quarter was low frequency about longitudinal cracks. So the material reviewed to find out the differences between two groups in construction process and analysis was conducted such as non-destructive testing, precise visual survey and safety evaluation of one tunnel which had bad ground condition. As the result, the tunnels were safety condition and the primary deterioration occurred during the construction process, namely, problems arrangement of rebar and the effects of the blast at middle tunnel.

**Keywords:** 3-Arch tunnel, tunnel, longitudinal crack, leaking water, efflorescence, maintenance

**요 지** 3-Arch터널 시공초기인 1990년대 중반에 시공된 4개소의 3-Arch터널을 대상으로 열화발생여부를 조사하였으며 그 결과 4개 터널 모두 중앙기둥측 상, 하선 아치부에서 발생형태가 유사한 종방향 균열이 조사되었다. 4개 터널 중 3개소의 터널에서는 종방향 균열의 발생빈도가 높고 1개의 터널에서는 종방향 균열의 발생빈도가 낮아 이 2개군의 시공과정상 차이 점을 분석하였으며 비파괴시험 및 정밀육안조사, 지반조건이 취약한 1개의 터널을 대상으로 안전성평가를 실시하여 이러한 열화들의 원인과 이에 따른 안전성여부를 판단하였다. 그 결과 안전성은 확보되었으며 중앙터널 기둥측 상, 하선아치부에 발생한 열화는 중앙터널굴착에 앞서 선시공되는 상, 하선 콘크리트라이닝의 철근배근불량과 이후의 시공단계인 중앙터널 굴착시의 영향이 큰 것으로 분석되었다.

**주요어:** 3-Arch터널, 터널, 종균열, 누수, 백태, 유지관리

## 1. 서 론

3-Arch터널은 지반이 불량하거나 도심지와 같이 인접 구조물의 영향을 받는 곳의 대 단면이 소요되는 곳에 시공이 되고 있다. 그러나 시공초기에는 분할굴착임에도 불구하고 굴착단면이 크고 굴착도중 지보재 철거 및 기둥 및 선(先)콘크리트라이닝 타설 등 공정이 복잡하여 시공관리가 어려운 점이 있었다.

3-Arch터널의 경우 일반적인 시공단계는 표 1과 같으며 최근의 지하철9호선, 경부고속철도, 인천공항철도 등의 시공사례로 볼 때 지보재 및 굴착장비의 소형화 및 경량화, 발파기술의 발달로 과거보다는 시공단계가 정형화 되었고 중앙터널 굴착 시 소형화된 기계굴착과 정밀제어발파를 이용하거나 막장간 거리, 굴진장 조절 등

을 통해 주변 지반이완을 최소화하고 있다.

본 연구에서 초기에 시공된 3-Arch터널을 선정하여 점검한 결과 공통적인 열화현상이 조사되었는데 대표적인 열화가 중앙터널 기둥측 기하학적인 형상과 배수시스템 시공어려움에 의한 누수, 백태가 조사되었고 역시 중앙터널 기둥측 상단 아치부에 균열폭이 크고 연장이 긴 종방향 균열이 조사되었다.

이러한 시공초기의 3-Arch터널은 대부분 철도나 지하철의 정거장에 시공되어 전 표면이 마감재 및 외장재로 덮여있어 공용 중 유지관리는 정밀하게 시행되지 않고 있는 실정이다.

본 연구에서는 3-Arch터널 4개소에 대한 정밀안전진단결과 구조적균열로 의심이 가는 중앙터널 기둥측 종방향 균열에 대하여 구조안전성평가를 실시하여 안전성

\*1정회원, 한국시설안전공단, 대리, 기술사 (E-mail: yslee@kistec.or.kr)

<sup>2</sup>정회원, 한국시설안전공단, 과장, 기술사 (E-mail: sungwoo@kistec.or.kr)

<sup>3</sup>정회원, 한국시설안전공단, 팀장 (E-mail: hib8329@kistec.or.kr)

<sup>4</sup>정회원, 한국시설안전공단, 실장, 공학박사, 기술사 (E-mail: sys3281@kistec.or.kr)

<sup>5</sup>정회원, 서울특별시도시철도공사 시설장비단 (E-mail: ksg0603@naver.com)

을 평가하였고 현장조사 결과와 함께 균열발생 원인을 분석하였다.

## 2. 3-Arch터널 시공시 고려사항

터널단면은 3개의 터널이 접하는 협상으로 중앙터널 기둥부에 응력이 집중되며 굴착시 각 터널과 시간차가 생겨 간섭효과가 크게 나타나고 중앙터널 기둥부의 누수가 발생할 가능성이 높다. 이에 대한 시공시 고려사항은 다음과 같다.

- 시공성과 안전성을 위해 중앙터널과 좌, 우터널을 서로 엇갈리게 굴착하되 상반 막장간 거리는 20 m 이상이 되게 함
- 발파로 인한 인접터널 영향을 최소화하기 위해 굴진장을 1.0 m이하로 제한
- 발파굴착시 발파진동의 영향을 최소화하기 위해 스무스블라스팅 공법 적용
- 방수지 공정시는 방수지에 손상이 가지 않도록 특별히 유의(김승렬, 2004)

이와 같이 3-Arch터널은 상기의 고려사항외에 여러 세세한 사항을 고려해야 하는 터널중의 하나로 본 연구의 대상터널 시공 자료에도 상기와 같은 시공시 특이사항이 일부 조사되었다.

## 3. 조사대상 3-Arch터널

준공 후 약11년이 경과된 3-Arch터널 4개소를 대상으로 외관조사와 간단한 비파괴시험을 병행하였다. 이를 통해 공통적인 열화발생유무를 조사하였고 중요한 열화에 대하여 발생원인 분석 및 안전성평가를 실시하였다.

조사대상터널은 개착식공법과 함께 구성된 도심지 철도 정거장으로 각각의 구성연장은 그림 1과 같다.

단면폭 및 높이는 4개터널 모두 거의 비슷하며 A터널의 단면도인 그림 7을 참고하기 바란다.

굴착순서는 표 1과 같이 좌우측터널 굴착 후 중앙기둥과 좌우측 콘크리트라이닝을 시공하고 이어 중앙터널을 굴착 후 중앙터널 콘크리트라이닝을 시공하는 순서로 4개 터널 모두 시공되었다.

## 3.1 A터널

3-Arch터널구간은 연장55m이며 단면형상과 시공단계는 그림 1, 표 1과 같다.

지반조건은 매립층, 풍화대층, 연암층, 경암층으로 이루어져 있으며 매립층과 풍화대층 사이에 층적층이 관입되어 있다. 터널 천단부는 연암층에 해당되며 RQD는

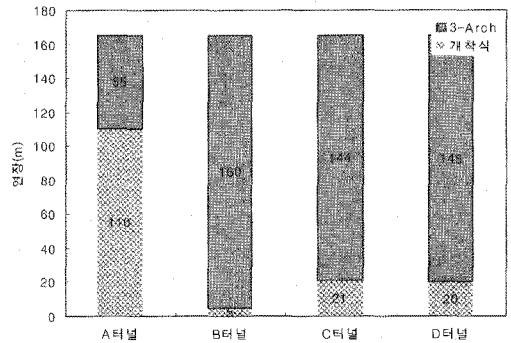


그림 1. 대상3-Arch터널 및 단면

표 1. 시공단계

시공 순서	① 좌측터널 상반굴착 및 지보설치	② 좌측터널 하반굴착 및 지보설치
개요도		
시공 순서	③ 우측터널 상반굴착 및 지보설치	④ 우측터널 하반굴착 및 지보설치
개요도		
시공 순서	⑤ 좌·우측터널 콘크리트 라이닝 타설	⑥ 중앙터널 상반굴착 및 지보설치
개요도		
시공 순서	⑦ 중앙터널 콘크리트 라이닝 타설	⑧ 중앙터널 하반굴착 및 부대시설 설치
개요도		



표 2. 비파괴시험결과

관련시험	시험 및 측정결과	비고
콘크리트강도	23~32(Mpa)	특이사항없음
콘크리트 라이닝두께	400(mm)이상	특이사항없음
균열깊이	160~230(mm)	단면 1/2 이상
탄산화측정	18(mm)	진행속도빠름
철근배근탐사	주철근간격 평균180(mm)	철근간격 특이사항없음 피복두께깊음

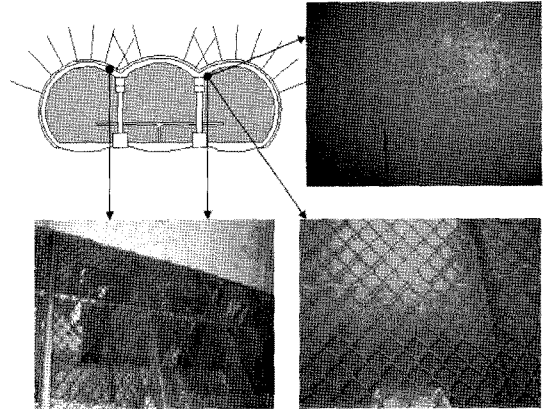


사진 2. B터널: 백태, 종방향균열

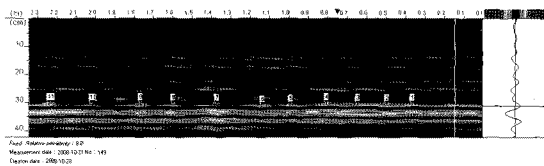


그림 4. A터널 종방향균열부 철근피복두께

발생하고 있다.

### 3.1.2 비파괴시험결과

비파괴시험은 콘크리트라이닝 강도와 균열깊이 등을 시험하였으며 표 2와 같이 특별한 문제점은 없는 것으로 분석되었다. 다만 균열깊이가 깊은 편이며 철근피복두께가 그림 4와 같이 300 mm정도로 설계피복두께 50 mm와 상당한 차이를 보여 시공당시 철근배근에 문제가 있었음을 추측할 수 있으며 주철근으로서의 역할이 제한적일 수 있는 상황이다.

## 3.2 B터널

3-Arch터널구간 연장은 160 m로 지반조건은 풍화암 지반이며 굴착시 큰 어려움은 없었다. 굴착에 따른 주변 지반의 영향을 최소화하기 위해 좌, 우측터널은 Road Header로 굴착을 했고 중앙터널은 양측터널사이로 Road Header투입공간이 협소하여 발파와 기계굴착을 실시하였다.

### 3.2.1 외관조사결과

일부 횡방향 균열이 조사되었고 사진 2와 같이 역시 중앙터널 기동측 아치부에 종방향 균열과 많은 개소에서 누수, 백태가 조사되었다. 종방향 균열은 주로 우측터

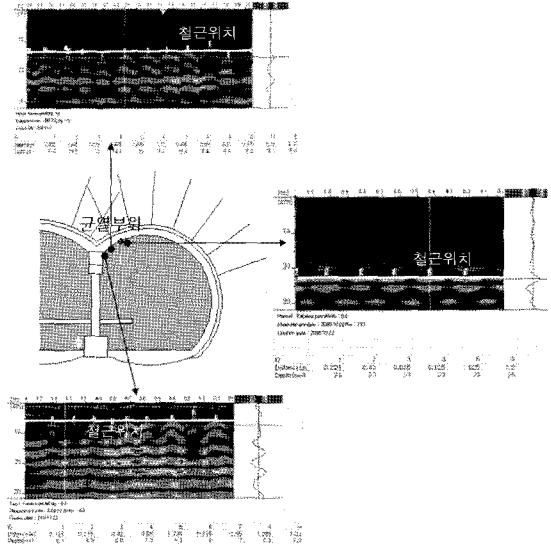


그림 5. B터널 종방향 균열부위의 철근피복두께 변화

널에서 균열폭 0.3 mm 이상으로 160 m구간 중 39.5 m로 조사되었다.

### 3.2.2 비파괴시험결과

균열깊이 측정결과 90~206 mm로 분석되었으며 철근배근탐사결과 A터널의 경우와 마찬가지로 철근피복두께가 상당히 깊은 것으로 분석되었다.

기동상단 거더측면, 균열면 하부, 균열면에서 피복두께를 측정한 결과 그림 5와 같이 49~73 mm, 130~160 mm, 230 mm로 점차 깊어져서 아치부 철근과 기동부

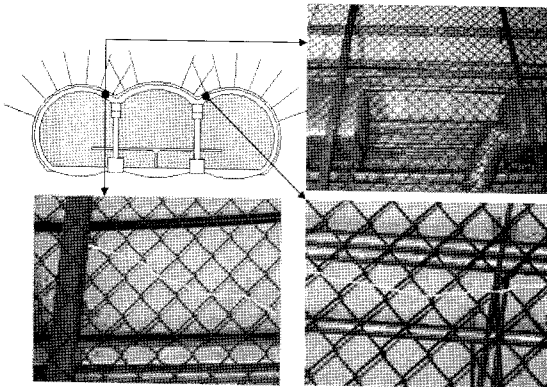


사진 3. C터널: 백태, 중·사방향균열

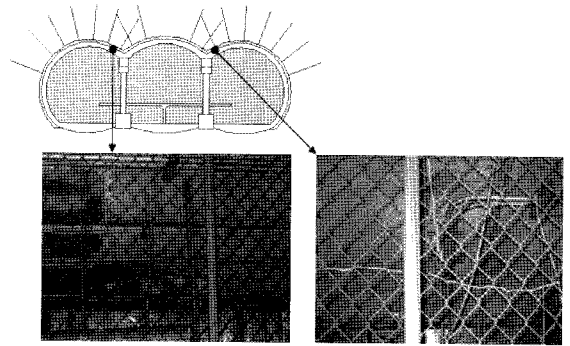


사진 4. D터널: 백태, 중·횡방향균열

철근시공이 미흡하거나 콘크리트 타설시 유동이 있었던 것으로 분석된다.

### 3.3 C터널

3-Arch터널의 연장은 144 m로 매립, 충적층, 풍화토, 연암(RQD 0~6), 경암(RQD 20~57)으로 구성되며 자료검토결과 시공과정상 특이점은 없다.

#### 3.3.1 외관조사 및 비파괴시험결과

A, B터널의 열화양상과 같이 중앙터널 기둥측 아치부에 종방향 균열, 누수, 백태가 조사되었다. 중앙터널 기둥측 아치부위의 종방향 균열 연장은 97.5 m로 대부분 스패에서 종방향 균열이 조사되었다.

콘크리트 강도는 24.4 Mpa로 준공도상의 설계기준강도 24.0 Mpa를 상회하며 탄산화깊이는 추정깊이 14.36 mm 미만이다.

### 3.4 D터널

3-Arch터널구간은 연장145 m이며 지반조건은 매립층을 포함한 충적층이 깊이 (-)7 m까지 분포하고 지하수량이 많다. 지반구성은 충적층, 풍화암, 연암(TCR/RQD, 27~100/0~36), 경암으로 형성된다.

시공과정상 특이점은 좌, 우측터널 콘크리트라이닝에 손상을 최소화하기 위해 비전기다단식 Excel뇌관을 사용한 것으로 조사되었다.

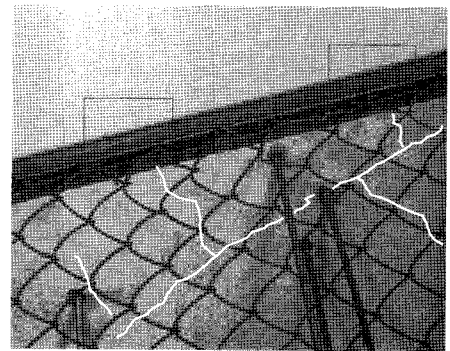


사진 5. A터널의 균열보수 경계부

#### 3.4.1 외관조사 및 비파괴시험결과

전술한 3-Arch터널과 같은 양상의 종방향 균열이 거의 없으며 일부 종방향 균열은 사진 4와 같이 시공이음부를 전후로 횡방향 균열과 같이 조사되었다. 누수와 백태는 지반조건에 영향을 받아 많은 개소에서 조사되었는데 주로 중앙터널부 기둥측의 취약개소에서 조사되었다. 콘크리트 비파괴강도는 25.5 Mpa로 준공도상의 설계기준 강도값인 24 Mpa를 상회하는 것으로 분석되었으며 기타 특이사항은 조사되지 않았다.

### 3.5 균열보수부 조사

일부개소 중앙터널 기둥측의 종방향 균열은 사진 5와 같이 승강장방향의 아치부위를 기준으로 주입보수가 실시된 곳과 미 실시된 곳이 조사되었으며 근접확인 조사결과 보수부에서는 재균열이 조사되지 않았다.

균열보수는 2000년 1월~2001년 9월까지 단계적으로 4차례 시행되었으며 시행된지 약 7년이 경과된 상태

이다. 이는 시공 후 추가의 하중이 작용하지 않았거나 추가의 하중이 작용되었더라도 지반이 안정되어 콘크리트 라이닝으로의 하중전이가 거의 없다고 볼 수 있을 것이다.

#### 4. 조사분석

4개의 터널에 발생한 종방향 균열 분석결과는 그림 6과 같다. A, B, C터널에서의 각 종방향 균열 면적율이 D터널 종방향 균열 면적율보다 월등히 많이 조사되었다. 또한 종방향 균열 이외의 열화는 일부 횡방향 균열과 누수, 백태로 조사되었다.

중앙터널 기둥측의 종방향 균열 면적율을 볼때 D터널은 양호한 것으로 분석되었는데 이는 시공당시 양측터널콘크리트라이닝의 손상을 최소화하기 위해 중앙터널 굴착시 발파방식을 변경한 것에 기인한 것으로 볼 수 있다.

누수와 백태의 발생빈도는 지반조건이 다르기 때문에 각 터널 상호간 연관성이 없으며 다만 중앙터널과 좌우터널의 경계부위에서 주로 발생하는 공통점이 있었다. 따라서 앞서 A터널의 시공관련 자료상의 대책과 함께 방수지를 절단하지 않고 일부부위는 2중으로 방수지를 시공하는 방안도 효과적인 것으로 분석된다.

#### 5. 안전성검토

안전성검토 대상터널은 지반조건이 가장 불리한 A터

널로 선정하였다. 단면상세제원은 그림 7과 표 3~표 4와 같다.

안전성 검토시는 A터널과 B터널의 균열발생부위 철근배근탐사결과, 주철근의 피복두께가 230~300 mm로

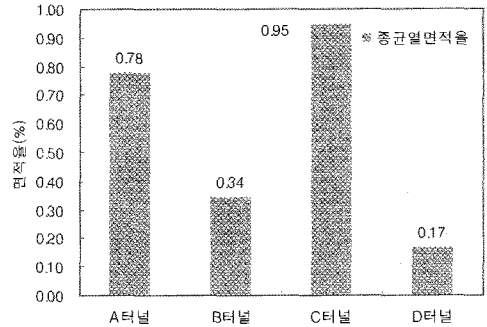


그림 6. 종방향균열 면적율비교

표 3. 콘크리트라이닝 허용응력

관련시험	설계기준	비고
콘크리트강도	24(Mpa)	준공도
허용전단응력	0.38(Mpa)	콘크리트 구조설계기준 ('07)
허용인장응력	0.64(Mpa)	
허용압축응력	9.41(Mpa)	
콘크리트 라이닝두께	400(mm)	준공도
숏크리트두께	200(mm)	
록볼트길이	3.0(m), D25	

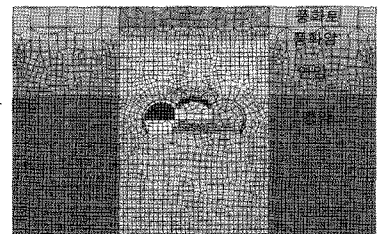
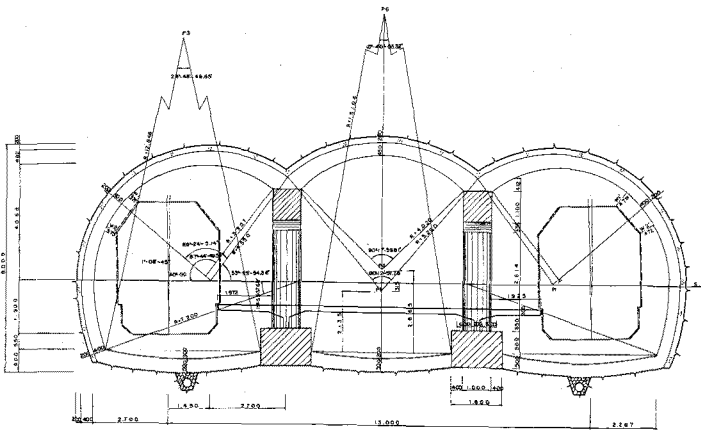


그림 7. A터널 단면 및 모델링

표 4. 단지반물성치

지반	층후 (m)	단위중량 (kN/mm <sup>3</sup> )	점착력 (N/mm <sup>2</sup> )	내부마찰각(°)	변형계수 (kN/mm <sup>2</sup> )	포아송비	비고
경 압	17.7	2.55E-8	5.97	40	8.5	0.23	K <sub>0</sub> =1.5
연 압	12.5	2.45E-8	0.48	36	1.6	0.27	
풍화암	3.0	2.16E-8	0.10	33	0.25	0.3	
풍화토	4.6	1.86E-8	0.03	30	35E-03	0.31	
매립층		1.67E-8	0.01	26	8E-03	0.35	

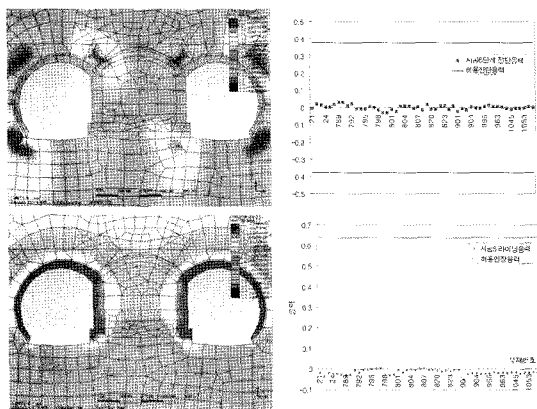


그림 8. 시공단계5에서의 콘크리트 라이닝응력

인장철근으로서의 역할이 제한적이므로 무근콘크리트 라이닝으로 검토를 하였고 전단응력을 참고할 경우엔 전단철근을 감안하여 분석하였다.

범용지반해석프로그램인 MIDAS GTS를 이용하였으며 해석시 지반물성치는 최근시행중인 A터널 인근의 철도시공현장 자료를 근거로 하였으며 검토는 균열발생부의 응력이 가장 크게 걸릴 것으로 예상되는 표 1의 시공 단계 5~6단계와 최종단계의 콘크리트라이닝응력에 대하여 검토하였다.

### 5.1 5단계 콘크리트라이닝응력

기둥 및 좌, 우 터널 콘크리트라이닝 시공 후 콘크리트 허용응력은 전단 및 인장응력에 대해 안전한 범위이다. 대체로 전단응력은 ±0.03 Mpa의 범위에 있으며 인장응력이 거의 발생하지 않는 -0.049~+0.002 Mpa의 압축 응력상태이다.

### 5.2 6단계 콘크리트라이닝응력

기둥 및 좌, 우 터널 콘크리트라이닝시공 후 중앙터널

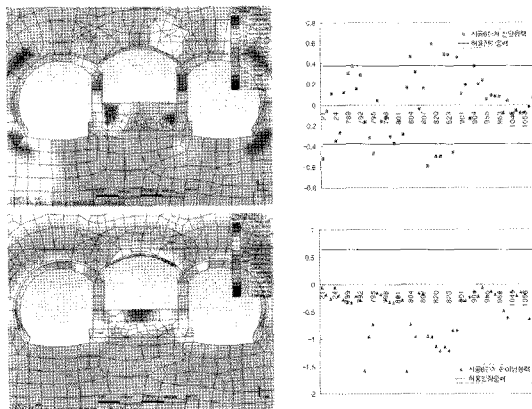


그림 9. 시공단계6에서의 콘크리트 라이닝응력

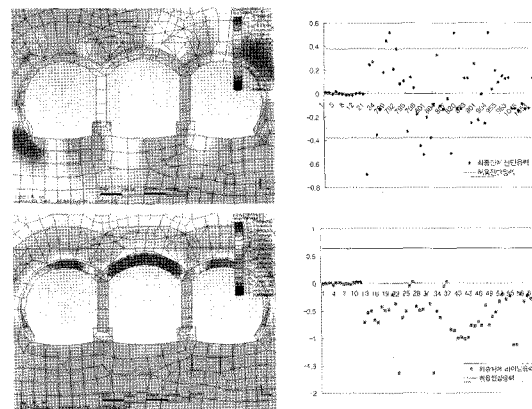


그림 10. 최종단계에서의 콘크리트 라이닝응력

상반을 굴착하였을 때 대체로 전단응력은 ±0.53 Mpa의 범위에 있으며 인장응력이 거의 발생하지 않는 압축응력상태로 허용압축응력의 범주안에 있다. 그러나 전단 응력이 양측 기둥상단에서 최대값을 기록하며 허용전단 응력 ±0.38 Mpa을 ±0.15 Mpa을 초과하지만 콘크리트가 부담하는 전단응력을 제외한 0.15 Mpa(전단력 60 kN에 해당)은 30 cm간격의 전단철근이 부담할 수 있는 것으로 분석된다.(스트립이 부담 가능한 전단력  $V' = \{ A \cdot f_{sa} \cdot d \} / s = 68.12 \text{ kN}$ )

### 5.3 최종단계 콘크리트라이닝응력

최종단계의 콘크리트라이닝 응력은 압축응력상태로 허용압축, 허용인장응력의 범주안에 있다. 중앙터널 천단주변부에 일부 인장응력이 발생하고 있으나 허용응력

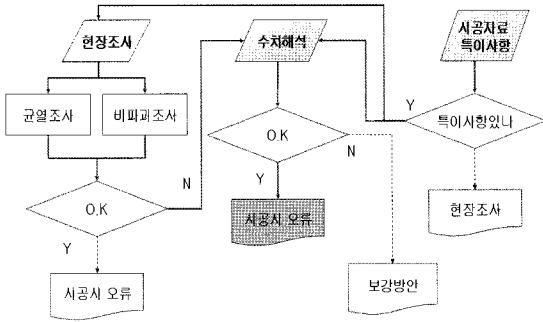


그림 11. 수치해석흐름 및 보강여부판단

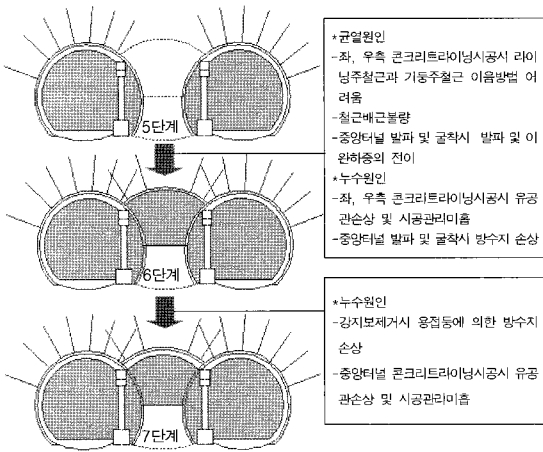


그림 12. 단계별 열화발생인자

범주이고 균열발생부위는 압축이 인장으로 바뀌는 변곡 부분이다.

전단응력은 기둥하단에각부의 일부값을 제외하면  $\pm 0.51$  Mpa의 범위에 있으며 시공6단계의 응력보다 비슷하거나 작은 경향을 보인다.

#### 5.4 안전성평가 분석

안전성확보여부 즉 보강이 필요한지 여부는 현장조사 결과를 고려한 수치해석결과에 따라 판단하며 본 연구의 안전성평가 분석결과 그림 11과 같은 흐름(실선)으로 보강까지는 필요 없는 것으로 분석된다.

콘크리트라이닝에 가장 큰 응력이 발생할 것으로 예상되는 시공단계인 5~7단계의 콘크리트라이닝 휨응력을 검토한 결과 안전성에 영향을 없는 것으로 분석되며 전단응력을 검토한 결과 양측 기둥상단 일부에서 최대

값을 기록하며 허용전단응력을 약간 상회하지만 전단철근을 고려한다면 허용범위이므로 현재 상태에서는 안전성을 확보하고 있는 것으로 분석된다. 그러므로 균열의 발생은 시공당시 일시적 하중에 의한 것으로 판단된다. 그림 12는 시공단계별 열화발생인자를 나타낸다.

## 6. 결 론

이상의 외관조사, 비파괴시험, 안전성검토와 관련자료 분석을 통해 3-Arch터널의 열화조사 및 원인추정을 다음과 같이 결론내릴 수 있다.

- 가. 4개소의 3-Arch터널 현장조사결과 좌, 우측터널과 중앙터널 연결부위의 누수와 백태, 중앙터널 기둥상단 아치부의 연장이 긴 종방향균열이 공통적으로 조사되었다.
- 나. 관련자료, 시공단계와 현장조사 분석결과 중앙터널 연결부위의 누수와 백태는 시공단계5단계인 기둥과 양측터널의 콘크리트라이닝시공단계, 시공단계6단계인 중앙터널상부 굴착 및 양측터널 방지보설치단계의 방수공정의 어려움과 시공단계7단계인 중앙터널 콘크리트라이닝시공 및 양측터널 방지보 해체과정 중에서 방수시손상과 시공난점이 주된 원인으로 분석된다. 이에 대한 대책으로는 A터널의 시공관련 자료에서 언급한 내용과 함께 중앙터널부위 아치부는 방수지를 절단하지 않고 2중으로 방수지를 시공하거나 방수지를 보호하기 위한 동판등을 설치하는 방안도 효과적일 것으로 분석된다.
- 다. 중앙터널 기둥상단 아치부의 종방향 균열 발생빈도는 A~C터널과 D터널에서 확연한 차이를 보이고 있다. A, B, C터널과 D터널의 중앙터널굴착방식의 가장 큰 차이점은 D터널이 시공 과정시 부터 정밀한 다단발파가 가능한 비전기식뇌관을 사용하여 제어발파를 실시한 것으로 이러한 제어발파가 양측 콘크리트라이닝에 영향을 최소화 시킨 것으로 분석된다.
- 라. 해당 준공도와 감리보고서에 의하면 중앙터널 기둥측 철근과 양측터널 콘크리트라이닝의 철근연결 상세가 누락되어 있고 철근배근 시 애로사항이 있었던 것으로 조사되었다.



실제 종방향 균열 발생부위 주변의 철근배근 탐사결과 주철근의 깊이가 매우 불규칙적으로 조사되어 시공 중 일시적으로 발생하는 중앙터널 굴착에 의한 영향을 부담하기에는 단면내력이 부족했을 것으로 분석된다.

- 마. 균열보수부위 조사결과와 철근배근이 불량한 것을 고려한 수치해석결과 주요 단계에서의 콘크리트라이닝은 안전성을 확보하고 있는 것으로 분석되어 구조적균열이 아니고 전술한 바와 같이 시공시 일시적인 하중인 중앙터널 발파영향이 주된 요인이고 여기에 철근배근이 불량한 것도 한 원인으로 분석된다.
- 바. 시공시 작용하는 일시하중 중 인접구조물에 영향을 미치는 가장 큰 요인은 중앙터널 굴착시 혹은 발파의 영향이며 이러한 영향으로부터 기 시공된 콘크리트라이닝을 보호하기 위한 방안으로는 소형화된 브레이커등으로 기계굴착을 하거나 정밀제어발파, 굴진장을 준수하는 것이 효과적일 것으로 분석된다.

## 참고문헌

1. 건설진흥공단 (1997), 서울지하철 시공감리용역(토목) 시공감리종합보고서(구조 및 토질), pp. 847-848.
2. 김상수 (1995) 역, 도시터널의 NATM공법, 창우출판, pp. 43-44.
3. 김승렬 (2004), 서울특별시 지하철건설본부 도시철도기술자료집(3), 터널, pp. 155-157.
4. 대한토목학회 (2004), 경의선 및 인천국제공항철도 지하철2호선 상하부 통과구간 안전성보고서, p. 87.
5. 석종우 외 3명 (2004), "대전지하철 3아치터널공사", 한국지반공학회, 제 20권 제 2호.
6. 이성민 (2004), 서울특별시 지하철건설본부 도시철도기술자료집(2) 개착터널, 제6장 참고자료, p. 671.
7. 한국시설안전공단 (2009), 시설물정보관리종합시스템 (www.fms.or.kr).
8. 한국터널공학회 (2007), 터널의 이론과 실무(9장 콘크리트라이닝 설계편), 구미서관 pp. 310-320.
9. 홍성영 역 (1993), 터널의 설계이론, 탐구문화사, pp. 57-58.