

라이닝 시공특성을 고려한 대단면 4차로 터널 균열최소화 방안에 대한 연구 A Study for Concrete Crack Minimize Methods in Large Section Tunnel Lining

추석연¹⁾, Seok-Yeon Choo, 이재성²⁾, Jae-Sung Lee, 고성일³⁾, Sung-Yil Koh, 김상환⁴⁾, Sang-Whang Kim, 나경웅⁵⁾, Kyong-woong, Ra, 김태혁⁶⁾, Tae-Hyok Kim

- 1) 단우기술단 전무이사, General Manager, Danwoo Engineering
- 2) 단우기술단 이사, Deputy General Manager of Geotechnical Division, Danwoo Engineering
- 3) 단우기술단 차장, Deputy Manager of Geotechnical Division, Danwoo Engineering
- 4) 호서대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hoseo University
- 5) 삼성물산 건설부문 토목기술팀 차장, Civil Division, Civil Tech. Team, SAMSUNG
- 6) 삼성물산 건설부문 국내토목영업팀 과장, Civil Division, Domestic Civil Bussiness Team, SAMSUNG

SYNOPSIS : The concrete lining in tunnel performs structural and nonstructural functions. The concrete lining works as a structural member for released load and residual water pressure in NATM tunnel system. Also concrete lining used for finishing the tunnel surface. The initial crack of concrete lining is reported because of difficulties in construction process, which concrete is injected into 30~40cm narrow gap between lining form and tunnel surface through 500×600mm small injection holes in the form. In this paper, we research a reason of initial crack occurrence by the case study of 4 lane wide span tunnel, and propose an improved method for crack minimization in construction process. We verify that the proposed method can give qualified concrete lining by carrying out the concrete injection model test and the numerical analysis of concrete flow.

Keywords : Large section tunnel, Concrete Lining, Steel Form, Concrete Flow Analysis

1. 서 론

터널에서의 콘크리트 라이닝 기능은 크게 구조체로서의 역학적 기능과 비구조적 기능으로 대별될 수 있으며, 구조적 기능으로써는 주지보재의 역할부족 및 배수시설의 기능저하에 따른 이완하중과 잔류수압이 작용할 가능성이 있는 경우를 대비한 역학적 기능을 수행하며, 비구조적 기능으로써는 내구성 확보 및 미관향상의 역할을 수행하고 있는 구조물이다. 구조적이든 비구조적이든 터널에서의 콘크리트 라이닝은 매우 중요한 역할을 수행하는 구조물이나, 시공성면에서 ① 콘크리트 타설시 폭 30~40cm의 좁은 폭 및 철근사이 타설, ② 강제거푸집상의 콘크리트 타설구(500×600mm)를 이용하여 콘크리트를 타설해야 하는 공간적 제한성등의 특수성으로 인하여 초기 균열발생사례가 많이 보고되고 있다. 따라서 본 논문에서는 균열발생량이 상대적으로 많은 대단면 4차로 터널을 대상으로 하여 콘크리트 라이닝 시공에서부터 터널운용전 발생하는 초기 균열에 대한 발생원인 분석을 실시하고, 국내 콘크리트 라이닝 시공 특성을 파악하기 위한 사례조사를 실시하였다. 이를 바탕으로 하여 균열발생 최소화를 위한 시공개선방안을 제안하고, 개선방안에 대한 라이닝 콘크리트 타설모형실험 및 콘크리트 유동분석을 수행하여 고품질 콘크리트 라이닝 시공을 위한 제안방안을 검증하였다.

2. 콘크리트 라이닝 균열형태와 원인분석

터널구조물 사용년한이 길어질수록 콘크리트 라이닝에 발생하는 균열량도 증가되나, 최근의 많은 연구 자료에 의하면 터널구조물 시공으로부터 준공직후 까지 발생하는 균열발생사례가 많이 보고되고 있다. 이러한 신설구조물의 초기균열은 재료적인 측면과 시공적인 측면이 복합되어 발생되며, 외부하중에 의한 균열발생 여부에 따라 구조적 및 비구조적 균열로 분류한 균열발생 패턴 및 원인은 다음과 같다.

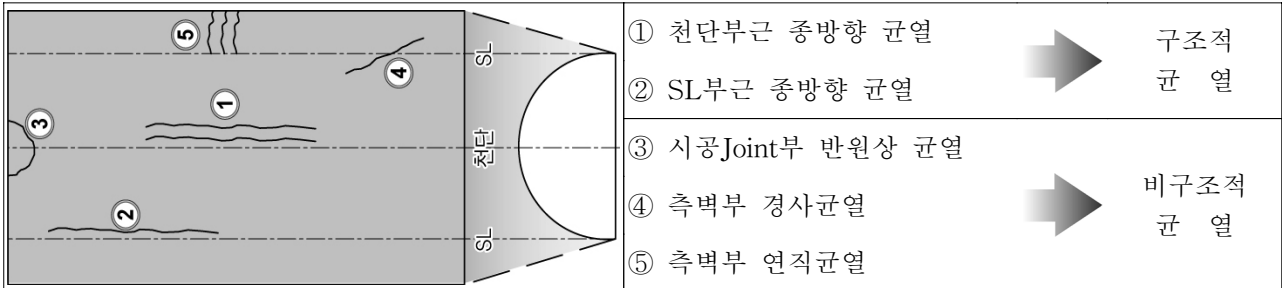


그림 1. 콘크리트 라이닝 초기 균열패턴

표 1. 시공직후 콘크리트 라이닝의 균열패턴 및 원인

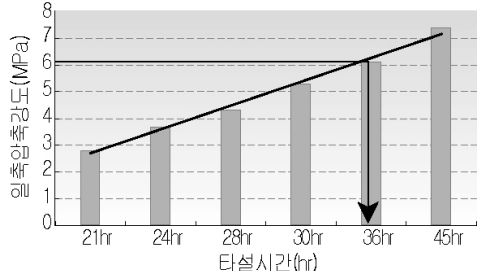
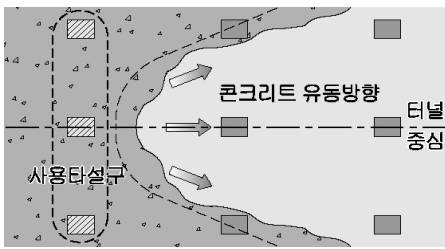
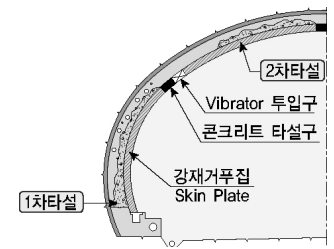
균열패턴	균열특성 및 원인분석	비고
① 천단부 종방향 균열	<ul style="list-style-type: none"> 터널에서 가장 빈번히 발생하는 균열 터널 천단부 20°범위에서 주로 발생 콘크리트 타설불량에 따른 밀실주입 부족 및 라이닝 두께 불규칙 측벽부 콘크리트 자중에 의한 압밀 거푸집 탈형강도 부족 지반 소성압 또는 편압 증대 	<p>천단부근 종단균열 콘크리트 자중에 의한 압밀</p>
② SL부근 종방향 균열	<ul style="list-style-type: none"> 지반 소성압 또는 편압 증대 거푸집 탈형강도 부족 	<p>추가 콘크리트 타설전 콜드조인트 발생</p>
③ 시공Joint부 반원상 균열	<ul style="list-style-type: none"> 신설라이닝부 거푸집 조립시 기설콘크리트 접합부에 가해지는 Jacking Force에 의한 균열 시공이음부 천단배면 공동 및 충전불량 	
④ 측벽부 경사균열	<ul style="list-style-type: none"> 흘러내림방식의 콘크리트 타설에 따른 콘크리트 페이스트 유동성 미확보 및 콜드조인트 	
⑤ 측벽부 연직균열	<ul style="list-style-type: none"> 등간격으로 발생하는 사례 많음 균열폭 0.2~0.5mm 혹은 그 이상이며, 관통균열 발달가능성 많음 바닥면 구속조건에 따른 구속하중에 의해 발생 라이닝 콘크리트 건조·수축 	<p>인버트 구속</p>

3. 국내 대단면 4차로 터널 콘크리트 라이닝 시험시공사례 분석

국내 4차로 터널은 1995년 공사완료된 서울외곽 순환고속도로 판교~구리간의 청계터널(L=450m)를 최초로 하여 시공사례가 계속적으로 증가하고 있는 추세이다. 본 고에서는 최근의 국내 대단면 4차로

터널 시공사례 중 현재 시공중에 있는 서울외곽순환 고속도로 00공구의 라이닝 콘크리트 시험시공 및 실제 시공사례를 분석하였으며, 결과는 표2와 같다.

표 2. 라이닝 시험시공 및 시공현황

구 분	내 용	
시험시공 결과분석	<ul style="list-style-type: none"> 콘크리트 규격 : <ul style="list-style-type: none"> - 25(mm)-240(kgf/cm²)-15(cm) 양생 및 온도관리 방식 : <ul style="list-style-type: none"> - 48hr 스팀보일러 습윤양생 (품질향상 및 조기강도 발현) 타설시 온도조건 : <ul style="list-style-type: none"> - 외부온도 : 13~19°, - 갱내온도 : 15~18° 	<ul style="list-style-type: none"> 시간에 따른 강도 증진율 : 
	<ul style="list-style-type: none"> 거푸집 탈형강도 6kgf/cm²를 기준으로 하여 36hr후 거푸집 탈형계획 수립 	
시공현황 분석	<p>콘크리트 배합설계 및 강도</p>	<ul style="list-style-type: none"> 라이닝 콘크리트 시험시공 결과에 따라 거푸집 탈형강도 및 탈형시간 선정 강재 거푸집내 원활한 콘크리트 유동성 확보를 위하여 15cm이상의 슬럼프치 확보 강재거푸집 총9개소의 타설구 중, 3개소만으로 콘크리트 타설 콘크리트 타설다짐시 외부 진동다짐 미적용 <ul style="list-style-type: none"> ➔ 인력타격 진동에 의존하여 콘크리트 타설 <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="558 1041 1005 1288">  <p>[강재거푸집내 콘크리트 유동 모식도]</p> </div> <div data-bbox="1053 1041 1388 1288">  <p>[콘크리트 타설구 위치 단면]</p> </div> </div> <ul style="list-style-type: none"> 하절기 살수양생 / 동절기 스팀양생 병행

4. 콘크리트 라이닝 균열 최소화 방안

라이닝 콘크리트의 경우 시공측면에서 ① 콘크리트 타설시 폭 30~60cm의 좁은 폭 및 철근사이 타설, ② 강재거푸집상의 콘크리트 타설구(500×600mm)를 이용하여 콘크리트를 타설해야 하는 공간적 제한성 등의 특수성으로 인하여 밀실한 콘크리트 타설에 많은 애로사항이 있는 구조물이다. 따라서 밀실콘크리트 타설을 기본 목표로 하여 시공방안을 개선하였다.

강재거푸집 및 콘크리트 타설방식 개선사항으로써, 4차로 터널에서의 기존 라이닝 콘크리트 타설방법의 경우 타설구 부족으로 인하여 최대 콘크리트 낙하고가 6.0m이상으로 타설된다. 일본 지오프론트 연구회(복공분과회;2004. 11)의 연구자료에 의하면 강재거푸집 콘크리트 타설시 4.0m이상의 낙하고를 갖는 콘크리트의 경우 라이닝 시공시 재료분리가 발생될 수 있으며, 이를 고려하여 콘크리트 낙하고가 4.0m이내가 되도록 최적의 타설구 개수 및 위치를 선정하였다. 강재거푸집 진동방식 개선을 위하여 소규모 고주파 진동기(Ø38×L300)를 적용하여 효율적인 타설진동이 수행될 수 있도록 계획하였으며, 천단부 종방향 균열유

도를 위한 유도줄은 홈을 설치하여 구조물 완공후 줄은 보수만을 수행하여 고품질의 구조물이 시공되도록 계획하였다. 이외에도 하절기 라이닝 수화열 및 부등건조·수축 최소화를 위한 자동살수장치 및 동절기 스팀양생 시스템을 적용토록 계획하였다.

표 3. 강재거푸집 및 콘크리트 타설방식 개선

강재거푸집 및 콘크리트 타설방식 개선	진동방식 개선	균열유도 줄눈 설치
<p>① 콘크리트 타설구 개수 증대 및 위치 최적화 → 콘크리트 낙하고 저감에 따른 재료분리 방지 및 밀실주입 유도</p>	<p>② Vibrator 취급용이성을 고려한 소규모 고주파 콘크리트 진동기 사용 ③ 터널 천단부 균열유도 줄눈 설치</p>	

5. 라이닝 콘크리트 유동 모형실험 및 유동성 분석

본 고에서는 강재거푸집 개선사항에 대한 효율성 검증을 위하여 콘크리트 타설 모형실험 및 유동분석을 통하여 개선안에 대한 효율성을 검증하였다.

5.1 콘크리트 유동 모형실험

타설 모형실험 수행을 위하여 그림2.에서와 같이 실규모의 1/20축소모형을 제작하여 타설구 위치 및 개수에 따른 콘크리트 유동성 분석 및 주입을 변화를 확인하였다.

- 축척 : 실규모(기존 4차로 터널)사이즈의 1/20
- 모형 강재거푸집 규격(cm) : 47(중)×90(횡)
- 적용 재료 특성
 - ① 사용재료 : 물+일반시멘트(시멘트 페이스트)
 - ② 물/시멘트비 : 44/100
 - 라이닝 시공시의 슬럼프치 15 기준
- 모형구성
 - ① 강재거푸집 모형
 - ② 콘크리트 주입조(25×23×25cm) 및 주입관
 - ③ 주입압 가압을 위한 에어 콤프레셔
- 철근 배근조건



그림 2. 라이닝 콘크리트 타설모형실험 개요도

적정 물/시멘트 선정을 위하여 물/시멘트 변화에 따른 1/20스케일의 공시체들을 제작후 슬럼프 15cm에 상응하는 물/시멘트를 선정하는 방법으로 예비 슬럼프 시험을 실시하여 적정 물/시멘트비(44/100)를 선정하였다. 콘크리트 유동 모형실험은 총 타설구 위치 9개소 및 15개소의 경우에 대하여 각각 2회의 유동실험을 실시하여, 투입 시멘트 페이스트량에 따라 주입을 평가를 실시하였다. 타설구 위치별 타설 순서 및 타설결과는 표4와 같다.

표 4. 모형실험 타설순서 및 결과

타설구 위치 및 타설순서	실험전경	실험결과분석
<p>[Case 1 투입구 평면도]</p>	<p>[측벽부 타설(1차) 및 천단타설(2차) 전경]</p>	<p>기존 타설방식 대비 14.2% 주입을 향상</p>
<p>[Case 2 투입구 평면도]</p>	<p>[어깨부 타설(2차) 및 타설완료후 전경]</p>	

5.2 콘크리트 라이닝 유동분석

5.2.1 유동분석 개요

라이닝 콘크리트 밀실타설 여부에 대한 해석적 검증을 위하여 미국 FLUENT Inc.에서 개발된 유한체 적법(FVM; Finite Volume Method)을 사용해, 질량/운동량 에너지와 화학종의 보존방정식을 푸는 범용 CFD코드인 FLUENT 6.0.12을 이용하여 수행하였다. FLUENT에서는 모든 유동에 대하여 식 (1)과 같은 기본적인 연속방정식과 운동량 방정식을 적용하며, 유동의 유형에 따라서 필요한 방정식을 추가하거나 제거하여 해석을 수행하였으며, 그림 3. 흐름도에 의하여 수행하였다.

$$\text{연속 방정식} : \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

$$\text{운동량 방정식} : \frac{\partial (\bar{\rho} \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \bar{\rho} \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

여기서 S_m : 질량 생성항(라이닝내에서 생성되는 질량없음; 층류조건)

μ : 점성 \vec{F} : 체적력 $\bar{\tau}$: 난류응력



그림 3. 라이닝 유동해석 흐름도

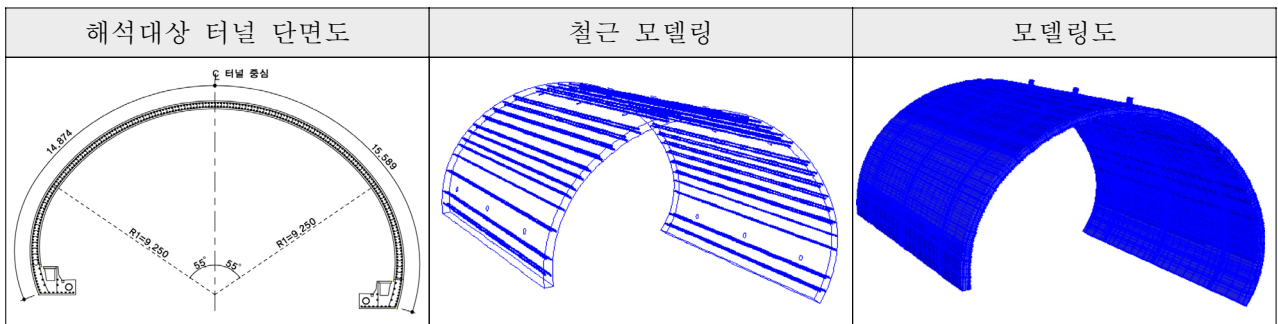
(1) 유동정수 산정 및 해석모델링

FLUENT 6.0.12 해석수행상 가장 중요한 인자로는 유동물질의 유동정수 산정으로써, 이를 위하여 표 5와 같이 콘크리트에 대한 유동정수 측정사례를 조사하여 대상 슬럼프치에 해당하는 소성점도를 선정하였다. 시멘트계 혼합물의 점도측정에 사용되는 장치는 주로 ①회전점도계, ②인상구식 점도계, ③ 평행판 Plastometer, ④ 이점법 시험장치, ⑤ 관식점도계등이 있으며, 이 중 해석이 쉽고 장치의 고체면에서 미끄러짐이 생기는 경우 변화속도의 보정이 비교적 간단하게 되는 회전점도계가 많이 사용되고 있음을 고려하여, 유동정수를 표 5.를 기초자료로 하여 산정하였다.

표 5. 콘크리트 유동정수 측정사례

연구자명	측정장치	골재종류	슬럼프(cm)	항목치(g/cm ²)	소성점도(Poise)
村田・鈴木 (실내실험)	회전점도계	쇄석골재	13~22	1.5~2.2	2,900~4,000
		경량골재	14~22	0.8~1.9	1,800~6,800
村田 (현장실험)	회전점도계	쇄석골재	13~14	2.3~2.5	5,000~6,300
		경량골재	10~22	1.1~2.7	1,800~5,300
菊川	회전점도계	하천사	10~15	1.4~1.9	2,500~4,400
Tattersal et al	MK (이점법 시험법)	-	15.21	1.7~3.5	390~750
Banfil	MK (이점법 시험법)	-	15.21	1.7~3.5	390~750
荒本・水口	평행관	쇄석골재	1~23	0.6~63.0	30~42,000

표 6. 해석 모델링도



(2) 해석조건

콘크리트 라이닝 유동해석에 있어 초기조건은 강제 거푸집 내부는 초기에 공기만이 존재한다고 가정하였다. 타설구로 부터는 콘크리트만이 주입되며 공기의 주입은 없는 것으로 하였다.

라이닝 타설구는 총 15개이며, 각 해석조건별로 타설구에 개별적으로 경계조건을 적용하였다. 라이닝이 주입되는 타설구는 Pressure Inlet조건을 설정, 콘크리트가 주입되지 않는 타설구에 대해서는 공기의 외부 배출을 위해 Pressure Outlet 조건을 적용하였으며, 터널 자체와 철근에 대해서는 벽조건을 적용하였다.

(3) 해석 Case 및 결과분석

설정 해석 Case는 기존 강제거푸집 시공사례를 고려하여 강제거푸집 내 타설구 개수중, 측벽 2개소(양측 1개소씩)/천단1개소 사용의 경우를 Case 1, 측벽 6개소(양측 3개소씩)/천단 3개소 사용의 경우를 Case 2, 측벽6개소/어깨부 6개소/ 천단 3개소 사용의 경우를 Case 3으로 하여 총 3개의 Case에 대하여 유동분석을 수행하였다.

표 6. 해석 Case별 타설구 개수 및 위치

Case 1	Case 2	Case 3

표 7. 해석 Case별 결과분석

Case 1	Case 2	Case 3
<p>1) 측벽 하부 타설구 1개 이용시</p> <p style="text-align: center;">최소 콘크리트 밀실도 : 55%</p>	<p>1) 측벽 하부 타설구 3개 이용시</p> <p style="text-align: center;">최소 콘크리트 밀실도 : 72%</p>	<p>1) 어깨부 타설구 3개 이용시 (측벽하부 완료후)</p> <p style="text-align: center;">최소 콘크리트 밀실도 : 96%</p>
<p>2) 천단 타설구 1개 이용시</p> <p style="text-align: center;">최소 콘크리트 밀실도 : 55%</p>	<p>1) 천단 타설구 3개 이용시</p> <p style="text-align: center;">최소 콘크리트 밀실도 : 72%</p>	<p>1) 천단 타설구 3개 이용시</p> <p style="text-align: center;">최소 콘크리트 밀실도 : 96%</p>

6. 결 론

토목분야에서의 모든 구조물은 최적의 설계, 안전하고 효율성 높은 시공관리를 통하여 고품질의 구조물이 되도록 많은 노력을 해왔으나, 최근에 와서는 기존구조물의 효율적인 유지관리를 통하여 구조물 사용년한 증대, 운용중 구조물 안전성 확보 등이 주요한 관심사가 되고 있다.

이에 대하여 본 연구에서는 대단면 터널의 고품질 콘크리트 라이닝 시공방안의 일환으로 시공시에 발생할 수 있는 초기균열 제어를 위한 시공상의 개선방안을 제시하였으며, 라이닝 콘크리트 타설모형실험 및 콘크리트 유동분석을 통하여 개선방안을 검증하였으며, 결과는 다음과 같다.

- 1) 라이닝 균열 최소화를 위한 주요 개선방안으로는 ① 기존 도로터널 강제거푸집 타설구 개수 증가(기존 9개소 ➔ 개선15개소) 및 라이닝 측벽 콘크리트 타설시 최대 낙하고 4.0m조절, ② 소규모 고주파 진동기를 이용한 효율적인 콘크리트 진동 방식 적용, ③ 강제거푸집 천단부 균열유도줄눈 홈설치로 균열발생 위치 확대 방지 등이 있다.
- 2) 상기 개선방안 중, 강제거푸집 타설구 개수 증가에 대한 효율성을 검증하기 위하여 강제거푸집 모형 실험 및 콘크리트 라이닝 유동분석을 실시하였다.
모형실험 결과, 강제거푸집 타설구 개수 증대시 기존 타설방식에 비하여 14.2%정도 주입율이 향상되었음을 확인하였으며, FLUENT Ver. 6.0을 이용한 콘크리트 유동분석을 통하여 강제거푸집 개선시 콘크리트 주입밀실도 증진여부를 검증하였다.
- 3) 본 고에서는 유지관리 효율성 향상을 위한 고품질 라이닝 구조물 시공방안의 일환으로 강제거푸집 개선방안에 대하여 제시하였으나, 향후 라이닝 콘크리트 특성을 고려한 배합설계, 효율적인 구조물 유지관리 기법도입 및 적용방안 도출등의 연구가 지속적으로 요구된다.

참고문헌

1. 기정석, 이종우, 오혁희(1999), "터널내 변상 콘크리트 라이닝의 해석", **한국구조물 진단학회**, 제3권 제3호, pp58~69.
2. 서강천(2002), "터널 콘크리트 라이닝의 균열현황 및 분석", **한국구조물 진단학회**, 제6권 제3호, pp22~29.
3. 이형주(2002), "터널 보수와 보강 매뉴얼", 기술경영사, 서울, pp 5~45.
4. 정준화(2001), "대단면 터널의 지보 및 라이닝 CONC. 시공", **제1회 터널 시공기술 향상 대토론회**, pp63~78
5. ジェオフロンテ研究會(2004), "二次覆工コンクリートの適切な配合および施工方法について(覆工コンクリートWG/2004年度活動報告)", 東京.
6. 朝倉俊弘(1997), "山岳トンネルの變狀メカニズムとその對策に關する研究", **鐵道總研報告 特別第13号**