

고성능 콘크리트의 폭렬 현상과 구조적 성능

Structural Behavior and Spalling of High Performance Concrete Members in Fire



최은규*
Eun-Gyu Choi

신영수**
Yeong-Soo Shin

이차돈***
Cha-Don Lee

1. 머리말

최근 10년 여간(1990년 ~ 2000년) 발생한 화재건수는 27만 4,556건으로 매년 10% 이상 증가하고 있으며, 최근의 화재발생은 인명 및 재산피해는 물론 막대한 국가적 손실을 초래하고 있다. 전체 화재 중 건축물이 차지하는 비율은 52.4%로써 절반 이상이 건축물에서 발생하며, 그 중에서도 주택, 아파트 및 공장, 작업장의 화재건수가 75%에 달한다. 각종 건축구조물이 고층화, 다양화, 대형화됨에 따라 화재 발생요인 또한 날로 증대하고 있으며, 손상된 건물의 관리가 중요한 문제로 대두되고 있다. 건축물에 보편적으로 사용되고 있는 철근콘크리트 구조는 가장 실용적이며 내화성능과 내구성능을 동시에 갖춘 재료로 평가되어져 왔다. 일반적으로 콘크리트는 다른 구조재료에 비해서 열전도율, 열확산계수가 현저히 낮고, 고온에서 완전붕괴에 도달하기까지의 에너지 소산능력이 우수하기 때문에 화재 등과 같은 비상상황에서 건물사용자에게 충분한 대피시간을 확보하게 해준다. 최근 구조물의 고층화로 인해 고강도 콘크리트의 사용이 점차 일반화 되어 가고 있는 추세이다. 고강도 콘크리트는 화재피해로 의한 손상정도에 따라 구조물의 사용성, 내구성, 안전성에 큰 영향을 미치므로, 이를 정확하게 평가하는 것이 매우 중요하다. 특히 고강도 콘크리트는 화재에 노출되는 시간, 내부수량, 온도 등에 따라 피복이 탈락하는 폭렬현상이 발생하여 구조적 문제를 야기할 수 있다.

일반적으로 내화성능을 검토하고 설계하는 데 피복의 두께를 규정하고 있으며, 국내에서도 단순하게 내화 피복두께를 50mm로 규정하고 있으나 선진 외국의 경우에는 화재에 노출된 부재의 일람 및 단부 구속조건, 내화시간에 따라 피복두께를 달

리 지정하고 있다. 우리나라의 방법은 내화성을 검토하는 데 가장 쉽게 접근할 수 있는 방법이기는 하나, 개개의 특수한 편차를 고려하기에는 적절하지 않다. 특히 고온에서의 고강도 콘크리트는 성질변화로 인한 구조성능 저하와 폭렬로 인한 크기의 감소로 인해 구조물의 안전성에 심각한 문제를 야기할 수 있다. 특히 압축재의 폭렬현상은 철근의 좌굴, 하중 지지능력 저하, 단면의 감소 등으로 인해 부재자체에서 좌굴이 발생 할 수 있으므로 구조물의 안전성에도 문제가 발생 할 수 있다. 이번 특집에서는 고강도 콘크리트의 폭렬현상에 대해 논하기로 한다.

2. 고온에서 고강도 RC의 폭렬현상

2.1 폭렬의 원인

폭렬의 주요 요인은 높은 수분 함유량, 낮은 투수성(permeability), 콘크리트 부재 내에 국부적인 높은 응력 발생시, 골재의 광물성분, 시멘트 페이스트와 골재, 콘크리트와 철근과의 열팽창 차이로 인한 응력 발생, 높은 온도에서 콘크리트의 일반적인 구조 성능 저하 등이 있으며 이러한 요인이 복합적으로 작용하여 일어나는 것이다. 국부적인 폭렬현상이나 부분적인 박리현상 등은 구조물에 크게 영향을 주지 않지만, 폭발적인 폭렬의 경우는 구조물에 매우 심각한 문제를 일으키며, 이것은 화재 초기 시 부재의 완전한 붕괴를 초래할 수 있다.

2.2 폭렬 메커니즘

화재시 부재가 고온에 노출되면 노출면에 인접한 층의 수분이 상대적으로 온도가 낮은 내부로 이동하고, 인접 층의 공극으로 재흡수 된다. 이러한 메커니즘으로 인하여 부재 표면의 건조층의 두께가 증가하고 바로 안쪽에 상당한 두께의 포화층(moisture clog)이 서서히 형성된다. 이로 인하여 건조층과

* 정회원, 이화여자대학교 건축학과 박사과정
eungyu18@empal.com

** 정회원, 이화여자대학교 건축학과 교수

*** 정회원, 중앙대학교 건축공학과 교수

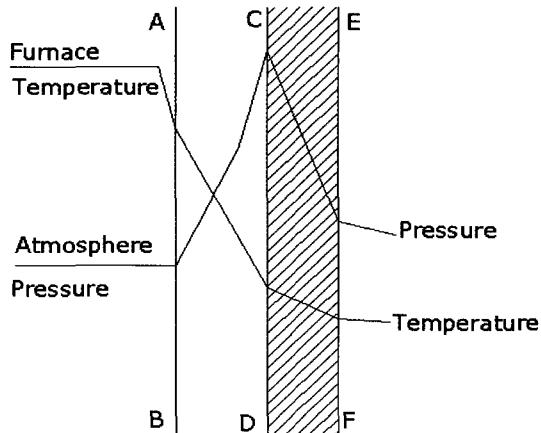


그림 1. 포화층 형성

포화층 사이에 구분면이 생긴다(〈그림 1〉의 C-D면). 화재가 진행됨에 따라 더 이상 내부로의 수분이동이 힘들어짐에 따라 수증기는 A-B-C-D 층을 통하여 노출된 표면을 향해 이동될 수밖에 없게 되면서 부재 내부가 강한 압력을 받게 된다. 더구나 수증기가 열을 받으면 팽창하게 되어 공극을 따라 흐름에 대한 저항성이 증가된다.

온도증가율이 더 커지게 되면서, C-D면에서 빠르게 압력이 증가된다. 재료의 투수성이 상대적으로 높으면 부재 내부 쪽으로 압력이 분산되어 전체적으로 안정 상태가 된다. 반면 투수성이 상대적으로 낮으면 C-D면에서의 압력이 계속적으로 증가하게 되고 결국엔 그 압력이 콘크리트의 인장 강도보다 커지게 된다. 이 시점에 도달하면 건조층이 노출된 표면으로부터 큰 소리를 내며 터져나가게 된다. 폭렬 현상은 한번 발생했다고 끝나는 것이 아니고, 새로운 건조층과 포화층을 형성하면서 점차 빈번하게 지속되게 된다. 〈그림 2〉는 공극의 포화도와 투수성을 변수로 폭렬에 대한 특정 콘크리트의 민감성을 보여준다. 같은 포화도를 가졌다면 투수성이 낮은 콘크리트일수록 수분 포화 폭렬(moisture clog spalling) 현상이 일어나는 것을 볼 수 있고, 포화도가 100 %가 되면 콘크리트 투수성에 관계없이 폭발적인 폭렬현상이 일어난다. 일반적으로 부재의 투수성이 작으면 공극 내의 포화도도 높아지게 되므로 투수성이 낮은 콘크리트의 경우 수분 포화 폭렬에 대한 위험이 커진다. 즉 절대적인 수분양이 중요한 것이 아니라 공극내의 상대적인 포화도가 중요한 변수로 작용하는 것이다.

Copier(1979)는 콘크리트 구조물이 지어진지 2년이 경과되면 콘크리트 부재의 부피당 수분양이 7.5 % 이하로 감소하게 되어 오래된 건물의 경우에는 화재 시 폭렬현상이 일어나지 않는다고 밝혔다. 그러나 실제로는 오래된 콘크리트 부재에서 그 부재의 물-시멘트비가 낮아졌더라도 그 구조물은 화재 시 폭발적인 폭렬현상이 일어날 위험이 높다. 이는 시간이 흐르면서

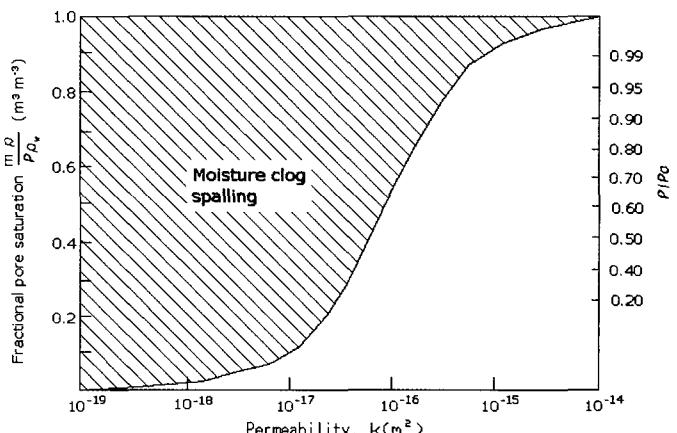


그림 2. 포화도와 투수성에 대한 콘크리트의 폭렬점

모세 공극이 분열되면서 콘크리트의 유효 공극 크기가 감소하게 되고, 따라서 투수성도 감소된다. 시간이 흐르면서 수분양이 감소된다고 하더라도 투수성이 감소하게 되면서 공극 내의 포화도가 상대적으로 높아져 폭렬의 위험성이 높아지게 된다.

Mayer-Ottens(1974)의 연구에서 보면 함수율(중량 당 수분양)이 2 % 이하(부피당 4.4 %)로 내려가면 폭렬 현상은 일어나지 않으며 그 이상의 함수율을 가진 콘크리트 부재에서는 실험체에 가해지는 하중과 온도 증가율이 크다면 폭렬에 대한 민감성이 증가한다고 한다.

폭렬 현상에서 투수성이 중요한 변수로 작용한다면 투수성이 콘크리트 재료 성질과 어떠한 관련이 있고 또 어떻게 결정지어지는지 고찰해볼 필요가 있다. 이를 위해 우선 콘크리트의 특정 표면(specific surface)에 관해 생각할 필요가 있다.

특정 표면은 공극을 가진 구조(대표적으로 콘크리트)의 재료 성질이며 단위 부피당 공극 표면 면적 $S(m^2/m^3)$ 또는 단위 중량당 공극 표면 면적 $\bar{S}(m^2/kg)$ 으로 나타낸다. 콘크리트의 경우 특정 표면이 다른 공극 구조(pore structure, 예를 들어 벽돌)에 비해 월등히 크다. 이것은 콘크리트 수화 작용에 관련되어 있기 때문에 콘크리트가 양생됨에 따라 증가한다.

Powers와 Brownyard(1948)에 의하면, \bar{S} 는 콘크리트 단위 중량당 증발되지 않은 수분의 중량에 비례한다. 콘크리트의 내부에서 포화도가 높은 모세 공극은 상호 연결된 네트워크를 형성한다. 콘크리트가 양생되기 시작하면서 발생하는 수화 작용은 포화된 공극에 침투하여 형성된 네트워크를 분열시킨다. 만약 물-시멘트비가 너무 높지 않다면 포화 공극의 분열은 얼마 지나지 않아 시작된다. 반면 물-시멘트비가 70 % 이상 높으면 공극의 분열은 절대로 발생하지 않는다. 공극의 분열 후 더 미세한 공극을 통해 모세 공극이 다시 상호 연결된다. 이러한 과정에서 콘크리트의 투수성이 급격하게 감소하게 된다. 투수성에 대한 식은 다음과 같다.

$$\frac{P_{pt}^2}{1-P_{pt}} \exp\left(\frac{1-P_{pt}}{P_{pt}}\right) \quad \text{식(1)}$$

여기서, P_{pt} : 공극률(m^3/m^3)이며 다음과 같이 계산된다.

$$P_{pt} = \left(\frac{\rho_t - \rho_{pt}}{\rho_t} \right) \text{ 또는} \\ \frac{\text{Volume of pore (water+air)}}{\text{Volume of concrete}} \quad \text{식(2)}$$

여기서, ρ_t 는 공극을 포함하지 않은 콘크리트의 밀도(true density)
 ρ_{pt} 는 공극을 포함한 콘크리트의 밀도(bulk density)

<그림 3>은 식으로 나타낸 공극률과 투수성의 관계이며 공극률이 클수록 투수성도 증가하는 것을 볼 수 있다. 같은 공기량을 가진 콘크리트라면 물-시멘트비가 클수록 공극률도 커지기 때문에 물-시멘트비가 클수록 투수성이 크게 된다. 일반적으로 고강도 콘크리트의 경우 일반 강도 콘크리트보다 물-시멘트비가 낮기 때문에 투수성이 낮게 되며 따라서 폭발적인 폭렬 현상이 심하게 일어나게 된다.

2.3 폭렬에 의한 구조적 손상

고강도 콘크리트 구조물이 화재피해를 입었을 경우 내부 온도분포는 일반강도 콘크리트와 전반적으로 유사한 경향을 보이지만, 고강도 콘크리트에서는 폭렬현상에 의해 콘크리트가 떨어져 나가면서 열의 침투 깊이가 늘어나 구조체 내부까지 고온이 전달되고, 피복의 손실로 철근의 온도상승 또한 증가하여 강도저하로 구조부재는 치명적인 내력저하를 초래하게 된다. 화재초기에는 일반강도와 고강도 콘크리트의 처짐에 별다른 차

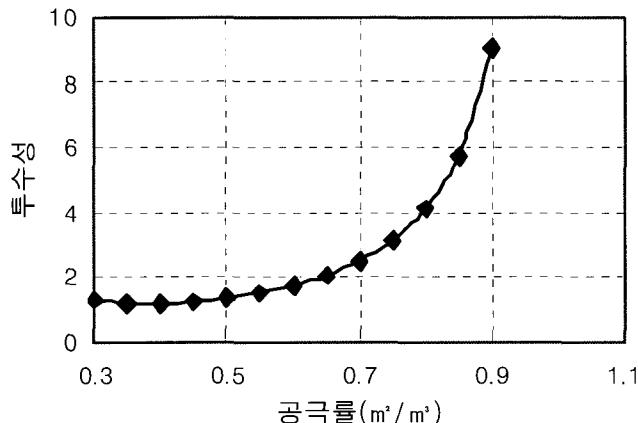


그림 3. 공극률과 투수성과의 관계

이가 없다 할지라도 일정시간이후 고강도 콘크리트에서 폭렬이 진행되고 난 후에는 고강도 콘크리트의 처짐 증가율이 일반강도 콘크리트의 처짐 증가율보다 많이 커지게 된다. 이는 고강도 콘크리트의 경우 폭렬현상이 일어나면서 단면이 손실되어 단면이차모멘트(I)가 감소하고 화해를 입는 면이 넓어지면서 탄성계수(E)도 일반강도 콘크리트에 비해 크게 감소하게 됨으로써 부재의 강성이 저하되며 되고, 부재 내력이 감소하여 처짐이 증가한다. 이러한 현상은 흔 부재에는 물론 압축 부재에 심각한 구조적 영향을 미쳐 구조체 전체의 안정성이 문제가 된다. 그러므로 고강도 콘크리트를 사용할 경우 화재시 폭렬현상에 대한 충분한 고려와 이에 의한 정확한 구조적 거동 파악 및 폭렬저감 방안에 관한 구체적 연구가 요구된다.

2.4 고강도 RC 부재의 화재실험

2.4.1 흔 부재 실험 계획

(1) 시험체 상세

일반강도와 고강도 철근 콘크리트 보 시험체에 대해 각각 화재피해를 입은 시간 및 피복두께를 변수로 시험체가 제작 되었다(<표 1>). 보의 크기는 $250 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 5,000 \text{ mm}$ 이며, 화재 실험을 위해 6개월간 양생하였다.

(2) 가열 실험

화재실험을 위한 시험체는 수평 가열로에 단순지지로 설치하고 4점 재하 방식으로 가력하여 하중을 유지한 상태에서 국제 규준인 ISO 834 기준을 따라 각 시험체 별로 60분, 90분, 120분 동안 가열하였다.

(3) 잔존 강도 실험

잔존강도 실험은 화재실험 후 자연대기 상태에서 2개월간 방치 후, 각 변수(콘크리트강도, 피복두께, 화재시간)에 따른 8개의 시험체에 대해 수행하였다. 본 연구에서는 시험체의 중앙 및 1/4 지점에 LVDT를 설치하여 부재의 사용성 및 강성의

표 1. 시험체 상세

시험체 명	화재시간 (min)	하중 (tonf)	강도 (MPa)	피복 (mm)
N4-T	-	-		
N4-1	60	8.88	21	40
N4-2	120	8.88		
N5-T	-	-	(Normal Strength)	
N5-1	60	8.88		50
N5-2	120	8.88		
H4-T	-	-		
H4-1	60	9.82	55	40
H4-2	90	9.82		
H5-T	-	-	(High Strength)	
H5-1	60	9.82		50
H5-2	90	9.82		

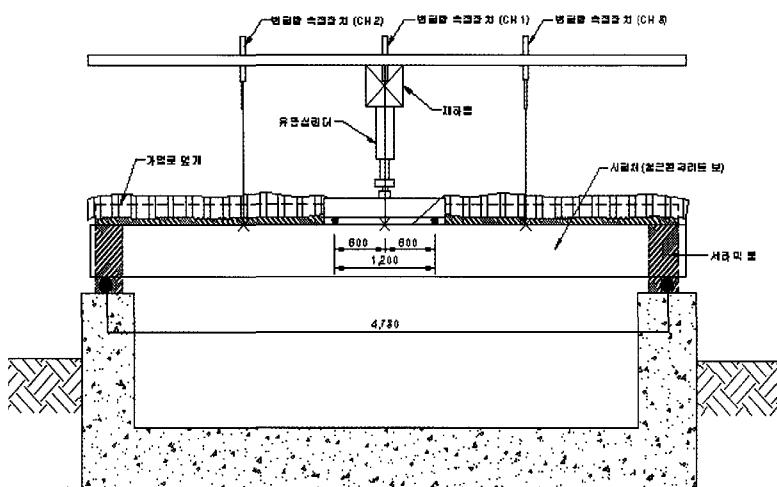


그림 4. 화재실험장치 단면

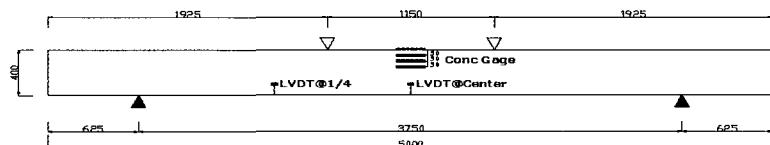


그림 5. 가력 실험 시 실험체 설치

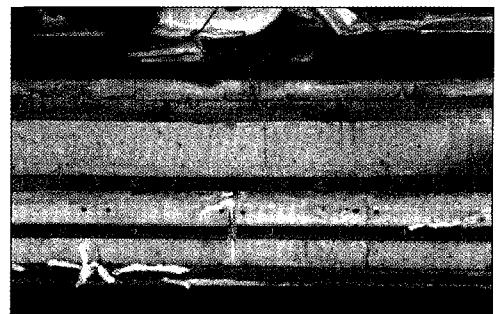


그림 6. 가열 실험 후 보의 형상(일반 강도)



그림 7. 가열 실험 후 보의 형상(고 강도)

변화를 분석하고자 하였다. 또한, 철근과 콘크리트의 변형률을 측정하기 위하여 인장 철근에 철근 게이지를 부착하고, 실험체 윗면에 1개, 실험체 옆면에 3개의 콘크리트 게이지를 부착하였다. 옆면의 콘크리트 게이지는 50 mm 간격으로 부착하였다.

2.4.2 휨 부재 실험 결과 및 분석

(1) 폭렬 현상

〈그림 6〉과 〈그림 7〉은 일반 강도와 고강도 콘크리트 부재의 가열 실험 후 모습이다. 그림에서 알 수 있듯이 둘 사이의 가장 큰 차이는 폭렬현상(spalling)의 유무이다. 고강도 콘크리트는 여러 복잡한 요인들에 영향을 받아 폭렬 현상이 일어나게 되는데 추정할 수 있는 요인으로는 온도 증가율, 물재의 광물 성분, 열에 의한 응력, 콘크리트 밀도, 콘크리트 내 수분 함량의 차이를 들 수 있다. 폭렬현상에 관한 정확한 기구는 아직 규명되지 않았으나 고강도 콘크리트의 폭렬 현상에 직접적인 영향을 주는 두 가지 요소는 급속한 온도 증가로 인한 열응력 발생(thermal shock)과 콘크리트 내부 공극에서 높은 증기 압력을 유발하는 수증기에 의한 것이다. 이러한 현상에 고강도가 일반 강도보다 더 민감하게 반응하여 일어나는 것이며 이로 인해 고강도 콘크리트가 고온에 노출되었을 때 일반 강도 콘크리트 부재보다 더 취약한 거동을 한다.

(2) 온도-시간 곡선 분석

일반 강도 콘크리트 부재의 경우 파괴 시까지 가열하여 피복

40 mm와 피복 50 mm의 거동을 실험한 결과, 피복 두께 40 mm의 경우 151분, 피복두께의 50 mm의 경우에는 225분이 소요된 반면, 고강도 콘크리트의 경우 피복 두께 40 mm의 경우 144분, 피복두께의 50 mm의 경우에는 151분이 소요되었다. 여기서, 파괴의 판정은 국제 규준인 ISO 733 기준에 따라 처짐이 $L^2/400d$ 를 초과하는 경우로 하였다. 피복 두께 40 mm의 경우 일반 강도와 고 강도 콘크리트 부재의 파괴시간 차이가 크게 나지 않는 반면 피복 50 mm 경우는 약 70분 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 이는 폭렬현상으로 인해 피복이 터져나가게 되면서, 일반 강도 콘크리트 부재에서와 같이 피복 50 mm 보다 피복 40 mm 보에 비해 고강도 콘크리트 보에서는 화재에 유리하게 작용하지 않았다.

〈그림 8〉은 피복 50 mm, 파괴된(failure) 계열 실험체 보 내부 콘크리트 하부의 온도 분포를 〈그림 9〉는 보 상부 온도 분포이다. 일반 강도 및 고강도 콘크리트 보에서 내부온도가 100°C 정도 되는 곳에서 온도의 증가세가 멈추게 되는데 이것은 콘크리트 내부에 물이 고온의 영향을 받아 수증기로 변하고 있는 구간이다. 일반 강도 및 고강도 콘크리트의 각각 물-시멘트비는 51.2 %, 31.0 %로 일반강도가 더 큰 것으로 나타나지만 단위 수량은 고강도 콘크리트가 많다. 그러나 실제 유리수의 양은 일반 강도 콘크리트가 고강도 콘크리트보다 더 많이 포함하고 있어 일반 강도 콘크리트 보의 이 구간이 고강도 콘크리트보다 긴 것이다.

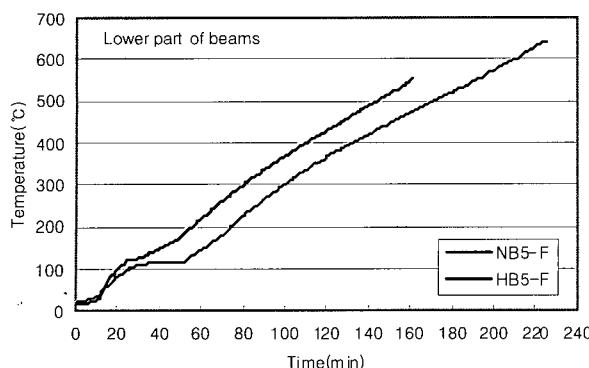


그림 8. 온도-시간 곡선 (보 하부)

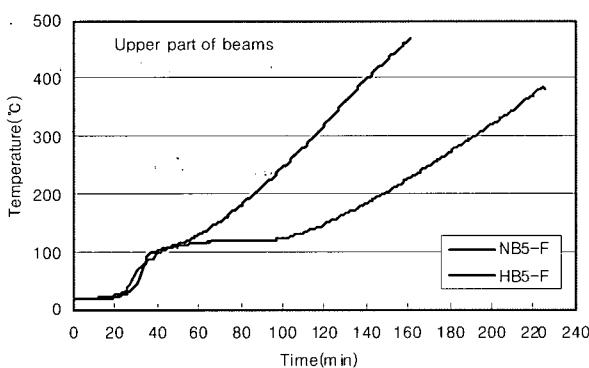


그림 9. 온도-시간 곡선 (보 상부)

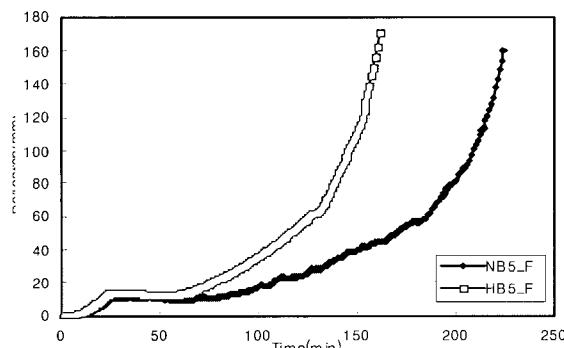


그림 10. 처짐-시간 곡선

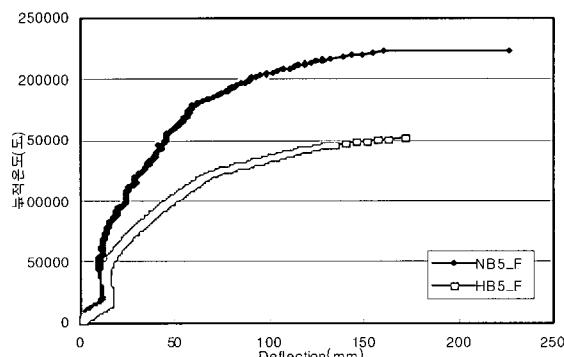


그림 11. 누적온도-처짐 곡선

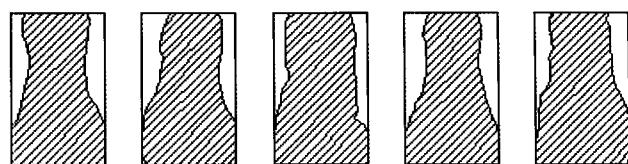


그림 12. 가열 후 폭렬이 일어난 실험체의 단면 형상

<그림 8>의 온도 곡선에서는 일반강도 콘크리트가 고강도 콘크리트에 비해 100°C에서 머무르는 시간이 조금 긴 것 외에는 온도 증가율은 거의 비슷한 경향을 보인다고 볼 수 있다. 그러나 <그림 9>의 경우 초반 50~60분경까지는 유사한 경향을 보이지만 60분 이후에는 온도 증가율이 확연한 차이를 보인다. 이는 고강도 콘크리트 부재 옆면의 폭렬현상으로 보 옆면 방향으로 많은 열이 작용하여 발생하는 현상이다. 수분량의 차이와 폭렬로 인한 콘크리트 단면 손실로 일반 강도 콘크리트 보에 비하여 고강도 콘크리트 보의 내부온도가 더 올라가는 것으로 추정된다.

(3) 처짐-시간 곡선

<그림 10>은 일반강도와 고강도 콘크리트의 처짐-시간 곡선을 비교한 것이다. 가열 초반 50~60분 사이에는 두 실험체가 유사한 거동을 보이다가 60분 이후에는 고강도 콘크리트의 처짐 증가율이 일반 강도 콘크리트의 처짐 증가율보다 많이 커진다. 이는 고강도 콘크리트의 경우 초반 60분 동안 폭렬현상이 일어나면서 단면이 손실되어 단면 이차 모멘트 I 값이 감소하고 화해를 입는 면이 넓어지면서 탄성 계수 E값도 일반 강도 콘크리트에 비해 감소하게 됨으로써 고강도 부재 내력이 감소하여 처짐 증가율이 증가한다. <그림 11>의 누적온도-처짐 곡선에서도 150 mm의 처짐이 발생 시 일반 강도의 경우 누적온도는 약 22,000 °C, 고강도의 경우 약 15,000 °C이다. 내구성 측면에서도 화재에 노출될 시 고강도 콘크리트가 일반 강도 콘크리트에 비해 취약한 것을 볼 수 있다.

<그림 12>는 고강도 콘크리트 보를 2시간동안 가열하였을 때 폭렬에 의한 단면손실을 나타낸 것이며, 중앙부의 단면손실률은 18~26 %로 나타났다.

2.4.3 압축 부재 실험 계획

(1) 시험체 상세

일반강도와 고강도 철근 콘크리트 기둥 시험체에 대해 각각 재하중의 크기, 가열시간, 피복두께, 편심의 유무를 변수로 시험체가 제작 되었다(<표 2>). 기둥의 크기는 350 mm × 350 mm × 3,360 mm이며, 화재 실험을 위해 6개월간 양생하였다.

(2) 가열 실험

화재실험을 위한 시험체는 국제 규준인 ISO 834 기준을 따

표 2. 시험체 상세

시험체 명	화재시간 (min)	하중(tonf)	강도 (MPa)	피복 (mm)
		축하중(tf)	편심(mm)	
NC4CP-T	-	-	-	
NC4EP-T	-	-	35	
NC4CS-1	60	38	0	
NC4CL-1	60	65	0	21
NC4EL-1	60	65	35	
NC4CS-2	120	38	0	(Normal Strength)
NC4CL-2	120	65	0	
NC4EL-2	120	65	35	
NC5CL-2	120	65	0	
HC4CP-T	-	-	-	
HC4EP-T	-	-	35	
HC4CS-1	30	38	0	
HC4CL-1	30	65	0	55
HC4EL-1	30	65	35	
HC4CS-2	60	38	0	(High Strength)
HC4CL-2	60	65	0	
HC4EL-2	60	65	35	
HC5CL-1	30	65	0	40
				50

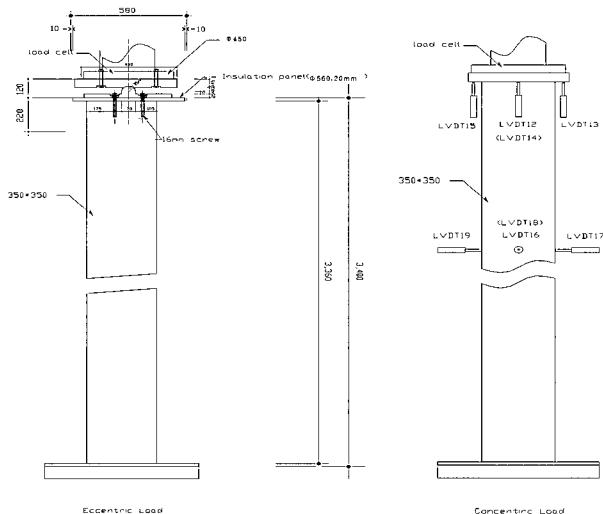


그림 13. 시험체 상세



그림 14. 가열 실험 후 기둥의 형상(일반 강도)

그림 15. 가열 실험 후 기둥의 형상(고 강도)

라 각 실험체 별로 30분, 60분, 120분 동안 가열하였다. 기둥의 양단은 힌지로 고정하였고, 편심이 있는 경우 가열로의 가력판의 중심축선과 편심거리만큼 기둥을 빗대어 설치하여 편심이 가하여지도록 하였다.

(3) 잔존 강도 실험

잔존강도 실험은 화재실험 후 자연대기 상태에서 2개월간 방치 후, 각 변수에 따른 시험체에 대해 수행하였다. 기둥 길이의 중간부분 4면에 콘크리트 계이지를 부착시켰고, 철근 계이지는 노출된 기둥의 중앙부분에 부착하였다. 또한 실험체의 변위를 측정하고자 LVDT 100 mm를 중앙부분 및 상부에 설치하였다.

2.4.4 압축 부재 실험 결과 및 분석

(1) 폭렬 현상

〈그림 14〉와 〈그림 15〉는 일반 강도와 고강도 콘크리트 부재의 가열 실험 후 모습이다. 앞의 흡 부재의 경우와 마찬가지로 고강도 콘크리트의 폭렬현상이 눈에 크게 띈다. 압축부재의 경우, 폭렬로 인한 단면손실과 띠철근 및 주철근의 노출로 인해 주근이 국부적으로 좌굴되어 전체적으로 좌굴되는 경향을 보인다. 이는 구조적인 성능 면에서 기능을 상실할 정도 심각하다.

고강도 콘크리트의 경우, 모든 실험체가 폭렬로 인하여 피복 콘크리트의 박리 및 탈락이 관찰되었다. 일반강도 콘크리트 기둥에서 폭렬이 9분에서 20분 사이에 몇 차례 발생 및 폭렬의 규모가 작은 반면, 고강도 콘크리트 기둥에서는 47분 이상의 시간까지 빠른 속도로 연속된 폭렬이 일어났으며, 전체적인 면에서도 심각한 손상이 관찰되었다. 또한 보통콘크리트 기둥에서 띠철근의 노출이 적었던 반면에 고강도 콘크리트 기둥에서는 폭렬의 정도가 피복두께 전체 및 콘크리트 심부까지 영향을 미쳐 모든 기둥에서 띠철근 및 주근이 노출되는 현상을 나타내었다. 이후 더 이상의 폭렬은 관찰되지 않았다. 폭렬은 하중의 형태나 크기, 피복두께와 무관하여 가열시간에 따라 발생함이 관찰되었다.

(2) 온도-시간 곡선 분석

〈그림 16〉은 피복 40 mm, 파괴된 계열 실험체 기둥 내부 콘크리트의 피복 부분의 온도 분포를, 〈그림 17〉은 내부 중심에서 온도 분포를 측정한 것이다. 고강도 콘크리트의 경우, 가열 20분 후 초기 폭렬로 인해 피복부분의 콘크리트가 떨어져 나감에 따라 급속히 온도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이후 30분 동안 계속되는 폭렬로 인해 피복콘크리트가 모두 탈락되어 60분 이후부터 일반강도 콘크리트와 비슷하던 단면 중심 부분의 온도가 150분경 300 °C까지 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 따라서 화재시간이 1시간이상 경과한 후의 고강도 철근 콘크리트 기둥의 경우, 상당한 내력저하가 예측된다.

(3) 변위-시간 곡선

일반강도 콘크리트 압축부재 피복 40 mm이 경우, 210분이 지나면 내화력이 상실되는 것으로 판정된다. 고강도 콘크리트의 피복 40 mm 실험체의 경우 168분, 피복 50 mm의 경우, 133분이 소요되었다. 이는 ISO 내화기준의 기둥 길이 수축률 $3 \times h / 1,000 \text{ mm/min}$ 을 초과하는 경우를 내화력을 상실한다고 판정하였다.

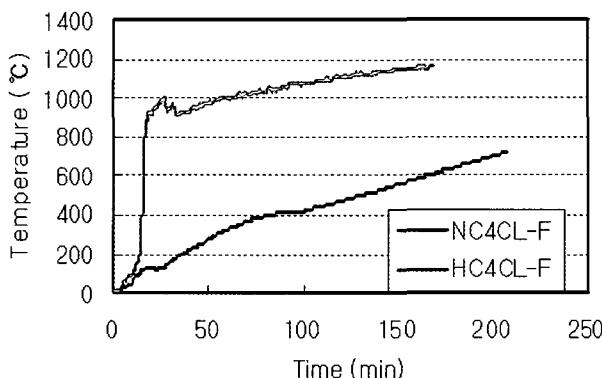


그림 16. 온도-시간 곡선 (기둥 피복 부분)

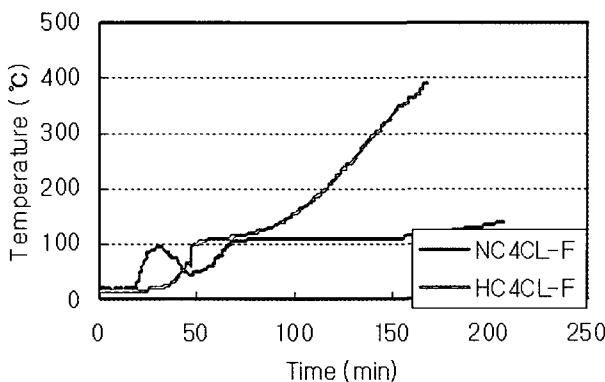


그림 17. 온도-시간 곡선 (기둥 중심 부분)

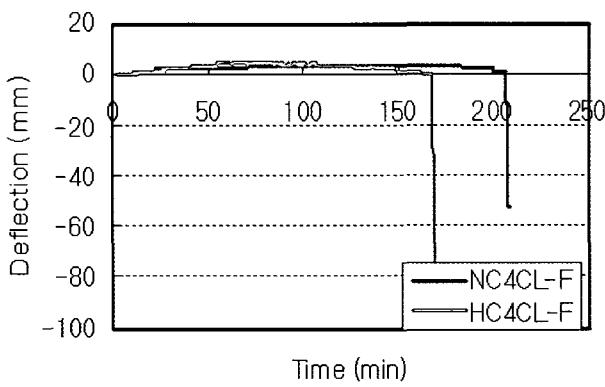


그림 18. 변위-시간 곡선

3. 폭렬 저감 방안

고강도 콘크리트가 고온에 노출되었을 경우 폭렬을 저감시키기 위한 방법으로는 내화 도료나 내화 피복을 이용하여 콘크리트의 급격한 온도 상승을 억제시키거나, 폭렬 저감재료를 혼입하여 콘크리트 내부의 수증기압이 발생하지 않도록 빠른 시간 내에 수증기의 이동을 가능하게 하는 방법 등이 있다. 이때 사용하는 폭렬 저감재료로는 내열성이 작은 폴리프로필렌 섬유 등이 사용되는데, 이는 화재시 섬유가 녹아 그 자리에 생기는 빈 공간을 통하여 내부의 높은 수증기압을 제거하는 원리를 이용한 것으로 보다 다양한 재료를 혼입한 고강도 콘크리트의 구조적 성능 및 화재 후 거동에 대한 연구가 필요하다.

4. 맷음말

최근 들어 RC 구조물의 초고층화, 장스팬화를 가능하게 하기 위해 고강도 재료의 활용이 활발해 지면서 50 MPa 정도의 고강도 콘크리트는 상용화되고 있는 실정이다. 대부분 초고층 건물의 용도가 주거용건물인 만큼 화재에 대한 대책 마련은 간과할 수 없는 부분이다. 이에 고강도 콘크리트의 화재 시 특성 중 구조물의 내구력저하에 큰 요인이 되는 폭렬현상에 대해 초점을 맞추어 볼 필요가 있다. 고강도 콘크리트의 폭렬현상에 대한 정확한 메카니즘과 폭렬저감 방안에 대한 연구가 요구되고 있는 실정이다. 또한 건축물에 고강도 콘크리트의 사용을 활성화 하기 위해서는 이에 대한 고려가 반드시 이루어져야 할 것이다. □

참고문헌

1. 이소진, “화재 피해를 입은 일반강도 철근콘크리트 휨부재의 구조 성능에 관한 연구”, 이화여자대학교 석사학위 논문, 2002.
2. 신미경, “화재 피해를 입은 고강도 철근콘크리트 휨부재의 구조 성능에 관한 연구”, 이화여자대학교 석사학위 논문, 2003.
3. 이승환, 이차돈, 신영수, 홍성걸, “고강도 철근콘크리트 기둥의 화재거동”, 대한건축학회 추계 학술발표대회, 제23권 제2호, 2003. 10, pp.23~26.
4. T. Z. Harmathy, “Fire Safety Design and Concrete, Longman Scientific & Technical,” 1993.
5. T. T. Lie, R.J. Irwin, “Method to Calculate the Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns with Rectangular Cross Section,” ACI Structural Journal, Vol.90, No.1, 1993.