구조보강형 고강도 콘크리트 기둥의 내화성능 실험 연구

An Experimental Study on Fire Resistance of High Strength Concrete Columns according to Structural Fire Design

박지선* · 이세현**

Park, jisun · Lee, seahyun

Abstract

In Korea, in the event of performing fire-proofing work on concrete columns with strength of 50 MPa and above, an assessment of the fire-resistance performance must be carried out in accordance with the Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs Notice 2008-334 'Standards for Management of Fire-resistance Performance of High-strength Concrete Columns and Beams.' However, the current standards only prescribe the need to check whether the testing report is submitted during the performance of fire-proofing work. This may pose difficulties in managing the fire-resistance performance in cases where it is impossible to identify whether such work has been done with a naked eye as is the case of the fire mixing method. Thus, in this study, three types of structurally reinforced specimens were fabricated for a fire-resistance performance test in order to propose a structural reinforcement technique that would facilitate the identification of the technique implemented in the field. The structural reinforcement techniques employed in this study were the method of increasing the amount of reinforcement and cross section in accordance with the Euro Code, the metal lath reinforcement method, and the method of increasing the amount of horizontal reinforcement. The strength of concrete used in the experiment was 70 MPa, the standard for design strength.

Key words : Fire resistance, High strength concrete, Column, Structural fire design

요 지

국내에서 50 MPa 이상의 고강도 콘크리트 기둥에 내화공법을 적용할 때에는 국토해양부 고시 제2008-334호 「고강도 콘크리트 기둥·보의 내화성능 관리기준」에 따라 내화성능을 평가하고 관리하도록 규정하고 있다. 그러나 현행기준에서는 현장에서 내화공법을 적용할 때, 해당 공법의 시험성적서 제출여부만을 확인하도록 규정하고 있어 섬유 혼입 공법과 같이 육안으로 공법의 적용 여부를 식별하기 불가능한 경우에는 내화 성능관리에 어려움이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 개선하고자 현장에서 공법 적용 식별이 용이한 구조보강공법의 제안하고자 3종류의 구조보강 실험체를 제작하고 내화성능을 평가해 보았다. 실험에 사용된 구조보강공법은 Euro code에 따른 보강량 및 단면을 증대한 방법, 메탈라스 보강법 및 횡보강량을 증대한 방법이며 실험에 사용된 콘크리트 강도는 설계강도 기준 70 MPa로 하였다.

핵심용어 : 내화성능, 고강도 콘크리트, 기둥, 내화구조설계

1. 서 론

국토해양부 고시 제2208-334호 「고강도 콘크리트 기둥·보의 내화성능 관리기준」(이하 고강도 관리기준)에서는 50 MPa이상의 고강도 콘크리트를 기둥·보 부재에 적용할 때 내화성능 확인기준과 방법을 제안하고 있다.

그러나 현장에서의 성능확인에는 단지 시험성적서 제출로만 판단하고 있어 해당 공법의 적정 적용 유·무를 판단하는 데 어려움이 있다. 예를 들어, 섬유혼입 내화보강 공법의 경우에

는 현장에 사용한 고강도 콘크리트에 실질적으로 적정 적용 유·무를 판단할 수 있는 시험기준이나 관리방법이 전무하여 시공 후, 내화성능 관리가 어렵다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 극복하고자 현장에서 내화공법 적용 여부를 용이하게 식별할 수 있도록 모부재 자체의 단면을 내화성능에 유리하게 설계하는 구조보강형 고강도 콘크리트 내화공법을 제안하고자 3가지 종류(단면 크기 및 보강량 증대, 횡보강근 증대, 와이어 메쉬 삽입)의 구조보강법에 따른 내화성능 평가를 실시하였다.

*교신저자. 정회원. 한국건설기술연구원 전임연구원(Tel: +82-31-910-0109, Fax: +82-31-910-0713, E-mail: batsun@kict.re.kr)

Corresponding Author. Member. Research Specialist, Department of Building Research, KICT

**정회원. 한국건설기술연구원 선임연구위원

Senior Research Fellow, Department of Building Research, KICT

보강근 및 콘크리트 피복두께에 따른 온도이력과 변형량의 추이, 파괴 양상 등을 살펴보았다. 이러한 결과를 토대로 향후 구조보강형 내화공법의 표준구조로서의 활용 가능성을 검토하고자 하였다.

2. 고강도 콘크리트 내화구조설계 기준분석

2.1 국외 현황

국내·외 콘크리트구조 내화 기준을 살펴보면 다음과 같은 방법들을 제시하고 있다.

(1) 일본

일본에서는 사용부재의 부위별(벽, 기둥, 바닥, 보, 지붕, 계단) 단면크기와 피복두께 등의 사양을 지정하여 내화성능을 나타낸 사양적 방법과 주요 부재의 보유 내화시간(비손상성, 차열성, 차염성)을 산정하여 내화설계 및 품질시험을 통한 성능을 확인하는 성능적 방법이 있다. 그러나 아직까지 고강도 콘크리트의 고온에서의 폭렬현상과 단면감소 및 구조내력 저하에 대해서는 명백하게 규명은 되지 않아 고강도 콘크리트의 내화구조설계에 대한 기준은 마련되어 있지 않다.

(2) 미국

미국에서는 각 주정부에서 해당 주의 환경 및 여건에 적합한 규정을 채택하여 적용하고 있기 때문에 동일한 규정은 없고 최근에 제정된 IBC(International Building Code)에서 기존의 UBC(Uniform Building Code), NEPA(National Fire Protection Association)에서 규정하고 있는 사양적 내화구조 기준과 더불어 성능적 내화구조 기준을 명시하고 있다.

(3) 유럽

유럽에서는 Eurocode 2에서 사양적 내화성능과 내화구조설계 기법을 제시하고 있다. 특히 고강도 콘크리트에 대해서는 Part 1-2: General rules-Structural fire design 6. High strength concrete에서 내화구조 설계기준을 제시하고 있다.

특히, 고강도 폭렬에 대해서는 콘크리트의 강도별로 내화대책을 구체적으로 제시하고 있는데, 콘크리트강도가 55 MPa 이상이며 95 MPa이하이고 이때 실리카흙의 배합이 6% 미만인 경우($55 < f_{ck} \leq 95$ MPa)에는 콘크리트 폭렬에 따른 강도저감계수 및 유효단면을 적용하여 내화구조를 실시하도록 제안하고 있고 실리카흙의 배합이 6% 이상인 경우와 콘크리트강도가 80 MPa이상 105 MPa이하($80 < f_{ck} \leq 105$ MPa)에서는 1) 메탈라스 삽입, 2) 내화콘크리트 사용(반드시 성능검증 실험을 거쳐야 함), 3) 내화피복층 시공(protective layers), 4) 프로필렌 섬유(monofilament propylene fibres)를 사용하도록 제안하고 있다.

본 연구에서는 향후, 고강도 관리기준에서의 내화구조구조설계기준 제안을 염두에 두고 유럽의 구조설계 기준에서 제시한 방법을 응용하여 실험체를 제작하고 성능을 분석하여 보았다.

2.2 국내 현황

국내에서는 주요 부재별 내화성능에 대하여 국토해양부령

제433호「건축물의 피난방화구조 등의 기준에 관한 규칙」에서 용도 및 규모에 따른 주요 부재의 성능 기준을 제시하고 있으며, 고강도 콘크리트의 성능관리기준은 있으나 내화구조 설계 기준은 전무한 실정이다.

3. 내화성능 실험

3.1 실험 개요

본 연구에서는 현장에서 내화공법 적용 여부를 용이하게 판단할 수 있는 구조보강형 고강도 콘크리트 내화보강공법의 성능여부를 검증하고자 내화성능 실험을 수행하였다. 실험체는 Eurocode에서 규정하고 있고 내화구조설계에 따라 제작한 기둥 및 와이어 메쉬를 삽입한 기둥과 와이어 메쉬와의 유사한 내화성능은 확보하고 시공의 편리성을 주기 위하여 횡보강량을 기존 보강량 보다 2배로 증대한 기둥으로 각 3종류의 기둥을 제작하여 ISO 834 표준 가열 온도곡선에 따라 가열하고 재하시험을 하였다.

3.2 실험체 제작

(1) 사용 재료

본 연구에 사용한 콘크리트 강도는 설계기준 강도 70 MPa이며 채령 28일 강도 71.43 MPa이었다. 콘크리트 강도를 70 MPa로 지정한 이유는 Eurocode에서 제안하고 있는 내화보강법이 콘크리트 강도별로 내화공법의 적용방식이 다른데, 콘크리트 강도 70 MPa는 내화구조설계를 적용할 수 있는 범위에 속하므로 내화구조설계에 의한 고강도 콘크리트 내화보강법과 메탈라스 보강법 및 횡보강방법과의 내화성능을 비교하는 데 용이할 것으로 판단하여 선택하였다. 실험에 사용한 콘크리트 배합은 Table 1과 같다.

Table 1. Mixing Table (unit: kg/m³)

w/b	s/a	cement	ggb ¹⁾	water	gravel	sand	ad. ²⁾
22.4%	41.4%	439	293	164	870	609	10.25

¹⁾ground-granulated blast-furnace slag

²⁾admixtures

보강재는 항복강도 400 MPa인 D10, D19의 이형철근을 사용하였다. 피복두께는 건축구조기준(Korea Building Code 2009)에 따라 40 mm로 하였다.

(2) 실험체 제작

실험체는 내화구조설계에 따라 제작한 HSC70-F, 와이어 메쉬를 삽입한 HSC70-W, 횡보강근을 일반 구조설계기준보강 2배 보강한 HSC70-S의 3종류로 하였다.

HSC70-F 실험체는 Eurocode의 내화구조 설계기준을 적용하여 제작한 것으로 500°C 등온곡선에 따른 유효 단면과 고온에서의 강재 및 콘크리트의 강도 저감계수를 적용하여 설계를 수행하였다.

HSC70-W 실험체는 Eurocode에서 제안하고 있는 지름 2 mm이상, 피치 50×50 mm의 와이어 메쉬를 사용하고 와이

Fig. 1. Longitudinal Cross Section

Fig. 2. Lateral Cross Section

어 메쉬를 포함하여 주근으로부터의 피복두께는 40 mm로 하였다.

HSC70-S 실험체는 와이어 메쉬를 사용한 유사 내화보강성을 가늠하되, 별도의 와이어 메쉬를 삽입하는 번거로움을 없애기 위하여 HSC-F 횡보강근을 2배로 증대시켜 125 mm 간격으로 제작하였다.

모든 실험체의 단면크기는 Fig. 1에서와 같이 500×500 mm²로 하였으며 높이는 3,000 mm로 하였다. 가로방향 및 길이방향 단면형상은 Fig. 1 및 2와 같다.

3.3 실험방법

실험방법은 재하-가열시험으로 하였다. 재하하중은 각 실험

체의 공칭강도의 HSC70-F는 고온에 따른 단면감소 및 강도저감계수를 적용하였을 때 공칭강도(ϕP_n)가 5,562.9 kN이었으며, 재하하중은 공칭강도의 45%를 재하 하였다.

HSC70-W, S는 와이어 메쉬와 횡보강근으로 내화공법을 적용하였다는 전제하에 일반 구조설계기준 공칭강도 8,343.7 kN의 45%를 재하하였다. 여기서, 재하하중에 대한 국내 기준은 시험의뢰자가 인정된 구조 기준에 규정된 방법에 따라 정하게 되어 있다. 국외의 경우에서 설계하중의 40%를 일정하게 재하하거나 선행 연구에서 설계하중의 54%를 재하 하는 경우가 있었다. 본 연구에서는 화재발생이 일반적인 사용하중을 받는 상태이므로 부재가 허용응력범위 내에 있는 것으로 간주하여 설계하중의 45%를 가력하였다.

Table 2. Loading Data (kN)

Specimens	ϕP_n	P	
HSC70-F	5,562.9	2,503.3	0.45 ϕP_n
HSC70-W	8,343.7	3,754.7	
HSC70-S	8,343.7	3,754.7	

실험체의 가열 시간에 따른 온도는 보강재와 콘크리트에 K-Type 1 mm 열전대를 설치하여 측정하였다.

보강재 열전대는 기둥 중앙부, 즉 길이방향으로 상부 끝단에서 1,500 mm 지점의 단면에 4개의 분할면에 설치하였고 콘크리트 열전대는 피복두께에 따라 최외곽면으로부터 10, 20, 30 mm 지점에 설치하여 피복깊이에 따른 온도변화 양상을 확인하고자 하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 내화성능

실험결과는 Table 3과 같다. 내화성능 판정은 KS F 2257-1 축방향 재하부재 수축량과 변형률 기준으로 하였으며 기준 값은 각각 30 mm(h/100 mm, 여기서 h는 부재높이), 9 mm/min(3 h/1000 mm/min이었다. 실험체별 내화성능을 살펴보면 HSC70-F는 최종 내화성능 93분이었고 이때의 변형률은 1.2 mm, 변형률은 0.1 mm/min이었다. HSC70-S는 최종 내화성능 85분이었고 이때의 변형률 및 변형률은 각각 1.5 mm, 0.1 mm/min로 나타났다.

HSC70-F는 기타의 보강공법을 사용하지 않고 단지 내화구조설계에 폭렬방지 효과를 기대하였으나 예상과 달리 낮은 내화성능을 발현하였다. 이는 유럽에서 사용되는 콘크리트 골재와 같은 재료자체의 내화특성이 일부 차이가 있는 것으로 판단되며 관련 기준을 국내에 적용하는 것은 비록 제한된 수의 실험에 의한 결과이지만 다소 무리가 있을 것으로 판단되며 향후, 보다 많은 수의 다양한 변수에 의한 실험을 추가하여 이에 대한 검증 작업이 필요할 것으로 판단된다.

HSC70-S는 횡보강근의 증대에 따른 와이어 메쉬의 내화성능과 유사한 성능 발현을 기대하였으나 83분으로 폭렬에 대한 저항성능은 확인되지 않았다. 다만, 본 연구에서 실험체 제작시 횡보강근과 주근의 결속을 90° 갈고리 방식으로 제작하였는데, 내진보강에 사용되는 135° 갈고리를 사용하여 주근과 결속시에는 보다 효과적인 내화성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

HSC70-W는 3종류의 실험체 중에서 129분으로 가장 높은 성능을 발휘하였으나 기대한 180분 내화성능에는 미치지 못

Table 3. Test Results

Specimens	Deformation (mm)	Strain (mm/min)	Rebar temperature(°C)		Fire resistance (min.)
			Ave.	Peak	
HSC70-F	7.7	6.5	838.1	937.3	93
HSC70-S	8.5	6.7	770.5	1072.7	85
HSC70-W	4.4	3.3	749.2	901.7	129

하였다. 그러나 와이어 메쉬의 피치를 좁히고 지름을 키워 열용량을 증대시킨다면 폭렬 효과를 저감할 수 있을 것으로 사료된다.

4.2 온도이력

표준화재조건하에서 재하가열한 실험체의 온도이력은 Fig. 3과 같다. 3개의 실험체 모두 외곽의 콘크리트부분의 온도 상승이 보강근보다 높게 나타났다.

HSC70-F, S는 콘크리트 피복두께별 온도상승에 차이가 다소 나타났지만 HSC70-W는 피복두께에 의한 온도상승의 차이가 거의 없이 유사하게 증가하는 양상을 나타내었다. 이와 같은 현상은 삽입된 와이어 메쉬가 피복콘크리트의 보강재 역할을 하여 콘크리트의 열흡수 능력이 상대적으로 보존된 것으로 판단된다.

4.3 변형량

가열시간동안 발생한 변형량은 Fig. 4와 같다.

(a) HSC70-F

(b) HSC70-S

(c) HSC70-W

Fig. 3. Temperature Distributions of Specimens

Fig. 4. Deformation Versus Time

HSC70-F는 약 40분 경과 후 수축(+값)이 발생되었고 HSC70-S와 W는 각각 약 45분, 75분에 발생되었다. 이때의 실험체의 온도분포를 살펴보면 급격한 온도상승이 발생하는 구간으로 고온에서의 재료의 강도 손실 및 단면 손실 등이 발생되면서 구조적 변형이 급격하게 발생된 것으로 판단된다.

4.4 파괴양상

모든 실험체에서 Fig. 5와 같이 폭렬이 발생하였다. 특히, HSC70-F와 S 실험체의 횡보강근은 내부수증기압을 견디지 못하여 주근과의 결속이 다 끊어져 있었다. 그러나 HSC70-W의 와이어 메쉬에 의한 콘크리트 구속작용으로 횡보강근의 손상이 비교적 적게 관찰되었다.

5. 결 론

본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 비록 제한된 수의 실험에 의한 분석이지만 내화설계구조

(a) HSC70-F

(b) HSC70-S

(c) HSC70-W

Fig. 5. Test Results

기준에 따른 구조보강법, 횡보강만을 증대시킨 방법, 와이어 메쉬를 삽입한 방법 중 고강도 폭렬에 대한 제어 효과는 와이어 메쉬 삽입법이 가장 효과적인 것으로 판단된다. 그러나 와이어 메쉬 삽입공법도 기대한 내화성능 시간 3시간을 만족시키지 않아 추후 폭렬방지에 효과적인 와이어 메쉬의 지름이나 피치 등의 간격에 대한 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

2) HCS70-S와 HCS70-W의 실험결과로부터 비록, HCS70-S가 고강도 폭렬 제어 효과는 나타나지 않았지만 내진 설계에 적용되는 135° 갈고리를 적용하면 주근과의 구속이 보다 면밀히 작용한다면 와이어 메쉬의 폭렬 제어 효과를 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 한국건설기술연구원 주요사업(50 MPa 이상 고강도 콘크리트 표준 내화구조 공법개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Korea Institute of Construction Technology (2008) The development of the durability evaluation and the maintenance guide for fire resistive structure, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (2000) Notice -Fire resistive structure, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism.
- International Code Council (2000) International Building Code, International Code Council.
- British Standards (2005), Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures Part 1-2: General rules - Structural fire design, British Standards.
- Korean Agency for Technology and Standards, KS F 2257-1 Method of fire resistance test for elements of building construction-general requirements.
- Korean Agency for Technology and Standards, KS F 2257-7 Method of fire resistance test for elements of building construction-specific requirements for columns.
- British Standards (1997) BS8110: Structural Concrete; Use of concrete, British Standards
- Kim, H.Y. (2002) An Experimental Study on the Mechanical Properties of High Strength Concrete at High Temperature, Ph. D. Thesis, KonKuk University.

© Received October 18, 2013

© Revised October 22, 2013

© Accepted November 4, 2013