

고성능 콘크리트의 폭발제어 공법

Control Method of Explosive Spalling for High Performance Concrete



송 훈*
Hun Song



이세현**
Sea-Hyun Lee



菅原 進***
Shinichi Sugahara

1. 서 론

건축물의 고층화 및 대형화에 따라 잠재적 화재 위험도의 예측 및 방화·방재 대책의 시스템화는 필요 불가결한 요구조건이며 구조물의 안전설계를 베이스로 하는 안전 확보대책이 요구된다. 현재, 우리나라의 경우 건축물의 고층화에 관한 많은 연구와 시행이 이루어져 설계기준강도 80 MPa급의 고강도 콘크리트(이하 HSC)를 적용한 건축물이 등장하였고, 외국의 경우는 130 MPa급의 초고강도 콘크리트(이하 UHSC)를 적용한 건축물이 등장하였다. 선진 각국의 경우, 1980년대부터 철근 콘크리트 건축물의 경량화·고층화 기술에 대한 종합 연구개발 프로젝트가 진행되고 있으며, 국내에서도 고층 건축물에서의 선진기술 적용에 관한 연구가 진행되고 있는 실정이다. 초고층 건축물에서의 HSC의 사용량은 점차 증가하는 추이에 있어 근일에 국내에서도 100 MPa급 이상의 UHSC 영역에서도 실용화가 진전될 것으로 예측된다.

하지만, 고층화에 따른 건축물의 사용안전성에 관한 문제점은 누차 지적되고 있으며, 특히 화재에 의한 고온 수열로 발생하는 콘크리트의 성능저하는 시급히 해결해야 할 문제점이다. 화재에 의해 콘크리트 부재는 콘크리트를 구성하는 시멘트 수화물의 탈수와 골재의 열팽창에 의해 발생하는 균열(crack)로 인한 부재의 강도저하 및 박락(spalling), 팝아웃(pop-out), 폭발(explosive spalling)로 인한 부재의 단면결손 등의 성능저하 현상이 발생한다.^{1,2,4,5)}

콘크리트 부재의 내화성능은 화재성상이나 경과시간 등의 많은 요인에 의해 좌우되지만 일반적으로 콘크리트의 종류에 관계없이 500 °C 이상의 고온에서 현저한 성능저하를 보인다. 특

히, 콘크리트 부재의 폭발은 표층부의 피복을 탈락시켜 철근의 온도상승을 유발하므로 소정의 피복두께를 유지하여 철근의 온도상승을 제어했던 기존의 내화성능을 기대할 수 없어 확연한 차를 보인다. 또한, 건축물의 고층화와 더불어 사용량이 증가하고 있는 HSC는 폭발의 경향성이 확연하므로 단면결손으로 인한 구조안전성의 심각한 영향을 미칠 가능성 높기 때문에 이에 대한 대책마련이 시급하다.

이러한 배경하에 본고에서는 HSC 부재의 실 화재특성 및 폭발에 관한 연구를 통해 단면 결손을 최소화하여 화재에 대한 내화성능을 확보하고 폭발을 제어할 수 있는 일부 공법들이 제시되고 있어 이를 소개하고자 한다.

2. 고강도 콘크리트 부재의 폭발

2.1 콘크리트 구조물의 성능저하

콘크리트 구조물의 화재에 의한 성능저하는 고온 수열에 따른 콘크리트와 철근의 저하로부터 기인한다. 콘크리트 구조물은 화재에 의해 열이 전도되어 구성체간의 신축이 발생하여 균열이 유발되며, 탈수와 이에 동반하는 화학적 변화가 발생하여 성능이 저하한다. 또한, 화열의 전도는 철근의 온도상승을 유발하며 철근의 내력을 저하시킨다. 콘크리트 구조 등의 내화구조는 이러한 철근의 내력저하에 따른 구조안전성을 고려하여 철근의 온도상승을 제어하기 위한 소정의 피복두께를 고시하고 있다.

많은 연구자에 의해 고온하의 콘크리트 성질을 연구하고 실험한 결과 화재와 같은 고온하의 조건은 콘크리트 부재의 화학적 변화를 동반하는 물의 탈수와 미세구조의 변화이며 콘크리트를 구성하는 골재도 화열에 의해 광물의 결정구조의 변화 및 탈수, 가스의 방출 등을 유발하는 것을 알아냈으며 이들 원인에 의한 콘크리트의 성능 저하를 규명하였다^{4,8,11)}. 성능저하는 콘크리트를 구성하는 시멘트 매트릭스, 골재, 물의 탈수로부터

* 정희원, 한국건설기술연구원 건축연구부 Post-doc
songhun@kict.re.kr

** 정희원, 한국건설기술연구원 건축연구부 수석연구원

*** (재)일본건축방재협회 부이사장/도쿄대학 명예교수

표 1. 고온하의 시멘트 매트릭스의 영향^{10,11,14,16)}

온도범위	분해반응	고온에 의한 영향
30 ~ 200 °C	물리적 결합수의 증발	- 수분의 증발은 비교적 큰 공극으로부터 100 °C 이하의 온도에서부터 시작하며 공극의 크기에 따라 증발온도는 다르게 나타남. · C-S-H계 수화물(C-S-H) 시멘트 매트릭스의 주성분, 물성에 미치는 영향이 큼. 결정도가 낮은 겔상으로 100 ~ 130 °C에서 탈수하지만, 수화물의 화학조성은 일정하지 않기 때문에 개개의 형태를 명확히 구분하기 어려움
30 ~ 300 °C	겔의 붕괴 및 시멘트 페이스트의 탈수	· 에트링가이트(C ₃ A ₃ CSH ₃₂) 100 °C 이하 및 100 °C, 160 ~ 180 °C 정도에서 큰 피크를 보이며, 250 ~ 270 °C에서 작은 피크를 보이며 단계적으로 탈수. · 모노설페이트(C ₃ ACH ₁₂) 50 ~ 150 °C 및 200 °C, 300 °C에서 3단계로 탈수하여, C ₄ A ₃ S와 CaO로 변화. · 알루미늄에이트계 수화물(C ₃ AH ₆) 270 ~ 330 °C에서 물이 탈수하여 550 °C 부근에서 남은 물이 탈수하여 C ₁₂ A ₇ 와 CaO로 변화. · 이수석고(CaSO ₄ · 2H ₂ O) 탈수에 의해 약 130 °C에서 반수석고, 약 160 °C에서 무수석고로 변화. CaSO ₄ · 2H ₂ O → CaSO ₄ + H ₂ O · 수산화칼슘(Ca(OH) ₂) 450 ~ 550 °C에서 Ca(OH) ₂ → CaO + H ₂ O
120 ~ 600 °C	화학 흡착수의 방출	- β-C ₂ S의 생성.
600 ~ 700 °C	C-S-H 상의 분해	- 경화 시멘트페이스트의 융점은 약 1,200 °C이며, 화학조성에 의해 1,200 °C 보다 낮아짐.
1,100 ~ 1,200 °C	콘크리트의 용해	

표 2. 콘크리트 구조물의 열화¹⁶⁾

형상 형태 발생 시기	균열			
	균열	박락	팜아웃	폭렬
발생 시기	화재경과 전기간	박락 및 들뜸	팜아웃	비산
피해 장소	표층부 전체	부재의 모서리 등	표층부 및 골재 부분	표층부 일부 전체
주요 원인	적 변화 열팽창 및 수축 내력상실에 의한 박락 철근 과밀 배근	급격한 온도상승에 따른 부재의 열응력 및 수증기압 - 물의 탈수로 인한 화학적 변화	열응력 - 골재의 폭렬	수증기압 - 열응력 - 골재
피해 대상	콘크리트	콘크리트 표층부 전반	경량, 고강도	고강도 경량, 고강도

기인하며 각 구성체의 탈수는 수열온도의 범위에 따라 다르게 나타나며 <표 1>과 같다.^{4,8,10)}

일반적으로 물리적 성질의 변화 및 부재의 온도상승에 영향을 미치는 수분의 탈수는 100 °C에서의 모세관에 존재하는 자유수의 증발에 따른 상변화이며, 30 ~ 600 °C에서의 시멘트수화물의 탈수, 600 ~ 700 °C에서의 C-S-H상의 분해, 1,100 ~ 1,200 °C에서의 용해 등이며 융점은 기본적으로 Al₂O₃와

열열화깊이는 각국마다 다르지만 대략 500 °C를 전후로 설정
폭렬에 의한 부재의 내력저하 및 열열화 깊이의 증가

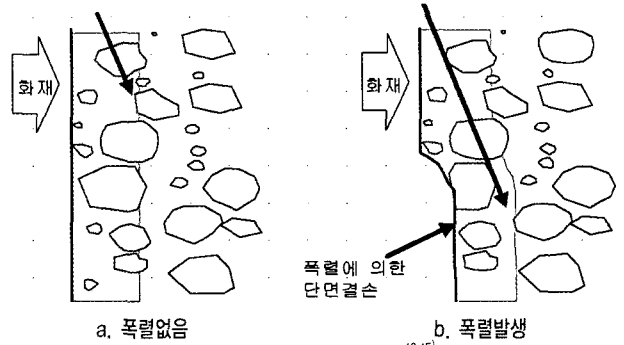


그림 1. 폭렬과 열열화 깊이^{10,15)}

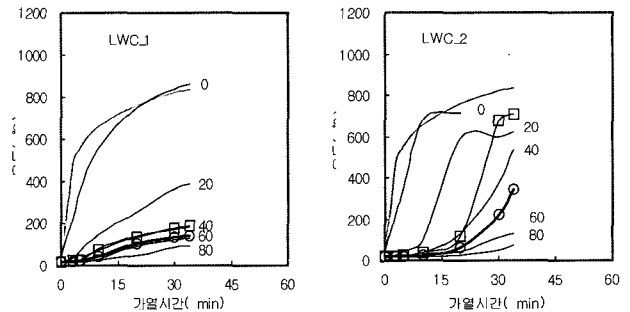


그림 2. 폭렬 발생에 따른 온도변화

Fe₂O₃의 양에 의해 결정된다^{8,16)}. 골재의 변화로서는 규암질 골재 등에 많이 포함되어 있는 석영의 570 °C에서의 변태, 석회암의 주성분인 탄산칼슘의 600 ~ 700 °C에서의 분해, 현무암의 팽창 등을 들 수 있다.¹¹⁾

이중 450 ~ 550 °C 영역에서 수산화칼슘이 열에 의해 탈수되어 중성화하는데 그 중성화한 깊이를 열열화 깊이라 하며 <그림 1>과 같다^{10,15)}. 열열화 깊이는 화재 피해의 척도로서 사용되며 화재경과시간 및 규모와 밀접한 관련을 지니므로 역으로 열열화 깊이를 판단하여 화재당시의 콘크리트 구조물의 수열상태를 유추할 수 있다. 폭렬에 의한 단면결손이 생기는 경우 열열화 깊이는 다르며 폭렬의 발생시기 및 정도에 따라 각각 상이하다.¹⁰⁾

2.2 콘크리트 구조물의 폭렬

2.2.1 폭렬연구의 현황

내화성능의 관점에서 폭렬은 부재내부의 급격한 온도상승을 유발하는 중요한 문제이므로 다양한 관점에서 폭렬 현상의 메커니즘 파악과 해결을 위한 연구가 진행되었다. 많은 연구자들에 의해 폭렬의 연구는 ① 콘크리트 종류나 혼합조건, ② 가열조

건, ③ 구조부재의 형상과 크기, ④ 외력하중과 프리스트레스 등의 여러 조건으로부터 접근하였다. 연구결과, 화재에 의한 ① 부재의 급격한 온도상승, ② 콘크리트의 종류 및 함수조건, ③ 부재에 작용하는 압축력, ④ 사용된 골재의 열적성질 등에 따라 폭발의 특성이 상이하며, 온도구배에 의한 ① 수증기압과 ② 비정상 열응력 등과 밀접한 관련을 가진다는 결론을 얻었다.^{1~8)}

콘크리트 부재에 발생하는 폭발을 정량화하여 해석적 예측이 가능한 모델은 보고되지 않았지만, 근래에 화재폭선에 의한 비정상 구속 상태의 실험결과들이 일부 보고되어 대략의 경향성을 파악할 수 있게 되었다. 폭발은 구조부재의 급격한 온도구배에서 발생하는 것이 일반적이며 부재에 작용하는 외력이나 프리스트레스, 부재가 받는 수열온도의 정도에 따라 그 결과는 상이하다. 콘크리트의 종류나 배합조건, 함수상태에 의해서도 다른 결과를 보여 HSC나 경량 콘크리트(이하 LWC) 혹은 연소속도가 빨라 부재의 온도가 급격하게 상승하는 경우 폭발의 발생 가능성이 높다.^{3~8)}

또한 콘크리트 부재의 강도에 따른 밀실정도나 함수상태는 폭발을 유발하는 중요한 인자이며 조적이 밀실하고 함수율이 높은 경우 우선적이며 위의 조건이 만족되는 경우에 한해서 선택적으로 발생하게 된다.¹⁶⁾

2.2.2 폭발의 유발요인

콘크리트 부재의 폭발을 유발하는 메커니즘에 관한 연구보고는 수증기압설과 열응력설 등의 관점에서 검토되었으며 개개의 작용으로는 설명하기 어려운 점이 많아 현재는 수증기압설과 열응력설의 복합작용에 의한 결과로부터 기인된다는 설이 설득력을 얻고 있다. 하지만, 수증기압 및 열응력의 복합작용은 양방이 균등하게 작용하는 것이 아니라 주어진 상황이나 조건에 의해 수증기압 또는 열응력이 우선적으로 작용하여 폭발에 영향을 미친다. 폭발성 폭발이 발견되는 가열초기는 수증기압에 의한 가능성이 우선적으로 고려된다.^{4,7,15,18)}

수증기압에 의한 폭발의 가능성은 Harmathy에 의해 제시되었고 moisture clog라는 과포수 상태에 의한 공극압의 생성과정을 설명하였다.^{1,6)}

또한, Bazant는 공극압과 열응력의 변화를 시뮬레이션 하였으며 수증기압과 열응력에 의한 폭발의 가능성을 제시하였다^{4,7)}. 이후 많은 연구자들이 실험과 시뮬레이션을 통해 검증하고 있으며 화재초기의 수증기압 및 열응력의 생성과정 및 응력변화를 개략적으로 표시하면 <그림 3>과 같다.

수증기압 및 열응력은 급격한 온도상승이 발생하는 가열초기에 콘크리트의 표층부에 한정하여 동시에 변화를 보인다. 이러한 변화는 5~30분간 표층부에 응력의 변화 및 집중되므로

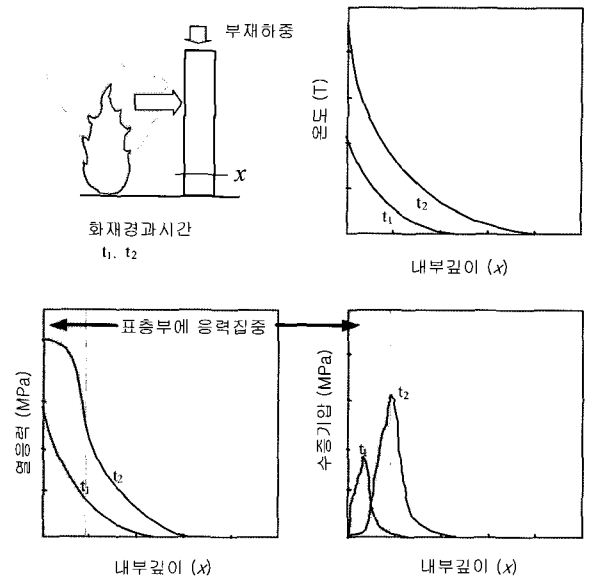


그림 3. 온도구배에 따른 내부응력의 변화^{1~10)}

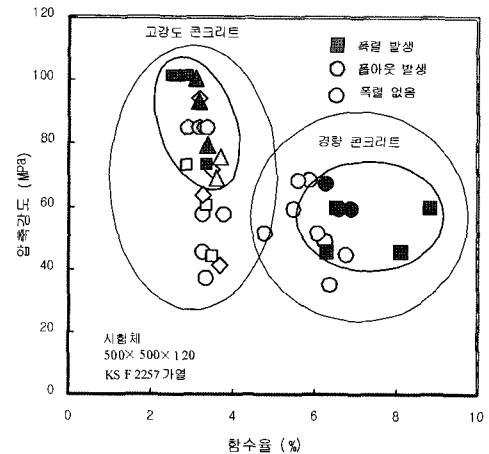


그림 4. 압축강도와 함수율의 영향¹⁶⁾

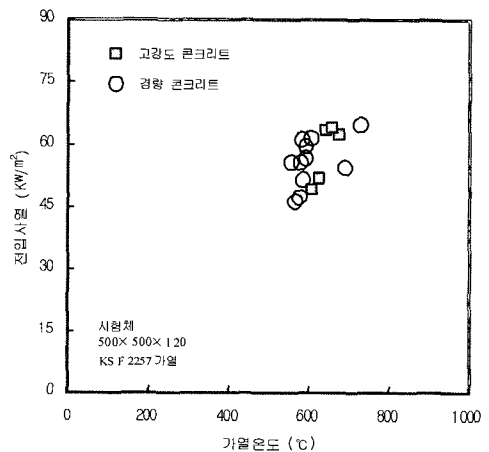


그림 5. 폭발시의 전입사열 및 가열온도¹⁶⁾

이 기간에 폭발이 발생할 가능성이 높다. 열응력은 수증기압보다 장시간에 걸쳐 콘크리트 부재에 영향을 미친다.

3. 고강도 콘크리트 부재의 폭발제어 공법

3.1 콘크리트 부재의 폭발제어 대책

구조물에 대한 성능설계의 가능성이 열림에 따라 내화성능에 대해서도 성능요구나 요건에 맞는 설계법의 적용이 가능하게 되었다. 구조물의 내화성능은 크게 ①비손상성, ②차열성, ③차염성 등의 3가지로 구분할 수 있으며 구조부재는 비손상성이 주요성능으로 제시된다¹⁵⁾. 즉, 구조내력상의 지장을 가져올만한 변형이나 응해, 단면손상이나 파괴 등이 발생하지 않아야 한다. 이는 화재시의 필요한 내력을 확보할 것을 요구하고 있으며 설사 폭발에 의한 단면결손이 발생하더라도 허용범위 이내에서 제어할 것을 의미한다. 즉, 성능설계상의 폭발제어 대책은 폭발의 유발요인으로부터 검토하는 설계수법 및 폭발이 발생하더라도 폭발깊이나 온도상승을 허용범위 이내로 억제하는 대책이 필요하다. <그림 6>은 성능설계와 콘크리트 부재의 폭발방지를 위한 요건이나 요구 및 폭발을 제어하기 위한 사양을 모식화한 것이다.

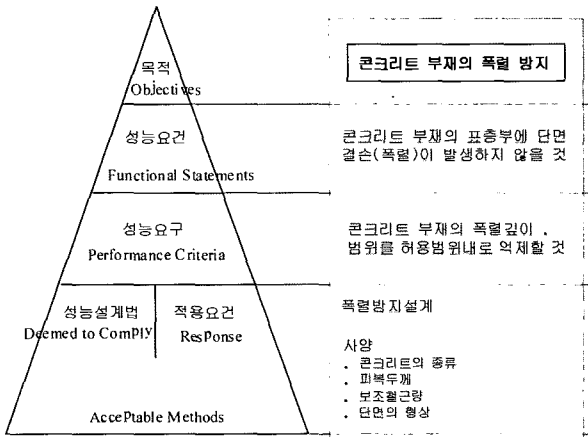


그림 6. 성능설계와 콘크리트 부재의 폭발방지¹⁵⁾

표 3. 폭발유발요인에 따른 대책

폭발의 유발요인	기본적인 대책	구체적 대책
콘크리트의 조건 - HPC - LWC - 열적성질 - 함수율 - 사용재료	- 열을 차단 - 표층부의 온도상승 억제 - 온도구배의 저감	- 내화성이 높은 재료의 선택 - 내화도료의 도포 - 내화모르타르의 도포 - 강관 등에 의한 콘크리트의 피복
화재성상 및 조건 - 급격한 온도상승 - 화재경과시간	- 온도상승의 방지	- 합성섬유의 혼입(PP섬유) - 부재의 강제전조 - 제거판 설치 - 실내 가연물의 저감 및 재료의 난연화 - 화재설비의 확충
부재의 조건 - 부재의 형상 - 피복두께 기타	- 내화성능설계의 적용	-

콘크리트 부재의 폭발을 효율적 제어하기 위한 방편으로 수증기압 및 열응력을 유발하는 요인을 제거하는 것이 유효하다. 압축강도 등의 부재의 조건은 용도나 형태에 의해 설계기준강도가 정해지므로 제어가 불가능하지만 콘크리트 표층부에서의 함수율의 조절 및 가열속도는 적절하게 조절할 수 있다.

가장 효율적인 방법은 화재시의 화열을 차단하여 부재의 온도상승을 제어함으로써 구조물에 미치는 영향을 최소화하는 것이며 폭발방지의 기본적인 대책이 된다. 구체적인 방법으로는 내화물이나 내화도료 및 내화모르타르의 도포 및 강관 등을 이용하여 콘크리트 표면을 피복하는 것으로 현재 폭발제어를 위해 실 시공되고 있다.

또한, 폭발발생의 유발요인인 수증기압의 생성을 저감하기 위한 기술들도 도입되고 있으며 크게 폴리프로필렌섬유(이하, PP섬유), 에틸렌비닐알콜섬유(이하, EVA섬유), 및 폴리프로필렌섬유분말(이하, PP분말)의 혼입 및 수증기를 배출할 수 있는 제거판의 설치 등을 예로 들 수 있으며 <표 3>과 같다.

최근에는 새로운 방·내화기술의 진보와 더불어 고내화성을 가지는 재료의 개발 또한 진전되고 있어 HSC 부재의 폭발현상을 제어하고 열에 의한 성능저하 정도를 저감할 수 있는 고성능 재료의 출현도 기대하고 있다.

3.2 신재료 및 신공법의 검토

3.2.1 수증기압 생성의 저감대책

화재시의 콘크리트 중의 수분이동을 용이하게 하여 수증기압의 생성을 저감하는 방법으로는 합성섬유의 혼입이 주로 논의되며 사용되는 합성섬유로는 PP섬유, EVA섬유가 이용되며 일반적으로 PP섬유가 널리 쓰인다.

높은 수증기압 및 열응력에 의한 파괴 등의 성능저하를 보강하기 위해 PP섬유를 혼입함으로써 수증기나, 수분, 가스 등이 빠져나갈 수 있는 미세경로를 만들어 주는 방법이다. PP섬유가 열에 의해 녹을 때 HSC의 투기성을 증대시키기 위해서는 시멘트 매트릭스 전반에 걸쳐서 PP섬유가 고르게 분포되어 있어야 한다. 또한 이렇게 고르게 분포된 섬유는 시멘트 매트릭스 내에서 투기성이 좋은 유기적으로 연결된 미세 네트워크를 형성하여야 한다.

일반적으로 PP섬유의 용해점은 약 170°C 정도로 콘크리트 내의 온도가 PP섬유의 용해점을 초과하면 용해한다. PP섬유 및 분말을 혼입한 HSC는 혼입하지 않은 경우보다 더 많은 미세경로가 관찰되며 대체적으로 약 1μm 이하로 상당히 크기가 작고 잔골재나 굵은골재 사이에서 매우 조밀하게 형성되는 반면에 섬유를 혼입하지 않은 HSC는 균열의 크기가 약 10μm 이상으로 상당히 크며 먼 거리까지 골재와 연결되어 있다. 섬

유를 혼입한 HSC에서 균열이 더 많이 발생하는 원인으로서는 열에 의한 골재의 팽창과 시멘트 매트릭스의 결합수와 잉여수의 탈수(dehydration)로 인한 수축현상에 의해 생기는 팽창-수축의 전이단계시 fiber bed가 국부적으로 균열의 미세거동을 집중시키기 때문이며, 또 다른 이유로는 섬유가 열에 의해 용해할 때 다소 팽창하여 매트릭스 내에 인장응력을 발생시켜 균열을 집중시키기 때문이다^{5,17)}. PP섬유의 혼입은 일정정도 폭렬의 완화가 가능하지만 성능저하 자체를 막진 못한다.

그 외에 미세경로를 형성하는 방법으로 금속분말을 이용하는 방법 등이 제시되기도 한다. 하지만 금속분말 혼입의 경우 콘크리트 구조체의 검증 및 경제성 확보가 중요한 과제이다¹⁸⁾. 또한, 부재내부에 생성되는 수증기를 원활하게 배출하기 위한 방편으로 수증기 제거관을 삽입하는 방법도 제시되고 있다.

3.2.2 신재료 및 신공법의 적용

HSC 부재의 폭렬에 의한 단면결손으로부터 내화성을 확보하기 위한 새로운 일환의 방편들이 제시되어 있으며 재료적인 접근 및 공법적 접근방법으로 구분할 수 있다.

재료적인 접근방법으로는 고내화성을 가지는 SiO₂계, SiO₂-Al₂O₃계, Al₂O₃계, MgO계 등의 내화물을 이용하여 폭렬을 제어하며 표층부에 ① 뿔칠하여 도포하는 방법, ② 액체상태로 혼입하여 사용하는 방법, ③ 표층부의 성상변화를 유도하여 내화성을 유지하는 방법이 제시되고 있으며 ②, ③의 경우가 내구성 확보나 공사비 측면에서 유리하다.

내화성 확보를 위한 공법상 접근방법은 ① 강관을 이용하여 피복하는 방법, ② 메탈라스나 폭렬구속 철근의 배치를 통한 횡구속을 이용하여 보강하는 방법, ③ PP섬유판 등의 내화 보강판을 콘크리트에 부착하는 방법 등이 제시되고 있다. 강관을 이용하는 경우 수증기 분출을 위한 구멍의 설치 등 적절한 제거 조치가 필요하며 수증기압의 과다 발생시 강관의 변형을 유발하므로 이에 대한 조치가 필요하다. 메탈라스나 폭렬구속 철근에 의한 방법은 주근 외부에 메탈라스나 철근을 설치하고 구속하여 폭렬의 진행이 주근까지 도달하는 것을 막는다. PP섬유판 등을 이용한 방법은 화재초기의 열전도를 제어함으로써 표층부의 온도구배를 제어하여 폭렬을 방지하고자 하는 기술로서 보강판과 모체의 접합물의 성능에 의해 차가 발생하므로 접합물의 내화대책이 필요하다.

4. 실 적용 폭렬제어기술의 사례

실제 건축물에 적용되고 있는 제어기술은 폭렬을 유발하는 요인들의 제거에 포커스를 두고 있으며, 전술한 열을 차단하여 표층부의 온도상승 억제 및 온도구배의 저감으로부터 수증기압

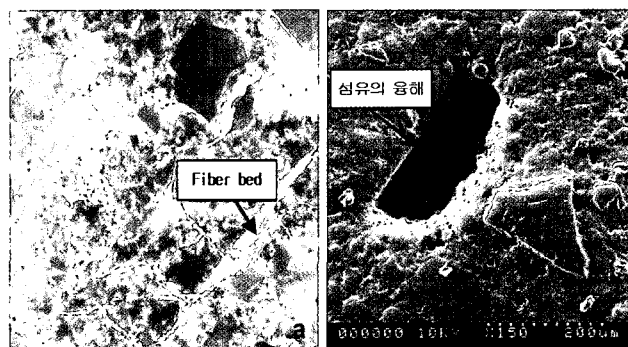
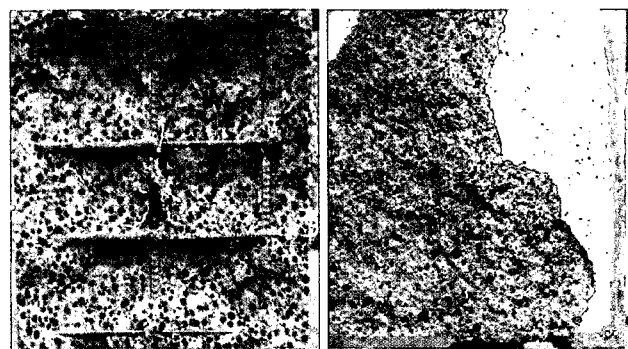


그림 7. 200 °C에서 섬유의 용해⁵⁾



a. PP섬유 무혼입 b. PP섬유 혼입(0.9 kg/m³)
그림 8. PP섬유 혼입 콘크리트 내화성능

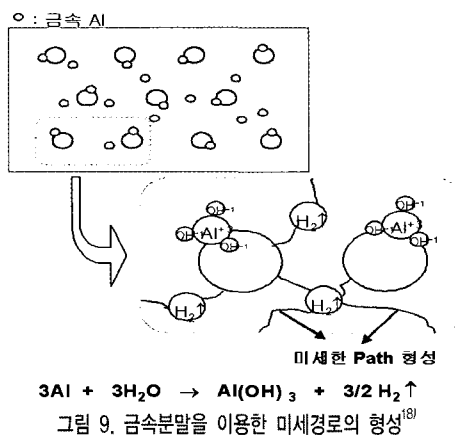
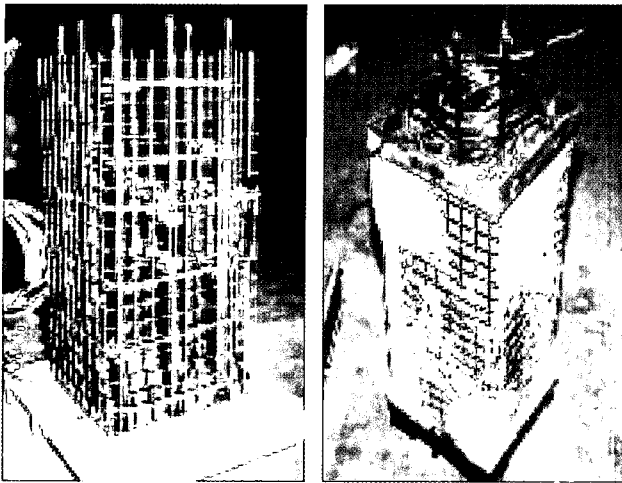
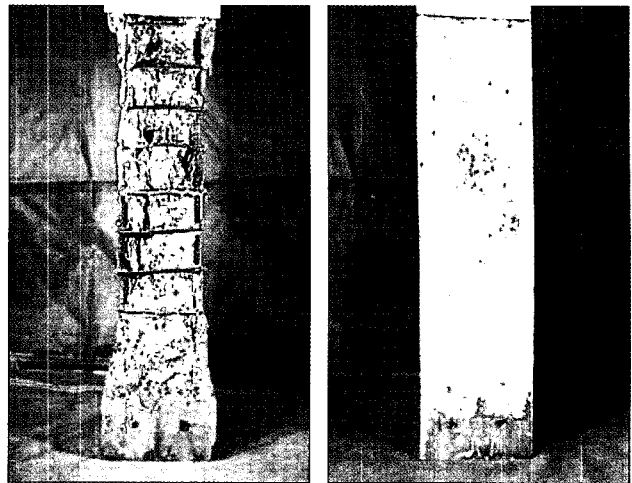


그림 10. 고내화성 콘크리트



a. 폭렬구속 철근의 배치 b. 내화시험 후 표층부

그림 11. 폭렬구속 철근의 배치와 내화성능¹⁹⁾



a. 플레인 콘크리트 b. AFR 콘크리트

그림 12. AFR 콘크리트²⁰⁾

의 완화를 유도하고 있다. 일본의 경우 60 MPa를 넘는 HSC를 적용하여 시공하는 경우 사전에 내화성능에 대한 검증 및 인정을 받을 것을 요구하고 있다¹⁵⁾. 본 절에서는 이를 바탕으로 HSC의 폭렬을 제어하고 최근에 기술성능의 인정을 취득한 공법들을 소개하고자 한다.

4.1 AFR 콘크리트

AFR(advanced fire resistant) 콘크리트는 PP섬유를 혼입하며 설계기준강도 80 ~ 120 MPa의 범위에서 실용화되었다. 전술한 바와 같이 화재시에 유해 소실하여 콘크리트의 미세경로를 형성하여 열팽창력 및 수증기압을 완화하는 역할을 함으로서 표층부의 박락이나 비산을 방지한다. 혼입하는 PP섬유의 직경은 0.012 ~ 0.2mm, 길이는 5 ~ 20mm이며 콘크리트에 대한 혼입률은 부피비 0.1 ~ 0.35%의 범위에서 균등하게 혼입한다. 또한, 최근에 150 MPa급의 UHSC 적용에서는 PP섬유의 경우 다량 혼입되는 문제점이 발생하므로 이를 대체하기 위한 신 섬유(EVA섬유)의 사용이 보고되고 있다²⁰⁾. <그림 12>는 AFR 콘크리트를 적용한 내화시험 사례를 나타내었다.

4.2 FPC공법

FPC(fire performance concrete)공법은 PP섬유 대신 PP분말을 HSC에 혼입하여 제조하였다. PP섬유나 분말을 혼입하는 공법은 프래쉬 콘크리트의 성상변화가 작고 부재단면의 증가를 유발하지 않는 메리트를 지니고 있다. FPC공법에 사용되는 PP분말은 용점이 약 165°C이며 밀도는 0.9g/cm³이며 질

량비로 약 1 ~ 3 kg/m³을 혼입한다. 분말상의 형태로 혼입하기 때문에 혼합시의 영향이 적으며 분산성이 우수하며 파이버볼(fiber ball) 현상이 발생하지 않는다. 통상의 HSC와 동일하게 설계, 제조, 시공이 이루어진다²¹⁾. <그림 13>은 FPC공법을 적용한 내화시험 사례를 나타내었다.

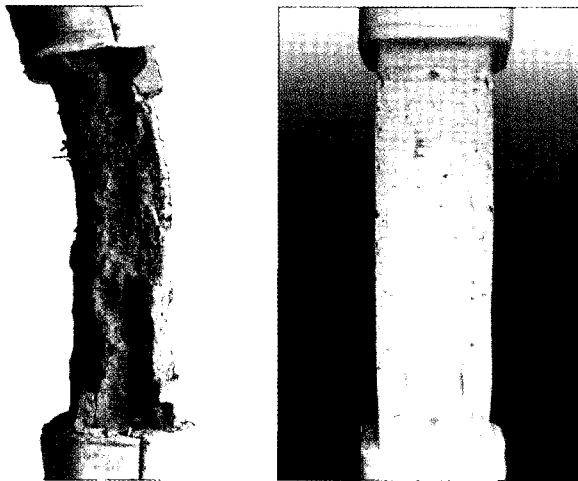
4.3 FIRECC공법

FIRECC(fire reinforced concrete column)공법은 내화성 재료를 이용하는 방법으로 섬유혼입 규산칼슘판 및 세라믹계 경질내화피복, 모르타르, 셀룰로스 섬유혼입 모르타르 등을 이용하여 콘크리트 기둥을 피복하는 방법이다. FIRECC공법은 전술한 열의 전도를 제어하기 위한 방편으로 제시된 내화물 피복을 이용하는 방법으로 설계기준강도 60 ~ 100 MPa의 범위에서 사용한다. 단면결손에 의한 폭렬을 제어하기 위한 피복두께는 각 재료에 따라 다르지만 일반적으로 20mm 이상으로 시공한다²²⁾. <그림 14>는 FIRECC공법을 적용한 내화시험 사례를 나타내었다.

5. 맺음말

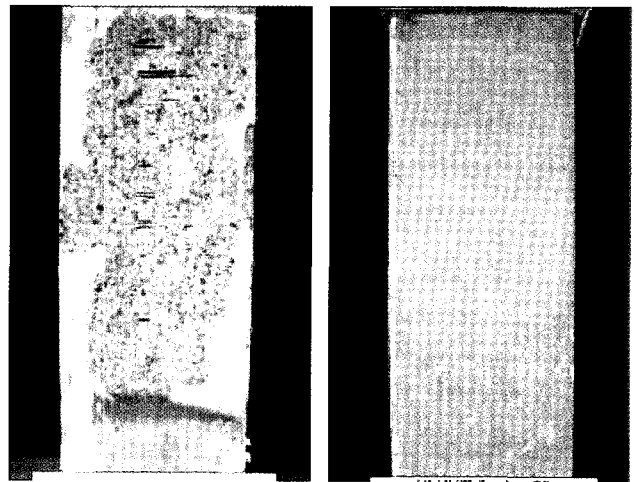
콘크리트 부재의 단면결손을 유발하는 폭렬은 비손상성이라는 내화성능의 관점에서 매우 중요한 문제이며 해결해야 할 시급한 문제이다. 미국, 영국, 스웨덴, 일본 등에서는 폭렬에 관한 연구가 일부 진행되어 메커니즘 및 제어방법에 대한 성과들이 보고되고 있으며 이를 이용하여 내화성능을 가지는 HSC를 이용한 초고층 구조물의 적용사례가 다수 보고된다.

HSC의 폭렬은 수증기압과 열응력 등과 밀접한 관련을 지니



a. 플레인 콘크리트

b. FPC 공법

그림 13. FPC 공법⁽²¹⁾

a. 플레인 콘크리트

b. 섬유혼입 규산칼슘관 사용

그림 14. FIRECC 공법⁽²²⁾

며 이를 제어하기 위한 효율적 방법으로 온도구배 및 수증기압의 완화를 들 수 있다. 온도구배를 완화하기 위한 방편으로서 열의 전도를 차단하는 방법은 내화성이 있는 재료를 이용한 마감방법이 효과적이며 수증기압을 완화하기 위한 방편으로는 합성섬유의 혼입 및 미세경로의 형성을 통한 수증기의 배출이 효과적이다.

이러한 폭발유발요인 및 대책으로부터 시공성 및 경제성을 지니는 유효한 제어공법의 개발이 필요하며 선행기술 확보를 통한 기술력 축적을 위한 일련의 연구가 더욱 진행되어야 한다. □

참고문헌

1. Y. Anderberg, "Spalling Phenomena of HPC and PC, International Workshop on Fire Performance of High Strength Concrete," NIST Specials Publication 919, 1997.
2. Dale P. Bentz, "Fibers, Percolation, and Spalling of High-Performance Concrete," ACI MATERIALS JOURNAL, May~Jun., 2000, pp.351~359.
3. P. Kalifa, "Spalling and pore pressure in HPC at high temperature", Cement and Concrete Research, Aug., 2000, pp.1916~1927.
4. Zdenek P. Bazant, Maurice F. Kaplan, "Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models," Prentice Hall, 1996.
5. Pierre Kalifa, "High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibers From spalling to microstructure," Cement and Concrete Research, Jun., 2001, pp.1487~1499.
6. NIST, "Fire Performance of High-Strength Concrete: A Report of the State-of-the-Art," NIST, Dec., 1996.
7. NIST, "International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete," Md Gaithersburg, Feb., 1997.
8. Ulrich Schneider, "Behavior of Concrete at High Temperatures," Berlin, 1982.
9. Wei-Ming Lin, "Microstructures of Fire-Damaged Concrete," ACI Materials Journals, May~Jun., 1996, p.199.
10. "構造部材の火害診断および補修・補強方法", シンポジウム資料, 日本建築學會, 2002.
11. 森 實, "建築材料の火災時における高温性状に関する研究", 博士學位論文, 東京大學, 1975.
12. 森田 武, "トンネル火災におけるコンクリートの耐火性について", 文獻調査委員會, 日本コンクリート工學協會, Vol.38, No.11, 2000, 11, pp.61~65.
13. 池尾陽作, "高強度コンクリートの耐火性能(爆裂)に関する研究", 文獻調査委員會, 日本コンクリート工學協會, Vol.37, No.8, 1999, 8, pp.53~57.
14. "コンクリート構造物の火災安全性研究委員會報告書", 日本コンクリート工學協會, 2002.
15. 新しい「避難安全検証法・耐火性能検証法」, 日本建築學會關東支部, 防火専門研究委員會シンポジウム, 2000.
16. 송 훈, "화재시에 대한 고강도 콘크리트 부재의 내화성능에 관한 연구", 박사학위논문, 도쿄대학, 2003.
17. 화재와 콘크리트, 콘크리트학회지 특집기사, Vol.14, No.2, 2002, pp.10~50.
18. 조선내화 기술자료
19. 폭발구속 철근의 배치, <http://www.obayashi.co.jp> 외.
20. AFR 콘크리트, <http://www.shimzo.co.jp> 외.
21. FPC 공법, <http://www.toa-const.co.jp> 외.
22. FIRECC 공법, <http://www.fujita.co.jp> 외.