

도로터널 라이닝 화재조건 콘크리트 라이닝 공극압력 특성에 관한 연구

박경훈 · 김흥열 · 유용호 · 이철호* 김형준**
한국건설기술연구원* (주)종합건축사사무소 광일건축**

A Study on Pore Pressure Evaluation of Concrete Lining in Road Tunnel Fire

Park, Kyung Hoon · Kim, Heung Youl · Yoo, Yong-Ho
Lee, Chul Ho* · Kim, Hyung Jun**

Korea Institute of Construction Technology* Kwang Il Architecture Co. Ltd**

Abstract

We carried out a one-way heating experiment on the PC panel manufactured by changing the filling depths(20,30,40,50mm) of concrete regarding the fire strength in order to measure the inner concrete pressure which is a direct cause of concrete spalling. This fire experiment was conducted under the fire strength conditions of ISO 834 Standard, Modified Hydrocarbon and the maximum value of Pore Pressure was measured. As a result of analyzing the time it took to reach maximum pressure, it showed that the time rising to the maximum pressure of high strength concrete of 40MPa is slower than that of a 24MPa tunnel lining. In case of ISO fire conditions, spalling damage might take place in heating period of 20~40 minutes in the range of 100~200°C temperature. In case of MHC fire conditions, the area damaged by fire can appear after a lapse of 25~50 minutes in the range of 150~250°C temperature.

1. 서 론

콘크리트 시편은 화재조건 하에서 어떠한 열적·역학적 응력을 받을 경우엔 점진적인 박락(Progress spalling)이나 폭발성 폭렬(explosive spalling)로 인한 단면 결손이 유발되며, 열-역학적 또는 열-수-역학적 메카니즘에 의해 폭렬 현상이 진행된다. 고온 가열시 골재는 화학적 재구성이 이루어지기 전까지는 팽창하게 되지만, 시멘트 페이스트는 180°C 부분에서 수분의 건조와 탈수현상으로 인해 수축하게 되며 이러한 골재팽창과 시멘트 페이스트의 수축으로 인해 국부적으로 양립할 수 없는 변형 현상이 발생하게 되어 폭렬 현

상으로 귀결되는 열-수-역학적 메카니즘 현상을 유발시킨다. 열-수-역학적 메카니즘은 여러 가지 복합적인 요인으로 인해 발생하게 되는데, 그 중 가장 직접적인 발생 원인은 콘크리트 내부의 급격한 수증기 압력상승이다. 수증기 압력 상승과 고온 가열로 인해 콘크리트 내부의 공극사이로 MASS(공기+수분+수증기)의 양방향 이동을 촉발시키며 이로 인해 공극압력의 상승으로 인한 폭발성 폭렬(Spalling)현상으로 귀결된다. 그러므로 폭발성 폭렬 현상은 열-수 역학적 메카니즘 과정에 의해 발생하게 되며, 이러한 메카니즘은 열전도성·열용량·수증기의 투수성 등이 주요 변수인 재료적 특성과 강도·열에 의한 균열형상 및 크기·골재의 열팽창률 등이 주 요소인 역학적 특성에 의해 영향을 받게 되므로 신뢰성 있는 폭렬 영향성 평가를 수행하기 위해서는 이에 대한 명확한 규명이 선행되어야 한다. 이를 토대로 열-수-역학적 메카니즘의 주요 요인인 콘크리트 내부의 수증기 압력 특성을 규명하기 위하여 내부 공극압력 분포를 측정할 필요성이 파생되며, 이를 분석하기 위한 이론적 고찰을 선행한 후에 콘크리트 내부 공극압력 측정실험을 수행하였다.

2. 연구범위

2.1 국내 도로터널 현황

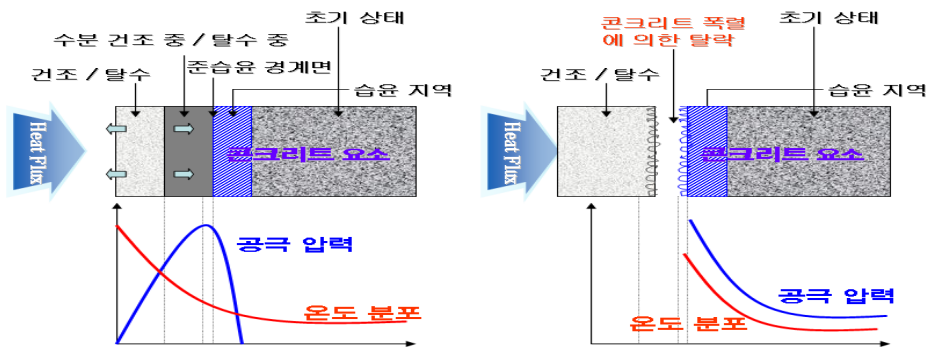
우리나라의 경우 산지가 국토의 70%를 차지하고 있으며 도로선형을 직선화하고 절개지를 최소화하는 등 환경 친화적인 터널의 건설이 증가하고 있다. 이러한 터널의 증가는 최근 더 현격한 증가추세를 보이고 있다. 국토해양부에 따르면 2007년 말을 기준으로 전국 터널은 132개가 증가하여 1064개소(연장 754km)인 것으로 조사되었다. <그림 1>에서 보는 바와 같이 1987년까지 70개소에 불과하던 터널은 10년 전인 1997년에는 184개소, 작년 말에는 1064개소로 20년만에 1000개 정도의 터널이 신규로 건설되었음을 알 수 있다. 이와 같이 터널개소가 증가하고 터널연장이 길어짐에 따라 터널내의 사고 및 화재로 인한 피해에 대한 관심이 모아지고 있다. 터널은 타 구조물에 비해 화재의 빈도가 높지는 않지만 밀폐된 공간이라는 특성상 5분내 1000℃ 이상으로 온도가 급상승할 수 있으며, 소화 및 구조활동이 곤란하여 화재 발생 시 인명 및 구조물의 피해가 극대화될 수 있다.



그림 1. 최근 10년간 터널 증가 추이

2.2 공극압력 발생 매커니즘

공극압력으로 인한 폭렬 발생 매커니즘을 살펴보면, 가열면의 경계면으로 이동한 수증기에 의해 표면 박리를 발생시키며, 내부로 이동한 수증기에 의해 비 투과막으로서의 역할을 하는 준-습윤지역에서의 수증기 정체현상을 가중시켜서 경계면의 최대 압력상승 현상을 유발시킨다. 그러므로 콘크리트 내의 공극압력의 크기는 표면에서부터 점차 증가하다가 준-습윤지역 경계면에서 최대 공극압력을 발생시키게 되며, 그 이후로는 점차 감소하게 되는 <그림 2-a>와 같은 비선형적인 곡선을 갖게 된다. 최대 공극압력 발생 지점에서 폭렬이 발생한 이후에는 공극 압력 곡선이 콘크리트 내부에 <그림 2-b>와 같이 발생하게 된다.(Kalifa,2000)



(a) 콘크리트 폭렬 발생 전 (b) 콘크리트 폭렬 발생 후
 그림 2. 일 방향 가열시 콘크리트 내부의 온도와 공극 압력분포

3. 실험계획

3.1 배합설계

신뢰성 있는 콘크리트 내부의 공극압력 측정을 위해 압력전달 파이프의 위치를 폭렬이 주로 발생하며 온도변화가 급격한 부위에 깊이별로 삽입하여야 하며, 내부 온도 변화와 공극 압력간의 상관성 분석이 가능하도록 실험변수를 산정하였다. 또한 콘크리트의 강도에 따른 공극압력의 변화를 측정하기 위해 <표 1>과 같이 일반적으로 도로터널 라이닝에 사용되는 재령 28일 24MPa 강도의 배합과 비교적 고강도인 재령 28일 40MPa의 배합에 대해 공극압력 측정 실험을 실시하였다.

표 1. 배합설계

목표강도 (MPa)	G _{max} (mm)	W/C (%)	Unit Weight(kg/m ³)				
			C	S	G	W	AE제(%)
24	25	47.2	341	874	993	161	0.3
40	25	39.4	405.7	676.5	1066.1	159.8	1.6

3.2 실험변수

콘크리트 내부압력을 측정하기 위해 화재강도에 따른 콘크리트 매입깊이(20, 30, 40, 50mm)를 변화하여, <그림 3>과 같이 공극압력 측정센서를 특수 제작된 형틀에 시험체를 인입하여 1방향 가열을 수행하였다. 화재시험은 ISO 834 Standard, Modified Hydrocarbon 화재강도조건에서 실험을 수행하여 공극압력(Pore pressure)의 최대값을 측정하였다

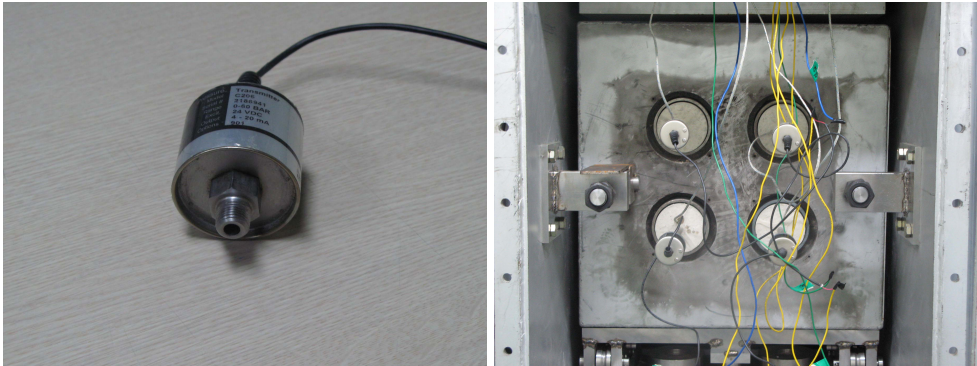


그림 3. 공극압력 측정 시험

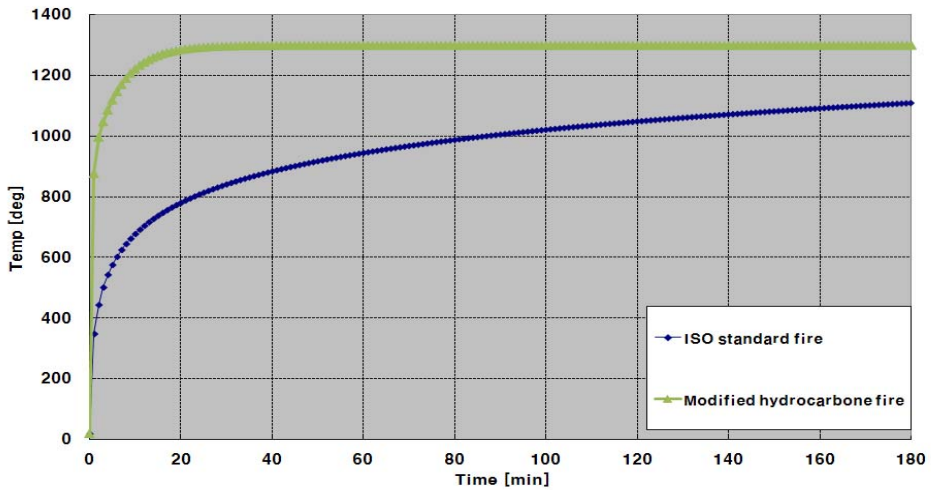


그림 4. 시험에 사용된 화재 온도곡선

4. 결론

콘크리트 폭렬에 직접적인 원인이 되는 콘크리트 내부압력을 측정하기 위해 화재강도

에 따른 콘크리트 매입깊이(20, 30, 40, 50mm)를 변화하여, 공극압력 측정센서를 특수 제작된 형틀에 시험체를 매입하여 1방향 가열을 수행하였다. 화재시험은 ISO 834 Standard, Modified Hydrocarbon 화재강도조건에서 실험을 수행하였으며, 측정된 공극압력(Pore pressure)의 최대값을 <표 2>와 같이 측정하였다. 최대압력 도달시간을 분석한 결과 24MPa의 터널라이닝에 비해 40MPa의 고강도 콘크리트의 최대압력상승 늦은 경향성은 나타내었다. 이에 ISO 화재조건에서는 가열시간 20분~40분, 온도범위 100℃~200℃에서 폭발이 발생할 수 있으며, MHC의 경우 25~50분 시간 경과후 150℃~250℃에서 화재손상범위가 나타날 수 있는 것으로 판단된다.

표 2. 화재강도에 따른 콘크리트 내부 공극압력 측정결과

화재강도	압축강도	깊이	최대압력	시간(분)	온도(℃)	
ISO FIRE	24MPa	20	0.486	19	157	
		30	0.709	37	174	
		40	0.545	90	231	
	40MPa	20	0.821	23	157	
		30	0.756	53	185	
		40	0.496	61	163	
MHC FIRE	24MPa	20	0.137	7	133	
		40	0.272	17	142	
		50	0.818	50	236	
	40MPa	20	0.176	25	301	
		30	0.205	18	170	
		40	0.769	35	234	
			50	0.368	29	176

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 기획및 정책연구 사업인 “(08)복합벽체(샌드위치패널) 화재안전성 평가기준 작성을 위한 기획연구”과제와 관련하여 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Anderberg, Y. "Spalling phenomena of HPC of OC, Proceedings of International Workshop on Fire performance of High-strength Concrete", NIST, USA, 1997 pp.69~73
2. Both, C., Haar, P. W., Tan, G. L., Wolsink, G. M. "Passive fire protection measures for concrete tunnels", Fire security in hazardous enclosed spaces, 8&9, 1999

3. Bazant, Z. P., etc., Finite Element Program for Moisture and Heat Transfer in Heated Concrete, Nuclear Engineering and Design, 1981, pp.61~70
4. C Meyer-Ottens, "The Question of Spalling of Concrete Structural Elements of Standard Concrete under Fire Loading", Ph.D. Thesis, Technical University of Braunschweig, German, 1972.
5. Kalifa, P., Menneteau, F. D., Quenard, D. "Spalling and pore pressure in HPC at high temperature in HPC at high temperatures" , Cement & Concrete Research, Vol. 30, 2000, pp.1~13.