

반단면 프리캐스트 패널을 적용한 RC 슬래브의 내화성능 평가

Evaluation of Fire Performance of RC Slabs with Half-Depth Precast Panels

정철헌* · 임초롱** · 김현준*** · 주상훈****

Chung, Chul-Hun · Im, Cho-Rong · Kim, Hyun-Jun · Joo, Sang-Hoon

Abstract

The fire performance of RC slabs with half-depth precast panel after exposure to the ISO-834 fire standard without loading has been experimentally investigated. During heating, according to the ISO 834 fire curve, concrete spalling was observed for concrete without PP(polypropylene) fibers. No spalling occurred when heating concrete containing PP fibers. The maximum temperature of RC slabs with PP fibers with half-depth precast panel was lower than that of concrete without PP fibers. The ultimate load after cooling of the RC slabs that were not loaded during the furnace tests was evaluated by means of 3 points bending tests. The ultimate load of the RC slabs without PP fibers showed a considerable reduction (around 32.5%) of the ultimate load after cooling if compared with of RC slabs with PP fibers. The ultimate load of the RC slabs with half-depth precast panel with PP fibers is higher than that of a full-depth RC slabs with PP fibers. Also, the addition of PP fibers and the use of half-depth precast panel improve fire resistance.

Keywords : fire performance, PP(polypropylene) fiber, explosive spalling, fire curve, half-depth precast panel, ultimate load

요 지

본 연구에서는 반단면 프리캐스트 패널을 갖는 RC 슬래브에 대해서 비재하 상태에서 ISO-834 화재곡선을 적용한 가열시험을 수행하였다. 가열시험시 PP섬유 혼입되지 않은 실험체에서는 콘크리트의 폭발이 발생되고, PP섬유가 혼입된 실험체에서는 폭발이 발생되지 않았다. PP섬유가 혼입된 반단면 프리캐스트 패널을 적용한 RC 슬래브의 발생온도는 PP섬유가 혼입되지 않은 경우보다 낮은 수준을 보였다. 화재 가열실험 후 상온상태로 냉각된 RC 슬래브의 극한하중을 평가하기 위하여 3점 휨실험을 수행하였다. 실험결과, PP섬유가 혼입되지 않은 RC 슬래브는 PP섬유가 혼입된 실험체와 비교해 약 32.5% 정도 극한하중이 감소하는 결과를 보였다. 또한, PP섬유가 혼입된 반단면 프리캐스트 패널을 갖는 RC 슬래브의 극한하중은 PP섬유가 혼입된 전두께 RC 슬래브보다 큰 수준을 보였다. 이상의 결과에서 PP섬유의 혼입과 반단면 프리캐스트 패널 적용시 화재에 대한 저항능력이 향상됨을 확인하였다.

핵심용어 : 내화성능, 폴리프로필렌(PP) 섬유, 폭발, 화재곡선, 반단면 프리캐스트 패널, 극한하중

1. 서 론

구조재료 중에서 콘크리트는 화재에 대한 저항능력이 우수한 재료특성을 갖고 있지만, 고온 환경 하에서의 거동은 보통의 온도조건하에서의 거동과는 큰 차이가 있다. 철근콘크리트 구조물은 피복두께가 철근의 온도상승을 억제시키기 때문에 일반적으로 내화구조로서 인정받고 있지만, 화재 발생으로 인해 콘크리트가 고온의 환경에 노출되면 화재에 노출된 콘크리트의 표면부가 떨어져 나가는 폭발이 발생하는데, 폭발은 화재로 인해 콘크리트 내에서 온도가 증가하여 콘크리트내 수증기 및 수분의 내부압력이 증가하여 발생하는 현상이다. 이로 인해서 내부 콘크리트와 철근으로의 열전달물

을 높여서 철근과 콘크리트의 온도가 급격히 상승하게 된다. 이는 사용중상태에 있는 구조물 부재의 하중저항능력을 감소시켜 구조물의 붕괴 또는 심각한 손상을 초래하게 된다 (Ali, 1992; 염광수 등, 2009). 화재시 폭발 및 내부콘크리트와 철근의 온도상승을 억제하기 위하여 다양한 연구가 진행되고 있으며, 폴리프로필렌(polypropylene)섬유(Nishida 등, 1995; Atkinson, 2004) 또는 강섬유(Purkiss, 1984; Lie 등, 1996; Suhaendi 등, 2006)를 사용한 많은 연구가 수행되어 폭발저어성능을 입증하였다. 김홍열 등(2007)은 폭발억제와 철근의 온도상승을 막기 위하여 폴리프로필렌섬유와 강섬유를 동시에 사용하는 섬유혼입공법을 적용하여 콘크리트의 압축강도, 탄성계수 및 비열 등의 열적특성을 평가하였다.

*정회원 · 교신저자 · 단국대학교 토목환경공학과 교수 (E-mail : chchung5@dankook.ac.kr)

**단국대학교 토목환경공학과 석사과정 (E-mail : dlachfd@dankook.ac.kr)

***정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 박사과정 (E-mail : rolandgarros@hanmail.net)

****정회원 · (주)케이씨산업개발 기술연구소 차장 (E-mail : smeared@paran.com)

Poon 등(2004)과 염광수 등(2009)은 섬유혼입공법을 적용한 고강도콘크리트 기둥에 대한 비재하 내화실험을 실시하여 콘크리트내 온도구배와 온도분포, 철근에서의 발생온도 및 폭렬 등의 내화성능을 평가하였다.

화재에 의한 손상을 정량적으로 평가하기 위해서는 화재온도 뿐만 아니라 화재지속시간에 대한 고려가 필요한데, 내화설계에 대한 각 국의 주요 규정에서는 구조물의 여건에 따라 화재로 인한 표준적인 온도-시간 곡선을 규정하고 있다. 대표적인 화재곡선으로 ISO 834 곡선(ISO, 1975; Yang 등, 2008)은 주로 건축구조를 대상으로 규정되었지만, 구조물의 내화설계시 온도조건으로 광범위하게 적용되고 있다. 국내에서 규정하고 있는 내화구조기준(KS F 2257, 2005)에서의 화재곡선도 ISO 834 화재곡선을 준용하여 적용하고 있다.

본 연구에서는 지하 공동구(전력구) 박스 구조물의 내화성능을 평가하였으며, 지하 공동구에 발생하는 화재는 주로 전력선 케이블이 연소재료이나, 현재 국내외에서 제시된 화재곡선 중에서 이를 정확히 모사하기는 매우 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 ISO 834 화재곡선을 적용하여 가열실험을 수행하여 단면깊이별 발생온도의 특성을 평가하였다. 또한, 지하 공동구 박스 구조물의 내부에서 화재가 발생하는 경우에 대한 내화성능이 평가되어야 하나 실험실 여건상 박스 구조물에 대한 가열실험이 어려워 벽체부를 모사한 RC 슬래브 실험체에 대한 가열실험을 수행하였다. 또한, 경제성을 고려하여 공동구의 내화성능 확보를 위해 전 두께에 PP섬유를 혼입하지 않고, 반단면 프리캐스트 패널에만 PP섬유를 혼입하고 나머지 벽체부에는 일반 콘크리트를 적용하는 시스템을 제안하였다. 가열실험을 위해서 전 두께 RC 슬래

브 실험체와 반단면 프리캐스트 패널을 적용한 RC 슬래브 실험체를 제작하였다. 이들 실험체는 내화성능 향상을 위해 PP섬유를 혼입한 경우와 혼입하지 않은 경우 각각을 제작하였다. 반단면 프리캐스트 패널을 갖는 실험체는 먼저 PP섬유가 혼입된 패널을 제작하고, 나머지 슬래브 두께는 PP섬유가 혼입되지 않은 현장타설 일반 콘크리트로 제작하였다.

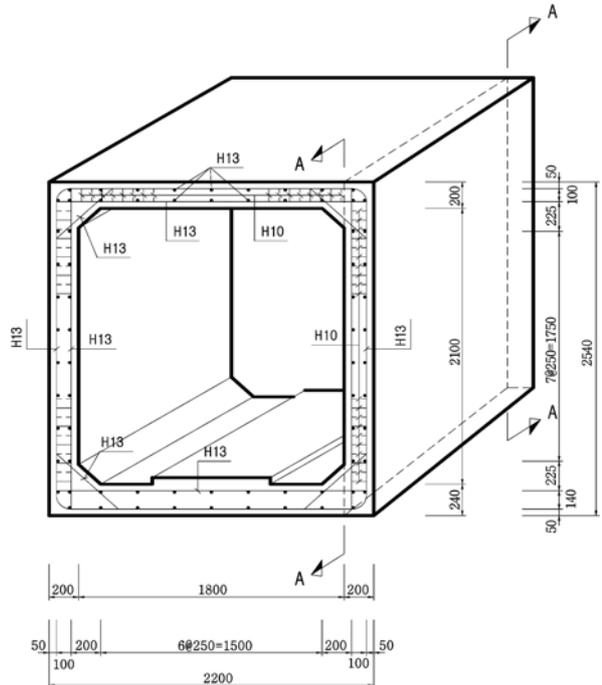
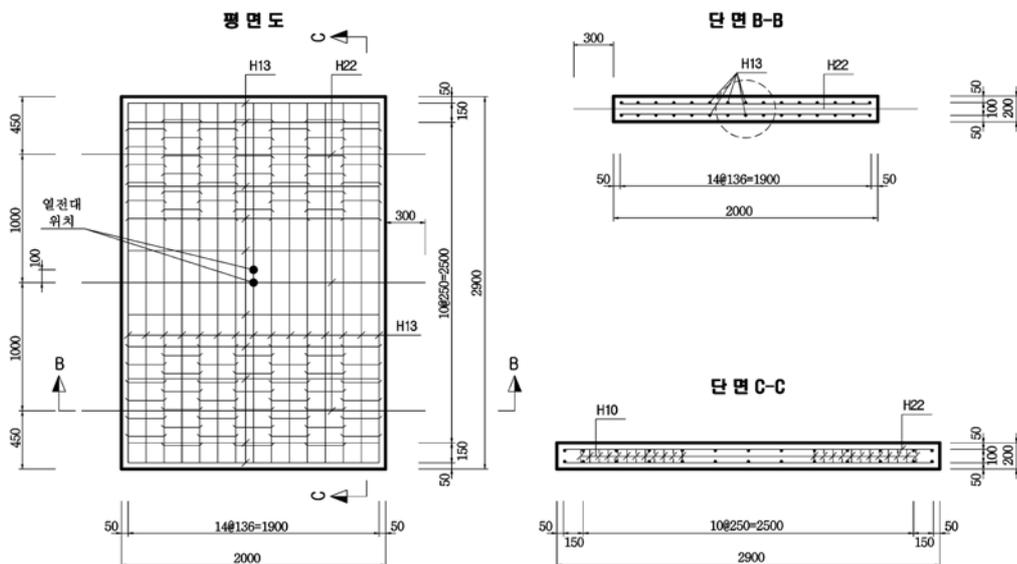
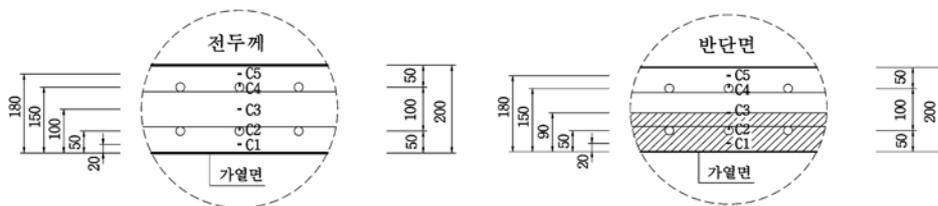


그림 1. 지하 공동구 박스 구조물의 형상



(a) 실험체의 단면형상



(b) 온도측정을 위한 열전대계 부착위치

그림 2. 실험체의 단면형상 및 온도 측정위치

가열실험을 통해서 전 두께 및 반단면 패널을 적용한 RC 슬래브의 발생온도 특성을 평가하고, 가열실험이 완료된 실험체는 상온상태로 냉각한 후 구조실험을 수행하여 화재 손상 후 구조내력잔존 내력을 평가하였다. 또한 가열실험을 수행하지 않은 일반 실험체에 대한 구조실험을 수행하여 화재 전후 각 실험체의 구조내력을 비교분석하였다.

2. 화재 가열실험 및 결과분석

2.1 실험체 제작

실험체는 지하공동구에 적용되는 프리캐스트 박스 형상의 압거구조물을 대상으로 하였으나, 현재 국내에서 운용되고 있는 화재시험실에 설치된 수직 및 수평 가열로를 이용하여 박스 구조물 내부에 가열시험을 수행하기가 어렵다. 따라서 본 실험에서는 그림 1과 같은 지하 공동구 박스 구조물의 측면을 그림 2와 같은 슬래브 실험체로 모사하여 내화실험체를 제작하였다. 실험체의 두께 및 단면내 철근배근은 실제 지하 공동구 박스 구조물의 설계단면을 동일하게 적용하였다. 그림 2의 (b)에 나타난 내화실험체에서 내화실험시 단면내 발생온도의 측정지점은 표면에서부터 20, 50(주철근), 100(반단면패널 적용부재 : 90 mm), 150(압축철근), 180 mm 5개소로서 이들 지점에 열전대(K-type)를 매설하였다. 실험체의 제작과정과 내화실험시 온도측정 데이터의 손실을 감안하여 그림 2의 (a)에서와 같이 2개소에 열전대를 설치하였다. 실험체의 종류는 표 1과 같고, 보통 콘크리트 실험체와 온도발생에 따른 콘크리트의 폭렬 방지 및 단면내 온도발생을 억제하기 위해서 PP섬유를 혼입한 실험체를 제작하였다. 화재로 인한 온도하중을 받은 경우와 온도하중을 받지 않은

표 1. 실험체의 종류

실험체 종류	PP섬유 혼입율	실험체 개수	비고
전 두께 프리캐스트 RC 슬래브	0.0 vol.%	2	가열 실험체 : 3개 비가열 실험체 : 3개
	0.10 vol.%	2	
반단면 패널 적용 RC 슬래브	0.10 vol.%	2	

경우의 내화 및 구조성능을 비교하기 위하여 각 변수별로 실험체를 2개씩 제작하였다.

표 1에서 전 두께 프리캐스트 RC 슬래브 실험체는 그림 3과 같이 일반적으로 적용되는 전두께(200 mm) 프리캐스트 지하 공동구를 모사한 경우이고, 반단면 프리캐스트 패널을 적용한 실험체는 그림 4와 같이 박스 내부의 상부플랜지와 벽체 상단부(벽체 높이의 1/2)에 패널(90 mm)을 적용한 지하 공동구를 모사한 경우이다.

2.2 재료특성

실험체 제작에 사용된 PP섬유의 특성을 표 2에 정리하였고, 설계강도가 35 MPa인 콘크리트의 배합특성은 표 3과 같다. 실린더 표준공시체의 28일 강도는 PP섬유가 혼입된 경우와 혼입되지 않은 경우 모두 약 30 MPa로 측정되었다. 콘크리트 양생시 현장여건상 증기양생실에서 양생하지 못하고 대기중에 천막을 덮어 증기양생을 실시하였다. 이로 인해 대기양생에 가까운 상황에서 부실하게 양생이 실시되어 설계강도보다 낮게 평가된 것으로 판단된다. 다만 타설횡수별로 각각 제작된 실린더 공시체 강도는 큰 차이를 보이지 않고 30 MPa과 유사한 수준을 보여 가열실험 및 구조실험시

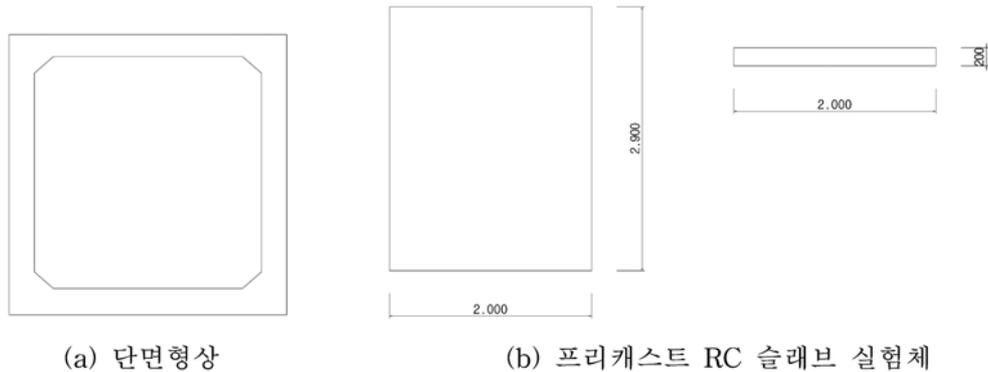


그림 3. 전 두께 프리캐스트 지하 공동구

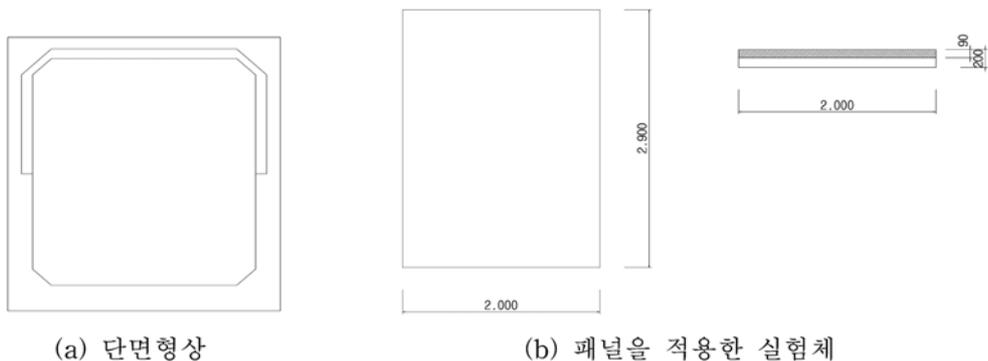


그림 4. 반단면 프리캐스트 패널을 적용한 지하 공동구

표 2. PP섬유의 재료특성

Polypropylene fibers	
밀도 (g/cm ³)	0.91
직경 (μm)	21.6~39.4
길이 (mm)	5~10
인장강도 (MPa)	328.3~367.7
탄성계수 (GPa)	3.0~3.2

설계강도 보다 낮은 콘크리트 강도로 인한 오차는 크지 않은 것으로 판단된다.

2.3 화재 가열실험

ISO 834 곡선(ISO, 1975; Yang 등, 2008)은 주로 건축 구조를 대상으로 규정되었지만, 구조물의 내화설계시 온도조건으로 광범위하게 적용되고 있는데, 국토해양부 고시 제 2005-122호에서 규정한 ISO 834의 시험(비재하시험)에 의하여 기동과 보에서 주철근의 온도가 평균 538°C, 최고 649°C 이하의 성능기준을 보유하고 있는 것으로 사용하도록 규정되었다. 그림 5에 나타낸 ISO 834 화재곡선은 식 (1)과 같이 규정하고 있다.

$$T(t) = 345 \cdot (8t+1) + T_0 \quad (1)$$

t : 화재 발생시간(min)

$T(t)$: 시간 에서의 온도(°C)

T_0 : 대기온도(20°C)

화재 가열실험(내화실험)은 식 (1)과 같은 ISO 384 화재 곡선을 실험체의 한쪽면에 적용하여 180분 동안 가열하였다. 가열실험의 절차는 그림 6으로서 (a)는 가열실험을 위해서

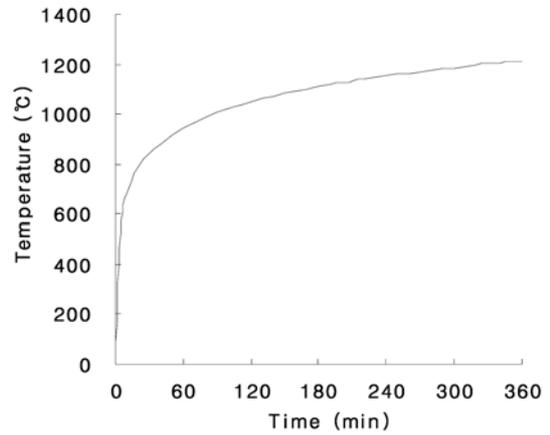


그림 5. ISO 834 표준 화재곡선

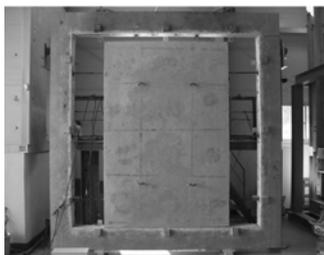
실험체를 프레임에 고정시키는 전경이고, (b)와 같이 실험체와 프레임 사이 공간은 내화블록 벽돌로 밀폐시킨 후, (d)와 같이 가열로에 프레임을 설치한다. (e)는 가열실험이 완료된 이후에 실험체가 설치된 프레임을 가열로에서 떼어내는 전이다.

2.4 결과분석

그림 7은 전 두께 프리캐스트 슬래브 실험체의 단면깊이 별 발생온도의 시간이력이다. (a)에서 보면, 섬유가 혼입되지 않는 경우에는 내화중을 받는 표면에서 20 mm 깊이의 콘크리트 온도는 내화곡선 온도와 거의 유사한 수준을 보이는데 이는 내화실험 도중에 폭발이 발생하여 이 부분 콘크리트가 탈락되었기 때문이며, 단면내 깊이가 증가할수록 발생온도가 현격하게 감소하다가 150 mm 이상 깊이부터는 수렴하는 경향을 보였다. PP섬유가 0.10 vol.% 혼입된 실험

표 3. 배합특성 (kg/m³)

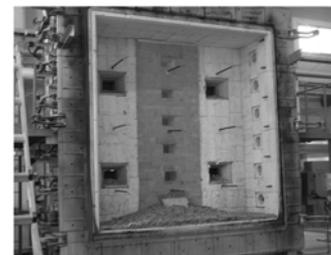
W/C(%)	S/a(%)	Water	Cement	Sand	Gravel	Admixture	PP fibers
38.5	38.9	170	442	692	1113	3.49	0.45~1.82



(a) 프레임과 실험체 접합



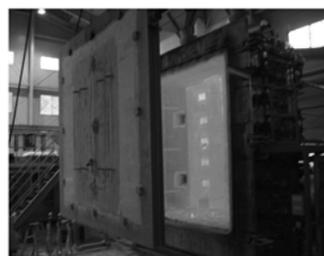
(b) 내화블록 조적



(c) 가열로 형상

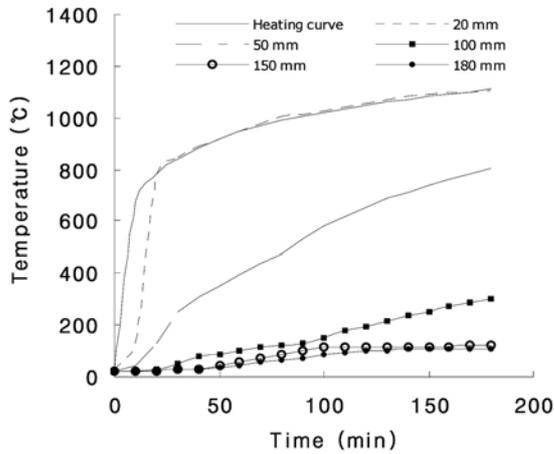


(d) 설치 완료 후

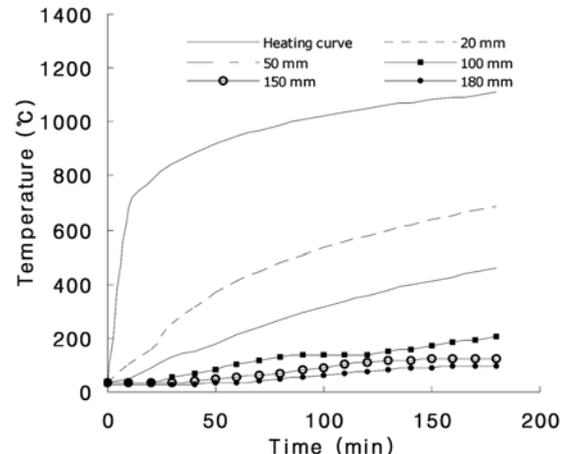


(e) 가열실험 종료 후

그림 6. 가열실험의 절차



(a) PP첨유 혼입률 : 0.0vol.%



(b) PP첨유 혼입률 : 0.10vol.%

그림 7. 단면깊이별 발생온도의 시간이력(전 두께 프리캐스트 시험체)

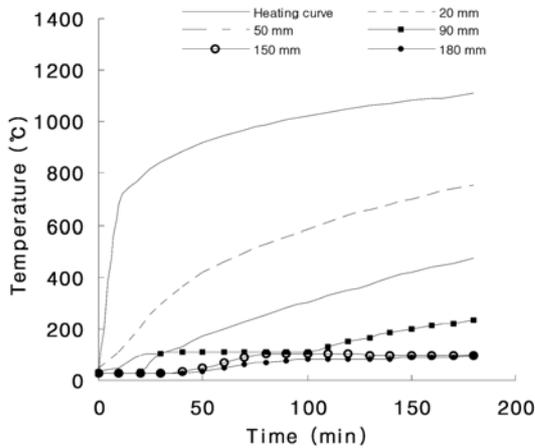


그림 8. 단면깊이별 발생온도의 시간이력(반단면 패널 적용 시험체)

체의 경우는 가열실험 종료시까지 폭발이 발생되지 않아 섬유 혼입이 없는 경우에 비해서 20 mm 깊이에서도 발생온도가 현격히 감소되는 경향을 보이며, 150 mm 이상 깊이에서는 온도 감소량이 현저히 둔화되었다.

PP첨유가 0.10vol.% 혼입된 반단면 프리캐스트 패널 부재를 적용한 슬래브 시험체에서의 발생온도의 시간이력은 그림 8과 같다. 이 시험체는 부재의 전체 두께 중에서 프리캐스트 패널부에는 PP 첨유가 혼입되고, 두께의 나머지 부분에는 PP첨유가 혼입되지 않았다. 내화실험시 가열시험시 가열면은 패널부의 표면에 해당하며, 실험결과에서 단면의 깊이는 패널 표면으로 부터의 수치이다. 그림에서 보면 PP첨유가 혼입된 패널부 단면내에서 발생온도가 PP첨유가 혼입되지 않은 전 두께 프리캐스트 부재(그림 7의 (a) 참조)에 비해서 현저하게 낮은 수준을 보여주고 있다. 또한, 전 두께 프리캐스트 시험체에 섬유가 혼입된 경우(그림 7의 (b))와 비교해서 발생온도가 유사한 수준을 보였다. 따라서 전체 두께에서 일정 부분만 PP첨유를 혼입하여도 전 두께에 PP첨유를 혼입하는 경우와 유사한 수준의 내화성능을 발휘하는 것으로 판단된다.

그림 9는 PP첨유 혼입률이 0.10 vol.%인 반단면 패널 적용 시험체의 내화시간대별로 발생온도를 가열면으로 부터의 단면 깊이에 따라 나타낸 그림이다. 그림에서 보면 단면깊이 150 mm 깊이까지는 발생온도가 감소하다가 150 mm 이상부터는

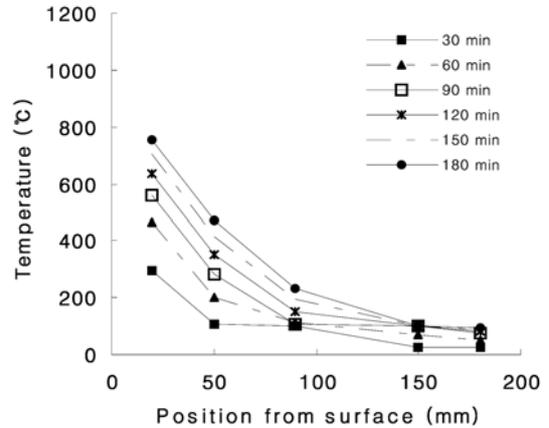


그림 9. 반단면 시험체의 내화시간별 단면깊이에 따른 발생온도

내화시간에 상관없이 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

3. 가열 전 · 후 구조실험 및 결과분석

3.1 구조실험

ISO 834 화재곡선에 따라 내화실험이 수행된 경우와 내화실험이 수행되지 않은 일반 시험체의 구조실험을 수행하였다. 여기서 내화실험이 수행된 시험체는 상온으로 냉각된 이후에 구조실험을 수행하였다. 휨 파괴를 유도하기 위하여 슬래브의 양단을 단순지지 조건으로 하여 화재로 인한 손상을 받은 상태에서 잔존강도를 평가하였다. 본 실험을 통해서 가



그림 10. 구조실험 전경

열 전·후 구조체의 내력을 측정하고, 온도하중이 내력에 미치는 영향을 비교분석하였다. 구조실험은 1000 kN 용량의 가력기를 이용하여 중앙부에서의 처짐을 측정하였으며, 구조 실험의 전경은 그림 10과 같다.

3.2 결과분석

3.2.1 화재 가열 전 실험체

화재 가열실험 수행되지 않은 전 두께 슬래브 실험체(PP 섬유 혼입률 : 0, 0.10 vol.%)와 반단면 패널을 적용한 슬래브 실험체(PP섬유 혼입률 0.10 vol.%)의 구조실험을 통해서 측정된 슬래브 중앙부에서의 하중-처짐 곡선은 그림 11과 같다. PP섬유가 0.10 vol.% 혼입된 전 두께 실험체의 최대내력(350.4 kN)은 PP섬유가 혼입되지 않은 실험체의 최대내력(376.0 kN)의 약 93.2% 수준을 보였다. PP섬유가 혼입되는 경우에는 전 두께 실험체와 반단면 패널을 적용한 실험체의 최대내력은 동등한 수준을 보여 반단면 패널이 구조체의 합성된 부재로 거동함을 확인하였다. PP섬유가 혼입된 실험체는 PP섬유가 혼입되지 않은 실험체에 비해서 최대내력이 약 7% 정도 감소되는 결과를 보였다.

3.2.2 화재 가열 후 실험체

화재 가열실험을 수행한 이후에 실험체가 상온으로 냉각된 상태에서 잔존내력을 평가하기 위한 구조실험을 수행하여 중앙부에서의 하중-처짐 관계를 그림 12에 정리하였다. 가열 후 PP섬유가 혼입되지 않은 전 두께 실험체의 최대내력은

253.8 kN으로 PP섬유가 혼입된 전 두께 실험체의 최대내력(316.9 kN)의 약 80% 수준이다. 가열 후 PP섬유가 혼입된 반단면 패널을 적용한 실험체의 최대내력은 350.6 kN으로 PP섬유가 혼입된 전 두께 실험체의 최대내력(316.9 kN)의 약 111% 수준을 보였다. 따라서 전체 두께 중 일정 부분만 내화성능이 향상된 반단면 패널을 적용하는 경우도 전체 두께에 대해 내화성능을 향상시키는 경우와 유사한 수준 이상의 내화성능 향상을 도모할 수 있는 것으로 판단된다. 이는 그림 7과 그림 8의 화재시 단면깊이별 발생온도에서 보면 가열면에서부터의 단면깊이가 100 mm 이상 되면 화재로 인한 온도가 크게 발생되지 않는 것에서 확인할 수 있다.

3.2.3 화재 가열 전·후 비교분석

화재 가열 전·후 실험체에 대한 구조실험에서 측정된 하중-처짐 곡선을 그림 13에 비교하였다. 그림 13에서 보면 전 두께 및 반단면 패널을 적용한 실험체의 화재 가열 전·후의 하중-처짐 곡선을 비교하였다. 전 두께 실험체의 경우 PP섬유가 혼입되지 않으면 화재 손상후에 약 32.5% 정도 최대내력이 감소하지만, PP섬유가 혼입된 경우에는 약 9.6% 정도 최대내력이 감소하였다. 그리고 PP섬유가 혼입된 반단면 패널을 적용한 실험체의 경우에는 화재 손상 후에 강성의 감소는 있지만, 화재 손상 전과 동등 수준의 최대내력을 보유하는 것으로 나타났다. 화재로 인한 콘크리트의 발생온도가 증가하면 콘크리트의 응력-변형률 곡선에서 초기강성과 최대강도가 감소하는데, EUROCODE 2(2004)에서는 단면내

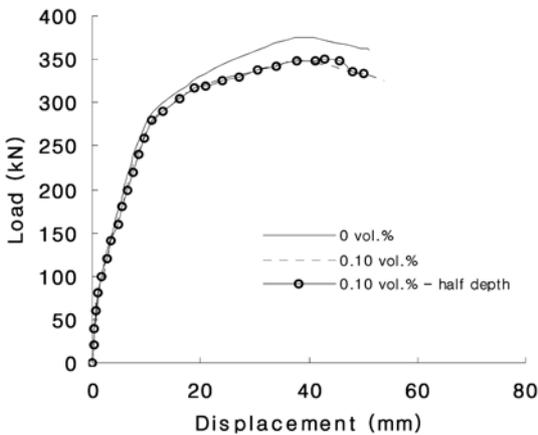


그림 11. 가열 전 실험체의 하중-처짐 곡선

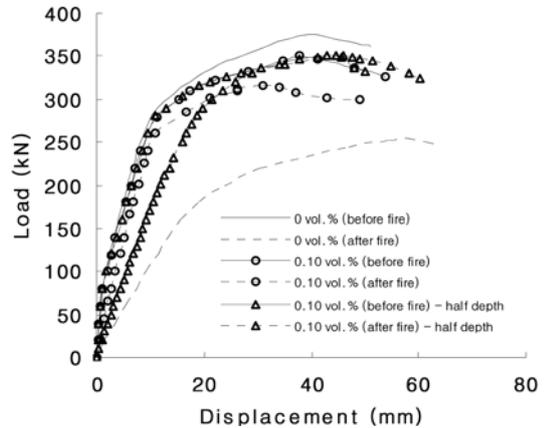


그림 13. 가열 전·후 하중-처짐 곡선의 비교

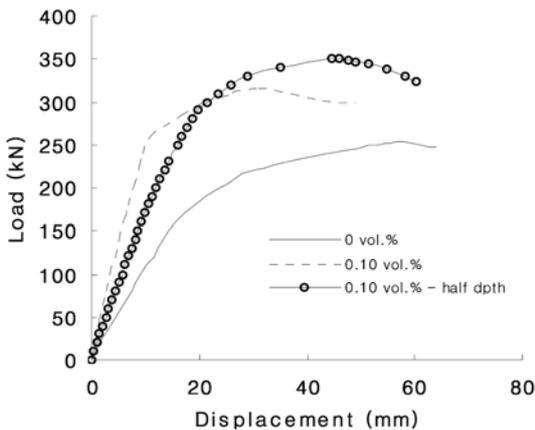


그림 12. 가열 후 실험체의 하중-처짐 곡선

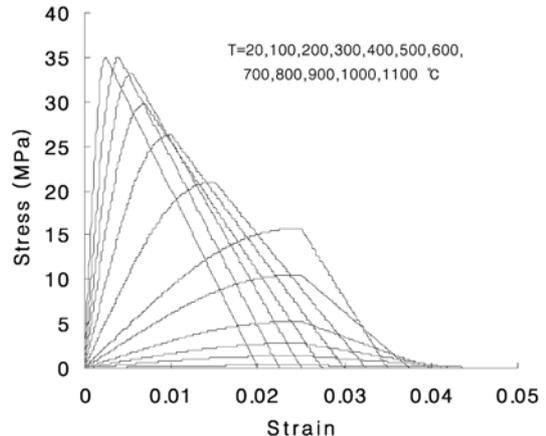


그림 14. 온도증가에 따른 콘크리트 모델

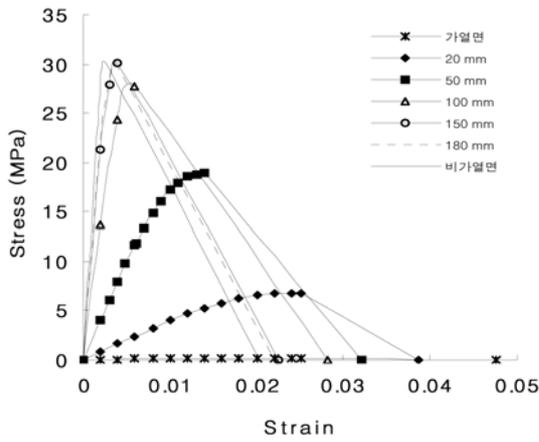


그림 15. 발생온도에 따른 반단면 패널 실험체의 단면깊이별 응력-변형률 곡선

발생온도에 따른 강성감소를 고려하기 위하여 온도변화에 따른 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 식 (2)와 같이 제시하고 있다. 식 (2)는 그림 14에서와 같이 를 기준으로 응력-변형률 곡선을 구분하는데, 변형률이 보다 작거나 같을 때에는 식 (2a)와 같이 나타내고, 그 이후에는 식 (2b)와 같이 최대 변형률까지 선형으로 감소한다.

$$f = \frac{3\epsilon f_{c,\theta}}{\epsilon_{c1,\theta} \left(2 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)} \quad \epsilon \leq \epsilon_{1c,\theta} \quad (2a)$$

선형으로 모델 (2b) $\epsilon_{c1,\theta} < \epsilon \leq \epsilon_{cu1,\theta}$

- $f_{c,\theta}$: 온도가 $\theta^\circ\text{C}$ 일 때의 콘크리트 압축강도(MPa)
- f_{ck} : 상온에서의 콘크리트 압축강도(MPa)
- $\epsilon_{c1,\theta}$: 온도가 $\theta^\circ\text{C}$ 일 때의 $f_{c,\theta}$ 에 대응하는 변형률
- $\epsilon_{cu1,\theta}$: 최대 변형률

그림 14에서 20°C 일 때의 모델은 화재 전 상온에서의 콘크리트 모델이며, 나머지는 화재로 인한 발생온도 증가에 따른 강성감소를 고려한 콘크리트의 모델을 나타낸 것으로 단면내에서 발생온도가 증가할수록 콘크리트의 강성 감소가 뚜렷하게 나타나고 있다. 이를 적용하여 내화실험에서 측정된 단면내 발생온도에 따른 PP섬유를 혼입한 반단면 패널을 적용한 실험체의 단면깊이별 응력-변형률 곡선을 산정하면 그림 15와 같다. 전반적으로 단면내 발생온도가 증가하면 응력-변형률 곡선에서 초기강성과 최대강도가 감소하는데, 이와 같은 영향으로 화재후에 실험체의 하중-처짐 곡선에서 강성감소(그림 13 참조)가 발생하는 것으로 판단된다.

표 4에 가열시험에서 측정된 발생온도를 ACI 216(1989)

표 4. 반단면 패널 부재의 극한모멘트 비교

가열시험	섬유혼입률 (vol.%)	이론값 (kN·m)	실험값 (kN·m)
×	0.10	126.4	184.0
○	0.10	114.8 (화재 중) 124.8 (화재 후)	- 184.1 (화재 후)

규정에 적용하여 단면의 저항모멘트를 계산한 결과(이론값)와 가열시험이 끝나고 실험체를 상온으로 냉각시킨 후에 구조실험을 수행하여 측정된 최대하중시 발생하는 최대모멘트(실험값)를 비교하였다. ACI 216(1989)에서는 온도증가에 따른 콘크리트의 압축강도 변화를 골재의 종류와 화재시 하중 재하 상태(unstressed, stressed)에 따라 규정하고 있는데 (Abrams, 1971), 비재하상태의 규정을 적용하여 잔존 압축강도를 산정하였다. 화재 손상을 받은 콘크리트의 강도특성은 화재 중 온도증가시 압축강도가 감소하지만, 화재 후에 상온으로 냉각된 이후에도 강도가 회복되지 않으며, 철근 항복강도의 경우에는 화재 중에는 온도증가시 항복강도가 감소하지만, 화재 후에 상온으로 냉각된 이후에는 대부분의 강도가 회복된다. 따라서 ACI 216 규정에 의해 단면의 저항모멘트 산정시 화재 중과 화재 후로 구분하여 평가하였다. 표 4에서 보면, 가열시험이 수행되지 않은 부재의 단면 저항모멘트는 실험값이 이론값보다 약 46% 정도 크게 평가되었고, 가열시험에 의해 화재손상을 받은 경우에는 화재 후의 약 47.5% 정도 실험값이 크게 평가되었다. ACI 216 규정을 적용하여 산정한 화재 중 단면의 저항모멘트는 화재 후의 경우보다 더욱 낮게 평가되어 화재 중이 화재 후보다 손상 정도가 더 큰 것으로 나타났다. 이상의 결과에서 ACI 216 규정이 화재 후에 평가되는 단면의 저항능력을 실제보다 과소하게 평가하는 것으로 판단된다.

가열 전·후 실험체에 대한 구조실험에서 측정된 최대내력 및 변위를 표 5에 정리하였다. PP섬유가 혼입되지 않은 전 두께 실험체의 경우 화재 손상후의 최대내력은 253.8 kN 수준이다. 그러나 PP섬유가 혼입된 전 두께 실험체의 화재 손상후 최대내력은 약 316.9 kN으로 0.10 vol.%의 PP섬유 혼입으로 최대내력이 약 124%로 증가하는 결과를 보였다. PP섬유가 반단면 패널에만 혼입된 실험체의 화재 손상후의 최대내력은 350.6 kN으로 PP섬유가 혼입되지 않은 전 두께 실험체의 화재 손상후의 최대내력 253.8 kN에 비해 138% 수준의 내력을 보였다. 따라서 PP섬유 혼입이 0.10 vol.% 이상 적용되는 경우에는 가열 전·후 실험체의 최대내력에서 큰 차이를 보이지 않으며, 전두께 프리캐스트

표 5. 화재 가열 전·후 실험체의 최대내력 및 변위

실험체 종류	PP섬유 혼입률 (vol.%)	가열시험	최대내력(kN) 및 비		최대하중시 변위(mm)
			최대내력	가열후/가열전	
전 두께 적용	0.0	×	376.0	0.675	39.54
		○	253.8		57.78
	0.10	×	350.4	0.904	37.89
		○	316.9		32.81
반단면 패널 적용	0.10	×	350.4	1.0	42.86
		○	350.6		43.92

실험체와 반단면 패널을 적용한 실험체 모두 유사한 결과를 보이는 것으로 판단된다. 이상의 결과에서 보면, PP섬유를 반단면 패널에만 혼입한 경우에도 전 두께에 PP섬유를 혼입한 경우와 마찬가지로 충분한 내화성능을 확보되는 것으로 판단된다. 반단면 패널 부재는 전 두께 프리캐스트 부재와는 달리 반단면 패널에만 PP섬유가 혼입되어도 내화성능이 확보되기 때문에 상대적으로 경제성이 우수해 보다 효율적인 구조로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 PP섬유 혼입여부를 변수로 제작된 전 두께 및 반단면 패널을 적용한 RC 슬래브 실험체에 대한 화재 가열실험 및 구조실험을 수행하였다. 화재 가열실험을 통해서 PP섬유 혼입에 따른 단면내 발생온도를 평가하였고, 전 두께 및 반단면 패널을 적용한 실험체의 발생온도를 비교분석하였다. 구조실험을 통해서 PP섬유 0.10 vol.% 혼입 여부에 다른 화재 손상 전후 실험체의 내력을 평가하였고, 전 두께 및 반단면 패널을 적용한 실험체의 내력을 비교분석하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

1. ISO 834 화재곡선으로 3시간 가열실험을 수행한 결과, PP섬유가 혼입되지 않은 전 두께 실험체는 폭렬로 인해 가열면으로부터 약 100 mm 단면깊이 이내에서 PP섬유가 혼입된 경우보다 상대적으로 발생온도가 높았으며, PP섬유가 혼입된 반단면 패널을 적용한 실험체의 발생온도는 PP섬유를 혼입한 전 두께 실험체와 유사한 수준을 보여 충분한 내화 성능을 갖는 것이 확인되었다.
2. PP섬유의 혼입은 가열면에서 단면깊이 100 mm 이내의 발생온도를 저감시키는데 매우 효과적이며, 100 mm 이후의 단면에서의 가열시 발생온도는 상대적으로 PP섬유 혼입의 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났다. 따라서 반단면 패널에만 PP섬유를 혼입한 RC 슬래브의 내화성능은 전 두께에 PP섬유를 혼입한 RC 슬래브와 유사한 수준의 내화성능을 갖는 것으로 판단된다.
3. PP섬유가 혼입되지 않는 경우 화재 손상 후 전 두께 실험체의 최대내력은 약 32.5% 정도 감소하였고, PP섬유가 0.10 vol.% 혼입된 경우에는 최대내력이 약 9.6% 정도 감소하여 PP 섬유 혼입이 화재 후 잔존강도를 크게 향상시키는 것으로 확인되었다.
4. PP섬유가 0.10 vol.% 혼입된 반단면 패널을 적용한 실험체의 화재 손상 후 최대내력은 화재 손상을 받지 않은 경우와 동등한 수준의 최대내력을 보였고, PP섬유를 전 두께에 혼입한 실험체의 최대내력의 약 111% 수준을 보였다. 또한, 화재 손상을 받은 후에는 단면내 발생온도에 따른 영향으로 구조체의 강성이 크게 감소하는데, 이는 발생온도에 따른 콘크리트의 응력-변형을 곡선에서의 초기강성 및 최대강도 감소에서도 잘 나타난다. 이상의 실험결과에서 PP섬유를 반단면 패널에만 혼입하는

경우에도 전 두께에 PP섬유를 혼입한 경우와 마찬가지로 화재시 단면내 발생온도의 저감 효과가 유사하고, 화재 손상 후 최대내력도 동등 이상의 수준을 보여 충분한 내화성능을 확보하는 것으로 판단된다.

참고문헌

김홍열, 채한식, 전현규, 염광수(2007) Fiber Cocktail을 혼입한 고강도콘크리트의 고온시입축강도 특성 및 모델 제시에 관한 실험적 연구, *한국콘크리트학회 학술발표논문집*, 한국콘크리트학회, pp. 605-608.

염광수, 전현규, 김홍열(2009) 섬유혼입공법을 적용한 고강도콘크리트 기둥의 비재하 내화 실험, *한국콘크리트학회논문집*, 한국콘크리트학회, Vol. 21, No. 4, pp. 465-471.

한국산업규격(2005) 건축 구조 부재의 내화시험방법-기둥의 성능 조건 KS F 2257-7, 한국표준협회.

Abrams, M.S. (1971) Compressive strength of concrete at temperatures to 1600F, *Temperature and Concrete*, SP-25, American Concrete Institute, Detroit, pp. 33-58.

ACI Committee 216 (1989) *Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements*, ACI 216R-89, American Concrete Institute, Detroit.

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.

Atkinson, T. (2004) Polypropylene fibers control explosive spalling in high-performance concrete, *Concrete*, Vol. 38, No. 10, pp. 69-70.

EUROCODE 2 (2004) *Design of Concrete Structures-Part 1.2: General rules- Structural Fire Design*, Brussels, July.

ISO (1975) *Fire Resistance Tests-Elements of Building Construction, International Standard ISO 834*, Geneva.

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.

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.

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.

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.

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 exposure, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, pp. 1672-1678.

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*, Vol. 64, pp. 556-570.

(집수일: 2010.2.11/심사일: 2010.3.19/심사완료일: 2010.5.5)