

PSC 풍도슬래브에 부착된 내화패널의 내화특성에 관한 실험연구

이두성* · 배 정** · 최 현*** · 민인기****

Lee, Doo Sung, Bae, Jeong, Choi, Heon, Min, In Gi

Experimental Study on the Fire Proofing Characteristic of Fire Resistance Panel that it attaches to PSC Airpit-Slab

ABSTRACT

In this Study, the performance of precast PSC slabs with fire resistance panel for fire resistance of the tunnel system was evaluated by experimentally. The fire test was performed in fire resistance (electric) furnace according to RABT(Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln) time heating temperature curve. The test results showed that the measured temperatures at the t=0 mm depth of PSC slab with precast fire resistance panel during a fire was maximum temperature 367°C, lower than 380°C (ITA 2004), when damage occurs. Also, at the t=25 mm, the maximum temperature was 239°C, which was lower than the damage temperature of rebar, 250°C. From the results, the use of precast fire resistance panel (t=25 mm) improves fire resistance of PSC structures.

Keywords : Fire resistance panel, Time heating temperature curve, Transverse ventilation system, PSC Airpit-slab, Experimental Study

초 록

본 연구에서는 터널에서 발생하는 화재로부터 구조물을 보호하기 위해 내화패널이 부착된 프리캐스트 PSC 슬래브의 내화성을 조사하기 위해 내화실험이 수행되었다. 내화실험은 독일의 RABT(Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln) 화재시간-온도곡선을 적용하여 내화성을 평가하는 것으로 하였다. ITA(2004)에서 제시하는 기준에 따라 내화성능 시험을 수행한 결과, 콘크리트의 손상을 판단하는 위치인 t=0mm의 최대온도는 367°C로서 손상한계온도 380°C(ITA 2004)이하였으며, 철근의 손상을 판단하는 위치인 t=25mm의 최대온도는 239°C로서 손상 한계온도인 250°C 이하로 나타났다. 실험결과로부터, 25mm두께의 내화패널이 부착된 프리스트레스 슬래브 시험체는 내화성을 가진 것으로 입증되었다.

검색어 : 내화패널, 화재온도-시간 곡선, 횡류식 환기시스템, PSC 풍도슬래브, 내화패널, 실험연구

1. 서론

최근 세계적으로 도로 및 철도터널에 대형화재가 발생하고 있으며 이로 인해 경제적, 사회적으로 심각한 손실이 발생하고 있는 실정이다. 이처럼 폐쇄된 공간인 터널 내 화재 발생 시 구조체의 강도저하로 인한 붕괴 및 인명피해 뿐만 아니라 사회기반시설인 교통망을 장시간 끊어 놓게 되는 등 큰 문제를 발생시킨다. 더욱이 경제발달과 함께 기술력의 향상으로 초대형 구조물이 건설되고

* 정회원 · 교신저자 · (주)홍지 기술연구소 연구소장, 공학박사 (Corresponding Author · Hong-G Reserch Institute Director · Lds1970@hgdc.com)

** 정회원 · (주)삼부토건 기술연구소 부장, 공학박사 (kingb@sambu.co.kr)

*** (주)경원건축사 사무소 엔지니어링 연구소장, 공학박사 (choiii@hanmail.net)

**** (주)도화엔지니어링 상무 (migfly@dohwa.co.kr)

Received February 20 2012, Revised August 20 2012, Accepted March 7 2013

지상공간의 부족으로 지하차도와 같은 지하공간의 개발이 활발히 진행되고 있는 현 상황에서는 화재발생에 대한 안전성 확보가 중요하게 여겨지고 있다.

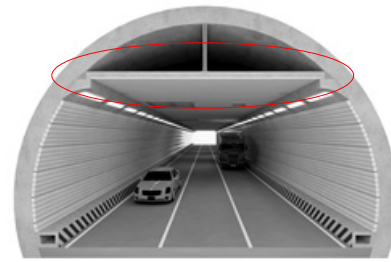
세계 각국의 주요 열차화재 사례에 의하면, 열차화재는 후진국형 재단이 아니고 미국, 일본, 영국, 독일, 프랑스 등 선진국에서도 발생하고 있으며 수송량 증대나 터널의 장대화에 동반하여 세계 각지에서 대규모 화재가 발생하여 심각한 피해가 발생하는 것으로 보고되고 있다. 또한 장대터널이 증가하는 현실을 고려할 때 화재 발생 가능성도 증가하고 있는 현실이다. 1999년 Mont Blanc 도로 터널 화재와 2000년 오스트리아 산악터널 화재는 대형 인명 피해 및 물질 피해를 발생시킨 사고였으며 이로 인하여 터널화재의 심각성 및 위험성에 대한 인식을 재고하게 되었다(Park et al., 2006). 또한 2003년에 발생한 대구지하철 열차방화사고로 인한 인명 및 재산피해로 국내에서도 지하구조물에 대한 내화대책에 관심을 가지게 되었다.

지하공간에서의 화재는 화재의 특성을 고려하여 볼 때 많은 인명 및 경제적 피해를 발생시킬 가능성이 크며, 발생한 화재가 터널에 구조적 손상을 발생시키지는 않더라도 화재 발생 후 터널의 보수에 소요되는 시간으로 터널을 이용하지 못하여 발생하는 사회적·경제적 손실을 감안한다면 터널 내 화재를 과소평가할 수는 없다(Lim and Yoo, 2007).

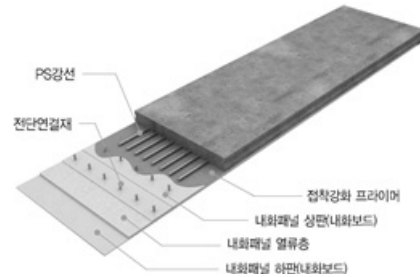
국내에서도 2000년대에 들어서면서 크고 작은 터널 내 화재사고가 발생하고 있어 이에 대한 관심이 높아지고 있는 실정이며, 유럽에서는 이미 오래전부터 지하구조물의 화재안전성을 중요시하여 이에 대한 연구개발이 진행되어왔다.

터널이나 지하차도와 같은 지하구조물의 주재료인 콘크리트는 구조재료 중에서 화재에 대한 저항능력이 우수한 재료특성을 갖고 있지만, 고온상태에서 거동은 일반적인 온도조건에서의 거동과는 큰 차이가 있다. 철근콘크리트 구조물에서 콘크리트의 피복두께는 철근의 온도상승을 억제시키기 때문에 일반적으로 내화구조로서 인정받고 있지만, 화재 발생 시 콘크리트가 고온의 환경에 일정시간 노출되면 콘크리트의 표면부가 떨어져 나가는 폭렬이 발생하여 철근과 콘크리트의 온도가 급격히 상승하게 되어 구조적 내화능력이 저하하게 된다(Jang et al., 2007). 이는 사용중상태에 있는 구조물 부재의 하중저항능력을 감소시켜 구조물의 붕괴 또는 심각한 손상을 초래하게 된다.

지금까지 터널 내화대책에 관련한 국내연구는 대부분 화재 발생 시, 터널의 라이닝 콘크리트에 폭렬방지를 목적으로 라이닝 콘크리트에 폴리프로필렌 섬유를 혼합시키는 것에 주로 포커스를 맞춰왔으며(Park et al., 2003; Lee et al., 2006; Won et al., 2007), 또 다른 방법으로 콘크리트 표면에 내화모르타르의 두께를 변경해 가며 내화성능을 확보하는 방안(Kim et al., 2006; Won et al.,



(a) Airpit-slab in Tunnel



(b) PSC Airpit Slab

Fig. 1. PSC precast airpit slab attached fireproof panel

2006)등에 대해서 연구가 진행되어 왔다.

본 연구에서는 화재 발생시 콘크리트의 성질변화와 폭렬을 일으키는 주원인으로 작용하는 고온이 구조체에 전달되지 않도록 하기 위해 열전도율을 저감시킬 수 있는 터널 및 지하구조물의 내화패널을 사용하여 횡류식 환기시스템(Fig. 1(a))을 구성하는 풍도슬래브와 같은 터널구조물의 내화성능을 향상시키는 것을 목적으로 연구가 수행되었다. 특히, Fig. 1(b)와 같은 프리캐스트 PSC 슬래브의 경우 화재발생에 의하여 강선의 긴장력이 손실되거나 콘크리트 단면손실이 발생할 경우, 구조물의 붕괴가 발생할 수 있으므로 소정의 내화성능이 반드시 필요하다.

따라서 본 연구에서는 우선 국내외에서 제시되고 있는 화재온도-시간곡선규정에 대해 비교검토하여 터널이나 지하차도와 같은 폐쇄공간에서 적합한 화재시간-온도곡선을 선별하고, Fig. 1(b)와 같은 횡류식 환기시스템을 구성하는 내화패널이 부착된 프리캐스트 PSC 풍도슬래브의 내화시험체를 제작하여 건설기술연구원에서 가열시험을 수행하였으며, 시험결과를 분석하여 내화패널이 부착된 PSC 슬래브의 내화성능에 대한 신뢰성을 확보하고자 한다.

2. 터널화재시 열방출량 및 화재시간 - 온도 곡선 규정

2.1 터널 화재시 열방출율과 온도

터널 및 지하구조물에서 발생하는 화재는 지하공간이라는 폐쇄된 공간특성으로 인해 지상화재에 비해 화재발생 초기 5~10분에 1000℃ 이상으로 온도가 상승하는 특징을 가지고 있다. PIARC

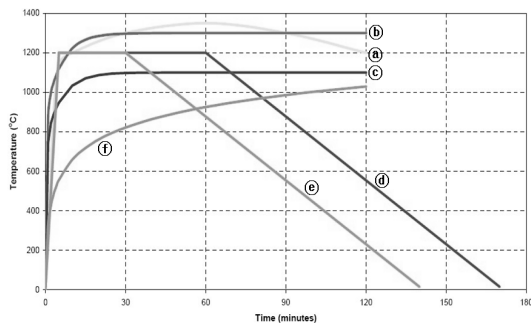
(1999)에서는 지하공간에서 유조차에 의한 화재사고가 발생할 때 최대 1,400℃에 이르는 고온에 의하여 지하구조물에 심각한 손상이 발생할 수 있다고 보고하였다. 이러한 특징으로 인하여 화재현장 접근이 어려워 진압이 곤란하여 많은 인명피해와 시설물의 피해를 발생시키며, 콘크리트 구조물이 고온에 노출될 경우에는 폭렬(spalling) 또는 탈수(dehydration)가 발생하여 구조물의 단면이 손실되고 구조적 안정성이 크게 저하된다. 또한 잔존부에서도 고온의 온도이력으로 인해 콘크리트의 역학적 및 열적 특성이 감소하게 된다(Park, 2005).

2.2 화재시간-온도 곡선 규정

터널 및 지하구조물에서 화재가 발생 시 화재의 유형들을 확인하기 위하여 국제적으로 많은 연구가 진행되었다. Fig. 2는 표준시간-가열온도 곡선 및 화재에 기인되는 물질에 따라 4가지의 화재시간-온도곡선을 보여주고 있다. 이는 터널과 같은 폐쇄적 공간에서 차량 및 차량적재물에 따른 서로 다른 열방출율, 최고온도 및 지속시간을 실험시험을 통해 얻어진 결과에 따른 유럽에서 제시하는 내화시험 방법 중 표준이 되는 시간-가열온도곡선이다.

2.2.1 ISO Curve

Fig. 2 ①와 같이 Cellulosic Curve는 KS F 2257, ISO 834 등에 규정되어 있는 표준시간-가열온도곡선이다. 이 곡선은 실험실 규모의 모형 화재실험을 여러 차례 수행하여 얻은 온도측정 결과를 기초로 하여 결과시간과 온도변화와의 관계를 나타낸 곡선으로서 일반적으로 건축재료의 화재에 대한 내력을 알기 위하여 가열시험용으로 표준화한 것을 말한다. 이 곡선은 건축자재들의 시험에 따른 결과물로서 5분 이내에 450℃ 이상으로 급속도로 올라가나



- (a) RWS Rijk WaterStaat
- (b) HCM Modified Hydrocarbon
- (c) HC Hydrocarbon
- (d) RABT-ZTV(Railway)
- (e) RABT-ZTV(Highway)
- (f) ISO 834

Fig. 2. Fire duration-temperature relation curves of several codes

화재발생 후 140분까지 완만한 곡선을 보이고 있다.

2.2.2 RABT Curve

Fig. 2 ②,③에 보이는 RABT Curve는 Eureka 499(1990~1992) 프로젝트의 결과물로 독일에서 개발되었다. 이 RABT곡선은 5분내 1200℃에 도달하여 25분간 지속된 후 110분 동안 서서히 냉각되는 현상을 보이고 있다.

RABT Curve는 Eureka 499 프로젝트(Haak, 1998)에서 터널 내 자동차, 대형트레일러 및 기차, 지하철에 대한 실험화재실험에서 얻어진 결과를 토대로 만들어진 시간-가열온도곡선이다.

3. 철근콘크리트 내화성능 향상방안

3.1 고온에 노출된 콘크리트의 폭렬

폭렬은 화재로 인해 발생한 급격한 온도상승으로 구조체의 표면으로부터 폭발하는 것과 같이 콘크리트가 박락 또는 파괴하는 현상을 의미한다. 일반적으로 폭렬은 화재발생 후 약 20~30분 이내에 발생하는 것으로 알려져 있다(Park, 2005).

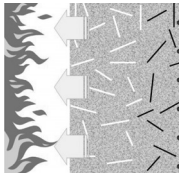
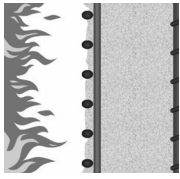
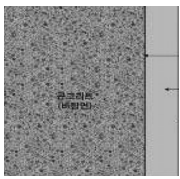
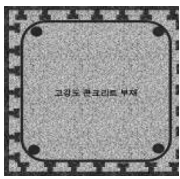
열이 콘크리트 부재에 침투되기 시작하면 화재 노출표면에 인접한 얇은 층안의 수분들이 빠져나간다. 빠져나간 수증기들의 주요 부분들은 상대적으로 기온이 낮은 안쪽지역으로 이동하고 인접층의 공극으로 재 흡수된다. 이와 같이, 부재 내부의 건조지역의 두께가 점차적으로 늘어나게 됨에 따라 상당한 두께의 포화층이 노출표면으로부터 약간의 거리를 두고 서서히 생겨난다. 화재노출 표면의 온도가 올라가면서 수분 증발은 건조지역을 통해 증가되어 지고 증발된 수증기가 moisture clog의 형성으로 기온이 낮은 안쪽지역으로 방출되기가 힘들어짐에 따라 수증기는 노출된 표면을 향해 이동될 수밖에 없게 되면서 부재내부가 강한 압력을 받게된다. 더구나 수증기가 열을 받으면 팽창하게 되어 수분흐름(공극)을 따라 흐름에 대한 저항성이 증가된다. 온도증가율이 더 커지게 되면서, 빠르게 압력이 증가된다. 압력이 계속적으로 증가하게 되면 결국엔 그 압력이 재료의 인장강도보다 커지게 된다. 이 시점에 도달하면 노출된 표면으로부터 큰 소리를 내며 터져나가게 된다. 폭렬현상은 한번 터져나갔다고 폭렬현상이 끝나는 것이 아니고, 수분을 집중적으로 함유하고 있는 새로운 층이 이미 700℃ 이상 올라간 화기에 노출되면서 그 내부에 moisture clog이 다시 형성되기 시작하고 점차 빈번하게 폭렬현상이 지속된다.

3.2 철근콘크리트 내화성능 보강공법

(I) 내화성능 보강공법의 종류

철근 콘크리트 구조물의 내화성능 보강공법에는 Table 1과 같이 일반적으로 콘크리트 내에 수증기압 저감공법으로 유기섬유를 혼합하는 방법과 폭렬 비산을 방지하는 공법, 그리고 내화피복공법으

Table 1. Comparison of reinforcing methods for fireproof

	
<ul style="list-style-type: none"> • anmixture of organic fiber 	<ul style="list-style-type: none"> • wiremesh • steel plate reinforcement
<ul style="list-style-type: none"> • Need to Verification for strength • Very Economic • Need to a lowering of Construction Efficiency • Difficulty of Temperature Control 	<ul style="list-style-type: none"> • Plain effect for scatter prevention • Incongruence of specification for fireproof • Need to another supplementary Method
<p>Fireproof Covering Method</p> 	<p>Covering Method for Spalling Restraint</p> 
<ul style="list-style-type: none"> • Fireproof board • Fireproof spray material • Fireproof paint 	<ul style="list-style-type: none"> • Permanent form for Spalling Restraint
<ul style="list-style-type: none"> • Fireproof mortar • Superiority of fire resistnace • Need to additional process • scalling, spalling 	<ul style="list-style-type: none"> • Superiority of fire resistnace • Need to verifiacion of material choice and product method

로 나눌 수 있다(Park et al., 2006).

반면, 표면층의 온도상승을 억제시키는 내화피복공법은 화재로 인한 열로부터 콘크리트를 직접적으로 차단시켜 줄 수 있어, 가장 효율적이고 우수한 내화보강 성능을 확보할 수 있다는 장점이 있다.

(2) 내화보드공법

내화보드공법은 반수석고, 석고경화제 및 전분과 같은 재료에 펠라이트, 무기질 섬유 등의 단열성을 갖춘 물질을 첨가하여 제작된 내화 석고보드를 구조체에 부착시켜 구조체로부터 열을 차단하는 공법이다. 내화보드 공법은 시공성이 간편하고, 마감성이 좋으며, 내구성 및 내진성이 우수한 장점이 있는 반면, 적용 시 구조체 크기가 증가하는 단점을 가지고 있다.

3.3 내화성능에 관한 기준

3.3.1 국내기준

국내의 내화구조와 관련된 규정은 2008년 7월 고시된 「고강도 콘크리트 기둥·보의 내화성능 관리기준(국토해양부 고시 제2008-

334호)」에 제시되어 있다. 고시된 내화기준에서는 KSF 2257-1 건축구조부재의 내화시험방법에 따라서 시험을 수행하도록 규정하고 있다.

- 화재시간-온도곡선: ISO 834 곡선
- 내화구조성능기능: 주철근의 온도가 평균 538℃/최고 649℃ 이하로 제한

3.3.2 ITA(2004) 권고안

국제터널학회(ITA)에서 발간된 Guidelines for Structural Fire Resistance for Road Tunnels(2004)에 터널의 내화성능에 관한 권고안을 제시하고 있다.

- Fire Time Duration

Type	Number Vehicles Involved	Air Ducts	
Cars/ Vans	1~2	ISO 834	60 min.
	>3	ISO 834	60 min.
Trucks/ Tanker	1~2	ISO 834	120 min.
	>3	ISO 834	120 min.

- Critical Temperature in Tunnel Structure for fire resistance

Concrete (wall, roof, cast in place concrete)	Max. 380℃
Precast Concrete	Max. 200~250℃
Segment Steel Liner	550℃
Stainless Steel Structure, Hanger Rod	Max. 800℃

4. 내화패널의 내화성능 실험

본 장에서는 화재 발생 시 콘크리트의 성질변화와 폭렬을 일으키는 주원인으로 작용하는 고온이 구조체에 전달되지 않도록 하기 위해 열전도율을 저감시킬 수 있는 터널 및 지하구조물의 내화패널 재료에 대한 내화성능을 확인하는데 목적이 있다. Fig. 3은 본 내화실험 시험체의 하단에 부착된 내화보드로 소재는 무기질계로서 화재 시에 인체에 무해하고 자연친화적인 소재이다. 한국건설자재



Fig. 3. Material for a fireproof board

Table 2. Incombustibility test results of fireproof panel

Test Item	Results			Criterion	Test method	
	1	2	3			
Incombustible test	Reduction rate of mass	25.2	25.4	26.0	under 30	Notification of MLTM No.2006-476 (KS F ISO 1182:20046)
	Temp. gap between maximum state and final stable state (°C)	1.4	1.2	1.9	under 20	
Test of gas harmfulness	action stay time (min:s)	15:00	14:53	-	over 9min.	Notification of MLTM No.2006-476 (KS F 2271:2006)

KICM Test report (2007.08.24)

시험연구원에서 수행된 시험(KS F ISO 1182:2004)에서 내화보드의 소재는 불연재료의 기준과 가스유해성시험(KS F 2271:2006)에서 적합한 것으로 보고되었다(Table 2).

4.1 C.F.D. 해석

Fig. 4와 같이 수치해석프로그램(n.TAQS:도로터널 환기시뮬레이터)을 이용하여 내화패널이 설치된 터널단면과 설치되지 않은 터널단면에서 화재열에 대한 CFD해석을 수행하였다.

ISO 834(건축물 내화기준)기준의 화재시간-온도에서 내화패널이 부착된 풍도슬래브에서 내화패널과 접촉되는 위치에서 콘크리트 온도가 153.2°C로 내화패널이 설치되지 않은 경우에서 온도 1050°C에 비해 현저히 감소하고 있어 내화패널 부착시 콘크리트 구조물보호에 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

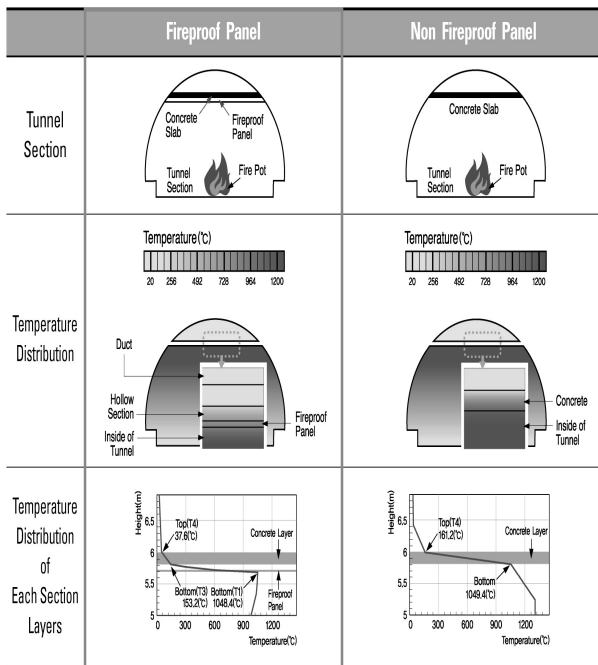


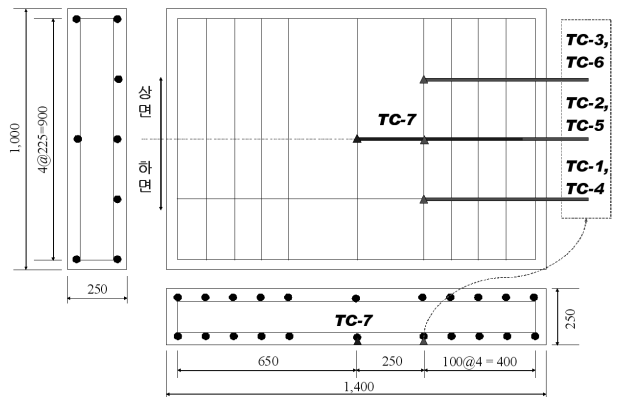
Fig. 4. Results of computational fluid dynamics analysis

4.2 내화실험방법

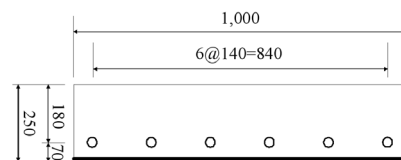
4.2.1 시험체 제작 및 시험방법

터널 및 지하차도의 내화성능을 향상시키기 위해 개발된 내화패널이 부착된 프리캐스트 PSC 슬래브의 내화성능을 평가하기 위한 내화시험을 실시하였다. 기본적인 내화패널의 부착성능이나 피로 시험 등의 결과는 대한토목학회 논문집(Kim et al., 2012)에 보고되었다.

내화시험을 위한 시험체는 PSC가 도입된 철근 콘크리트 슬래브로 하부면에 내화패널이 부착되어있다. 시험체의 단면적은 1,400mm×1,000mm×250mm이고, H10철근과 H13 철근이 상·하부에 배근되어있다. 또한 하부에 140mm 간격으로 PS강연선이 6개 매입되어 있다. 내화 시험에 사용된 시험체의 단면도와 철근 배근, PS강연선의 배치는 Fig. 5에 상세히 나타내었다. 시험체에 사용된



(a) Cross section of test specimen and setting places of measuring gage



(b) PS strand arrangement

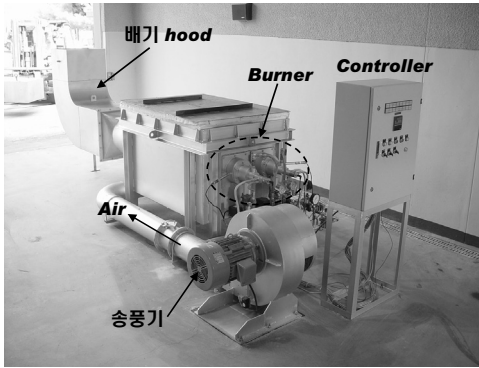
Fig. 5. Detailed plan of test specimen

Table 3. Concrete mix proportion of Test Specimen

target strength	48.0MPa
W/C	30.8%
S/A	41.0%
unit weight of watet	175kg
aggregate maximum size	25mm
slump	150mm
air content	3.5±1.5

콘크리트의 설계강도는 45MPa이며, 골재최대치수는 25mm, 슬럼프는 150mm로 배합비는 Table 3과 같다.

내화시험은 Fig. 6과 같이 건설기술연구원에 보유중인 고온시험용 수평가열로를 사용하였으며, 가열은 터널화재라는 것을 고려하여 1면 노출 화재시험을 수행하였다. 시험체는 가열로 상부에 Fig. 7과 같이 설치한 후, 가열로 상부와 시험편 사이를 단열하고자 약 1,400℃까지 사용이 가능한 세라믹섬유(세라믹울)를 설치하였다. 수평가열로는 시험체의 사이즈인 1,400mm×1,000mm에 맞게 제작되었으며, 실제 가열면적은 1,100mm×700mm 이다.



(a) Heating Device



(b) Heat shield for fireproof

Fig. 6. High heating device for fireproof test (KICT)

4.2.2 열전대 설치 및 측정

PSC가 도입된 철근 콘크리트 슬래브에 부착된 내화패널의 내화 성능을 확인하기 위해서 실험체 내부에 열전대를 설치하였다. 시험체 내부에는 총 7개의 열전대가 설치되었으며, 내화패널과 콘크리트의 접촉면($t=0\text{mm}$)에 4개, 그리고 내화패널과 콘크리트의 접촉면으로부터 25mm 위치($t=25\text{mm}$)에 3개가 설치되었다. 열전대의 설치 위치는 Fig. 5(a)의 단면도에 나타내었다.

시험체에 매설되어 있는 열전대로부터 시험체 내부 각 위치에서의 온도를 측정하기 위하여 데이터로거를 사용하여 각 채널별로 1초에 1회씩 온도를 측정하였다. 또한 가열로내의 온도를 동시에 측정하여 시험자가 설정한 화재이력곡선의 정확한 구현여부를 판별할 수 있도록 하였다. Fig. 8은 내화시험시 온도를 측정하는 전경이다.

4.2.3 화재이력곡선

RABT 곡선은 독일에서 개발되었으며 Eureka 499 프로젝트의 결과물로서 RABT 곡선은 초기에 급격하게 온도가 증가하여 일정 시간을 유지한 후 소화되는 터널 내 실제화재 과정을 가장 유사하게 모사하는 화재이력곡선으로 알려져 있다. Eureka 499 프로젝트의 RABT곡선은 5분내 1200℃에 도달하며 최대온도 지속시간은 일반적으로 30~60분이(RABT-ZTV가 30분, RABT-EBA가 60분)



Fig. 7. Test specimen on a heating device



Fig. 8. Measure the changes in fireproof test

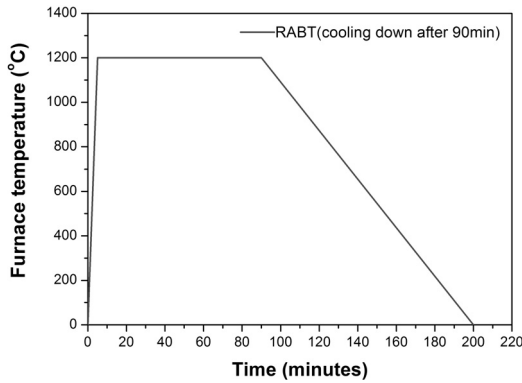


Fig. 9. Fire Duration Curve in RABT

유지된 후 110분 동안 냉각되는 형상을 보인다. 그러나 Eureka 499 프로젝트의 실험대상물 최고온도는 1000°C 이하 이지만 최고 온도가 지속된 시간은 대형트레일러인 경우 최소 15분 이상, 가차인 경우 최대 80분까지 지속되며 지하철원 경우 최소 5분 이상 지속된다고 보고하고 있다. 이러한 결과에 따라 RABT 곡선에서 최고온도 지속시간은 구조물의 요구조건에 따라 60분 이상을 사용하기도 한다.

본 연구에 적용된 RABT 곡선은 가장 극한상황에 대한 안정성을 확인하기 위해 5분 이내에 최대온도 1200°C에 도달하여 90분간 지속시킨 후 110분 동안 냉각시키는 방법을 적용하였으며, 적용된 시간가열곡선은 Fig. 9와 같다.

4.3 내화시험결과

내화패널 두께가 25mm인 프리스트레스트 슬래브 콘크리트 실험체에 대하여 RABT 화재이력곡선 하에서 내화시험을 수행한 결과, 내화시험이 완료된 시간(200분)에서 실험체의 바닥면(내화패널과의 계면)을 기준으로 t=0mm(TC-1, TC-2, TC-3, TC-7), 25mm(TC-4, TC-5, TC-6) 위치에서의 최대온도는 각각 367°C,

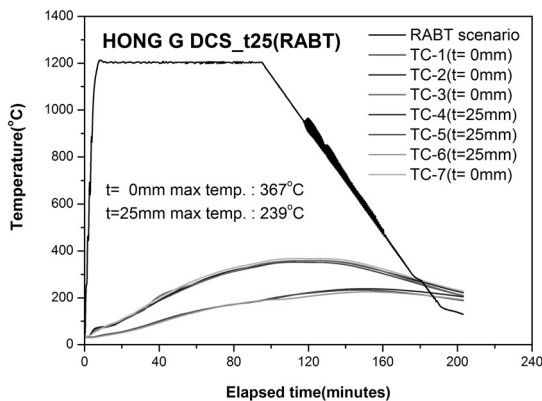


Fig. 10. Temperature distribution of each layer in Concrete

239°C로 측정되었으며, Fig. 10에서 보이는 것과 같이 각 위치별 열전대 온도는 같은 높이에서 유사한 결과를 보였다.

Fig. 11은 내화시험 전·후 내화패널의 모습이며, 내화시험 후 내화패널 표면에 크랙이 발생하였다. 또한, 육안조사결과 실험 전 밝은 노란색에서 백색으로 표면 색깔이 변색이 되었다.

본 연구에서는 Table 4에 나타낸 것과 같이 ITA(2004)에서는 제시하고 있는 기준에 근거하여 실험결과로부터 도출된 콘크리트와 철근의 온도변화로 내화패널의 화재저항성을 판단하였다. 실험결과, 콘크리트의 손상을 판단하는 위치인 t=0mm의 최대온도는 367°C로서 손상 한계온도인 380°C 이하였으며, 철근의 손상을 판단하는 위치인 t=25mm의 최대온도는 239°C로서 손상 한계온도인 250°C 이하로 나타났다. 따라서 내화패널 두께가 25mm인 프리스트레스트 슬래브 실험체는 RABT 화재시나리오 하에서 내화능을 가진 것으로 판단된다.

Fig. 12는 가열로 옆면에 설치된 관찰창을 통하여 적용 시간에



(a) Before Heating Test



(b) After Heating Test

Fig. 11. Surface variation of before and after fireproof test

Table 4. Critical Fire Temperature of Concrete and Rebar in ITA (2004)

	Concrete (°C)	Steel Rebar (°C)
Critical Temp.	380	250

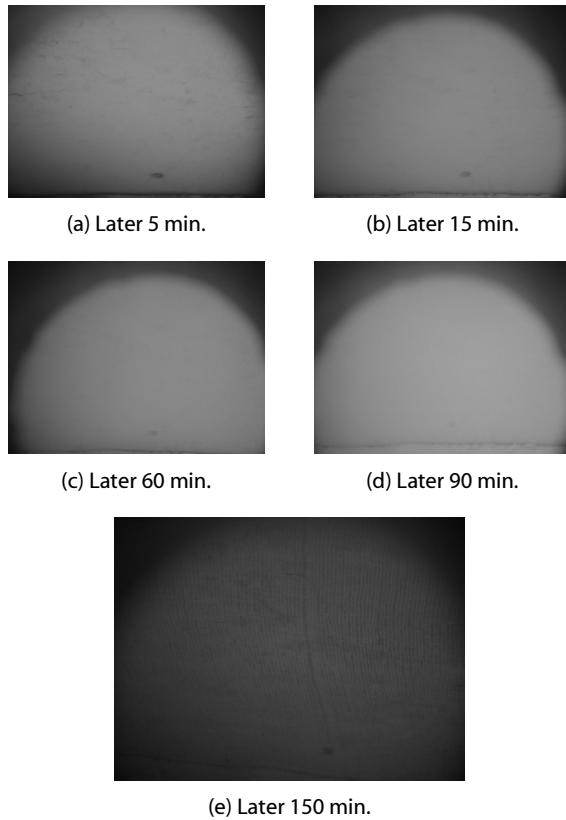


Fig. 12. Variation of heating area according to time step

따른 가열면의 변화를 나타낸 것이다. 가열온도가 1200℃에 도달한 5분에서부터 내화패널의 표면을 관찰한 결과 콘크리트의 탈락이나 폭렬은 발생하지 않았다. 또한 표면에서의 최대온도는 367℃로 한계온도인 380℃보다 낮기 때문에 콘크리트의 표면에 손상이 발생하지 않은 것으로 판단된다. 즉, 내화패널이 콘크리트와 철근에 가해지는 열을 적절히 차단하기 때문에 철근과 콘크리트에 손상이 발생하지 않은 것이다. 따라서, 내화패널은 철근 콘크리트 구조물을 화재로부터 보호할 수 있는 매우 효과적인 내화재료인 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 터널 및 지하차도의 설치되는 횡류식 환기시스템의 풍도슬래브 하단에 부착되는 내화패널의 내화성능을 확인하기 위해 수행된 내화실험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 풍도슬래브의 내화패널성능시험이 1차적으로 CFD해석을 통해서 수행되었다. ISO 834(건축물내화기준)기준의 화재시간-온도곡선을 고려한 해석에서 내화패널이 부착된 풍도슬래브에

서 내화패널과 접촉되는 위치에서 콘크리트온도가 153.2℃로 내화패널이 설치되지 않은 경우에서 온도 1050℃에 비해 현저히 감소하고 있어 내화패널 부착시 콘크리트 구조물보호에 효과가 있음을 알 수 있었다.

- (2) ITA에서 제시하는 기준에 따라 내화성능을 평가한 결과, 콘크리트의 손상을 판단하는 위치인 $t=0\text{mm}$ 의 최대온도는 367℃로서 손상 한계온도인 380℃ 이하였으며, 철근의 손상을 판단하는 위치인 $t=25\text{mm}$ 의 최대온도는 239℃로서 손상 한계온도인 250℃ 이하로 나타나 내화패널 두께가 25mm인 프리캐스트 PSC 슬래브 실험체는 RABT 화재시나리오 하에서 구조물을 안정적으로 보호할 수 있는 내화성능을 갖는 것으로 평가되었다.

References

- Kim, J. H., Park, H. G., Won, J. P. and Lim, Y. M. (2006) Study of fire proof performance for newly developed fire protection material coated RC tunnel lining., *Proceeding of The Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, pp. 1569-1572 (in Korean).
- Kim, T. K., Bae J., Choi, H. and Min I. G. (2012) Experimental Studies on PSC Airpit-Slab with Fire Resistance Panel under Static and Dynamic Loads., *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 32, No. 4A, pp. 245-253 (in Korean).
- Park, K. W. (2005) A Study on the Model and Influence Factor of Tunnel Fires., *Graduated School of Urban Sciences, University of Seoul*, Thesis of a Master, pp. 1-7 (in Korean).
- Park, H. G., Lee, S. B., Lee, M. S. and Kim, J. K. (2003) Research of Fire-Resistance Characteristics for Shield Tunnel., *Proceeding of The Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, pp. 4801-4804 (in Korean).
- Park, H. G., Won, J. P. and Jang S. H. (2006) State-of-the-art Reports for Fire Protection of Tunnel Concrete., *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, KSMI, Vol. 10, No. 6, pp. 22-32 (in Korean).
- Won, J. P., Choi, S. W., Park, C. G. and Park, H. G. (2006) Temperature Distribution of Wet-Mixed High Strength Sprayed Polymer Mortar for Fire Resistance of Tunnel., *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 26, No. 4C, pp. 283-290 (in Korean).
- Won, J. P., Park, K. H., Park C. G. and Lee, S. W. (2007) Enhanced Fire Resistance and Mechanical Properties of Hybrid Fiber Reinforced Concrete for Underground Space Concrete Structures., *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 27, No. 4A, pp. 627-633 (in Korean).
- Lee, C. Y., Sim, J. W. and Ahn, T. S. (2006) Evaluation of Fire-Resistant Performance for Tunnel Lining Concrete with Heating Temperature-Time Curves., *Proceeding of The Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, pp. 1629-1632 (in Korean).
- Lim, K. K. and Yoo, S. B. (2007) Are We Safe from Road Tunnel Fire?, *The Magazine of The Korean Society of Civil Engineers*,

- KSCE, Vol. 55, No. 11, pp. 131-139 (in Korean).
- Chang, S. H., Choi, S. W., Kwon, J. W, Kim, S. H. and Bae, G. J. (2007) Alteration of mechanical properties of tunnel structural members after a tunnel fire accident., *Tunnelling Technology*, KTA, Vol. 9, No. 2, pp. 157-169 (in Korean).
- Abrams, M. S. (1971) *Compressive Strength of Concrete at Temperatures to 1600F, Temperature and Concrete*, SP-25, American Concrete Institute, Detroit, pp. 33-58.
- Ali, F. (2002) *Is High Strength Concrete More Susceptible to Explosive spalling than Normal Strength Concrete in Fire*, *Fire and Materials*, Vol. 26, pp. 127-130.
- ACI Committee 216 (1989) *Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements*, ACI 216-89, American Concrete Institute, Detroit.
- Gabriel, A. K. (2003) *Passive fire protection in tunnel*, *Concrete for the Construction Industry*, Vol. 37, No. 2, pp. 31-36.
- Haak, A. (1998) *Fire Protection in Traffic Tunnels, General Aspects and Results of the EUREKA Project*, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 13, No. 3, pp. 377-381.
- Harmathy, T.Z. (1993) *Fire Safety Design and Concrete*, Longman Scientific & Technical.
- ISO. (1975) *Fire Resistance Tests-Elements of Building Construction*, International Standard ISO 834, Geneva.
- ITA Working group No.6 (2004) *ITA Guideline for Structural Fire Resistance of Road Tunnels, Repair maintenance of underground structures*, ITA, pp. 72-81.
- PIARC (1999) *Fire and smoke control in road tunnels*, Report of the WG 6 of the Road Tunnels Committee of the PIARC.
- Pierre, K., Gregoire, C., and Christophe, G. (2001) *High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fiber from spalling to microstructure*, *Cement & Concrete Research*, Vol. 31, pp. 1487-1499.