

과다 여굴에 따른 터널 라이닝콘크리트의 온도균열 제어 연구

A Study on the Thermal Crack Control of Tunnel Lining Concrete due to the Overbreak

장 동 일*, 채 원 규**, 조 광 현***, 김 광 일***, 손 영 현***
D.I. Chang, W.K. Chai, K.H. Cho, K.I. Kim, Y.H. Son

1. 서론

터널공사에서는 지산(地山)의 강도에 따라 선정된 굴착공법을 이용하여 굴착된 단면에는 굴삭된 터널의 안전과 시공상 능률을 증진시키고, 장기간에 걸친 터널의 사용에 대한 충분한 신뢰성을 갖추기 위하여 지지공·라이닝콘크리트 등이 설치된다.

이 중 라이닝콘크리트는 터널의 안전을 확보할 지지부재임과 동시에 터널 마무리로서의 내장역할이 있기 때문에 그 사용목적과 사용조건 등에 적합하도록 설치되어야 한다. 이것의 재료는 일반적으로 무근콘크리트가 사용되고, 장기적인 안정성 향상을 주된 목적으로 할 경우 복공의 최소두께를 20 ~ 40cm로 하여 타설하는 경우가 많다.

그러나, 이러한 무근의 라이닝콘크리트 최소두께는 설계상 설정된 것으로, 실 시공현장에서는 여러가지 요인에 의해 그 두께가 설계도면상의 두께보다 커지거나 작아지는 경우가 흔히 발생되고 있는데, 단면이 소요단면보다 훨씬 커질 경우, 즉 과다한 여굴이 발생할 경우, 라이닝콘크리트 타설 후 경화할 때 발생하는 수화열에 의한 균열발생, 라이닝콘크리트 배면에 설치된 방수시트의 결함에 따른 누수에 의한 라이닝콘크리트의 열화 및 그에 따른 터널내 제반 설치물의 기능저하가 유발되고, 한랭지에서의 터널에서는 노면동결과 고드름 등의 원인이 되는 등 유지관리상 큰 문제가 유발될 수 있다.

이에 본 연구에서는 이러한 과다여굴에 따른 라이닝콘크리트의 수화열에 의한 온도균열발생 가능성을 실 시공현장의 사례를 이용하여 배합비의 적합성 및 온도균열 발생가능성에 대한 한계여굴량 등을 온도이력해석을 통해 검토하였다.

* 한양대학교 토목공학과 교수

** 신구대학 토목과 조교수

*** 한양대학교 토목공학과 박사과정

2. 대상구조물의 개요 및 여굴발생 현황

본 연구의 대상구조물은 H사가 시공하여 약 2년여에 걸쳐 관통한 연장 약 3.9km인 2차선 도로터널로서 NATM공법으로 양질의 암질임을 고려하여 1회 발파당 약 3.0 - 3.5m의 굴진장으로 굴착되었다.

굴착 후 강섬유보강샷크리트, 록볼트 및 강제지보공으로 지지공을 형성시켰고, 라이닝콘크리트는 길이 10m의 슬라이딩폼(이동식틀)을 미리 제작하여 설계기준강도 240kg/cm^2 의 무근콘크리트를 타설하였다.

다음 그림 1은 대표적인 여굴발생현황을 나타낸 것이며, 그림 2는 지지공과 라이닝콘크리트의 설계두께를 나타낸 것이다.

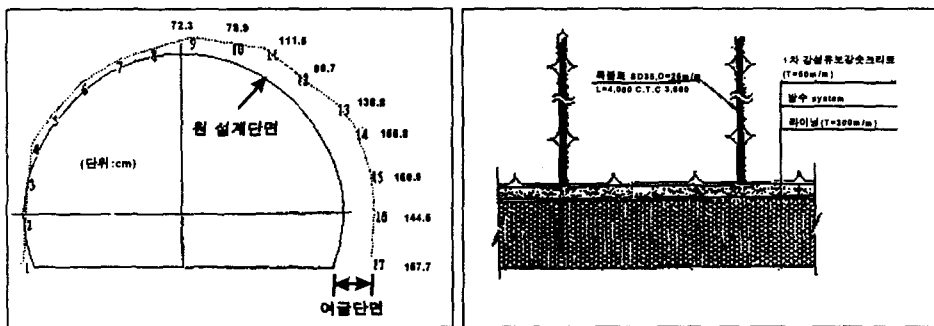


그림 1. 여굴발생현황

그림 2. 지지공 및 라이닝의 구성

3. 온도이력해석

온도이력해석은 시멘트의 수화열에 기인하는 콘크리트의 발열특성, 타설온도, 외기온도 및 양생조건 등을 고려하여 주로 2차원 평면변형요소를 이용한 비정상 열전도해석(Transient Thermal Analysis)를 수행하고, 구조물내부의 온도이력을 구하게 되는데, 이때, 구조물 내부(중앙부)와 외부(표면부)의 온도차, 온도강하속도등을 검토함으로써 균열발생여부를 판단할 수 있게 된다.

상기의 내외부온도차는 주로 20°C 를 기준으로 하는 경우가 많은데, European Standard ENV 206에서는 온도상승시와 온도하강시 내외부온도차에 따른 균열발생가능성을 판단할 때, 그 판단기준을 20°C 로 선정하고 있다.

상부와 측면의 열전달경계와 직접 관련되는 외기온도는 열발산 및 콘크리트 표면의 균열 등에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 외기온도는 시간에 따른 Sine 함수로 표현될 수 있다.

본 연구에서는 터널내부의 온도변화 현황을 조사하여 1998년 3월20일 - 1998년 3월 31일 현재까지의 온도변화 자료를 기초로 하여 최대온도 11°C 와 최소온도 9°C 일 때를 대상으로 하였는데, 거의 온도변화가 없는 것으로 판단하여 콘크

리트 타설시부터 양생완료시까지의 온도를 Sine함수로 모델링하지 않고, 평균 10℃로 일정하게 하였다.

한편, 콘크리트의 열특성값 및 강제 Sliding form의 열전달율은 콘크리트표준시방서를 참고로 정하였으며, 표 1과 표 2에 각각 나타내었다.

이때, 방수쉬트의 열전달율은 방수쉬트의 주성분이 ETHYLEN COPOLYMER BITUMEN임을 고려하여 DIN 4108의 열특성치를 참고로 하여 정하였다.

표 1. 콘크리트의 열특성값

라이닝콘크리트 및 숏크리트			방수쉬트
밀도 (kg/m^3)	열전도율 ($kcal/mh^{\circ}C$)	비열 ($kcal/kg^{\circ}C$)	열전달율 ($kcal/m^2 h^{\circ}C$)
2450	2.300	0.27	0.17

표 2. 강제거푸집의 열전달율

라이닝콘크리트 ($kcal/m^2 h^{\circ}C$)	
거푸집 탈형전	거푸집 탈형후
12.0	12.0

또한, 시멘트 수화작용에 의해 발생하는 수화열은 콘크리트의 온도분포에 가장 큰 영향을 미치는 요인이다. 이러한 수화작용으로 발생한 열은 단열온도상승곡선으로 표현된다. 본 연구에서는 다음 표 3과 같은 라이닝 콘크리트 배합표를 참고로 하여, 콘크리트표준시방서에서 제시하고 있는 값을 사용하였으며, 다음 식과 같이 표현된다. 이때 콘크리트 타설온도는 20℃로 하였다.

$$T(t) = 52.6(1 - e^{-1.332t})$$

또한, 단위시간당, 단위체적당 내부발열량(q_c)은 다음 식으로 구하여 입력치로 활용하였다.

$$q_c = C_c * \rho * 52.6 * \frac{1.332}{24} * e^{(-\frac{1.332}{24} t)}$$

상기 두 식에서 $T(t)$ 는 재령 t 일에서의 단열온도상승량(℃), t 는 재령(일)이다. C_c 는 콘크리트의 비열(=0.27 $kcal/kg^{\circ}C$), ρ 는 밀도(=2450 kg/m^3)이다.

표 3. 라이닝 콘크리트 배합표

규격	구분	W/C (%)	S/a (%)	단위재료량 (kg/m^3)					
				W	C	G	S	AE 감수제	플라이 애쉬
25-240-13	보통포틀랜드 시멘트	48.0	42.0	173	360	1032	725	540 g	-

다음 그림 3은 대상구조물인 터널에 대해 구성된 유한요소 모델을 나타낸 것

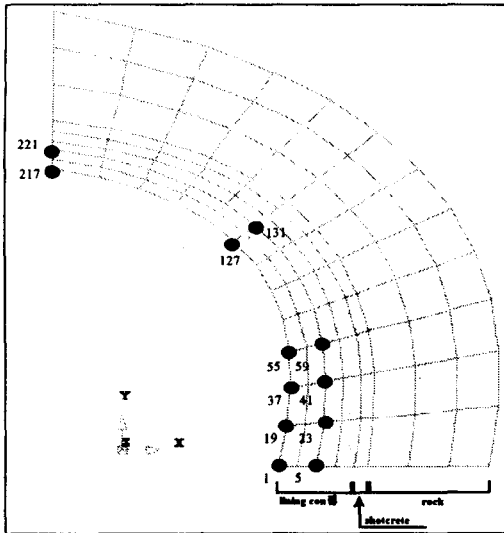


그림 3. 2차원 유한요소 모델

그림 4는 단위시멘트량이 360kg/m^3 인 경우의 결과를 보이고 있는 것으로 최대 온도 도달 이후 30°C 이상의 온도차를 약 100hr(약 4일)이상 지속되고 있어 표 3과 같은 배합비를 사용하여 여굴발생부위를 1회 전체타설시 온도균열의 발생확율이 높은 것으로 나타났다.

그림 5는 플라이애쉬를 20% 치환하여 타설온도 20°C 로 콘크리트를 타설한 경우로서, 최대온도 도달 이후 온도차가 최대 약 25°C 정도 보이면서 약 50 - 60hr(2일 - 2.5일)정도 지속되는 것으로 나타났다.

또한, 플라이애쉬를 30% 치환하여 타설온도 20°C 로 콘크리트를 타설한 경우, 내외부의 최대온도차가 최대온도에 도달시 약 20°C 정도 발생하여 그 이후 20°C 이내에서 완만하게 감소하게 되는 것으로 나타났다(그림 6). 그리고, 타설온도를 15°C 로 하였을 경우에는 내외부온도차는 더욱 감소하여 온도균열에 대해 보다 안전한 타설조건을 보이는 것으로 나타났다(그림 7).

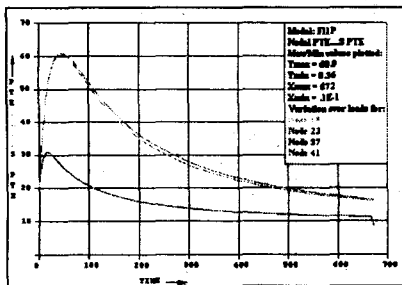


그림 4. 현행배합비를 사용한 경우의 온도이력 (타설온도 20°C)

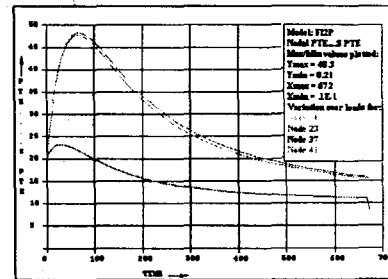


그림 5. 플라이애쉬 20%치환시의 온도이력 (타설온도 20°C)

으로 라이닝콘크리트, 숏크리트 및 암반을 동시에 고려하여 구성되어 있고, 암반에 대해서는 숏크리트 배면 약 3.0m까지 모델링에 사용하였다.

4. 온도이력해석 결과

4.1 배합비에 대한 검토

제 3장에서 기술한 바와 같은 여러가지 조건을 고려하여 온도이력해석을 수행하였으며, 다음과 같은 일련의 결과를 얻었다.

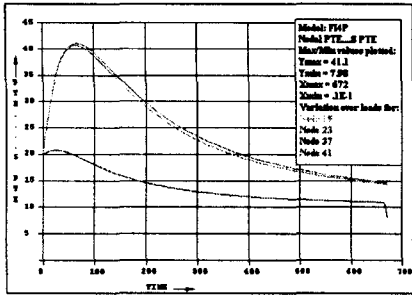


그림 6. 플라이애쉬 30%치환시 온도이력(타설온도 20°C)

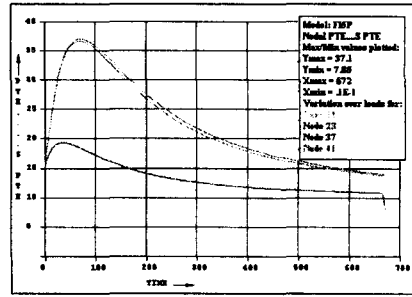


그림 7. 플라이애쉬 30%치환시의 온도이력 (타설온도 15°C)

4.2 한계여굴량에 대한 검토

본 절에서는 각 배합비와 타설온도를 고려하여 내외부온도차가 20°C 이내로 발생하는 한계단면에 대한 검토를 수행하였다.

그림 8 ~ 그림 11의 한계단면의 아래부분 즉 side wall방향으로는 모두 20°C 이상의 내외부온도차를 보이게 되는 것에 주목해야 한다.

이 결과에서 현행배합비를 사용하여 콘크리트를 타설할 경우 고려된 전 단면이 20°C를 초과하는 것으로 나타났으며, 플라이애쉬를 20% 치환한 경우는 그림 1에서 12 - 13번 중간정도, 플라이애쉬를 30%혼입하여 20°C의 타설온도로 콘크리트를 타설한 경우는 15 - 16번 중간정도, 그리고 플라이애쉬를 30% 혼입하여 15°C의 타설온도로 콘크리트를 타설한 경우는 고려된 전체 단면에서 온도균열에 안전한 것으로 나타났다.

이상을 종합하면, 여굴발생량이 복공콘크리트의 설계두께와 합하여 약 1.0m를 초과하여 라이닝콘크리트를 타설할 경우, 내외부온도차에 의한 온도균열의 발생 가능성이 높은 것으로 판단된다.

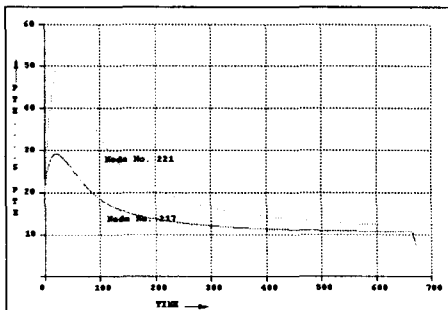


그림 8. 현행배합비에 따른 온도이력(타설온도 20°C)

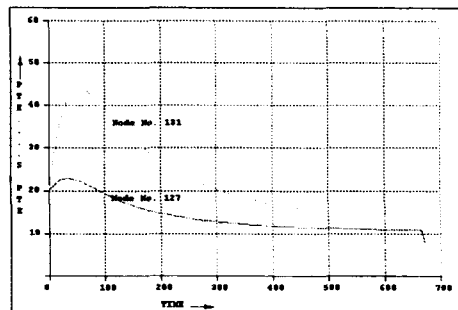


그림 9. 플라이애쉬 20% 치환시 온도이력(타설온도 20°C)

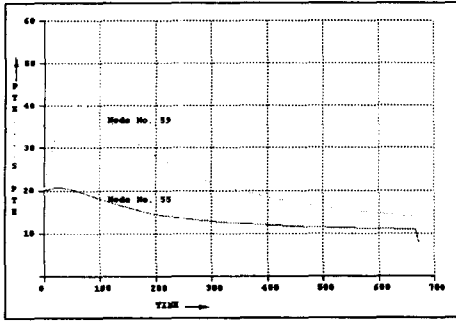


그림 10. 플라이애쉬 30% 치환시 온도이력(타설온도 20°C)

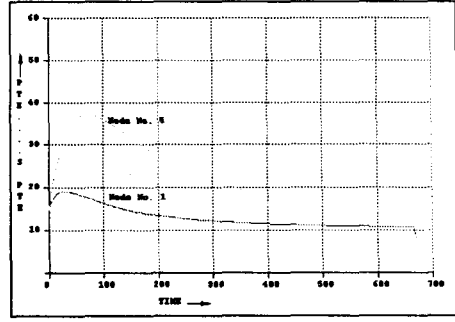


그림 11. 플라이애쉬 30% 치환시 온도이력(타설온도 15°C)

5. 결론

본 논문에서는 일련의 조건을 고려한 온도해석 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

현행 현장배합비를 사용하여 라이닝콘크리트를 1회에 타설한다는 것은 온도균열의 발생 가능성이 높은 것으로 나타났다.

따라서, 현행 배합비에서 단위시멘트량 중 일부를 플라이애쉬로 치환하는 방법을 사용하여 발생하는 수화열량을 줄여야 할 것으로 판단되며, 이때, 강도가 충분히 확보될 수 있는 조건에서 20%이상을 치환해야 할 것으로 사료되며, 콘크리트의 타설온도를 15°C 정도까지 낮추어야 할 것으로 판단된다.

또한, 각 배합비와 타설온도를 고려하여 내외부온도차가 20°C 이내로 발생하는 한계단면에 대한 검토를 수행한 결과에 따르면, 여굴발생량과 라이닝콘크리트의 설계두께가 약 1.0m를 초과하는 경우, 내외부온도차에 의한 온도균열의 발생 가능성이 높은 것으로 판단되므로, 여굴발생량과 정확한 측량에 따른 최종 라이닝콘크리트 타설두께를 1.0m이하로 감소시켜야 할 것으로 사료된다.

이상의 결론은 과다 여굴에 따른 라이닝콘크리트 단면을 1회에 전체 타설할 경우에 대한 것으로 현장에서 가능하다면, 국부적인 조립식 폼을 고안하여 상기 한계단면이하에 대해서는 수평이음처리를 하여 라이닝콘크리트 타설에 임하는 것도 효과적인 온도균열 제어방안인 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부, 콘크리트표준시방서, 1996.
2. 장 동일, 채 원규, 조 광현, 김 광일, 손 영현, "지하옹벽 매스콘크리트 구조물의 균열제어에 관한 연구," 산업안전학회 추계학술발표회, 1997.11., pp.289~294.
3. A.M. Neville, "Properties of Concrete," LONGMAN, 1996.
4. CEB-FIP, CEB-FIP MODEL CODE, 1990.