



내화성능설계시 재료적 관점의 고려사항

Consideration of Building Materials Perspective in Fire Resistance Performance Design

송훈 Hun Song
한국세라믹기술원 책임연구원

류동우 DongWoo Ryu
대전대학교 건축공학과 조교수

1. 머리말

건축물의 초고층화에 의해 국내에서도 고강도 콘크리트를 적용한 구조물의 시공이 빈번해져 80 N/mm²급 고강도 콘크리트의 시공이 보편화되고, 최근에는 200 N/mm²급의 초고강도 콘크리트도 기술개발 측면에 시범적용되고 있다. 건축물의 고강도화에 따라 구조부재의 단면을 감소시켜 사용성을 확보할 수 있지만 화재시에는 단면 손실이 발생하는 폭렬의 경향성이 커지고 상대적인 위험성이 증가하므로 내화성능설계에 있어 고려해야 할 요인으로 언급하고 있다.

이렇듯 고강도 콘크리트의 제조 및 적용에 있어 내화성능 확인은 국내에서도 국토부고시(2008-334호)를 통해 50 N/mm² 이상의 고강도 콘크리트에 대한 내화성능 확인 규정을 도입하였으며, 건설사 및 레미콘 제조사 등의 기관을 주축으로 성능을 확인하고 있다. 콘크리트 구조물에서 내화성능은 크게 구조안전성, 차열성, 차염성으로 구분되며, 특히 기둥은 구조안전성의 확보가 필수적이다. 화재 시 구조내력상의 지장을 가져올만한 변형이나 용해, 단면 손상이나 파괴 등이 발생하지 않아야 하며, 필요한 내력을 확보해야 하고 폭렬에 의한 단면결손이 발생하더라도 허용범위 이내에서 제어해야 한다. 즉, 내화성능설계상의 폭렬제어 대책은 폭렬의 유발요인으로부터 검토하는 설계수법 및 폭렬이 발생하더라도 폭렬깊이나 온도상승을 허용범위 이내로 제어하는 대책이 필요하다.

구조안전성에 대한 성능확인도 각각 구조·재료적인 요건에 의해 다르게 적용된다. 국내와 유사하게 성능확인 규정을 도입하고 있는 일본은 60 N/mm² 초과하는 고강도 콘크리트를 대상으로 하며, 최대 축방향 수축량 및 수축속도로 판정하거나 내부강재의 온도상승 정도에 따라 내화성능을 판정한다. 또한 국내와는 다르게 2종 경량골재 콘크리트의 사용에도 내화성능의 확인이라는 제한규정을 두고 있다. 아무래도 철근콘크리트 구조물에 경량골재 콘크리트의 적용이 빈번하며 경량골재의 수급도 안정적이기 때문에 성능확인에 대한 절차도 자연스럽게 이루어졌기 때문이다.

〈표 1〉은 콘크리트 구조물의 화재피해 형태를 나타낸 것으로 고강도 콘크리트와 더불어 경량골재 콘크리트의 내화성능도 언급하고 있는 것을 알 수 있으며, 고강도 콘크리트와 마찬가지로 내화성능의 심각한 저하를 유발하는 폭렬이 발생하기 쉽다. 본 고에서는 재료적 관점에서 고강도 콘크리트 및 경량골재 콘크리트의 내화특성에 대해 알아보고 이해함으로써 내화성능설계시 고려조건으로 반영하고자 한다.

표 1. 콘크리트 구조물의 화재피해 형태

구분	균열	폭렬			
		박락	팝아웃	폭발성 폭렬	
형상	-	박락	비산		
폭렬형태	-	일시형		연속형	
피해 대상	보통콘크리트	보통콘크리트	경량골재, 고강도	고강도	경량골재, 고강도
피해 장소	가열면 전체	엷지 등	• 표면 일부분 • 골재부분	• 가열면 일부 • 가열면	• 가열면 전체
주요원인	화재시의 온도상승, 부재의 압축응력				
	• 시멘트 경화체의 화학적 변화 • 열팽창 · 수축	• 표층부가 중력에 의해 박락 • 철근의 과밀	• 열응력 • 골재자체의 폭렬	• 수증기압 • 열응력	• 수증기압 • 열응력 • 골재

2. 재료적 관점에서의 고강도 콘크리트

2.1 고강도 콘크리트의 내화성능설계

내화성능설계를 실시하기 위해서는 화재를 상정한 고온시의 각 구조재료의 특성을 파악할 필요가 있다. 특히, 고온시 고강도 콘크리트에 대한 질량변화, 열팽창계수, 열전도율, 열확산율 등의 물리적 성질과 압축강도, 영계수, 응력-변형 관계 등의 역학적 성질의 특성 파악이 중요하다. 고온시 고강도 콘크리트의 역학적 특성은 시험시의 함수율, 골재종류, 배합, 시멘트 및 혼화재료의 종류, 물-시멘트비 등에 따른 재료물성의 변화 및 변형특성에 의해 결정된다. 시멘트 수화생성물의 분해 및 각종 골재의 물리·화학적 변형에 의한 강도저하와 시멘트 수화생성물을 구성하는 화학적 결합수의 분해 및 세공구조에 분포되어 있는 물리적 흡착수, 자유수 등의 수분증발에 기인한 수축거동에 따른 강도저하를 들어 설명할 수 있다. 또한, 콘크리트라는 복합재료의 특성상 각 재료의 열·수분거동 및 미세구조 특성에 의해서 화재시 단면내부에 비선형의 온도분포가 생기고 이로 인한 국부적인 내부응력이 발생하게 되며, 정도에 따라서는 균열진전과 콘크리트 파괴의 주된 요인이 된다. 일반적으로 각종 열정수는 상온시에 비해 밀도는 약 10~15%, 열전도율은 약 40~50%, 열확산율은 약 20~50%, 비열은 10~30% 정도 저하하며, 압축강도는 500℃에서 약 50%, 800℃에서는 약 20% 이하의 잔존압축강도를 나타내는 것으로 알려져 있다⁹⁾.

일본의 내화성능설계에서는 3개의 루트가 준비되어

설계자가 임의로 설계루트를 선택할 수 있게 하고 있다. 종래의 시방규정인 루트 A와 화재공간의 특성을 반영한 열적외력을 대상으로 하는 내화성능검증법의 루트 B, 공학적으로 높은 신뢰성이 인정된 계산틀(해석)이나 내화시험 결과를 이용한 루트 C가 바로 그것이다. 여기에서 설계기준강도 60 N/mm²를 초과하는 고강도 콘크리트의 사용은 루트 B에 의한 내화성능검증법을 적용할 수 없으며, 루트 C에 의한 고도의 평가가 필요하다. 내화성능검증법의 루트 B에서 콘크리트 설계기준강도를 60 N/mm²로 제한하는 주된 이유로 화재시 고강도 콘크리트의 폭렬발생으로 인한 단면결손의 위험을 들 수 있다. 즉, 큰 압축력을 부담하는 부재는 폭렬의 가능성이 높고, 고강도 콘크리트는 탄성계수가 높기 때문에 고온시 생기는 열응력이 크다. 또한 콘크리트가 치밀하기 때문에 내부에서 증발한 수분으로 인한 공극내 압력의 상승에 의해 2차적인 응력이 발생하여 폭렬의 가능성이 보다 높게 된다. 따라서 설계기준강도 60 N/mm² 초과 고강도 콘크리트를 이용한 내화건축물의 내화성능검증에 대해서는 고온시 콘크리트의 강도와 온도의 관계에서 안전수준을 판단할 수 있는 화재시의 내력평가법의 확보가 필요하다. 또한 화재내력평가법의 타당성 검증에 사용가능한 고강도 철근콘크리트부재의 재하가열 시험결과와 축적도 지속적으로 필요하다.

한편, 콘크리트계 구조물을 대상으로 한 Eurocode 2에 있어서도 콘크리트나 철근, PC강선 등의 여러 재료에 관해서 1,200℃까지 고온역을 대상으로 한 재료의 물성치와 구조부재에 대한 내화설계법이 규정되어 있다. 또한 압축강도 80 N/mm² 이상의 고강도 콘크리



(a) 1종 경량골재 콘크리트 (b) 2종 경량골재 콘크리트 (c) 1종 경량골재 콘크리트(PP섬유 혼입) (d) 2종 경량골재 콘크리트(PP섬유 혼입)

그림 1. 경량골재 콘크리트의 내화성능

트에 대한 폭발억제 대책도 명확히 규정되어 있다²⁾. 내화성능설계는 건축물내의 연소 확대 방지 및 구조부재의 붕괴방지를 위하여 각각 방화구획과 구조안전성의 관계를 균형적으로 고려하여 검토하여야 하며, 구조재료의 고온시에 대한 역학적 성질의 정식화가 특히 중요하다.

3. 재료적 관점에서의 경량골재 콘크리트

3.1 경량골재 콘크리트의 내화성능설계

경량골재 콘크리트는 구조물의 자중경감을 목적으로 경량골재를 적용하여 제조한 콘크리트로 구조물의 고층화 및 대형화에 효과적으로 대응할 수 있고, 가볍기 때문에 구조재의 단면을 최소화 할 수 있어 유리하다. 또한 경량골재 제조방법이 다양해짐에 따라 단가를 낮출 수 있는 여지가 생겨 향후 콘크리트 구조물에 보다 많은 적용이 예상된다.

경량골재 콘크리트는 경량골재 자체가 다공성이기 때문에 표면건조 내부포수 상태로 조절하여 혼합하는 것이 일반적이며, 공극내부에 수분을 많이 가지고 있어 화재와 같이 급격한 온도 변화가 생기는 경우 폭발이 발생할 수 있다. 특히 시공된 지 얼마 되지 않은 경량골재 콘크리트의 다량 수분은 더욱 더 치명적이다. 경량골재 콘크리트도 함수율의 정도에 따라 폭발의 정도의 차는 발생하지만 단면손상이 크고 지속적으로 발생하므로 고강

도 콘크리트의 내화성능 판정과 연관 짓기에는 어려움이 따른다. 하지만 경량골재 콘크리트가 함수율에 민감하며 폭발의 정도가 크다는 것을 확인할 수 있다.

〈그림 1〉과 같이 폴리프로필렌섬유(이하 PP섬유)를 혼입한 경량골재 콘크리트의 경우 단면손상의 깊이도 혼입하지 않은 경우에 비해 내화성능이 비교적 양호한 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 기 보고된 연구결과와 동일하며, PP섬유의 혼입에 따라 폭발을 감소시킬 수 있다는 것을 알 수 있다³⁾. 현재 국내의 규정상 50N/mm² 이상의 고강도 콘크리트에 대해서만 성능의 검증이 이루어지고 있으며, 관점의 포커스도 맞추어진 것은 사실이지만 경량골재를 적용하는 경우 고강도 콘크리트와 동등한 폭발의 경향성을 가지므로 사전 검증이 필요하다.

4. 맺음말

내화성능설계는 궁극적으로 화재시에도 구조물이 안전하게 성능을 유지할 수 있는 것을 의미하며, 요구조건으로 단면손상을 유발하는 폭발이나 폭발깊이를 더한 열열화 깊이를 허용범위 이내로 한정하여 하중을

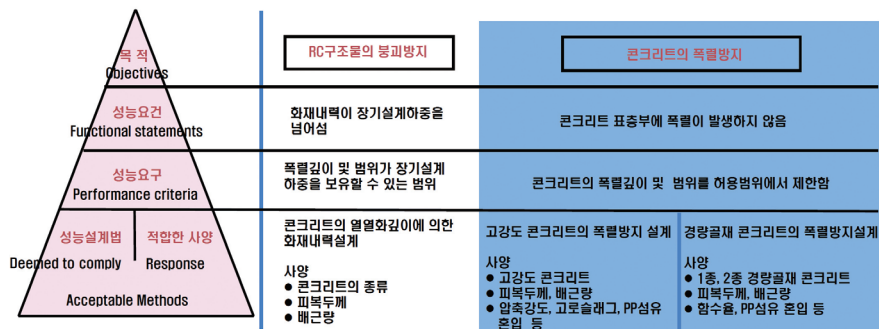



그림 2. 내화성능설계와 재료적 관점에서의 고려사항⁴⁾

보유할 수 있도록 한다. 고강도 콘크리트나 경량골재 콘크리트 모두 성능에 대한 요구조건은 동일하며, 폭발방지를 위한 설계도 고강도 콘크리트나 경량골재 콘크리트가 갖는 재료적인 차이에서 보이는 단점을 보완하는 방향으로 접근한다. 아직까지 내화성능설계 적용을 위한 구체적인 매뉴얼이 제시되지 않았지만 화재시 구조물의 성능을 유지하기 위한 기술이나 방법은 일정 수준에 도달한 것은 사실이다. 보다 합리적으로 사용재료가 화재하중 등 환경조건으로부터 예측되는 사항에 대한 고려와 내화성능설계에의 반영이 필요한 시점인 것은 분명하다<그림 2>. 

담당 편집위원 : 류동우(대진대학교) dwryu@daejin.ac.kr

참고문헌

1. 일본콘크리트학회, 콘크리트공학, Vol. 45, No. 9, 2007. 9.
2. 일본건축학회, 구조재료의 내화성가이드북, 2009.
3. 한천구, 양성환, 한민철, 'PP섬유 혼입에 의한 60~100MPa급 고강도 콘크리트의 폭발방지', 대한건축학회논문집 구조계, Vol. 24, No. 4, 2008, pp. 91~98.
4. 송 훈, '화재에 의한 고강도 콘크리트 부재의 내화성능에 관한 연구', 도쿄대학 박사학위논문, 2003.



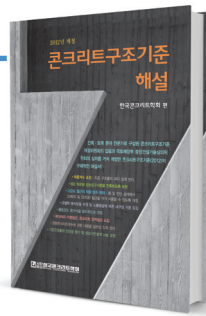
송 훈 책임연구원은 일본 도쿄대학 건축학전공에서 화재에 의한 고강도콘크리트 부재의 내화성능에 관한 연구로 2003년 박사학위를 취득하였다. 한국건설기술연구원을 거쳐 현재 한국세라믹기술원에 책임연구원으로 재직 중이다. 주요 관심 분야는 건축물의 방·내화공법 및 기능성 재료이다.
songhun@kicet.re.kr



류동우 교수는 일본 도쿄대학 건축학전공에서 환경조건에 따른 콘크리트중의 수분분포에 관한 연구로 박사학위를 취득한 후 한국건설기술연구원에서 Post Doc.을 마치고 대우건설기술연구원 근무를 거쳐 2010년부터 대진대학교 건축공학과 교수로 재직하고 있다. 주요 관심 분야는 고성능 콘크리트의 내구성 및 내화성능 평가, 친환경 건설재료 개발이다. 우리 학회 내화콘크리트위원회 위원장 및 학회지편집위원회 간사로 활동하고 있다.
dwryu@daejin.ac.kr

2012 개정 콘크리트구조기준 해설

- 저 자 : 한국콘크리트학회
- 출판사 : 기문당
- 발행일/Page : 2012-12-20/600(판형 A4변형)
- 정가(비회원가) : 45,000원
- 회원할인가 : **36,000원**
- 배송비 착불(3,000원)



도서 소개

건축·토목 분야 전문가로 구성된 콘크리트구조기준개정위원회의 집필과 국토해양부 중앙건설기술심사위원회의 심의를 거쳐 개정된 콘크리트구조기준(2012)의 구체적인 해설서이다.

- ① 하중계수 조정 : 지중 구조물 설계에서 연직 및 수평 토압이 상쇄되는 효과를 고려하여 재하방법을 명시하고 하중계수를 조정.
- ② 고강도 철근 적용을 위한 관련 기준 보완 : 국내외 실험결과를 바탕으로, 고강도 철근을 구조부재에 적용하기 위하여 관련 기준을 정비함. 개정기준에서는 SD600, SD500을 휨 철근과 전단철근으로 사용함.
- ③ 철근 상세 보완 : 확대머리 이형철근 도입과 콘크리트 앵커철근 사용을 신설함.
- ④ 기존 구조물의 안전성평가 및 성능기반설계 고려사항 제시 : 국토부 R&D 결과를 반영, 기존 구조물의 안전성평가 내용을 대폭 개선하고, 성능기반 설계시 설계자가 고려해야 하는 기본 사항을 제시
- ⑤ 균열기준 개정 : EC 모델을 참조하여 균열폭 해석모델을 수정 보완
- ⑥ 국내외 주요 연구결과 반영 : ACI 318-08 등 최신 선진기준 내용 반영, 슬래브와 기초판의 뿔림전단 강도를 합리적으로 개정