



경제성 및 시공성을 고려한 터널 라이닝 강재거푸집 제거시기 검토

1. 머리말

터널의 콘크리트 라이닝 타설은 굴착이 완료된 후 시행되는 단일 공정으로 콘크리트 라이닝 시공시 적절한 거푸집 제거 시기의 결정은 라이닝 균열 제어와 전체적인 공기에 밀접한 관련이 있으며, 최근 장대터널의 경우는 더욱 그러하다.

또한, 콘크리트 라이닝의 품질은 적절한 양생시간을 확보하는 것이 관건이므로 강재 거푸집의 제거시기를 합리적으로 설정하는 것은 매우 중요하다.

이러한 관점에서 경제성 및 안정성을 확보할 수 있도록 터널 라이닝 강재거푸집 제거시기를 설정할 수 있는 설계기준 및 검증방법에 대해 00현장의 적용사례를 통해 알아 보고자 한다.

2. 거푸집 제거시기 검토

현재 거푸집 제거시기에 대한 기준은 터널표준시방서에 “거푸집은 부어 넣은 콘크리트의 강도가 30kgf/cm² 이상 발현된 후 또는 콘크리트라이닝의 자중을 견딜수 있는 강도가 발현된후 거푸집 제거하여야 한다.” (터널표준시방서, 1999,p60)로 정의되어 있다.

따라서, 콘크리트 라이닝 단면에 대하여 fck =30kgf/cm² 일때 거푸집 제거시 자중에 의한 안정성 여부를 모델링하면 다음과 같다.

(1) 해석방법 및 조건

- 콘크리트 라이닝을 2차원 Beam요소의 연속체 구조물로 모델링함
- 지반은 압축전담 스프링으로 이상화함
- 암질이 양호한 지반과 불리한 지반을 선정해 각각 조건별 해석 수행 및 결과비교
- 재령에 따른 콘크리트 압축강도 적용(t=1일)

· 지령에 따른 콘크리트의 발현 압축강도 (콘크리트 구조설계기준, 1999)

$$f'_{cx}(t) = f_{cx}(t) \cdot f_{28} \quad f_{cx}(t) = \exp[\beta_{cc}(1 - \sqrt{\frac{28}{t}})]$$

f'_{cx}(t) : 시간에 따른 콘크리트 압축강도 (kgf/cm²)

f_{28} : 지령28일의 콘크리트 압축강도 (kgf/cm²)

\beta_{cc}(t) : 시간에 따른 강도 발현속도

\beta_{cc} : 시리트 종류에 따른 상수(2종 시리트 = 0.38)

$$\bullet f_{cx}(t) = \exp[0.38 \cdot (1 - \sqrt{\frac{28}{1}})] = 0.196$$

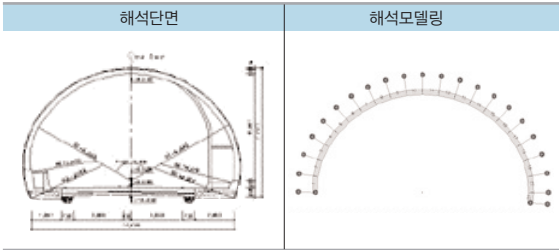
$$\bullet f'_{cx}(t) = 0.196 \cdot 240 = 47.040 \text{ kgf/cm}^2 > 30 \text{ kgf/cm}^2$$

이 경우 콘크리트 재령 1일 발현 압축강도는 47.040kgf/cm²으로서 터널 표준시방서에서 제시한 거푸집 탈형시기의 콘크리트 강도인 30kgf/cm²를 상회하나, 시공시 현장조건 및 제반조건등을 고려하여 콘크리트 재령 1일 압축강도를 30kgf/cm²으로 가정하여 거푸집 탈형시 콘크리트 라이닝의 자중에 대한 안정성 검토를 시행함

(2) 해석 입력물성치

구 분	탄성계수 (tonf/m ²)	점착력 (tonf/m ²)	내부마찰각 (°)	단위중량 (tonf/m ³)	포아송비 (ν)
TYPE-4	100,000	20	35	2.25	0.30

(3) 해석모델링



(4) 단면형태 및 특성

구 분	B (m)	H (m)	A (m ²)	I (m ⁴)	부재번호
TYPE-4	1.000	0.300	0.300	0.00225	1 - 21

(5) 지반스프링 계수

구 분	지반변형계수 Es (tonf/cm ²)	등가환산반경 R (m)	스프링 계수 Ks (tonf/cm ²)	절점번호	비 고
TYPE-4	100,000	4.413	22,662	22-45	부재길이 자동계산

; 지반스프링계수는 woelfer공식을 이용하여 산정하였음

(6) 작용하중

구 분	내 용	하중모식도
자 중	<ul style="list-style-type: none"> 설계기준강도 (fck) : 240kg/cm² 단위중량 : 콘크리트 구조물 2.35tonf/m³적용 	

(7) 하중조합

CASE1 ; 자중 × 1.0

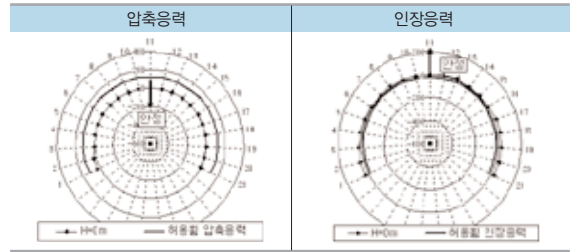
(8) 단면력 검토

허용휨압축력 : $f_{ca} = 0.4f_{ck} = 0.4 \times 240 \text{ kgf/cm}^2 = 96 \text{ tonf/m}^2$

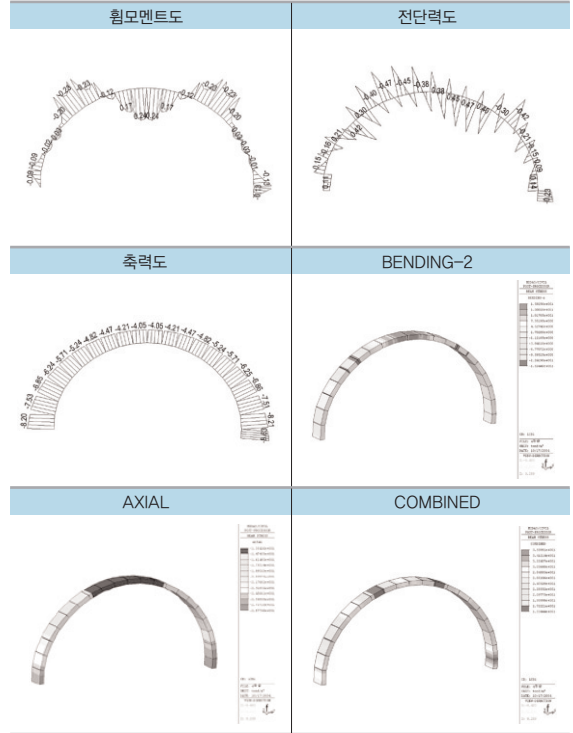
허용휨인장력 : $f_{ct} = 0.42\sqrt{f_{ck}} = 0.42 \times \sqrt{240} \text{ kgf/cm}^2 = 23 \text{ tonf/m}^2$

허용전단응력 : $V_{ca} = 0.25\sqrt{f_{ck}} = 0.25 \times \sqrt{240} \text{ kgf/cm}^2 = 13.7 \text{ tonf/m}^2$

구 분	모멘트 (tonf-m)	전단력 (tonf)	축 력 (tonf)	압축응력 (tonf/m ²)	인장응력 (tonf/m ²)	전단응력 (tonf/m ²)	검 토 결 과
천단부(11)	0.18	0.38	4.05	29.2	-2.4	1.3	O.K
아래부(15)	0.23	0.30	4.83	31.3	-	1.0	O.K
측벽부(20)	0.01	0.10	7.53	36.0	-	0.3	O.K



(9) 해석결과



(10) 현장적용

당 현장의 경우 위와 같은 구조해석 결과를 바탕으로 콘크리트 재령강도가 30kgf/cm²를 확보할 수 있도록 현장시공시 공시체 시험에 의해 초기강도 및 발현시기(약1일)를 확인하고, 이에 따른 합리적인 거푸집 제거시기를 결정토록 함

3. 거푸집 제거시기에 따른 공사비 비교 · 검토

터널의 라이닝 거푸집을 제거하는 시기를 설정하는 것은 위 사례와 같이 설계기준에 맞게 구조검토를 통하여 검증할 수 있으나, 라이닝 콘크리트 양생의 특성상 필요이상의 존치기간은 거푸집 제거시 강재거푸집과의 마찰로 인한 콘크리트 품질저하를 가져올 수 있으며, 소요강도 이전에 제거할 경우 안정성에 문제가 될 수 있다.

또한, 경제성 측면에서도 터널 강재거푸집 제거시기에 따른 공사비의 영향을 예상할 수 있을 것이다.

이러한 측면에서 최근의 장대터널의 경우 라이닝 타설은 공기단축의 결정적 공정으로 인식되고 있으며, 최근 제시된 거푸집 제거시기에 따른 공사비 영향을 검토한 사례를 소개하면 다음과 같다.

3-1. 거푸집 제거시기 기준

(1) 콘크리트 표준시방서(건설교통부)

〈표 1〉 콘크리트의 압축강도를 시험할 경우

부 재	콘크리트의 압축강도(fcu)
확대 기초, 보연, 기둥, 벽 등의 축벽	50kg/cm ² 이상
슬래브 및 보의 밀면, 아치 내면	설계기준 강도 × 2/3 (fcu ≥ 2/3fck) 다만, 140kg/cm ² 이상

〈표 2〉 콘크리트의 압축강도를 시험하지 않을 경우
- 기초, 보연, 기둥, 벽 등의 축벽

시멘트의 종류 평균기온	조강 포틀랜드 시멘트	보통 포틀랜드 시멘트 고로 슬래그 시멘트(특급) 포틀랜드 포졸란 시멘트(A종) 플라이애시 시멘트(A중)	고로 슬래그 시멘트 포틀랜드 포졸란 시멘트(B중) 플라이애시 시멘트(B중)
20°C 이상	2일	4일	5일
20°C 미만 10°C 이상	3일	6일	8일

(2) 고속도로공사 전문시방서(한국도로공사)

; 가시설공(7-4절)

〈표 3〉 거푸집 제거시기 콘크리트 압축강도의 참고값

부재면의 종류	예	콘크리트의 압축강도(kg/cm ²)
두꺼운 부재의 연직 또는 연직에 가까운 면, 경사진 상면, 작은 아치의 외면	확대기초의 축면	35
얇은 부재의 연직 또는 연직에 가까운 면, 45°보다 급한 경사의 하면, 작은 아치의 내면	기둥, 벽, 보의 축면	50
교량, 건물 등의 슬래브 및 보, 45°보다 느린 경사면의 하면	슬래브, 보의 저면, 아치의 내면	설계 압축강도의 90% 이상 달할 때 또는 마지막 콘크리트 타설 후 21일 이후

; 콘크리트 라이닝(8-6절)

거푸집은 천단부의 콘크리트 강도가 자중을 견딜 수 있는 강도를 발휘하기 전까지는 제거하지 않아야 하며, 콘크리트의 압축강도가 30kg/cm² 이상 발현된 이후에 제거하여야 한다.

3-2. 라이닝 콘크리트 타설 설계 적용현황

구 분	설계기준	실적용시간	비 고
거푸집 이동·거치	1일	6시간	숙련공, 단가산출기준
콘크리트 타설	1일	3시간	펌프카 작업능력 고려
양 생	3일		
소 계	5일		

(1) 펌프카 작업 능력에 따른 타설시간 검토

- 콘크리트 라이닝 1회 타설량 (고속도로 2차로 TYPE-3 기준)
: 8.087m³ / m × 9m = 72.8m³

- 펌프카(80m³/hr) 시간당 타설능력

일일 작업량	철근콘크리트	무근 콘크리트
50~100m ³	22.6m ³ /hr	25.6m ³ /hr
100m ³ 이상	27.1m ³ /hr	30.1m ³ /hr

- 1회 타설시간 : 72.8m³ ÷ 22.6m³ = 3.2시간

(2) 콘크리트 양생 시간별 강도

(fck = 240kg/cm², ACI Committee 209)

$$f_c(t) = t / (a + bt) \times f_c(28)$$

보통 콘크리트 습윤 양생시 : a = 4.0 b = 0.85

- 1일 강도 : 49.48kg/cm²

- 2일 강도 : 84.21kg/cm²

- 3일 강도 : 109.92kg/cm²

(3) 콘크리트 강도 따른 안정성 검토

- 콘크리트 강도에 따른 거푸집 제거시의 라이닝 안정성을 검토하였다.

- 검토조건) 1. 지반조건 : 연암으로 고려(E = 100,000tf/m²)
- 2. 하중조건 : 자중만 고려

- 검토결과) 콘크리트 강도 30kg/cm² 이상의 강도에서 안정성 확인

3-4. 거푸집 제거 시기에 따른 공사비 영향

(1) 라이닝 콘크리트 공사비

- 공종별 공사비 산출현황

구 분	단가구성	기준단위	수량기준	비 고
강재 거푸집	제작 및 설치비	1조당	100회	손율 적용시 변동
	이동 및 거치	1회당	6시간	
	청소 및 박리제 버림	1회당	25회에 1회 시공, 2시간	
라이닝 콘크리트	Reil 부설 및 철거	m당	SET당 타설거리	
	콘크리트 타설	m ³ 당	무근, 철근 펌프카 타설	
	신축이음	m당		



- 터널 연장별 라이닝 타설에 따른 강제 거푸집 적용 손율
(100회 사용 기준)

구 분	타설 횟수	강거푸집 수 량	3일			5일		
			①타설기간 손율(%)	②거푸집 손율(%)	③동바리	①타설기간 손율(%)	②거푸집 손율(%)	③동바리 손율(%)
500m	56회	1조	202일	50.4	11.1	336일	50.4	17.8
1,000m	112회	2조	202일	50.4	11.1	336일	50.4	17.8
2,000m	222회	3조	267일	66.6	14.4	444일	66.6	23.2

주1) ①은 25일/1개월 기준, 2조이상은 동시 투입으로 고려

주2) ②는 강제 거푸집 잔존율 10%를 감안한 평균 손율임
(손율=조당 타설횟수/100회×0.9)

주3) ③은 시스템 동바리로 고려하였으며 강제 동바리 내구년한 5.5년 기준임 (표준품셈 2-8-2 기준, 2-5-1참조)
강제동바리 설치 횟수 400회 기준시 변경될 수 있음.
표준품셈 2-2 강제 손율 기준 적용시 변경됨

- 강제 거푸집 손율적용에 따른 공사비

구 분	타 설 횟 수	강거푸집 수 량	3일		5일	
			①평균손율	②강거푸집 비용	③평균손율	④강거푸집 비용
500m	56회	1조	18.17	18.17백만원	23.67	23.67백만원
1,000m	112회	2조	18.17	36.34백만원	23.67	47.34백만원
2,000m	222회	3조	23.80일	71.4백만원	31.01	93.03백만원

주1) ①은 강거푸집 중량구성에 따른 평균손율(거푸집 18%, 동바리 82%)

주2) ②는 강제 거푸집 제작 및 설치 비용 1억기준시임

(2) 부대 공사비

- 라이닝 타설중 조명설비 : 15m 마다 150W 백열등 양측 설치

- 공사중 조명공사비

; 연장/15 × 2 × 150W/1000 × 8hr × 25일 × 라이닝 타설
공기 × 전력비/KWH

- 라이닝 거푸집 제거시간에 따른 공기 및 전력비 비용
(전력비 62원/KWH 기준)

구 분	3일		5일		비 고	
	타설기간	전력비	타설기간	전력비	타설기간	전력비
500m	202일	25.0백만원	336일	41.7백만원	+134일	- 16.7백만원
1000m	202일	50.1백만원	336일	83.3백만원	+134일	- 33.2백만원
2000m	267일	132.4백만원	444일	220.2백만원	+177일	-87.8백만원

4.결론

상기 검토 내용과 같이 라이닝 타설시 거푸집 제거시기 단축에 의한 공사비용(일반관리비 제외)은 일정부분 절감할 수 있을 것으로 사료되나, 단순한 공사비 측면에서 거푸집의 제거시기를 결정하는 것이 아니라 가장 우수한 품질을 확보할 수 있는 최적의 재령일수를 검토함으로써 시공성 및 경제성을 만족할 수 있도록 하여야 할 것이다.