

수화열을 고려한 터널 라이닝 콘크리트 거푸집 탈형 사례

The Application of Hydration Heat to Form Removal of Lining Concrete in Tunnel



이종길*
Jong-Gil Lee



정형목**
Hyung-Mok Jung



김국한***
Kook-Han Kim



남궁영환****
Yeong-Hwan Nangooong



박찬규*****
Chan-Kyu Park

1. 머리말

일반적으로 건설현장에서 이루어지고 있는 거푸집 제거 시기 결정, 설계기준강도 확보 등의 강도관리는 각 전문 시방서 등의 규준에 준하여 공사현장에 반입되는 콘크리트의 샘플을 채취하여 표준양생을 실시한 시험체의 압축강도 시험을 통하여 이루어지고 있다. 그러나 실제 구조물의 양생 온도 이력과 표준양생의 온도 이력은 많은 차이를 나타내며, 특히 콘크리트 부재의 두께가 두꺼우면 수화열에 의하여 콘크리트 부재의 온도가 상당히 증가를 하게 된다. 이와 같이 부재의 온도가 증가를 하면, 압축강도 발현이 빠르게 되어 표준양생을 실시한 경우보다 강도가 높게 되는데 특히 초기에 큰 차이를 나타낸다.

그 결과 콘크리트 구조물의 양생 온도와 시간 및 압축강도 특성에 대하여 적산 온도 개념을 바탕으로 많은 연구가 이루어져 왔다. 국내에서도 양생 온도별 콘크리트의 특성을 파악하여 실제 구조물에서 거푸집 제거시기를 합리적으로 결정하여 공정의 단축을 도모하는 연구 결과도 발표되었다.¹⁾

한편, 2000년에 개정된 고속도로공사 전문시방서²⁾ 콘크리트 라이닝 부분에 따르면, 거푸집 제거는 콘크리트의 압축강도가 3 MPa 이상 발현된 이후에 실시하도록 되어 있다. 그런데, 2004년에 개정된 시방서³⁾에는 “거푸집을 떼어내는 시기는 터널 단면의 크기, 형상, 시공성 등을 고려하여 결정해야 하는데, 천정부 콘크리트가 자중을 견딜 수 있는 강도를 발휘하기 전까지 거푸집을 제거해서는 안되며, 콘크리트의 압축강도가 5 MPa 이상 발현된 이후에 거푸집을 제거해야 한다.”로 규정되어 있다.

따라서 터널 라이닝 콘크리트의 거푸집 해체를 위해서 필요한 압축강도 시방 기준이 상향 조정됨에 따라 거푸집 존치시간의 연장 즉 양생 시간이 증가하게 된다. 이는 라이닝 콘크리트 사이클 타임의 지연으로 인한 공기 지연을 발생시키게 된다.

이에 본고에서는 이러한 공기 지연을 예방하기 위해서 첫째 사이클 타임을 점점 조정하고, 둘째 라이닝 콘크리트의 수화열에 의한 온도 측정결과를 바탕으로 콘크리트 공시체를 양생한 후 압축강도를 측정하고 거푸집 탈형을 실시 중인 시공사례를 보고하고자 한다.

2. 현장 개요

부산-울산 고속도로 9공구 현장 내의 무거 터널의 길이는 1,599 m이고 6차로로서 굴착 공법은 NATM 공법이며, 환기를 위하여 JET-FAN 8대가 설치가 된다. 또한 피난 시설로서 연락갱 2개소와 비주대 4개소가 설치된다. <그림 1>과 <그림 2>는 현장 전경과 무거 터널의 표준단면투시도를 각각 나타낸 것이다. 무거 터널의 라이닝 콘크리트는 철근 콘크리트 구간의 경우 설계 400 mm, 시공 시에는 120% 할증으로 480 mm, 무근 콘크리트 구간의 경우 설계 350 mm, 시공 시에는 420 mm 정도로 시공되고 있다. 따라서 라이닝 콘크리트가 매스 콘크리트에는 해당되는 않지만 수화열에 의하여 어느 정도의 온도 상승은 기대되어 콘크리트 초기 재령 압축강도 발현에 매우 유리한 것으로 판단되었다.

3. 기본 검토

3.1 작업 계획

무거 터널 라이닝 콘크리트 타설 사이클 타임과 시간대별 작업 계획 검토 내용은 <표 1, 2>에 나타낸 바와 같다. 콘크리트

* 정회원, 한국도로공사 부산-울산 건설사업소 9공구 주감독
lee5904@freeway.co.kr

** 정회원, 삼성물산(주) 건설부문 부산-울산 고속도로 9공구 현장소장

*** 정회원, 한국도로공사 부산-울산 건설사업소 품질관리 과장

**** 정회원, 삼성물산(주) 건설부문 부산-울산 고속도로 9공구 품질관리부장

***** 정회원, 삼성물산(주) 건설부문 기술본부 기술연구소 선임연구원

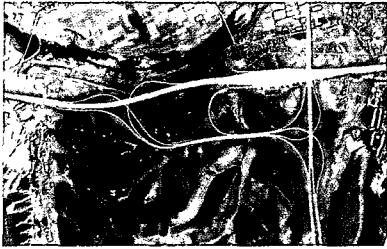


그림 1. 부산-울산 고속도로 9공구 현장 전경

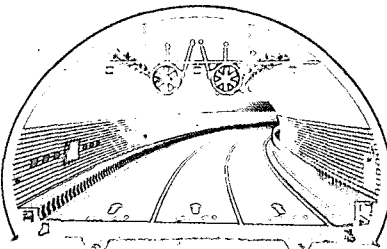


그림 2. 무거 터널 표준 단면투시도

표 1. 라이닝 콘크리트 사이클 타임 검토

구분	기존(인근 현장, 2차로)	개선(현장적용 계획)
거푸집 해체	2.0 시간	1.5 시간
거푸집 청소 및 이동	1.5 시간	1.0 시간
거푸집 세팅	1.5 시간	1.5 시간
거푸집 측량 및 준비	1.5 시간	1.0 시간
콘크리트 타설	5.0 시간	5.0 시간
콘크리트 양생	17.0 시간	20.0 시간
계	28.5 시간	30.0 시간
거푸집 탈형 압축강도	3 MPa	5 MPa

표 2. 시간대별 작업 계획 검토

구분	1일차			2일차			3일차		
	오전 (06~11)	오후 (11~18)	야간 (18~07)	오전 (07~12)	오후 (12~17)	야간 (17~06)	오전 (06~13)	오후 (13~18)	야간 (18~06)
1조	콘크리트 타설	1차 양생	거푸집 준비작업	콘크리트 타설	1차 양생	거푸집 준비작업	작업대기		
2조	사이클 1			사이클 2					
	거푸집 준비작업	콘크리트 타설	1차 양생	거푸집 준비작업	작업대기	콘크리트 타설	1차 양생		
	사이클 1			사이클 2					

표 3. 라이닝 콘크리트(25-24-15) 배합

배합 구분	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m³)					일반 AE 감수제	고성능 AE 감수제
			W	C	S1	S2	G		
A	53	43	180	340	224	512	1,025	1.02	-
B	53	44	171	323	234	536	1,029	-	2.26
C	53	44	161	304	239	548	1,053	-	2.43

의 거푸집 탈형 압축강도가 기존 3MPa에서 5MPa로 증가함에 따라 콘크리트 양생 시간을 3시간 정도 증가시켰다. 통상적으로 라이닝 콘크리트의 양생 시간은 18시간 정도가 전체적인 공기 측면에서 안정적인 것으로 알려져 있다.

그리고 거푸집 준비 시간을 각각의 작업별로 약간씩 줄여 최종적으로 기존 공법보다 1.5시간 연장된 계획안을 수립하였다.

3.2 콘크리트 배합 검토

당 현장을 포함하여 일반적으로 터널 라이닝 콘크리트는 25-24-15로 설계가 되며, 기존의 3개 현장 터널 라이닝 콘크리트 배합비를 검토해 보면 물-시멘트비는 45.4~51.4%, 단위수량은 168~182kg/m³, 단위시멘트량은 346~370kg/m³ 인 것으로 나타났다. 지역적인 재료 특성을 반영한 콘크리트 배합비가 적용되었다고 판단되지만, 설계강도 대비 물-시멘트비가 너무 낮은 배합비 또는 상대적으로 높은 단위시멘트량이 적용되는 곳도 있는 바 이는 거푸집 탈형 시기를 단축시키기 위한 것과 관련이 있는 것으로 판단된다.

당 현장의 무거 터널 라이닝 콘크리트에 적용하기 위하여 도출된 기본 배합비는 <표 3>에 나타난 A 배합이다. 그리고 콘크리트의 단위수량을 줄여 건조수축에 의한 균열 발생을 저감시키기 위하여 고성능 감수제(폴리카르본산계)를 사용한 배합 B, C를 도출하였다. 도출된 배합 A, B, C에 대하여 <표 1> 및 <표 2>에 나타난 바와 같은 작업 계획이 가능한지에 대하여 실내에서 제작된 공시체를 사용하여 초기 압축강도를 측

표 4. 라이닝 콘크리트 압축강도

배합 구분	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	압축강도(MPa)			
			25°C 기준양생		표준양생	
			20시간	24시간	7일	28일
A	14.5	4.6	5.83	7.81	18.7	25.8
B	17	3.7	6.63	8.97	23.6	31.3
C	14	4.0	5.50	8.63	23.4	28.0

정하였다. <표 4>에 나타난 바와 같이 콘크리트의 양생 온도를 25°C로 설정하여 콘크리트 초기 압축강도를 측정된 결과, 모든 배합에서 콘크리트 타설 후 20시간 만에 거푸집 탈형강도 5MPa를 넘어서는 것으로 나타났다. 따라서, 콘크리트의 양생 온도를 25°C 이상으로 유지하면, 당초 계획한 시공 사이클을 준수할 수 있는 것으로 나타났다. 그리고 표준양생을 실시한 공시체의 압축강도는 재령 28일에서 설계강도 이상 확보되는 것으로 나타났으며, 압축강도를 측정된 공시체의 크기는 φ150×300mm 원주형이다.

콘크리트 배합 A, B, C에 대한 경제성 분석 결과, 기본 배합 A 대비 B는 단위시멘트량이 5% 절감되었지만 고성능 감

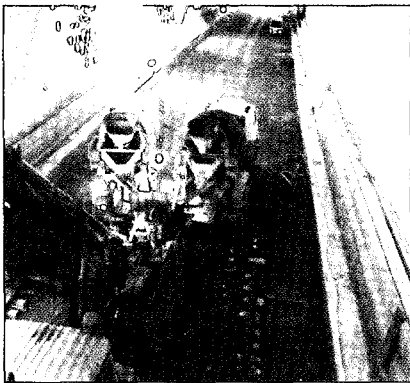


그림 3. 라이닝 콘크리트 시공

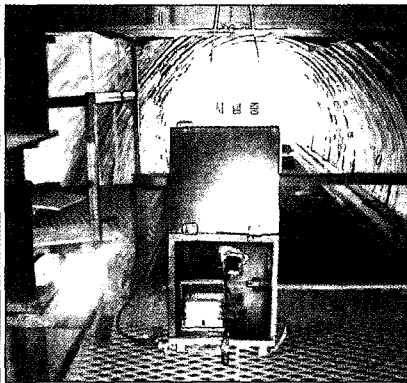


그림 4. 라이닝 콘크리트 수화열 측정

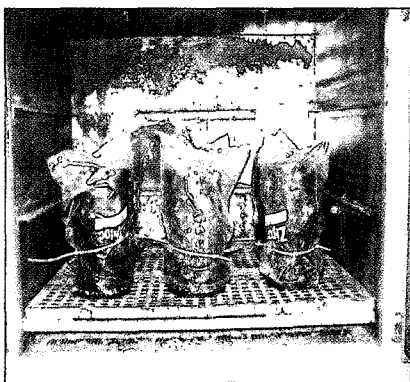


그림 5. 가열기에서의 공시체 양생



그림 6. 터널 내에서의 공시체 양생

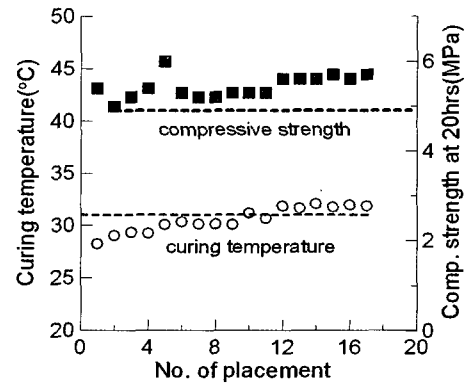


그림 7. 양생온도와 압축강도(20시간)

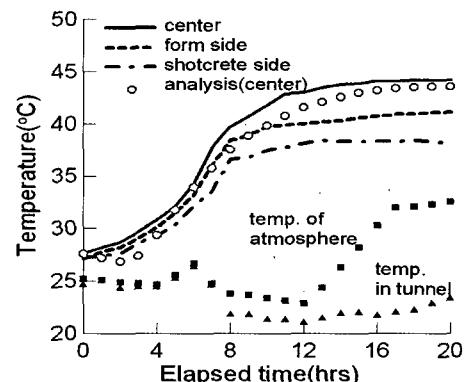


그림 8. 수화열에 의한 온도 이력(배합 C)

수제의 사용으로 1,251원, C는 164원이 증가되는 것으로 나타났다. 그 결과, 배합 B는 비경제적인 배합으로 판정되어 실제 시공 시에는 A, C를 적용하는 것으로 최종 결정하였다.

4. 현장 시공

4.1 가열 양생 온도 설정 및 적용

무거 터널 라이닝 콘크리트의 수화열에 의한 양생온도를 설정하기 위하여 라이닝 콘크리트 시공 후에 수화열에 의한 온도를 첫 번째 타설 시 측정하였다. 첫 번째 타설은 배합 A에 대하여 2005년 5월 23일 이루어졌다. 라이닝 콘크리트 중심부와 표면부에서 측정된 온도를 바탕으로 평균 온도를 계산하였으며, 수화열에 의한 평균온도는 20시간까지 31°C인 것으로 나타났다. 이 평균을 이후의 시공에 기본적인 양생 온도로 설정하고 콘크리트 시공 시 제조된 공시체를 가열기에서 가열 양생을 할 때 양생온도로 가열기를 설정하였다. <그림 3>은 라이닝 콘크리트 시공 장면, <그림 4>는 수화열 측정 장면 및 <그림 5>는 가열기에서 공시체를 양생하는 모습을 나타낸 것이다. 가열기에서 공시체를 양생할 경우에는 공시체서의 수분 증발을 방지하기 위하여 비닐로 공시체를 감싸주었다.

<그림 7>은 라이닝 콘크리트 시공 시 가열기의 양생 온도와 약 20시간 경과 시의 압축강도를 나타낸 것이다. <그림 7>에서 알 수 있는 바와 같이 양생 온도 31°C에서 모든 경우에 20시간 경과 시 목표로 하는 탈형강도 5MPa를 상회하는 것으로 나타났다.

4.2 양생 방법에 따른 압축강도

<그림 8>는 배합 C를 적용한 라이닝 콘크리트의 수화열에 의한 온도를 측정된 결과를 나타낸 것이며, 수화열 해석 결과는 중심부의 온도를 비교적 정확히 예측하는 것으로 나타났다. 양생 방법에 따른 콘크리트의 압축강도 특성을 파악하기 위하여, 수화열에 의한 양생 온도를 그대로 적용했을 때의 강도와 터널 내에서 양생시켰을 때의 강도를 비교하였다. 수화열에 의한 양생 온도를 적용시킨 방법은 <그림 8>에서 측정된 3지점의 온도를 각 시간대 별로 평균한 값을 가열로에 계속적으로 입력하였다.

압축강도 측정 결과, 수화열에 의한 온도 이력을 반영한 양생을 실시한 경우 20시간 및 24시간에 압축강도가 5.6MPa 및 7.2MPa가 각각 발현되었다. 그러나 <그림 6>에 나타낸 바와 같이 터널 내(평균 온도 23°C)에서 양생한 공시체의 압축강도는 각각 3.6MPa 및 4.5MPa가 발현된 것으로 나타

표 5. 시험 시공 결과 분석 요약

구분	검토 내용	시험시공 결과 비교	
		A 배합	C 배합
탈형강도	수화열에 의한 온도에 준하여 양생한 탈형강도 5MPa를 만족하는 양생시간	평균 20~21시간	평균 19~20 시간
압축강도	28일 압축강도(설계기준강도 24MPa)	25.8MPa	28.0MPa
경제성	자재 투입 비용 비교(시멘트 및 혼화제 비용)	약 23,426 원/m ³	약 23,590 원/m ³
배합설계	단위시멘트량	표준(340kgm ³)	10%감축(304kg/m ³)
	단위수량	180kg/m ³	161kg/m ³
시공성	혼화제	일반 AE 감수제(0.30%)	고성능 AE 감수제(폴리카르본산계 0.8%)
	공기량 및 슬럼프	양호	양호
	재료 분리 및 작업성	재료분리 없고 작업성 양호	작업성 양호하나 재료분리 약간 발생
표면상태	펌프카 압송 상태	양호	보통
	재료 분리 및 곰보	보통	양호
	얼룩상태	보통	A보다 양호
	표면 매끄러움 상태	양호	보통
	균열상태	발생 정도 관찰 중	

났다. 또한 비슷한 시기에 배합 A를 적용한 콘크리트를 터널 내(평균 온도 19.5°C)에서 양생한 결과 20시간 경과 시 3.2MPa, 24시간 경과 시 3.9MPa의 압축강도가 발현되는 것으로 나타났다. 그 결과 터널 내에서 양생된 콘크리트의 압축강도를 기준으로 하면, 거푸집 해체 시기는 24시간 이상이 되어 전체적인 시공 사이클에 상당한 부담을 줄 수 있는 것으로 나타났다. 또한 20°C 표준양생을 실시하여도 20시간에 5MPa를 확보하기 어렵다는 것을 간접적으로 알 수가 있다.

따라서 수화열에 의한 양생 온도를 적용하여 콘크리트 압축강도를 평가하면, 라이닝 콘크리트의 거푸집 해체시기를 앞당길 수 있어 원활한 시공이 가능한 것으로 나타났다. 또한 해체시기를 앞당기기 위하여 필요 이상으로 시멘트 사용량을 증가시키거나 물-시멘트비를 낮추는 등의 비경제적인 배합설계를 제거할 수 있다.

4.3 시공 결과 요약 및 향후 계획

〈표 5〉는 2005년 5월 23일부터 7월 6일까지 총 17회의 시공 결과를 요약한 것이다. 콘크리트 배합 측면에서 현장 작업자들이 배합 A를 선호하는 것으로 나타났다. 그 이유로는 콘크리트의 점성이 배합 C보다 적기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 배합 C의 경우에는 배합 A보다 물결무늬 형태의 얼룩상태가 개선된 것으로 나타나고 있다.

지금까지는 외기 온도가 상승되는 시기에 콘크리트 시공이 이루어졌고, 콘크리트 타설 온도와 외기 온도 또는 터널 내의 온도가 비교적 높은 시기여서 계획한 시공 사이클을 만족한 것으로 판단된다.

그러나 10월, 11월에는 콘크리트의 타설 온도와 외기 온도가 낮기 때문에 목표로 하는 '20시간-5MPa'를 만족하기 위해서는 지속적인 수화열에 의한 온도 측정을 통한 콘크리트 배합설계 조정 및 보온 양생 방법의 도입 등을 통한 대책이 필요하다고 판단된다. 이에 대한 시공 결과는 향후에 보고하기로 한다.

5. 맺음말

본고에서는 수화열에 의해 발생되는 온도를 고려하여 콘크리트 양생을 실시하고, 이를 바탕으로 라이닝 콘크리트의 거푸집 해체시기를 결정하는 것을 기술하였다. 지금까지의 결과로서, 콘크리트의 배합설계에서 단위시멘트량의 증가 또는 낮은 물-시멘트비를 사용하지 않더라도 당초 계획한 시간(20시간)에 거푸집을 탈형할 수 있어, 원활한 시공을 이룰 수가 있었다.

당 현장에서는 기초적인 접근 방법으로 거푸집 제거시기를 결정하였지만, 이를 기반으로 하여 보다 체계적인 라이닝 콘크리트 제거시기 결정을 위한 전체적인 시스템 구축이 이루어지길 기대하며 본고를 마감하고자 한다. □

참고문헌

1. 김무한 외 4인, "적산온도 방법에 의한 강도에측모델 개발 및 건설현장에서의 강도관리에 관한 연구", 콘크리트학회 논문집 15권 1호, 2003, pp.87~94.
2. 한국도로공사, "고속도로공사 전문시방서(토목편)", 2000.
3. 한국도로공사, "고속도로공사 전문시방서(토목편)", 2004.