

## 화재시 콘크리트 요소 폭발영향성 고찰 Review of Spalling Effect on Concrete Element in Fire

김형준 · 한상훈 · 최승관<sup>†</sup>

Hyung-Jun Kim · Sang-Hoon Han · Seng-Kwan Choi<sup>†</sup>

한국건설기술연구원 화재 및 설비연구부  
(2007. 3. 13. 접수/2007. 5. 14. 채택)

### 요 약

콘크리트는 일반적으로 내화능력이 내재되어 있다고 여겨지나, 이것은 화재시 콘크리트의 낮은 열전달 특성으로 인해 폭발이 일어나지 않는다는 것을 전제한 것이다. 그러나, 최근의 화재사고사례를 분석한 결과 콘크리트 폭발이 구조물에 미치는 영향은 심대한 것을 알 수 있다. 따라서, 본 연구는 콘크리트 폭발에 관한 선진 연구 성과의 이론적 고찰 및 실험결과 분석·검토를 토대로 국내에 상대적으로 미흡한 화재시 콘크리트의 거동특성 및 폭발현상을 체계적으로 규명하였다. 또한, 본 연구를 통해 화재조건에서의 성능 설계법을 제시할 수 있는 콘크리트 폭발 기초연구자료를 제시하고자 한다. 폭발성 폭발현상은 고온 영역 하에서 공극압력이 상승하게 되어 단면을 감싸는 인장응력보다 박리되고자 하는 압력이 커지게 되어 200°C~400°C에서 발생하게 된다. 폭발에 직접적인 원인이 되는 요소는 수분함유량, 공극(수증기에 의한) 압력, 변형에 의한 응력변화(하중비), 가열비(화재강도) 등으로 요약할 수 있다.

### ABSTRACT

Concrete is generally accepted to have good inherent fire resistance. It mainly relies on the assumption that concrete has low heat-transfer characteristic and spalling does not occur during the course of a fire. However, the significant numbers of fire accidents have shown in recent years that incidence of spalling has caused sever damages to many structures. This review has systematically investigated the behaviour of concrete in fire, including phenomenon of spalling, with respect to the theoretical consideration and experimental results. Explosive spalling is caused by the build-up of water vapor pressure in concrete subjected to increasing temperatures. When this pressure exceeds the tensile strength of the concrete over a fire-exposed area, explosive spalling can result in a typical temperature range between 200°C and 400°C. The major functions are known to be moisture content, pore pressure, load ratio, and heating regime.

**Keywords :** Spalling, Moisture content, Pore pressure, Load ratio, Heating regime

### 1. 서 론

화재 통계 연보의 최근 10년간 국내 화재 현황(1995~2004)을 살펴보면 연 평균 4.3%씩 증가하여 1995년도에는 26,071건이던 화재 발생이 2004년도에는 32,737건으로 증가하여 1995년에 대비 25.6% 증가하였으며, 이중 건축물 화재는 연 평균 82.1%로 화재피해의 주 원인이 되는 것으로 분석되어 건축물 화재에 대한 근본적인 대책방안이 필요한 시점이다. 건축물화재는

1995년도 21,546건에서 매년 연평균 4.3%의 증가율을 보여 2004년도에는 26,620건이 발생하여 1995년도 대비 23.5%가 증가하여 지난 10년 동안의 건축물 화재 방지 대책에 관한 노력이 결핍된 것으로 판단되며, 이에 대한 개선방안으로 성능기반 건축물 화재대응 설계지침 제정 및 건축물 내화성능 향상방안에 대한 관련연구가 필요한 시점이라고 사료된다. 이와 관련하여 화재관련 선진국들은 최근 30여 년간 발전된 화재설계 성능기반 대응기술에 관한 연구기반을 착실히 닦아 놓고 있으나, 국내 학계·산업계에서는 아직도 이 분야에서는 제한적인 기초연구 수행 단계이며 화재 관

<sup>†</sup>E-mail: sengkwanchoi@kict.re.kr

런 성능기반 설계규정 지침 연구 역시 미비한 상황이다.<sup>1)</sup> 이를 해소하기 위해 국내에 각종 건축물의 화재 안전 성능기반 내화설계기술의 보급과 활용을 추진할 필요가 있으며, 특히 콘크리트 구조물에 있어서 부재의 단면결손을 유발하는 폭렬현상에 대한 명확한 이론적 규명 및 관련 선진외국의 연구 성과 분석·검토를 기반으로 한 콘크리트 폭렬영향성 평가가 선행되어야 한다.

콘크리트 구조는 재료특성 관점에서는 낮은 열전도율과 비연소성인 특성을 갖고 있기 때문에 일반적으로 내화성능(fire resistance)을 갖고 있다고 여겨지나, 구조물의 화재 대응 설계시의 구조적 안정성을 판단하는 기준으로는 논리적이지만 못한 접근이다. 그 이유는 화재와 같은 급격한 고온 노출상황에서 콘크리트의 표면으로부터 발생하는 폭렬로 인한 급격한 구조적 성능 저하 요소에 대한 충분한 검토를 간과하고 있으며, 폭렬현상에 대한 이론적 고찰 및 원인 분석·관련 메커니즘의 이해가 선행되지 않았기 때문이다. 특히 구조적 성능증진 및 특수한 목적과 용도를 달성하기 위해 최근 사용빈도가 높아진 고강도 콘크리트(HSC)의 경우에는 보통강도 콘크리트(NSC)에 비해 폭렬현상이 현저하게 유발되는 특성을 내재하고 있기 때문에 구조물 현장 적용시에는 사전분석 및 검토가 선행되어야 한다.

그러므로, 본 연구에서는 콘크리트 폭렬의 선진외국의 이론적 고찰 및 실험결과 분석·검토를 토대로 국내에 상대적으로 미흡한 화재시 콘크리트의 거동특성 및 폭렬현상을 체계적으로 규명하고, 국내 폭렬관련 내화실험 수행에 관한 향후과제 및 연구방향을 제안하여 성능적 분석수행기술과 화재조건에 따른 대응설계지침 및 기법마련을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

## 2. 콘크리트 폭렬 이론 고찰

폭렬 현상의 발생 원인은 다양한 관점에서 설명이 시도되어 왔으며, 최근에는 단순한 한 가지의 원인보다는 제안된 몇 종류의 이론을 동시에 적용하여 대상의 적절한 거동을 단계적으로 설명하는 시도가 그 주류를 형성하고 있다. 본 장에서는 먼저 콘크리트의 열적특성을 살펴보고, 폭렬 발생 원인과 폭렬발생 메커니즘을 분석하여, 이를 기반으로 여러 가지 폭렬 발생 요인들의 영향성 평가수행의 이론적 배경을 구축하고자 한다.

### 2.1 고온시 콘크리트의 재료적 변화

콘크리트 재료는 비 균질 재료이므로 고온영역 하

에서 온도에 따른 물리적·화학적 변화성상을 면밀하게 고찰할 필요성이 있다. 일정한 온도조건에서의 화학적 작용을 분석하여 수분조건 및 변화성상고찰을 토대로 온도에 따른 열적특성을 규명할 수 있으며, 고온영역 물성변화를 토대로 강도변화 및 구조적 특성변화를 고찰할 수 있는 토대를 마련할 수 있다고 사료된다

#### 2.1.1 콘크리트의 화학적 변화

콘크리트는 외부 노출 온도의 상승과 연동하여 고온 조건에서 다양한 주요 구성 물질의 물리·화학적 변화가 단계적으로 발생한다. 콘크리트의 주 구성물인 골재, 시멘트 페이스트와 물에서 이러한 영향은 독립적으로 발생하여 복합적으로 작용한다. 내부 수분은 약 100°C 이상에서 자유수의 증발이 시작되어 공극압의 팽창을 유발시켜 폭렬의 발생을 일으키는 원인이 되며, 다양한 형태의 화학적 결합수가 120°C부터 600°C까지 분해되어 발생한다. 골재 측면에서는 주요 화합물인 석영이 573°C에서 열영향으로 그 결정 구조가 α형태에서 β 형태로 바뀌게 된다. 이 상변형은 골재의 급격한 팽창을 발생시켜 콘크리트에 균열을 일으키는 원인이 된다. 석회암 골재의 경우는 800°C에서 분해과정이 발생한다. 시멘트 페이스트는 약 400°C에서 portlandite, Ca(OH)<sub>2</sub>가 화학적으로 석회와 물로 분해가 된다. 이 현상은 주요 화학결합수의 분해 발생 및 콘크리트 화학적 조성의 결합 약화를 발생시켜 강도를 감소시키는 요인이 된다. 약 1200°C에서 시멘트 페이스트의 용해 현상이 발생한다. 이러한 다양한 형태의 화학적 변화는 콘크리트의 고온조건에서 주요 물성인 열팽창, 비열, 전도율, 강도, 강성 및 폭렬 발생의 변화를 주도하게 된다. 이는 관련 분야의 화재대응 및 성능향상 연구에 기반이 되므로, 그 주요한 변화의 분석은 매우 중요한 부분으로 인식되고 있다.

#### 2.1.2 콘크리트의 물성 변화

유로코드에 기술된 온도에 따른 콘크리트 강도의 변화를 기술한 Fig. 1은 보통 콘크리트(NC)와 경량 콘크리트(LC)의 온도에 따른 강성저하와 변형율의 변화를 나타낸 것이다. 보통 콘크리트의 경우 550°C에서 상온에서의 강도에 비해 약 50%의 강도저하가 나타나며, 800°C 이상에서는 약 15%의 강도만 잔류하게 된다. 또한 경량 콘크리트에 비해 일반 콘크리트의 온도가 올라 갈수록 잔류강도가 급속하게 떨어지는 특성을 갖는데, 이는 콘크리트 중량에 기인하는 것으로 사료된다. 경량 콘크리트는 약 300°C까지 강도저하가 발생하지 않으며, 300°C~1100°C까지 일정하게 감소되고, 약

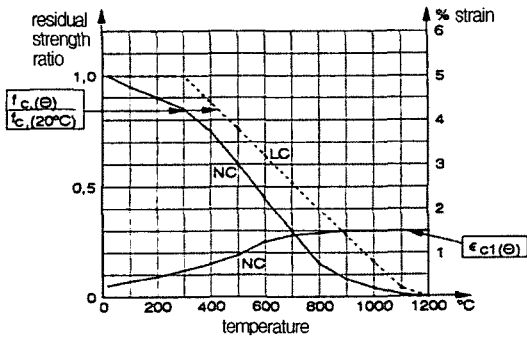


Fig. 1. Strength distribution of concrete at elevated temperature.<sup>2)</sup>

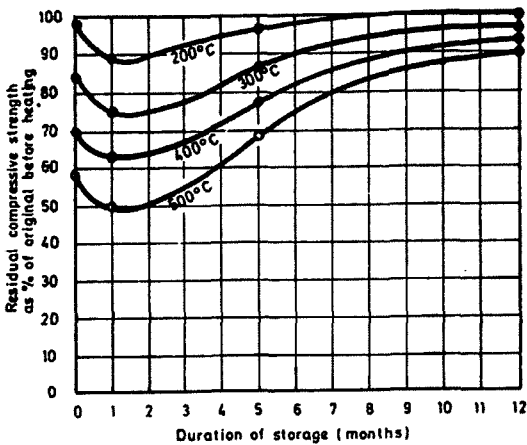


Fig. 2. Autogenous strength recovery of heated concrete. mature concretes (3 to 12 months old), storage in air.<sup>3)</sup>

700°C에서 50%의 잔류강도가 나타나는 특성을 갖는다. 고온영역 콘크리트의 변형을 변화는 온도가 증가할수록 커지게 되며 약 900°C 이상에서 1.5%의 열팽창 변형증가가 유발된다.

Table 1. The phenomenon of spalling

분류	Progressive spalling			Explosive spalling
	Aggregate spalling	Surface spalling	Coner spalling	
피해정도	하	중	중~상	상
철근영향	없음	가능함	가능함	심각함
피해범위	표면	표면에서 5~10 mm	피복두께 이상	전체 부분
발생시기	초기		초·중기	전 기간
발생문제	미관 문제	단면결손	단면결손	부분 붕괴
spalling 이론	골재 변형 수증기압	골재변형 열응력	수증기압 열응력	공극압력 삼투압
발생원인	열을 받은 골재표면 국부 박락	표면골재로 인한 콘크리트 파편발생	코너부의 수증기압	콘크리트 내부의 급격한 응력 발생

화재 후 콘크리트의 존치 기간에 따른 강도 특성은 보수·보강을 위해 중요한 요소이므로 이에 대한 고찰이 필요하다. 콘크리트의 화재 후 열화특성을 Fig. 2를 토대로 분석한 결과 약 45일 이후에 압축강도가 가장 낮아지게 되며, 대략 11~12개월 이후엔 화재 발생 전 강도의 상당한 정도로 복구된다. 노내 온도 500°C에서 화재 발생 직후 60%로 감소한 콘크리트의 잔류강도가 약 12개월 이후에는 화재 전 강도의 90%로 회복함을 알 수 있다.

## 2.2 폭렬 이론의 분류

현재까지 폭렬을 설명하기 위해 제안된 이론들 중 합리적으로 인식되고 있는 주요 이론의 분류는 발생형상 및 피해정도에 따라 Progressive Spalling과 Explosive Spalling으로 나눌 수 있으며, 발생원인에 따라 Table 1과 같이 네 가지로 요약할 수 있다.

### 2.2.1 Progressive Spalling

고온 가열시 콘크리트 내부의 수분이 가열면으로 이동하게 되고 열 특성에 의해 점진적인 변형을 유발하여 표면 박락을 발생시키게 되는데 이를 Progressive Spalling이라 한다. 이러한 특성은 다양한 원인으로 설명할 수 있으며, 그 중 가장 명확하게 알려진 이론은 수증기압 이론, 골재 변형 이론, 열응력 이론 세 가지로 분류할 수 있다.

수증기압 이론에 의하면 콘크리트가 고온에 노출될 경우에 자유수와 결합수의 증발로 인해 국부적인 수증기압이 증가되는데, 투수성이 낮은 재료일 경우엔 그 특성과 연동되어 고압증기의 분산을 어렵게 하는 현상이 발생하게 되어 궁극적으로 국부적인 Spalling을 발생시키게 된다.<sup>4)</sup> 골재변형 이론은 서로 다른 열팽창률을 갖고 있는 콘크리트의 표면 골재가 고온 노

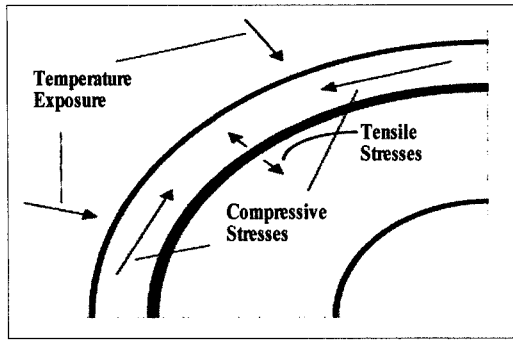


Fig. 3. Mechanism of surface spalling.

출시에 국부적인 변형을 발생시키고, 이로 인해 표면 Spalling이 발생하게 된다.<sup>5)</sup> 열응력 이론에 의하면 비선형적인 온도분포가 콘크리트 단면에 영향을 주어서 최대 변형이 발생할 경우, 콘크리트 강도 이상의 표면 압축응력이 발생하게 되고 결국 Spalling이 발생하게 된다. 이러한 현상들은 콘크리트 내부의 상반된 응력에 의해서 억제될 수 있는데, Fig. 3과 같이 표면에서 발생한 압축응력이 철근에 의한 구속력에 의해 억제되어서 결국 폭발현상을 지연시킬 수 있다.<sup>6)</sup> 그러나, 고온으로 가열될 경우엔 표면에서의 압축응력이 철근의 구속력을 초과할 경우가 발생하게 되고, 결국 콘크리트 표면이 박락되는 표면 Spalling 현상이 발생된다.

2.2.2 Explosive Spalling

고온 가열시 콘크리트 내부의 수분을 이동시키는 압력에 의해 수증기는 콘크리트내의 공극사이로 이동하게 되고, 공극압력을 유발하는 원인이 되어서 결국 Explosive Spalling을 발생시킨다. 반면 내부로 들어간 수증기는 열원과의 거리가 멀어지면서 열에 의한 흐름의 세기가 감소하게 되며 수증기압도 감소하게 된

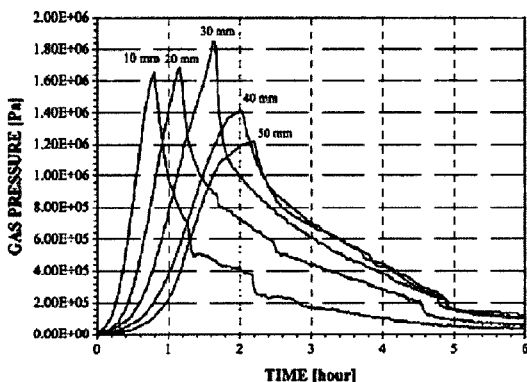
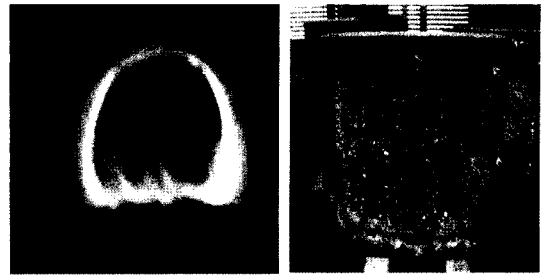


Fig. 4. Pore pressure distribution with time.<sup>8)</sup>



a. heating in furnace    b. concrete specimen

Fig. 5. Spalling after fire resistance tests.<sup>9)</sup>

다. 이러한 현상으로 인해 콘크리트 내의 공극압의 크기는 Fig. 4에서와 같이 표면에서부터 점차 증가하다가 Vapor Zone에서 최대 수증기압을 발생시키며 Fig. 5와 같이 폭발성 폭발이 발생하고 되고, 그 이후로 압력이 점차 감소하게 되는 특성을 나타낸다.

삼투압 현상은 고온 가열시 콘크리트를 구성하는 두 성분의 서로 다른 열 특성에 의해 발생한다. 시멘트 페이스트는 내부 공극의 수증기 증발로 인해 수축을 하는 반면 골재는 열에 의한 팽창을 하게 되어 상반된 변형이 발생하게 된다. 이러한 상이한 변형으로 인해 다공질의 ITZ(Interfacial Transition Zones)가 발생하게 되며, ITZ의 내부 공극이 크기 때문에 수분을 흡수하려는 삼투압 현상이 발생하게 된다. 그러므로, 고온 가열시 ITZ의 온도는 급속도로 올라가게 되어 높은 압력이 발생하게 되고 폭발로 귀결된다.<sup>7)</sup> 삼투압 변형의 이론적 고찰을 기반으로 고강도 콘크리트에 섬유보강 폴리프로필렌(poly propylene fibers)을 첨가하여 폭발을 제어할 수 있는 방안이 도출되었다.

2.3 폭발 메커니즘 고찰

콘크리트 폭발 현상은 크게 두 가지 과정에 의해 발생하게 되는데, 한 가지는 열-역학적 메커니즘에 의해 발생하게 되고, 다른 한 가지는 열-수-역학적 메커니즘에 의해 발생하게 된다.

열-역학적 메커니즘은 콘크리트 구성 성분 중 골재와 시멘트 페이스트의 양립할 수 없는 국부적 열 특성으로 인한 폭발 발생 과정을 나타낸다. 열을 받은 골재는 화학적 재구성이 이루어지기 전까지는 팽창하게 되지만, 반대로 시멘트 페이스트는 180°C 부분에서 화학적 재구성이 되기 전까지 수분의 건조와 탈수현상에 의해 오히려 수축하게 된다. 이러한 팽창과 수축의 국부적으로 양립할 수 없는 변형 현상은 결국 점진적인 폭발(Progressive Spalling) 현상으로 귀결된다.

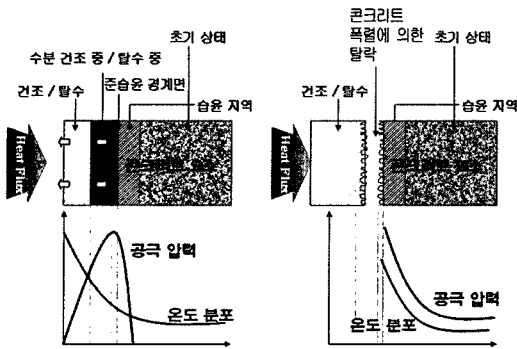


Fig. 6. Distribution of pressure and temperature.

열-수-역학적 메커니즘은 여러 가지 복합적인 요인에 의해 발생하게 되며, 그 중 가장 직접적인 발생 원인은 콘크리트 내부의 급격한 수증기 압력 상승이다. 이러한 수증기압은 콘크리트 내부의 공극사이로 MASS (공기+수분+수증기)를 이동시키게 되어 공극압력을 유발시키며, 결국 폭발적 폭렬(Explosive Spalling) 현상으로 이어지게 된다.

폭발적 폭렬현상의 메커니즘은 다음과 같다. 콘크리트가 고온을 받으면 콘크리트내의 자유수는 가열 표면에서 증발을 하거나 상대적으로 저온인 콘크리트 내부로 이동하기 시작한다. 가열면의 경계면으로 이동한 수증기는 표면 폭렬을 유발할 수 있으며, 내부로 이동한 수증기는 비 투과막으로 역할을 하는 준-습윤지역에서 수증기 정체현상의 주 원인이 된다. 이런 현상이 가중될 경우 준-습윤 지역과 습윤지역의 경계면(Moisture Clog)에서 압력차이가 발생하게 되어 결국 최대 공극압력을 유발시킨다. 이러한 현상으로 인해 콘크리트 내의 공극압력의 크기는 가열면에서 깊이 방향으로 점차 증가하다가 준-습윤지역 경계면에서 최대값을 나타내며, 그 이후로는 점차 감소하게 되는 Fig. 6과 같은 비선형적인 분포를 갖게 된다.<sup>10)</sup>

구조물에 심각한 단면결손을 유발할 수 있는 폭발적 폭렬현상은 열-수 역학적 메카니즘 과정에 의해 발생하게 되며, 이러한 메카니즘은 재료적 특성과 역학적 특성에 의해 영향을 받는다. 재료적 특성으로는 열전도성, 비열, 수증기의 투수성 등이 주요 변수이며, 역학적 특성은 강도, 열에 의한 균열 형상 및 크기, 골재의 열팽창률 등에 의해 영향을 받게 된다.

### 3. 콘크리트의 폭렬요인과 영향성

다양한 형태의 폭렬 발생 원인에 관한 이론들에서 제시되어진 것처럼, 폭렬 발생은 한 가지 변수에 의해

지배되는 것이 아니라 매우 복잡적이고 다양한 원인들의 조합에 의해 결정되기 때문에 체계적인 관점에서의 접근이 필요하다. 또한 콘크리트 재료 자체가 불균질한 특성을 갖고 있기 때문에, 동일한 조건과 변수를 가지고 제작한 실험체의 실험에서도 상이한 거동을 보이기 때문에 폭발거동 특성을 명확히 규명하기 위해서는 단계적 접근이 필요하다.

그러므로 콘크리트 폭렬요인들의 영향성 분석을 수행하여 관련 인자들과 폭렬특성의 상관관계를 고찰하고자 한다. 콘크리트 폭렬 요인은 콘크리트 자체의 재료적 특성인 골재특성, 투수성, 수분함유량, 물시멘트비, 재령, 실험체 크기 및 인장강도 등이 있으며, 콘크리트 고온 가열시에 유발되는 수증기압력, 공극압력 등이 있다. 또한 외부 환경에 의한 영향특성인 하중재하, 가열비, 열팽창구속 등으로 분류할 수 있으며, 각 요소들이 폭렬에 미치는 영향성은 아래와 같다.

#### 3.1 폭렬에 관한 콘크리트 재료의 영향

콘크리트의 배합설계의 주요 요소인 물시멘트비에 의해 재료의 수증기압을 유발하는 수분함유량이 변화하며, 사용골재 및 시멘트에 의해 콘크리트 재료자체의 열적특성과 재료적 특성(투수성 및 공극율)의 차이가 발생하게 된다. 이러한 차이는 고온에서의 콘크리트 폭렬현상에 영향을 주는 주요 인자로 작용하기 때문에 사용재료의 물적·역학적 특성에 대한 규명이 선행되어야 하며, 폭렬현상과의 상관성 분석이 필요하다.

##### 3.1.1 골재특성

콘크리트 사용골재는 화학 성분에 따라서 크게 규산질, 석회질, 탄산질 골재로 분류할 수 있으며, 사용골재에 따라 폭렬 특성이 변화한다. 콘크리트에 적용된 골재에 따라 폭렬특성 비교 실험을 실시한 결과, 열팽창 계수가 큰 규산질 골재 콘크리트가 석회질 골재 콘크리트보다 폭렬이 더 잘 발생하는 경향을 갖는다.<sup>11)</sup> 고강도의 경우엔 규산질 골재 콘크리트가 탄산염 골재 콘크리트보다 비열이 작기 때문에 폭렬현상이 더 잘 발생하는 경향을 나타내게 된다.<sup>12)</sup> 그러나, 폭렬현상은 여러가지 요인에 의해 복합적으로 영향을 받기 때문에 골재 종류 한 가지 변수가 폭렬현상을 유발하는 절대적인 요인은 될 수 없다고 사료된다.

##### 3.1.2 수분 함유량

수분 함유량은 폭렬 현상의 주 원인이며, 콘크리트 내 수분이 많을수록 폭렬이 더 잘 발생하게 되는데, 이는 수분 함유량이 수증기압과 공극압 상승의

Table 2. Moisture content in concrete<sup>14)</sup>

재령	수분 함유량
7년 재령 LWC 보	보의 중앙에서 보의 2% 이상 중량의 8% 또는 체적의 15%
Younger 콘크리트 보	보의 중앙에서 중량의 4% 이상 중량의 15.5% 또는 체적의 28%
2년 재령 건물	체적의 7.5%
건물 내부에 있는 경량골재콘크리트의 수분양은 재령이 지날수록 줄어드나, 외부에 노출될 경우 수분 함유량은 점차 늘어나게 된다.	

직접적인 원인이 되기 때문이다. 콘크리트 내의 수분은 자유수와 화학적 결합수로 분류할 수 있고, 약 100°C~150°C까지는 자유수가 주로 증발하므로 자유수가 폭발 현상의 주 원인이 되며, 그 이상의 온도에서는 화학적 결합수가 분해되므로 이에 대한 고려가 필요하다.

자유수에 의한 폭발 메카니즘은 가열로 인해 콘크리트 내부의 자유수가 가열 표면 부위로 이동하게 되며, 온도상승으로 인한 기화현상을 동반한다. 이러한 현상은 국부적으로 급격한 공극압력증가를 발생하게 하여 결국 폭발로 귀결된다. 만약 수분 함유량이 콘크리트 전체 중량의 3% 이내일 경우에는 폭발이 유발되는 수증기압까지는 증가하지 않는다.<sup>13)</sup> 그러나, 콘크리트 재령과 배합비에 따라 수분 함유량이 달라 질수 있기 때문에 정확한 수분 함유량을 알기 위해서는 신뢰성 있는 실험이 요구된다. 이와 관련한 연구로 Danielsen 등의 실험결과는 Table 2와 같다.

3.1.3 물시멘트비 및 투수성

물시멘트비가 클수록 콘크리트 내의 수분함유량이 많아지기 때문에 폭발발생의 가능성이 커지게 된다. 그러나, 고강도 콘크리트의 경우에는 물·시멘트비가 낮음에도 불구하고 폭발이 발생하게 되는데, 이는 내부의 밀도가 커서 투수성이 작아지게 되고 결국 높은 수증기압을 발생시키기 때문이다. 보통 강도 콘크리트의 경우 Hydrocarbon 가열곡선에서의 물시멘트비가 0.55일 경우에 가장 큰 폭발현상이 발생하게 된다.<sup>15)</sup>

투수성은 수증기압과 공극 압력을 결정짓는 주요 재료적 특성이며, 폭발에 직접적인 원인이 된다. 투수성이 낮을수록 수증기압 상승의 원인이 되며, 공극율이 작을수록 공극압 상승의 원인이 된다. 그러므로, 재료의 투수성과 공극율은 폭발의 영향성 평가의 주요 변수 중의 하나이며, 폭발을 방지하기 위해서는 이에 대한 직접적 조절이 필요하다고 판단된다.

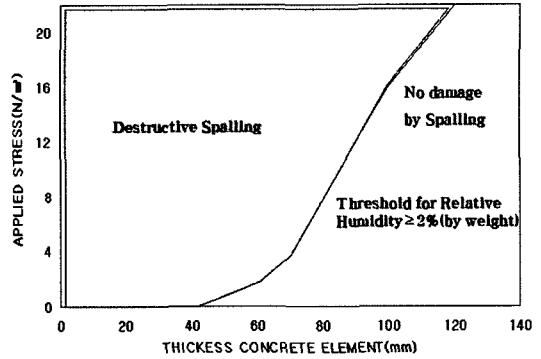


Fig. 7. Prediction of explosive spalling.

3.1.4 실험체 크기 및 보강 철근의 영향

실험체의 크기가 폭발발생에 영향을 주기도 하는데 그 이유는 온도와 수분의 함유량이 달라지기 때문이다. 일반적으로 실험체 크기와 폭발간의 관계는 가열 방향과 재하 하중에 따라서 서로 다른 결과를 나타낸다. 실험체를 전 방향에서 가열할 경우엔 Fig. 7에서 보는 것과 같이 두께가 얇을수록 폭발이 더 잘 발생하는데, 이는 실험체가 얇을수록 수분의 이동 경로가 짧고 폭발을 억제하는 인장강도가 작기 때문이다.<sup>16)</sup> 일 방향 가열 시에는 일정두께 이하에서는 폭발 현상이 오히려 저감되는데, 그 이유는 일정두께(100 mm) 이하일 경우 손쉽게 수분이 빠져 나가게 되어 폭발로 이어지지 않게 되기 때문이다.<sup>17)</sup>

철근에 의한 인장강도가 폭발에 미치는 영향은 상반된 의견이 공존하므로, 이에 대한 연구가 더 진행된 후에 그에 대한 영향성 평가를 할 수 있다. Hertz는 ‘철근은 콘크리트 내부의 인장응력을 증가 시키는 역할을 하여서 재료적 파괴현상을 제어하고 폭발현상을 억제하게 된다.’<sup>18)</sup>는 연구결과를 발표하였다. 이와 반대로 Ali는 ‘철근의 인장응력이 미세 균열을 억제하고 콘크리트 내의 수분 이동을 불리하게 하여 폭발의 원인이 된다.’고 주장하였다. 이러한 상반된 결론이 나온 이유는 인장응력만으로 폭발 현상을 설명하였기 때문으로 판단된다. 철근의 인장응력은 폭발을 유발하는 주요 요인이 아니므로, 폭발발생 원인으로서는 일률적 적용의 한계를 내포하고 있다.

3.1.5 양생방법과 재령

강도에 따른 콘크리트의 양생방법과 섬유보강에 따른 공극압력의 차이를 분석한 Fig. 8은 NSC는 수증 양생 할수록 공극압력이 커지고, HSC에서는 섬유보강량이 많을수록 공극압력이 작아지는 효과가 도출되어

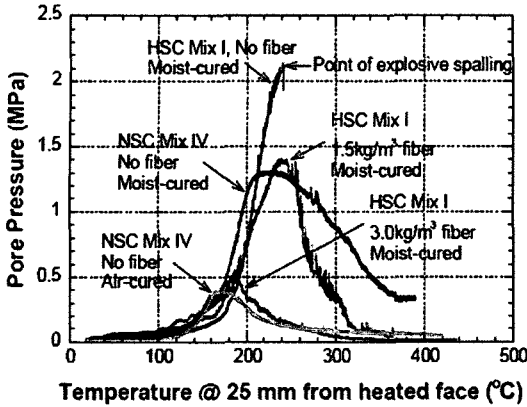


Fig. 8. Pore pressure in different specimens.

pp 섬유가 효과적인 폭발저감 물질로서 적용될 수 있다는 연구결과를 제시하고 있다.<sup>18)</sup>

콘크리트 재령에 따라서 폭발에 영향을 준다는 연구가 수행되었으며, 그 결과를 분석한 결과 서로 상반된 평가로 도출되었다. Sullivan은 ‘콘크리트 재령이 증가 할수록 수분 함유량은 점차 줄어들며, 그에 따라 폭발 현상이 줄어들 수 있다.’<sup>19)</sup>는 주장을 하였다. 반면 Malhotra는 ‘콘크리트의 재령이 증가 할수록 재료의 투수성이 줄어들고 밀도가 증가하게 되어서 폭발 현상이 발생한다.’<sup>20)</sup>는 주장을 하였다. 이러한 서로 상반된 주장이 발생한 것은 콘크리트 재령만으로 폭발 현상에 대한 영향성 평가를 하였기 때문이다. 그러므로, 재령과 폭발의 관계를 독립적으로 판단하기 보다는 다른 요인들에 대한 고려를 복합적으로 조합하여서 폭발의 영향성 평가를 하는 것이 바람직하다고 판단된다.

3.2 콘크리트의 폭발 유발 요인

고온조건 콘크리트의 폭발유발 요인은 가열에 따른 내부 수분 이동과 공극압력의 크기 변화 그리고 하중재하, 변형구속, 화재강도 등의 외적요인이 재료적 특성과의 상관관계에 의해서 복합적으로 나타난다.

3.2.1 내부 수분과 공극압력

Sharp는 시편을 일정한 온도(150°C)로 가열할 경우의 무게 변화와 공극압력간의 상관관계를 규명하는 실험을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.<sup>21)</sup> 수분의 증량 감소에 따른 압력을 측정 한 Fig. 9의 A 부분의 공극압력은 가열로 인해 발생하는 공기와 수증기의 방출 및 탈수 작용으로 인해 시편의 무게가 감소하게 되어 결국 일정한 압력까지 낮아지게 된다. B 부분의 공

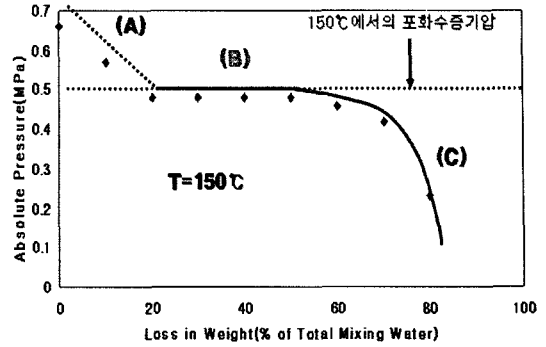


Fig. 9. Absolute pressure at 150°C against loss of weight for release test specimen.

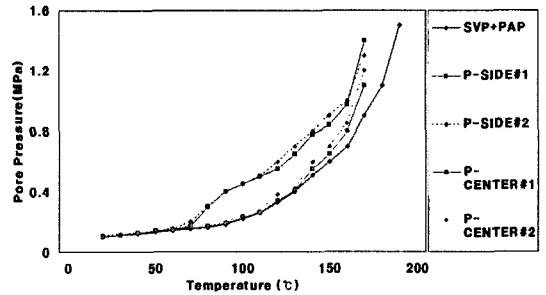


Fig. 10. Relationship between pore pressure and temperature [w/c=0.45].

극압력은 포화 수증기압과 동일하게 유지되는데, 이러한 압력 값은 콘크리트 내부의 공극에 수분이 포화상태를 유지하는 한 지속되게 된다. C 부분의 공극 압력은 수분 증량 손실이 약 55% 이상되면서 점차 낮아지기 시작하는데 이는 공극 안에서의 탈수작용으로 인해 수분 함유량이 감소하기 때문이며, 공극내의 수증기가 모두 방출되게 될 경우의 압력 값은 결국 0으로 떨어진다.

Kontani는 0.44 K/min의 일정한 가열을 통해 최고 온도 171°C를 구현하여 콘크리트 배합비(w/c:0.25, 0.3, 0.45)에 따른 압력과 온도의 상관관계를 Fig. 10과 같이 규명하였으며, 그 내용은 다음과 같다.<sup>22)</sup> 콘크리트 내부 압력은 SVP(포화수증기압)+PAP(부분 공기압)보다 약 11%~45% 더 높게 측정되었으며, 최대 공극 압력이 측정된 부분은 시편의 중앙부이고 시편 온도 171°C에서 약 1.4 MPa까지 측정되었다.

Kalifa는 폭발 발생의 주 원인인 콘크리트의 공극압력 측정을 주 목적으로 실험을 실시하였으며, 이를 위해 콘크리트 내부의 열 분포 · 압력 분포 · 증량 손실을 실험 변수로 설정하였다.<sup>23)</sup> 시편 실험은 고강도(M100)와 일반강도 콘크리트(M30)로 분리하여 실험을

**Table 3.** Pore pressure of HSC and NSC

시편 번호	가스 온도	최대압력 (MPa)	최대압력 발생 깊이(mm)	최대압력 발생 온도(°C)
M100	600°C	3.8	50	210
M30		1.8	30	240

실시하였으며 그 주 내용은 Table 3과 같다. 최대 공극 압력은 HSC(고강도 콘크리트)가 낮은 투수성으로 인해 NSC(일반 강도 콘크리트) 보다 크게 발생하였고, HSC가 NSC보다 가열면 기준으로 약 20 mm 정도 깊은 부위에서 최대 공극압력이 측정되었다. 이를 토대로 분석해보면 단면결손에 의한 구조 손상 규모는 HSC가 NSC보다 높다고 판단되며, 폭발 현상은 HSC가 NSC보다 약간 낮은 온도에서 발생하게 된다.

3.2.2 하중재하 및 열팽창 구속

일반적으로 고온 가열시의 콘크리트는 하중을 재하할수록 폭발이 더 잘 발생하게 된다. 그러나, 하중재하를 적정수준으로 조절할 경우엔 오히려 폭발이 억제되는 현상이 나타나게 된다. 그 이유는 적당한 하중재하가 콘크리트 내부에 미세 균열을 발생시키게 되고 내부 공극을 커지게 하거나 늘리는 효과를 발생시켜서 수분의 흐름을 원활히 하게 하기 때문이다. 그러므로 하중재하 정도에 따라서 폭발발생에 미치는 영향은 Table 4와 같이 정도에 따라 변화하게 된다.

열팽창에 대한 변위 구속을 할수록 미세 균열을 억제하여 공극내의 수분의 이동을 억제하므로 폭발 현상을 발생시키는 원인이 된다. 그러나, 약간의 열팽창 구속은 열응력과 열 변형 차이를 완화시키는 역할을 하여 폭발현상을 경감하거나 지연시키는 효과를 발생하게 한다. 그러므로, Table 5와 같이 열팽창 구속에 따라 폭발 발생정도가 변화한다.

3.2.3 가열비율 및 화재강도

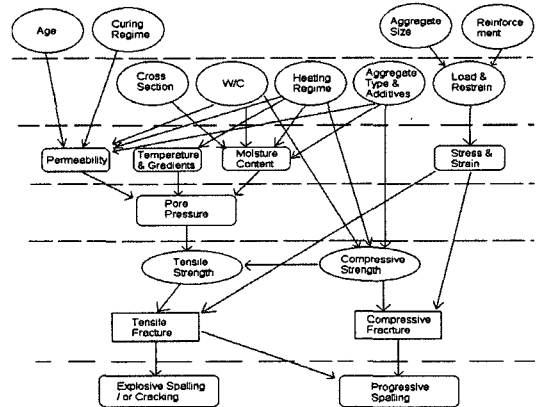
콘크리트 실험체의 가열 방법은 폭발 현상에 영향

**Table 4.** Effect on spalling in fire (load)<sup>24)</sup>

재하하중의 폭발발생 영향
하중재하 > 하중 비재하 > 적정한 하중재하

**Table 5.** Effect on spalling in fire (Restraint to Free Thermal Expansion)

열팽창 구속의 폭발발생 영향
열팽창구속 큼 > 열팽창구속없음 > 적정한 열팽창구속



**Fig. 11.** Summary of factors influencing spalling.

을 주는 주요 변수이며, 만약 실험체에 급격한 가열을 할 경우엔 폭발현상이 잘 발생하게 된다. 그 이유는 급격한 가열을 할수록 콘크리트 표면의 온도가 급속도로 증가하게 되고, 수증기가 빠져 나가기 전에 급속도로 증발하게 된다. 이러한 가열비율은 콘크리트가 직접적으로 받는 화재하중 및 강도에 영향을 주게 되며, 이러한 화재강도의 변화는 폭발현상을 유발하게 되는 직접적인 요인으로 작용하게 된다.

이러한 상기 연구내용들을 토대로 폭발유발요인들의 영향성을 분석한 결과는 Fig. 11과 같다. 각각의 요인들은 개별적인 인자로서 폭발을 유발하지 않으며, 상호 복합적인 유기적 상관관계 형성을 토대로 폭발현상의 요인으로 상존하고 있다.

4. 폭발 제어 방법

최근에는 이러한 고강도 콘크리트의 폭발현상을 억제하기 위한 연구가 진행되고 있는데 그 방법으로는 콘크리트의 배합을 조절하거나 배합시 미세섬유를 혼합하는 방법 등이 있다. 콘크리트의 배합을 조절하여 폭발을 억제하는 방법은 다음과 같다. 먼저 수분 함유량을 전체 콘크리트 중량의 3% 이하로 유지하며, ITZ의 두께를 조정(20 μm 이하)하여, 삼투압 발생을 억제시켜서 폭발을 제어한다. ITZ 두께 조정 방법은 시멘트 입도 크기를 세립화 하거나, 골재의 입도를 크게 하는 방법이 있다. 또한 잔골재와 굵은 골재의 배합비를 조정하는 방법이 있는데, 그 내용은 잔골재를 적게 배합하여 콘크리트 내의 공극을 크게 하여서, 수증기가 내부 삼투압에 의해 잔골재가 아닌 굵은 골재 사이로 이동하게 하여 폭발을 방지하는 방법이다.

또 다른 방법은 콘크리트 내부에 합성 섬유(주로



poly propylene 섬유)를 사용하여 폭렬을 제어하는 방법이 있다. 폭렬에 상대적으로 취약한 고강도 콘크리트의 경우 10 mm~20 mm 길이, 50  $\mu\text{m}$ ~200  $\mu\text{m}$  직경의 pp 섬유를 1.5 kg/m<sup>3</sup>~2 kg/m<sup>3</sup> 정도 첨가하는 것이 최근 유럽에서 고강도 콘크리트의 폭렬 제어의 효율적 방안으로 제시되고 있는 추세이다. 섬유는 콘크리트의 연성과 강도를 증가시켜서 균열과 폭렬을 방지하는 효과가 있으며, 폴리프로필렌 섬유가 폭렬을 추가적으로 방지하는 역할을 하는 이유는 대략 170°C의 낮은 온도에서 폴리프로필렌 섬유가 용융되기 때문에 콘크리트 혼합에 사용할 경우, 고온 가열시에 녹은 섬유가 공극압력의 상승을 감소시켜서 폭렬 현상을 억제하게 된다.

또다른 방법으로 FRP를 외부에 보강할 경우엔 재료의 축강도와 연성, 폭렬성능 등의 개선이 가능하지만, FRP는 가연성이며 유독가스가 배출되는 특성을 갖고 있기 때문에 화재 발생시에 이러한 문제에 대한 고려가 필요하다. GTT(유리변형온도)이상의 온도에서는 접착력 저하로 인해 탈락이 발생할 수 있기 때문에 이 부분에 대한 고려가 포함되어야 한다. 그러므로, ASTM E119에서는 FRP로 보강된 철근 콘크리트 구조물은 5 시간 이상의 내화성능 실험을 해야 하는 규정을 제시하고 있으며, ACI 440에서는 FRP로 인한 콘크리트의 강도 증진은 40%~50% 이하로 제한하고 있으며, 기둥 부재일 경우엔 25%~50%로 제한하고 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 콘크리트의 폭렬 현상에 대하여 발생과정과 원인을 문헌을 통하여 고찰하였다. 콘크리트의 폭렬 발생원인은 구성 재료의 열-수 역학적 상호작용에 의해 발생하며, 그 종류는 크게 Progress Spalling과 Explosive Spalling으로 분류된다. Progress Spalling은 콘크리트 Layer 사이에서 양립할 수 없는 재료의 열적 팽창으로 인해 발생하는 서로 다른 열응력 및 변형에 의해 발생하며, Explosive Spalling은 수증기의 탈수부진으로 공극 압력이 급격하게 커지면서 발생하게 된다.

일반적인 폭렬 발생온도는 대부분 200°C~400°C에서 발생하며, 폭렬에 직접적인 원인이 되는 요소는 수분함유량, 수증기에 의한 공극압력, 변형에 의한 응력변화 또는 하중제하, 가열비율 등으로 요약할 수 있다. 이러한 폭렬에 관한 문헌 분석을 토대로 콘크리트 폭렬 현상에 대한 영향성 평가를 폭렬 유발인자를 중심으로 고찰한 결과 Table 6과 같이 요약·정리할 수 있다.

Table 6. Factors influencing concrete spalling

영향 변수	폭렬 유발 영향성	폭렬 연관성
수증기압	↑	직접적
공극압력	↑	
수분함유량	↑	
투수성	↓	
재하하중	↑	상호 복잡적
가열비율	↑	
열팽창구속	↑	
인장강도	↑ or ↓	
시편크기	↓(전방향), ↑(일방향)	
골재 종류	규산질 > 탄산질	
재령	↑ or ↓	
인장철근	↑ or ↓	

※ ↑: 폭렬영향성 상승, ↓: 폭렬영향성 저하

현재 다양한 측면에서 폭렬 발생에 대한 대응 연구가 수행되고 있으나 정량적으로 제시된 통합 안전을 보장하는 설계 방법은 존재하지 않으며, low melting fiber의 첨가 분야에서 상대적으로 주목할 만한 성과가 나타나고 있는 것으로 사료된다.

이러한 고찰결과를 토대로 향후 효율적인 콘크리트 내부의 공극압력 측정방안을 강구하여 폭렬현상의 열적 특성과 연계된 상관관계를 실험적·수치 해석적으로 규명할 필요성이 있으며, 고온에서의 정확한 콘크리트의 재료적 특성에 대한 연구를 기반으로 수치해석 예측기법의 개발이 필요하다. 향후 이를 기반으로 구조적 측면에서의 폭렬 영향성 평가를 수행하여 단면결손으로 인한 구조적 불안정성을 예측하고, 제어할 수 있는 방안에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 감사의 글

“화재시 콘크리트 요소 폭렬영향성 고찰” 연구는 건설교통기술평가원 (05건설핵심 C09)의 지원 하에 수행 되었습니다.

## 참고문헌

1. <http://www.nema.go.kr/data/statistic/list.jsp>
2. BS 5950. PART8: Code of Practice for the Fire Protection of Structural Steelwork. British Standards Institute.
3. T. Harada, “Strength, Elasticity and Thermal

- Properties of Concrete Subjected to Elevated Temperatures”, ACI, SP-34, V.1, pp.393(1972).
4. Y. Ichikawa and G.L. England, “Prediction of Moisture Migration and Pore Pressure Build-up in Concrete at High Temperatures”, Nuclear Engineering and Design, pp.245-259(2004).
  5. K.D. Hertz, “Limits of Spalling of Fire-exposed concrete”, Fire Safety Journal, pp.103-116(2003).
  6. J.W. Dougill, “A Note on the Mechanisms of Spalling in Concrete”, Appendix to Fire Research Memorandum (No.70), Joint Fire Research Organization, Boreham Wood(1972).
  7. Y. Anderberg, “Spalling Phenomena of HPC and OC”, NIST Workshop on Fire Performance of High Strength Concrete in Gaithersburg(1997).
  8. Z.P. Bazant and W. Thonguthai, “Pore Pressure in Heated Concrete Walls: Theoretical Prediction”, Magazine of Concrete Research, pp.6776(1979).
  9. 최승관 외 25인., “신개념 NATM Composite 라이닝 공법 개발 보고서(1차년도)”, 한국건설기술연구원 (2006).
  10. J.A. Purkiss, W.A. Moris, and R.J. Connolly, “Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns - Correlation of Analytical Methods with Observed Experimental Behaviour, in Interflam 96”, Proceedings of the 7th International Fire Science and Engineering Conference, eds. Franks C. and Grayson S., 26-28 March, St John's College, Cambridge, Interscience Communications, pp.531-541(1996).
  11. J. Lindgard and T.A. Hammer, “Fire Resistance of Structural Lightweight Aggregate Concrete - A Literature Survey with Focus on Spalling”, Lightweight Aggregate Concrete - Science, Technology and Applications, By: Chandra S.; Berntsson L. William Andrew Publishing/Noye(2002).
  12. F. Arita, K. Harada, and K. Miyamoto, “Thermal Spalling of High-performance Concrete during Fire”, 2nd International Workshop on Structures in Fire, Christchurch, March(2002).
  13. Y. Sertmehemetoglu, “On the Mechanism of Spalling of Concrete under Fire Conditions”, Ph.D. Thesis, King's College, University of London(1997).
  14. U. Danielsen, T.A. Hammer, H. Justnes, and S. Smeplas, “Marine Concrete Structures Exposed to Hydrocarbon Fires”, SINTEF-report no STF65 A88064, Trondheim, pp.48(1988).
  15. H. Justnes and E.A. Hansen, “LWA Concrete for Floaters, SP4 Hydrocarbon Fire Resistance, Report 4.1-A Theoretical Evaluation based on Material Technology”, SINTEF Report no. STF65 F90009, Trondheim, pp.4(1990).
  16. L. Bostrom, U. Wickstrom, and B. ADL-Zarrabi, “Effect of Specimen Size and Loading Conditions on Spalling of Concrete”, Proceedings of the Third International Workshop on Structures in Fire, Ottawa, Canada, pp.235-248(2004).
  17. U.M. Jumpannen, “Effect of Strength on Fire behaviour of Concrete”, Nordic Concrete Research, 1989. Publication No.8.
  18. L.T. Phan, “High-strength Concrete at High Temperature: An Overview”, Proceedings of 6th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Leipzig, Germany, pp.501-518(2002).
  19. A.A.A. Zaman and P.J. Sullivan, “Explosive Spalling of Concrete Exposed to High Temperatures”, Concrete Structures and Technology Research Report, Imperial College, London(1970).
  20. H.L. Malhotra, “Fire Resistance of Structural Concrete Beams”, Fire Research Note No.741, Joint Fire Research Organization, Borehamwood(1969).
  21. T.J. Sharp, “The Influence of Elevated Temperatures on the Physical behaviour of Water in Concrete”, Ph.D. Thesis, King's College, University of London (1971).
  22. O. Kontani, “Experimental Determination and Theoretical Prediction of Pore Pressure in Sealed Concrete at Sustained High Temperatures”, Ph.D. Thesis, Northwestern University(1994).
  23. P. Kalifa, G. Chene, and C. Galle, “High-Temperature behaviour of HPC with Polypropylene Fibres from Spalling to Microstructure”, Cement and Concrete Research 31, pp.1487-1499(2001).
  24. C. Meyer-Ottens, “The Question of Spalling of Concrete Structural Elements of Standard Concrete under Fire Loading”, Ph.D. Thesis, Technical University of Braunschweig, German(1972).