

## RC 슬래브의 내화성능 평가 및 개선 Fire Performance Evaluation and Enhancement of RC Slabs



정 철 현<sup>1)\*</sup>

Chung, Chul Hun



김 현 준<sup>2)</sup>

Kim, Hyun Jun

### 1. 서론

구조재료 중에서 콘크리트는 화재에 대한 저항능력이 우수한 재료특성을 갖고 있지만, 고온 환경에서의 거동은 보통의 온도조건에서의 콘크리트와는 다르다. 화재로 인해 온도가 증가하면 콘크리트와 강재의 강도 및 탄성계수는 감소하지만 모든 구조 부재는 사용하중에 대해서 붕괴가 발생하지 않도록 잔존강도를 유지하여야 한다. 화재에 의한 손상을 정량적으로 평가하기 위해서는 화재온도 뿐만 아니라 화재지속시간에 대한 고려가 반드시 필요하다. 따라서 내화설계에 대한 각 국의 주요 규정에서는 표준적인 화재로 인한 온도-시간 곡선을 규정하고 있다. ISO 834 화재곡선(ISO, 1975; Yang 등, 2008)은 주로 건축구조를 대상으로 규정되었지만, 구조물의 내화설계시 온도조건으로 광범위하게 적용되고 있다. 국내에서 규정하고 있는 내화구조기준(KS F 2557-1)에서의 화재곡선도 ISO 834 화재곡선을 준용하여 적용하고 있는데, ISO 화재곡선은 화재온도의 상승부와 하강부 각각에 대해서 규정하고 있다.

화재로 인해 발생하는 폭발은 화재시 콘크리트 피복의 빠른 손실을 일으켜 내부콘크리트와 철근으로의 열전달률

을 높여서 철근과 콘크리트의 온도를 상승시킨다. 이는 사용하중상태에 있는 구조물 부재의 하중저항능력을 감소시켜 구조물의 붕괴 또는 심각한 손상을 초래하게 된다(Ali 등, 1992; 염광수 등, 2009). 따라서, 화재시 폭발 및 내부콘크리트와 철근의 온도상승을 억제하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있으며, 폴리프로필렌(polypropylene, PP) 섬유(Nishida 등, 1995; Atkinson 등, 2004) 또는 강섬유(Purkiss 등, 1984; Lie 등, 1996; Suhaendi 등, 2006)를 사용한 많은 연구가 수행되어 폭발제어성능을 입증하였다. 김홍열 등(2007)은 폭발억제와 철근의 온도상승을 막기 위하여 폴리프로필렌섬유와 강섬유를 동시에 사용하는 섬유혼입공법을 적용하여 콘크리트의 압축강도, 탄성계수 및 비열 등의 열적특성을 평가하였다. Poon 등(2004)과 염광수 등(2009)은 섬유혼입공법을 적용한 고강도콘크리트 기둥에 대한 비재하 내하실험을 실시하여 콘크리트내 온도구배와 온도분포, 철근에서의 발생온도 및 폭발 등의 내화성능을 평가하였다.

본 기사에서는 프리캐스트 RC 슬래브의 내화성능을 평가하기 위하여 수행한 ISO 834 화재곡선을 적용한 비재하 내하실험 및 내화성능의 향상을 위하여 도입한 PP섬유(Polypropylen 섬유)의 혼입효과에 대하여 소개하였다.

1) 단국대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사

2) 단국대학교 토목환경공학과 박사과정 수료

\* E-mail : chchung5@dankook.ac.kr

## 2. 표준 화재온도-시간 곡선

화재로 인한 온도발생 과정은 화재의 발생원인, 발생지점의 공간 특성, 화재에 노출되는 연소 재료의 종류 등에 따라 발생온도, 지속시간, 온도-시간 이력 등이 차이는 있지만, 화재로 인해 온도가 증가하는 과정은 대표적으로 Fig. 1과 같으며, 화재 단계별 주요 내용은 Table 1과 같다. 주요 시방규정에서는 위에서 기술한 내용을 토대로 특성에 맞게 화재곡선을 제시하고 있다.

### 2.1 ISO 834 및 KS F 2257

ISO 834 곡선(ISO, 1975; Yang 등, 2008)은 주로 건축구조를 대상으로 규정되었지만, 구조물의 내화설계 시 온도조건으로 광범위하게 적용되고 있다. 국내에서 규정하고 있는 내화구조기준(KS F 2257)에서의 화재곡선도 ISO 834 화재곡선을 준용하여 적용하고 있다. ISO 화재곡선은 화재온도의 상승부와 하강부 각각에 대해서 Table

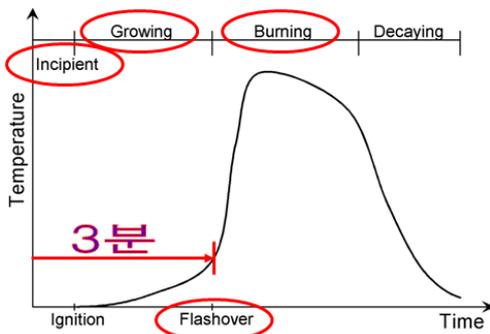


Fig. 1 화재로 인한 온도발생 과정

Table 1 화재 단계별 주요 내용

화재 단계	단계별 화재발생 내용
점화기	가연물 온도상승, 연기탐지기 작동, 사전예방 가능
성장기	가연물지배화재, 열탐지기, 소화기구로 진화가능, 대피가능
최성기	대류지배화재, 화염 및 연기 유출, 소방관활동으로 화재확산 방지, 사망

Table 2 ISO 화재곡선

상승부	$T(t) = 345 \log(8t + 1) + T_o$	
하강부	$T(t) = T_h - 10.417(t - t_h)$	$(t_h \leq 30)$
	$T(t) = T_h - 4.167 \left( 3 - \frac{t_h}{60} \right) (t - t_h)$	$(30 < t_h < 120)$
	$T(t) = T_h - 4.167(t - t_h)$	$(t_h \geq 120)$

2와 같이 규정하고 있다. 여기서,  $t$ : 화재 발생시간(min),  $T(t)$ : 시간  $t$ 에서의 온도(°C),  $T_o$ : 대기온도(20°C),  $t_h$ : 최대온도  $T_h$ 에 도달하는 시간(상승부)를 나타낸다.

### 2.2 ASTM E 119

미국에서 화재 시 구조물의 평가는 ASTM Standard E119(1985)의 규정에 맞추어 수행되는 실험에 의해서 이루어진다. 이 실험은 화재 시 저항에 대한 대부분의 빌딩 코드를 토대로 이루어져 일반적인 화재 저항 설계기준으로 확대하기에는 비경제적이고 큰 규모의 모델로 적용하기가 어렵다.

구조 부재의 화재-저항 특성은 화재 실험에 의해서 결정되며, 가장 폭넓게 사용되고 있는 표준적인 화재 실험 방법은 ASTM E 119이다. 내화 실험 시 온도는 ASTM E 119에서 제시하는 표준 온도-시간 곡선(Fig. 2)에 따라서 주어진 시간동안 상승시킨다. 이 규정된 시간-온도 관계는 실험 시작 후 5분쯤에 537.8°C에 도달하고, 10분쯤에 704.4°C, 1시간쯤에 926.7°C, 2시간쯤에 1010°C, 4시간쯤에 1093.3°C에 도달하도록 하고 있다. ASTM E 119에 따른 내화실험은 가장 신뢰할만한 방법이지만, 이 방법을 실용적으로 적용하기 위해서는 많은 시간과 비용이 요구된다.

### 2.3 RABT

화재의 발생온도와 지속시간은 여러 가지 원인에 의해 영향을 받는다. RABT 화재 곡선은 터널 내 화재 실험에서 얻어진 발생 온도와 지속시간의 관계를 통하여 결정되

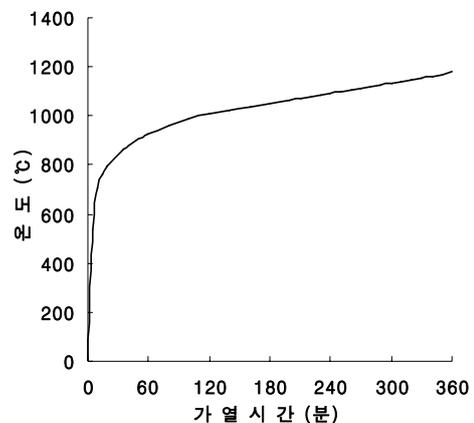


Fig. 2 ASTM E 119 표준 화재온도-시간 곡선

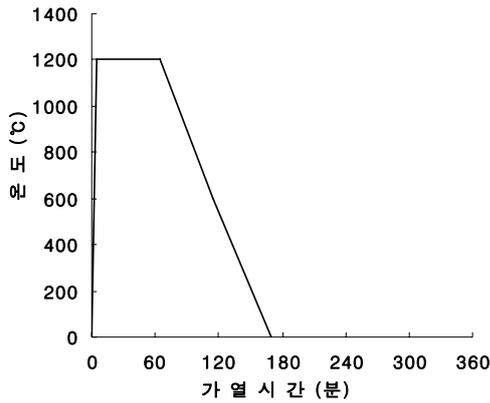


Fig. 3 RABT 표준 화재온도-시간 곡선

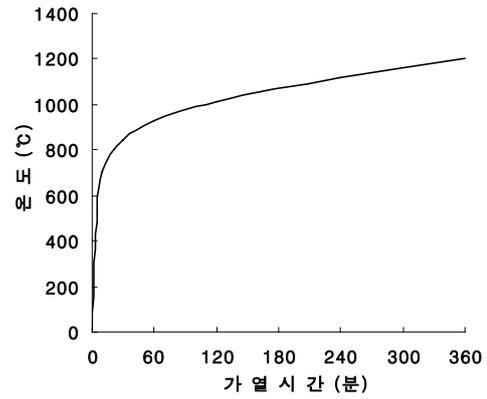


Fig. 4 BS 표준 화재온도-시간 곡선

었다. 화재로 인한 터널 내에서의 온도는 터널의 공간 및 규모, 환기의 유무, 화재 발생부 등에 따라서 발생하는 온도가 다르지만, 일반적으로 천장부나 측벽 상부가 가장 고온으로 된다. 터널구조에서 처음에는 ISO 등의 설계 온도-시간 곡선이 적용되었지만, 최근에는 터널 내 대형의 위험물 차량, 자동차, 대형 트레일러, 기차 및 지하철 등에 대한 실험화재실험에서 얻어진 결과로부터 결정된 Fig. 3과 같은 RABT 곡선 등이 제안되어 적용되고 있다. 이 설계 곡선은 상승시간 5분, 최고온도 1200°C, 지속시간 60분으로 터널과 같은 구조체에는 엄격한 조건에 해당한다. RABT 곡선은 독일에서 개발된 것으로 가열시작 5분 만에 최고온도에 도달하여 30~90분 동안 지속되며, 화재의 규모와 종류에 따라 다르게 적용한다.

2.4 탄화수소곡선(HC) 및 수정 탄화수소곡선(HCM)

탄화수소곡선(hydrocarbon curve)은 석유화학 공장의 위험물 저장지역 및 주유소의 기름 등의 화재를 가정한 화재 시간-온도 곡선으로 1970년대에 제시되어 일본 및 외국에서 많이 이용되고 있다. 탄화수소곡선은 위험물의 종류에 따라 화재지속시간을 60~180분으로 규정하며, 식 (1)과 같다.

$$T(t) = 1080(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}) + 20 \quad (1)$$

여기서,  $t$ : 화재시간(mim),  $T(t)$ : 화재시간  $t$ 에서의 온도(°C)를 나타낸다.

수정 탄화수소곡선(HCM)은 프랑스 등에서 이용되는 방법으로 탄화수소곡선(HC)의 최고온도 1,080°C를 1,280°C

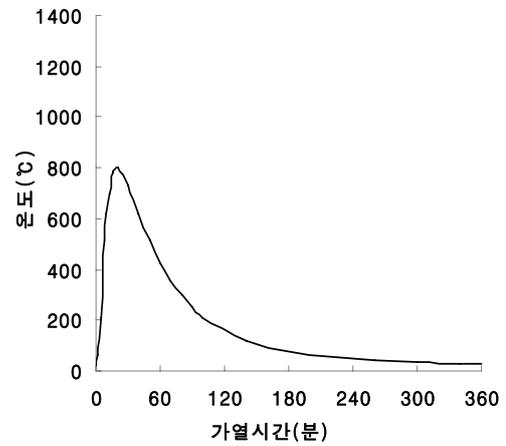


Fig. 5 BFD 표준 화재온도-시간 곡선

로 수정한 곡선이다.

$$T(t) = 1280(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}) + 20 \quad (2)$$

2.5 BS CODE

BS 규정에서는 Fig. 4와 같은 화재곡선에 의한 실험을 통해서 빌딩 구조물의 부재의 화재 저항능력을 평가한다.

2.6 BFD

BFD 곡선(Barnett, 2002)은 화재 발생 시 온도증가부와 온도강화부를 실제 화재곡선에 가깝도록 개발되었다. 이 화재곡선은 기존의 곡선보다는 형식이 간단하고, 자동차 화재, 건축물의 화재 등 다양한 화재에 대해 적용시킬 수 있으며, 형상은 Fig. 5와 같다.

### 3. 화재로 인한 단면 내 발생온도 평가 기준

국내의 경우 콘크리트는 내화성능이 우수한 재료로 각인되어 있으며, 건축법에서 정하고 있는 법정내화구조에서도 철근콘크리트 구조는 부재의 두께만 만족할 경우 내화구조로 인정되고 있다. 국내의 콘크리트 내화구조기준은 벽, 기둥 및 바닥판의 경우 일정두께 이상 확보하면 내화구조로 인정하고 있으며, 그 이외의 부분에서는 철근콘크리트 구조이면 모두 내화구조로 인정하고 있다. 반면에 일본의 경우는 사용되는 부위와 콘크리트 부재의 크기 등에 따라 내화성능을 달리하고 있으며 성능등급도 30분에서 3시간까지 세분화하여 분류하고 있다. 또한, 미국의 경우는 콘크리트 제작에 사용된 골재의 종류를 대분류로 하여 각 내화성능등급에 따라 피복두께를 정하고 있으며, 벽체의 경우는 콘크리트의 종류에 따라 각 내화성능등급별 부재의 두께를 정하고 있다.

ACI 216 Committe(1989)의 지침에서는 화재시간에 따라 부재 깊이별 온도분포에 대한 그래프를 단면형태 및 골재의 종류 등 여러 가지 조건에 따라 제시하고 있다. Fig. 6은 슬래브 구조에서의 화재시간에 따른 온도분포이다. 골재의 종류에 따라 각각 온도분포가 규정되어 있으며, Fig. 6에는 규산질(sliceous) 골재를 사용한 콘크리트 슬

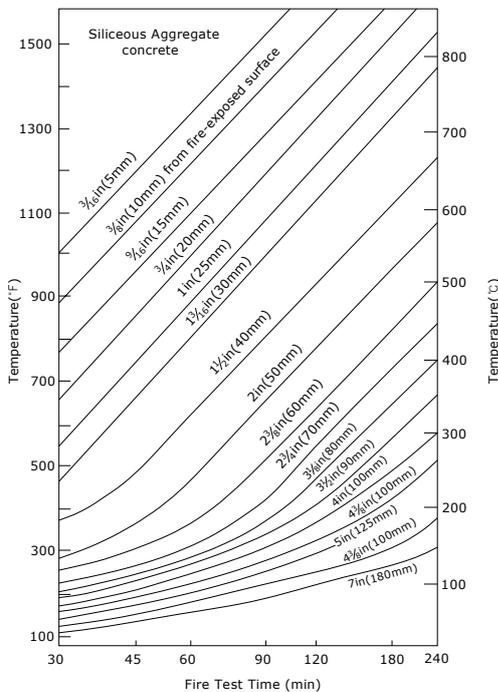


Fig. 6 슬래브 단면 내 온도분포 (ACI)

래브(0.9 × 0.9 m)의 온도분포를 예로 나타내었다.

EUROCODE 2(2004)에서는 부재의 형태에 따라 단면 내 온도분포를 규정하는데, 슬래브의 화재 노출표면으로부터 단면 깊이에 따른 온도변화는 Fig. 7과 같다. 그림에서 각 곡선에 명기된 기호 R은 표준화재등급으로서 Table 3에 간략히 기술하였다.

### 4. 화재 가열시험

#### 4.1 시험체 제작 및 시험수행

본 절에서는 일반 RC 슬래브와 내화성능 향상을 위해 PP섬유를 혼입한 RC 슬래브의 내화성능 비교를 위하여 수행한 화재 가열시험의 개략적인 과정을 소개하였다.

시험체는 폭 2000mm, 높이 2900mm, 두께 200mm의

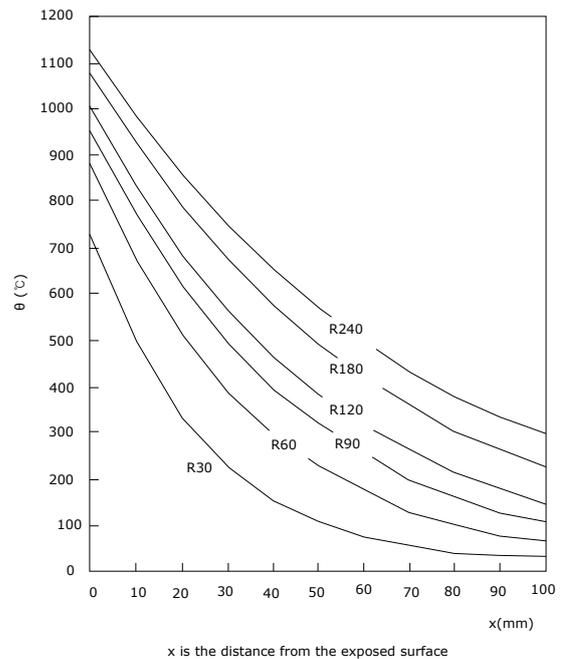


Fig. 7 슬래브 단면 내 온도분포 (Eurocode 2)

Table 3 단순 지지된 슬래브의 최소두께 및 최소뒀개

Standard fire resistnace	Minimum dimensions (mm)	
	slab thickness	axis distance
R20	60	10
R60	80	20
R90	100	30
R120	120	40
R180	150	55
R240	175	65



(a) 실험체 몰드 제작

(b) 철근 배근



(c) 열전대 설치

(d) PP섬유 혼입



(e) 콘크리트 타설

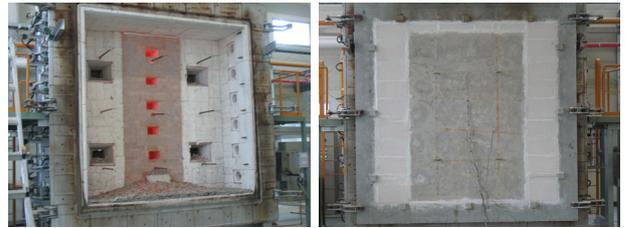
(f) 완성된 실험체

Fig. 8 실험체의 제작과정



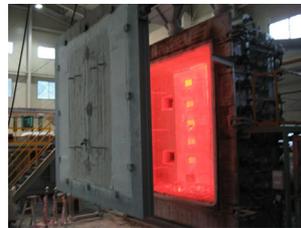
(a) 프레임과 실험체 접합

(b) 내화블록 조적



(c) 가열로 형상

(d) 설치 완료 후



(e) 가열실험 종료 후

Fig. 9 가열실험의 절차

크기로 제작하였으며, 내화실험 시 단면 내 발생온도 측정을 위해 표면에서부터 20, 50(주철근 위치), 100, 150(압축철근 위치), 180mm 지점에 열전대(K-type)를 매설하였다. 실험체의 제작과정은 Fig. 8에 나타내었다.

화재 가열실험은 2.1절 같은 ISO-834 화재곡선을 실험체의 한쪽 면에 적용하여 180분 동안 가열하는 방법으로 진행하였다. 가열시험의 진행과정은 Fig. 9에 나타내었다.

#### 4.2 실험결과

내화실험 시 가열과정에서 실험체의 가열면 반대쪽 표면부에 콘크리트 내부에서 발생하는 수증기압의 증가로 인해 Fig. 10에서와 같이 수분이 표출되었다. 가열실험 도중에 PP섬유가 혼입되지 않은 실험체에서는 폭발현상이 발생되었는데, 실험 종료 후에 폭발이 발생된 가열면의 표면 상태는 Fig. 11의 (a)와 같다. PP섬유가 혼입된 실험체에서는 내화실험이 종료될 때까지 폭발이 발생되지 않았으며, 실험 종료 후 가열면의 표면 상태는 Fig. 11의 (b)와 같다.

PP섬유가 혼입되지 않은 시험체와 0.05 vol.% 혼입된



(a) 수분 표출 형상

(b) 확대부의 형상

Fig. 10 가열실험 중 수분 표출



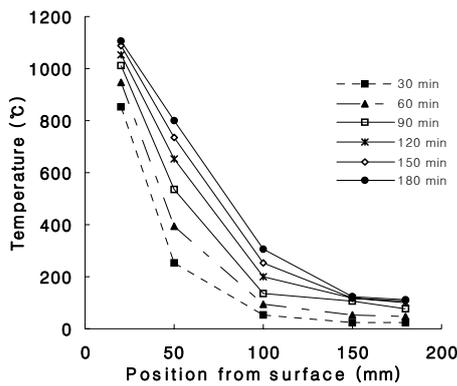
(a) PP섬유 미혼입

(b) PP섬유 0.05 vol.% 혼입

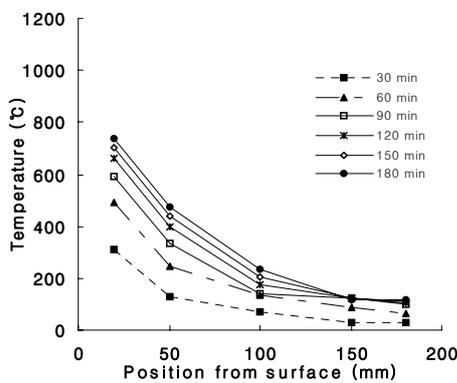
Fig. 11 내화실험 후 가열측 표면상태

시험체에 대하여 화재 시간에 따라 시험체 내부에 발생하는 온도를 비교하여 다음의 Fig. 12에 나타내었다. 앞의

참고문헌



(a) PP섬유 미혼입



(b) PP섬유 0.05 vol.% 혼입

Fig. 12 PP섬유 혼입에 따른 슬래브 내 발생온도 비교

Fig. 11에 나타난 바와 같이 PP섬유의 혼입에 의해 가열면 폭발 현상이 방지되었고, 그에 따라 Fig. 12에 나타난 바와 같이 가열면에 가까운 부재 내부의 발생온도가 현저히 낮추어 질 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 기사에서는 RC 슬래브의 내화성능 평가를 위한 가열 시험에서 사용되는 각 국의 표준 화재곡선에 대하여 정리하고, 이 중 ISO-834 화재곡선을 사용하여 수행한 화재 가열시험의 사례를 소개하였다.

본 기사에서 소개한 가열시험의 사례는 일반 RC 슬래브와 내화성능 향상을 위해 PP섬유를 혼입한 RC 슬래브의 내화성능 비교를 위하여 수행한 실험으로, PP섬유의 혼입에 의해 가열면 폭발현상이 방지되고, 이로 인해 부재 내의 온도상승을 현저히 저감할 수 있는 것으로 나타났다.

1. 김홍열, 채한식, 전현규, 염광수 (2007), Fiber Cocktail을 혼입한 고강도콘크리트의 고온시 압축강도 특성 및 모델 제시에 관한 실험적 연구, 한국콘크리트학회 학술발표논문집 pp.605-608.
2. 염광수, 전현규, 김홍열 (2009), 섬유혼입공법을 적용한 고강도콘크리트 기둥의 비재하 내하실험, 한국콘크리트학회논문집, Vol. 21, No. 4, pp.465-471.
3. 한국산업규격 (2005), 건축 구조 부재의 내화시험방법-일반 요구사항 KS F 2257-1, 한국표준협회.
4. ACI Committee 216 (1989), Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements, ACI 216R-89, American Concrete Institute, Detroit.
5. 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.
6. American Society for Testing and Materials (1985), Standard Methods of Fire Tests of Building Constructions and Materials, Designation E119-83, Philadelphia, PA.
7. Atkinson, T. (2004), Polypropylene Fibers Control Explosive Spalling in High- Performance Concrete, Concrete, Vol. 38, No. 10, pp.69-70.
8. Barnett, C. R. (2002), BFD Curve-A New Empirical Model for Fire Compartment Temperatures, Fire Safety Journal, Elsevier Science.
9. Chul Hun Chung, Jungwee Lee, and Hyun Jun Kim, "Evaluation of Fire Performance of Polypropylene Fiber RC Slabs," KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 17, No. 5, 2013, pp.1040-1050.
10. EUROCODE 2 (2004), Design of Concrete Structures- Part 1-2 : General rules - Structural Fire Design.
11. ISO (1975), Fire Resistance Tests-Elements of Building Construction, International Standard ISO 834, Geneva.
12. Lie, T. T., and Kodur, V. K. R. (1996), Thermal and Mechanical Properties of Steel-Fibre-Reinforced Concrete at Elevated Temperatures, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 23, pp.511-517.
13. Nishida, A., Ymazaki, N., Inoue, H., Schneider, U., and Diederichs, U. (1995), Study on the Properties of High-Strength Concrete with Short Polypropylene Fibre for Spalling Resistance, Proceedings of International Conference on Concrete under Severe Conditions, CONSEC'95, Vol. 2, Sapporo, Japan, pp.1141-1150.
14. Poon, C. S., Shui, Z. H., and Lam, L. (2004), Compressive Behavior of Fiber Reinforced High-Performance Concrete Subjected to Elevated Temperatures, Cement and Concrete Research, Vol. 34, No. 12, pp.2215-2222.
15. Purkiss, J. A. (1984), Steel Fibre Reinforced Concrete at Elevated Temperatures, International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 6, No. 3, pp.179-184.
16. Suhaendi, S. L., and Horiguchi, T. (2006), Effect of Short Fibers on Residual Permeability and Mechanical Properties of Hybrid Fibre Reinforced High Strength Concrete after Heat Eposition, Cement and Concrete Research, Vol. 36, pp.1672-1678.
17. Yang, H., Han, L. H., and Wang, Y. H. (2008), Effects of heating Loading Histories on Post-Fire Cooling

- Behaviour of Concrete-Filled Steel Tubular Columns,  
Journal of Constructional Steel Research, 64, pp.556-570.
18. Yang, H., Han, L. H., and Wang, Y. H. (2008), Effects  
of heating Loading Histories on Post-Fire Cooling  
Behaviour of Concrete-Filled Steel Tubular Columns,  
Journal of Constructional Steel Research, 64, pp.556-570.

담당 편집위원: 이정휘  
(단국대학교 토목환경공학과 교수)  
jwhee2@dankook.ac.kr