

시간가열온도곡선에 따른 터널라이닝 콘크리트의 내화성능 평가

Evaluation of Fire-Resistant Performance for Tunnel Lining Concrete with Heating Temperature-Time Curves

이 찬 영* 심 재 원** 안 태 송*** 임 채 혁****
Lee, Chan Young Shim, Jae Won Ahn, Tae Song Lim, Chaehyeok

ABSTRACT

In this study, evaluation of fire-resistant performance for polypropylene fiber-mixed mortar was performed to establish specification for stability of tunnel structure against fire afterward. In the fire-resistant performance test with mix proportion of polypropylene fiber, cracks were observed for mortar under 0.15% of fiber content, but micro-cracks were remarkably reduced for mortar more than 0.2% of fiber content. From the results, we are concluded that optimal mix proportion of polypropylene fiber is 0.20~0.25%.

1. 서론

최근 세계적으로 터널 및 지하구조물에서의 대형화재로 인해 경제·사회적으로 심각한 손실이 발생하고 있는 실정이다. 이처럼 폐쇄된 공간인 터널 및 지하구조물 내의 화재는 구조체의 강도저하로 인한 붕괴 및 인명피해 뿐만 아니라 사회기반시설인 교통망을 장시간 끊어놓게 되는 등 큰 문제를 야기한다. 콘크리트는 내화성이 우수한 재료로 널리 사용되어 왔으며 일반강도의 보통 콘크리트는 화재시 폭열에 대한 심각한 우려가 발생하지 않아 이에 대한 검토가 거의 이루어지지 않았으나 콘크리트의 고강도화가 진행되어져 가면서 일반강도의 보통 콘크리트와는 달리 내외부 조직이 치밀해져 화재시 갑작스러운 고열을 받게 되면 부재표면이 심한 폭음과 함께 박리 및 탈락하는 폭열현상이 발생하여 균열 및 피복두께의 결손과 함께 철근의 온도상승으로 철근콘크리트 구조체의 내력저하를 초래하게 된다. 따라서 이러한 콘크리트의 취성 거동을 연성거동으로 유도하고 인장저항능력의 증대, 국부적인 균열의 생성 및 성장을 억제하며 콘크리트의 폭열 현상을 효과적으로 방지할 수 있는 콘크리트에 대한 연구와 적용이 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 터널내 화재 발생시 구조물 안정성에 대한 관련 시방 규정을 도출하기 위하여 폴리프로필렌 섬유 혼입 콘크리트에 대해 서로 다른 4가지 종류의 시간가열온도곡선에 따른 내화 특성을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 실험변수 및 배합

표 1은 고속도로 터널 콘크리트 라이닝에 사용되는 배합을 선정된 후 실제 실험배합을 통해 목표 슬럼프 값과 공기량 값을 만족하도록 도출한 배합이다. 도출한 배합에 화재로 인한 폭열을 방지하기 위하여 폴리프로필렌 섬유를 표 2와 같이 혼입하였다.

2.2 압축강도시험

* 정희원, 한국도로공사 도로교통기술원 전임연구원
** 정희원, 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원
*** 정희원, 한국도로공사 도로교통기술원 수석연구원
**** 정희원, 한국도로공사 도로교통기술원 연구원

폴리프로필렌 섬유 혼입률에 따른 터널 콘크리트 라이닝의 재령에 따른 압축강도 특성을 알아보기 위하여 KS F 2405에 준하여 시험을 실시하였다. Ø100×200mm의 실리더 공시체를 9개를 제작하여 재령 7일, 14일, 28일에 각각 3개씩 압축강도를 측정하였다. 공시체는 22±3℃, 상대습도 50%의 양생실에서 1일 초기양생 후 22±3℃의 항온조건으로 수중양생을 실시하였다.

표 1. 터널라이닝 콘크리트 배합설계

G _{max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)					
					5	C	S	G	SP (%)	AE (%)
25	15±1.5	5±1	50	41.54	167	334	728.33	1025.1 ₃	0.2	0.03

표 2. 폴리프로필렌 섬유 혼입률

사용 섬유	배합명	섬유 혼입률(%)
폴리프로필렌	P20	0.2
	P25	0.25

2.3 휨강도시험

폴리프로필렌 섬유 혼입률 터널 콘크리트 라이닝을 평가하기 위해 JCI-SF4 (Method of tests for flexural strength and flexural toughness of fiber reinforced concrete)에 의하여 실시하였다. 실험은 150×150×550mm의 공시체를 재령별로 2개씩 2회 반복하여 제작하였으며 24시간 후의 초기 양생 후 온도 23±2℃의 항온 조건으로 수중 양생하여 시험을 실시하였다.

2.4 내화시험

압축모드 공시체(Ø100×200mm)를 내화조에 투입하여 시험을 실시하였다. 본 시험은 그림 1과 같이 국외에서 규정하고 있는 4가지(Cellulosic, Hydrocarbon, RABT, RWS)종류의 시간가열온도곡선에 따른 내화 특성을 각 배합마다 3개의 시편을 제작하여 시험을 실시하였다.

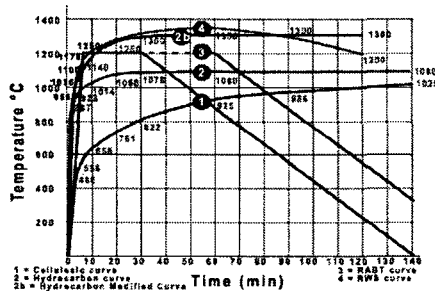


그림 1. 종류별 시간가열온도곡선

3. 결과 및 고찰

3.1 압축강도 및 휨강도

재령 28일 후 P20배합과 P25배합의 압축강도 측정결과 목표 강도 값인 24MPa를 모두 상회하는 것으로 나타났으며 이는 표 3과 같다. 두 배합의 압축강도 값은 큰 차이는 보이지 않았지만 P25배합의 경우가 조금 더 큰 압축강도 값을 나타내었다. 압축강도와 휨강도를 비교하여 보았을 때 재령 28일의 라이닝 콘크리트 휨강도는 비교적 작은 값을 나타내 폴리프로필렌 섬유가 휨강도의 증진에는 별다른 효과를 주지 못하는 것으로 판단된다.

표 3. 섬유 혼입률에 따른 재령 28일 강도

배합명	28일 압축강도(MPa)				28일 휨강도(MPa)		
	1	2	3	Mean	1	2	Mean
P20	3.66	3.67	3.67	3.67	3.66	3.67	3.67
P25	3.53	3.50	3.61	3.61	3.53	3.50	3.61

3.2 중량변화 및 잔존 압축·휨강도

4가지 종류의 시간가열온도곡선에 따른 내화시험 전·후의 중량변화는 그림 2와 같다. 시험결과 중량변화 감소율은 6.93~9.19%의 범위를 나타내었다. 모든 결과 값에서 P25의 배합의 경우가 P20의 배합보다 중량손실률이 높았다. 이는 화재실험시 콘크리트 내부에 있던 폴리프로필렌 섬유가 모두 용해되어 나타나는 결과로 판단된다. 화재실험 후 콘크리트의 중량감소는 폴리프로필렌 섬유의 용해와 시멘트 페이스트 내의 Ca(OH)_2 의 분해에 의해서 발생하는데 섬유의 혼입률이 0.2% 정도가 되면 콘크리트 내의 열기와 습기를 방출할 수 있는 충분한 네트워크를 형성하여 Ca(OH)_2 의 분해에 의한 중량감소는 거의 발생하지 않기 때문에 0.25%의 섬유를 혼입한 배합이 0.2%를 혼입한 배합보다 중량 감소가 크게 나타났다. 또한 4가지의 시간가열온도곡선 중 RABT 온도곡선^{1, 2)}을 이용한 경우 중량 감소율이 가장 작게 나타났는데 이는 RABT 곡선이 빠른 시간 내에 1200℃에 도달하여 콘크리트 내에서 수산화칼슘의 탈수되는 온도인 450~550℃에 노출되는 시간이 다른 시간가열온도곡선에 비해 작았기 때문인 것으로 판단된다.

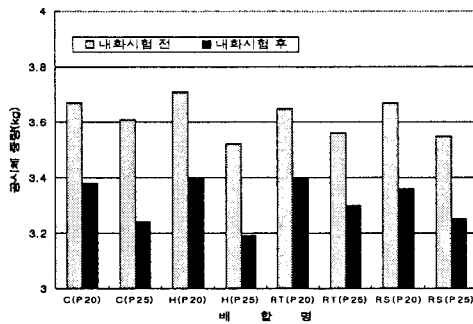


그림 2. 내화시험 전·후 중량변화

또한 내화시험 후 콘크리트의 폭열 현상을 일어나지 않았으나 그림 5와 같이 박리현상과 많은 균열들이 표면상으로 관찰되었다. 특히, RWS 곡선을 적용하였을 경우 4가지 곡선 중 가장 극심한 박리 현상이 발생하였다. 반면 450~550℃ 이상의 고온에 노출된 시간이 비교적 적은 RABT 곡선이 가장 표면상의 균열과 박리현상이 가장 적게 관찰되었다. 내화시험 후 압축강도 및 휨강도 손실률은 각각 그림 3, 4와 같다. 강도의 손실률은 압축강도와 휨강도 모두 RWS 곡선내화실험 시 가장 크게 나타났으며 Hydrocarbon 곡선, Cellulosic 곡선, RABT 곡선 순으로 나타났다.

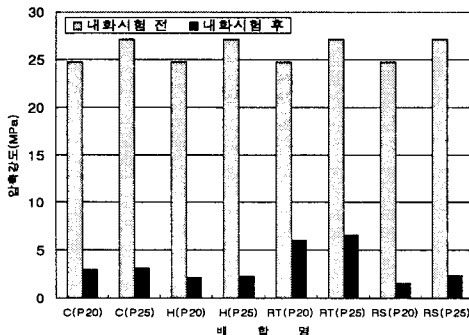


그림 3. 내화시험 전·후 압축강도 변화

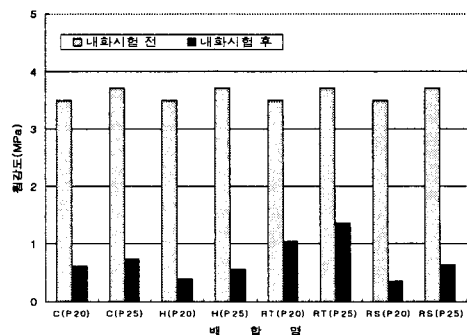


그림 4. 내화시험 전·후 휨강도 변화

도로터널의 경우 화재 발생시 밀폐된 상태와 비슷한 환경이 되므로 온도의 상승효과는 매우 크다. 즉 단시간 내에 최고의 온도에 도달하기 때문에 이와 같은 상황을 모사한 온도가열곡선의 적용이 필요한데 4가지 종류의 시간가열곡선을 가지고 실험을 수행한 결과 도로터널의 환경조건을 만족하는 온도가열곡선은 RABT 곡선이라 판단된다. 즉 급속한 온도의 증가를 발생시키는 도로 터널을 가장 잘 모사할 수 있는 시간가열곡선은 RABT 곡선이며, 시험결과에서 볼 수 있듯이 다른 곡선을 적용하였을 때 보다 수산화칼슘의 분해가 일어나는 450~550℃에 노출되는 시간이 적어 중량감소 및 강도의 감소가 크게 나타나지 않는 결과를 보여주었다.

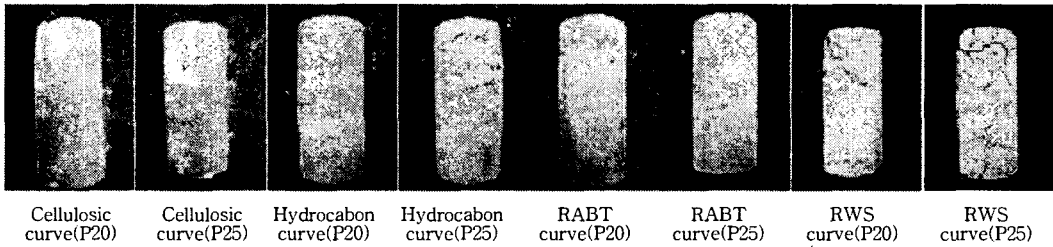


그림 5. 시간가열온도곡선에 따른 내화시험

4. 결론

본 연구에서는 폴리프로필렌 섬유 혼입률을 0.2% 및 0.25%로 하여 도로터널 라이닝 콘크리트에 적용하였을 때 4가지 시간가열온도곡선에 따른 내화시험을 실시하였으며 시험결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 4가지 시간가열곡선에 대한 폴리프로필렌 섬유혼입 콘크리트의 내화시험 결과 폭열 현상은 발생하지 않았다. 따라서 폴리프로필렌 섬유를 혼입한 콘크리트는 폭열 발생의 주요원인이 되는 수증기압을 빠르게 배출하는 네트워크의 생성에 효과적인 것으로 판단된다.
2. 4가지 시간가열곡선에 대한 내화시험 결과 도로터널의 화재발생시 환경조건을 가장 모사할 수 있는 곡선은 RABT 곡선이라 판단된다. 즉, 화재 발생시 밀폐된 도로터널은 급속한 온도 증가를 발생시키게 되는데 RABT 곡선의 경우 이를 가장 잘 표현할 수 있는 것으로 사료된다.
3. 내화시험 결과 라이닝 콘크리트의 폭열 현상은 일어나지 않았으나 내화실험 후 콘크리트 표면에 균열과 박리현상이 일어났으며 이로 인해 구조체의 강도가 70~90%까지 손실되는 경향을 보여주었다. 즉, 폴리프로필렌 섬유의 혼입은 어느 정도 폭열의 완화는 가능하지만 성능 저하 자체를 막지는 못하는 것으로 판단되며 향후 이를 보강하기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.
4. RABT 곡선에 따른 내화시험결과 라이닝 콘크리트의 표면박리 및 균열의 발생이 가장 작게 나타났다. 이는 RABT 곡선이 급격한 온도의 증가를 모사하기 때문에 콘크리트 내에서 수산화칼슘의 분해가 일어나는 450~550℃에 노출되는 시간이 상대적으로 적었기 때문이다.

참고문헌

1. Gabriel, A. K., "Passive fire protection in tunnel, Concrete for the Construction Industry", Vol. 37, No. 2, pp. 31~36, 2003
2. Haukur I., Anders L., "Recent Achievements Regarding Measuring of Time-Heat and Time-Temperature Development in Tunnel", Safe & Tunnels, First International Symposium, Prague, pp. 87~96, 2004