

고강도 콘크리트 부재의 내화성능 확보기술

Technology of Fire Resistance Performance of High Strength Concrete Column

김규용 Gyu-Yong Kim
충남대학교 건축공학과 교수

이태규 Tae-Gyu Lee
충남대학교 건축공학과 박사과정

김영선 Young-Sun Kim
롯데건설(주) 기술연구소 선임연구원

남정수 Jeong-Soo Nam
충남대학교 건축공학과 박사과정

이승훈 Seung Hoon Lee
삼성물산 건설부문(주) 수석연구원

1. 고강도 콘크리트의 내화성능

고강도 콘크리트를 사용할 경우 수증팽창압에 의한 폭렬이 발생하는 문제점으로 인하여^{1~4)} 국내·외에서는 고강도 콘크리트를 사용한 구조부재의 화재 안전성을 확인하기 위한 제도로서 <표 1>과 같은 기준을 통하여 내화성능을 평가하고 있다. 국내의 경우 50 MPa 이상의 콘크리트에 대하여 국토해양부 고시 제 2008-334호 ‘고강도 콘크리트 기둥·보의 내화성능 관리기준’을 2008년 7월부터 시행하고 있다. 이는 비재하 방법에 의한 온도이력을 평가하는 것으로 콘크리트 내부 강재의 온도가 평균 538℃, 최고온도 649℃를 만족할 경우 내화구조로 인정하고 있다⁵⁾.

한편 고강도 콘크리트의 폭렬평가와 더불어 설계하중이 재하된 경우 기둥의 수축거동과 내력저하에 따른 구조물의 화재 안전성에 관한 검토도 크게 고려되고 있다. <사진 1>은 기둥부재 재하가열로를 활용한 고강도 콘크리트 내화시험 전후의 전경을 나타낸 것으로, <그림 1>에 나타낸 바와 같이 콘크리트의 내화성능을 평가할 경우 설계하중이 재하된 상태에서 내부온도이력 특성과 더불어 구조적인 거동을 파악하기 위해 수축량을 고려해야 할 필요가 있다. 이에 본 고에서는 국내 고강도 철근콘크리트 구조물의 내화성능의 확보기술에 있어 체계적인 프로세스를 바탕으로 내화성능 설계를 위한 자료를 제시하고자 한다.

표 1. 콘크리트 내화성능 평가 기준⁵⁾

기둥 부재의 내화 성능	현상	콘크리트 가열후 열전달에 의한 철근의 내력저하	
	대책	<ul style="list-style-type: none"> • 콘크리트 폭렬저감 • 강재의 열차단 	
	기준	수축량	<ul style="list-style-type: none"> • 수축 변위량 : h/100 이하 • 수축 최고속도 : 3h/1,000 이하
		온도	<ul style="list-style-type: none"> • 주철근 평균온도 : 538℃ 이하 • 주철근 최고온도 : 649℃ 이하



사진 1. 기둥부재 재하가열로를 활용한 고강도 콘크리트 내화시험 전후의 전경

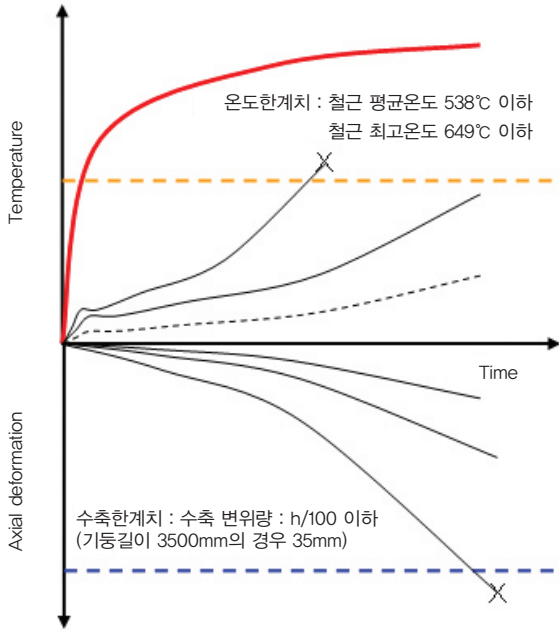


그림 1. 고강도 콘크리트 기둥의 내화성능평가 모식도

2. 고강도 콘크리트의 폭발특성

2.1 강도에 따른 콘크리트의 폭발성상

콘크리트는 고강도화 될수록 인장강도가 작아지게 되며, 급격한 고온을 받을 시 콘크리트의 폭발로 인한 단면손실이 크게 발생하게 되어 내력저하가 크게 이루어 질 수 있다^{2~4)}. <그림 2>는 압축강도에 따른 폭발성상을 나타낸 것으로 ISO-834 표준가열곡선에 의해 가열을 받은 경우 40 MPa 이상의 고강도 콘크리트에서 폭발현상이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 가열속도가 느린 경우 폭발이 발생하지 않지만 100 MPa 이상의 고강도 콘크리트에서는 온도상승에 따라 파괴가 발생되어 수증 팽창압뿐만 아니라 열응력에 변형조건도 고려해야 한다³⁾.

2.2 고강도 콘크리트의 수증팽창압

고강도 콘크리트는 자체의 내부공극이 전체부피의 약

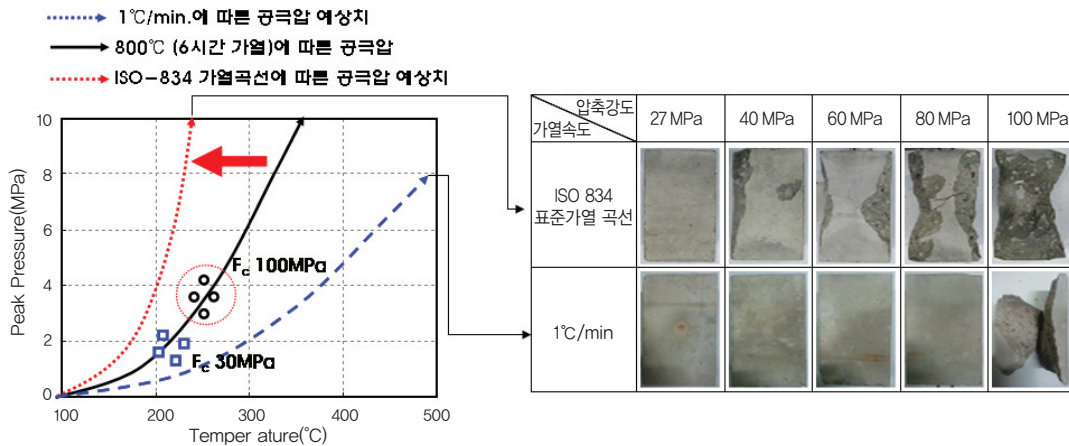
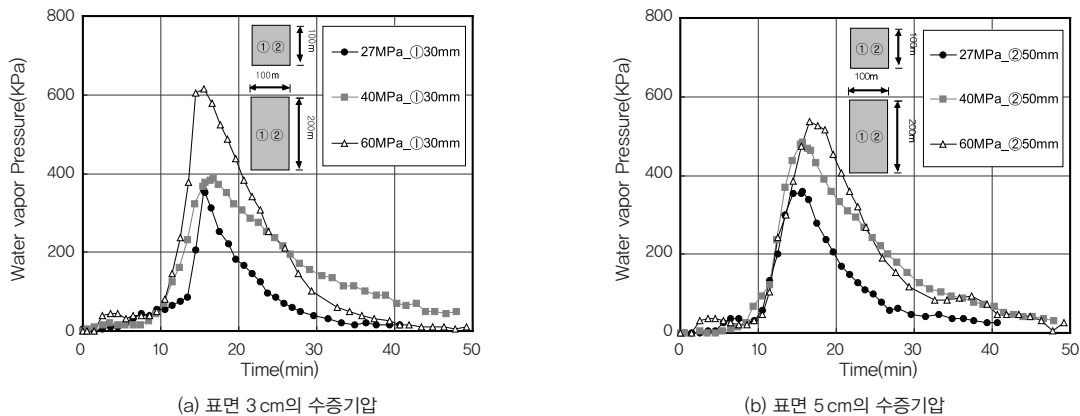


그림 2. 압축강도와 수증기압의 관계⁴⁾



(a) 표면 3cm의 수증기압

(b) 표면 5cm의 수증기압

그림 3. ISO-834가열곡선에 따른 압축강도와 수증기압의 관계

2% 이하로써 밀실한 조직을 갖는다. 따라서 압축강도가 증가할수록 가열에 따른 수증기압의 이동통로가 차단되어 폭렬의 위험성이 크다. 압축강도에 따른 콘크리트의 내부 수증기압은 <그림 3>과 같다. 콘크리트 압축강도에 있어 압축강도 60 MPa 고강도 콘크리트까지는 강도가 증가함에 따라 콘크리트 내부의 수증기압이 높게 측정된다. 따라서 수증기압에 따른 폭렬현상은 60 MPa 이상의 고강도 콘크리트를 시점으로 콘크리트 자체의 공극에 따른 압력의 상쇄가 이루어지지 않기 때문에 크게 발생되며, 콘크리트의 공극의 네트워크를 확보하는 기술이 요구되고 있다.

3. 고강도 콘크리트의 내화성능확보기술

3.1 차단에 의한 내부온도 상승 억제

콘크리트가 고온으로 가열되면 <그림 4>에 나타난 바와 같이 콘크리트의 표면 30 ~ 50 mm 위치에서 내부의 수분이 포화상태에 이르게 되고, 내부의 수증기압이 급격히 증대되어 이 부분에서 폭렬이 발생하게 된다. 따라서 내부의 수증기압을 낮추는 방법으로 유기섬유를 혼입하여 연속공극을 만드는 방법과 내화피복재를 도포해 급격한 온도상승을 억제함으로써 폭렬을 방지할 수 있다. 실제로 내화 피복재를 도포할 경우 소형 시험체의 내부 온도상승 속도가 저하되어 중도+상도를 도포하는 경우 내화피복재의 두께 3mm 이상이면 폭렬이 방지되었다. 또한 폭렬이 방지되는 경우 내부온도 이력은 <그림 5>와 같이 폭렬이 방지되는 PP섬유혼입 콘크리트에 비해 약 34% 이상의 온도저감 효과가 나타난다. 따라서 이를 실무에 적용할 경우 PP섬유혼입 콘크리트보다는 내력저하가 적고 충분한 내화성능을 확보할 수 있다.

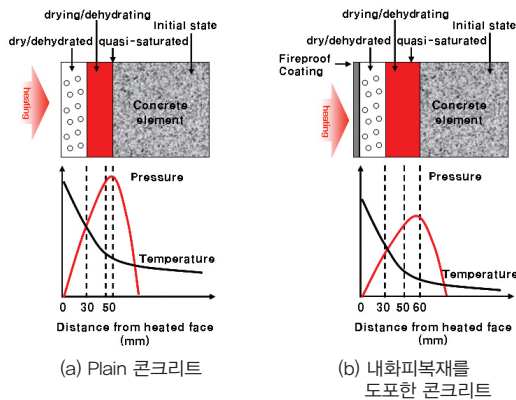
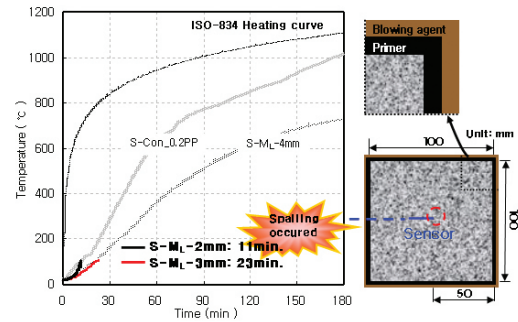


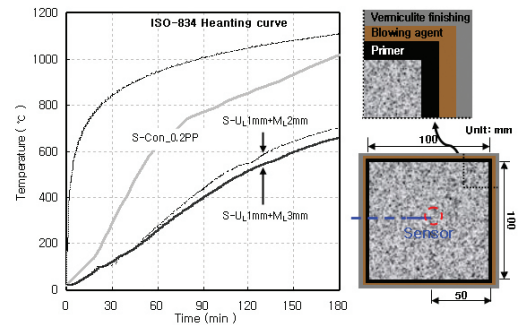
그림 4. 고온에 따른 표면에서부터의 수증기압 상승 모식도

3.2 섬유혼입에 의한 폭렬 방지

<그림 6>은 폭렬이 방지된 상태(섬유혼입)에서 단면치수에 따른 고강도 콘크리트 기둥부재의 온도이력을 나타낸 것으로 모든 시험체에서 모서리 부분의 온도가 가장 높게 나타났으며, 다음으로 면 중앙의 주철근의 온도가 높은 경향을 나타냈다. 또한 콘크리트 피복 두께가 40 mm인 경우 주철근 평균온도는 400 °C 이하로 나타났지만 주철근 최고온도는 700 °C에 도달하고 있어 온도규정(주철근 최대온도 649 °C 이하)은 만족하지 못하였다. 또한 해석프로그램을 활용하여 내부온도



(a) 하도+중도를 도포



(b) 하도+중도+상도를 도포

그림 5. 내화피복재를 도포한 콘크리트의 온도이력

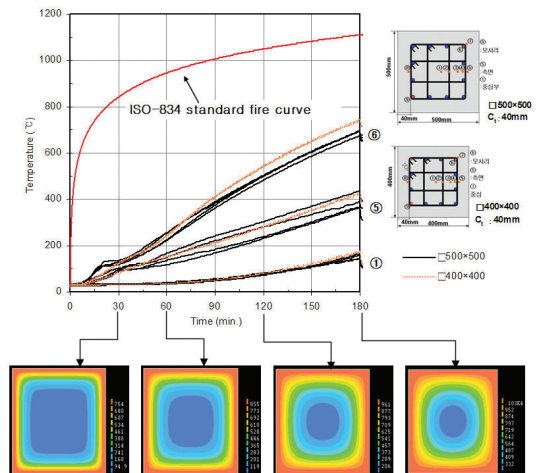


그림 6. 단면치수에 따른 고강도 콘크리트 기둥부재의 온도이력

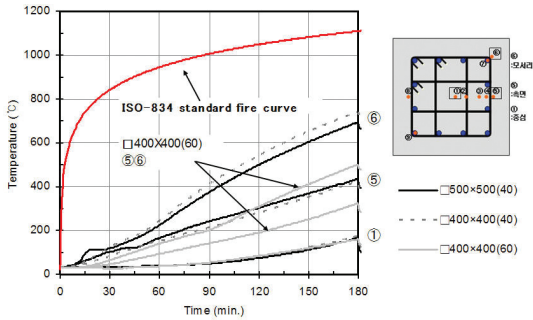


그림 7. 콘크리트 피복두께에 따른 고강도 콘크리트 기둥부재의 온도이력

해석 결과 온도분포가 표층부부터 원형의 형태로 분포가 되며, 실제 실험보다 다소 과도한 해석은 되고 있지만 온도분포 패턴은 유사했다.

한편 <그림 7>은 콘크리트 피복두께에 따른 고강도 콘크리트 기둥부재의 온도이력을 나타낸 것으로 피복두께가 커질수록 주철근의 온도이력은 낮아지는 것으로 나타났으며, 피복두께 60mm의 시험체가 피복두께 40mm의 시험체에 비하여 모서리부에서 200℃ 이상 온도가 낮은 479℃의 값을 보였다. 따라서 철근 콘크리트 기둥의 내화성능에 있어 온도규정에 따른 내화성능 평가를 활용하기 위해서는 폭렬이 방지된 상태에서 콘크리트 단면치수 400×400 mm 이상, 콘크리트 피복두께 50mm 이상이면 국내 규정을 만족시키는 것이 가능하다.

3.3 고강도 철근 콘크리트 부재의 거동

철근 콘크리트 중심부재의 변형 거동은 소형 시험체의 재료적 변형특성과 동일한 경향으로써 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 수축 변형량과 최대 수축 속도가 빨라지는 경향이 있다. 이러한 고온에서의 재료특성이 콘크리트의 수축거동에는 크게 작용할 수 있는 요소가 충분하며, 이는 시멘트량과 골재의 양에 의해 좌우될 수 있으므로 철근 콘크리트 기둥부재를 구성하는 재료특성이 콘크리트 부재의 영향이 수축량에 크게 작용된다.

또한 콘크리트의 고강도화에 따른 크리프 변형, 과도 변형 등과 같은 요인을 고려해야 하며, 내력저하 및 잔존 내력을 산정하기 위해서는 충분한 재료적 검토가 요구된다. 따라서 본 고에서는 고강도 및 초고강도 철근 콘크리트 기둥의 내화성능 예측 및 설계프로세스를 <그림 8>과 같이 제안하였다.

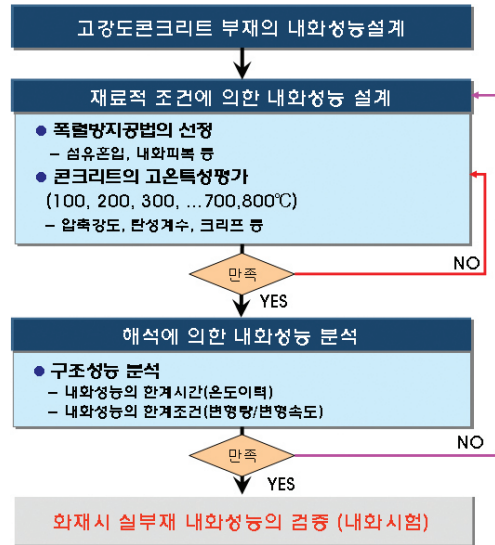


그림 8. 고강도 및 초고강도 콘크리트 부재의 내화성능설계 프로세스

4. 맺음말

초고층 건축물의 등장과 더불어 국내의 내화기술 또한 비약적으로 발전하고 있다. 이러한 배경으로는 정보화 기술의 발달이 크게 작용된 결과로써 다방면에 걸친 노력의 결실이라 할 수 있다.

하지만 빠른 성장의 과정에서 화재조건을 상정한 재료 데이터의 부족, 설계 프로세스의 부재 등에 따라 체계적이고 과학적인 검토는 이루어지고 있지 않는 실정이다. 또한 철근 콘크리트 구조부재의 화재안전성을 평가 및 예측하기 위한 모델 및 수치적 해석기법도 필요한 시점이다.

현행 법규만으로는 기본적인 성능을 만족할 수 있도록 규제된 사양규정으로써 다양한 설계하중이 존재하는 상태를 고려한 내화성능설계 규정이라 단정하기는 문제점이 많이 존재하고 있다. 따라서 현장적용을 위한 실용화 기술뿐만 아니라 고온에서의 재료특성을 평가할 수 있는 기법과 다수의 평가데이터를 기반으로 한 신뢰성 설계의 개념이 도입되어야 한다. 본 고에서 고찰한 다양한 평가기법도 아직은 초기단계로써 활발한 연구 및 실용성을 갖추어 내화성능설계기법의 체계화에 기여할 수 있기를 기대한다. □

참고문헌

1. 김규용, 김영선, 이태규, 이승훈, 박찬규, '설계하중 사전 재하 및 비재하방식에 의한 고강도 콘크리트의 고온특성 평가', 콘크리트학회 논문집, Vol. 20, No. 5, 2008, 10, pp. 583 ~ 592.
2. 한민철, 허영선, 한천구, '고강도 콘크리트의 폭발발생 및 방지 메커니즘', 콘크리트학회지, Vol. 19, No. 1, 2007, 1, pp. 94 ~ 100.
3. Hertz KD. Limits of spalling of fire-exposed concrete. Fire Safety Journal, 2003. 3, Vol. 38, No. 2, pp. 103 ~ 116.
4. Kalifa P, Menneteau FD, Quenard D. Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures. Cement and Concrete Research, 2000. 10, Vol. 30, No. 10, 2000, pp. 1,915 ~ 1,927.
5. 국토해양부 고시 제2008-334호, 고강도 콘크리트 기동·보의 내화성능 관리기준, 2008. 7.

저자약력



김규용 교수는 충남대학교 건축공학과에서 고유동 콘크리트의 유동특성 및 공학특성에 미치는 제영향요인에 관한 연구로 박사학위를 취득한 후 일본 독립행정법인 건축연구소 재료연구그룹에서 Post Doc.을 마치고 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소에서 근무하였다. 현재는 충남대학교 건축공학과 교수로 재직하고 있으며, 주 관심 연구 분야는 콘크리트의 내화, 내충격/방폭, 자기수축, 친환경소재이며 우리학회 특수환경위원회 위원장을 맡고 있다.

gyuyongkim@cnu.ac.kr



김영선 박사는 충남대학교 대학원 건축공학과 건설재료·시공학연구실에서 섬유를 혼입한 고강도 철근 콘크리트 기동의 내화성능 평가에 관한 연구로 박사학위를 취득한 후 일본 동경이과대학에서 Post Doc.을 마치고 롯데건설(주) 기술연구소에서 근무하고 있다. 주 관심 연구 분야로는 초고강도 콘크리트의 배합설계, 고온 역학적 특성, 철근 콘크리트의 내화성능설계이다.

kellery76@gmail.com



이태규는 충남대학교 대학원 건축공학과 건설재료·시공학연구실에서 고강도 섬유혼입 콘크리트의 내화성능평가에 관한 실험적 연구로 석사학위를 취득한 후 현재는 동연구실에서 박사과정에 재학 중이다. 주 관심 연구 분야는 콘크리트의 폭발, 고온 역학적특성, 초고강도 및 고성능콘크리트의 내화성능설계이다.

ninga777@naver.com



남정수는 충남대학교 대학원 건축공학과 건설재료·시공학연구실에서 섬유보강 순환잔골재 콘크리트의 공학적 특성 및 내구특성에 관한 실험적 연구로 석사학위를 취득한 후 현재는 동연구실에서 박사과정에 재학 중이다. 주 관심 연구 분야는 섬유보강 콘크리트의 내화성능, 수퍼소재 및 콘크리트계 재료의 내충격/방폭성능 설계이다.

andrea326@nate.com



이승훈 수석은 연세대학교 토목공학과를 졸업 후 삼성건설 기술연구소에서 20여년간 콘크리트 및 건설재료와 관련한 연구개발을 수행하였고, 현재 국토해양부 과제인 200MPa 초고강도 콘크리트 개발과제를 수행중에 있으며 국내외 다수의 건설재료의 개발총괄을 담당하고 있다.

concrete@samsung.com