대단면 터널 라이닝 콘크리트의 균열저감 대책

Crack Control of Tunnel Lining Concrete with Large Section

전상은*
Sang-Eun Jeon
김완영**
Wan-Young Kim

1. 서 론

이 기사에서는 대단면 터널 현장 라이닝 콘크리트에 발생된 균열에 대한 균열발생 패턴 및 원인을 분석하고 이에 근거한 구조, 재료적인 측면에서의 균열저감대책을 마련하고자 하였다.

국내 터널에서 시행된 라이닝 콘크리트에 발생된 균열 조사 후 분석한 결과에 따르면, 대표적인 균열 패턴은 <그림 1>에서 보는 바와 같이 ① 종방향 균열(터널 중심선과 평행하게 터널 천단과 어깨부에 터널 종단 방향으로 발생한 직선상의 균열형태), ② 횡방향 균열(터널 중심선에 직교하여 횡방향으로 발생하는 균열형태이며 시공이음부 주변과 터널 어깨부, 천단부에 주로 발생), ③ 전단 균열(터널 중심선에 대각선 방향으로 나타나는 균열형태로서 터널 어깨부에 주로 발생), ④ 복합 균열(터널 천단에서 발생한 종방향 균열이 전단균열의 형태로 진전되거나 종방향 균열이 횡방향 균열과 복합적으로 나타나는 균열 형태)로 대별할 수 있으며, 전체 균열 중 약 80% 이상이 종방향 균열과 횡방향 균열로 나타나는 것으로 추정된다.

특히 종방향 균열의 대부분은 천단부로부터 20° 범위내에서 발생되고 균열의 폭이 다른 균열에 비해 훨씬 크며 균열의 연장이 길어 구조적 취약부로서 터널의 내구성을 저해하는 요소로 작용한다. 이러한 종방향 균열은 터널 시종점 초입부에 많이 나타나는 특징이 있으며, 횡방향 균열은 시공이음부에서 주로 발생하는 특징을 나타내고 있다.

상기의 균열발생 현황은 터널의 설계조건(하중이나 형상, 크기 등)이나 환경조건(예를 들어 지하철공사 터널의 경우, 바람의 흐름이 센 조건으로 건조수축에 의한 균열이 심함) 등에 따라 차이를 보이기 때문에 당 현장의 도수로 터널의 조건과 동일하다고 보긴 어려우나 어느 정도 상관성을 보일 것으로 추정된다.

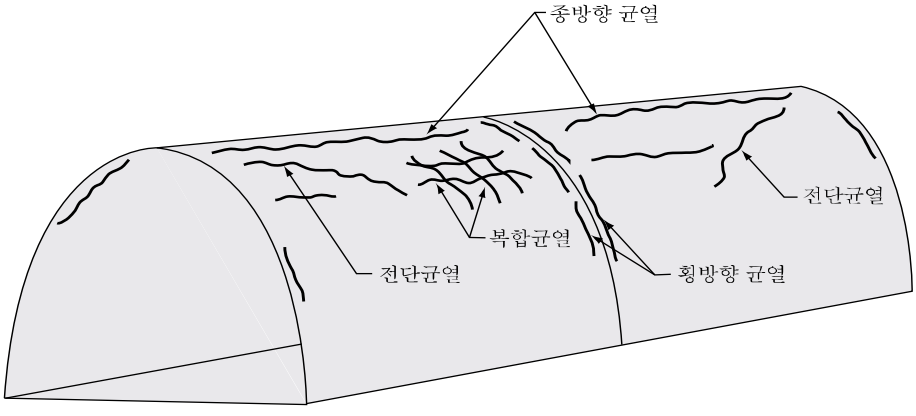


그림 1. 터널 라이닝의 전형적인 균열형태

* 정회원, 삼성건설 싱가폴 DTL1 C908현장 과장
congrito.jeon@samsung.com
** 정회원, 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원

2. 균열발생 현황분석

2.1 균열발생 현황

본 00터널 라이닝 구간은 약 5개월 동안의 공사기간동안 T1, T2 각각 10개의 세그먼트를 완료하였으며(단위 세그먼트 길이 =10 m), 지금까지 타설된 각 세그먼트별 균열발생 현황을 균열관리대장 및 현장 확인을 토대로 정리하면 <표 1>과 같다.

<표 1>에서 보는 바와 같이 발생된 균열패턴들은 크게 연직균열(굴진방향에 직각), 수평균열(굴진방향), 경사균열로 나눌 수 있으며<사진 1>, 발생 시점은 명확히 확인하기 힘들지만, 최초 확인은 거푸집제거(타설 후 3~5일) 후 표면 살수작업을 끝낸 시점에서 표면이 건조됨과 동시에 가능하였다.

즉, 최소한 타설 후 5~7일 이전에 균열이 발생하는 것으로 예측할 수 있다.

2.2 균열발생 분석

상부터널 라이닝 타설은 전구간에 있어 동일한 구조 및 양생조건으로 수행된 것이 아니므로 이를 고려한 검토가 필요하다.

구조적 측면으로 볼 때 라이닝 구조는 5번째 세그먼트까지는 직선구간이고, 6~12번째 세그먼트까지는 변경사구간에 놓이게 된다. 또한 양생조건도 2월 타설 세그먼트(T1 : 6번째, T2 : 8번째)까지는 동절기 보온양생(폼탈형전까지 평균 15℃로 양생)을, 그 이후는 대기에 노출양생을 실시하였다.

상기조건을 감안하여 <표 1>의 균열발생현황을 분석해보면,

(a) 수평균열 (b) 연직균열 (c) 경사균열

사진 1. 터널라이닝의 균열형태

(a) 균열깊이 측정용 초음파 장비(TICO, proceq)

(b) 피복두께 측정용 철근탐사기(profometer 5, proceq)

사진 2. 비파괴 탐사용 시험장비

표 1. 터널라이닝 균열발생 현황

세그먼트 #	T1				T2			
	연직 균열	수평 균열	경사 균열	타설 일자	연직 균열	수평 균열	경사 균열	타설 일자
1	2개소	-	-	1/4	-	-	-	11/26
2	1개소	1개소	-	1/16	1개소	1개소	1개소	12/6
3	1개소	-	-	1/24	2개소	1개소	1개소	12/20
4	1개소	-	-	2/1	-	-	-	12/28
5	1개소	-	1개소	2/8	2개소	2개소	-	1/8
6	1개소	-	-	2/15	2개소	1개소	-	1/18
7	1개소	-	-	3/5	1개소	2개소	-	1/27
8	2개소	-	-	3/11	1개소	6개소	3개소	2/10
9	-	3개소	-	3/21	1개소	1개소	-	3/4
10				4/12	2개소	1개소	-	4/2

다음과 같은 균열발생 특성을 도출할 수 있다.

1) 직선구간의 경우는 주로 연직균열이, 변경사구간에서는 수평균열의 발생 빈도가 큼
2) 보온양생을 실시한 조건이 노출양생조건보다 균열발생 빈도가 큼

3. 균열조사

3.1 조사개요

라이닝 콘크리트에 발생된 균열의 상태 및 건전성을 정량적으로 파악하기 위하여 균열조사를 수행하였다.

조사항목은 균열 상태평가를 위하여 균열폭 및 균열깊이를 조사하였고, 균열 부근의 콘크리트의 건전성 및 피복상태를 평가하기 위하여 비파괴강도시험과 철근탐사시험을 수행하였다.

해당시험은 접근이 용이한 T1 : 7 ~ 9번째 세그먼트와 T2 : 9 ~ 10번째 세그먼트의 발생 균열 중 수직균열 2개소, 수평균열 5개소에 대해 수행하였고 각 시험에 사용된 장비는 <사진 2>와 같다.

3.2 조사결과

3.2.1 균열폭/깊이 및 피복두께

발생 균열폭 및 깊이와 함께 균열 주변의 피복두께를 조사한 결과는 <표 2>와 같다. <표 2>에서 볼 수 있듯이 피복두께(주철근이 최외단 철근인 구간)는 100(설계피복) - 15.9/2 = 92.05 mm이다. 이를 근거로 <표 2>의 조사결과를 비교하면, T1-8번째 세그먼트의 수평균열을 제외한 모든 균열 부위에서 피복두께를 만족하는 것을 확인할 수 있다.

조사된 균열의 균열폭은 최대 0.35 mm로 0.15 ~ 0.35 mm의 범위를 갖는 것으로 조사되었다. 콘크리트 구조물의 허용균열폭은 콘크리트구조설계기준(2007)에 따라 산정할 수 있으며, 라이닝 콘크리트 구조물의 경우(습윤환경), cc = 100 - 15.9/2 -12.7 = 79.35 mm이고 이때의 허용 균열폭은 wa = 0.005 × 79.35 = 0.397 mm가 된다. 이로부터 조사된 최대 균열폭 0.35 mm는 허용 균열폭을 만족함을 알 수 있다.

3.2.2 압축강도

균열 발생 부근 콘크리트의 건전도를 확인하기 위한 비파괴강도 시험결과<표 3>, 재령 28일 이상의 압축강도는 모두 설계기준압축강도를 만족하고 있으며, 재령 14일의 압축강도도 설계기준압축강도의 90% 이상인 것으로 확인되었다.

4. 균열 원인분석

일반적으로 콘크리트 구조물에 발생하는 균열은 단일 원인으로 발생한 경우보다 여러 원인들이 복합적으로 작용하여 나타나게 된다. 따라서 대상 라이닝 콘크리트의 균열원인으로 수많은 요인

표 2. 균열폭/깊이 및 피복두께 시험결과

위치		균열패턴	피복두께(mm)	균열폭(mm)	균열두께(mm)
T1	7번째 세그먼트	좌측 수직균열	109	0.25~0.35	46
	8번째 세그먼트	우측 수평균열	78	0.20~0.30	166
	9번째 세그먼트	좌측 수평균열	95	0.25~0.30	74
T2	9번째 세그먼트	우측 수평균열	98	0.20~0.30	125
	10번째 세그먼트	좌측 수평균열	105	0.15~0.25	66
		우측 수직균열	102	0.25~0.30	168
		하부 수평균열	112	0.20~0.30	74

표 3. 압축강도 시험결과

위치		균열패턴	측정값(MPa)	설계기준(MPa)	재령일(Day)
T1	7th 경간	좌측 수직균열	29.6	24	47
	8th 경간	우측 수평균열	28.0	24	37
	9th 경간	좌측 수평균열	26.3	24	27
T2	9th 경간	우측 수평균열	27.3	24	44
	10th 경간	좌측 수평균열	24.6	24	14
		우측 수직균열	21.5	24	14
		하부 수평균열	22.6	24	14

이 있을 수 있지만, 여기서는 현재까지 파악된 자료를 근거로 연직균열과 수평균열에 대한 주요 균열원인을 찾아보고자 하였다.

4.1 연직균열

균열발생 현황에 따르면 연직균열이 거의 모든 세그먼트에 걸쳐 발생하였으며, 주로 각 세그먼트의 중앙단면(연장 10 m 중 5 m 구간) 인버트부에서 S.L 부근까지 분포된 것으로 확인되었다. 발생부위와 시점을 감안한다면 가장 큰 원인으로는 수화열에 의한 온도균열로 예측할 수 있다. 즉, 라이닝 단면 중 가장 큰 인버트(두께 1.0 m 이상)에서의 온도상승 및 하강이 가장 크게 나타날 것으로 예상되며, 이로 인하여 단면 내외부 온도차가 가장 극심한 인버트부를 중심으로 연직균열이 발생될 가능성이 높다<그림 2>.

특히 당 현장 라이닝의 경우 숏크리트면에 바로 콘크리트를 타설하므로 방수시트를 적용한 경우에 비해 지반의 구속정도가 심하고, 상부터널 라이닝의 경우 현재까지 타설된 구간까지 동절기 배합(플라이 애쉬 7% 혼입)을 사용함(수화열 저감 효과가 거의 없음)으로써 수화열에 의한 온도균열 발생 가능성이 높을 것으로 사료된다.

온도균열의 발생여부 판단을 위하여 수화열 해석을 수행하였고, 그 결과는 <그림 3>과 같다. <그림 3>에서 보는 바와 같이 인버트부를 중심으로 최대 온도 도달시점(약 2.5일)에 표면부를 중심으로 큰 인장응력이 발생함을 확인할 수 있다. <그림 3>의 응력이력곡선을 보면, 상기 인장응력은 양생조건변화(동절기 보온양생의 경우)와 관련없이 발생하는 것을 알 수 있다.

일반적으로 내부구속에 의한 표면부 온도균열의 경우 그 깊이는 피복 전후까지 진행되는 경우가 많으나 관통균열로 발전할 가능성은 거의 없고 온도하강 이후 균열 진전도 미미한 것으로 알려져 있으며, 이는 균열조사 결과와 일맥상통한다.

4.2 수평균열

수평균열의 발생위치는 주로 천단부와 S.L 부근으로 전 세그먼트에 걸쳐 발생하였다. 특히 변경사구간 라이닝의 경우 균열발생 빈도가 큰 특성을 갖는다. 본 건과 관련해서는 기검토 보고서를 토대로 일부 조건을 변경하여 검토하였다.

4.2.1 구조적 특성

터널 라이닝 구조물은 그 구조특성상 재료 및 시공상의 원인으로 인해 수평균열(굴진방향)이 발생할경우 우선적으로 천단부, 그 다음으로 측벽부(S.L 부근)에 나타날 가능성이 크다. 이는 다음의 구조계 검토를 통해 확인할 수 있다. 여기서는 당 현장 A3 Type 라이닝에 대해 압축강도가 7 MPa(현 탈형일시를 감안하여 최소값으로 산정)일 때 자중만 고려하여 구조검토를 수행하였다.

<그림 4>의 구조검토결과에서 볼 수 있듯이 라이닝 내측면에 정모멘트가 발생하는 위치는 천단부, 측벽부(S.L 하단) 그리고 바닥 인버터부이다. 그러나 이를 작용 축력과 함께 고려한다면 천단부에서 가장 큰 표면 인장응력이 발생할 수 있다. 물론 상기 인장응력으로는 실제로 콘크리트 표면에 균열을 발생시키지는 않는다. 이를 수치적으로 확인해 보면 다음과 같다. 단, 여기서는 철근에 의한 영향을 제외하고 콘크리트만 단면력에 저항한다고 가정하였다(콘크리트 허용인장응력 = 0.13√(fcu)).

- 천단부(P = 70.9 kN, M = 10.8 kN m, 두께 0.5 m)

$$\sigma = -\frac{P}{A} + \frac{M}{Z} = 0.12\,MPa(\text{인장}) < \sigma_a = 0.34\,MPa$$

- 측벽부(P = 175 kN, M = 2.35 kN m, 두께 0.512 m)

$$\sigma = -\frac{P}{A} + \frac{M}{Z} = 0.29\,MPa(\text{압축})$$

상기 결과에서 보듯이 라이닝 구조계의 특성상 천단부 내부표면에 일부 인장응력이 발생되나 허용인장응력에 미치지 못한 수준이며, 기본적으로 라이닝 구조물은 <그림 4>와 같이 압축력을 받기 때문에 수평균열 발생을 저항하는 구조를 갖는다.

4.2.2 균열 발생원인

상기 구조적 특성검토에서 볼 수 있듯이 발생된 수평균열은 구

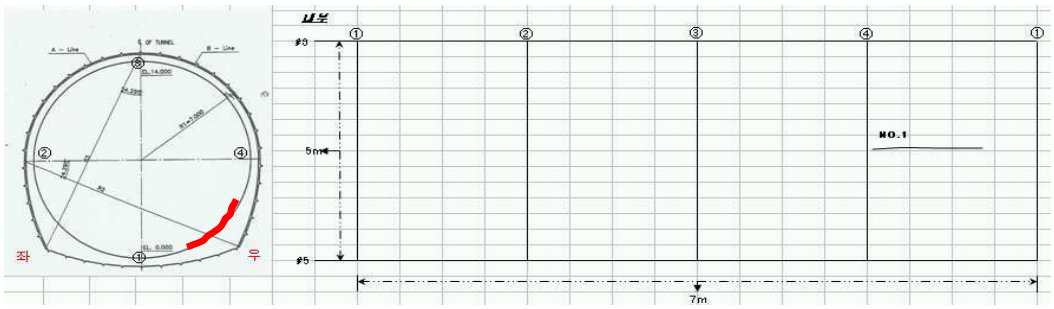
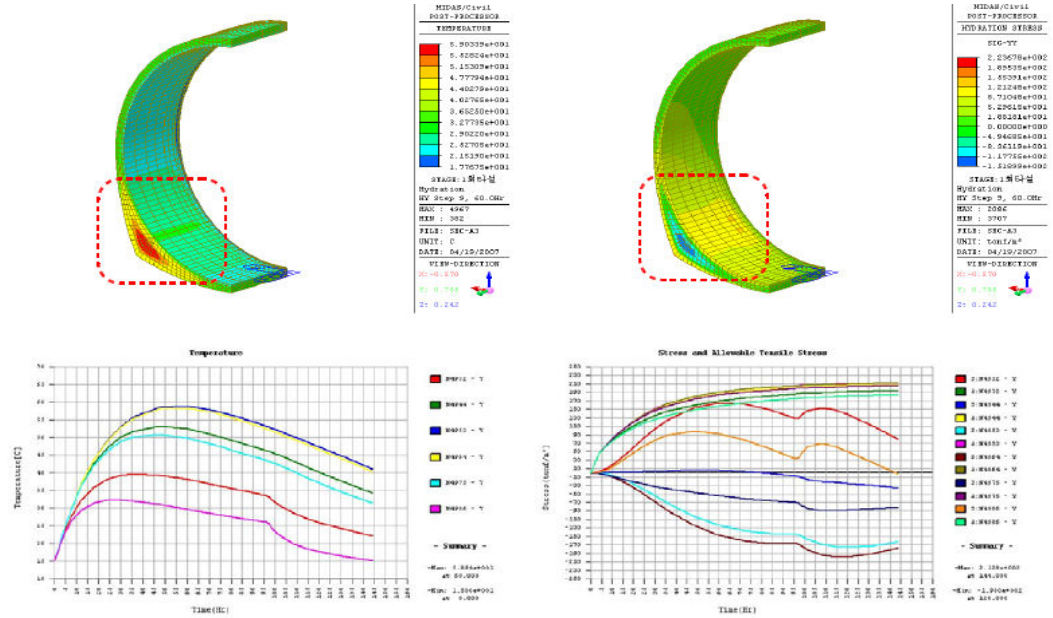


그림 2. 전형적인 연직균열 형상



(a) 온도 해석결과 (b) 응력 해석결과

그림 3. 수화열 해석결과(인버트)

조적 원인에 의해 나타난 균열이 아님을 알 수 있다. 따라서 본 검토에서는 콘크리트의 재료적 특성 및 라이닝 설계 및 시공측면에서 균열 발생 원인을 찾고자 하였다.

1) 재료적 측면

연직균열에서와 마찬가지로 수화열에 의한 표면 인장응력이 추가될 수 있다. 특히 동절기 보온양생 조건인 경우, 거푸집 탈형과 함께 양생을 마치고 바로 외기에 노출시킬 경우 급격한 표면 인장응력의 증가가 나타난다<그림 5>. 예를 들어 앞의 구조적 특성분석에서 확인한 측벽부의 응력이 −0.29 MPa인 반면, <그림 5>의 최대 표면 인장응력은 0.88 MPa이다.

2) 설계적 측면

라이닝의 설계적 측면에서의 원인을 찾는다면 주철근의 겹침이음 위치를 들 수 있다. <그림 6>의 A3 Type 주철근도를 보면, 내측 주철근의 겹이음 위치가 S.L과 어깨부 상단에 위치함을 알 수 있다. 특히 천단부에 발생된 일부 수평균열은 <그림 6>의 주철근 겹침이음 위치 부근에 나타난 것으로 확인된다.

3) 시공적 측면

발생된 수평균열 중 최근 타설부(예 : T2-8번째 세그먼트)에 나타난 균열경향을 보면 발생된 수평균열이 콘크리트 타설 연결부(각 타설 투입구간(間) 계면)를 중심으로 나타나며 타설 레벨을 따라 경사방향을 띠는 것을 확인할 수 있다<그림 7>.

이러한 경향을 시공 프로세스와 함께 검토해 보고자 한다. 우리 현장 라이닝 콘크리트의 타설은 현재 <그림 8>과 같이 진행된

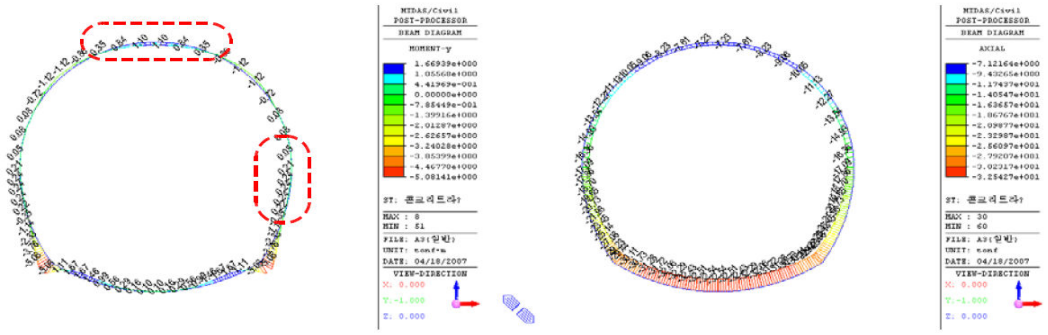


그림 4. 구조검토결과(자중만 고려, fcu = 7MPa 조건)

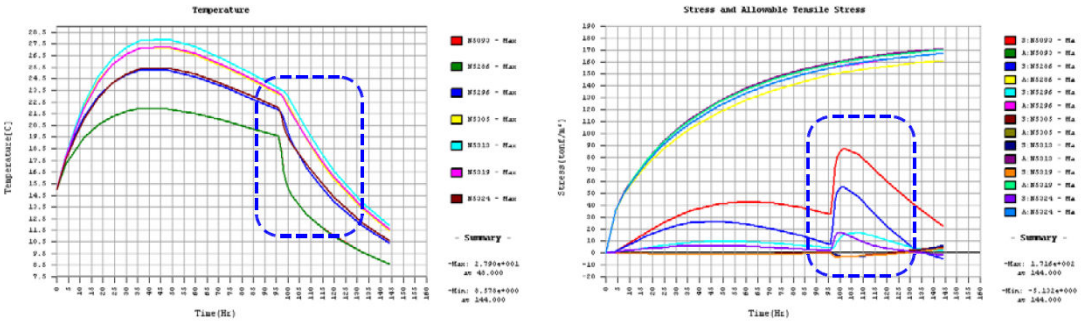


그림 5. 수화열 해석결과(S.L부)

다. 그림에서와 같이 1~3단계까지는 폼 하부에서 상부로 압력타설을 하고, 4~5단계에서는 하부로 타설하고 있다(라이닝 하부단면 표면품질 확보를 위해 개선한 사항임). 따라서 각 타설 투입구간 콘크리트의 콜드조인트를 방지하기 위하여 투입구간 설치시간을 1시간 이내로 규정하여 시공 관리하고 있다.

그러나 1~3단까지의 타설 공정은 역방향 타설이므로 일부 콘크리트는 각 단계 타설 초기의 콘크리트가 상부면으로 떠오를 가능성이 있으며, 역방향 타설의 특성상 최종 타설면에서는 페이스트와 함께 다량의 블리딩 수가 발생할 가능성도 내재하고 있다. 이 경우 타설간(間)계면이 취약부가 되므로 재료변형 등에 의한 응력발생시 균열이 발생할 가능성이 크며, 균열깊이도 깊어질 수 있다.

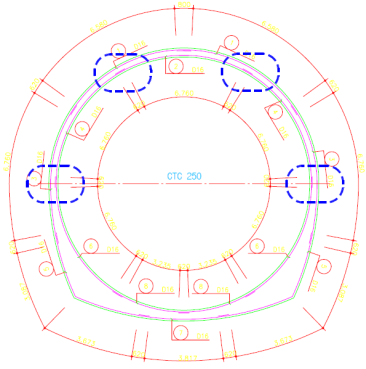


그림 6. 라이닝 주철근도(A3 Type)

당 현장 플라이 애쉬 기준배합(20% 혼입)에 대한 응결시험 결과에 따르면 초결은 6시간 30분, 종결은 9시간 정도에 나타남을 알 수 있다. 그러나 현재 사용중인 동절기 배합인 플라이 애쉬 7% 배합의 경우는 상기 시험결과보다는 다소 빠른 응결시간을 갖을 것으로 예상할 수 있다<그림 9>. 단, 응결시간은 콘크리트의 온도와도 큰 상관관계를 맺고 있기 때문에 타설온도가 상대적으로 낮은 겨울철(12~2월)의 경우는 응결시간이 늦어질 것으로 보인다(5시간 전후). 그러나 최근 들어 온도가 높아짐에 따라 응결시간은 겨울철에 비해 빨라질 것으로 예상되며(플라이 애쉬 7% 배합의 경우, 4시간 전후), 이로 인해 투입구간(間) 타설 콘크리트의 계면이 발생할 가능성이 클 것으로 보인다.

라이닝 폼의 특성상 S.L 부근에서 침강균열이 나타날 수 있다. <그림 10>에서 보는 바와 같이 4단 투입구를 통하여 타설을 지속적으로 실시할 경우 S.L 하단에서는 단면이 넓어짐에 따라 타설 콘크리트의 침강이 자유로운 반면, S.L 상단은 내측 폼면의 마찰로 인해 침강이 제한을 받을 수 있다. 이러한 경우 S.L 위치

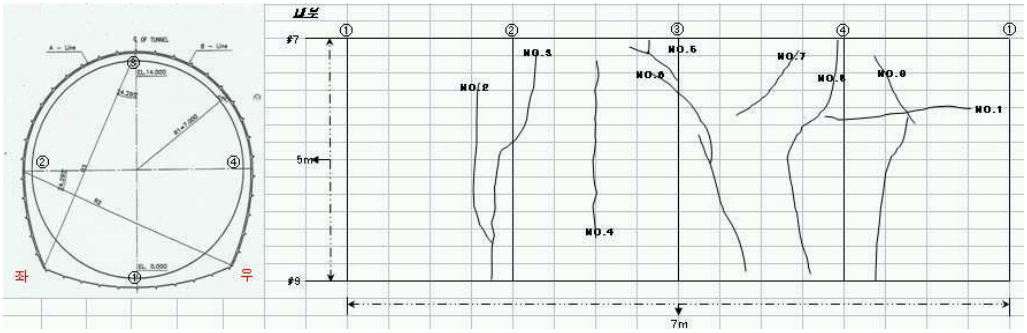
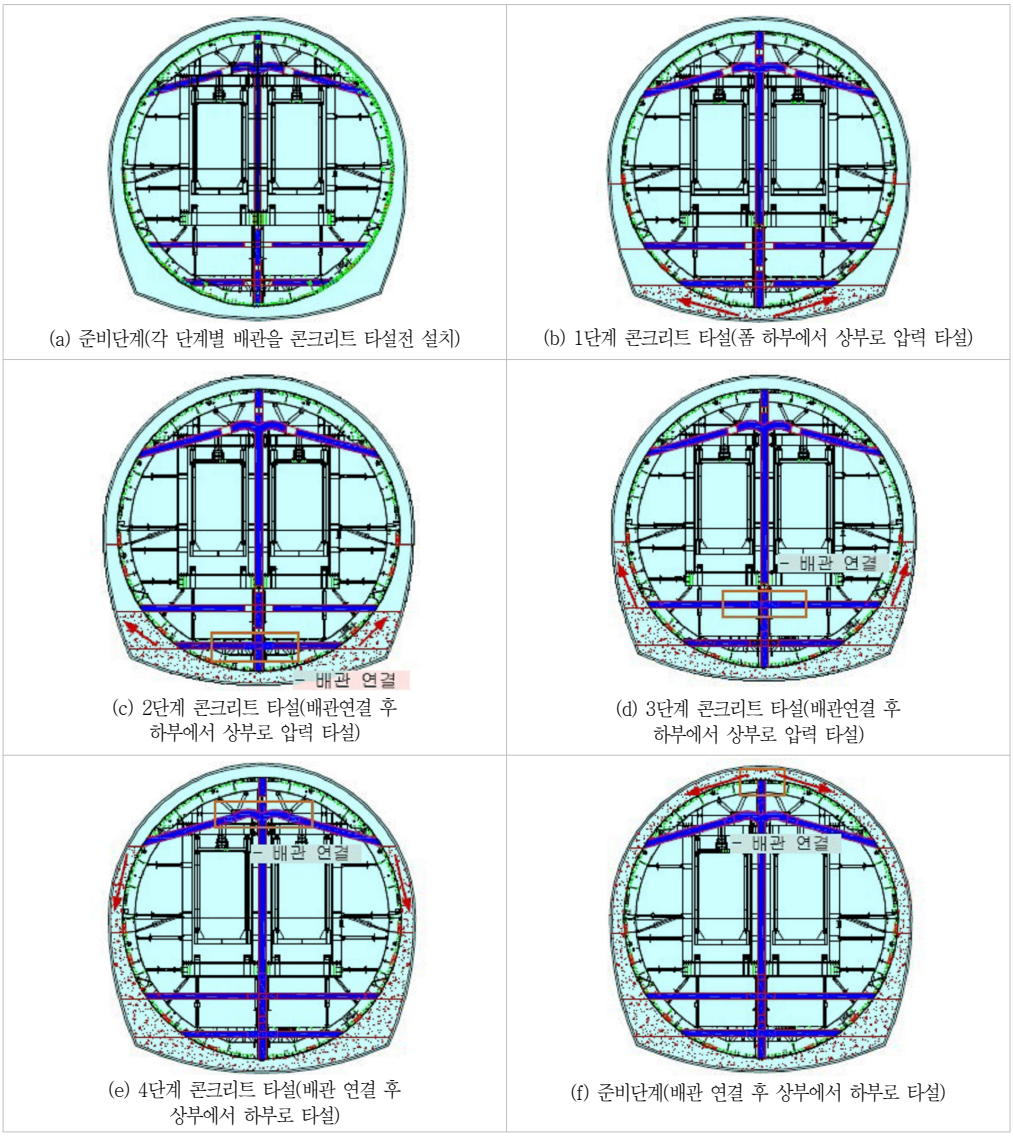


그림 7. 균열전개도(T2-8번째 세그먼트)



(a) 준비단계(각 단계별 배관을 콘크리트 타설전 설치)

(b) 1단계 콘크리트 타설(폼 하부에서 상부로 압력 타설)

(c) 2단계 콘크리트 타설(배관연결 후 하부에서 상부로 압력 타설)

(d) 3단계 콘크리트 타설(배관연결 후 하부에서 상부로 압력 타설)

(e) 4단계 콘크리트 타설(배관 연결 후 상부에서 하부로 타설)

(f) 준비단계(배관 연결 후 상부에서 하부로 타설)

그림 8. 라이닝 콘크리트 타설 프로세스

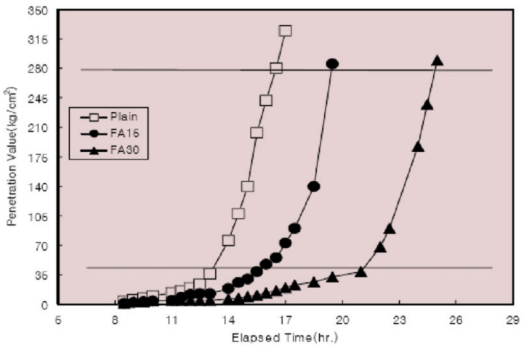


그림 9. 플라이 애쉬 혼입률에 따른 응결특성

에서 침강 차이에 따른 균열이 발생될 수 있을 것으로 사료된다. 특히 이러한 현상은 라이닝 두께가 작은 부위에서 더 크게 발생할 것이다.

5. 균열저감 대책

지금까지 검토한 균열 원인은 현재 발생된 균열현황 파악을 통해 얻어낸 주요 원인을 도출하는데 초점을 맞추었다. 따라서 균열저감대책은 도출된 주요 균열원인을 개선하는 방안을 제시하였다. 서두에서도 언급한 바와 같이, 균열 발생 특성이 단일 원인에 의해 결정되는 것이 아니기 때문에 상기 도출된 원인이 100% 균열발생을 저감하지 않겠지만 단계적인 저감대책을 추진하여 균열의 추이를 살펴볼 필요가 있을 것으로 사료된다.

5.1 재료적 측면

하절기 배합인 플라이 애쉬 20% 배합으로 변경하면 수화열 저감효과와 함께 초결시간의 지연효과도 가져올 수 있으므로 연직균열 및 수평균열에 모두 유리한 조건을 만들어 줄 수 있을 것으로 사료된다.

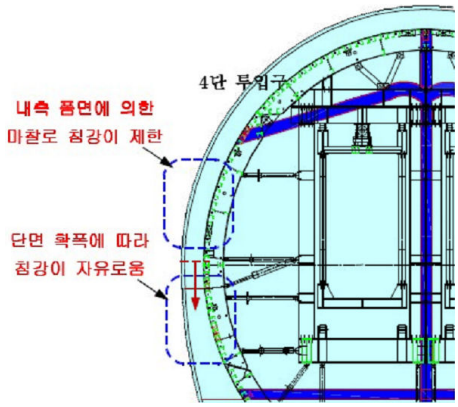


그림 10. 예상 침강균열 발생 기작

5.2 시공적 측면

1) 균열이 주로 발생된 S.L 부근의 다짐방법과 관련하여 다음과 같이 개선코자 한다. 즉, 3단과 4단 투입구간(間) 계면 방지를 위하여 4단 투입구를 통하여 일부 콘크리트를 타설 후 타설중지 상태에서 3단과 4단 투입 콘크리트를 같이 다짐을 실시한다. 이 때 주의할 점은 3단 타설 콘크리트의 초결 이전에 재다짐이 되어야 하므로 전체 시간을 6시간 이내에 완료해야 한다(플라이 애쉬 20% 혼입 조건).
   ① 3단 투입구를 통한 콘크리트 타설(4시간 이내)
   ② 투입구 이동(1시간 이내)
   ③ 4단 투입구를 통한 콘크리트 일부타설(30분) 후 중지
   ④ 점검창을 통한 3단과 4단 투입 콘크리트 동시 다짐
2) 일단 S.L 부근까지 콘크리트를 타설한 후, 하단부의 콘크리트가 충분히 침강이 일어날 수 있도록 30분 내외 타설을 중지하였다가 후속 콘크리트를 타설하도록 한다.

상기의 개선방안은 각각 균열 발생에 영향을 줄 것으로 보이므로 가급적 순차적으로 적용하여 그 효과를 확인함이 바람직할 것으로 보인다. 또한 현재 실시하고 있는 타설 전 숏크리트면 습윤, 철저한 다짐수행, 온도 급변화 방지를 위한 방풍막 운영, 살수양생 등은 지속적으로 수행토록 한다.

참고문헌

1. 서강천, “터널 콘크리트 라이닝의 균열현황 및 분석”, 한국구조물진단학회지 Vol.6, No.3, 2002. 7, pp. 22 ~ 20.
2. 유오식, “시공단계를 고려한 터널 라이닝 거동 연구”, 박사학위논문, 2005. 2.
3. Hikasa, J. & Genba, T., Replacement for asbestos in reinforced cement products - ‘Kuralon’ PVA fibres, properties, structure. Paper presented at the International Man-Made Fibres Congress, Austrian Chemical Institute, Austria, September, 1986.
4. 김완영, 최세진, 원종필, “CFRD 차수벽 콘크리트의 소성수축 균열 제어특성에 관한 실험적 연구”, 2000년도 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 2000. 5. 20, pp. 118-121.

담당 편집위원 :
김태훈((주)대우건설기술연구소) *kimth@dwconst.co.kr*