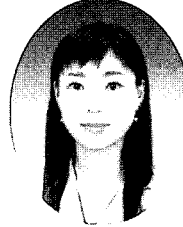


# 화재시 고강도 RC의 폭발현상

- Spalling of High-strength Reinforced Concrete under High Temperature -



신영수\*  
Shin, Yeong Soo



최은규\*\*  
Choi, Eun Gyu



이차돈\*\*\*  
Lee, Cha Don

## 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%로서 절반 이상이 건축물에서 발생하며, 그 중에서도 주택, 아파트 및 공장, 작업장의 화재건수가 75%에 달한다. 각종 건축 구조물이 고층화, 다양화, 대형화됨에 따라 화재 발생요인 또한 날로 증대하고 있으며, 손상된 건물의 관리가 중요한 문제로 대두되고 있다. 건축물에 보편적으로 사용되고 있는 철근 콘크리트 구조는 가장 실용적이며 내화적인 동시에 내구적인 것으로 평가되어져 왔으며, 최근 들어 구조물의 고층화로 인해 고강도 콘크리트의 사용 또한 점차 일반화 되어 가고 있는 추세이다. 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. 그러나 고강도 콘크리트의 경우에 있어서 화재피해에 의한 손상정도에 따라 구조물의 사용성, 내구성, 안전성에 큰 영향을 미치게 되므로, 이를 정확하게 평가하는 것은 매우 중요하다. 특히 고강도 콘크리트는 화재에 노출되는 시간, 내부수량, 온도 등에 따라 피복이 탈락하는 폭발현상이 발생하여 구조적 문제를 야기시킬 수 있다.

일반적으로 내화성능을 검토하고 설계하는데 피복의 두께를

규정하고 있으며, 국내에서도 단순히 내화 피복두께를 5cm로 규정하고 있으나, 선진 외국의 경우에는 화재에 노출된 부재의 일람 및 단부 구속조건, 내화시간에 따라 피복두께를 달리 지정하고 있다. 우리나라의 방법은 내화성을 검토하는데 가장 쉽게 접근할 수 있는 방법이기도 하나, 개개의 특수한 편차를 고려하기에는 적절하지 않다. 특히 고온에서의 고강도 콘크리트는 성질변화로 인한 구조성능 저하와 폭발로 인한 크기의 감소로 인해 구조물의 안전성에 심각한 문제를 야기할 수 있다. 특히 압축재의 폭발현상은 철근의 좌굴, 하중 지지능력 저하, 단면의 감소 등으로 인해 부재자체에서 좌굴이 발생 할 수 있으므로 구조물의 안전성에도 문제가 발생 할 수 있다. 본고에서는 고강도 콘크리트의 폭발현상에 대해 논하기로 한다.

## 2. 고온에서 고강도 RC의 폭발현상

### 2.1 폭발의 원인

폭발은 많은 요인들에 의해 일어난다. 그 요인들로는 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 폭발 현상이나 부분적인 박리현상 등은 구조물에 크게 영향을 주지 않지만, 폭발적인 폭발의 경우는 구조물에 매우 심각한 문제를 일으키며, 이것은 화재 초기 시 부재의 완전한 붕괴를 초래할 수 있다.

\* 정희원, 이화여자대학교 건축학과 교수

\*\* 정희원, 이화여자대학교 건축학과 박사과정 수료

\*\*\* 정희원, 중앙대학교 건축공학과 교수

## 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 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.

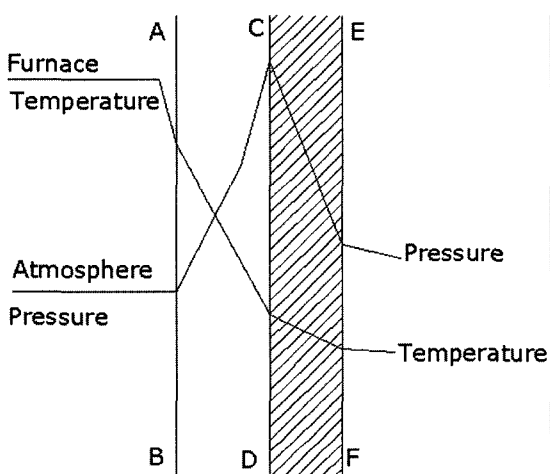


그림 1. 포화층 형성

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.

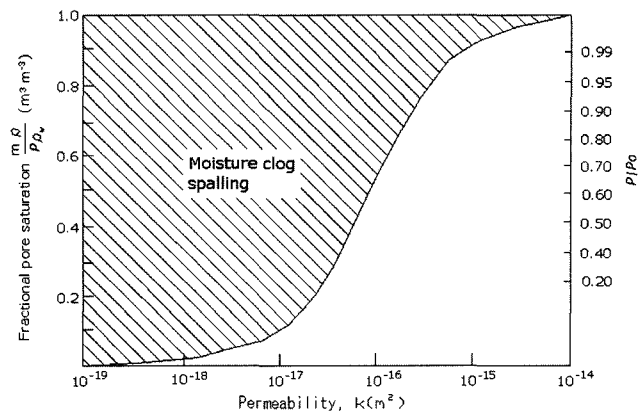


그림 2. 포화도와 투수성에 대한 콘크리트의 폭렬성

Copier(1979)는 오래된 콘크리트 건물의 경우에는 화재 시 폭렬현상이 일어나지 않는다고 말했다. 그러나 실제로는 오래된 콘크리트 부재에서 그 부재의 물-시멘트비가 낮아졌더라도 그 구조물은 화재 시 폭발적인 폭렬현상이 일어날 위험이 높다. 이는 시간이 흐르면서 모세 공극이 분열되면서 콘크리트의 유효 공극 크기가 감소로 투수성이 감소된다. 시간이 흐르면서 수분양이 감소된다고 하더라도 투수성이 감소하므로 공극내의 포화도가 상대적으로 높아지면서 폭렬의 위험성이 높아지게 된다.

폭렬 현상에서는 투수성이 중요한 변수로 작용하므로 이에 대해 살펴보면, 콘크리트의 내부에서 포화도가 높은 모세 공극은 상호 연결된 네트워크를 형성하게 되는데, 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. 공극률과 투수성은 비례관계를 갖는데, 같은 공기량을 가진 콘크리트라면 물-시멘트비가 클수록 공극률도 커지기 때문에 투수성 또한 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 온도 분포는 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 차이가 없다 할지라도 일정시간 이후 고강도 콘크리트에서 폭렬이 진행되고 난 후

에는 고강도 콘크리트의 처짐 증가율이 일반강도 콘크리트의 처짐 증가율보다 많이 커지게 된다. 이는 고강도 콘크리트의 경우 폭발현상이 일어나면서 단면이 손실되어 단면이차모멘트(I)가 감소하고 화해를 입는 면이 넓어지면서 탄성계수(E)도 일반강도 콘크리트에 비해 크게 감소하게 됨으로써 부재의 강성이 저하되게 되고, 부재 내력이 감소하여 처짐이 증가한다. 이러한 현상은 휨 부재에는 물론 압축부재에 심각한 구조적 영향을 미쳐 구조체 전체의 안정성이 문제가 된다. 그러므로 고강도 콘크리트를 사용할 경우 화재시 폭발현상에 대한 충분한 고려와 이에 의한 정확한 구조적 거동 파악 및 폭발저감 방안에 관한 구체적 연구가 요구된다.

### 2.4 고강도 RC 부재의 화재실험

본 실험실에서 고강도 콘크리트(50 MPa) 부재에 대한 화재실험을 실시한 결과 보 부재(25 cm×40 cm×500 cm)에서 폭발적인 폭발현상이 관찰되었다. 이러한 현상은 기둥에서도 동일하게 발생하였다. 비록 모든 실험에서 관찰되지는 않았지만 폭발 현상은 일반강도에서는 잘 나타나지 않는 고강도 콘크리트의 주요 특성이라고 할 수 있다.

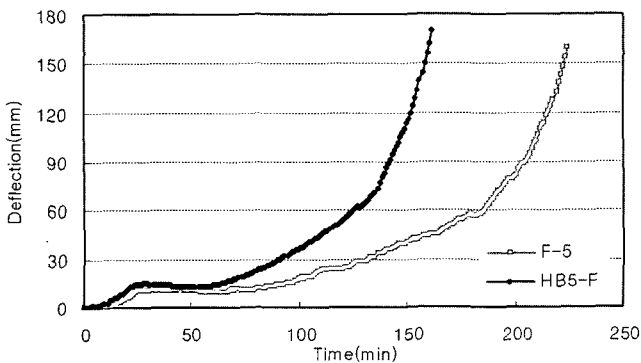


그림 3. 일반강도(F-5)와 고강도 콘크리트(HB5-F)의 처짐-시간 곡선

〈그림 3〉는 일반강도와 고강도 콘크리트의 처짐-시간 곡선을 비교한 것이다. 가열초반에는 유사한 거동을 보이다가 60분 이후에는 고강도 콘크리트의 처짐 증가율이 일반강도 콘크리트의 처짐 증가율보다 많이 커졌다. 〈그림 4〉는 고강도 콘크리트 보를 2시간동안 가열하였을 때 폭발에 의한 단면손실을 나타낸 것이며, 중앙부의 단면손실률은 18~26%로 나타났다. 〈사진 1〉은 화재에 의해 폭발현상이 일어난 보의 형상이다.

### 3. 폭발 저감 방안

고강도 콘크리트가 고온에 노출되었을 경우 폭발을 저감시키기

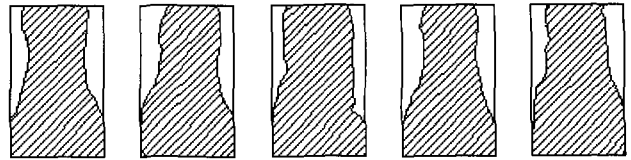


그림 4. 가열 후 폭발이 일어난 실험체의 단면 형상

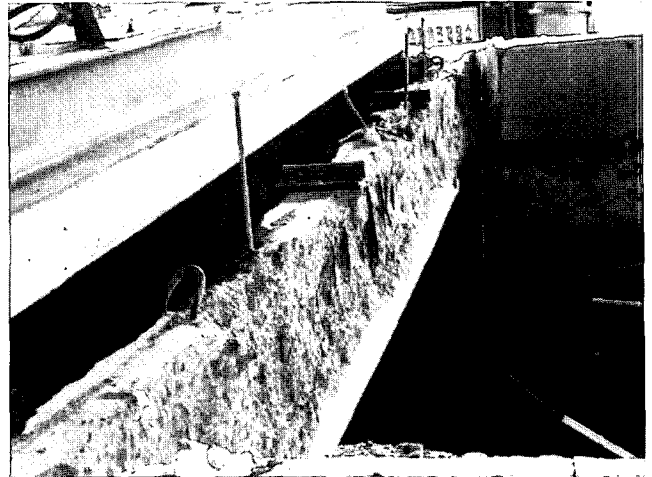


사진 1. 가열 후 폭발현상이 일어난 실험체의 형상

위한 방법으로는 내화 도료나 내화 피복을 이용하여 콘크리트의 급격한 온도 상승을 억제시키거나, 폭발 저감재료를 혼입하여 콘크리트 내부의 수증기압이 발생하지 않도록 빠른 시간 내에 수증기의 이동을 가능하게 하는 방법 등이 있다. 이때 사용하는 폭발 저감 재료로는 내열성이 작은 폴리프로필렌 섬유 등이 사용되는데, 이는 화재 시 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. 맺음말

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