

## 터널 풍도슬라브에 사용된 내화패널의 적용성에 관한 실험연구

## An Experimental Study on the Application of Fireproof Panel in Tunnel Duct Slab

최우진\*

Woo Jin Choi\*

Doctor's Course, Department of Industrial Engineering, Sunmoon University, Asan, Republic of Korea

\*Corresponding author: Woo Jin Choi, wjchoi32@hanmail.net

## ABSTRACT

**Purpose:** In this study, fire-resistance test were executed to evaluate the effectiveness of the fireproof panel attached to the PSC slab in tunnel. **Method:** For the fire resistance test, the RWS curve was applied and the furnace of the KICT was used. **Result:** As a result of the experiment, the maximum temperature measured on the concrete surface of the PSC slab with the fireproof panel was 321.8°C, which was lower than the damage limit temperature of 380°C for concrete. Also, at the t=25mm, the maximum temperature was 35.2°C, which was lower than the damage temperature of steel, 250°C. The use of precast fire resistance panel(t=30mm) improves fire resistance of PSC structures. **Conclusion:** As a result of the test, a reinforcement method for attached a fireproof panel in case of fire in a tunnel or an underground roadway is provided to protect a structure from fire. In the future, it is necessary to perform the static performance test of the slab to which the fireproof panel is attached, and to confirm the adhesion performance of the fireproof panel by performing the pull-off test and the fatigue test.

**Keywords:** Fire Resistance Panel, Time-temperature Curve, Fire Resistance Tests, PSC Airpit-slab, High-temperature Behaviour

## 요약

**연구목적:** 터널에서 발생하는 화재로 인하여 구조물의 피해를 보호하기 위해 적용되는 PSC 슬라브에 부착된 내화패널의 성능을 평가할 목적으로 내화실험을 수행하였다. **연구방법:** 내화실험은 RWS 화재 이력곡선 화재시간-온도곡선을 적용하였으며, 한국건설기술연구원(KICT)의 가열로를 이용하여 내화 성능을 평가하였다. **연구결과:** 국제터널학회(2004)에서 제시하는 기준으로 내화성능 실험을 실시한 결과, 내화패널과 콘크리트의 접촉면에서의 최대온도는 콘크리트에 손상을 주는 한계온도(380°C) 이하였으며, 접촉면과 25mm 이격된 지점에서의 최대온도는 철근에 손상을 주는 한계온도(250°C) 이하로 측정되었다. 실험결과로부터, 내화패널이 30mm 두께로 부착된 PSC 슬라브 시험체는 내화성능을 가진 것으로 평가되었다. **결론:** 터널이나 지하차도에서의 화재발생시 내화패널을 부착하는 보강방법은 화재로부터 구조물을 보호할 수 있으며 향후, 내화패널이 부착된 슬라브의 정적 성능시험을 수행하고, Pull-off test와 피로실험을 실시하여 내화패널의 부착성능을 확인하는 것이 필요하다.

**핵심용어:** 내화패널, 화재온도-시간 곡선, PSC 풍도슬라브, 내화성능, 실험연구

Received | 22 March, 2023

Revised | 22 May, 2023

Accepted | 26 May, 2023

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서론

### 연구의 배경 및 목적

최근 제2경인고속도로 방음터널과 중부내륙고속도로 방음벽에서 발생한 화재로 다수의 인명피해와 막대한 경제·사회적 인 손실이 유발되었고, 세계적으로 도로 및 철도 터널에서 대형화재가 발생했다는 소식을 접하면서 국민 불안이 증대되고 있는 상황이다.

이처럼 밀폐된 공간과 유사한 터널 내에서의 화재 발생은 필연적으로 구조물 강도저하를 초래하게 되며 이로 인한 터널 붕괴로 이어지면서 크나큰 인명·재산피해를 일으킬 뿐만 아니라 장시간 교통망을 마비시킨다.

더불어 경제성장과 기술력의 향상 그리고 환경에 대한 관심이 커지면서 터널이 장대화되고 있으며 지상에서의 교통 및 용지보상 등의 제한조건으로 지하공간개발이 활발하게 진행되고 있으며, 이러한 시대상황에서는 화재발생에 대한 안전성 확보가 더욱 강조되고 있다.

터널이나 지하차도와 같은 지하구조물을 건설하는데 주로 쓰이는 콘크리트는 화재에 대한 저항능력이 우수한 특성을 갖고 있지만, 고온에서의 거동특성은 보통의 온도조건에서의 거동특성과는 큰 차이가 있다.

화재로 인한 철근의 온도상승을 콘크리트의 피복두께로 억제시키기 때문에 일반적으로 철근콘크리트는 내화구조로서 인정받고 있다. 하지만, 화재가 발생하게 되면 콘크리트가 고온의 환경에 노출되어 콘크리트 표면이 떨어져 나가는 폭발이 발생하게 된다. 이러한 폭발현상은 철근과 콘크리트의 온도가 급격히 상승하게 됨으로서 구조적 내화성능 저하를 유발하게 된다. 이는 구조물 부재의 하중저항능력을 감소시켜 사용중상태에서 구조물의 붕괴 또는 심각한 손상을 발생시킨다.

구조물 부재의 내화성능 저하를 방지하기 위한 방법은 터널의 지보재인 shotcrete에 내화성능을 가지게 함으로써 구조물 자체로 내화성능을 증가시키는 방법과 구조물의 표면에 코팅재료를 적용하여 열전달을 지연할 수 있는 방법, 그리고, 뿔칠용 재료로 2차라이닝을 실시하는 방법, 마지막으로 내화용 프리캐스트 패널을 설치하는 방법이 있다.

현재 터널내화방법으로 국내·외적으로 가장 널리 사용되는 방법은 내화용 뿔칠재료로 2차라이닝을 실시하는 방법이다. 보통의 뿔칠용 재료는 강도가 매우 낮아 탈락 및 박락 현상으로 부재의 내화성능이 저하되는 문제를 초래하게 된다. 최근에는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 Fig. 1과 같은 내화패널을 설치하는 방법이 점차 늘어나고 있다.

따라서 시간 경과에 따른 내화패널의 장기적인 내구성능과 부착강도의 변화를 파악하는 것이 중요하다.

본 논문에서는 터널 및 지하차도에 사용되는 내화패널을 대상으로 내화실험을 실시하였으며, 실험결과와 국제터널협회와 국토교통부의 내화성능관리기준을 비교함으로써 내화패널의 적용성을 제시하는데 목적이 있다.



Fig. 1. Precast PSC air duct slab

## 이론적 배경

### 터널 화재발생에 따른 열방출율과 온도

터널 및 지하도로와 같은 장소에서 발생하는 화재는 폐쇄된 공간적 특성으로 인해 비교적 개방된 지상에서 발생한 화재와 다르게 화재발생 초기 5분에서 10분 사이에 1,000°C 이상으로 온도가 상승한다는 특징이 있다.

세계도로협회(PIARC)에서는 유조차에 의한 화재사고가 지하공간에서 발생하게 되면 최대 1,400°C에 이르는 고온으로 지하구조물에 심각한 손상이 발생할 수 있다고 발표하였다. 특히, 화재현장으로의 접근이 용이하지 않고 화재진압이 곤란하다는 특수성으로 터널과 지하차도에서는 화재발생시 더 많은 인명피해와 시설물의 피해가 발생되고 있다.

콘크리트 구조물이 고온에 노출되면 폭렬 또는 탈수가 발생하여 필연적으로 구조물 단면이 손실되며 이로 인한 구조적 안정성 저하의 가져오는 원인이 된다.

### 고온에 노출된 콘크리트의 폭렬

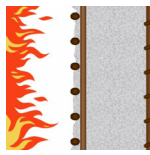
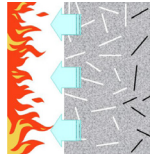
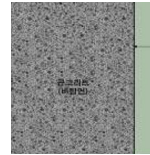

폭렬은 콘크리트가 화재 등으로 약 400°C의 급격한 온도 변화를 겪게 되면, 콘크리트 내부에 갇혀 있던 수분이 외부로 빠져나가지 못하고 한계점에 도달하면서 폭발을 일으키거나, 부재 표면의 콘크리트가 탈락하거나 박리되는 현상으로 폭렬 현상은 콘크리트의 내화력을 저감시키는 대표적인 원인이다.

일반적으로 폭렬현상은 화재발생 후 약 20에서 30분 이내에 발생하는 것으로 알려져 있으며, 폭렬현상은 일회성으로 끝나는 것이 아니고 수분을 집중 함유하고 있는 새로운 층이 화기로 인하여 700°C 이상에 노출되면 포화층이 내부에 재형성되기 시작하고 점점 빈번하게 폭렬현상이 지속적으로 발생된다.

### 철근콘크리트 내화성능 보강방법

현재 널리 쓰이고 있는 철근 콘크리트 구조물의 내화성능 보강공법은 Table 1과 같이 wire mesh나 강판으로 폭렬 비산을 방지하는 방법, 유기섬유를 혼입하여 콘크리트 내에 수증기압을 저감하는 공법, 그리고 내화피복공법이 있다.

Table 1. Comparison of fire resistance reinforcement method

폭렬 비산방지	내부 수증기압 공법	내화피복공법	폭렬 억제형 피복공법
			
wire mesh 강판보강	유기섬유 혼입	내화보드 내화뿔질 내화도료	폭렬억제형 영구거푸집
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 단순 비산방지효과</li> <li>• 내화성능 관리기준 대응곤란</li> <li>• 다른 공법과의 병용필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 강도에 따른 검증필요</li> <li>• 가장 경제적인 공법</li> <li>• 시공성 저하 고려필요</li> <li>• 온도제어 곤란</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 내화성 우수</li> <li>• 추가공정필요</li> <li>• 재료선정 주의필요</li> <li>• 박리, 박락</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 내화성능 우수</li> <li>• 개발단계로서 실적없음</li> <li>• 재료선정 및 생산방법 검증필요</li> </ul>

### 화재시간-온도 곡선 규정

국제적으로 화재의 유형들을 확인하기 위한 많은 연구가 진행되었으며, Fig. 2는 각 나라별 대표적인 화재이력곡선을 나타내고 있다. 화재이력곡선 중 ISO 834 화재이력곡선을 제외한 나머지는 터널 내의 화재를 대상으로 하는 강력한 화재이력곡선으로 알려져 있다.

이는 터널과 지하차도와 같은 폐쇄적인 환경의 공간에서 차량과 차량 적재물에 따른 열방출율, 최고온도 그리고 지속시간을 고려한 실험시험에서 얻어진 결과이다. 현재 내화시험을 수행할 때 표준이 되는 시간-가열온도 곡선으로 널리 사용되고 있는 방법이다.

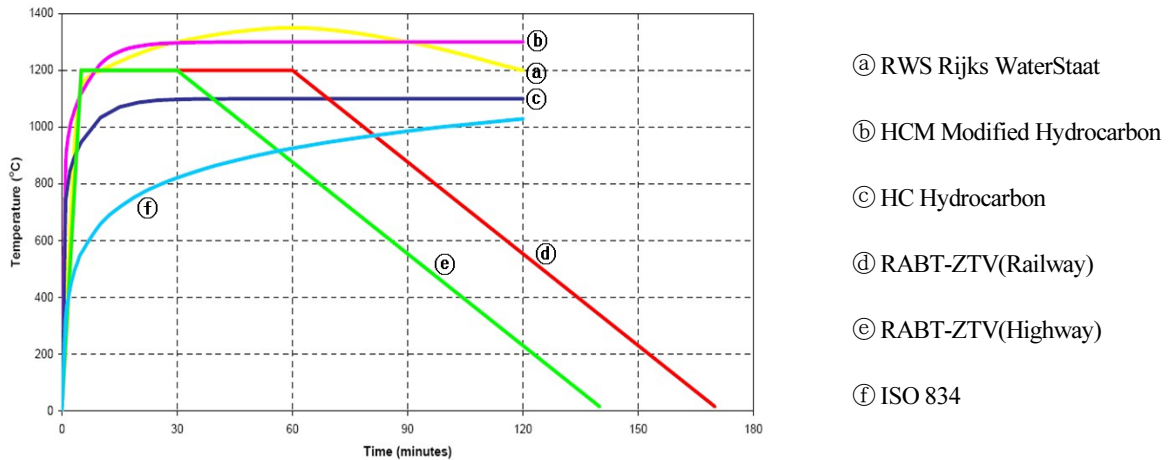


Fig. 2. Fire time-temperature curve for each rule

### 내화패널의 내화성능 실험

터널이나 지하차도에서 화재가 발생 시 콘크리트의 특성변화와 폭발을 일으키는 고온이 구조체에 전달되지 않도록 열전도율을 저감시킬 수 있는 내화패널재료에 대한 내화성능을 확인하는데 연구목적이 있다. 본 연구에 사용된 내화실험에서는 무기질계로서 화재 시에 인체에 무해하고 자연친화적인 소재의 내화패널을 시험체 하단에 부착하였다.

### 시험체 제작 및 실험방법

내화성능을 향상시키기 위한 목적으로 쓰이는 내화패널을 PSC 슬래브에 부착하였으며 Fig. 3과 같이 설치를 종료한 후에, 내화실험을 실시하였다.

내화실험에 사용된 시험체의 단면도와 철근 배근 그리고 PS강연선의 배치는 Fig. 3에 나타내었다. 시험체는 PSC가 도입된 철근 콘크리트 슬래브이며 하부면에 내화패널을 부착하였다. 시험체의 단면적은 가로(1,400mm)×세로(1,000mm)×높이(250mm)이고, 철근은 상부에는 H10을 하부에는 H12을 배근하였다. 또한 하부에 PS강연선이 140mm 간격으로 6개를 매입하였다.

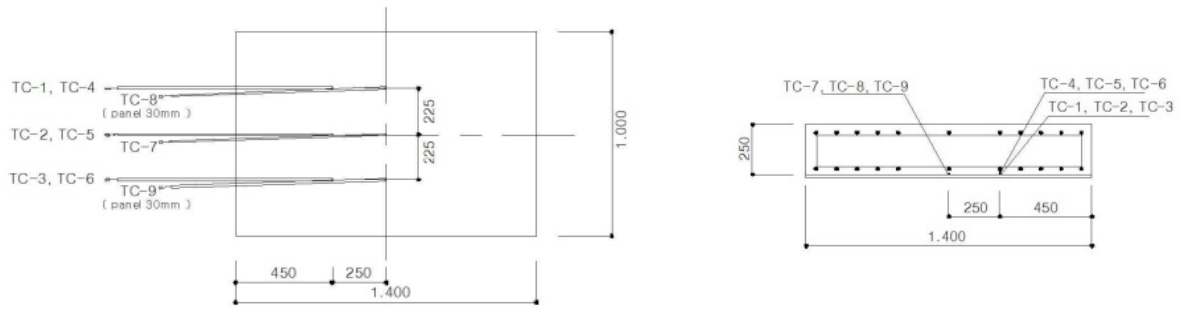


Fig. 3. Cross-section and arrangement

Table 2. Concrete mixing ratio

배합강도	48.0MPa
W/C	30.8%
S/A	41.0%
단위수량	175kg
골재최대치수	25mm
슬럼프	150mm
공기량	3.5±1.5

내화시험은 Fig. 4와 같이 한국건설기술연구원(KICT)에서 보유중인 고온시험용 수평가열로를 사용하였으며, 터널화재라는 것을 고려하여 1면 노출 조건으로 가열하면서 화재실험을 수행하였다.



Fig. 4. Installing test bodies in furnaces

시험체는 Fig. 4와 같이 가열로 상부에 설치한 후, 단열을 위하여 가열로 상부와 시험편 사이를 세라믹섬유로 설치하였다. 세라믹섬유는 약 1,400°C까지 사용이 가능하다. 수평가열로는 시험체의 사이즈인 가로(1,400mm) × 세로(1,000mm)에 맞게 제작되었으며, 실제 가열면적은 가로(1,100mm) × 세로(700mm) 이다.

## 열전대 설치 및 측정

시험체 내부에는 내화패널의 내화성능을 확인하기 위하여 모두 9개의 열전대를 설치하였다. 내화패널과 콘크리트의 접촉면( $t=0$ )에는 6개를 설치하였으며, 내화패널과 콘크리트의 접촉면에서 25mm 이격된 위치에는 3개의 열전대를 설치하였으며, 설치위치는 Fig. 3에 나타내었다.

매설된 열전대로부터 채널별 1초 간격으로 시험체 내부 각 위치에서의 온도변화를 datalog를 사용하여 측정하였고 설정한 화재이력곡선이 정확하게 수행되고 있는지 판별할 수 있도록 가열로 내부의 온도를 동시에 측정하였다.

## 실험결과

### 내화실험결과

두께가 30mm인 내화패널이 부착된 PSC 슬래브 실험체에 대하여 RWS 화재이력 시나리오 곡선에서 내화실험을 수행하였으며 Fig. 5와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 실험시작 후, 120분까지 콘크리트 블록의 바닥면을 기준으로 0mm과 25mm 이격된 위치에서의 최대온도는 각 321.8°C, 35.2°C 로 측정되었다.

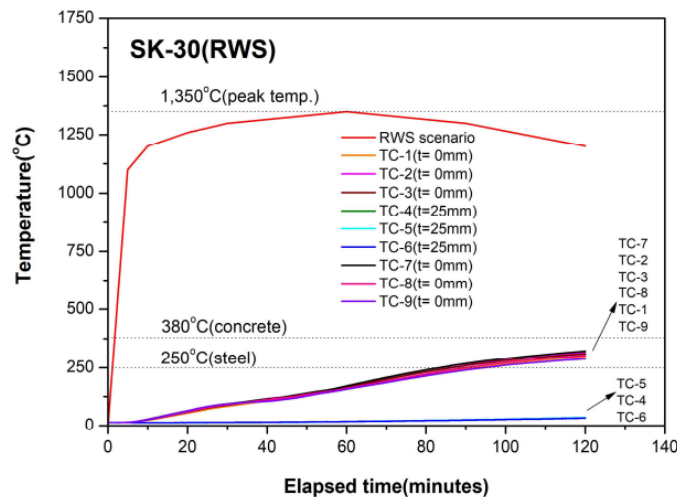


Fig. 5. Temperature change of Concrete

국제터널학회(2004)에서 제시하고 있는 콘크리트와 철근의 한계온도의 기준은 Table 3과 같다. 국제터널학회(2004)의 기준을 기초로 Fig. 5와 같은 실험결과를 판단해보면 콘크리트의 손상을 판단하는 위치인 콘크리트 블록의 바닥면( $t=0$ mm)의 최대온도는 321.8°C로서 콘크리트의 손상 한계온도 보다 낮았으며, 철근의 손상을 판단하는 위치인  $t=25$ mm에서 측정된 최대온도는 35.2°C로서 철근의 손상 한계온도인 250°C 이하로 나타났다. 따라서 내화패널 두께가 30mm인 PSC 슬래브 실험체는 RWS 화재이력 상태에서 내화성능을 가진 것으로 판단된다.

**Table 3.** Limit temperature of concrete and steel proposed by ITA

구분	콘크리트(°C)	철근(°C)
한계온도	380	250

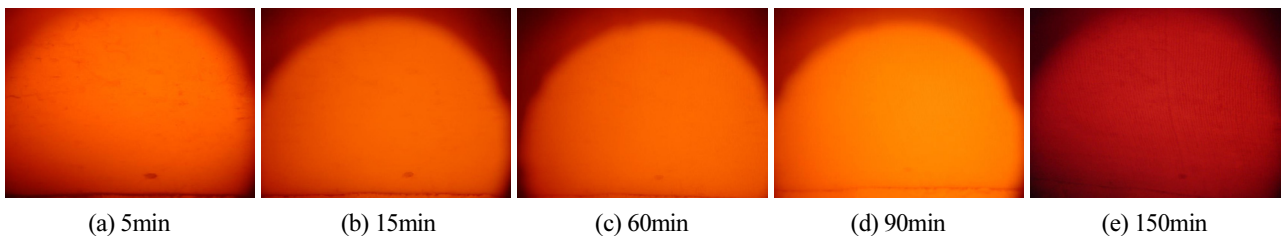
Fig. 6은 내화패널의 내화실험 전과 후의 모습이며, 내화실험 후 내화패널 표면에 균열(Crack)이 발생하였으며, 육안조사 결과 밝은 노란색에서 흰색으로 표면 색깔이 변색된 것을 관찰할 수 있었다.



**Fig. 6.** Changes before and after fire resistance test

가열로 옆면에 설치된 관찰창을 통하여 실험경과시간에 따른 가열면의 변화를 살펴보았다. Fig. 7에서 보는바와 같이 표면을 관찰한 결과 가열온도가 1,200°C에 도달한 5분에서부터 시간이 경과함에도 불구하고 내화패널에서 콘크리트의 탈락이나 폭발은 발생하지 않았다.

또한 표면에서 측정된 최대온도가 321.8°C로 한계온도인 380°C보다 낮게 나타났다. 따라서 콘크리트의 표면에 손상이 발생되지 않은 것으로 판단된다. 즉, 콘크리트와 철근에 가해지는 열을 내화패널이 차단하는 역할을 하기 때문에 철근과 콘크리트에 열에 의한 손상이 발생하지 않은 것이다. 따라서 내화패널은 터널이나 지하차도와 같은 밀폐된 환경에서 화재로부터 구조물을 보호할 수 있는 효과적인 내화보강방법인 것으로 판단된다.



**Fig. 7.** Variation of heating surface over time

## 결론

최근 터널이나 지하차도와 같은 밀폐된 공간에서의 화재로 많은 인명·재산피해와 장시간 교통망을 마비시킨 사건들을 자

주 접하게 된다. 터널에서 화재가 발생하게 되면 콘크리트가 고온의 환경에 노출되어 콘크리트 표면이 떨어져 나가는 폭발이 발생하게 된다. 이러한 폭발현상은 철근과 콘크리트의 온도가 급격히 상승하게 됨으로서 구조적 내화성능 저하를 유발하게 된다. 이는 구조물 부재의 하중저항능력을 감소시켜 사용하중상태에서 구조물의 붕괴 및 심각한 손상을 발생시킨다.

본 연구에서는 열전도율을 저감시켜 고온이 구조체에 전달되지 않도록 내화패널이 부착된 프리캐스트 PSC 슬래브에 대한 내화실험을 실시하였다. 한국건설기술연구원(KICT)에서 보유중인 고온시험용 수평가열로를 이용하였으며, 터널화재라는 것을 고려하여 1면 노출 조건으로 가열하면서 화재실험을 수행하였다.

실험결과로부터 국제터널학회(ITA)에서 제시하는 기준으로 내화성능을 평가해보면, 열에 의한 콘크리트의 손상을 판단하는 위치인 콘크리트 블록의 바닥면에서의 최대온도는 321.8°C로서 손상 한계온도인 380°C 이하였으며, 철근의 손상을 판단하는 위치인 콘크리트 블록의 바닥면으로부터 25mm 위치에서의 최대온도는 35.2°C로서 철근의 손상 한계온도인 250°C 이하로 나타났다. 따라서 두께가 30mm인 내화패널을 부착한 프리캐스트 PSC 슬래브 시험체는 RWS 화재이력 환경에서 내화성능을 갖는 것으로 평가되었다.

실제 터널과 지하차도의 환경에서는 진동 및 내부 공기압 등이 존재하여 내화재료가 박락 및 탈락되는 문제점이 예상된다. 향후, 내화패널이 부착된 슬래브의 정적 성능시험을 수행하고, Pull-off test와 피로실험을 실시하여 내화패널의 부착성능을 확인하는 것이 필요하다.

## References

- [1] ACI Committee 216 (1989). Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements. ACI 216-89, American Concrete Institute, Detroit, USA.
- [2] 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.
- [3] Gabriel, A.K. (2003). "Passive fire protection in tunnel." *Concrete for the Construction Industry*, Vol. 37, No. 2, pp. 31-36.
- [4] 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.
- [5] Harmathy, T.Z. (1993). *Fire Safety Design and Concrete*. Longman Scientific & Technical, England.
- [6] ISO (1975). *Fire Resistance Tests-Elements of Building Construction*. International Standard ISO 834, Geneva.
- [7] ITA Working group No.6 (2004). *ITA Guideline for Structural Fire Resistance of Road Tunnels*. Repair Maintenance of Underground Structures, ITA, Switzerland, pp. 72-81.
- [8] Kim, T.K., Bae, J., Choi, H.M., 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*, Vol. 32, No. 4A, pp. 245-253.
- [9] PIARC (1999). *Fire and Smoke Control in Road Tunnels*, Report of the WG 6 of the Road Tunnels Committee of the PIARC, France.
- [10] Pierre, K., Gregoire, C., Christophe, G. (2001). "High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fiber from spalling to microstructure." *Cement & Concrete Research*, Vol. 31, pp. 1487-1499.