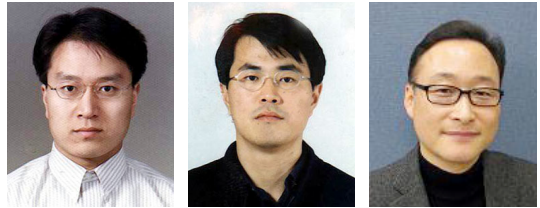


터널 콘크리트 라이닝 균열저감 방안 연구



문 경 수 | 한국도로공사 상주안동건설사업단 품질기술팀 과장
 김 민 수 | 한국도로공사 상주안동건설사업단 품질기술팀 팀장
 박 준 일 | 한국도로공사 상주안동건설사업단 품질기술팀 차장

〈요약〉

최근 터널에서 균열, 누수 등과 같은 현상이 많이 발생하고 있어 터널의 안정성 및 균열보수, 미관, 고객의 공용 중 심리적 불안감을 조성한다는 것을 쉽게 찾을 수 있다. 고속국도 제30호선 상주~안동간은 16개소/12km의 터널이 설계되어 있어 터널의 비중이 크다. 그러므로 본 연구에서는 터널 라이닝 균열 발생 원인분석 및 기존사례 조사를 통하여 균열발생 최소화 방안을 검토 및 터널 라이닝의 유해한 균열 방지를 위하여 공사관계자(발주처, 감리사, 시공사, 하도급사 등) 의견수렴을 통한 여러 가지 대책공법을 제안하였으며 제안공법의 효율성을 판단하기 위해 고속국도 제30호선 상주~안동간 제 8공구의 단촌 2터널, 단촌 3터널에 시험시공을 실시하여 각 공법별 균열율 및 시공성, 경제성을 고려하여 결과를 분석하고 최적의 공법을 파악, 전파하는데 그 목적이 있다.

1. 서론

1.1 검토 배경

터널 구조물은 대량 물류의 신속한 수송 및 전 국토의 효율적인 이용을 통한 지역간의 균형있는 발전 등 교통수단으로서의 큰 역할을 담당하고 있어 전 국토의 약 70%가 산악지대인 우리나라 실정에서는 국가의

급성장과 생활수준 향상으로 인한 각종 사회간접자본의 확충에 따라 터널 시설의 건설은 불가피 하다.

1980년대 초반 이후 국내 터널 라이닝은 원지반의 강성을 최대한으로 활용하는 NATM 개념을 적용하여 역학적 구조체가 아닌 유지관리와 미관확보의 목적으로 설계 및 시공되었다. 그러나 최근 노후화된 터널의 콘크리트 라이닝에서 발생하는 균열에 대한 문제가 제기되면서 공용 중 터널의 안정성 및 균열보

수, 미관, 고객의 심리적 불안감을 조성하고 있다.

따라서 본 연구에서는 터널 라이닝 균열발생 원인 분석 및 기존사례 조사를 통하여 콘크리트 품질개선 등 6가지의 라이닝 균열저감방안에 대한 시험시공을 실시하고, 그 결과를 분석하고 효과를 평가하였다.

1.2 균열의 원인

라이닝의 균열은 한가지 원인이 아닌 복합적 원인으로 발생하며 작용하중 및 인장응력의 증가로 발생하는 구조적 균열보다는 콘크리트 건조수축 등 2차적인 원인에 의한 균열이 다수이다.

설계상 원인	- 터널 형상의 부적절한 설계 - 지반조사 불충분으로 지보패턴 잘못 적용 - 편토압의 작용 미 고려
시공상 원인	- 거푸집 조기 탈형으로 양생기간 부족 - 양생 중 온도하강에 따른 수축 - 대기온도 변화에 따른 수축·팽창 반복 - 큰 슬럼프(Slump)의 콘크리트 타설 - 라이닝 두께 부족 또는 타설 불량 - 국부적인 지반팽창에 따른 추가 하중 발생 - 천단부 공극에 의한 휨모멘트, 편압 발생 - 하부 기초 침하 및 지하수압 작용

1.2.1 위치별 균열의 종류 및 원인

(1) 균열의 종류

① 종방향 균열

터널 중심 천장 및 어깨부에 종방향으로 발생한 직선상 균열로서 전체균열 중 54% 이상 발생하며, 천장부로부터 20° 범위 내의 시·중점 초입부에 많이 발생하며 균열의 폭과 연장이 길어 터널의 내구성을 저하시키고, 미관도 좋지 않아 이용객에게 불안감을 조성한다.

② 횡방향 균열

터널 중심선에 직교하여 횡방향으로 발생하는 균열로서 전체균열 중 27% 정도 발생하며, 시공이음부 전 주변장과 터널 어깨부, 천단부에 주로 발생한다.

③ 기타 균열

기타 균열에는 2가지가 있으며 전단균열, 복합균열 등이 있다.

기타 균열은 어깨부에 주로 발생하며 중심선에 대각선 방향으로 나타나며 복합균열은 종방향 균열이 복합적으로 발생하거나 전단균열 형태로 진전된다.

(2) 균열의 발생위치별 원인분석

① 터널 천장부

횡방향 온도변화 및 건조수축(균열분포가 가장 많음) 및 거푸집 조기 탈형에 의한 천장부 처짐 및 천장부의 콘크리트 채움효과 저하에 따른 공극발생 및 연직압 증대로 많이 나타남.

② 터널 어깨부

천장부와 벽체와의 곡선반경이 변하는 구간으로 최대응력 발생으로 균열이 발생

③ 벽체 하부

인버트 Con'c와 터널 아치의 시공이음부 종방향 온도변화와 건조수축에 의해 균열이 발생

④ 터널 입·출구부 및 기타부

터널 내·외부 온도차와 암반상태변화 및 라이닝 두께의 불균일로 인해 균열이 발생

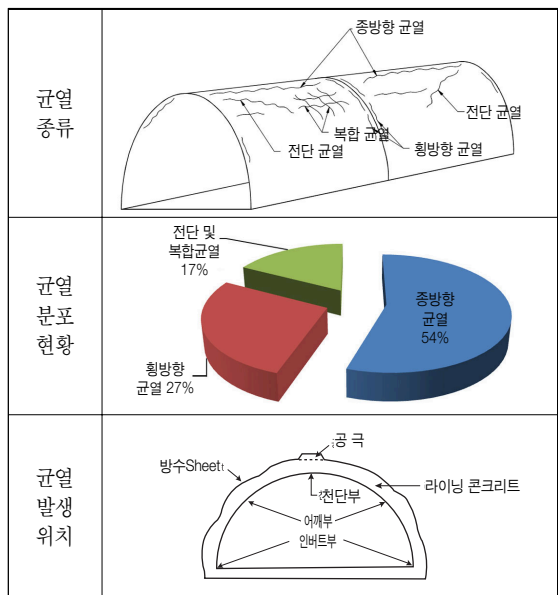


그림 1. 균열 형태

2. 본론

2.1 균열 저감방안

터널 콘크리트 라이닝 균열의 억제대책은 콘크리트의 품질개량, 시공관리, 콘크리트의 라이닝 구속효과 저감 및 하중작용 요인제거 등 몇 가지로 구분할 수 있는데 이러한 대책은 근본적으로 터널의 균열발생을 방지할 수는 없으며 단지, 균열의 폭과 길이 및 발생빈도를 억제하는 방안으로서 효과가 있는 점에 유의하여야 한다.

2.1.1 천장부 라이닝 배면 공극 채움 그라우팅 시공
 슛크리트와 방수시트, 방수시트와 라이닝 콘크리트와의 밀착이 확보되지 않는다. 따라서, 콘크리트 라이닝이 주입압력에 견딜 수 있는 강도에 도달한 후, 가능한 조기에 그라우팅 주입(라이닝 전체 완료 후 일시 그라우팅 절대지양)을 실시하며, 공극충전은 최소 2~3회 정도 단계별로 나누어 실시한다.

그라우팅 압력은 0.1MPa를 표준으로 시험시공 후, 0.2MPa까지 증가시키는 것을 원칙으로 한다.

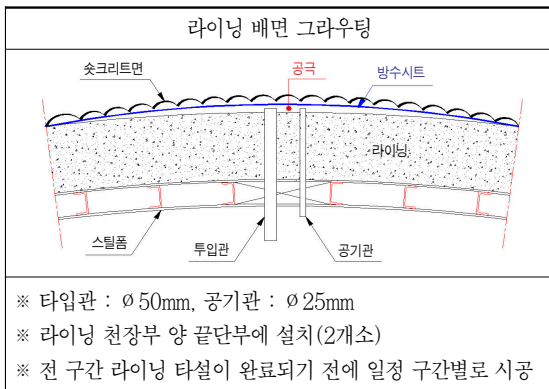


그림 2. 라이닝 배면 그라우팅 개요도

2.1.2 천장부 인장응력 보강(무근 콘크리트 구간)

무근 콘크리트 라이닝에 섬유보강재를 투입하거나 와이어매쉬 및 철근으로 보강하여 천장부 균열을 억제하는 방안으로서 균열발생빈도 및 범위를 고려, 천

장부 중심으로 좌우 20° 범위 보강을 원칙으로 하나, 강섬유재 투입방안은 고속철도 공사에 다수 적용하나, 강섬유재의 부식에 따른 미관저해를 고려하여 본 구간 도로터널에는 미적용하며 그 대안으로 콘크리트 인장응력 발생 대응을 위한 와이어매쉬를 적용하였다.

■ 입출구 철근보강구간도 균열 별도분석

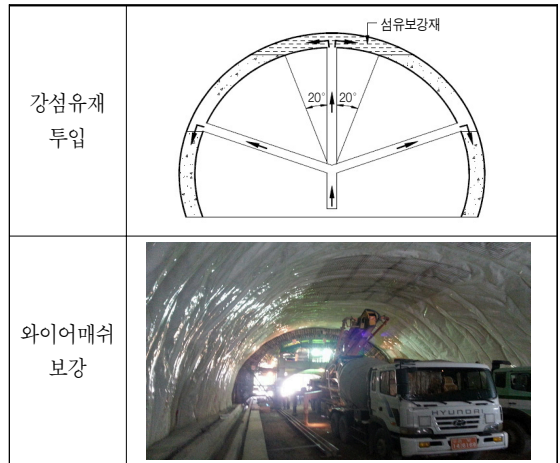


그림 3. After Grouting 개요도 및 시공사례

2.1.3 종방향 균열유도줄눈 설치

라이닝 천장 내측면에 인위적인 균열유발줄눈 형성하여 균열을 유도한다.

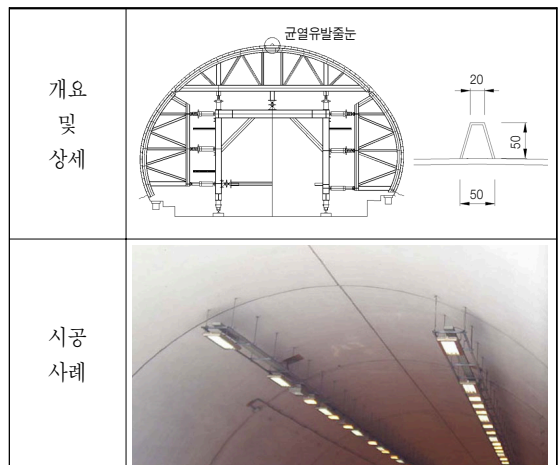


그림 4. 종방향 유도줄눈 개요도 및 시공사례

균열유도 줄눈형성에 따른 단면손실(5cm)을 고려 하더라도 구조적 안정성은 확보되었다.

표 1. 단면손실 구조계산

구 분	작용응력 (MPa)	허용응력 (MPa)	안전율	판정
단면 T=30cm	0.075	0.13√f _{ck} = 0.637	8.49	O.K
단면 T=25cm	0.577		1.10	O.K

2.1.4 팽창콘크리트 타설(초기 건조수축 보상)

종방향 균열이 많은 천장부에 팽창콘크리트를 타설하여 공극을 최소화하고 균열을 억제, 시멘트 중량의 10% 범위 내에서 팽창제 사용(천장부 6~12m²)을 원칙으로 한다.

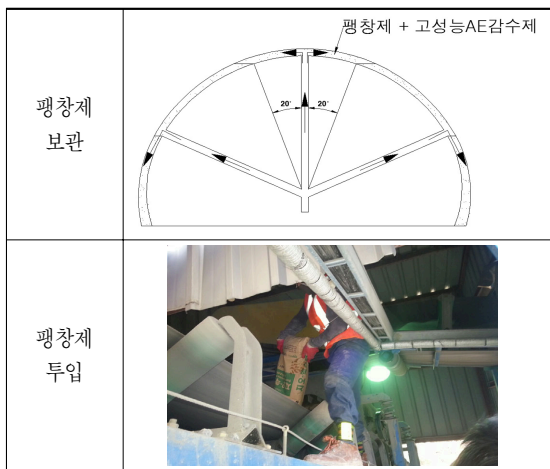


그림 5. 팽창콘크리트 개요도

2.1.5 고성능 AE 감수제 + 플라이애쉬 적용

플라이애쉬 적용시 수화열 저감효과로 초기 건조수축균열 감소를 유도하며 플라이애쉬 첨가에 따른 초기강도 저하방지를 위해 고성능 AE감수제 사용을 원칙으로 한다.

- ⇒ 8:2(시멘트 : 플라이애쉬) 비율 적용
- ⇒ 초기 건조수축 감소, 장기강도 증진, 단위수량 감소, 워커빌리티 개선효과

2.2 균열 저감방안 시험시공 실시

2.2.1 시험시공 적용공법

표 2. 시험시공 적용공법 현황

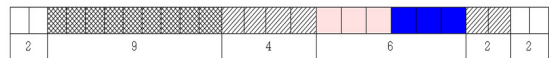
1안(설계)	2안	3안
AE감수제 (PNS계)	고성능AE감수제 (PNS계)	고성능AE감수제 (PC계)
4안	5안	6안
wire mesh + 고성능AE감수제 (PC계)	팽창제(10%) + 고성능AE감수제 (PC계)	Flyash(20%) + 고성능AE감수제 (PC계)

* 감수율 : AE감수제 10% 이상, 고성능 AE감수제 18% 이상

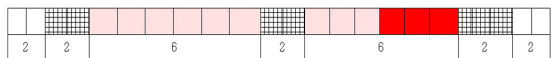
2.2.2 시험시공 개요도

(1) 단층 2터널

- 상주(25span, 217m, 균열유도줄눈 설치)



- 영덕(22span, 196m, 균열유도줄눈 설치)

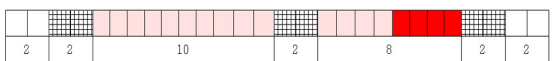


(2) 단층 3터널

- 상주(29span, 257m, 균열유도줄눈 미설치)



- 영덕(28span, 252m, 균열유도줄눈 미설치)



범례

AE감수제 (PNS계, 설계)-1안	wire mesh + 고성능AE감수제 (PC계)-4안
고성능 AE감수제 (PNS계)-2안	팽창제 + 고성능AE감수제 (PC계)-5안
고성능 AE감수제 (PC계)-3안	Flyash + 고성능AE감수제 (PC계)-6안
입출구분	철근 구간

2.2.3 사용재료 및 콘크리트 배합

(1) 시멘트

보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 시멘트의 화학성분 및 물리적 성질은 표 3과 같다.

표 3. 시멘트의 화학성분 및 물리적 성질

비중	분말도 (m^2/g)	안정도 (%)	응결시간				압축강도			강열 감량 (%)	Mgo (%)	SO ₃ (%)
			초결 (min)	종결 (hrs)	3일 (MPa)	7일 (MPa)	28일 (MPa)					
3.15	3,320	0.12	215	5:15	22.3	34.4	50.7	1.34	2.90	2.10		

(2) 혼화재(플라이애쉬)

혼합 시멘트 플라이애쉬 시멘트를 사용하였으며, 플라이애쉬 시멘트의 화학성분 및 물리적 성질은 표 4와 같다.

표 4. 플라이애쉬의 화학성분 및 물리적 성질

비중 (g/cm^3)	분말도 (m^2/g)	플로우값비 (%)	활성도지수 (%)	총알칼리량 (%)	수분 (%)	강열감량 (%)	SO ₃ (%)	CaO (%)
2.24	3,640	100	80	0.81	0.1	2.9	46.5	7.2

(3) 골재

잔골재는 낙동강사를 사용하였으며, 굵은골재는 최대치수 25mm인 쇄석을 사용하였으며, 골재의 물리적 성질은 표 5와 같다.

표 5. 골재의 물리적 성질

골재	최대 치수 (mm)	조립율	밀도 (g/cm^3)	흡수율 (%)	단위 중량 (kg/L)	마모 (%)	안정성 (%)	#200 통과량 (%)
굵은 골재	25	7.03	2.71	0.4	1.557	21.6	5.5	0.8
잔골재	5	2.90	2.59	1.90	1.61	-	3.1	1.4

(4) 혼화재(팽창제)

혼화제는 팽창제 10%를 사용하였으며, 팽창제의 화학성분 및 물리적 성질은 표 6과 같다.

표 6. 팽창제 물리적 성질

산화 마그 네슘 (%)	강열 감량 (%)	비표 면적 (m^2/kg)	1.2mm 체 잔분 (%)	응결시간			팽창률			압축강도		
				초결 (min)	종결 (hrs)	7일 (MPa)	28일 (MPa)	3일 (MPa)	7일 (MPa)	28일 (MPa)		
1.78	1.8	3,961	0.02	210	6:40	0.039	0.006	13.9	25.1	39.4		

(5) 와이어매쉬

와이어매쉬는 #8 58×58×100을 사용하였으며, 와이어매쉬의 화학성분 및 물리적 성질은 표 7과 같다.

표 7. 와이어매쉬 물리적 성질

망눈치수 (mm)		선지름 (mm)		인장강도 (N/mm^2)		용접점 전단 강도 (N/mm^2)	단면수축률 (%)	
가로	세로	가로	세로	가로	세로		가로	세로
100	100	58	58	614	613	373	43.6	44.4

(6) 혼화제

혼화제는 AE감수제 및 고성능 AE감수제를 사용하였으며, AE감수제는 나프탈렌계 계열을 사용하였으며 고성능 AE감수제는 나프탈렌계 계열과 폴리카본산계 계열로 나타난다. 혼화제의 화학성분 및 물리적 성질은 표 8, 표 9와 같다.

표 8. 고성능 AE감수제(NPS계) 화학성분 및 물리적 성질

슬럼프 (mm)		공기량 (%)		감수율 (%)	응결시간			압축강도			블리딩 량의비 (%)	비 중	고형분 (%)
plain	test	plain	test		초결 (min)	종결 (min)	3일 (%)	7일 (%)	28일 (%)				
180	185	1.7	4.9	21	+50	+55	142	131	119	48	1.142	28.8	

표 9. 고성능 AE감수제(PC계) 화학성분 및 물리적 성질

슬럼프 (mm)		공기량 (%)		감수율 (%)	응결시간			압축강도			블리딩 량의비 (%)	비 중	고형분 (%)
plain	test	plain	test		초결 (min)	종결 (min)	3일 (%)	7일 (%)	28일 (%)				
180	180	1.6	4.5	22	+45	+50	140	131	120	47	1.041	17.8	

(7) 콘크리트 배합

설계기준강도 24MPa인 콘크리트를 사용하였으며, 콘크리트의 배합표는 표 10과 같다.

표 10. 콘크리트 시방배합 집계표

골재 최대 치수	슬럼프 범위	공기량 범위	물 시멘트 트비	잔 골재 율	단위재료량						비 고	
					물	시멘트	플라이 애쉬	잔 골재	균열계	팽창제		혼화제
25	150	6±1	50.0	42.0	167	335	-	739	1041	-	2.00	1안
			50.4	45	169	335	-	766	1002	-	2.01	2안
			42.4	47.5	141	332	-	837	972	-	3.65	3안
			42.4	47.0	140	330	-	836	999	33	3.99	5안
			41.3	46.0	149	289	72	797	990	-	3.97	6안

2.3 적용공법별 분석

2.3.1 균열발생현황(종방향 줄눈 설치여부 비교 분석)

표 11. 균열발생현황

적용 공법		균열율	적용 공법		균열율
1안 (AE감수제, PNS계)	줄눈 설치	0.0041	4안 (wire mesh 설치)	줄눈 설치	0.0011
	줄눈 미설치	0.0117		줄눈 미설치	0.0022
2안 (고성능 AE감수제, PNS계)	줄눈 설치	0.0027	5안 (팽창제 혼합)	줄눈 설치	0
	줄눈 미설치	0.0057		줄눈 미설치	0.0003
3안 (고성능 AE감수제, PC계)	줄눈 설치	0.0016	6안 (Flyash 혼합)	줄눈 설치	0.0004
	줄눈 미설치	0.0027		줄눈 미설치	0.0012

2.3.2 적용 공법별 균열율 및 시공 장·단점

(1) AE감수제(설계, PNS계) - 1안

표 12. 균열발생현황(AE감수제, PNS계)

구 분	시공면(㎡)	균열 발생	균열율	비 고
줄눈 설치	618	2개소(2.5m)	0.0041	
줄눈 미설치	824	3개소(9.6m)	0.0171	

당초 설계되어 있는 AE감수제(NPS계)를 사용하여 종방향 유도줄눈을 설치한 경우와 설치하지 않은

경우 균열율을 측정하여 정리하였다(표 12). 줄눈을 설치한 경우 미설치 구간보다 76%의 균열율 감소를 나타내고 있다. 이 공법을 사용하면 콘크리트 배합 및 생산이 용이하고 추가 자재비 및 시공비는 없으나 콘크리트의 유동성 부족 및 조기강도 저하로 인한 시공성 저하, 미관불량 등을 나타내고 있어 장점 보다는 단점이 많은 것을 보여주고 있다.

(2) 고성능 AE감수제(PNS계) - 2안

표 13. 균열발생현황(고성능AE감수제 - PNS계)

구 분	시공면(㎡)	균열 발생	균열율	비 고
줄눈 설치	618	1개소(2.3m)	0.0027	
줄눈 미설치	572	2개소(3.2m)	0.0057	

고성능 AE감수제(PNS계)를 투입하고 종방향 유도줄눈을 설치구간과 미설치구간의 균열율을 측정하였더니 줄눈을 설치한 경우 미설치구간보다 52%의 감소효과를 보였다. 나프탈렌계 AE감수제는 폴리카본산계와 마찬가지로 단위수량 감소로 콘크리트 균열 저감효과와 W/B감소로 단위시멘트량 감소, 수밀성 및 내구성 향상 효과는 있지만 콘크리트 유동성 부족으로 시공성이 떨어졌고 콘크리트 골재 분리현상 및 색상이 불량하였다.

따라서, 인부들의 작업속련도, 워커빌리티, 최종 마감면(색상 및 재료분리) 상태 등을 감안하여 실제 현장에서는 PC계열 혼화제의 사용이 일반화되면서 현재 PNS계 혼화제는 거의 사용하지 않는 경향으로 각 있다.

(3) 고성능 AE감수제(PC계) - 3안

표 14. 균열발생현황(고성능AE감수제 - PC계)

구 분	시공면(㎡)	균열 발생	균열율	비 고
줄눈 설치	2,473	2개소(4.1m)	0.0016	
줄눈 미설치	4,122	2개소(11.3m)	0.0027	

고성능AE감수제를 PC계로 대체 투입한 경우에도

줄눈 설치구간에서 미설치구간보다 균열이 41% 감소하였다. 폴리카본산계 혼화제 사용에 의한 단위수량 감소로 콘크리트의 균열 저감효과와 콘크리트 워커빌리티 향상으로 시공성이 양호하였다. 초기강도 증진으로 폼 탈형시간이 단축되며 콘크리트 라이닝의 수밀성 및 내구성이 향상되었다.

(4) 와이어메쉬+고성능 AE감수제(PC계)-4안

표 15. 균열발생현황(와이어메쉬+고성능AE감수제)

구 분	시공면(㎡)	균열 발생	균열율	비 고
줄눈 설치	1,178	1개소(1.3m)	0.0011	
줄눈 미설치	1,237	1개소(2.7m)	0.0022	

와이어메쉬와 고성능 AE감수제를 동시에 적용한 경우도 줄눈 설치구간이 미설치구간의 균열률 보다 50% 감소되었다. 천장부의 인장응력 보강에 의한 균열억제 및 천장부 부착력이 증대되었지만 천장부 와이어메쉬 시공에 어려움이 있고 와이어메쉬 설치에 따른 추가비용이 발생한다.

(5) 팽창제(10%)+고성능AE감수제(PC계)-5안

표 16. 균열발생현황(팽창제+고성능AE감수제)

구 분	시공면(㎡)	균열 발생	균열율	비 고
줄눈 설치	1,672	0	0	
줄눈 미설치	2,061	1개소(0.7m)	0.0003	

팽창제와 고성능 AE감수제를 함께 사용한 경우도 타공법의 사례와 마찬가지로 줄눈 설치구간에서는 균열 조사시점인 2014년 2월 현재 균열이 발견되지 않았다. 미설치구간의 균열율도 0.0003으로 시험시공 방법 중에서 가장 우수한 효과를 보였다.

천단부 공극감소로 배면부 공극채움 그라우팅을 최소화할 뿐 아니라 건조수축에 대한 억제효과를 보인 것으로 판단된다. 그러나, 팽창제 인력투입 등으로 별도의 시공비와 안전관리가 필요하며 배치플랜트에 자동투입설비가 갖춰지지 않을 경우 콘크리트 믹싱관리에 유의해야하고 이에 따라 라이닝 표면에

나쁜 영향을 끼칠 수 있다.

(6) Flyash(20%)+고성능 AE감수제(PC계)-6안

표 17. 균열발생현황(Flyash+고성능AE감수제)

구 분	시공면(㎡)	균열 발생	균열율	비 고
줄눈 설치	1,237	1개소(0.5m)	0.0004	
줄눈 미설치	1,191	1개소(1.4m)	0.0012	

이번에는 Flyash와 고성능AE감수제를 혼합하여 사용한 경우에도 줄눈을 설치한 경우 미설치 구간보다 균열이 67% 감소되었다. 이 적용공법을 사용하면 플라이애쉬 시멘트의 특성인 수화열을 낮춰 초기 건조수축균열이 감소되고 분말도가 높아 워커빌리티 향상으로 시공성이 우수하였다. Flyash의 단가가 시멘트의 50% 정도이므로 공사비가 다소 떨어지는 장점이 있지만 초기강도 저하로 폼 탈형시간이 지연되어(20시간) 1span/day 공정추진이 어렵고 품질변동이 심한 Flyash의 품질관리에 각별한 노력이 필요하다.

(7) 입·출구부 철근콘크리트 구간

표 18. 균열발생현황(고성능AE감수제(PC계))

구 분	시공면(㎡)	균열 발생	균열율	비 고
줄눈 설치	1,649	0개소	0	
줄눈 미설치	1,649	0개소	0	

당초 설계대로 터널 입·출구부의 철근콘크리트 구간은 중방향 유도줄눈 설치구간 뿐 아니라 줄눈 미설치구간도 조사시점 현재(2014년 2월) 균열이 발견되지 않았다.

인장응력 보강효과는 와이어메쉬 보다 우수하여 균열억제 효과는 뛰어나지만 공사비가 증가되고 시공 시 콘크리트 다짐에 유의해야 한다.

2.3.3 발생균열의 양상 및 위치

단촌 2터널, 단촌 3터널 라이닝 구간은 약 4개월 동안 시공하였다.

전체 시공면적은 종방향 유도줄눈 설치구간 9,445m², 종방향 유도줄눈 미설치구간 11,656m²이다. 유도줄눈 설치구간의 균열은 7개소 10.7m의 균열길이를 나타내고 있으며 미설치구간의 균열은 10개소 28.9m의 균열길이를 나타내고 있다. 균열 패턴은 크게 종방향 균열과 횡방향 균열로 나눌수 있으며 발생균열폭이 최대 0.25mm, 평균 0.1mm~0.15mm 정도이고 균열 길이는 최대 8.5m의 종방향 균열이 발생하였고 최소 4m 정도이다.

(1) 종방향 균열

터널중심 천장 및 어깨부에 종방향으로 발생한 직선상 균열로서 전체 균열 중 약 85% 정도가 발생되었고, 천장부로부터 20° 범위내에서 많이 발생되었고 균열의 폭과 연장이 길어 터널의 내구성에 영향을 줄 뿐 아니라, 미관도 불량하여 이용객에게 불안감을 조성한다. 유도줄눈 미설치구간에는 8개소 19.3m의 균열을 보였고 줄눈 설치구간은 5개소 8.2m의 균열을 보였다. 설치구간과 미설치구간의 각 균열율은 0.0009, 0.0019이다. 종방향 유도줄눈을 설치하면 종방향 균열율은 약 52%의 감소율을 보여 종방향 균열에서는 유도줄눈을 설치하는 방법이 종방향 균열 저감대책으로는 가장 우수한 방법으로 평가되었다.

(2) 횡방향 균열

터널 중심선에 직교하여 횡방향으로 발생하는 균열로서 전체 균열 중 약 15% 정도 발생하였고, 시공 이음부 주변장과 터널 어깨부, 천단부에 주로 발생되었다. 발생부위와 발생시점을 감안한다면 가장 큰 요인으로는 수화열에 의한 온도균열로 판단할 수 있다. 즉 플라이애쉬(20%) 구간은 횡방향 균열이 나타나지 않지만 1종 보통 포틀랜드 시멘트 구간의 균열은 3개소 2.4m의 균열을 보여주고 있어 횡방향 균열은 수화열을 낮춰 시공하는 것이 가장 바람직한 것으로 판단된다.

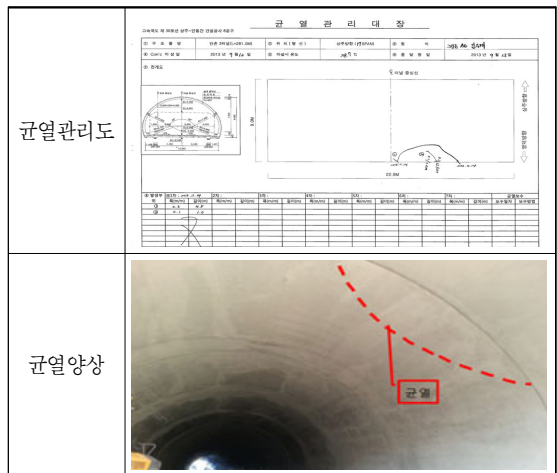


그림 7. 횡방향 균열 발생위치 및 균열영상

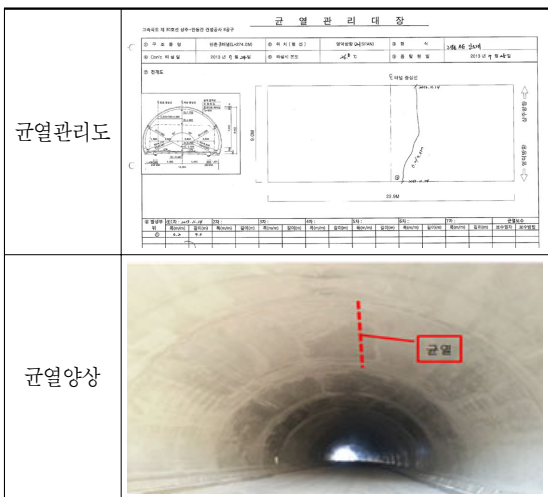


그림 6. 종방향 균열 발생위치 및 균열영상

2.3.4 경제성 비교

(1) 적용공법별 공사비 비교

표 19. 공사비 비교

(단위 : 만원)

적용 공법	공사비(m당)	증(감)	비고
1안 AE감수제(PNS계)	47.6	-	설계
2안 고성능AE감수제(PNS계)	48.1	0.5	
3안 고성능AE감수제(PC계)	48.6	1.0	
4안 와이어메쉬 + 고성능AE감수제(PC계)	51.6	4.0	
5안 팽창제(10%) + 고성능AE감수제(PC계)	50.6	3.0	
6안 Flyash(20%) + 고성능AE감수제(PC계)	45.1	2.5	

2.3.5 시공성 비교

(1) 적용공법별 콘크리트 압축강도 및 폼 탈형시간 측정

표 20. 적용공법 콘크리트 시간별 압축강도

양생 시간	구 분	강 도	비 고
16 시간	1안 AE감수제	2.45	
	2안 고성능AE감수제(PNS계)	2.99	
	3안 고성능AE감수제(PC계)	3.23	폼탈형가능
	5안 팽창제+고성능AE감수제	3.10	폼탈형가능
	6안 플라이애쉬(20%)+고성능AE감수제	2.93	
18 시간	1안 AE감수제	2.72	
	2안 고성능AE감수제(PNS계)	3.52	폼탈형가능
	3안 고성능AE감수제(PC계)	4.12	폼탈형가능
	5안 팽창제+고성능AE감수제	3.98	폼탈형가능
	6안 플라이애쉬(20%)+고성능AE감수제	3.88	폼탈형가능
20 시간	1안 AE감수제	2.92	
	2안 고성능AE감수제(PNS계)	3.82	폼탈형가능
	3안 고성능AE감수제(PC계)	4.85	폼탈형가능
	5안 팽창제+고성능AE감수제	4.51	폼탈형가능
	6안 플라이애쉬(20%)+고성능AE감수제	4.36	폼탈형가능
24 시간	1안 AE감수제	3.08	폼탈형가능
	2안 고성능AE감수제(PNS계)	4.01	폼탈형가능
	3안 고성능AE감수제(PC계)	5.43	폼탈형가능
	5안 팽창제+고성능AE감수제	5.12	폼탈형가능
	6안 플라이애쉬(20%)+고성능AE감수제	4.95	폼탈형가능

터널의 콘크리트라이닝 시공 시 거푸집 탈형 시기가 매우 중요하다.

이에 대하여 터널표준시방서(2009년)에서는 『콘크리트라이닝의 거푸집은 부어넣은 콘크리트의 강도가 3MPa 이상 발현된 후, 또는 콘크리트라이닝의 자중을 견딜 수 있는 강도가 발현된 후에 제거하여야 한다』라고 규정하고 있다.

콘크리트의 24시간 이내의 압축강도 발현은 양생

온도, 배합비 특히 W/B와 단위 시멘트량에 따라 크게 좌우되기 때문에 콘크리트라이닝 시공전에 현장 배합설계 콘크리트에 대한 양생시간별(15~24시간) 강도특성 Curve를 이용하여 라이닝 거푸집 제거 시기를 결정함이 바람직하다.

터널 라이닝콘크리트의 공정추진에 지장을 주지 않는 시공속도는 1cycle/day이 일반적이인데, 이를 달성하기 위해서는 아래 그림과 같이 콘크리트라이닝 타설 후 적어도 17시간 이내에 거푸집 탈형이 가능한 압축강도(3MPa)에 도달하여야 한다.

1cycle/day을 실현할 수 있는 압축강도와 폼 탈형 가능시간을 만족하는 경우는 표 20에 보이는 바와 같이 3, 4, 5, 6안이다. 그에 반해 1안은 1cycle/day 압축강도를 만족하지 못하므로 시공성이 떨어지는 것으로 나타난다.

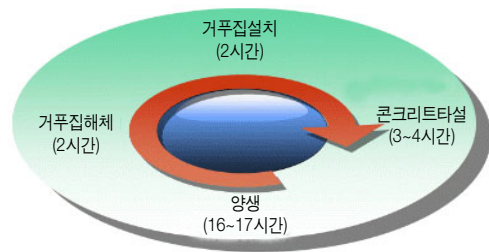


그림 8. 터널 콘크리트라이닝 공정(1cycle/day)

3. 결론

3.1 라이닝 균열 저감방안 결과

터널 라이닝에 나타나는 균열의 종류는 4가지로 나타나지만 대표적으로 2가지로 분류할 수 있다. 대표적인 균열로는 종방향 균열과 횡방향 균열로 분류할 수 있고 그 외 기타균열로 복합균열과 전단균열이 있다. 보통 종방향 균열 및 횡방향 균열이 0~80% 내외, 기타균열이 0~20% 내외로 알려졌지만 우리 사업단의 시험시공 결과, 종방향 균열은 85%, 횡방향 균열이 15% 발생하였다.

라이닝 균열 저감방안에 대해 다양한 방법을 시험 시공한 결과, 팽창제(10%) + 고성능AE감수제(PC계) + 종방향 균열유도 줄눈설치방법이 균열저감효과에서는 가장 우수하나 경제성이 불리하고 팽창제의 인력투입으로 안전관리에 유의하여야 하며, 믹싱이 불량할 경우 라이닝 표면색상에 나쁜 영향을 줄 우려가 있지만 종방향 유도줄눈 설치가 곤란한 곡선반경이 작은 구간에서는 유효한 방법으로 판단된다.

고성능AE감수제(PC계)와 종방향 균열 유도줄눈 설치방법은 균열저감효과와 시공성에서 단연 우수하다.

Flyash(20%)를 대체하는 경우 시공속도(1cycle/day)에 심각한 영향을 주지는 않았지만 초기강도 발현의 지연으로 양생기간이 상대적으로 길었고 또한, 플라이애쉬의 품질변동이 심하므로 품질의 균질성을 확보할 수 있도록 원재료의 품질관리에 각별한 관심을 가져야 할 것으로 판단된다.

그러나, 플라이애쉬 가격이 1종 보통포틀랜드 시멘트보다 저렴하므로 경제성면에서 가장 유리하였다.

와이어매쉬 + 고성능AE감수제를 이용한 공법은 균열저감효과는 있었지만 시공성 및 경제성 측면에서 상당히 불리하였다.

종방향 균열 유도줄눈설치 효과는 설치하지 않은 경우 보다 약 50%의 균열이 저감되었으므로 종방향

균열 유도줄눈의 설치효과는 절대적이었다.

PNS계 AE감수제는 워커빌리티와 물결무늬(색상 포함), 콘크리트 재료분리 등 미관측면에서 상당히 불리하므로 실제 터널 현장의 콘크리트라이닝 시공에서는 거의 사용하지 않는 추세이다.

3.2 제언

플라시에서 혼입 시 콘크리트 초기강도 저하, 원재료의 품질관리 어려움 등으로 인하여, 터널의 라이닝 콘크리트에서 플라이애쉬를 대체 혼입하여 시공하는 경우는 전무한 실태이다.

그렇지만, 본 연구에서 나타난바와 같이 라이닝 천단부의 종방향 균열 유도줄눈설치를 원칙으로 하고, 현장 여건을 고려하여 섬세한 공정계획을 세우고 원재료를 포함한 콘크리트 품질관리에 철저를 기한다면 플라이애쉬(20%) + 고성능AE감수제(PC계)를 혼합하여 시공하는 방법이 경제성과 균열저감효과 측면에서 매우 유리할 것이다.

그리고, 종방향 균열 유도줄눈설치가 곤란할 정도로 곡선반경(1,800m 미만)이 아주 작은 구간에서는 유지관리 시 라이닝콘크리트의 균열보수비용을 고려한다면 팽창제를 첨가하는 방안도 고려해 볼 수 있을 것이다.

회비 납입 안내

회원 여러분께서 납부하시는 회비는 학회 운영의 소중한 재원으로 쓰이고 있습니다. 회원 제위께서는 체납된 회비를 납부하시어 원활한 학회운영에 협조하여 주시기 바랍니다.

- 회비납부는 한국씨티은행 : 102-53510-243
(예금주(사)/한국도로학회)
- 지로번호 : 6970529

<학회사무국>