

단면크기 및 피복두께 변화에 따른 철근콘크리트 기둥의 내화성능에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Fire Resistance Performance of the Reinforced Concrete Columns According to the Cross Section Size and Depth of Concrete Cover

조경숙 · 여인환[†] · 조범연 · 김흥열 · 민병렬

Kyung-Suk Cho · In-Hwan Yeo[†] · Bum-Yeon Cho · Heung-Youl Kim · Byung-Yeol Min

한국건설기술연구원

(2011. 1. 7. 접수/2011. 2. 11. 채택)

요 약

최근 콘크리트 내화 연구는 대부분 고강도 콘크리트의 내화성능 확보에 많은 초점이 맞추어져 있다. 그러나 국내의 콘크리트 수요를 살펴보면 40MPa 이하의 일반강도 콘크리트의 수요가 전체 콘크리트 수요량의 대부분을 차지한다. 따라서 고강도 콘크리트의 내화성능에 대한 연구뿐만 아니라 일반콘크리트의 내화성능에 관한 연구도 필요하다. 본 연구에서는 40MPa 콘크리트 기둥을 대상으로 콘크리트 피복 두께와 단면크기를 변수로 하여 내화성능을 평가하였으며, 연구 결과 단면크기가 커질수록, 피복두께가 두꺼워질수록 내화성능은 향상되는 것으로 나타났다.

ABSTRACT

Recent researches of the fire resistance in concrete focus on how to secure relevant functions in the high strength concrete. However, the demand of normal strength concrete less than 40 MPa takes most of the total concrete demand. Therefore, fire resistance study needs to cover not only high strength concretes but also normal strength concretes. This study evaluated the fire resistance performance of 40 MPa concrete columns, taking the concrete covering thickness and the size of section as variables. Consequently, the fire resistance performance improved as the section size and the covering thickness became larger.

Key words : Concrete column, Fire resistance, Depth of concrete cover, A cross section size

1. 서 론

최근 건축의 초고층화, 대공간화는 콘크리트의 고성능화 및 고기능화에 초점이 맞추어져 왔다. 그러나 여전히 고강도콘크리트에 비해 일반콘크리트의 소비가 더 큰 비중을 차지하고 있다. 한국레미콘공업협회의 조사에 따른 2005년 호칭강도별 레미콘소비실태현황을 살펴 보면 호칭강도 18MPa, 21MPa, 24MPa이 차지하는 비율이 전체의 85.2%를 차지하며, 40MPa 이상은 0.8%로 보고되었다.⁶⁾

따라서 고강도 콘크리트의 내화성능에 대한 연구뿐만 아니라 일반콘크리트의 내화성능에 관한 연구도 필요하다. 일반적으로 콘크리트는 내화성이 뛰어난 것으로 알려져 있지만¹⁾ 콘크리트를 구성하는 재료와 그 물성, 단면형상, 피복두께 등 내화성능에 미치는 인자들과 내화성능과의 상관관계에 대한 보다 심도 있는 연구가 필요하다.

2. 연구의 배경 및 목적

지금까지 콘크리트 내화에 관한 연구는 주로 고강도 콘크리트에 초점이 맞추어져 왔으며, 이는 고강도 콘

[†]E-mail: kscho@kict.re.kr

Table 1. Mixture Proportion of Concrete

Compression Strength (MPa)	w/c (%)	s/a (%)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	AD (kg/m ³)
40	34.6	42.5	480	166	720	993	3.84

크리트의 가장 큰 문제점인 폭렬 발생으로 단면 손실에 의한 구조물 내력 저하로 붕괴를 초래할 수 있어 이를 방지하기 위한 다양한 연구가 진행 중에 있다.^{2,3,5)}

ACI 363R-92에 따르면 고강도 콘크리트는 40MPa (6000psi) 이상으로 규정하고 있으며,¹¹⁾ 국내 콘크리트 표준시방서(2009)에 따르면 ACI 규정과 같이 40MPa 이상을 고강도 콘크리트로 규정하고 있다. 반면에 고강도 콘크리트 내화성능 관리기준에 따른 고강도 콘크리트 관리대상은 50MPa 이상을 규정하고 있다. 따라서 시공의 관점에서는 40MPa, 내화의 관점에서는 50MPa로 규정하고 있어 본 연구에서는 그 경계에 있는 40MPa 강도의 내화특성을 먼저 살펴본 후에 후속 연구를 통하여 강도별 내화특성도 살펴보고자 한다.

일반강도 콘크리트는 300°C에서 10~20%의 강도감소가 발생되며, 600°C에서는 60~75%의 강도감소가 발생되는 것으로 보고되었다. CSH의 화학적결합수가 방출되어 약 110°C 이상에서 주로 증발되며, CSH 결합수의 탈수와 골재의 팽창은 내부압력을 증가시키고 300°C에서의 미세균열을 발생시키게 된다.¹²⁾ 또한 600°C 이상에서는 CSH gel이 분리되고, 800°C에서 콘크리트는 일반적으로 부서진다.¹³⁾ 결과적으로 이러한 많은 미세구조의 변화는 콘크리트 강도와 내구성의 감소를 초래하게 된다.⁸⁾

국내 건축법에 따르면 철근 콘크리트 기둥의 경우 작은 지름 25cm 이상인 경우 내화구조로 인정하고 있다. 일본의 경우 국내와 달리 좀 더 세분화 되어 최소 지름 20cm 이상은 120분, 40cm 이상은 180분, 크기와 상관없이 철근콘크리트 구조일 경우는 60분의 내화성능을 갖는 것으로 규정하고 있다. 미국과 캐나다의 경우도 부재의 최소지름과 피복두께를 기준으로 내화성능을 최소 60분에서 최대 240분까지 규정하고 있다. 이상과 같이 국외의 경우 규정에 의해 사양구조를 다양화하여 건물의 용도와 기능에 맞추어 내화설계가 가능하나 국내의 경우 내화구조 설계와 시공에 있어 선택의 폭이 제한되어 있는 실정이다.

따라서 내화성능에 영향을 미칠 수 있는 다양한 인자 연구를 통하여 건축물의 용도 및 기능에 맞는 내화구조의 선택이 필요할 것으로 판단되며, 본 연구에서는 단면크기와 피복두께 변화에 따른 철근콘크리트 기둥의 내화성능을 살펴보고자 한다.

Table 2. Results of the Tests

Specimen	Compressive Strength (MPa)	Moisture Contents (%)
40 MPa	42.6	5.37

3. 실험체 제작 및 실험방법

3.1 실험체 제작

본 실험에 사용된 시멘트는 KS F 5201에 규정된 H 사 영월산 제품인 보통 포틀랜드 시멘트 1종을 사용하였다. 콘크리트 공시체는 KS F 2403에 따라 제작하였고 KS F 2405에 따라 28일 압축강도를 측정하였다. 콘크리트 공시체의 함수율 측정은 KS F ISO 12570에 의해 측정하였으며 그 결과는 Table 2와 같다. 제작된 시험체의 콘크리트 배합은 Table 1과 같다.

내화성능 평가를 위한 철근콘크리트 기둥은 단면크기와 피복두께를 달리한 각각의 시험체를 높이 1000mm의 단주로 제작하였으며, 내부 주철근 3개소(모서리 2부위, 중앙부 1부위)와, 향후 철근콘크리트 기둥의 성능설계를 위한 기초 데이터로 활용하기 위하여 콘크리

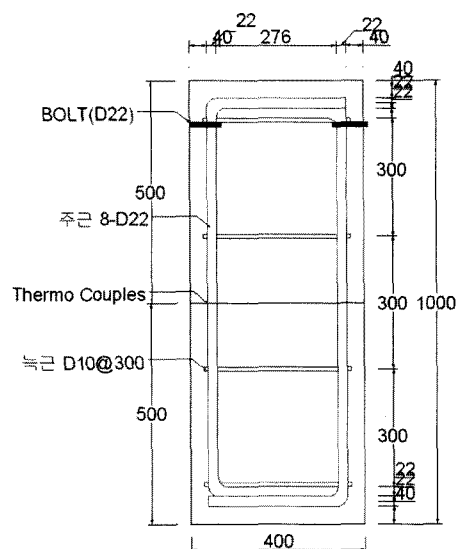


Figure 1. Test specimen(ex)size-400 × 400.

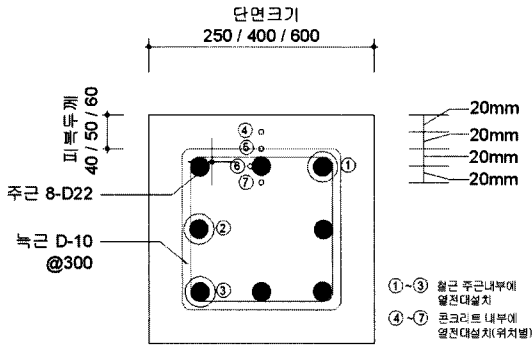


Figure 2. Location of thermocouples.



Figure 3. Test specimens in furnace.

Table 3. Factor of Model for Concrete Column

Compressive Strength (MPa)	Section (mm)	Depth of Concrete Cover (mm)	Number	Note
40	250, 400, 600	40,50,60	3 × 3 = 9EA	-

트 내부 온도는 20mm 간격으로 4개소를 측정하였다. 실험체 형태와 부재 내부의 열전대 설치 모습은 다음 Figure 1, 2와 같다.

3.2 실험 계획 및 방법

40MPa 콘크리트 기둥의 내화성능 평가를 위하여 단면크기와 피복두께를 달리하여 평가하였으며 단면크기는 250mm, 400mm, 600mm의 3수준과 피복두께 40mm, 50mm, 60mm의 3수준으로 총 9개의 실험체를 제작 시험하였다.

실험은 KS F 2257-1의 표준시간 가열곡선에 의하여 180분을 가열하였으며, 내화성능은 국토해양부 고시 제 2008-334호의 고강도 콘크리트 기둥·보의 내화성능 관리기준에 따라 주철근 평균온도 538°C, 최고온도 649°C로 평가하였다. 또한 가열에 의한 부재 내부 수분의 증발로 인해 중량 감소를 측정하기 위하여 실험

전 중량과 실험후의 중량을 측정하였다.

부재 상부에 노출된 열전대 보호를 위하여 내화자인 세라믹을 사용하여 보양하였으며 다음 Figure 3과 같이 가열로 내부에 배치하여 실험을 실시하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 가열에 의한 질량감소

KS F 2257-1의 표준시간 가열곡선에 의한 180분 동안 가열하였으며, 실험체의 중량 변화를 살펴보기 위하여 가열전 중량과 가열후 중량을 각각 측정하였으며, 감소된 중량으로 각각의 중량감소율을 산출하였으며 그에 따른 결과는 다음 Table 4와 같다.

실험체 9개중 단면크기 600mm의 피복두께 60mm 실험체만 모서리 한면에 일부 폭렬이 발생되고 다른 모든 실험체는 폭렬이 발생되지 않았다. 따라서 600-60 실험체만 폭렬에 의한 단면결손에 따른 중량감소량이 증가되었으며 다른 실험체는 가열에 따른 내부 수분 증발의 중량 감소량이다.

각각의 수분증발에 의한 중량감소량을 살펴보면 단면크기 250mm의 경우 적게는 20kg에서 많게는 30kg로 배합표에 의한 배합수 166kg/m³에 따른 실험체의

Table 4. Weight Loss and Spalling Occurrence of Test Specimen after Heating

Specimen	250-40	250-50	250-60	400-40	400-50	400-60	600-40	600-50	600-60
Before (kg)	160	160	150	370	370	380	820	820	820
After (kg)	140	130	120	340	340	350	780	770	760
Spalling	×	×	×	×	×	×	×	×	○
Weight (kg)	20	30	30	30	30	30	40	50	60
Ratio (%)	14.2	23.0	25.0	8.8	8.8	8.5	5.1	6.4	7.9

배합수량인 10.37kg과 비교해보면 콘크리트 배합시 투입된 배합수량보다 2배 이상의 증발량을 보이고 있다. 이는 콘크리트 내부의 자유수뿐만 아니라 CSH 구조의 결합수와 골재 내부에 포함되어 있는 수분까지 증발됨으로 인한 결과로 볼 수 있다. 이에 반해 단면크기 600mm의 경우 40~60kg으로 배합표에 따른 배합수 166kg/m³의 실험체 배합수량인 59.76kg과 비슷한 것으로 나타났다. 이는 급격한 온도상승에 따라 콘크리트 표면부의 수증기압이 증가하여, 그에 따른 압력구배가 구동력으로 작용하여 압밀유동에 의해 수분이 중심부 방향으로 이동^{5,10)}한다. 화재에 직접적으로 노출된 표면부의 경우 자유수와 결합수가 모두 증발되지만 단면이 커짐에 따라 내부로의 열전달이 상대적으로 느려짐으로 인해 콘크리트 내부로 갈수록 열전달이 지연되어 CSH 구조의 결합수뿐만 아니라 자유수의 증발이 모두 이루어지지 않은 것으로 판단된다.

또한 Omer⁸⁾에 따르면 콘크리트는 200°C에서 약 5%의 질량이 감소하며, 1200°C에서는 약 45%의 질량이 감소하는 것으로 나타났으며, 질량 감소율이 약 10%일 경우 콘크리트 강도는 약 70%가 감소하고, 질량감소를 30% 이상인 경우 콘크리트 강도 약 90%가 감소하여 콘크리트 질량 감소는 콘크리트 역학적 특성 변화와 큰 관계가 있는 것으로 보고하였다. 따라서 14~25%까지 질량이 감소한 250mm 크기의 부재의 경우 콘크리트 강도의 감소량은 90% 가까이 될 것으로 판단된다. 따라서 피복두께 50mm 이상 부재의 경우 180분의 내화성능을 갖추었지만 실제적으로 부재가 갖는 역학적인 성능은 거의 상실한 것으로 볼 수 있다.

이를 통해 볼 때 현재 주근의 내부 온도만으로 내화성능을 평가하는 방법은 다소 한계가 있는 것으로 생각할 수 있으며 주요 부재에 대해서는 부재의 변형 측정 등을 통해 내화성능을 평가하는 것이 보다 합리적일 것으로 판단된다.

4.2 단면크기 및 피복두께 변화에 따른 기둥의 내화 성능

단면크기 변화에 따른 콘크리트 기둥의 내화성능은 Figure 4~6과 같으며, 피복두께 변화에 따른 콘크리트 기둥의 내화성능은 다음 Figure 7~9와 같다.

동일피복두께 40mm의 경우 단면크기 250mm의 실험체는 주철근 평균온도 538°C를 173분에 초과하였으나 400mm와 600mm는 180분의 내화성능을 확보하는 것으로 나타났다.

Figure 5의 피복두께 50mm의 경우 모든 실험체가

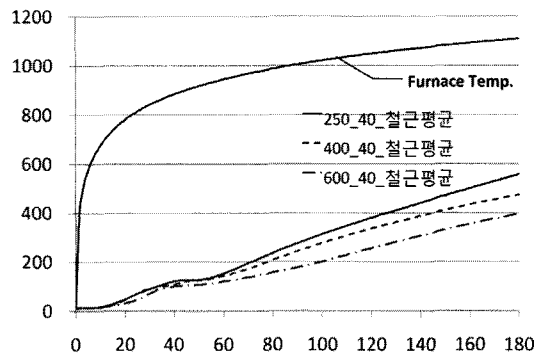


Figure 4. Comparison of the internal temperatures of reinforcing rods depending on the section size (covering thickness 40 mm).

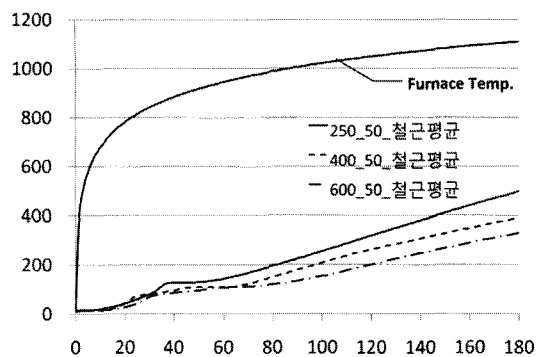


Figure 5. Comparison of the internal temperatures of reinforcing rods depending on the section size (covering thickness 50 mm).

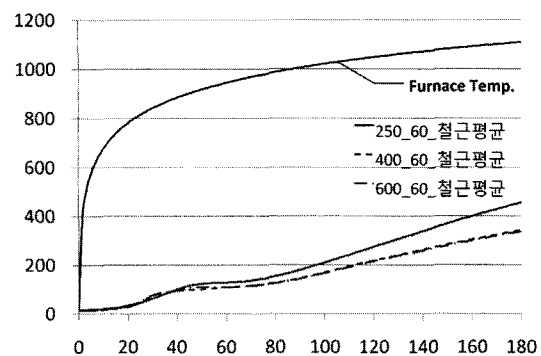


Figure 6. Comparison of the internal temperatures of reinforcing rods depending on the section size (covering thickness 60 mm).

180분의 내화성능을 확보하였으며, Figure 6의 피복두께 60mm의 경우도 모든 시험체가 180분의 내화성능

을 확보하는 것으로 나타났다.

동일 피복두께에서 단면이 커짐에 따라 내부 주철근

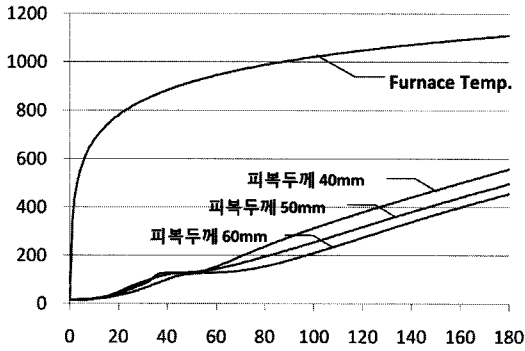


Figure 7. Comparison of the internal temperatures of reinforcing rods depending on the covering thickness (section size 250 mm).

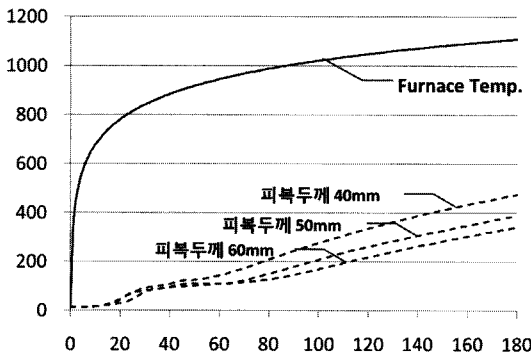


Figure 8. Comparison of the internal temperatures of reinforcing rods depending on the covering thickness (section size 400 mm).

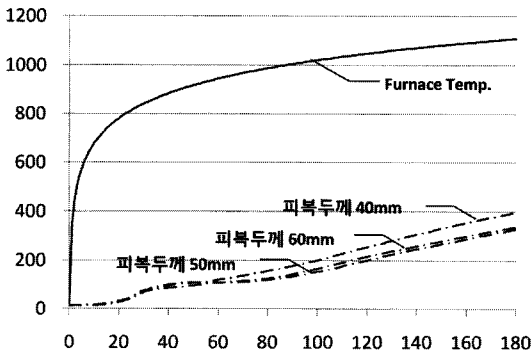


Figure 9. Comparison of the internal temperatures of reinforcing rods depending on the covering thickness (section size 600 mm).

의 온도 상승이 느려지는 것은, 단면적이 커짐으로 인해 부재 자체가 열을 흡수할 수 있는 열용량이 크고, 실험체가 가지고 있는 내부 수분량이 상대적으로 많아짐으로 인해 온도상승을 느리게 하는 것으로 판단된다.

콘크리트 기둥의 피복두께를 변수로 내부 주철근의 온도를 비교한 결과 피복두께가 두꺼워질수록 내화성능은 우수한 것으로 나타났다. 그러나 단면크기 600mm의 경우 피복두께 50mm와 60mm는 내부 철근온도의 상승이 거의 비슷한 것으로 나타났다.

부재 단면의 크기가 커지는 경우 내화시험 3시간 종료 후 내부 주철근의 최종 평균 온도를 비교한 결과 피복 40mm에서는 단면크기 250mm에서 400mm 증가한 경우 최종 온도는 약 14.9%, 400mm에서 600mm로 증가한 경우 최종 온도는 약 16.4%가 감소하여 400mm에서 600mm로 증가할 때 온도 감소폭이 큰 것으로 나타났다. 반면에 50mm와 60mm는 반대의 경향이 나타

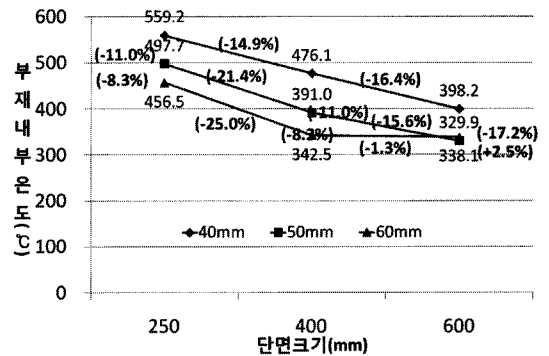


Figure 10. Comparison of the last temperature of reinforcing rods after 180 minutes.

Table 5. Ratio of Reduction Temperature Depending on the Section Size and Covering Thickness as Variable

		Cross Section Size (%)	
		250>400	400>600
Reduction of Temp.	40	-14.9	-16.4
	50	-21.4	-15.6
	60	-25.0	-1.3
Volume Ratio		2.56	2.25
		Depth of Concrete Cover (%)	
		40>50	50>60
Reduction of Temp.	250	-11.0	-8.3
	400	-17.9	-12.4
	600	-17.2	+2.5

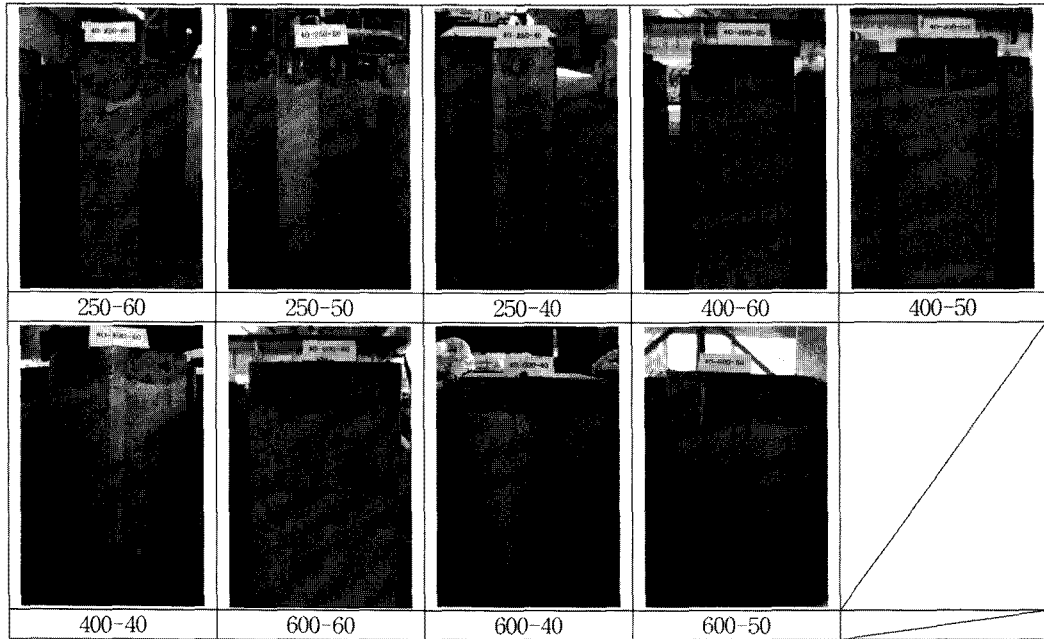


Figure 11. Specimens after test.

났으며 피복두께가 증가할수록 감소폭은 줄어드는 것으로 나타났다.

피복두께 변화에 따른 내부 주철근의 최종 평균온도는 단면크기 증가에 따른 온도에 비해 상대적으로 작게 나타나 내화성능에 영향을 주는 인자로는 단면크기가 피복두께보다 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

5. 결 론

(1) 40MPa 철근콘크리트 기둥은 표준화재에 180분간 노출한 경우 작게는 약 5%에서 많게는 약 25%까지 중량이 감소하는 것으로 나타났으며 이러한 중량감소는 부재의 역학적 성능의 감소를 초래하는 연구 보고가 있어 향후 중량감소와 역학적 성능에 대한 구체적인 연구가 더 필요할 것으로 보인다.

(2) 단면크기 및 피복두께 변화에 따른 40MPa 철근콘크리트 1m 단주 기둥의 주철근 온도 측정을 통한 내화성능을 살펴본 결과 단면크기 250mm에 피복두께 40mm를 제외한 모든 실험체는 180분의 내화성능을 확보한 것으로 나타났다. 또한 단면의 크기가 증가할수록, 피복두께는 두꺼워질수록 내화성능은 향상되는 것으로 나타났으며, 내화성능에 영향을 주는 인자로서는 피복두께보다 단면크기가 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 국가 R&D로 수행하고 있는 한국건설기술연구원의 “지능형 유지관리 기술 개발-구획화재 내화성능 확보기술” 과제와 관련한 연구에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김홍열, 서치호, 신현준, “고온 영역에서 강도영역별 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 논문집(구조계), Vol.21, No.7, pp.55-66 (2005).
2. 정홍근, 손호정, 이보형, 한민철, 양성환, 한천구, “고강도 콘크리트의 부재사이즈 변화에 따른 폭렬특성”, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 구조계, Vol.29, No.1호, pp.571-574(2009).
3. 송영찬, 김용로, 오재근, 김옥중, 이도범, “섬유 혼입량 및 피복두께에 따른 고강도 콘크리트의 내화성능에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 구조계, Vol.29, No.1, pp583-586(2009).
4. 김홍열, 고온 영역에서 고강도 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구, 건국대학교(2002).
5. 고정원, 류동우, 이문환, 이세현, “화재가열환경하에 있는 콘크리트층의 열과 수분이동에 의한 세공구조의 거동 및 폭렬메카니즘에 관한 연구”, 대한건축학회

- 문집 구조계, Vol.23, No.12, pp.107-116(2007).
6. 한국레미콘공업협회, 2005년도 레미콘 및 원자재 소비실태 분석, 레미콘, 제89호(2006).
 7. Long T. Phan and Nicholas J. Carino, Fire performance of high strength concrete: research needs, BFRL in NIST(2004).
 8. Omer Arioiz, "Effect of Elevated Temperatures on Properties of Concrete", Fire Safety Journal, Vol.42, pp.516-522(2007).
 9. Bing Chen, Chunling Li, and Longzhu Chen, "Experimental Study of Mechanical Properties of Normal-strength Concrete Exposed to High Temperatures at an Early Age", Fire Safety Journal, Vol.44, pp.997-1002(2009).
 10. Aschl, M: Mechanical properties of mass concrete at high temperatures, Research Report, TU Munchen (1977)(unpublished).
 11. American Concrete Institute, "State-of-the-Art Report on High-Strength Concret", ACI 363R-92.
 12. G.A. Khoury, C.E. Majorana, F. Pesavento, and B.A. Schrefler, "Modelling of Headed Concrete", Mag. Concr. Res., Vol.54, No.2, pp.77-101(2002).
 13. K.D. Hertz, "Concrete Strength for Fire Safety Design", Mag. Concr. Res., Vol.57, No.8, 445-53 (2005).