

터널 화재시나리오에 따른 콘크리트 PC패널 라이닝의 전열특성에 관한 해석적 연구

김형준 · 김흥열* · 박경훈* · 신현준*
서울시립대학교 · 한국건설기술연구원*

An Study on Heat Transfer Analysis to Concrete PC Pannel Lining under Tunnel Fire Scenario

Kim Hyung Jun · Kim, Heung Youl* · Park, Kyung Hoon* · Shin, Hyun Jun*
University of Seoul, Korea Institute of Construction Technology*

This study was performed FE numerical analysis under 120-minute fire conditions, using the ABAQUS, a wide use software, on the basis of the test results by concrete tunnel lining fire strengths (ISO, RWS, and MHC). The concrete material test was to secure the material properties of concrete linings, which were numerical analysis input conditions. And then built the material properties, such as specific heat, heat transfer rate, heat expansion rate, density, elasticity coefficient and compression strength under high temperature conditions, as database at 20 °C to 800 °C, applying them to analysis as input values. As a result, the tunnel linings under RWS fire conditions saw fire temperature rose to maximum 1119 °C at the location of 5 mm above a thermal surface, and saw surface temperature amount to 1214 °C in the middle part.

1. 서론

경제력 향상과 쾌적하고 안전한 삶에 대한 사회적 욕구가 증대되면서 환경과 안전성확보의 요소가 강조되고 있으며 최근의 화재사고에 의한 인명피해가 속출하면서 터널에 대한 화재안전기술의 수요는 증가하고 있다. 이러한 추세에 따라 터널화재에 대한 콘크리트 구조물의 안전성 확보를 위한 화재손상 범위 및 폭렬영향에 대한 실증실험이 진행되고 있으며, 이는 실험의 고비용 및 제약조건을 극복할 수 있는 수치해석에 대한 연구가 병행되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 실증실험 결과를 토대로 터널화재에 따른 구조체의

화재손상범위를 예측할 수 있는 해석기법을 정립하고자 한다.

2. 연구범위 및 해석조건

2.1 연구범위

구조물이 터널 화재와 같은 높은 화재강도에 노출되었을 때 부재의 온도는 두 가지 메커니즘에 기초하여 예측할 수 있다. 요소 내부의 열전도는 Fourier 방정식에 의해 계산할 수 있으며, 요소의 열전달은 열대류와 복사열의 경계면을 통하여 노의 화염으로부터 요소로 전달된다. 이러한 이론을 근거로 상용 S/W인 ABAQUS V.6.7.1 을 이용하여 시험체 단면의 온도분포에 대한 전열 해석을 수행하고 이를 실험결과와 비교하였다. 해석의 신뢰성을 확보하기 위하여, 콘크리트의 터널라이닝의 화재강도에 따른 실증실험¹⁾과의 비교·검증을 수행하였다. 해석변수는 실증실험과 동일하게 화재강도의 크기에 따라 ISO , MHC, RWS 화재시나리오에 대해서 수행하였으며, 해석모델 조건은 다음 <표 1>과 같다.

<표 1> 해석모델 형상조건 및 화재조건

해석모델명	화재조건 (2시간)	시험체 크기 (mm)	압축강도(MPa)
Model- I	ISO FIRE	600×600×200	40MPA
Model- II	Modified Hydrocarbon FIRE		
Model- III	RWS FIRE		

2.2 해석수행 조건

모델 해석을 위한 전열 해석식은 <식 1>과 같으며, 상기 화재시나리오 및 모델 형상에 따른 전열특성계수를 아래와 같이 적용하여 해석을 수행하였으며, 모델요소는 3CD8I를 적용하였다.

$$q = \alpha_c (\theta_g - \theta_m)^m + V_\sigma (\alpha_m \epsilon_f \theta_g^4 - \epsilon_m \theta_m^4) \quad \text{<식 1>}$$

여기서 α_c 열대류계수(7 W/m²K^m, 화재노출조건)

m 열대류 발생계수(1.0, 화재노출표면)

θ_g 로의 온도(K)

θ_m 모델온도(K)

V 복사각 계수(1.0)

ϵ_f 화염(가열로) 열방사율(=0.7)

em 모델 열방사율(=0.8)

am 표면 흡수율

o Stefan-Boltzmann상수(=5.67×10⁻⁸ W/m²K⁴)

- 콘크리트 터널라이닝의 종 방향 단면은 표준화재조건에 균일하게 노출되며, Z축 방향으로의 열전달은 없는 것으로 가정하며, 터널라이닝의 직접적 화재노출부위인 콘크리트 표면은 균일하게 평활한 것으로 가정한다.
- 열전달은 기둥의 단면방향(X-Y축)으로만 발생하는 것을 전열해석의 기본으로 설정하여 해석을 수행한다.
- 본 해석에서는 수분에 의한 수증기 증발 및 온도방출, 수분이동에 대한 특성과 폭발에 의한 단면결손은 고려하지 않는다.

2.3. 수치해석입력 재료물성

수치해석 입력데이터의 신뢰성을 확보하기 위하여 고온재료 물성 데이터는 40 MPa 콘크리트 공시체로 20 °C ~ 800 °C까지의 비열 · 열전도율 · 열팽창율 · 탄성계수 · 압축강도의 선행재료실험²⁻³⁾을 통해 얻은 <표 2>와 같은 입력 값을 적용하였다.

<표 2> 콘크리트의 고온재료물성 데이터

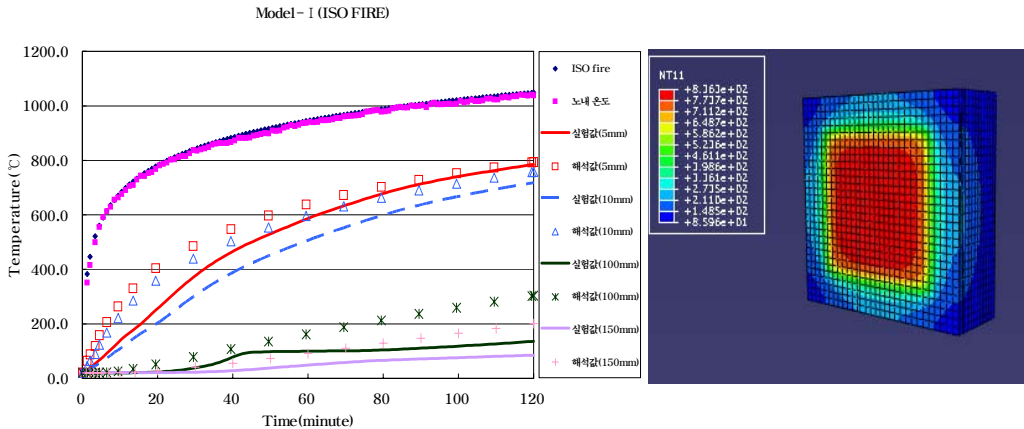
콘크리트 온도(°C)	40MPa 콘크리트			
	비열 (J/kg °C)	열전도율 (w/mK)	열팽창율 (mm/mm×10 ⁻⁶)	탄성계수저감(%)
100	497	1.86	1102.60	1.003
200	625	1.65	1537.00	1.005
300	687		2511.10	1.007
400	721	1.50	3552.70	0.974
500	756		4802.20	0.937
600	903	1.37	9154.50	0.892
800	843	1.46	9721.4	0.792

3. 수치해석 수행결과

해석의 신뢰성 확보를 위해 콘크리트 터널라이닝 실증실험체와 동일한 형상 조건으로 모델링을 하였으며, 해석값과 실험값의 온도경향성 비교하였다. 또한 ITA국제기준⁴⁾에 의거한 터널화재조건에서 해석기법을 통한 터널라이닝의 화재손상범위의 도출 가능성을 검토하였다.

3.1 Model- I (ISO Fire)

콘크리트 라이닝의 실증실험 결과에서 열전대 측정값과 해석결과와의 비교를 수행하였으며, 비교 깊이는 화재가열 면으로부터 표면부위(5 mm · 10 mm)와 중심부위(100 mm · 150 mm)로 선정하여 <그림 2>와 같이 비교하였다. 해석값이 실험값에 비해 전반적으로 약간 높은 경향성을 나타내나, 전열특성 경향성과 온도분포는 신뢰성을 확보하는 것으로 나타났다.

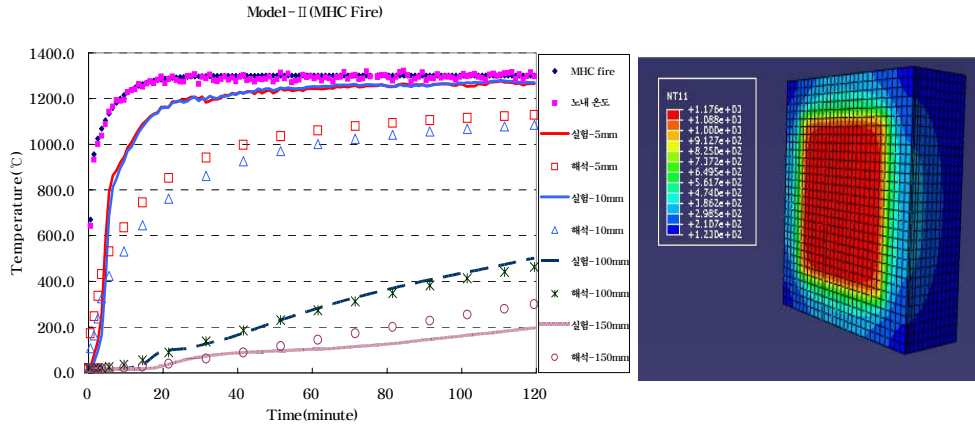


<그림 1> 실증실험 & 해석결과 비교(Model- I , ISO Fire)

3.2 Model- II (MHC Fire)

화재 초기에 가장 급격하게 온도상승이 발생하는 터널화재조건인 MHC Fire 조건에서 수치해석을 수행한 결과, 가열면의 표면인 5 mm와 10 mm 깊이에서의 온도가 실증실험에 비해 약 100 °C 정도의 오차가 발생하였다. 이러한 차이는 실증실험시 단기간 내의 급격한 화재강도의 증가로 인한 콘크리트 폭렬로 인해 표면이 박리되어, 5 mm와 10 mm의 콘크리트 내부 깊이가 가열 표면이 되었기 때문이다.

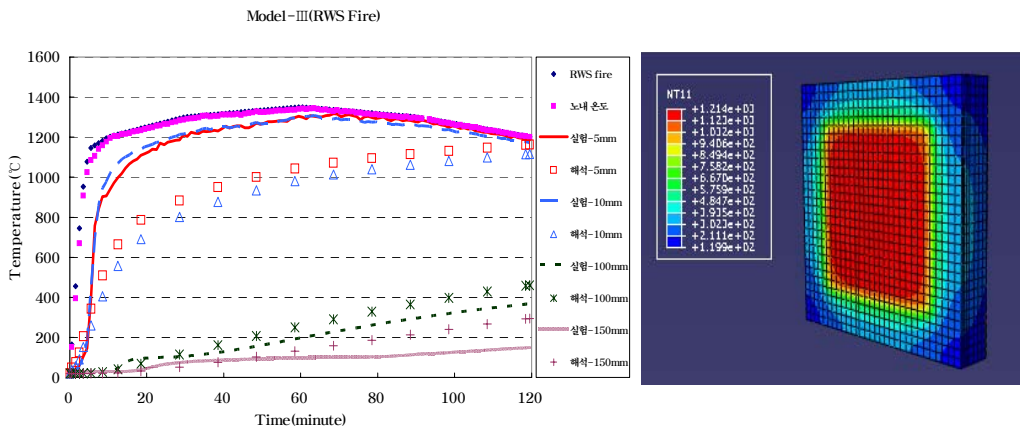
가열 면으로부터 100 mm와 150 mm의 중심부의 전열특성 예측은 실증실험값과 해석값이 대체로 유사한 경향을 나타내어 신뢰성을 확보하였다. MHC 화재조건에서의 화재손상범위는 실증 실험은 100 mm까지로 나타났으며, 수치해석에서도 동일하게 100 mm까지로 나타났다. 본 해석연구기법에서는 급격한 온도상승 및 실험체의 폭렬로 인한 온도상승효과를 구현하지는 못하나, 터널라이닝의 화재손상범위에 대한 내화성능 평가로서의 신뢰성은 확보 가능한 것으로 판단된다.



<그림 2> 실증실험 & 해석결과 비교(Model-II, MHC Fire)

3.3 Model-III(RWS Fire)

터널화재 시나리오 중 가장 높은 온도에 도달하는 RWS 화재시나리오 조건에서 해석을 수행한 결과, 가열면으로부터 표면부위인 5 mm와 10 mm에서는 실증실험값에 비해 낮은 온도로 해석되며, 표면폭렬에 의한 온도상승 효과가 낮아지는 중심부인 100 mm와 150 mm에서는 실험값과 유사한 경향을 나타낸다. 이러한 경향은 상기 3.2절에서 수행한 MHC 화재해석모델과 동일하며, 표면 폭렬로 인한 단면결손에 의해 가열로의 온도가 10 mm까지 직접적으로 상승하기 때문으로 판단된다.



<그림 2> 실증실험 & 해석결과 비교(Model-III, RWS Fire)

4. 소결

콘크리트 라이닝의 터널화재조건에서의 수치해석을 수행하여 실증실험과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) ISO 표준화재조건에서의 콘크리트 라이닝의 깊이별 전열특성에 대해서 실증실험과 수치해석결과를 비교한 결과 유사한 경향성을 나타내었으며, 이에 따라 화재손상범위도 동일하게 판단되어 해석기법을 통한 터널라이닝의 내화성능예측이 가능하다.
- 2) MHC과 RWS 화재조건에서의 수치해석모델은 급격한 온도상승에 의한 폭렬로 인해 10 mm까지의 온도편차가 약 150 °C 정도 발생하나, 화재손상범위를 평가하는 380 °C 범위에서의 콘크리트 깊이에 대한 평가에서는 다음 <표 3>과 같이 신뢰성 있는 예측이 가능하다.

<표 3> 화재조건별 콘크리트 라이닝의 화재손상범위 분석결과(ITA, 380 °C)

모델명	화재조건 (2시간)	폭렬깊이 (mm)	화재손상부위(380°C, mm)	
			실험	해석
Model-I	ISO	10	0~30	0~30
Model-II	Modified Hydrocarbon	30	0~100	0~100
Model-III	RWS	30	0~100	0~100

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 기관고유사업인 “(09기본) 구조물 성능기반 화재거동해석 및 설계기술연구”과제와 관련한 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김홍열, 박경훈, 김형준(2008). “터널화재시나리오에 따른 콘크리트 PC패널라이닝의 열적손상에 관한 실험적 연구” 한국콘크리트학회, 2008년 추계학술대회.
2. 김홍열, 채한식, 전현규, 염광수, “Fiber Cocktail을 혼입한 고강도 콘크리트의 고온시 변형특성 및 모델제시에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트 학회 학술대회 발표논문집 제 19권 2호, 2007.
3. 김홍열, 채한식, 전현규, 염광수, “Fiber Cocktail을 혼입한 고강도 콘크리트의 고온시 압축강도특성 및 모델제시에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트 학회 학술대회 발표논문집 제 19권 2호, 2007.
4. ITA Working Group No.6(2004), “Guidelines for Structural Fire Resistance for Road Tunnels”, International Tunnelling Association.