

화재시 온도증가로 인한 RC 슬래브의 강도 특성

임초롱 · 정철현[†] · 김유석

단국대학교 토목환경공학과

(2010. 6. 15. 접수 / 2010. 8. 5. 채택)

Strength Properties of RC Slabs under Elevated Temperatures from Fire

Cho-Rong Im · Chul-Hun Chung[†] · Yu-Seok Kim

Civil & Environmental Engineering, Dankook University

(Received June 15, 2010 / Accepted August 5, 2010)

Abstract : The fire resistance performance of 2 RC slabs after exposure to the ISO-834 fire standard without loading has been experimentally investigated. A Comparison is made of the fire resistance performance between RC slabs without PP(polypropylene) fibers and RC slabs with PP fibers. From the fire test results, the presence of PP fibers in RC slabs can reduce spalling and enhance their fire resistance. Until now, the determination of fire resistance of reinforced concrete(RC) slabs has essentially been based on tabulated data. According to ACI 216 code and EUROCODE 2, the design of concrete structures is essentially based on tabulated data for appropriate concrete cover and various fire durations. From the comparison between fire test results and codes, current fire design provisions of codes such as the ACI 216 and the EUROCODE 2 are unconservative for estimating mechanical properties of RC slabs at elevated temperatures.

Key Words : fire resistance performance, PP(polypropylene) fiber, spalling, ISO 834 fire curve, mechanical properties

1. 서론

구조재료 중에서 콘크리트는 화재에 대한 저항 능력이 우수한 재료특성을 갖고 있지만, 고온 환경 하에서의 거동은 보통의 온도조건하에서의 거동과는 큰 차이가 있다. 철근콘크리트 구조물에서 피복 두께는 철근의 온도상승을 억제시키기 때문에 일반적으로 내화구조로서 인정받고 있지만, 화재 발생 시 콘크리트가 고온의 환경에 노출되면 콘크리트의 표면부가 떨어져 나가는 폭렬이 발생한다. 폭렬은 화재로 인해 콘크리트 내에서 온도가 증가하여 콘크리트 내 수증기 및 수분의 내부압력이 증가하여 발생하는 현상으로 이로 인해 철근과 콘크리트의 온도가 급격히 상승하게 된다. 화재 시 폭렬 및 내부콘크리트와 철근의 온도상승을 억제하기 위하여 다양한 연구가 진행되고 있으며, PP섬유^{6,10)}(polypropylene fibers) 또는 강섬유^{9,12,13)}를 사용한 많은 연구가 수행되어 폭렬제어성능을 입증하였다. 김홍열 등¹⁾은 폭렬억제와 철근의 온도상승

을 막기 위하여 PP섬유와 강섬유를 동시에 사용하는 섬유혼입공법을 적용하여 콘크리트의 압축강도, 탄성계수 및 비열 등의 열적특성을 평가하였다. Poon 등¹¹⁾과 염광수 등²⁾은 섬유혼입공법을 적용한 고강도콘크리트 기둥에 대한 비재하 내화실험을 실시하여 콘크리트 내 온도구배와 온도분포, 철근에서의 발생온도 및 폭렬 등의 내화성능을 평가하였다. Taerwe 등¹⁴⁾은 온도 하중을 받은 PSC 거더의 구조성능을 평가하기 위한 연구에서 콘크리트의 잔존 압축강도를 평가하였는데, 실린더 공시체의 크기를 변수로 측정된 결과로 실 부재에서의 잔존 압축강도에 비해서 손상이 과다하게 평가되는 경향을 보였다. ACI 216⁵⁾과 EUROCODE 2⁷⁾에서는 철근 콘크리트 부재의 내화성능을 평가하기 위해 가열 시간에 따른 단면 내 발생온도 산정, 발생온도에 따른 콘크리트 강도, 철근의 항복강도 및 탄성계수 등을 평가하기 위한 도표를 제시하고 있다.

본 연구에서는 내화성능을 고려하지 않은 실험체와 내화성능 향상을 위해 PP섬유를 0.10vol.% 혼입한 RC 슬래브 실험체를 제작하여 ISO 834 화재 곡선을 적용한 가열실험을 수행하였다. 가열실험으

[†] To whom correspondence should be addressed.
chchung5@dankook.ac.kr

로부터 철근과 콘크리트의 단면 깊이 별 발생온도를 측정하고, ACI 216과 EUROCODE 2에서 규정하는 가열시간별 발생온도를 산정하여 가열실험 결과와 비교하여 주요 규정에서 산정되는 가열시간별 발생온도의 수준을 평가하였다. 가열실험 및 주요 규정에 따라 산정된 가열시간 및 단면 깊이 별 발생온도를 ACI 216과 EUROCODE 2의 규정에 적용하여 온도증가에 따른 콘크리트의 압축강도, 철근의 항복강도 및 탄성계수 등을 평가하고 이를 비교분석하였다.

2. 화재시 발생온도 및 강도 평가 규정

2.1. 단면내 발생온도의 추정

ACI 216의 지침에서는 화재시간에 따라 부재 깊이별 온도분포에 대한 그래프를 단면형태 및 골재의 종류 등 여러 가지 조건에 따라 제시하고 있는데, Fig. 1의 (a)는 슬래브 구조에서의 화재시간에 따른 온도분포이다. 골재의 종류에 따라 각각 온도 분포가 규정되어 있지만, 본 연구 조건과 동일한

Table 1. Minimum dimensions for simply supported slabs

Standard fire resistance	Minimum dimensions(mm)	
	slab thickness	axis distance
REI 30	60	10
REI 60	80	20
REI 90	100	30
REI 120	120	40
REI 180	150	55
REI 240	175	65

규산질(silicious) 골재를 사용한 콘크리트 슬래브 (0.9 × 0.9m)의 온도분포를 나타내었다. EUROCODE 2에서는 부재의 형태에 따라 단면 내 온도분포를 규정하는데, 슬래브의 화재 노출표면으로부터 단면 깊이에 따른 온도변화는 Fig. 1의 (b)와 같다. Fig. 1의 (b)에서 각 곡선에 명기된 기호 R은 표준화재 등급으로서 Table 1에 간략히 기술하였다.

2.2. 온도증가에 따른 강도 변화

2.2.1. 콘크리트 압축강도

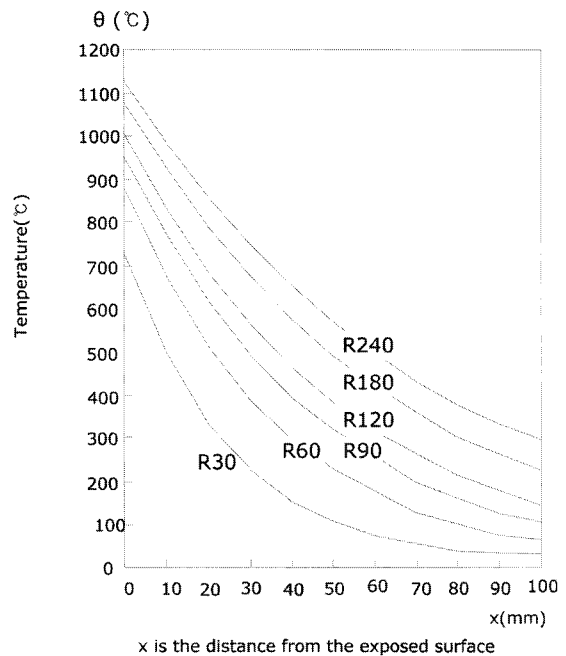
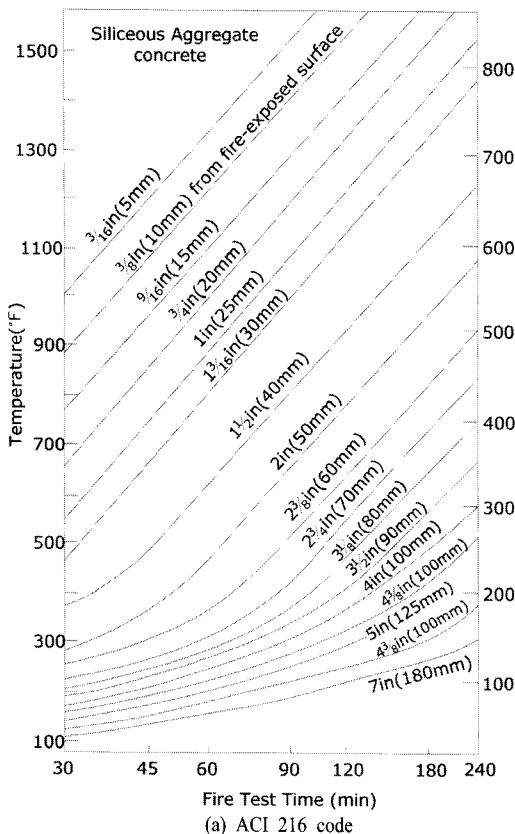


Fig. 1. Temperature within slabs during fire test,

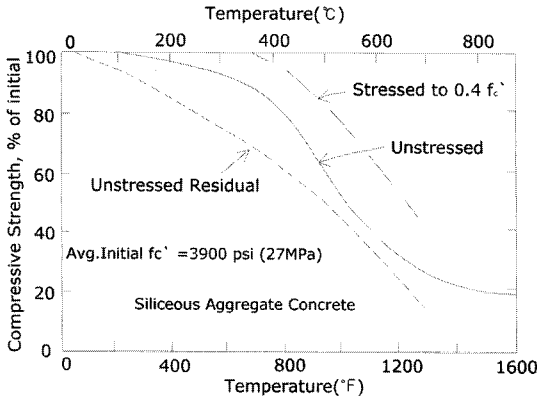


Fig. 2. Compressive strength of concrete at high temperature and after cooling.

ACI 216에서는 온도증가에 따른 압축강도의 변화는 콘크리트에 사용된 골재의 종류에 따라 규정하고 있다⁴⁾. 이 압축강도의 변화는 화재로 인해 온도가 냉각된 이후에 대한 것으로 화재로 인해 발생하는 최대온도에 따라 압축강도를 추정할 수 있다. Fig. 2는 규산질 골재를 사용한 콘크리트의 압축강도 변화로서 곡선에서 ‘Unstressed’로 표기된 것은 화재 가열실험 중에 하중을 가하지 않는 경우, ‘Stressed to 0.4f_c’라고 표기된 것은 가열실험 중에 콘크리트 압축강도의 40%를 재하 한 경우이다. 이 두 가지 경우는 모두 화재로 인해 온도가 증가한 상태에서의 압축강도 수준을 의미한다. ‘Unstressed Residual’라고 쓰여진 곡선은 하중을 가하지 않은 상태에서 가열실험을 수행하고, 대기상태로 냉각된 이후에 압축강도 실험을 실시하여 잔류하는 압축강도를 초기 압축강도와 비교한 값이다. 이때 시편은 6일 동안은 대기상태에서 상대습도는 75%를 유지하여 보관하여야 한다.

EUROCODE 2에서 화재 손상을 받은 콘크리트의 압축강도는 발생온도 크기에 따른 감소계수를 반영하여 식 (1)에 의해서 결정된다. 발생온도에 따른 압축강도 감소계수의 분포는 Fig. 3과 같고, 발생온도 범위에 따른 감소계수는 Table 2에 수록되었다. Fig. 3에서 기호 1은 규산질 골재이고, 기호 2는 석회질 골재이다.

$$f_{c,\theta} = K_c(\theta) f_{ck} \quad (1)$$

$f_{c,\theta}$: 발생온도가 $\theta^\circ\text{C}$ 일 때의 콘크리트 압축강도
 f_{ck} : 20°C에서 콘크리트 압축강도
 $K_c(\theta)$: 발생온도 크기에 따른 콘크리트 압축강도의 감소계수

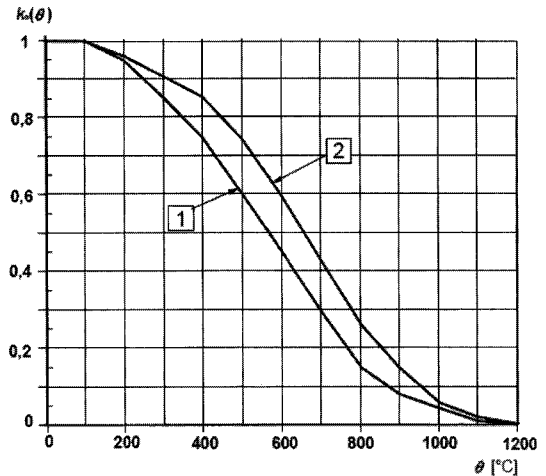


Fig. 3. Coefficient allowing for decrease of characteristic strength of concrete.

Table 2. Coefficient allowing for decrease of characteristic strength of concrete

Concrete temp.($\theta, ^\circ\text{C}$)	Siliceous aggregates	Calcareous aggregates
	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$f_{c,\theta} / f_{ck}$
20	1.0	1.0
100	1.0	1.0
200	0.95	0.97
300	0.85	0.91
400	0.75	0.85
500	0.60	0.74
600	0.45	0.60
700	0.30	0.43
800	0.15	0.27
900	0.08	0.15
1000	0.04	0.06
1100	0.01	0.02
1200	0	0

2.2.2. 철근의 항복강도

Fig. 4는 ACI 216에 제시된 온도증가에 따른 철근 항복강도의 변화로서 최대값과 최소값을 규정하고 있다. EUROCODE 2에서 규정하는 발생온도에 따른 철근의 항복강도 감소계수는 Fig. 5와 같다. 항복강도 감소계수가 결정되면 화재로 인한 발생온도 크기에 따른 손상된 철근의 항복강도는 식 (2)에 의해서 산정된다.

$$f_{y,\theta} = K_s(\theta) f_y \quad (2)$$

$f_{y,\theta}$: 발생온도가 $\theta^\circ\text{C}$ 일 때의 철근의 항복강도

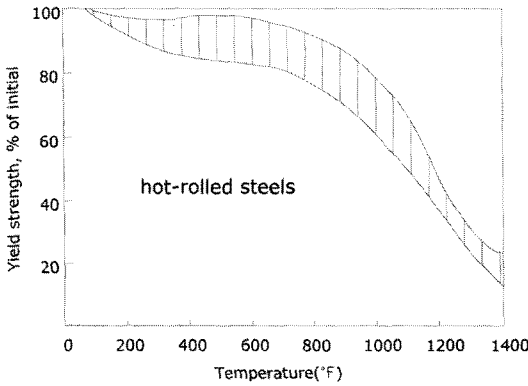
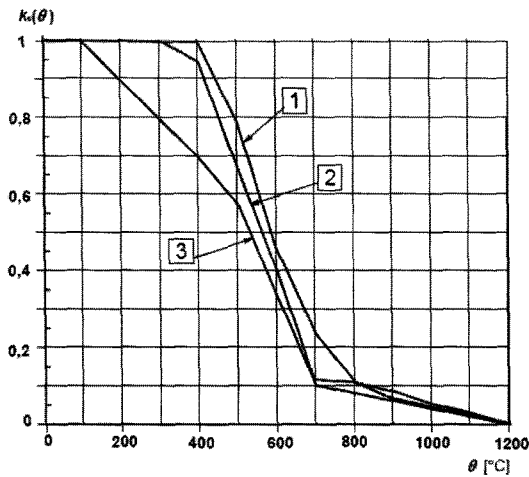


Fig. 4. Range of yield strength of steel at high temperatures.



- Curve 1 : Tension bar(hot rolled), $\epsilon_{s,fi} \geq 2\%$
- Curve 2 : Tension bar(cold worked), $\epsilon_{s,fi} \geq 2\%$
- Curve 3 : Compression bar(hot rolled), $\epsilon_{s,fi} < 2\%$

Fig. 5. Coefficient allowing for decrease of characteristic strength of reinforcement.

f_y : 20°C에서 철근의 항복강도

$K_s(\theta)$: 발생온도에 따른 철근 항복강도의 감소계수

2.2.3. 철근의 탄성계수

ACI 216에서 규정하는 온도증가에 따른 철근 탄성계수의 변화는 Fig. 6과 같다. EUROCODE 2에서는 200°C까지는 상온에서의 탄성계수로 정의하였고, 그 이후 온도에서는 Fig. 7에서와 같이 온도증가에 따라 감소한다. 온도증가에 따른 탄성계수의 감소계수를 적용하여 탄성계수는 식 (3)에 의해서 산정한다.

$$E_{s,\theta} = K_E(\theta) E_s \quad (3)$$

$E_{s,\theta}$: 발생온도 θ °C일 때 철근의 탄성계수

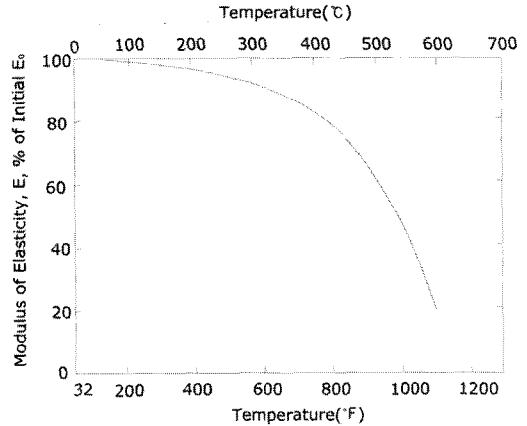


Fig. 6. Modulus of elasticity of steel at high temperature.

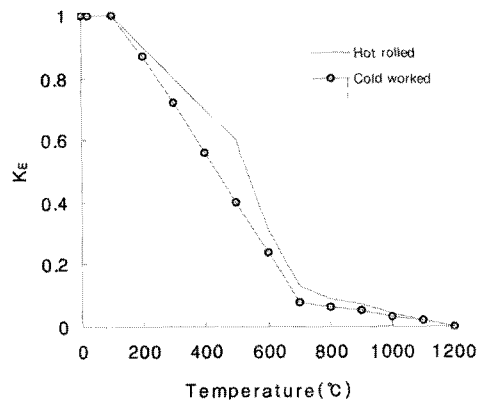


Fig. 7. Coefficient allowing for decrease of Elastic modulus of steel.

E_s : 20°C에서 철근의 탄성계수

$K_E(\theta)$: 온도증가에 따른 탄성계수의 감소계수

3. 비재하 내화실험

3.1. 실험체 제작

가열실험이 수행된 RC 슬래브 실험체의 형상은 Fig. 8과 같다. Fig. 8의 (b)에 나타난 실험체에서 가열실험 시 단면 내 발생온도의 측정지점은 표면에서부터 20, 50(주철근 위치), 100, 150(압축철근 위치), 180mm 5개소로서 이들 지점에 열전대(K-type)를 매설하였다. 실험체의 제작과정과 가열실험 시 온도측정 데이터의 손실을 감안하여 Fig. 8의 (a)에서와 같이 2개소에 열전대를 설치하였다. 실험체의 종류는 Table 3과 같고, 보통 콘크리트 실험체와 온도발생에 따른 콘크리트의 폭열 방지 및 단면 내 온도발생을 억제하기 위해서 PP섬유 혼입률이 0.10 vol.%인 실험체를 제작하였다.

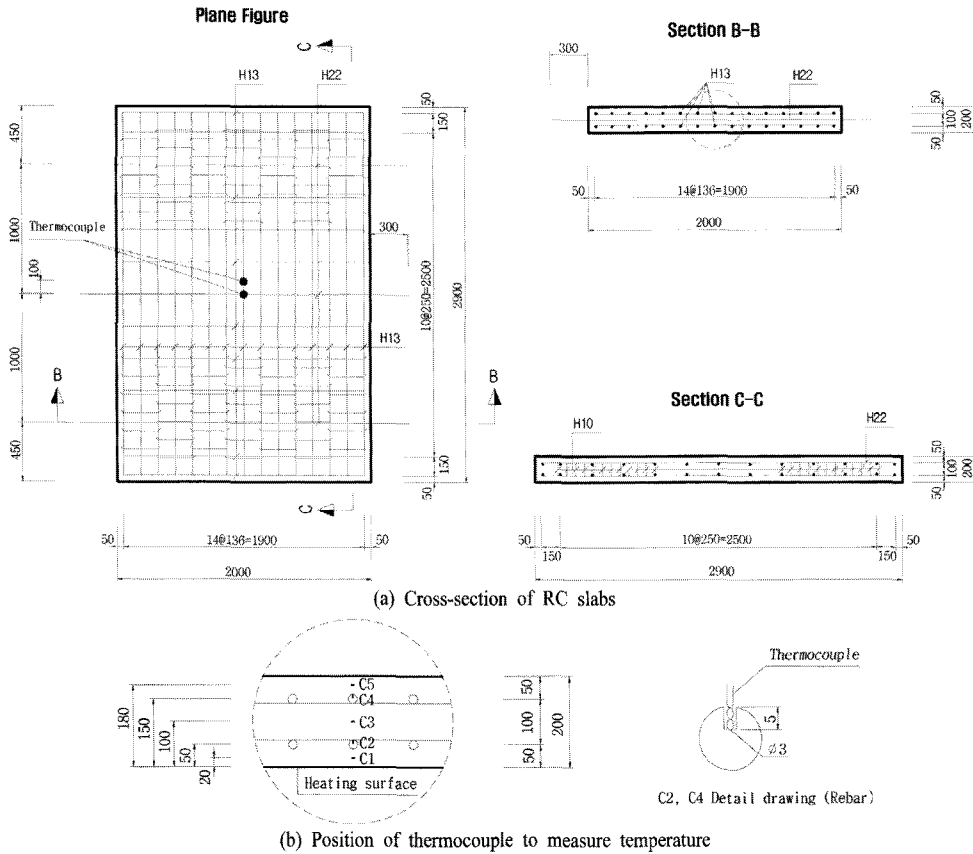


Fig. 8. Cross-section and position of thermocouples to measure temperature.

Table 3. Test specimens

PP fiber contents(vol.%)	Number of Specimen	Note
0.0	2	one is for preliminary experiment
0.10	1	

3.2. 재료특성

실험체 제작에 사용된 PP섬유의 특성을 Table 4에 정리하였고, 설계강도가 35MPa인 콘크리트의 배합특성은 Table 5와 같다. 실린더 표준공시체의 28일 강도 측정결과는 평균 30.1MPa로 대기양생으로 인해서 낮게 평가되었다.

Table 4. Properties of PP fibers

	Polypropylene fibers
Density(g/cm ³)	0.91
Diameter(μm)	21.6~39.4
Length(mm)	5~10
Tensile strength(MPa)	328.3~367.7
Elastic modulus(GPa)	3.0~3.2

Table 5. Mix proportions of concrete with PP fibers (kg/m³)

W/C(%)	S/a(%)	Water	Cement	Sand	Gravel	Admixture	PP fibers
38.5	38.9	170	442	692	1113	3.49	0.0-0.90

3.3. 화재 가열실험

ISO 834 곡선^{8,15)}은 주로 건축구조를 대상으로 규정되었지만, 구조물의 내화설계 시 온도조건으로 광범위하게 적용되고 있는데, 국내 KS F 2257-7³⁾에서 규정한 ISO 834-7의 시험(비재하시험)에 의하여 기둥과 보에서 주철근의 온도가 평균 538℃, 최고 649℃ 이하의 성능기준을 보유하고 있는 것으로 사용하도록 규정되었다. Fig. 9에 나타난 ISO 화재곡선은 식 (4)와 같이 규정하고 있다.

$$T(t) = 345 \cdot \log(8t + 1) + T_0 \quad (4)$$

t : 화재 발생시간(min)

$T(t)$: 시간 t 에서의 온도(℃)

T_0 : 대기온도(20℃)

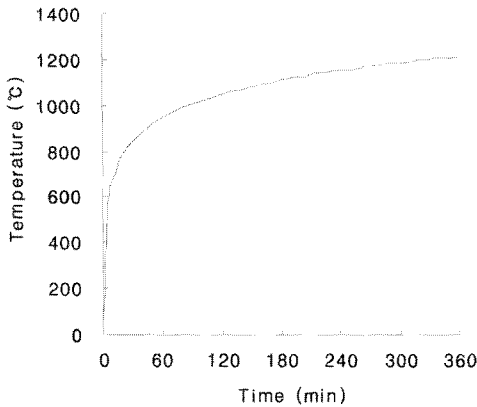


Fig. 9. ISO-834 fire curve.

화재 가열실험(내화실험)은 식 (4)를 따르는 ISO-384 화재곡선을 실험체의 한쪽 면에 적용하여 180 분 동안 가열하였다. 가열실험의 절차는 Fig. 10으로 (a)는 가열실험을 위해서 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 전경이다.

3.4. 실험결과

가열실험 도중에 PP섬유가 혼입되지 않은 보통 실험체에서는 폭발현상이 발생되었으며, PP섬유가

0.10vol.% 혼입된 실험체에서는 폭발이 발생되지 않았다. 가열실험에서 폭발로 인한 탈락은 가열면 전체에서 일정한 두께가 탈락된 것이 아니고 탈락된 두께가 위치별로 차이를 보였다. Fig. 11은 ISO 834 화재곡선에 의한 내화실험에서 측정된 실험체 단면 내 발생온도의 시간이력이다. (a)에서 보면, PP 섬유가 혼입되지 않는 경우에는 온도하중을 받는 표면에서 20mm 깊이의 콘크리트 온도는 가열곡선 온도와 거의 유사한 수준을 보이는데 이는 가열실험 도중에 폭발이 발생하여 이 부분 콘크리트가 탈락되었기 때문이며, 단면 내 깊이가 증가할수록 발생온도가 현격하게 감소하다가 150mm 이상 깊이 부터는 수렴하는 경향을 보였다. PP섬유가 혼입된 실험체의 경우는 폭발현상이 발생되지 않아 섬유 혼입이 없는 경우에 비해서 20mm 깊이에서도 발생온도가 현격히 감소되는 경향을 보이며, 150mm 이상 깊이에서는 온도 감소량이 둔화되었다. ISO 384 화재곡선에 의한 가열시험에서 측정된 실험체의 각 단면 깊이에서의 가열시간별 발생온도는 Table 6~7에 정리하였다.

국내 KS F 2257-7에서는 ISO 834 시험(비재해 시험)에 의하여 기둥과 보에서 철근의 온도가 평균 538°C, 최고 649°C 이하의 성능기준을 보유하는 것을 사용하도록 규정되었다. Table 8은 가열실험에서 측정된 각 실험체에서의 철근온도로서 PP섬유가 혼입되지 않는 경우 가열면에 가까운 철근위치

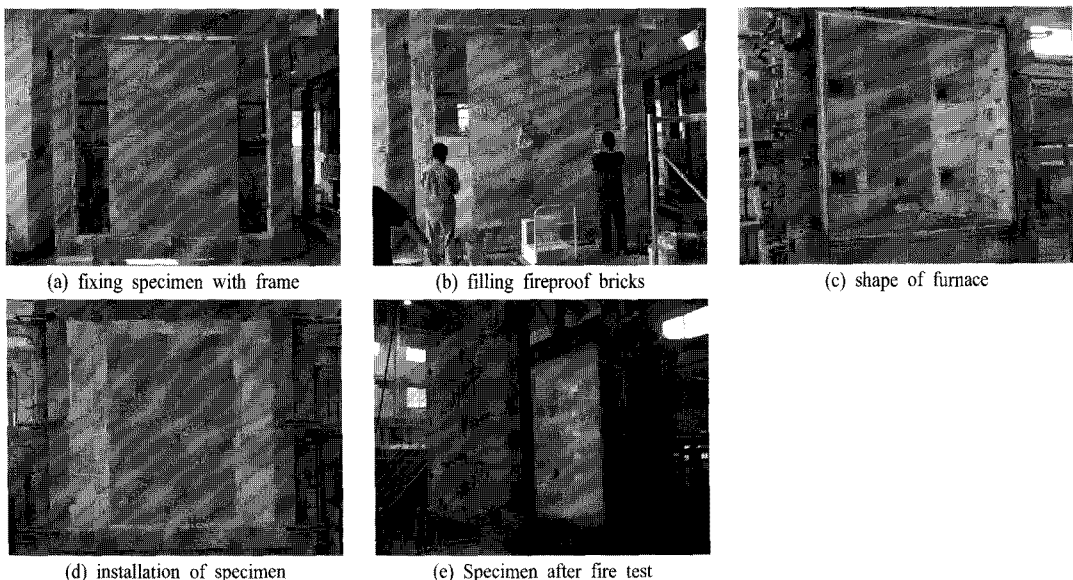
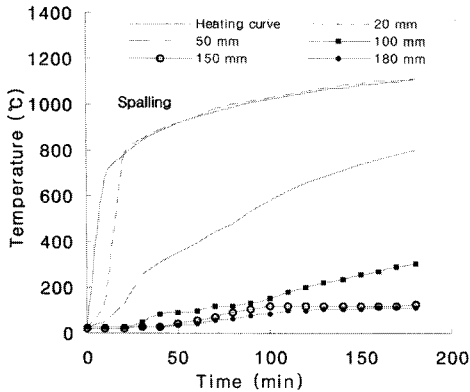
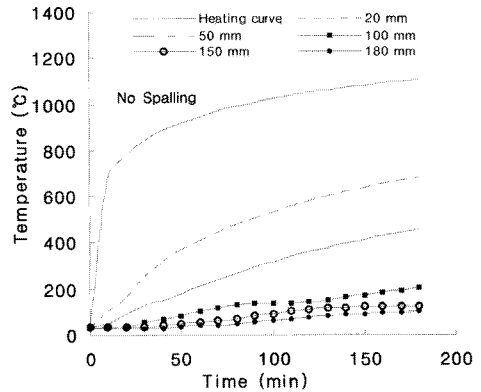


Fig. 10. Procedure of fire test.



(a) PP fiber contents : 0.0vol.%



(b) PP fiber contents : 0.10vol.%

Fig. 11. Temperature distribution of slabs.

Table 6. Sectional temperature of concrete(°C, PP fiber contents : 0.0 vol.%)

Depth from surface	Time	Heating duration (min)					
		30	60	90	120	150	180
C1 (20 mm)		850.1	947.1	1014	1055	1091	1108.1
C2 (50 mm)		252.0	396	534.2	655.8	736.9	802.7
C3 (100 mm)		51.5	97.0	132.4	197.3	254.7	304.5
C4 (150 mm)		25.2	55.0	103.6	116.1	116.5	124.4
C5 (180 mm)		25.7	44.5	74.0	99.5	106.8	111.1

Table 7. Sectional temperature of concrete(°C, PP fiber contents : 0.10 vol.%)

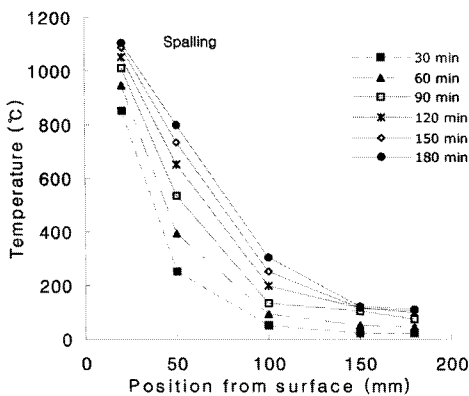
Depth from surface	Time(min)	Heating duration (min)					
		30	60	90	120	150	180
C1 (20 mm)		252.1	409.1	507.8	578.8	637.6	685.9
C2 (50 mm)		132.1	211.3	294.1	359.8	413.1	456.9
C3 (100 mm)		51.5	100.7	137.9	140.3	171.3	205.5
C4 (150 mm)		33.7	53.2	80.7	108.2	121.2	123.3
C5 (180 mm)		28.9	37.7	55.6	74.2	90.6	99.5

Table 8. Temperature of steel rebar(°C)

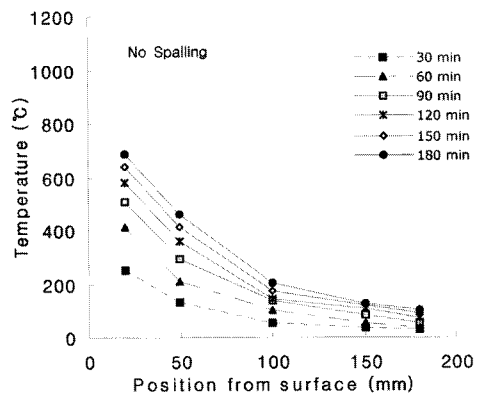
PP fiber contents (vol.%)	Steel rebar	Depth from surface (mm)	Heating duration(min)		
			60	120	180
0.0	C1	50	396.0	655.8	802.7
	C4	150	55.0	116.1	124.4
0.10	C1	50	211.3	359.8	456.9
	C4	150	53.2	108.2	123.3

에서는 가열시간이 120분을 초과하면 KS F 2257-7 규정온도를 초과하는 것으로 나타났다. 그러나 섬유가 혼입된 실험체의 가열면에서 가까운 철근에서 발생하는 온도는 가열실험 종료 시까지 KS F 2257-7 규정온도보다 낮은 수준의 온도가 발생되었다.

Fig. 12에 화재시간대별로 발생온도를 가열면으로 부터의 단면 깊이에 따라 나타내었다. 그림에서 보면 단면 깊이 150mm 깊이까지는 발생온도가 감소하다가 150mm 이상부터는 가열시간에 상관없이 큰 변화가 없고, PP섬유가 혼입되는 경우에는 단



(a) PP fiber contents : 0.0vol.%



(b) PP fiber contents : 0.10vol.%

Fig. 12. Temperature at the position of thermocouple from surface.

면 깊이 100mm 이내에서는 발생온도가 크게 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 13은 가열실험(180분 가열시) 종료 직전에 측정된 단면 내 발생온도와 가열시간에 따라 ACI 216에 의해 산정된 온도를 가열시간별로 비교한 그림이다. 그림에서 보면 단면 깊이가 100mm 이상부터는 실험이나 ACI 216에 의한 발생온도가 매우 유사한 수준을 보여주었다. 그러나 PP섬유가 혼입되지 않으면 단면 깊이 100mm 이내인 구간에서는 가열시험에서 측정된 온도보다 ACI 216에 의한 온도가 매우 낮은 수준을 보였는데, 이는 단면 깊이가 낮을수록 그 차이가 증가하는 경향을 보인다. PP섬유가 혼입된 경우에는 폭렬이 발생되지 않아 측정온도보다 ACI 216에 의한 온도가 약간 높게 평가되었다.

대부분 폭렬이 발생하는 PP섬유가 혼입되지 않는 보통 콘크리트에서는 가열 깊이에 따라 발생온도가 낮게 평가되면 발생온도에 따른 콘크리트의 압축강도, 철근의 항복강도 및 탄성계수가 상대적

으로 높게 산정되기 때문에 이로 인해 단면 내력을 과다하게 평가하게 된다. 따라서 폭렬의 영향이 고려되지 않은 ACI 216의 규정을 적용하여 RC 부재의 단면내력을 평가하는 경우에는 내화성능을 실제보다 과다하게 평가할 수도 있는 것으로 판단된다.

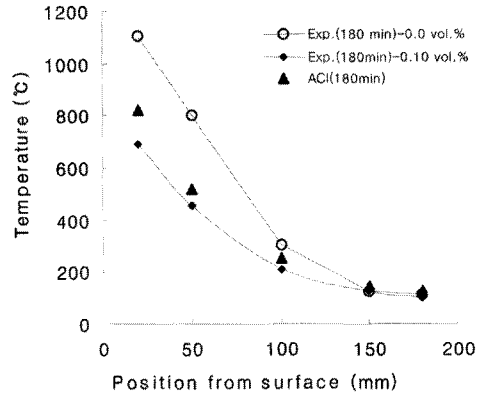
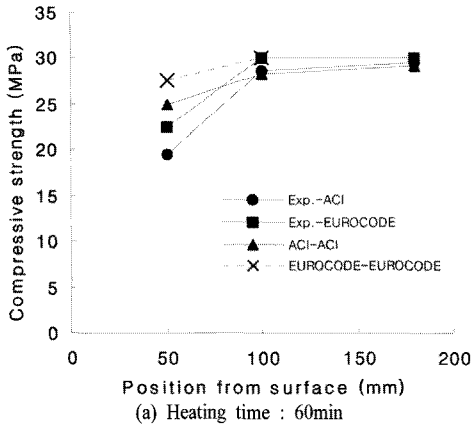
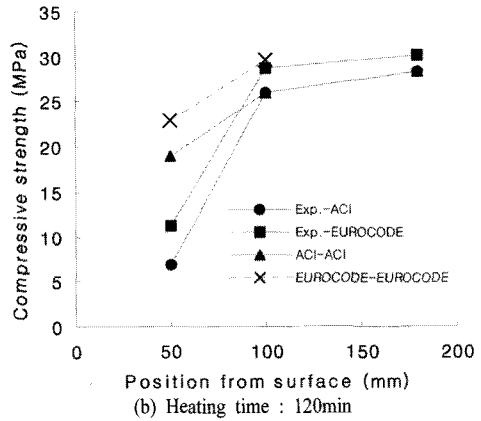


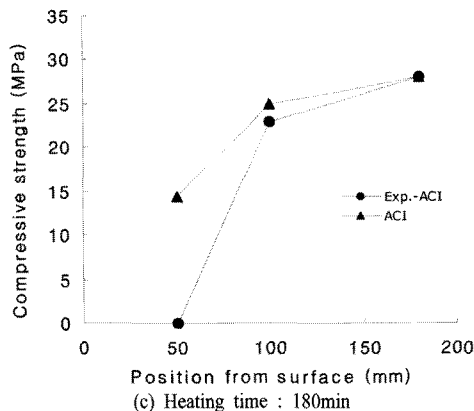
Fig. 13. Comparison of measured (fire test) and predicted (ACI Code) temperature.



(a) Heating time : 60min



(b) Heating time : 120min



(c) Heating time : 180min

Fig. 14. Compressive strength according to position from surface (PP fiber : 0,0vol.%)

4. 발생온도에 따른 강도 특성

4.1. 콘크리트

가열실험에서 측정된 각 실험체의 단면 깊이별 발생온도(Table 6~7)에 따른 콘크리트 압축강도를 산정하였다. EUROCODE 2 규정에서는 가열면에서의 단면 깊이가 100mm 까지만 가열시간별로 발생온도를 산정할 수 있고, ACI 216 규정에서는 압축강도 산정 시 발생온도가 700°C 이내로 설정되어 있어 가열실험에서 측정된 온도가 700°C를 초과하는 경우에는 압축강도를 산정하지 못했다. PP섬유가 혼입된 실험체는 각 규정에서 PP섬유 혼입의 영향을 고려하여 온도를 산정할 수 없기 때문에 압축강도를 산정하지 못했다. 발생온도에 따른 압축강도 산정 시 화재를 받지 않은 기준강도는 각 실험체 제작 시 만들어진 실린더 공시체에서 측정된 평균 강도인 30.1MPa를 적용하였다.

Fig. 14~15에 가열면 으로부터의 단면 깊이에 따른 압축강도의 변화를 PP섬유 혼입 여부에 따라 나

타내었다. Fig. 14에서 보면, PP섬유가 혼입되지 않은 경우에는 50mm 깊이에서는 강도 감소가 크고, 단면 깊이가 증가할수록 감소량이 크게 줄어든다. 그러나 Fig. 15에서 보면, PP섬유가 혼입되는 경우에는 단면 깊이 50mm에서 강도 감소는 있지만, PP섬유가 혼입 되지 않은 경우에 비해서 강도 감소량이 현저히 줄어드는 결과를 보였다. Fig. 14에서 보면 가열실험에서 측정된 온도에 의해서 산정된 압축강도가 ACI 216과 EUROCODE 2에 의해서 산정된 온도에 의한 압축강도보다 현저하게 작은 수준을 보였다. 이들 규정을 적용하여 가열시간에 따라 산정되는 온도가 낮게 평가되기 때문에 압축강도는 실험에 의한 것보다 높게 평가되는 것으로 판단된다. Fig. 15에서 ACI 216과 EUROCODE 2 규정에 의해 발생온도 산정 시 PP섬유 혼입의 효과를 고려할 수 없기 때문에 비교 대상에서 제외하였다.

Fig. 16~17에 가열시간에 따른 압축강도의 변화를 나타내었다. Fig. 16에서 보면, 가열면에서 부터

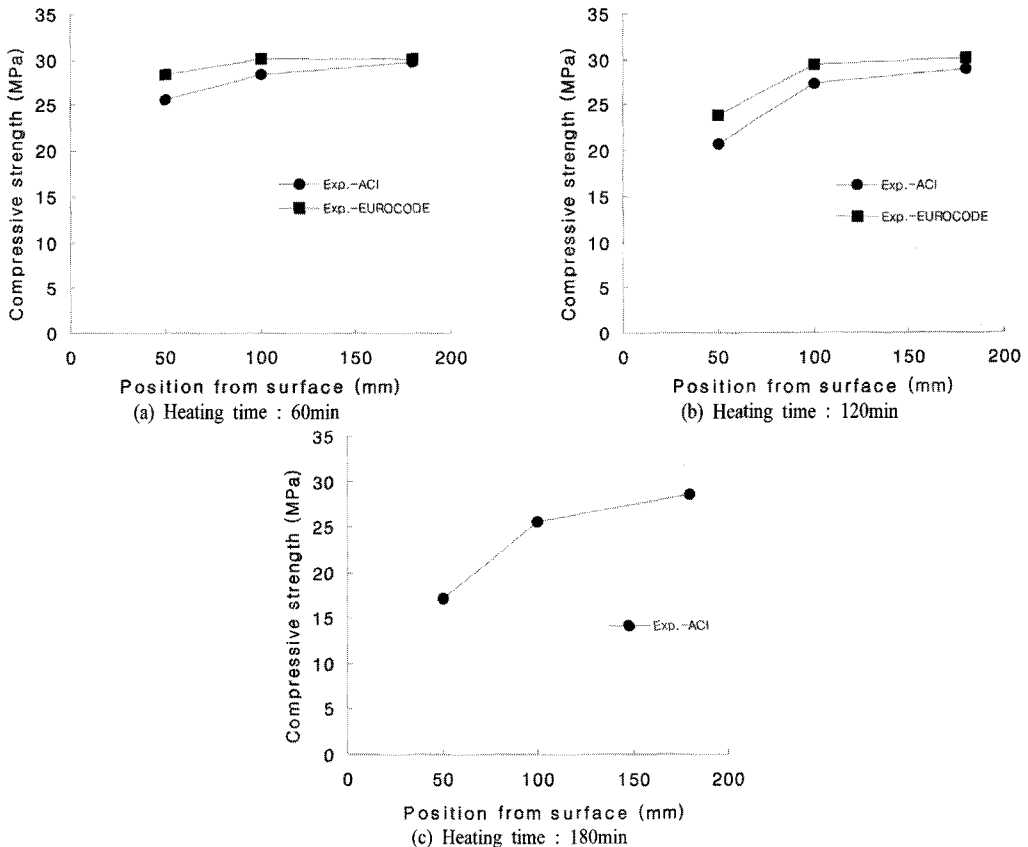


Fig. 15. Compressive strength according to position from surface(PP fiber : 0,10vol.%).

화재시 온도증가로 인한 RC 슬래브의 강도 특성

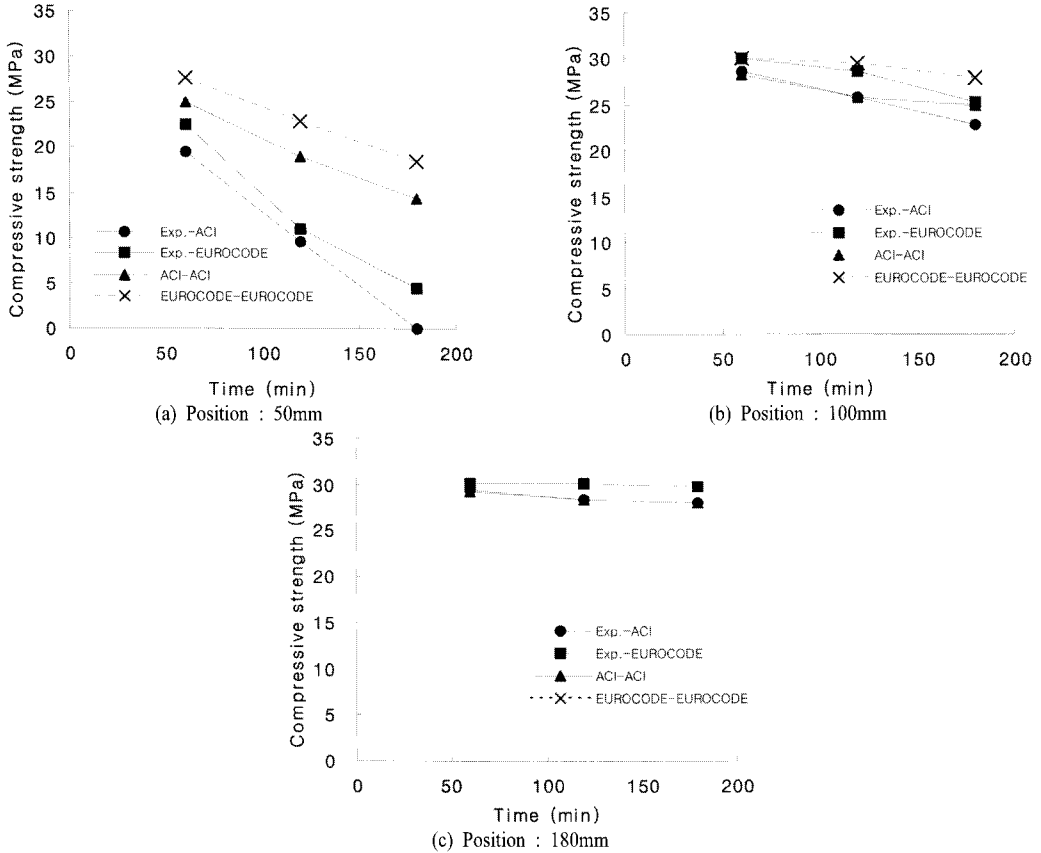


Fig. 16. Compressive strength according to heating time(PP fiber : 0.0vol.%).

의 단면 깊이가 50mm인 경우에는 압축강도 산정 방법에 따른 차이가 크게 나타나는데 단면 깊이가 증가할수록 그 차이가 크게 줄어드는 경향을 보였다. Fig. 17에서 보면, PP섬유가 0.10vol.% 혼입되는 경우에는 단면 깊이가 50mm인 경우에는 가열시간에 따라 압축강도 감소가 크게 발생하지만, PP 섬유가 혼입되지 않은 경우에 비해서 압축강도의 감소량은 아주 작으며, 100mm 이상부터는 가열시간이 증가하여도 압축강도의 감소량이 작은 수준이다.

반발경도법(N형 슈미트 햄머)에 의해 가열 전·후 실험체의 부재 두께 높이별 콘크리트 강도를 측정하였다. 측정된 반발경도를 일본재료학회에서 제시된 식 (5)에 적용하여 콘크리트의 압축강도를 산정하였다.

$$f_c = \alpha (-184 + 13R_o) \quad (5)$$

α : 재령보정계수

R_o : 타격방향에 따른 보정된 반발도

Fig. 18은 반발경도법에 의한 측정값 및 가열실험에서 측정된 발생온도를 ACI 216과 EUROCODE 2 규정에 적용하여 산정한 압축강도 감소계수를 비교한 그림이다. 그림에서 f_c 는 가열실험 전 측정된 콘크리트의 압축강도이며, f'_c 는 가열실험 후에 측정된 압축강도이다. ACI 216에서는 압축강도 감소계수를 700°C 미만의 범위에 대해 제안되고 있어 가열면에서 가까운 단면에는 적용하지 못했다. 그림에서 보면, PP섬유가 혼입되는 경우에는 압축강도의 감소가 상대적으로 작게 나타났다. 가열 후 실험체에 대해 반발경도 측정 시 PP섬유 혼입(0.0 vol.%)이 없는 실험체에서는 폭렬이 발생하여 표면부 부근에서 반발경도를 측정하지 못했다. 전반적으로 반발경도에 의한 실측 압축강도는 PP섬유가 혼입되지 않은 보통 콘크리트에서는 ACI 216과 EUROCODE 2 규정의 사이에 수준을 보였고, PP섬유가 혼입된 콘크리트에서는 약간 높은 수준을 보였다.

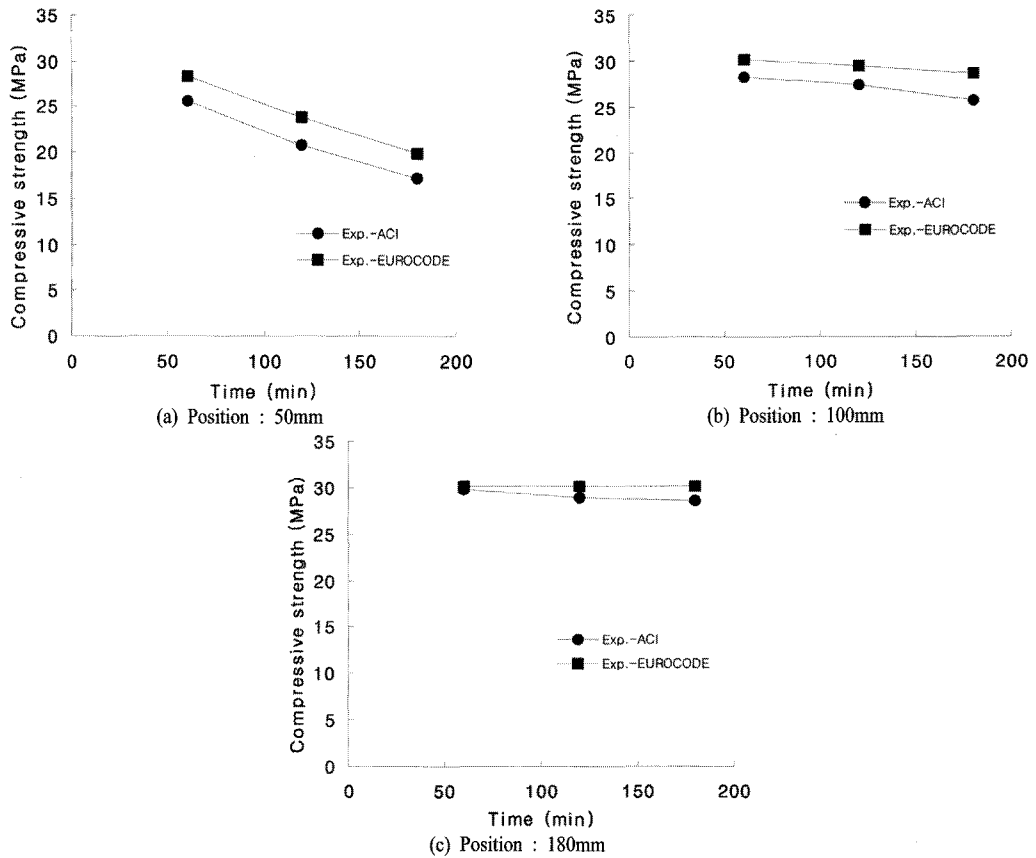


Fig. 17. Compressive strength according to heating time(PP fiber : 0.10vol.%).

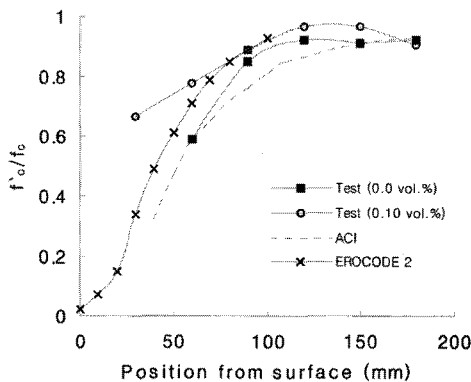


Fig. 18. Reduction factor of compressive strength of concrete.

4.2. 철근

철근의 항복응력 및 탄성계수는 온도가 증가할수록 감소하는데 철근에서의 온도증가로 인해 감소되는 항복응력 및 탄성계수는 감소계수에 의해서 식 (2)와 (3)에 의해서 표현된다. 화재 가열실험에서 측정된 각 실험체의 철근 위치에서의 발생온

도는 가열시간별로 Table 8에 정리하였다. 이를 각 규정에서 제시된 방법에 적용하여 발생온도에 따른 철근의 탄성계수 및 항복응력 감소계수를 산정하여 Table 9에 정리하였다. Table 9에서 보면, 가열면에서의 단면 깊이가 작으면 가열실험에서 측정된 단면 내 발생온도가 커서 철근의 항복응력 및 탄성계수가 크게 감소하였고, PP섬유가 혼입되는 경우에는 발생온도가 낮아 상대적으로 철근의 항복응력 및 탄성계수가 높게 평가되었다. ACI 216과 EUROCODE 2 각 규정에 따른 감소계수는 큰 차이를 보이지 않았다.

화재 가열실험에 의하지 않고, ACI 216 및 EUROCODE 2에 규정된 방법에 의해서 산정한 발생온도를 이용하여 철근의 항복응력 및 탄성계수의 감소계수를 산정하면 Table 10과 같다. 화재지속시간에 따른 발생온도가 가열실험에 의한 온도와 비교하면 단면 깊이가 50mm인 경우에는 62~65% 수준으로 발생온도가 낮게 산정되어 감소계수가 높게 평가되고, 단면 깊이가 150mm로 증가하면 가열실험

Table 9. Reduction factor of yield strength and elastic modulus with steel rebar

PP fiber contents (vol.%)	Position (mm)	Steel rebar	Measured temp. (°C)	Reduction factor	
				ACI 216	EUROCODE 2
0.0	50	bottom	802.7	$f_{y,\theta}$	0.23
				$E_{s,\theta}$	0.09
	150	upper	124.4	$f_{y,\theta}$	0.97
				$E_{s,\theta}$	0.98
0.10	50	bottom	456.9	$f_{y,\theta}$	0.89
				$E_{s,\theta}$	0.64
	150	upper	123.3	$f_{y,\theta}$	0.97
				$E_{s,\theta}$	0.98

Table 10. Reduction factor of yield strength and elastic modulus of steel rebar using temperature estimated by Code equations

Code	PP fiber contents (vol.%)	Position (mm)	Steel rebar	Code estimated temp. (°C)	Reduction factor
ACI 216	0.0	50	bottom	520	$f_{y,\theta}$
					$E_{s,\theta}$
		150	upper	145	$f_{y,\theta}$
					$E_{s,\theta}$
EUROCODE 2	0.0	50	bottom	495	$f_{y,\theta}$
					$E_{s,\theta}$
		150	upper	Estimation of the temperature effect occurs within the range 100mm	$f_{y,\theta}$
					$E_{s,\theta}$

시 발생온도보다 약간 높게 산정되어 감소계수가 약간 작아지는 결과를 보인다. 따라서 ACI 216 및 EUROCODE 2에 규정된 화재지속시간에 따른 발생온도는 단면 깊이가 낮으면 철근의 항복응력 및 탄성계수를 매우 과다평가하게 되고, 단면 깊이가 증가하면 약간 과소평가되는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 내화성능을 고려하지 않은 실험체와 내화성능 향상을 위해 PP섬유를 0.1vol.% 혼입한 RC 슬래브 실험체를 제작하여 ISO 834 화재곡선을 적용한 가열실험을 수행하였다. 가열실험으로부터 철근과 콘크리트의 단면 깊이별 발생온도를 측정하고, ACI 216과 EUROCODE 2에서 규정하는 가열시간별 발생온도를 산정하여 가열실험 결과와 비교하여 가열시간별 발생온도의 수준을 비교분석하였다. 가열실험 및 주요 규정에 따라 산정된 가열시간 및 단면 깊이별 발생온도를 ACI 216

과 EUROCODE 2의 규정에 적용하여 온도증가에 따른 콘크리트의 압축강도, 철근의 항복강도 및 탄성계수 등을 평가하고 이를 비교분석하였다. 참고로, PP섬유가 혼입되지 않은 실험체에서는 폭렬이 발생하여 가열면에서 가까운 단면 내에서 발생온도가 높게 측정되었지만, 각 규정에서는 폭렬의 영향이 반영되지 않아 상대적으로 발생온도가 낮게 평가되었다. 주요 결론은 다음과 같다.

1) ISO 834 화재곡선으로 3시간 가열실험을 수행한 결과, PP섬유가 혼입되지 않은 콘크리트 표면부에서는 폭렬현상이 심하게 발생하였고, PP섬유가 0.10vol.% 혼입된 콘크리트에서는 폭렬이 발생되지 않았다. 또한 PP섬유가 혼입되지 않은 실험체는 폭렬로 인해 가열면으로 부터 약 100mm 단면 깊이 이내에서 PP 섬유가 혼입된 경우보다 상대적으로 높은 온도가 발생되었으며, 100mm 단면 깊이가 이후부터는 유사한 수준을 보였다.

2) 가열실험에서 측정된 가열시간에 따른 단면 깊이별 발생온도를 ACI 216과 EUROCODE 2 규정에 의해 산정된 가열시간에 따른 발생온도와 비교한 결과, 100mm 이내의 단면 깊이에서는 폭렬의 영향이 고려되지 않아 코드 규정이 발생온도를 낮게 평가하고, 100mm 이상의 단면 깊이에서는 유사한 수준을 보였다. 또한, 발생온도의 차이는 가열시간이 증가할수록 커지고, 가열면으로 부터의 단면 깊이가 작을수록 커지는 경향을 보였다.

3) 가열실험, ACI 216 및 EUROCODE 2 규정에 의해 가열시간에 따른 발생온도를 산정하고, 이들 발생온도를 적용하여 콘크리트 압축강도를 산정한 결과, 폭렬의 영향을 고려하지 못하는 각 규정에 의한 발생온도 적용시 압축강도가 높게 평가되어 단면내력을 실제보다 과다하게 평가하는 것으로 나타났다. 전반적으로 반발경도에 의한 실측 압축강도는 PP섬유가 혼입되지 않은 보통 콘크리트에서는 ACI 216과 EUROCODE 2 규정 사이의 수준을 보였고, PP섬유가 혼입된 콘크리트에서는 약간 높은 수준을 보였다.

4) 가열실험에서 측정된 단면 내 발생온도는 PP 섬유가 혼입되지 않는 경우, 폭렬의 영향으로 가열면에서의 단면 깊이가 작으면 발생온도가 커져 철근의 항복응력 및 탄성계수가 크게 감소하였고, PP섬유가 혼입되는 경우에는 발생온도가 낮아 상대적으로 철근의 항복응력 및 탄성계수가 높게 평가되었다. ACI 216과 EUROCODE 2 각 규정에 따른

감소계수는 큰 차이를 보이지 않았다.

5) ACI 216 및 EUROCODE 2에 규정된 화재지속시간에 따른 발생온도는 단면 깊이가 낮으면 철근의 항복응력 및 탄성계수를 과다하게 평가하게 되고, 단면 깊이가 증가하면 약간 과소하게 평가되는데, 주원인은 폭열의 영향이 합리적으로 고려되지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

감사의 글 : 이 논문은 2010년도 단국대학교 대학 연구비의 지원으로 연구 되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 김홍열, 채한식, 전현규, 염광수, “Fiber Cocktail을 혼입한 고강도콘크리트의 고온시 압축강도 특성 및 모델 제시에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 학술발표논문집, pp. 605~608, 2007.
- 2) 염광수, 전현규, 김홍열, “섬유혼입공법을 적용한 고강도콘크리트 기둥의 비재하 내화 실험”, 한국콘크리트학회논문집, 제21권, 제4호, pp. 465~471, 2009.
- 3) 한국산업규격, “건축 구조 부재의 내화시험방법-기둥의 성능조건 KS F 2257-7”, 한국표준협회, 2005.
- 4) Abrams, M. S., “Compressive Strength of Concrete at Temperatures to 1600F, Temperature and Concrete”, SP-25, American Concrete Institute, Detroit, pp. 33~58, 1971.
- 5) ACI Committee 216, Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements, ACI 216R-89, American Concrete Institute, Detroit, 1989.
- 6) Atkinson, T., Polypropylene Fibers Control Explosive Spalling in High- Performance Concrete, Concrete, Vol. 38, No. 10, pp. 69~70, 2004.
- 7) EUROCODE 2, “Design of Concrete Structures” - Part 1-2 : General rules - Structural fire design, 2004.
- 8) ISO., “Fire Resistance Tests-Elements of Building Construction”, International Standard ISO 834, Geneva, 1975.
- 9) Lie, T.T., and Kodur, V.K.R., “Thermal and Mechanical Properties of Steel-Fibre-Reinforced Concrete at Elevated Temperatures”, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 23, pp. 511~517, 1996.
- 10) Nishida, A., Ymazaki, N., Inoue, H., Schneider, U., and Diederichs, U., “Study on the Properties of High-Strength Concrete with Short Polypropylene Fiber for Spalling Resistance”, Proceedings of International Conference on Concrete under Severe Conditions, CONSEC'95, Vol. 2, Sapporo, Japan, pp. 1141~1150, 1995.
- 11) Poon, C.S., Shui, Z.H., and Lam, L., “Compressive Behavior of Fiber Reinforced High-Performance Concrete Subjected to Elevated Temperatures”, Cement and Concrete Research, Vol. 34, No. 12, pp. 2215~2222, 2004.
- 12) Purkiss, J.A., “Steel Fibre Reinforced Concrete at Elevated Temperatures”, International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 6, No. 3, pp. 179~184, 1984.
- 13) Suhaendi, S.L., and Horiguchi, T., “Effect of Short Fibers on Residual Permeability and Mechanical Properties of Hybrid Fiber Reinforced High Strength Concrete after Heat Eposition”, Cement and Concrete Research, Vol. 36, pp. 1672~1678, 2006.
- 14) Taerwe, L., Poppe, A. M., and Annerel, E., “Structural Assessment of a Pretensioned Concrete Girder after Fire Exposure”, CEB-FIP, Proceedings of the 2nd International Congress, June 5-8, Naples, Italy, 2006.
- 15) Yang, H., Han, L.H., and Wang, Y.H., “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, 2008.