

## 화재시 고강도 콘크리트의 폭열현상에 관한 고찰 A Review on Spalling Phenomenon of High Strength Concrete during a Fire Accident

김형두<sup>†</sup>

Hyung-Doo Kim<sup>†</sup>

신한은행 BPR 추진부  
(2006. 4. 10. 접수/2006. 6. 13. 채택)

### 요약

본 고찰은 화재시 고강도 콘크리트의 주요 이슈 중의 하나인 폭열 현상에 초점을 맞추어 폭열의 정의, 분류 및 각각의 특징, 발생원인과 그 반응기구에 대하여 선행연구를 중심으로 분석하였다. 폭열은 급격한 온도 상승, 높은 수분 함유량, 낮은 물시멘트비(W/C), 콘크리트 내에 국부적인 높은 응력 발생 등과 같은 요인이 복합적으로 작용하여 발생한다. 이러한 요인을 토대로 폭열을 방지하기 위한 방법으로 크게 콘크리트의 온도 상승을 억제하는 방법, 콘크리트의 비산을 억제하는 방법, 그리고 빠르게 내부 수분을 건조시키는 방법 등을 들 수 있다. 본 고찰에서는 이러한 방법 가운데 가장 효율적인 폭열 방지 방안으로서 콘크리트 내부의 수분을 빠르게 건조시킴으로써 폭열에 이르게 하는 함수율 이하로 낮추어서 콘크리트 자체의 내폭열성을 높이는 방안을 고찰하였다. 실제 강제건조를 통해 함수율을 어떤 임계치(critical value) 이하로 낮추게 되면 폭열을 방지할 수 있으며 이를 위해서는 수동적인 자연건조 외에 강제건조 등으로 함수율을 낮출 필요가 있을 것이다. 이러한 임계치 결정을 위해 추가적인 많은 실험 및 자료가 도출되어야 할 것이다.

### ABSTRACT

This study focuses on spalling phenomenon which is the one of the main issues of high strength concrete. The definition, classification and characterization, causes and the reaction mechanism of the spalling were investigated on the basis of previous literatures. The spalling phenomenon occurs when several factors such as sharp temperature increase, high water content, low water/cement ratio and local stress concentration in material combine in the concrete material. On the basis of the factors, the preventing methods from the spalling are known as decrease of temperature increase, preventing of concrete fragmentation and fast drying of internal moisture. In this study, the controlling method of water content below some critical value was proposed as the most effective spalling-preventing method among the spalling-preventing methods. The spalling phenomenon can be prevented by adjusting the water content in the high strength concrete. Therefore, an enforced drying method is needed to decrease the water content below a critical value. Additional experimental data should be generated to determine the critical value of water content for preventing the spalling.

**Keywords :** Spalling phenomenon, Stress concentration, High strength concrete, Water content, Critical value

### 1. 서론

전체 화재 중 건축물이 차지하는 비율은 52.4%로서 화재건수의 절반 이상이 건축물에서 발생하며, 건축물 화재 중에서도 주택, 아파트 및 공장, 작업장의 화재건

수가 75%에 달해 대부분의 화재는 주거시설 및 공장에서 발생하는 것으로 나타났다. 특히 각종 건축구조물의 고층화, 다양화, 대형화되어가는 추세에 따라 화재 발생요인은 날로 증대하고 있다.

이러한 구조물에 대형 화재가 빈번하게 발생하여 재산 및 인명피해는 물론 구조물의 손상으로 이어져 사회문제로 대두되고 있는 실정이다. 철근콘크리트용 재

<sup>†</sup>E-mail: kh4064@hanmail.net

료로 시공된 교량, 고가교, 도로 및 철도용 터널 등과 같은 토목 구조물과 아파트, 빌딩, 오피스텔 등과 같은 건축구조물에 화재가 발생하게 되면 1,000°C 정도의 높은 열에 노출되는 경우가 종종 있다. 그러므로 토목 및 건축용 철근콘크리트 구조물에 화재가 발생하게 되면 일시적으로 고온을 받게 되므로 고온에 노출된 철근콘크리트는 강도 및 탄성계수뿐만 아니라 구조물의 역학적 성질은 물론 내구성능이 저하하여 그 성능을 회복할 수 없는 상황에 이르게 된다.

우리나라에서 보편화되어있는 철근콘크리트 구조는 가장 실용적이며 내화적인 동시에 내구적인 것으로 그 성능이 평가되어져 왔다. 일반적으로 콘크리트는 다른 구조재료에 비해서 열전도율, 열확산계수가 현저히 낮고, 고온에서 완전붕괴에 도달하기까지의 에너지 소산 능력이 우수하기 때문에 화재 등과 같은 비상상황에서 건물사용자에게 충분한 대피시간을 확보하게 해주기 때문이다.

이처럼, 일반적으로 콘크리트는 내열, 내화재료로 평가되며 보편적으로 사용되고 있으나, 선행 연구들에서 밝혀진 바에 따르면, 콘크리트는 온도가 상승함에 따라 탄성계수와 압축강도 등의 성능이 급격히 저하된다. 가열되면서, 재료의 변화 및 열응력이 발생되어 그 내부가 국부적으로 손상되며 콘크리트의 역학적 성질이 변화하게 되는 것이다.

특히 고강도 콘크리트는 최근 들어 많이 쓰이게 된 재료로서 부재 크기의 축소를 가능하게 해 고층 구조에 유리하고 새로운 건축공간을 만들 수 있는 등 여러 가지 면에서 보통 콘크리트보다 큰 이점을 가지고 있어 현대 구조물의 고층화, 다양화, 대형화 추세에 부합되어 많이 사용되고 있다. 그런데 고강도 콘크리트는 화재시 일반강도 콘크리트에 비해 폭열(spalling) 현상이 매우 심한 것으로 나타났다. 높은 수분함유량, 낮은 투수성, 콘크리트 부재 내에 국부적으로 높은 응력 발생시, 시멘트 페이스트와 골재, 콘크리트와 철근과의 열팽창 차이로 인한 응력발생, 높은 온도에서 콘크리트의 일반적인 구조성능 저하 등이 복합적 요인으로 작용하여 발생하는 것이다.

이에 본 연구에서는 화재시 고온노출에 따른 고강도 콘크리트에서 안전상의 주요 이슈가 되고 있는 폭열현상에 대하여 각종 학위논문과, 국내외 학술지 논문을 통해 이론적으로 검토 및 고찰해보고자 한다.

## 2. 화재시 콘크리트 구조물의 재료특성

철근 및 콘크리트는 현재 사용되고 있는 골조구조

재료 중에서 가장 내구성이 풍부한 재료에 속한다. 화재 시와 같이 1000°C 정도의 고온에 일시적으로 노출되는 경우의 성질을 내화성(耐火性)이라 하며, 공업용으로 또는 원자력용기 등과 같이 연속하여 고온에 노출되는 경우의 성질을 내열성(耐熱性)이라 한다. 한편, 콘크리트가 열에 노출될 경우 시멘트의 종류, 골재의 압질, 배합, 함수율 등이 재령에 따라 콘크리트의 재료특성이 달라지며, 화재를 받은 콘크리트의 수열조건에 따라 매우 복잡한 양상을 띠게 된다고 알려져 있다.<sup>1)</sup>

따라서 열에 노출된 콘크리트의 압축강도, 인장강도, 부착강도 탄성계수 및 고강도 콘크리트에 특히 취약한 폭열에 대해 우선 고찰하고자 한다.

### 2.1 압축강도

콘크리트는 압축강도에 저항하는 구조재료로 이용되므로, 각종 강도 특성 중에서도 고온에 가열된 콘크리트 압축강도의 변화는 매우 큰 관심을 갖는다. 또, 콘크리트의 압축강도는 다른 강도나 탄성계수와 상관성이 높고 콘크리트의 역학적 성질을 나타내는 종합적인 지표로서 활용되고 있다.<sup>2)</sup> 고온에 노출된 콘크리트의 압축강도는 콘크리트 배합과 재료의 성질, 특히 골재의 성질에 의해서 크게 다르기 때문에 간단하게는 서술할 수 없지만, 일반적인 경향은 다음과 같다.

온도가 100°C 정도까지는 상온의 경우에 비하여 그다지 변화가 없지만, 200°C를 초과하면 강도의 저하가 현저하게 되고, 온도가 500°C 정도가 되면 강도는 상온의 경우의 1/2정도까지 저하되는 경우가 있다.<sup>3)</sup>

### 2.2 인장강도

철근 콘크리트 부재에서는 콘크리트의 인장강도를 무시해서 설계되므로 구조설계상 콘크리트의 인장강도가 문제가 되는 일은 드물다. 그러나 구조물에 따라서는 기능유지 및 내구성의 관점에서 균열의 발생이 문제가 되는 경우도 있고, 부재에 작용하는 열응력이나 고온 가열로 생기는 변형에 대한 평가와 더불어 인장강도의 평가도 중요하다. 인장강도는 압축강도에 비해 공시체 내부의 잠재적인 결함에 민감하므로,<sup>4)</sup> 가열에 의한 영향을 보다 쉽게 받게 된다.

### 2.3 부착강도

부착강도는 가열 온도에 따라서 달라지며, 가열에 의한 콘크리트와 철근의 열팽창계수의 차이에 의해 부착의 일부가 파괴된다.<sup>5)</sup> 특히 적은 슬립량에서도 부착강도는 저하된다. 또 이형철근을 사용해서 부착 실

험을 실시하면 슬립량은 커지지만 종국부착강도에는 큰 변화가 없다. 또한 콘크리트가 고온 가열되면 시멘트 페이스트 부분과 골재와의 부착력에도 큰 영향을 받게 된다.

#### 2.4 탄성계수

콘크리트가 가열되면 골재와 시멘트 페이스트 간의 열팽창률의 차에 의한 조직이완이나 수분의 이동 증발에 기인한 물리적 및 화학적 변화가 일어나므로 탄성계수의 저하가 생긴다. 이 때문에 인장강도와 같이 탄성계수는 고온가열의 영향을 쉽게 받는다. 고온에 놓인 콘크리트의 탄성계수와 압축강도는 같이 온도가 높게 됨에 따라 저하량이 커지게 된다. 그러나 탄성계수의 저하비율은 압축강도의 경우보다 크고, 400°C의 온도에서는 상온 값의 약 30%(70% 감소), 500°C에서는 20%(80% 감소)까지 저하된다.<sup>6)</sup>

#### 2.5 폭열

콘크리트는 화재와 같은 고열을 받게 되면, 부재의 표면이 부분적으로 파편이 떨어지게 된다. 폭열은 콘크리트의 열전도율과 함수율이 클 경우, 급격한 고열에 의해서 나타나는 현상이다. 또한 폭열은 내부수분의 증기압, 열응력, 골재의 광물특성, 시멘트의 밀실성, 가열 온도 및 가열 속도, 콘크리트의 재령 등 여러 요인이 복합적으로 영향을 미친다. 이러한 폭열현상은 보통 콘크리트 보다는 주로 고강도 콘크리트에서 발생하는 비율이 높다. 따라서 폭열현상은 고강도 콘크리트의 화재시 매우 중요한 고온 특성이라 할 수 있다.

건축공사 표준시방서 1986년판에는 고강도 콘크리트 정의를 270~360 kgf/cm<sup>2</sup> 이하로 하고 있으나 1994년판에는 이를 300 kgf/cm<sup>2</sup> 이상으로 개정하였다. 그리고

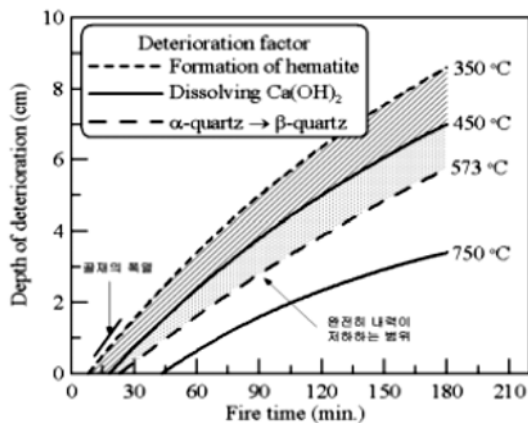


Fig. 1. Correlation of depth of deterioration with fire time.

1999년 개정된 콘크리트 표준시방서에서는 400 kgf/cm<sup>2</sup> 이상을 고강도 콘크리트 정의하고 있다.<sup>7)</sup>

폭열 현상의 특성에 대해서는 다음 장에서 자세하게 고찰해보도록 한다.

한편, 석영질 골재를 사용한 콘크리트의 가열온도와 화재피해 정도를 조사한 연구결과를 Fig. 1에 나타내었다.<sup>8)</sup> 이 그림 가운데 350, 450, 573°C의 경계선은 각종 갈철광→적철광변환, Ca(OH)<sub>2</sub>의 분해, α석영→β석영 변환의 온도경계선을 나타내고 350°C의 등온선과 0.5~1.5 cm 층선과의 교선은 적철광 변환에 의해 일어나는 골재의 폭열의 범위를 나타내고 있다.

최근, 콘크리트의 내화성능에 관해서는 고온시의 재료특성, 열전도 해석에 의한 단면내의 온도예측 등의 연구가 많이 행해져 왔으며, 그 결과 고강도 콘크리트 구조는 일정 피복두께가 있으면 내화 구조로 인식되어 왔다. 그러나 고강도·고성능 콘크리트는 고온시 재료특성이 일반 강도의 보통 콘크리트와 다르고, 특히 조직이 치밀하기 때문에 화재시 폭열 발생이 용이한 것으로 알려지고 있다. 특히, 건축물이 고층화, 대형화됨에 따라 고강도를 갖는 고성능 콘크리트가 실제 건축물에도 사용되고 있어 화재시 발생하는 폭열 현상은 현대 개념의 고품질·고성능 콘크리트에서는 반드시 검토하고, 내화구조상 해결해야만 하는 문제점으로 지적되고 있다.

### 3. 폭열(spalling) 현상의 특성

#### 3.1 폭열의 정의

폭열이란 화재시 갑작스런 고온에 의해 콘크리트 구조체의 부재표면이 심한 폭음과 함께 박리·탈락하는 현상을 말한다. 이러한 폭열현상은 피복 콘크리트가 결손됨으로써 구조체 내부까지 고온이 전달되고, 또한 철근이 노출되어 고온을 받게 되면 철근의 강도저하로 구조부재는 치명적인 내력 저하를 초래하여 결국에는 붕괴를 일으킬 수 있는 원인이 되기도 한다.

콘크리트의 폭열은 고강도, 고내구적인 고성능 콘크리트일수록 내부 조직이 치밀하여 발생하기 쉬운 것으로 알려지고 있지만, 아직까지 명확한 폭열의 메카니즘(mechanism)은 밝혀지지 않고 있다.

#### 3.2 폭열의 구분

폭열은 일반적으로 구조부재의 압축영역에서 발생하고, 콘크리트의 내화성과는 다른 특성을 나타내고 있는데, 이러한 폭열의 종류 및 특징을 세분화하면 Table 1과 같이 구분할 수 있다.

**Table 1.** Classification and characteristics of spalling of concrete

폭열의 종류	특징
파괴폭열	부재표면으로부터 여러 개의 큰 파편이 비산하는 폭열
국부폭열	부재 모서리 등에서 콘크리트의 작은 파편이 비산하는 폭열
단면방향의 점진폭열	폭열에 의해 단면이 단계적으로 파괴하는 폭열
박리폭열	부재 표면 부분이 중력에 의해 박리하는 폭열

**3.3 폭열 발생 원인 및 요인**

폭열의 발생요인으로는 콘크리트 내부의 수증기압 상승, 급격한 가열에 의한 비정상적인 열응력의 발생 및 골재 종류 등을 주요 원인으로 보고 있다. 또한, Fig. 2의 폭열 발생 상관도에서 보는 것처럼, 급격한 고온, 낮은 W/C, 높은 함수율 및 단위수량, 골재종류, 혼합재의 종류 등의 복합적인 원인에 의해서 발생하는 것으로 알려지고 있으며 다음과 같은 요인이 영향을 주는 것으로 알려지고 있다.<sup>9,10)</sup>

첫째, 함수율이다. 수분이 없으면 화재시 내부 수증기압이 발생하지 않아 폭열은 일어나지 않으나, 함수율이 증가하면 폭열의 가능성은 높아진다.

둘째, 가열조건을 들 수 있다. 가열속도가 빠르면 폭열은 발생하기 쉬우며, 복수면으로 가열하면 내부압력의 증가와 증기압의 급속한 흐름에 의해 폭열의 가능성은 높아진다.

셋째, 외력하중(압축응력)이다. 폭열은 구조부재의 압축영역에서 발생하는 것으로 압축응력은 폭열의 가능성을 높게 한다.

넷째, 구조부재의 철근 구조부재 모서리에서 철근의 집중은 폭열의 발생을 촉진시킨다.

다섯째, 골재를 들 수 있다. 편마암, 점판암과 같은 골재는 고온에서 국부 폭열이나 점진 폭열을 일으키고, 습윤한 경량 콘크리트도 같은 거동을 보인다.



**Fig. 2.** A schematic of spalling phenomenon condition.

**3.3.1 물 시멘트 비(W/C) 및 단위수량**

배합과 관련하여 W/C가 낮은 경우 강도가 높은 만큼 폭열이 발생하기 쉬우며, 단위 수량과 관련하여 일반적으로 단위수량이 적은 쪽이 폭열을 일으키기 쉬운 것으로 알려지고 있다. 또한, 배합에 따라 골재의 종류 및 양 등이 변하고, 기공의 분포상태가 변화하기 때문에 배합은 폭열에 큰 영향을 미치며, 기공직경이 작게 되면 폭열의 위험성은 높게 된다.

**3.3.2 골재 종류**

고성능 콘크리트는 사용하는 골재의 암질에 따라 내화성과 관련이 있는데, 화성암의 경우로 반심성암 및 분출암계의 안산암, 현무암, 경석 등은 내화성이 우수하고, 심성암계의 화강암 및 수성암계의 석회암은 내화성이 매우 떨어진다. 따라서, 내화성이 우수한 골재를 사용하는 경우는 폭열 피해가 적으며, 내화성에 불리한 골재를 사용하는 경우는 폭열을 일으키기 쉽다.

**3.3.3 시멘트 종류**

시멘트 종류는 강도-온도 특성에 대하여 대부분 영향을 미치지 않으나, 500°C를 초과하면 보통 포틀랜드 시멘트는 내열성이 큰 고로슬래그 시멘트와 비교하여 강도가 급격히 저하한다.<sup>11)</sup> 또한, 고온시 콘크리트에 미치는 시멘트 종류의 영향은 크게 나타나지 않으나, 폭열에 미치는 영향은 내열성이 큰 고로슬래그 시멘트가 보통 포틀랜드 시멘트보다 저항성이 크다.

**3.3.4 혼화제**

혼화제(플라이 애쉬, 고로슬래그, 실리카흄 등)를 사용한 분체계의 고성능 콘크리트는 낮은 물결합재비로 강도가 크고, 조직이 치밀하기 때문에 보통 콘크리트와 비교하여 건조가 어렵고, 수증기압의 배출도 어렵기 때문에 화재시 폭열 발생이 용이한 것으로 알려지고 있다.

**4. 폭열현상 분석**

일반적으로 수분은 내화성능을 높인다고 알려져 있으나 부재 내의 수분은 물의 집결이 폭열(spalling)을 일으키지 않는 수준의 양에서만 내화성능을 높이는데 효과적이다. 즉, 수분량이 너무 높으면 오히려 폭열 현상을 일으켜 내화성능을 저하시킨다. 폭열의 요인에는 높은 수분 함유량, 낮은 투수성, 콘크리트 내에 국부적인 높은 응력 발생, 시멘트 페이스트와 골재, 콘크리트와 철근과의 열팽창 차이로 인한 응력 발생, 고온에서

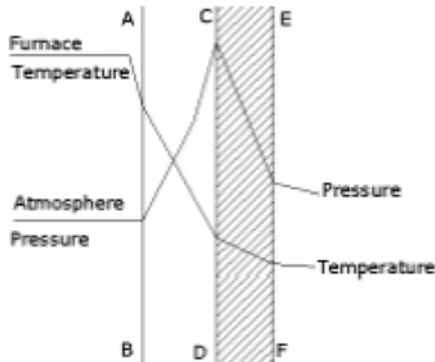


Fig. 3. A schematic of moisture clog spalling.

콘크리트의 일반적인 구조 성능 저하 등이 있으며 이러한 요인이 복합적으로 작용하여 폭열이 발생한다.

몇몇 경량 골재의 경우, 폭발적인 폭열을 일으키는 것으로 알려져 왔으나, 다양한 경우의 열응력 또한 기여 요인이 될 수 있다. 여러 요인들이 일반적으로 알려져 있지만, 구조물 안의 수분이 수용할 수 없을 정도로 높지 않다면 폭발적인 폭열 현상은 일어나지 않는다. 즉, 가장 중요한 요인은 부재 내 수분의 포화도이다.

Harmathy(1965)는 높은 수분량에 의한 폭발적인 폭열 현상을 ‘moisture clog spalling’이라고 하였다.<sup>12)</sup> 이러한 폭열현상에 대한 기구(mechanism)는 다음과 같다 (Fig. 3 참조). 열이 콘크리트 부재에 침투되기 시작하면 화재 노출 표면에 인접한 얇은 층 안의 수분들이 빠져나간다. 빠져나간 수증기들은 상대적으로 기온이 낮은 안쪽으로 이동하고 인접(기온이 낮은 안쪽 지역) 층의 공극으로 재수된다. 이와 같이, 부재내부의 건조 지역의 두께가 점차적으로 늘어남에 따라 상당한 두께의 포화층(moisture clog)이 화재 노출 표면으로부터 약간의 거리를 두고 서서히 생겨난다. 얼마 지나지 않아 뚜렷한 면(front)이 건조지역과 포화지역 사이에 형성되고, 그 이상의 수분 증발은 이 면(Fig. 3의 C-D면)으로부터 일어난다.

화재 노출 표면의 온도가 올라가면서 부재 내의 온도 증가율은 높은 열전도율과 C-D면에서의 집중적인 수분 증발에 의해 건조 지역을 통해 높아진다. 증발된 수증기가 moisture clog의 형성으로 기온이 낮은 안쪽 지역으로 방출되기가 힘들어짐에 따라 수증기는 A-B와 C-D 층을 지나 노출된 표면을 향해 이동될 수밖에 없게 되면서 부재 내부가 강한 압력을 받게 된다. 더구나 수증기가 열을 받으면 팽창하게 되어 수분 흐름 경로(공극)를 따라 흐름에 대한 저항성이 증가된다.

온도증가율이 더 커지면서, C-D면에서 빠르게 압력

이 증가된다. 재료의 투수성이 상대적으로 높으면, 즉 수분 흐름 통로의 저항성이 상대적으로 낮으면, moisture clog를 가로질러 부재 안쪽으로 압력이 분산되면서 전체 moisture clog(C-D와 E-F 층) 형성이 완화되고 압력 증가가 안정 상태가 된다. 반면 투수성이 상대적으로 낮으면, 즉 수분 흐름 구멍의 저항성이 상대적으로 높으면, C-D면에서의 압력이 계속적으로 증가하고 결국 그 압력이 재료의 인장 강도보다 커지게 된다. 이 시점에 도달하면 건조층(대개 25 mm)과 같은 두께의 moisture clog 층이 형성되고 노출된 표면으로부터 큰 소리를 내며 터져나간다.

표준 화재 실험에서 최초의 폭열은 대개 10~25분 사이에 발생한다. 폭열은 한번 터져 나갔다고 끝나는 것이 아니고, 수분을 집중적으로 함유하고 있는 새로운 층(폭열 전의 moisture clog)이 이미 700°C 이상 올라간 화기에 노출되면서 그 내부에 moisture clog가 다시 형성되기 시작하고 점차 빈번하게 폭열현상이 지속된다.

Fig. 4는 공극의 포화도와 투수성을 변수로 폭열에 대한 특정 콘크리트의 민감성을 보여준다. 같은 포화도에서는 투수성이 낮은 콘크리트일수록 moisture clog spalling 현상이 많이 발생하고, 포화도가 100%가 되면 콘크리트 투수성에 관계없이 폭발적인 폭열현상이 일어난다. 일반적으로 부재의 투수성이 작으면 공극 내의 포화도도 높아지므로 투수성이 낮은 콘크리트의 경우 moisture clog spalling에 대한 위험이 커진다. 즉 절대적인 수분량은 중요한 것이 아니라 공극내의 상대적인 포화도가 중요한 변수로 작용하는 것이다.

Copier(1996)는 콘크리트 구조물이 지어진지 2년이 경과되면 콘크리트 부재의 부피당 수분량이 7.5% 이하로 감소하여 오래된 건물의 경우에는 화재시 폭열현상이 일어나지 않는다고 하였다.<sup>13)</sup> 그러나 실제로는 오래된 콘크리트 부재가 물시멘트비(W/C)가 낮아졌더라도 화재시 폭발적인 폭열현상이 일어날 위험이 높다.

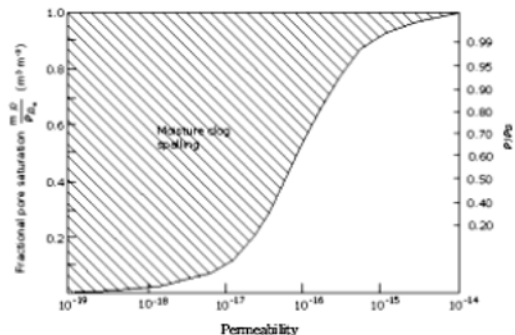


Fig. 4. Sensitivity of spalling of concrete.

이는 시간이 흐르면서 모세 공극이 분열되면서 콘크리트의 유효 공극 크기가 감소하게 되고 따라서 투수성도 감소되고 공극 내의 포화도가 상대적으로 높아지기 때문이다.

Chan(2000)의 연구에서는 함수율(중량당 수분 양)이 2% 이하(부피당 4.4%)로 내려가면 폭열 현상은 일어나지 않으며 그 이상의 함수율을 가진 콘크리트 부재에서는 실험체에 가해지는 하중과 온도 증가율이 크다면 폭열에 대한 민감성이 증가한다고 하였다.<sup>14)</sup>

폭열 현상에서 투수성이 중요한 변수로 작용한다면 투수성이 콘크리트 재료 성질과 어떠한 관련이 있고 또 어떻게 결정지어지는지 고찰해 볼 필요가 있다. 이를 위해 우선 콘크리트의 비표면(specific surface)에 대해 생각할 필요가 있다. 비표면은 다공성 구조의 재료 성질이며 단위 부피당 공극 표면 면적 또는 단위 중량당 공극 표면 면적으로 나타낸다. 콘크리트의 경우 비표면이 다른 다공성 구조(예를 들어 벽돌)에 비해 월등히 크다. 이것은 콘크리트 수화 작용에 관련되어 있기 때문에 콘크리트가 양생됨에 따라 증가한다.

Kalifa(1998)에 의하면, 단위 중량당 공극 표면 면적은 콘크리트 단위 중량당 증발되지 않은 수분의 중량에 비례한다.<sup>15)</sup> 콘크리트의 내부에서 포화도가 높은 모세 공극은 상호 연결된 네트워크를 형성한다. 콘크리트가 양생되기 시작하면서 발생하는 수화 작용은 포화된 공극에 침투하여 형성된 네트워크를 분열시킨다. 만약 물시멘트비가 너무 높지 않다면 포화 공극의 분열은 얼마 지나지 않아 시작된다. 반면 물시멘트비(W/C)가 70% 이상 높으면 공극의 분열은 절대로 발생하지 않는다.

공극률이 클수록 투수성도 증가하게 된다. 따라서 같은 공기량을 가진 콘크리트라면 물시멘트비(W/C)가 클수록 공극률도 커지기 때문에 물시멘트비(W/C)가 클수록 투수성이 크게 된다. 일반적으로 고강도 콘크리트의 경우 일반 강도 콘크리트보다 물시멘트비(W/C)가 낮기 때문에 투수성이 낮게 되며 따라서 폭발적인 폭열현상이 심하게 일어나게 된다.

## 5. 결 론

낮은 온도에서 점진적으로 가열되어 고온에 이르는 콘크리트의 내화성과 관련하여 내화성을 확보하기 위해 기존에 알려진 방안은 다음과 같다.

첫째, 내화성이 작은 철근을 보호하기 위하여 피복 두께를 충분히 한다.

둘째, 내화성이 높은 골재를 사용한다.

셋째, 부재 표면을 회반죽 등의 단열재로 보호한다.

넷째, 피복부재가 박리되는 것을 방지하기 위하여 메탈라스 등을 사용한다.

그러나 보통 콘크리트에 비해 고강도·고성능 콘크리트일수록 내부조직이 치밀하여 내화성 인자 중의 하나인 폭열 발생이 쉬운 것으로 알려지고 있어 내화성과 더불어 내부 수증기압에 의한 폭열이 매우 중요한 현상이며, 화재시 고성능 콘크리트의 폭열 방지 방안으로는 다음과 같은 것을 들 수 있다.

첫째, 콘크리트의 온도 상승을 억제하는 방법을 들 수 있다. 내화피복이나 내화도료의 적용 등이 그 방법이 될 것이다.

둘째, 콘크리트의 비산을 억제하는 방법을 들 수 있다. 강판피복이나 메탈라스에 의한 비산 방지 등을 생각할 수 있지만, 이들 방법은 콘크리트 자체의 폭열을 방지하는 것이 아니라 외부조건에 의한 폭열 방지 방안이라고 볼 수 있다.

셋째, 내부수증기압을 외부로 배출하는 방식, 즉 PP 섬유(polypropylene fiber)를 혼입하는 방법이 있다. PP 섬유를 0.1% 이상 혼입하게 되면 폭열 가능성을 대폭 낮추는 것으로 알려져 있으며, 이는 PP 섬유가 화재시 콘크리트 내부에서 녹음으로써 내부 수증기압을 외부로 빠져나가게 하는 통로역할을 하게 된다.<sup>16,17)</sup>

넷째, 빠르게 내부 수분을 건조시켜 수분을 대기중으로 이동시키는 방법을 들 수 있다.

위의 폭열 방지 방법 가운데 내화피복이나 내화도료의 적용은 부재단면을 크게 하고, 경제적으로도 현실적이지 못하며, 강판피복이나 메탈라스의 사용은 시공성의 확보와 경제성의 문제가 있다. 따라서 가장 효율적인 폭열 방지 방안은 콘크리트 내부의 수분을 빠르게 건조시켜 폭열에 이르게 하는 함수율 이하로 낮추어서 콘크리트 자체의 내폭열성을 높이는 방안이라고 할 수 있다. 실제 강제건조를 통해 함수율을 어떤 임계치(critical value) 이하로 낮추게 되면 폭열을 방지할 수 있는 것이다. 이를 위해서는 수동적인 자연건조 외에 강제건조 등으로 함수율을 낮출 필요가 있다고 사료된다.

이상으로 화재시 고강도 콘크리트의 폭열을 방지할 수 있는 근본적인 이론에 대하여 살펴보았다. 화재시 급격한 온도상승을 방지함으로써 폭열을 방지하는 것은 현실적이지 못한 방안이지만, 함수율의 경우 어떤 임계치 이하로 낮추게 되면 폭열의 가능성을 상당히 낮출 수 있을 것이다. 따라서 여러 변수들에 따른 함수율의 임계치 결정과 임계치를 낮추는 방안 등에 관한 많은 실험연구가 필요할 것이다.

따라서 본 연구의 후속연구로서 이러한 함수율의 임계치 및 PP 섬유 혼입에 관한 실험계획을 추진중에 있다.

PP 섬유의 혼입율의 경우, 앞서 언급하였듯이 0.1% 이상 혼입하게 되면 폭열 가능성을 대폭 낮추는 것으로 알려져 있으므로 0.1% 내외로 설정, 즉 0 vol.%, 0.05 vol.%, 0.10 vol.%, 0.15 vol.%, 0.20 vol.%, 0.30 vol.%로 조건을 변화시켜가면서 PP 섬유 혼입율에 따른 폭열 여부를 시험하고자 한다.

함수율의 경우에는 3% 정도 이하로 낮추게 될 경우, 폭열의 가능성이 거의 없는 것으로 선행연구에서 나타났기 때문에 본 연구에서는 1%, 1.5%, 2.0%, 2.5%, 3.0%, 4%, 5%로 함수율을 조절하여 실험을 수행하고자 한다.

한편, 건물 자체 내 공조시스템 혹은 콘크리트 혼화재 등을 통한 강제건조 연구가 필요하며, 이러한 연구를 토대로 기존의 사양(specification) 중심의 소방시설 기준에서 시장경제원칙에 입각한 성능(performance) 중심의 소방시설 기준으로 유도할 필요가 있다 하겠다.

### 참고문헌

1. 황인성, “화재시 고성능 콘크리트의 폭열에 미치는 재료 및 배합요인의 영향”, 청주대학교 석사학위논문(1999).
2. 김두현, 권영진, “콘크리트 압축강도 추정을 위한 비파괴 시험식의 활용성 검토에 관한 연구”, 한국구조물진단학회, 제3권, 제1호(2001).
3. 강병희 외, “가열시 콘크리트 내부온도분포 산정에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집, 제7권, 제6호(1991).
4. 김홍열 외, “고온 가열시 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집 구조계, 제18권, 제11호(2002).
5. 김홍열, “고온 영역에서 고강도 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구”, 건국대학교 박사학위논문(2002).
6. 김인수, “국내외 콘크리트 구조물의 화재피해 사례분석”, 콘크리트학회지, 제14권, 제2호, pp.10-16(2002).
7. 한국콘크리트학회, “콘크리트 표준시방서”(1999).
8. U. Schneider, “Properties of Materials at High Temperatures: Concrete”, RILEM, International Union of Testing and Research Laboratories of Materials and Structures, June(1985).
9. 이소진, “화재 피해를 입은 일반강도 철근콘크리트 휨부재의 구조성능에 관한 연구”, 이화여자대학교 석사학위논문(2002).
10. 허은진, “철근콘크리트 휨 부재의 내화성능에 관한 해석적 연구”, 부산대학교 석사학위논문(2001).
11. 김재영, “저 분말도 포틀랜드 시멘트 및 고로슬래그 혼합시멘트의 수화특성”, 단국대학교 대학원 석사학위논문(1999).
12. T. Z. Harmathy, Fire Safety Design and Concrete, Longman Scientific & Technical(1993).
13. J. Copier, Fire Performance of High-Strength Concrete: A Report of th State-of-the-Art, Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology(1996).
14. S. Y. N. Chan, X. Luo, and W. Sun, Effect of High Temperature and Cooling Regimes on the Compressive Strength and Pore Properties of High Performance Concrete, Construction and Building Materials, Vol. 12, pp.261-266(2000).
15. P. Kalifa, F. D. Menneteau, and D. Quenard, Spalling and Pore Pressure in HPC at High Temperature, Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp.1915-1927(1998).
16. 한천구, “비폭열성 콘크리트”, 콘크리트학회지, 제10권, 제6호(1998).
17. 한천구, 황인성, “고성능 콘크리트의 폭열방지에 관한 연구”, 계간 건자재, 통권17호(1999).