

다양한 전단보강근비를 가진 RC보의 화재노출시간에 따른 강도변화

Strength of RC Beam with Various Shear Reinforcement Ratios After Experiencing Different Duration of Fire Load

서수연¹⁾* 정채명²⁾ 최기봉³⁾
Seo, Soo Yeon Jeoung, Chae Myeoung Choi, Ki Bong

Abstract

This paper presents research result to study the change of structural capacity of reinforced concrete beams with various shear reinforcement ratios after damage by fire load. In addition, fundamental data are given in order to predict the strength variation of RC member due to fire damage by evaluating the previous calculation method codified in codes.

Nine RC beam specimens were made and exposed to the fire controlled by the standard fire curve. And the structural capacity was evaluated through a failure test under simple support condition. Previous code formula, ACI code and Eurocode were reviewed and used for the calculation of the strength of specimens damaged by fire.

From the test, RC beam specimens exhibited very brittle failure when it exposed to fire controlled by standard fire curve during more than one hour. And this failure pattern tended to be more serious when shear reinforcement ratio decreased or fire loading duration increased. From the evaluation of the calculation process in code, the change of strength due to fire can be properly predicted if the damage of materials is well defined.

Keywords : Shear reinforcement ratio, fire load, failure test, duration, brittle failure

1. 서론

국내의 화재통계자료(소방방재청, 2009; 소방방재청, 2010)에 의하면 2008년과 2009년도의 화재 발생 건수는 각각 총 49,631건과 47,318건에 이른다. 2008년도에 비하여 2009년의 발생건수가 다소 감소하였으나, 여전히 높은 발생건수를 보이고 있으며, 국내 건물의 재해 중에서 가장 높은 발생건수를 보이고 있다. 2009년의 화재발생현황을 보면, 건물에서 발생한 비율은 비주거 건물이 34.8%(16,482건), 주거건물이 24.9%(11,767건)으로서, 전체 화재건수에 중 59.7%에 달하고 있음을 알 수 있다. 즉 많은 건물이 아직도 화재에 노출되고 있으며, 이에 의해 화재에 의한 건물의 손상이 지속적으로 발생하고 있음을 예측할 수 있다.

건물의 주구조부재로 사용되는 철근콘크리트 구조물의 화재에 대한 성능변화는 재료적으로 콘크리트와 강재의 응력-변형률 관계 및 잔존 강도를 근거로 평가할 수 있다

(Buchanan, 2001). 이에 따라 각 국의 기준(Eurocode 2, 1992; ACI 216, 2007)은 화재온도를 근거로 화재노출시간에 따라 각 부재의 재료적 성능이 저감하는 것으로 간주하여 구조성능의 평가를 실시하고 또한 내화설계를 하도록 하고 있다.

철근콘크리트 부재가 화재에 노출될 경우, 일차적으로 피복 콘크리트가 고온에 노출되고 다음으로 내부의 전단보강근, 주근, 코아 콘크리트의 순으로 온도가 전이됨으로 인하여 표면에서 가까이 있는 부재부터 재료적 물성이 변화된다. 피복콘크리트는 내부의 철근을 보호하는 역할을 하는 반면에 전단보강근은 내부콘크리트의 구속 및 전단력에 대하여 저항을 하게 됨으로 인하여, 전단보강근의 물성변화는 구조성능의 변화를 의미한다.

화재에 노출된 철근콘크리트 부재에서 고온에 의하여 콘크리트 또는 전단보강근의 물성변화가 발생할 경우, 취성적인 거동이 예상되므로, 전단이 지배적인 철근콘크리트 부재의 성능변화에 대한 연구 또한 필요하다.

1) 정회원, 충주대학교 건축공학과 교수, 공학박사
2) 정회원, 토담구조 대표이사, 공학박사
3) 정회원, 경원대학교 건축공학과 교수, 공학박사

* Corresponding author : syseo@cjnu.ac.kr 043-841-5211
• 본 논문에 대한 토의를 2010년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

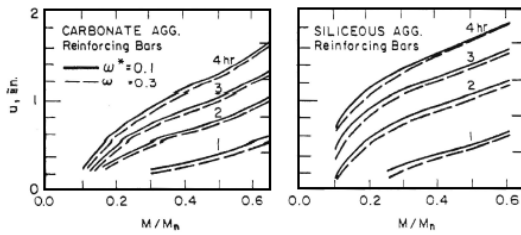


Fig.1 Fire resistance of concrete slabs (ACI 216.1, 2007)

본 연구에서는 전단보강근 비율이 다양한 철근콘크리트 보에 대하여 가열시간을 각각 달리한 후 그 구조성능 변화를 실험적으로 연구하고자 한다. 또한 기존의 기준에서 적용하고 있는 부재의 내력산정방법에 대한 검증을 통하여 화재손상된 철근콘크리트 강도에측을 위한 자료를 제공하고자 한다.

2. 화재손상된 RC보의 성능평가

화재에 노출된 철근콘크리트 부재에 대한 성능평가는 콘크리트와 철근의 온도에 따른 물성변화에 근거한다. 즉 화재노출시 콘크리트와 철근이 경험한 온도를 정확하게 파악할 수 있다면, 그에 따른 재료적인 변화를 고려하여 부재의 강도변화를 예측할 수 있다.

내화설계의 측면에서는 화재시 시간대별로 변동하는 온도를 표준화하고 설계온도에 따른 부재내 콘크리트 및 철근의 온도에 따른 강도변화와 구조내력의 관계를 근거로 안전한 설계가 가능하다. 화재에 노출된 철근콘크리트 보에 대하여 미국과 유럽의 기준에서 정하고 있는 내화강도산정에 관련한 내용을 보면 아래와 같다.

ACI 216에서는 Fig. 1에 나타난 피복(그림의 세로 축)에 따른 표준가열시간별 강도 저감 곡선을 이용하여 슬래브 및 보의 화재저항성능을 결정할 수 있도록 하고 있다. Fig. 1에서 $w = A_s f_y / (b d f'_{ck})$ 이다. 이때 보에서 하부 모서리 철근의 경우, 하부와 측면이 동시에 화재에 노출되기 때문에 피복 값은 실제의 1/2로 간주한다. Fig. 1로부터 피복두께가 결정되면, 가열시간에 따른 강도저감율 (M/M_n)을 구할 수 있다.

Eurocode에서는 Fig. 2에 나타난 온도분포관계 그림을 이용하여 가열된 표면에서의 위치별 온도를 산정할 수 있도록 하고 있다. 이때의 외부 온도는 표준온도곡선을 근거로 하고 있고, 측면과 하부에서 동시에 열이 작용하는 경우를 대상으로 한다. ACI기준과 달리 Eurocode에서는 Fig. 2로부터 구한 온도를 근거로 철근 또는 콘크리

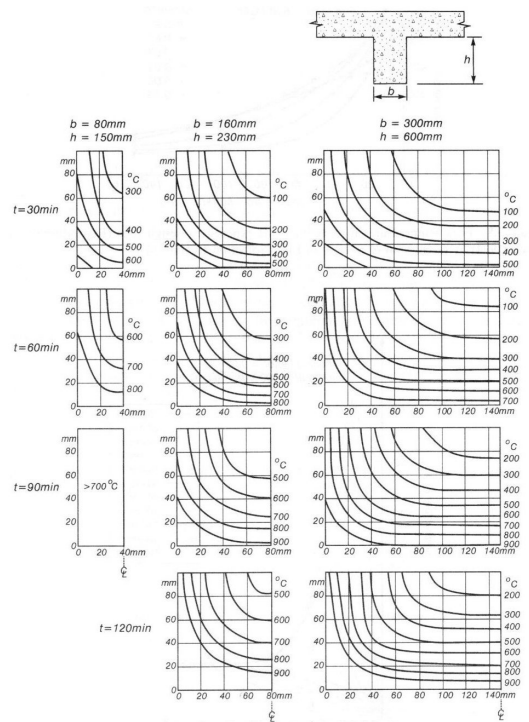


Fig. 2 Temperature contours in concrete beams exposed to the standard temperature curve (EC2, 1993)

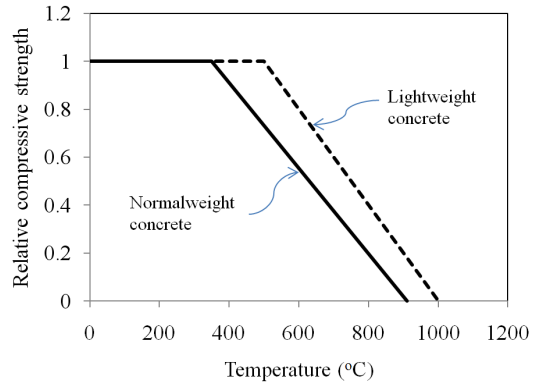


Fig. 3 Design values for reduction of compressive strength of concrete with temperature (EC2, 1993)

트의 물성변화를 계산하고 이를 이용하여 부재의 내력을 산정한다. 이때의 콘크리트와 철근의 온도별 강도변화는 Fig. 3 및 Fig. 4와 같이 단순화된 상관관계를 이용하여 산정할 수 있다.

상기의 두가지 기준에서 ACI기준에서는 화재발생시 철근콘크리트 보의 경우에는 휨성능의 변화를 중심으로 규정하고 있다. 즉 화재에 의해 주근보다 외부쪽에 있는 전단보강근의 재료적특성이 변하거나 콘크리트가 취성적이 될 경우 전단강도의 변화가 예상되지만 이에 대한 사항은 다루고 있지 않다.

반면에 Eurocode에서는 화재발생에 따른 부재내 위치

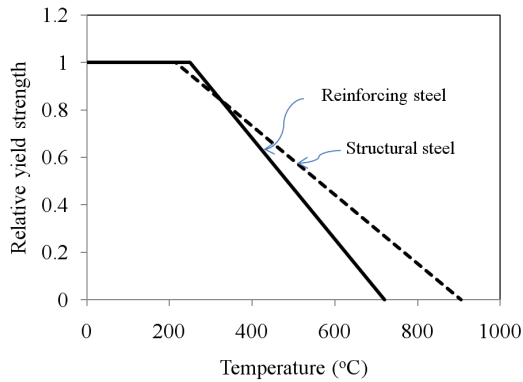


Fig. 4 Design values for reduction of yield strength of steel with temperature (EC3, 1993)

별로 온도를 계산하고 이를 근거로 콘크리트와 철근의 재료적 물성변화를 이용하여 부재의 보유내력을 산정할 수 있도록 하고 있기 때문에 휨 및 전단내력의 변화를 모두 예측할 수 있다. 그러나 부재단면상으로 다양한 온도분포가 형성되기 때문에 유한요소해석 등과 같은 해석을 실시하거나 아니면 온도분포를 보다 단순화하여 부재내력을 평가할 수 있는 방안이 요망된다.

화재노출된 철근콘크리트 부재의 성능변화에 관련해서는 국내에서도 많은 연구가 수행되었다. 화재노출시간 등에 대하여, 신영수 등(2002)이 실시한 보통 강도 콘크리트 휨부재에 대하여 화재 노출시간과 피복두께를 변수로 실험을 실시한 결과에 따르면, 규정된 피복두께인 실험체에 대하여 표준가열곡선에 따라 온도하중이 작용할 경우, 약 60분 이상의 가열부터 구조물에 손상이 발생하였다. 또한 1시간 이상 부터 2시간까지 가열될 경우, 일정 하중에 대한 처짐이 무가열에 비하여 최대 53%까지 증가하는 것으로 보고하여 전술한 ACI 기준과 Eurocode에서 정한 값들에 비하여 화재노출에 따른 손상정도가 다소 심각해지는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

이와 같은 경향은 서수연 등(2010)이 실시한 보 실험에서도 60분 가열 이후 급격한 손상이 발생하며 또한 부재의 거동이 매우 취약적인 양상을 보이는 것이 확인되었다. 이는 콘크리트를 구성하는 재료적인 특성상의 차이 등과 같은 여러 가지 이유가 있을 것으로 예상된다.

따라서 가열온도에 따른 철근콘크리트 보에서의 내력 저감과 관련하여 국내실정에 적합한 연구가 필요할 뿐만 아니라, 전단보강근의 물성변화 및 콘크리트의 취성화에 따른 부재의 구조성능변화에 대한 연구가 필요한 것으로 사료된다. 특히 기존의 기준식에서 정하고 있는 화재손상

Table 1 Test specimen

Specimen name	Size	Exposure time (min.)	Shear reinforcement distance (mm)	Shear reinforcement ratio (%)
NA-10	300 × 500 × 2000	-	150	0.32
NB-10		-	200	0.24
NC-10		-	250	0.19
FT1A-10		60	150	0.32
FT1B-10		60	200	0.24
FT1C-10		60	250	0.19
FT2A-10		120	150	0.32
FT2B-10		120	200	0.24
FT2C-10		120	250	0.19

N=Normal, F=Fire, T=Time

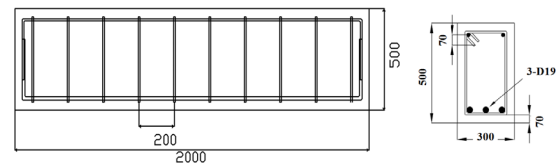


Fig. 5 Specimen detail

이후 성능평가에 대한 검토 및 평가가 요망된다.

3. 실험

3.1 실험체 계획

전술한 연구배경을 근거로 본 연구에서는 Table 1에 나타난 바와 같이 총 9개 철근콘크리트 보 즉, 고온에 의해 손상된 실험체 6개, 고온에 노출되지 않은 실험체 3개를 계획하였다. 실험체의 인장철근은 3개의 D19철근, 압축철근은 2개의 D13철근으로 배근하였고 실험체의 형태 및 치수 등은 Fig. 5에 나타난 바와 같다.

제작된 실험체에 대한 가열시험은 수평가열로에서 KS F 2257(한국표준협회, 1999) 기준에 따라 가열 하였다. 실험에서 고려한 주요변수는 고온에서의 노출시간과 전단스팬비이다.

3.2 재료실험

실험체에 사용한 콘크리트의 28일 압축강도는 21MPa로 나타났다. 고온에 의해 손상된 콘크리트의 경우에는 반발경도시험기(schmidt-hammer)를 사용하여 강도를 추정 하였다. 콘크리트 공시체를 실험체와 동일하게 가열로

Table 2 Material properties

Type	Concrete		Reinforcement							
	f _{ck} (MPa)	Ratio	D10				D19			
			f _y (MPa)	Ratio	f _u (MPa)	Ratio	f _y (MPa)	Ratio	f _u (MPa)	Ratio
No fire	21	1.00	375	1.00	585	1.00	336	1.00	414	1.00
1 hour fire	17.6	0.84	357	0.95	560	0.96	307	0.91	408	0.99
2 hour fire	15.5	0.74	314	0.84	557	0.95	304	0.90	402	0.97

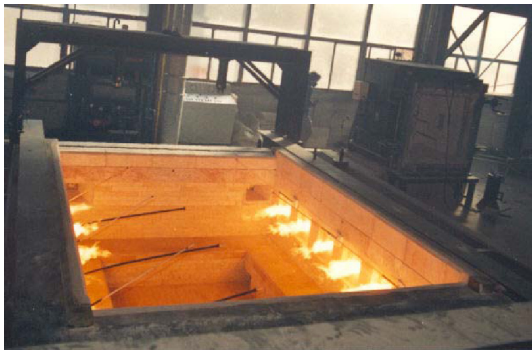


Fig. 6 Furnace for heating

에서 가열하였으나, 고온에 의해 압축강도시험을 실시할 수 없을 정도로 파손시 심각하여 실험체를 대상으로 반발경도 시험을 통하여 압축강도를 추정하였다. 반발경도시험의 신뢰성 확보를 위하여 무가열시험체의 콘크리트 압축강도시험결과와 반발경도값을 비교하여 측정방법의 신뢰성을 확보한 뒤에 고온에 노출된 실험체에 대하여 반발경도 시험을 실시하였다. 측정위치에 따라 고온에 대한 손상 정도가 다르고 그에 따라 강도값이 다르기 때문에 실험체의 측면 중앙부 위치를 선정하여 강도를 측정하였다.

철근의 경우에는 실제 실험체와 동일조건을 만들기 위하여 철근의 외부에 콘크리트 피복을 만든 후 가열로에서 실험체와 함께 가열하였다. 가열실험 후 실험체의 실험시기에 맞추어 외부 피복을 제거한 뒤 인장시험을 실시하였다.

재료 시험 결과는 Table 2에 나타내었으며 가열시간이 길수록 콘크리트와 철근 모두 강도가 저하됨을 알 수 있다.

3.3 가열실험

실험체를 고온에 노출시키는 가열실험은 “한국 화재보험협회 부설 방재시험연구원”에서 실시하였다. Fig. 6은 가열로에서 고온이 가열되는 상황을 나타낸 사진이며, Fig. 7은 가열개념도를 나타낸다.

실험체의 측면에서 직접 고온이 분사되도록 하였으며

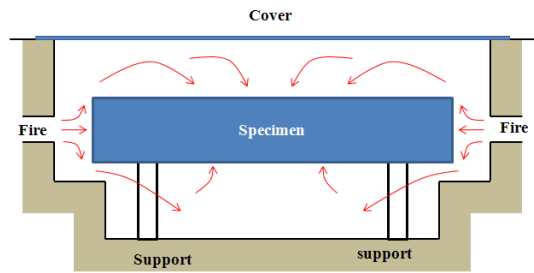


Fig. 7 Heating concept

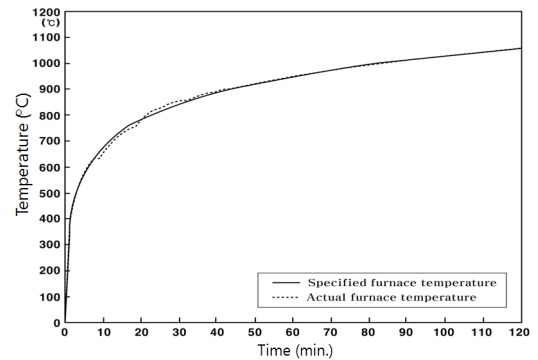


Fig. 8 Standard furnace temperature curve in KS

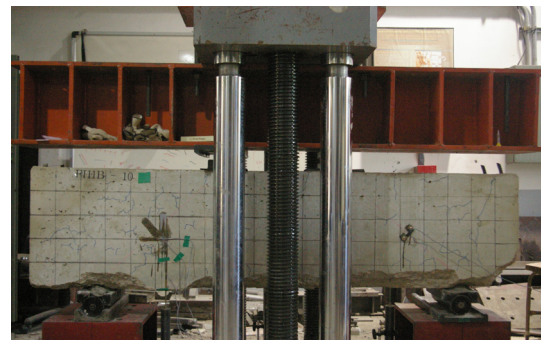


Fig. 9 Failure test setup

가열은 표준가열곡선에 따라 실험의 목적에 부합하도록 60분, 120분 가열하였다. 가열시간에 따른 가열온도는 가열로 중앙에 설치된 열전대를 통하여 측정하였으며 시간에 따른 목표 표준가열온도는 Eq. (1)과 같고 이를 그림으로 나타내면 Fig. 8과 같다.

$$T = 345 \log_{10}(8T + 1) + 20 \quad (1)$$

3.4 파괴실험의 계획

가열로에서 실험계획에 따라 가열된 실험체의 구조성능 변화를 관찰하기 위하여 Fig. 9와 같이 파괴실험을 실시하였다. 단순지지조건으로 실험체를 지지하고 중앙부에



Fig. 10 Damaged specimens after fire test

점증가력하여 잔존내력을 평가하였다. 실험체의 가력부 중앙하단에는 자동변위계를 설치하여 중앙부 처짐을 측정하였다.

4. 실험결과의 분석

4.1 가열시험 결과

가열시험으로부터, 분사되는 고온에 의해 철근콘크리트 보의 하부가 손상되었으며 각 실험체의 가열후 손상상태는 Fig. 10과 같다. 그림으로부터 측면 상부는 거의 손상되지 않았으며, 직접 고온이 분사됨으로 인하여 분사하중이 직접 작용한 밀면의 경우 1시간의 가열에서도 하부 피복이 탈락되는 등의 손상이 발생하였다. 이들 콘크리트 박락은 주로 피복콘크리트로서 1시간 가열과 2시간 가열에 따른 박락정도의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

4.2 화재에 노출된 보에 대한 파괴실험 결과

4.2.1 균열상황

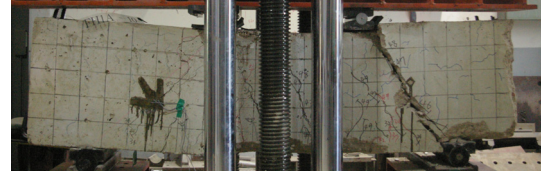
Fig. 11에 무가열, 1시간 가열, 2시간 가열후 가력실험을 실시한 결과 나타난 대표적인 파괴상황을 나타내었다.

무가열실험체인 NA-10의 경우 균열의 진행 양상은 초기 균열이 발생한 후 다수의 횡·전단균열이 발생한 다음 최대하중에 도달하였다. 반면에 전단보강근 비가 상대적으로 작은 NC-10 실험체의 경우에는 초기 횡균열이 발생이후 곧 바로 횡·전단균열이 발생하였으나, 급격한 파괴는 발생하지 않고 압축측의 콘크리트가 압괴되면서 최대하중에 도달하였다.

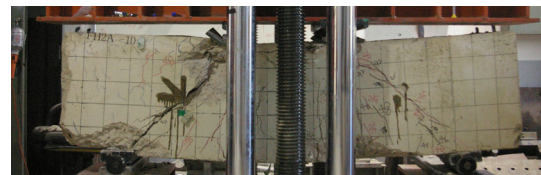
1시간 가열한 실험체인 FT1A-10은 무가열실험체인 NA-10에 비하여 전단균열이 보다 많이 발생 한 뒤 사균열과 파괴로 최대내력에 도달하였다. 2시간 가열한 실험체인 FT2A-10의 경우에도 횡·전단균열 이후 전단파괴에 의해 최종파괴에 도달하였고, 전단보강근비가 적은 경우에는 더욱 취약적인 전단파괴를 보였다. 1시간과 2시간 가



(a) NA-10 specimen



(b) FT1A-10 specimen



(c) FT2A-10 specimen

Fig. 11 Failure shape of specimens after loading test

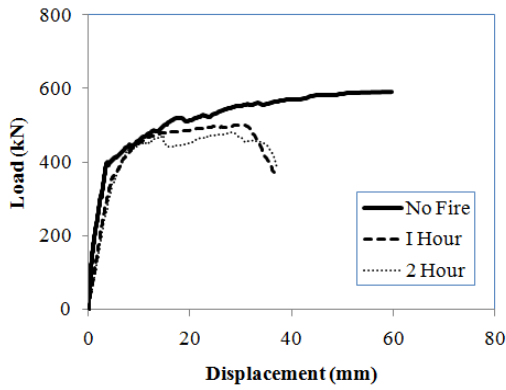
열의 경우, 무가열실험체들에 비하여 매우 취약적인 파괴양상을 보였고, 이러한 양상은 전단보강근비가 작아질수록 그리고 가열시간이 증가할수록 심하게 나타났다.

이상의 결과를 요약하면 초기 균열의 발생형태와 균열의 진전 및 최종파괴 양상이 비교적 유사한 형태를 보이는 것으로 나타났으나, 화재에 노출된 시간이 길어질수록 전단파괴의 양상이 뚜렷해졌음을 알 수 있다.

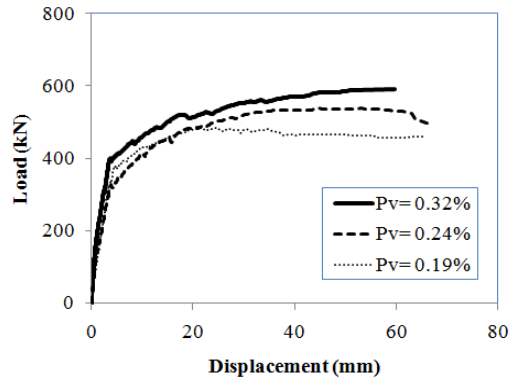
4.2.2 가열시간에 따른 구조성능 변화

동일한 전단보강근비를 가진 실험체들에 대하여, 가열시간에 따른 하중-변위곡선을 비교하여 나타내면 Fig. 12와 같다.

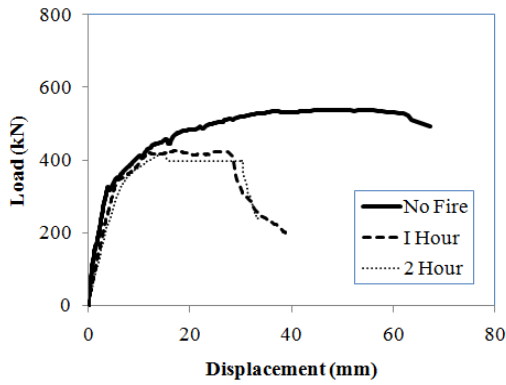
그림으로부터, 1시간 이상 화재에 노출될 경우, 전단보강근의 비율과 상관없이, 현저한 강도와 연성의 저감이 있음을 알 수 있다. 그러나 전단보강근의 간격이 150mm ($\rho_v=0.32\%$)인 실험체와 200mm($\rho_v=0.24\%$)인 실험체들에서는 1시간 가열과 2시간 가열된 실험체의 하중-변위관계곡선상에서 뚜렷한 차이가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 다만, 전단보강근의 간격이 250mm($\rho_v=0.19\%$)인 실험체에서는 가열시간이 길어짐에 따라 부재의 강도 및 강성저감이 현저히 저하되는 양상을 보였다. 이는 화재손상에 의하여 콘크리트가 보다 취약적인



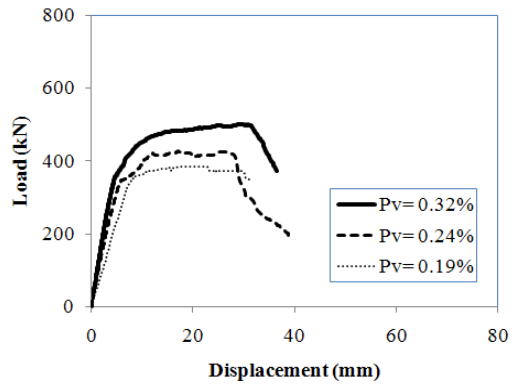
(a) A Series ($\rho_v = 0.32\%$)



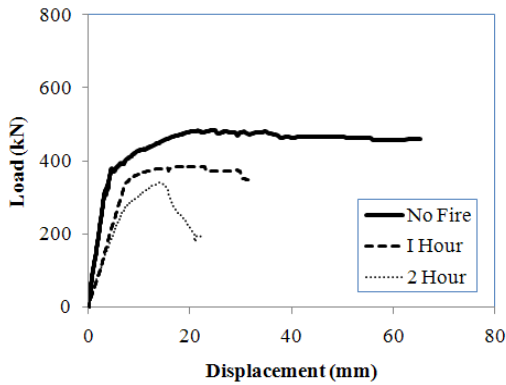
(a) No fire



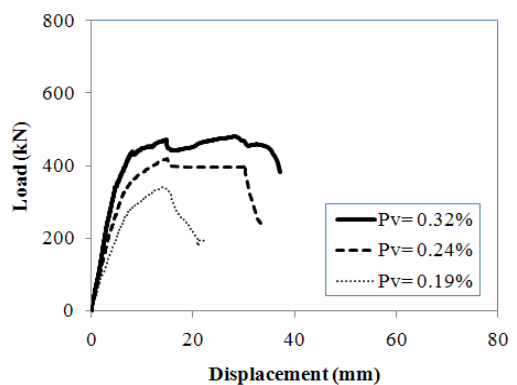
(b) B Series ($\rho_v = 0.24\%$)



(b) 1 Hour fire



(c) C Series ($\rho_v = 0.19\%$)



(c) 2 Hour fire

Fig. 12 Load-Displacement curve of specimens corresponding to the fire exposure duration

Fig. 13 Load-displacement curve corresponding to the shear reinforcement ratio

거동을 보였고 또한 전단보강근에 의한 구속력이 저하되었기 때문으로 예측된다.

4.2.3 전단보강근비에 따른 구조성능 변화

가열시간별로 분류하여 실험체의 하중-변위곡선을 Fig. 13에 나타내었다.

무가열실험체의 경우에는 전단보강근비의 비율이 작아짐에 따라 부재의 최대내력이 낮아지는 경향을 보이고 있으나, 초기강성과 연성은 매우 유사한 양상을 보이고 있

다. 그러나 가열시간이 1시간인 경우, 부재의 초기강성과 최대내력에서 전단보강근비가 작을수록 저하율이 증가하였고, 2시간 가열에서는 그 차이가 확연하게 나타났다. 특히 C 시리즈 실험체가 2시간 화재에 노출된 경우, 최대내력에 도달한 뒤 바로 취성과괴되는 양상을 보였다.

이상으로 부터, 화재에 일정시간 이상 노출될 경우, 부재의 취성적인 성향은 증가하며 특히 전단보강근이 작아질수록 그 양상은 심각하게 됨을 알 수 있다.

Table 3 Load test result

Specimen name	Initial crack			Yield point			Ultimate point		Ductility δ_u/δ_y
	Load (kN)	Displacement (mm)	Stiffness (kN/mm)	Load (kN)	Displacement (mm)	Stiffness (kN/mm)	Load (kN)	Displacement (mm)	
NA-10	150	0.8	187.5	382	3.4	112.4	590	59.7	17.6
NB-10	130	1.06	122.6	316	3.2	98.8	538	44.9	14.0
NC-10	130	1.32	98.5	361	4.3	84.0	484	24.8	5.8
FT1A-10	200	2.34	85.5	343	5.7	60.2	500	29.5	5.2
FT1B-10	110	1.5	73.3	330	5.3	62.3	424	25.9	4.9
FT1C-10	50	1.12	44.6	331	7.2	46	386	18.9	2.6
FT2A-10	180	2.7	66.7	412	7.0	58.9	480	28.0	4.0
FT2B-10	140	2.3	60.9	323	6.3	51.3	419	15.0	2.4
FT2C-10	51	1.28	39.8	254	6.5	39.1	341	14.0	2.2

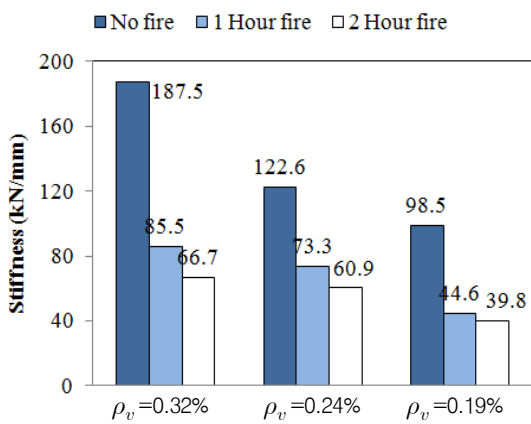


Fig. 14 Stiffness at initial crack

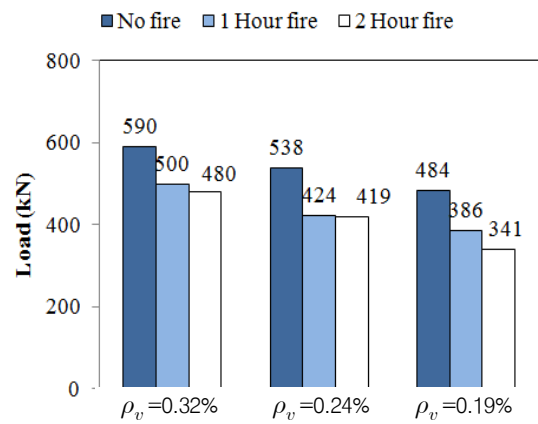


Fig. 16 Ultimate load

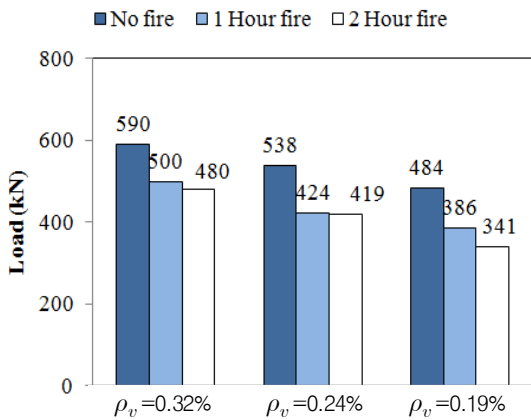


Fig. 15 Stiffness at yield point

4.2.4 내력, 강성 및 연성의 비교

실험계획에 따라 화재에 노출된 실험체에 대하여 최종 파괴시까지 하중을 점증가력시켜 파괴실험을 실시한 결과 나타난 초기균열 발생시, 항복시와 최대내력시의 하중과 변위를 정리하여 Table 3에 나타내었다. 항복은 하중-변위곡선에서 탄성기울기가 변하여 비선형거동이 시작

될 때로 하였다.

강성은 초기균열시의 강성과 항복시의 원점에 대한 강성으로 나타내었으며, 실험체별로 강성을 비교하여 Fig. 14와 Fig. 15에 나타내었다. 초기강성과 항복강성은 비슷한 양상이었으며 가열시간이 증가할 수록 강성이 낮아지는 경향을 보였다. 그 감소비율은 1시간 화재노출된 경우 현저하였지만, 2시간인 경우에는 1시간에 비하여 그 감소폭이 급격히 낮아지는 것으로 나타났다. 통상 이와 같은 강성의 저감은 콘크리트의 물성변화에 밀접하게 관련된다.

각 실험체의 최대내력을 비교하여 나타낸 Fig. 16에서도 가열시간이 증가함에 따라 최대내력이 저감함을 알 수 있다. 전단보강근비가 0.32%이거나 0.24%인 경우에는 1시간 가열과 2시간가열에 따른 내력저하가 큰 차이가 없지만, 전단보강근비가 0.19%인 경우, 가열시간이 1시간, 2시간으로 증가함에 따라 강도저감이 지속적으로 발생하였다. 이는 전단보강근 양이 작을 경우 콘크리트의 물성저감에 따른 지속적으로 내력이 저감될 가능성이 있음을 의미한다.

항복변위에 대한 최대내력시의 변위를 나타낸 연성비를

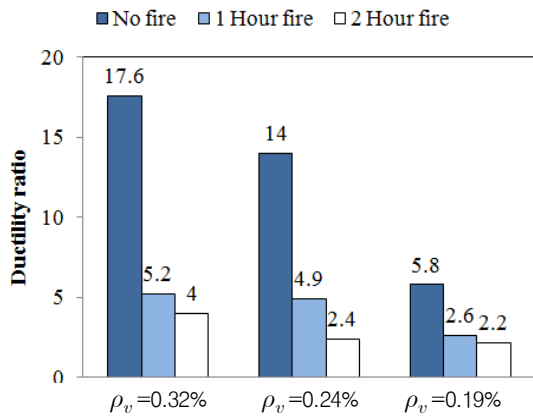


Fig. 17 Ductility ratio

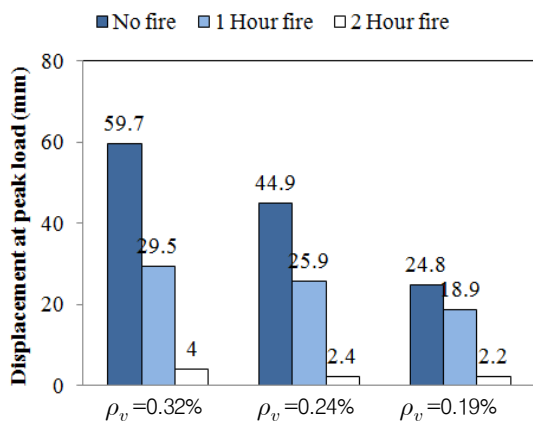


Fig. 18 Displacement at peak load

Fig. 17에 나타내었다. 이 그림으로부터 1시간 이상 가열된 실험체의 연성비가 급격히 낮아짐을 알 수 있다. 이와 같은 연성비의 저감은 전단보강근비의 양과 무관한 것으로 나타났다. 연성비는 부재의 항복변위를 어떻게 정하는가에 따라 그 값이 크게 변할 가능성이 높다. 이에 따라 최대 하중에 도달했을 때의 변위값을 비교함으로써, 부재의 변형능력을 평가할 수 있다. Fig. 18은 각 실험체가 최대내력에 도달했을 때의 변위값을 비교하여 나타낸 것으로서, 2시간 가열된 실험체가 전단보강근 비와 상관없이 급격히 저감되었음을 알 수 있다. 이는 부재를 구성하는 콘크리트와 철근의 급격한 성능저하가 수반되었음을 의미한다.

5. 화재손상 후의 내력 평가

5.1 화재손상 후의 재료강도 변화

전술한 바와 같이 철근콘크리트 부재가 화재에 노출될 경우, 부재의 성능이 저감되고 이는 온도에 따라 콘크리트

Table 4 Strength reduction factor due to fire by Eueocode 2

Fire loading duration	Temp. (°C)	k_{cf} *	k_{sf} **	Location
1 Hour	250~350	1.0	1.0~0.78	Main bar (50mm)
	300~450	1.0~0.82	0.89~0.57	Stirrup (40mm)
2 Hour	400~550	0.91~0.64	0.68~0.36	Main bar (50mm)
	500~650	0.73~0.46	0.46~0.15	Stirrup (40mm)

* Strength reduction factor for concrete

** Strength reduction factor for reinforcement

트와 철근의 재료적 물성이 변함을 의미한다.

화재발생에 따른 콘크리트 부재내의 온도변화는 각 기준에서 정하고 있으며, ACI 기준은 Fig. 1 그리고 Eurocode는 Fig. 2를 이용하여 산정하도록 하고 있다.

특히 Eurocode를 이용할 경우, 본 실험체의 조건 즉, 실험체의 폭이 300mm이고, 깊이가 600mm이며 피복은 40mm, 주근이 위치한 곳이 표면에서 50mm일 때 가열 시간별 전단보강근 및 주근의 도달온도를 구할 수 있다.

이와 같이 예측된 온도를 근거로, Fig. 3과 Fig. 4를 이용하여 콘크리트와 철근의 온도변화에 따른 강도를 추정할 수가 있다. Tble 4는 가열에 따른 콘크리트와 철근의 위치별 온도를 근거로 Fig. 3과 Fig. 4로부터 구한 저감 계수 값을 나타낸다. 각 가열시간에서 계산된 온도 중 높은 온도는 모서리 부분의 온도이다.

전체적으로 온도분포에 따른 저감율의 변동폭이 큼을 알 수 있고, 특히 철근의 강도저감 값은 실제 재료시험결과인 Table 2의 값에 비하여 노출온도에 따른 저감율이 훨씬 높음을 알 수 있다. 이에 따라 화재에 노출된 철근콘크리트 부재내 철근의 강도저감을 기존의 기준식으로 평가할 경우 실제 강도가 매우 과소평가됨을 알 수 있다.

5.2 화재손상 후의 구조성능 변화

철근콘크리트 부재는 화재에 노출됨으로 인하여, 콘크리트와 철근에 부분적인 재료적 성능저하가 발생하게 되고 이에 의하여 부재의 구조적 특성이 변하게 된다. Fig. 19는 1시간 이상 표준가열곡선에 노출될 경우 철근콘크리트 보는 급격히 취성적인 거동을 보일 수 있음을 보여 주고 있다. 이와 같은 취성적인 거동은 화재에 의해 콘크리트 또는 강재에 심각한 손상이 발생하였음을 의미한다.

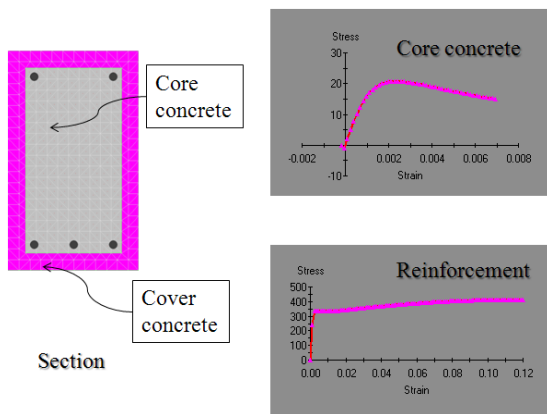


Fig. 19 Material models for nonlinear sectional analysis

그러나 화재에 노출된 철근의 재료시험결과 심각한 강도 저하 없이 충분한 소성변형을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 화재에 노출된 경우 부재의 급격한 변형능력 저감은 콘크리트가 취성적으로 파괴되었기 때문으로 예측할 수 있다. 이와 같은 콘크리트의 취성적인 파괴는 Fig. 7의 가열개념도에서 압축측 콘크리트도 고온에 노출되어 재료성능이 저하되었기 때문이다. 이와 같은 재료적인 성능변화를 고려하여 부재의 구조성능, 즉 휨성능과 전단성능을 검토하였다.

5.2.1 휨내력의 산정

부재의 휨성능을 검토하기 위하여 X-TRACT 프로그램(Chadwell, 2004)을 이용하여 비선형 단면해석을 실시하였다. 전술한 바와 같이 콘크리트의 경우, 압축측에서 화재에 의한 온도의 영향이 있음을 추정할 수 있기 때문에 Table 2의 저감된 강도를 적용시켰다. 또한 철근도 Table 2의 재료시험결과를 이용하여 휨에 대한 단면해석을 실시하였다. Fig. 18은 프로그램내에 있는 콘크리트와 철근의 재료특성을 나타낸 것으로 콘크리트는 Mander 모델을 적용하였고, 철근은 재료시험결과를 나타낸다.

5.2.2 전단내력의 산정

전단내력의 경우에는, 가열 실험에 따른 재료의 물성치를 적용하여 콘크리트구조설계기준(한국콘크리트학회, 2007)의 콘크리트의 전단력 산정식인 Eq. (2) ~ Eq. (4)를 이용하여 산정하였다.

$$V_c = (0.16 \sqrt{f_{ck}} + 17.6 \rho_w \frac{V_u d}{M_u}) b d \leq 0.29 \sqrt{f_{ck}} b d \quad (2)$$

Table 5 Comparison of test and calculation results

Specimen name	Test result (kN)	Calculation result by code (kN)				Test Cal.	
		Flexural strength	Shear strength				Ultimate strength
	V_c		V_s	V_n			
NA-10	590	555	198	320	518	518	1.14
NB-10	538		198	240	438	438	1.22
NC-10	484		198	192	390	390	1.24
FT1A-10	500	432	182	305	487	432	1.16
FT1B-10	424		182	228	410	410	1.03
FT1C-10	386		182	183	365	365	1.06
FT2A-10	480	422	171	268	439	422	1.14
FT2B-10	419		171	201	372	372	1.13
FT2C-10	341		171	161	332	332	1.03

여기서, $\frac{V_u d}{M_u} \leq 1.0$

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (3)$$

$$V_n = V_c + V_s \quad (4)$$

5.2.3 구조성능의 검토

가열후 손상된 재료특성을 고려하여 산정한 휨강도와 전단강도를 Table 5에 실험결과와 함께 나타내었다. FT1A-10과 FT2A-10 실험체의 경우에는 휨강도로 내력이 결정되었고, 나머지 실험체는 모두 전단강도에 의해 내력이 결정되었다. 전체적으로 실험결과와 계산결과를 비교할 때, 서로 좋은 대응을 보이는 것으로 나타나, 화재에 의해 발생한 재료적 손상이 정확히 파악될 경우 기준의 휨 또는 전단강도 산정식을 이용하여 손상된 부재의 내력을 예측할 수 있는 것으로 사료된다.

6. 결론

- (1) 표준가열곡선에 따라 화재에 노출된 철근콘크리트 보의 파괴실험에서, 1시간과 2시간 가열된 실험체가 무가열실험체들에 비하여 매우 취성적인 파괴양상을 보였고, 이러한 양상은 전단보강근비가 작아질수록 그리고 가열시간이 증가할수록 심하게 나타났다.
- (2) 전단보강근비가 0.32%이거나 0.24%인 경우에는 1시간 가열과 2시간가열에 따른 내력저하가 큰 차이가 없지만, 전단보강근비가 0.19%인 경우, 가열

시간이 1시간에서 2시간으로 증가함에 따라 강도 저감이 지속적으로 발생하였다. 이는 전단보강근 양이 작을 경우 콘크리트의 물성저감에 따라 지속적으로 내력이 저하될 가능성이 있음을 의미한다.

- (3) 초기강성의 경우 가열시간이 증가할 수록 낮아지는 경향을 보였으며 그 감소비율은 1시간 화재노출된 경우 현저하였지만, 2시간인 경우에는 1시간에 비하여 그 감소폭이 급격히 낮아지는 것으로 나타났다.
- (4) Eurocode에 따라 표준가열곡선의 화재에 노출된 RC보의 온도분포를 예측한 결과, 온도분포에 따른 저감율의 변동폭이 크음을 알 수 있고, 특히 철근의 강도저감 값은 실제 재료시험결과에 비하여 노출 온도에 따른 저감율이 훨씬 높게 나타났다. 이에 따라 화재에 노출된 철근콘크리트 부재내 철근의 강도저감을 기존의 기준식으로 평가할 경우 실제 강도가 과소평가될 수 있는 것으로 나타났다.
- (5) 콘크리트와 철근의 화재손상에 따른 물성변화를 적절히 고려할 경우, 단순한 휨이론 또는 전단설계식으로 화재손상된 철근콘크리트 부재의 구조성능 변화를 충분히 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설핵심연구개발사업(06건설핵심 B04)에 의해 수행된 연구의 일부로서 연구지원에 감사드리며, 또한 실험연구를 위해 많은 도움을 준 김영만

군에게 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 소방방재청, 2008년도 화재통계연감, 소방방재청, 2009.
2. 소방방재청, 2009년도 화재통계연감, 소방방재청, 2010.
3. 서수연, 김영만, 최기봉, "화재손상된 철근콘크리트 깊은 보의 전단경간비에 따른 구조성능 변화", 대한건축학회 논문집, 게재예정.
4. 이소진, 신영수, 이차돈, 홍성걸, "화재피해를 입은 일반 강도 철근콘크리트 휨부재의 구조거동", 한국콘크리트학회 2002년 가을학술발표회, pp.307-312.
5. 한국표준협회, 건축 구조 부재의 내화 시험 방법, 한국산업규격 KS F 2257, 1999.
6. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준 해설, 2007, pp.154-155.
7. ACI Committee 216, "Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies", American Concrete Institute, 2007.3.
8. Buchanan, A. H., Fire Engineering Design Guide, Second Edition, Centre for Advanced Engineering, University of Canterbury, New Zealand, 2001.
9. Charles Chadwell, XTRACT-Cross Section Analysis Program for Structural Engineers, Imbsen Software Systems, 2004.
10. Eurocode 2, Design of Concrete Structures, ENV 1992-1-2: General Relase-Structural Fire Design, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

(접수일자 : 2010년 7월 2일)

(심사완료일자 : 2010년 8월 31일)

요 지

본 연구에서는 전단보강근 비율이 다양한 철근콘크리트 보에 대하여 가열시간을 각각 달리한 후 그 구조성능변화를 실험적으로 연구하였다. 또한 기존의 기준에서 적용하고 있는 부재의 내력산정방법에 대한 검증을 통하여 화재손상된 철근콘크리트 강도예측을 위한 자료를 제공하고자 한다.

이를 위하여 9개의 철근콘크리트 보를 제작하여 표준가열곡선에 따라 가열로에서 가열시험을 실시하고, 이들 손상된 보에 대한 파괴실험을 통하여 구조성능의 변화를 관찰하였다. 또한 부재와 동일한 피복을 가진 철근에 대하여 가열후 철근강도변화를 관찰하여 가열에 따른 철근의 물성변화를 파악하였다. ACI기준과 Eurocode 기준을 분석하고 실험결과와의 비교를 통하여 화재손상된 RC부재의 구조성능변화를 평가하였다.

연구결과, 1시간과 2시간 가열된 실험체가 무가열실험체들에 비하여 매우 취성적인 파괴양상을 보였고, 이러한 양상은 전단보강근비가 작아질수록 그리고 가열시간이 증가할 수록 심하게 나타났으며, 화재에 의한 재료손상의 정확한 예측이 가능할 경우, 부재의 구조성능변화는 충분히 평가가능한 것으로 나타났다.

핵심 용어 : 전단보강근비, 화재하중, 파괴실험, 기간, 취성적 파괴