

# 고강도 콘크리트의 폭렬발생 및 방지 메커니즘

## Investigation of Spalling Mechanism in High Strength Concrete



한민철\*  
Min-Cheol Han



허영선\*\*  
Young-Sun Heo



한천구\*\*\*  
Cheon-Goo Han

### 1. 서 언

콘크리트는 처음 개발된 이래로 현재까지 약 3,500년의 역사와 함께 인류문명에 지대한 영향을 미쳤다. 그동안 콘크리트 구조물에서는 크고 작은 화재가 발생하였으나, 이에 대한 구조물 자체의 피해는 근대에 들어와 그 사례가 보고되었을 뿐 과거에 지어진 콘크리트 구조물에서는 피해사례가 많지 않았다. 이러한 이유는 콘크리트 내부 조직의 치밀성과 관계가 있는데, 과거 대부분의 구조물은 일반강도의 보통 콘크리트로서 화재에 대한 붕괴 등의 위험 등에 노출될 가능성이 크지 않았으나, 1970년대 고성능감수제가 개발되면서 콘크리트가 고강도화 및 고성능화 되고, 콘크리트 조직 자체도 더욱 치밀해짐으로써, 이러한 고강도 콘크리트 구조물에 화재가 발생할 경우 폭렬을 유발, 결국 구조체의 붕괴 위험까지도 이르게 되었다. 이에 국내외 많은 학자 및 기술진들은 이러한 화재시 고강도 콘크리트의 폭렬문제 해결을 위해 많은 연구를 진행하였는데, 그 결과 다양한 폭렬방지 공법 개발 및 초고층 건축물의 내화공법 적용 사례도 보고되고 있으나, 고온 시 발생하는 폭렬 메커니즘에 대한 이론은 학자들마다 다른 각도에서 접근하고 있는 상황이다.

그러므로 본 고에서는 문헌고찰을 통해 여러 학자들에 의해 주장되어온 고온의 환경에 노출된 고강도 콘크리트의 폭렬 메커니즘 이론에 대해 보고함으로써, 새로운 개념의 폭렬메커니즘을 모델화하기 위한 참고자료로 제시하고자 한다.

### 2. 국외 연구동향

〈표 1〉은 유럽 및 세계 각국에서 발표된 고강도 콘크리트의

\* 정회원, 청주대학교 건축공학부 전임강사  
twhan@cju.ac.kr

\*\* 정회원, 청주대학교 건축공학부 석사과정

\*\*\* 정회원, 청주대학교 건축공학부 교수, 공학박사

폭렬문제에 대한 보고내용을 대표적으로 일부 정리하여 나타낸 것이다. 〈표 1〉의 내용에서와 같이 고온의 환경에 노출된 고강도 콘크리트에서 발생하는 폭렬방지에 대한 연구는 지금까지 다양하게 진행되어 왔는데, 그 중 폭렬발생 메커니즘과 폭렬방지 메커니즘을 규명하고자 한 학자들 중에는 대표적으로 Long T. Phan<sup>17)</sup>, Pierre Kalifa<sup>14)</sup> 및 Gary R. Consolazio<sup>11)</sup> 등이 있으며, 최근에는 Y. F. Fu<sup>24)</sup> 등에 의한 균열 메커니즘에 관한 연구도 보고되고 있다.

### 3. 폭렬발생 및 방지 메커니즘

#### 3.1 Long T. Phan

Long T. Phan<sup>17)</sup>은 NIST의 한 보고서에서 시간경과에 따른 온도변화를 측정하였고, 그 결과 각각의 수열단계에서 나타나는 3부분의 특징적 구간(perturbation)을 분석하여 폭렬발생 메커니즘을 규명하고자 하였다.

〈그림 1, 2〉는 Ø100×200 mm 원주형 공시체를 제작하여 표면, 중심부 및 표면과 중심부 사이에 각각 1개씩 총 3개의 열전대를 설치한 후, 6시간 내화시험 동안 측정된 온도이력 결과를 나타낸 것이다. 실험결과에서 보듯이 측정 위치에 따라 가열시험 동안 각기 다른 온도상승률을 나타내었는데, 〈그림 1, 2〉에서 수직점선으로 표시한 3부분에서와 같이 특징적인 구간(perturbation)이 관찰되었다. 그 내용은 다음과 같다.

- (1) 중심부의 급격한 온도상승률 저하(첫 번째 수직점선 부분)
- (2) 표면의 온도상승률 증가 및 동시에 발생하는 중심부의 온도상승률 저하(두 번째 수직점선 부분)
- (3) 중심부의 온도상승률 증가(세 번째 수직점선 부분)

이러한 3부분의 구간(perturbation)은 가열시험동안 발생되

표 1. 고강도 콘크리트의 폭발방지에 관한 연구동향

연구자	년도	연구제목	연구내용
ACI committee <sup>1)</sup>	1919	콘크리트의 내화성능에 관한 보고	골재 종류, 피복두께, 횡구속 조건 등에 따른 고온시 구조체의 붕괴 시간 측정
T.Z. Harmathy <sup>2, 3)</sup>	1973	콘크리트 벽 구조물의 내화설계	콘크리트 벽 구조물의 화재시 성상을 정의하고 화재시 콘크리트 구성재료의 기하학적 성질 분석
W.J. Copier <sup>4)</sup>	1983	일반 및 경량콘크리트의 폭발특성에 관한 연구	다양한 경량골재를 사용한 콘크리트의 폭발 특성 분석
T.D. Lin <sup>5)</sup>	1989	에폭시 코팅한 슬래브 콘크리트의 내화시험	실구조체 사이즈의 슬래브 콘크리트를 대상으로 에폭시 코팅을 실시하여 내화 성능 검토
S.Y.N. Chan <sup>6)</sup>	1992	슬래브 콘크리트의 내화시험	내화시험을 통한 슬래브 콘크리트의 폭발발생 가능 범위 분석
G. Sanjayan <sup>7)</sup>	1993	고강도 실리카폼 콘크리트의 폭발특성	실리카폼 사용에 따른 고강도 콘크리트의 폭발발생 위험 보고 및 피복두께의 영향 분석
A.N. Noumowe <sup>8)</sup>	1994	고강도 콘크리트에 미치는 고온의 영향	일반 강도 및 고강도 콘크리트의 폭발특성 및 온도변화에 따른 공극구조 분석
N. Khoylou <sup>9)</sup>	1996	콘크리트 함수율이 폭발특성에 미치는 영향	함수율, 모세관 공극, 수화물, 콘크리트 투수성 등의 복합적 요소에 의한 폭발 특성 분석
George C. Hoff <sup>10)</sup>	1996	해변가의 플랫폼에 시공된 고강도 콘크리트 내화특성	경량골재 종류변화 및 섬유 혼입에 따른 폭발특성 분석 및 대형 부재의 잔존강도 검토
Gary R. Consolazio <sup>11)</sup>	1998	급속한 고온시 습윤 모르타르의 수증기 압력 예측	폭발발생 메카니즘 분석 및 고온시 모르타르의 수증기 압력 예측 모델식 제안
D.A. Crozier <sup>12)</sup>	2000	철근 콘크리트 벽 구조물의 가력 내화시험	부재의 형상비, 피복두께, 강도, 배합조건에 따른 폭발특성
F.A. Ali <sup>13)</sup>	2001	화재시 고강도 콘크리트 기둥의 폭발	폭발발생의 열화 모델 제시 및 폭발방지를 위한 적정 함수율 분석
Pierre Kalifa <sup>14)</sup>	2001	PP섬유 혼입에 따른 폭발방지와 콘크리트 거동	섬유 혼입에 의한 폭발방지 메카니즘 제안 및 최적의 섬유 혼입량 결정
N.R. Short <sup>15)</sup>	2001	화재피해를 입은 콘크리트의 색깔 이미지 분석	각각의 수열온도에서 나타나는 콘크리트 색깔 변화 분석
A. Meda <sup>16)</sup>	2002	고강도 콘크리트의 고온시 거동	폭발발생 가능 온도범위 분석 및 폭발사태 분석
Long T. Phan <sup>17)</sup>	2002	고온시 고성능 콘크리트의 폭발 특성	폭발발생 가능온도 및 폭발발생의 원인 분석과 섬유 혼입에 따른 폭발방지 공법
K.D. Hertz <sup>18)</sup>	2003	화재시 고온에 노출된 콘크리트의 한계 특성	다양한 콘크리트 배합 조건에서 폭발 특성 분석 및 폭발방지 대책 제시
F.H. Olivares <sup>19)</sup>	2004	재활용 고무를 혼입한 고강도 콘크리트의 내화성능	3%의 고무를 혼입한 고강도 콘크리트의 역학적 특성 및 내화 특성 검토
S. L. Suhaendi <sup>20)</sup>	2005	하이브리드 섬유 혼입 콘크리트의 잔존내력 및 투수성	PP섬유 및 강섬유를 동시에 혼입한 고강도 콘크리트의 내화시험 후 잔존특성 검토
Gai-Fei Peng <sup>21)</sup>	2006	고온시 고성능 콘크리트의 폭발 및 잔존성능	하이브리드 섬유를 혼입한 고성능 콘크리트의 폭발 발생률 검토
Jianzhuang Xiao <sup>22)</sup>	2006	고온시 PP섬유 혼입한 고성능 콘크리트의 잔존강도	섬유 혼입량 증가에 따른 잔존강도 향상 분석
M.Y. Koca <sup>23)</sup>	2006	화재에 노출된 대리석 구조물의 공학적 특성	실제 화재에 의해 피해를 입은 구조물의 코어 체취를 통한 공극구조, 화해온도, 잔존내력 분석
Y.F. Fu <sup>24)</sup>	2006	온도의 영향을 받은 콘크리트 균열에 관한 다양한 실험	FEM 프로그램을 활용한 열응력 계산 및 다양한 시뮬레이션을 통한 균열 메카니즘 분석

는 단계별 수증기 상태의 변화와 관계가 있고, 잉여수와 결합수의 이동과 증발의 과정과도 연관이 있다. 부재의 중심과 표면에서 발생되는 첫 번째와 두 번째의 구간 (perturbation)은 <그림 1>에서와 같이 콘크리트의 내부온도가 각각 100°C와 180°C일 때와 거의 일치한다. 콘크리트의 내부의 온도가 약 100°C에서는 잉여수가 빠르게 증발하기 시작하여 수분이 열에 의해 부재의 중심으로 이동

하게 되는데, 이때 중심부의 온도상승률이 감소하여 결국 원주형 공시체의 표면과 중심부의 온도차를 크게 증가시킨다. 한편, 중심부의 온도가 180°C에 이르렀을 때는 상당한 양의 결합수가 증발하여 중심부의 온도상승률 저하를 유발한다. 표면과 중심부의 가장 큰 온도차는 중심부의 온도가 270°C일 때 나타나는데, 이는 원주형 공시체의 3번째 구간 (perturbation)과 일치하고, 이 시점에서 폭발이 발생한다.

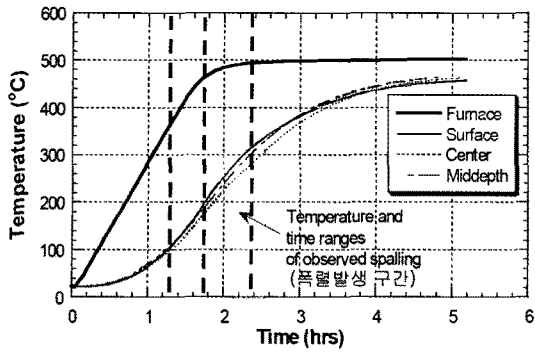
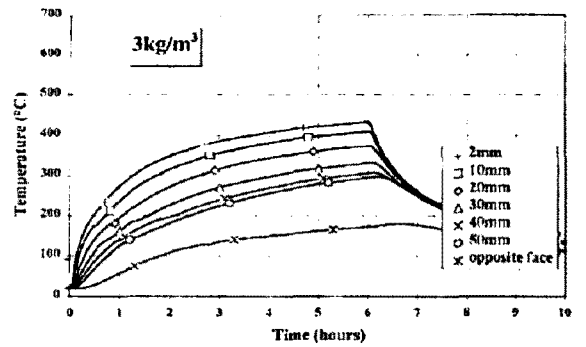


그림 1. 콘크리트 온도이력



(a) PP섬유 3 kg/m<sup>3</sup>

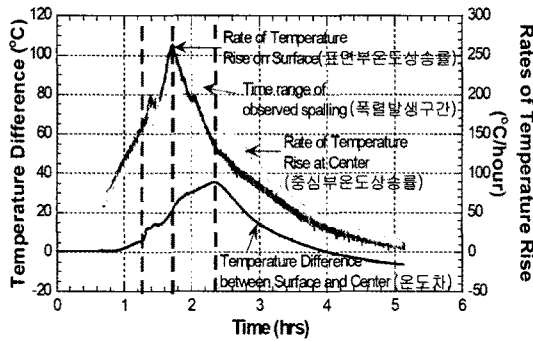
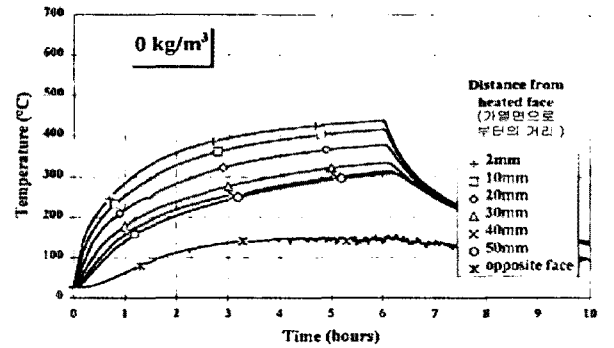


그림 2. 온도상승률 및 온도이력 차



(b) 플레인

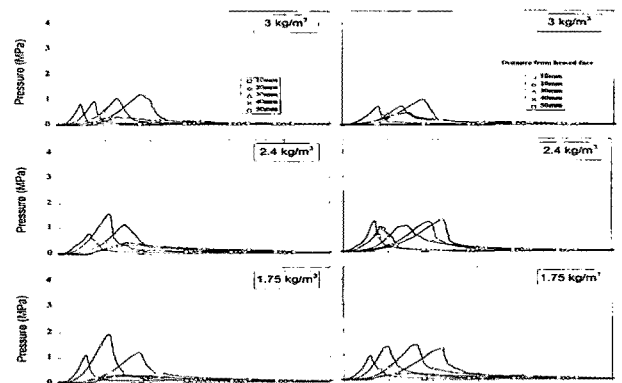
그림 3. 위치별 시간 경과에 따른 온도이력

### 3.2 Pierre Kalifa

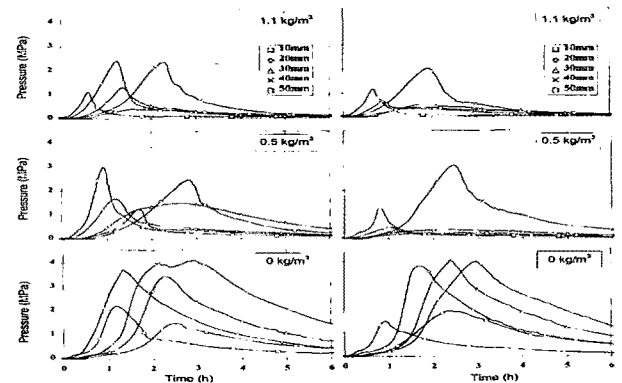
Pierre Kalifa<sup>14)</sup>는 PP섬유에 대한 폭발방지 메커니즘을 고온의 환경에서 섬유를 혼입한 콘크리트의 공극 구조 및 수증기압 변화와 섬유의 네트워크형성 모식도 등을 통해 규명하고자 하였다. 실험방법으로는 압축강도 100 MPa급 초고강도 콘크리트에 대하여 가열 면으로부터 10, 20, 30, 40, 50 mm 거리에서 콘크리트의 압력과 온도를 동시에 측정하였고, 가열 면으로부터 2 mm 부근에서는 온도이력만 측정하였다.

실험결과 <그림 3>과 같이 내화시험 중 콘크리트의 온도변화는 섬유의 혼입량과 관계가 없다는 것을 증명하였고, 두 번에 걸쳐 실시한 시간 경과에 따른 콘크리트의 내부 압력 변화는 <그림 4>에서와 같이 섬유혼입량 증가에 따라 현저히 줄어들었다. 특히, <그림 3, 4>를 비교해 보았을 때, 내부압력은 콘크리트의 온도가 폴리프로필렌(이하 PP)섬유 녹는점(171°C)에 도달할 경우 최대가 되는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 섬유의 재료적 특성에 기인한 결과로 섬유가 녹는점에 도달하면서 약 10% 팽창했기 때문인 것으로 분석하였다.

또한, <그림 5>는 Pierre Kalifa가 제안한 섬유를 이용한 폭발방지 메커니즘을 네트워크형성 모식도를 이용하여 나타낸 것이다. 콘크리트에 혼입된 PP섬유는 상호간의 매트릭스를 통하여 연결되어 존재하게 된다. 그러나 혼입량이 작을 경우에는 이



(a) PP섬유 1.75 ~ 3 kg/m<sup>3</sup>



(b) PP섬유 0 ~ 1.1 kg/m<sup>3</sup>

그림 4. 위치별 시간경과에 따른 콘크리트 압력

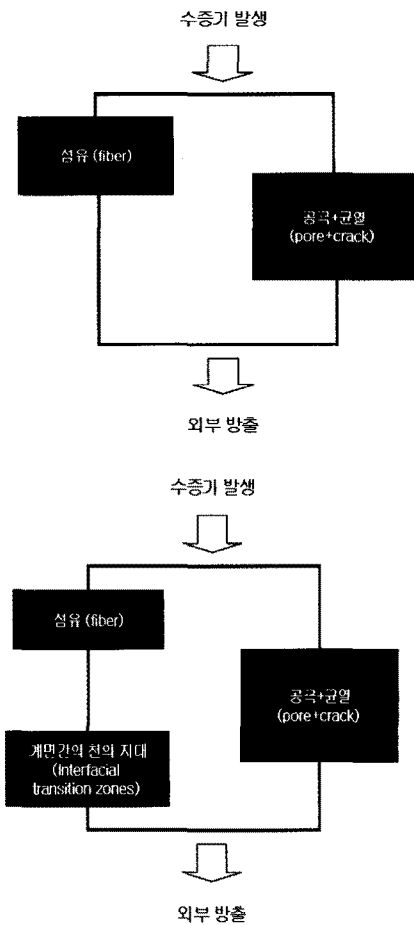


그림 5. 네트워크형성 모식도

러한 연결 상태가 좋지 못하여 다른 매트릭스 조직을 통해 네트워크를 형성하게 된다. 여기서 또 다른 매트릭스 조직이란 그림에서와 같이 콘크리트 내부에 발생하는 공극을 의미하는데, 모세관 공극, 천이지대(interfacial transition zone) 균열공극 및 기타 미세 공극 등이 해당된다. 즉 이러한 네트워크 형성은 화재시 발생하는 수증기압력을 원활히 외부로 배출시켜 폭발을 방지한다는 이론이다.

### 3.3 Gary R. Consolazio

Gary R Consolazio<sup>11)</sup>는 1990년대 많은 학자들에 의해 보고된 문헌들의 고찰을 통해 그림 3.8과 같이 폭발발생 메커니즘을 모델화 하였다. 본 모델은 현재까지 지배적으로 많은 학자들에 의해 보편화 되고, 인식되어온 폭발발생의 기본 메커니즘으로 그 내용은 다음과 같다.

본 모델은 크게 4단계로 분류되어 있는데, 1단계는 <그림 6-(a)>와 같이 고열이 고온의 환경에 노출된 콘크리트 안쪽 공극 속으로 침투(heat flow)하게 되면, 내부 공극 속에 존재하는 물(liquid

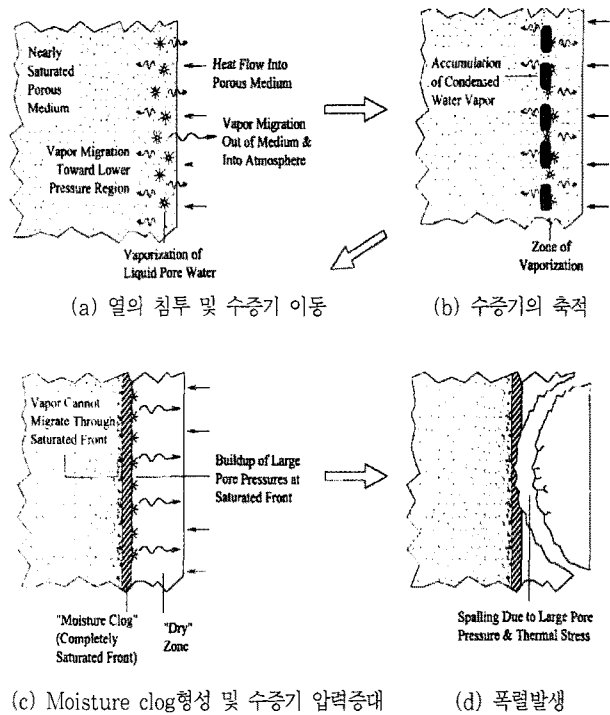


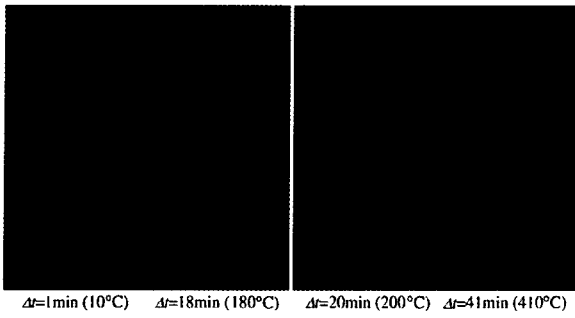
그림 6. 단계별 폭발발생 메커니즘

pore water)이 수증기화(vaporization) 되어 일부는 밖으로 이동하지만, 대부분은 압력이 낮은 내부로 이동하게 된다. 2단계에서는 <그림 6-(b)>에서와 같이 밖으로 이동한 수증기는 증발되어 없어지고, 내부로 이동한 수증기는 가열 면으로부터 일정한 거리에 쌓이게 된다(accumulation). 3단계에서는 시간경과에 따라 연속적으로 쌓인 수증기가 <그림 6-(c)>와 같이 수증기 층적층(harmathy에 의해 제안)를 형성하게 되는데, 이때부터 이 부분의 압력이 증가하기 시작하며, 내부의 수증기와 외부에서 발생된 수증기는 모두 이 부분에서 축적된다. 마지막 4단계에서는 수증기 층적층 영역의 압력이 계속적으로 상승하여 결국 콘크리트의 인장력을 상회하면서 부재 표면이 박리 및 탈락되는 폭발(spalling)현상이 발생하게 된다.

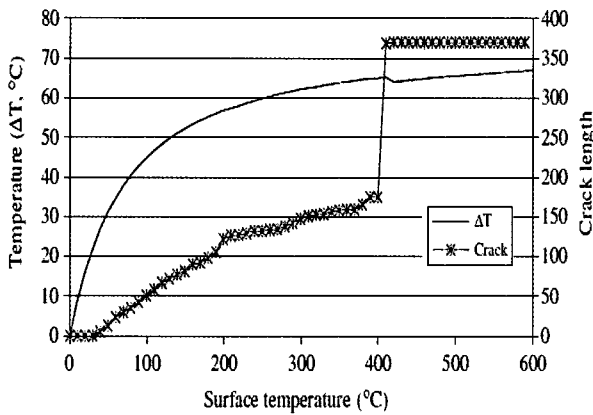
### 3.4 Y.F. Fu

Y.F. Fu<sup>24)</sup>는 2-D FEM 프로그램을 이용하여 압축강도 200 ~ 300 MPa급 초고강도 콘크리트 구조물의 열응력을 해석하고, 고온의 환경에서 발생하는 구조물의 균열 메커니즘을 3-D 모델화 하였다.

먼저, 본고에서는 다루지 않았으나 Y.F. Fu는 부재의 가열속도가 증가함에 따라 부재 내부에 작용하는 인장력이 커지고, 이러한 인장력은 중심부에서 가장 높은 것으로 보고하였는데, <그림 7>의 열응력 및 이에 따른 균열 발전 단계에서는 이러한 현상을 잘 반영하고 있다. 즉, 부재 표면의 온도가 200°C에 도달할



(a) 3-D 모델



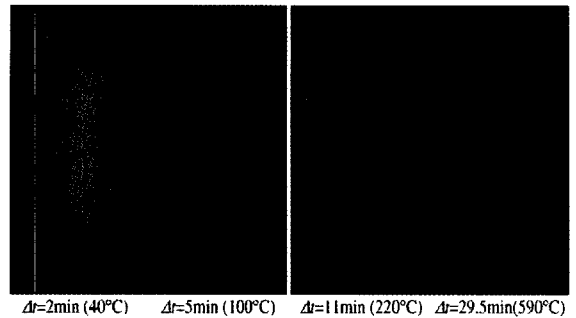
(b) 중심부와 표면부의 온도차 및 균열 발생 길이

그림 7. 온도변화에 따른 열응력 및 균열생성 단계(페이스트와 유사한 조건)

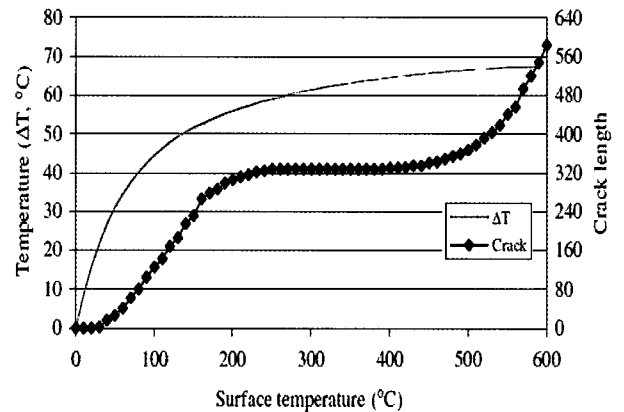
경우 부재의 중앙을 중심으로 열응력이 높게 발생되어 균열이 생기기 시작한 후, 균열은 부재의 바깥 표면쪽으로 확대되어 400°C 이상에서는 균열생성이 급격히 발생되다가, 이후에는 더 이상 균열이 생기지 않는 것으로 나타났다. 이를 "온도에 의해 발생된 균열 (temperature gradient-induced cracks)"로 정의한다. 그러나 이러한 균열에서는 부재의 일부분이 박리 및 탈락되는 폭발현상은 일어나지는 않는다.

〈그림 8〉에서는 다양한 구성재료(골재 가정)를 함유하고 있는 가상 시험체의 균열발전 단계를 표면부의 온도변화에 따라 표현한 것인데, 이러한 경우는 〈그림 7〉에서 나타난 균열 성장과는 달리 다른 구성재료(보다 강한 성질을 띠는 재료)의 영향에 의해 다음과 같은 단계로 제한적으로 균열이 발생한다(그림 6-(b)).

- (1) 100°C 부근에서 작은 균열 (temperature-induced shrinkage crack) 발생
- (2) 220°C 부근에서 온도에 의해 수평균열 (temperature gradient-induced cracks) 발생
- (3) 240°C 이상에서 구성재료의 계면간의 균열 (thermal mismatch cracks) 발생
- (4) 240°C ~ 460°C 부근에서 균열 발생 멈춤



(a) 3-D 모델



(b) 중심부와 표면부의 온도차 및 균열 발생 길이

그림 8. 위치별 시간경과에 따른 콘크리트 압력

(5) 460°C 이상에서 구성 재료를 중심으로 방사형 균열(radial cracks) 발생

또한, 여기서 가장 큰 비율을 차지하고 있는 구성재료의 계면간 균열은 〈그림 9-(a)〉에서와 같이 방사형 균열(radial cracks), 접선방향 균열(tangential cracks) 및 구성재료 자체의 균열(inclusion cracks) 등으로 균열 패턴을 정의하여 분류할 수 있다. 폭발은 부재내부의 공극에서 발생하는 압력과 균열의 발전 단계와 밀접한 관계가 있는데, 이는 또한 가열속도 및 구성재료의 물리적 특성에도 영향을 받게 된다. 〈그림 9-(b)〉에서와 같이 공극압력이 콘크리트 내부에서 발생하는 균열보다 빨리 증가될 경우 폭발발생 확률은 더욱 커지게 된다. 즉, 이러한 균열 발생은 본질적으로 내부에서 존재하는 공극 압력을 완화시켜 궁극적으로 폭발방지에 도움을 준다.

#### 4. 맺음말

본 고에서는 국외 학자들에 의해 주장되고 있는 고온의 환경에 노출된 교강도 콘크리트의 폭발 메커니즘에 대하여 대표적으로 Long T. Phan, Pierre Kalifa, Gary R. Consolazio 및 Y.F.

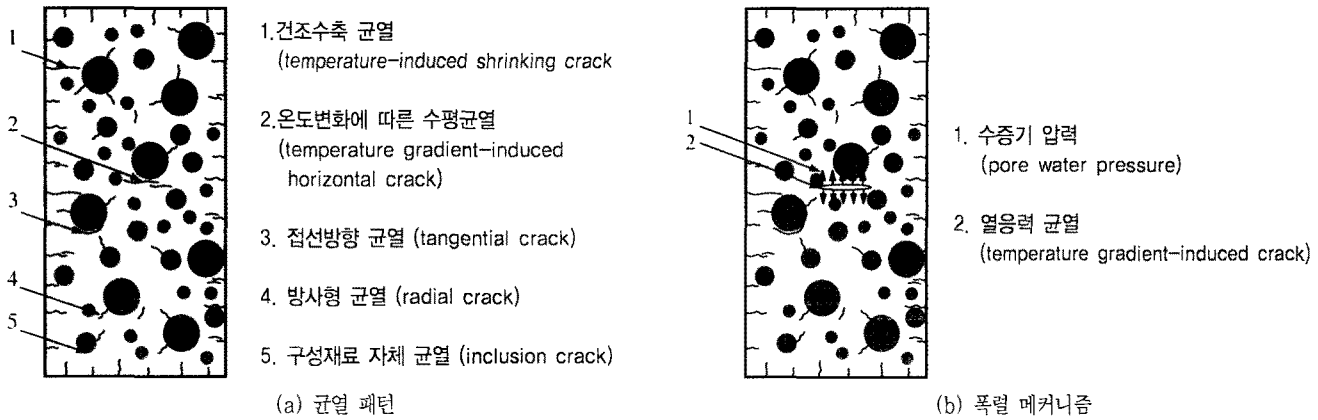


그림 9. 고온시 균열 패턴 및 폭발 메커니즘

Fu의 이론을 분석하여 기술하였다. 기존 학자들에 의해 보편적으로 받아들여졌던 폭발 메커니즘 이론에서는 고강도 콘크리트의 폭발발생 원인으로 내부 수증기 압력과 구성재료의 열팽창 계수 차에 의한 열응력을 중요한 요소로 검토하였고, 고온시 발생하는 수증기는 대부분 모세관 공극과 균열공극을 통해 이동되는 것으로 인식하였다. 그러나 이러한 이론들은 근본적으로 수증기가 콘크리트 마이크로 조직의 어떠한 경로를 통해 이동하는지와 어떤 근거로, 어느 시점으로부터 폭발이 최초 발생하는지에 대한 명확한 분석이 검토되지 않았고, 공극사이즈에 따라 수증기의 이동량을 평가할 수 있는 공극 구조 상호간의 정확한 스케일을 반영한 분석이 이루어 지지 않았다. 특히, 국내외 모든 학자들은 타설시 생기는 콘크리트의 블리딩수에 의한 물길공극과 이러한 물길에 의해 골재 밑에 갇혀있는 공기포에 의한 공극 등 콘크리트 조직 내에서 존재하는 이러한 거대 공극의 역할을 폭발발생 메커니즘으로 검토하지 않음으로써, 페이스트 및 모르타르에서 발생하는 전단폭발<sup>25~27)</sup>에 대한 원인을 정확히 설명할 수 없는 한계성을 나타낸다. 즉, 고온의 환경에서 발생하는 수증기 이동 경로를 정확히 분석하는 것은 폭발 발생 및 방지 메커니즘을 규명하기 위한 핵심적인 요소로써 이를 포괄적으로 설명할 수 있는 새로운 개념의 폭발 메커니즘을 모델화할 필요성이 제기된다.

참고문헌

1. ACI Committee on Fireproofing, Report of committee on fireproofing, 1919, pp. 335 ~ 338.
2. Hamarthy, T.A., *Effect of moisture on the fire endurance of building elements*, ASTM publication STP 385, America Society of Testing and Materials, 1965, pp. 179 ~ 203.
3. Hamarthy, T.A., *Design of Concrete Masonry Walls For Fire Endurance*, *ACI Materials Journal*, Vol. 39, 1973, pp.179 ~ 203.

4. W.J. Copier, *The Spalling of Normal Weight and Lightweight Concrete Exposed to Fire*, *ACI Materials Journal*, Vol.80, 1983, pp. 219 ~ 236.
5. T. D. Lin, R. I. Zwiers, S. T. Shirley, and R. G. Burg, *Fire test of concrete slab reinforced with epoxy-coated bars*, *ACI Materials Journal*, Vol.86, 1989, pp. 156 ~ 162.
6. S.Y.N. Chan, G.F. Peng, M. Anson, *Fire tests on ribbed concrete slabs*, *ACI Materials Journal*, 1992, pp. 345 ~ 347.
7. G. Sanjayan, L. J. Stocks, *Spalling of High-Strength Silica Fume Concrete in Fire*, *ACI Materials Journal*, Vol.90, 1993, pp. 170 ~ 173.
8. A. N. Noumowe, P. Clastres, G. Debicki, and M. Bolvin, *High Temperature Effect on High Performance Concrete (70-600°C) strength and porosity*, *ACI Materials Journal*, Vol. 145, 1994, pp. 157 ~ 172.
9. N. Khoylou, G.L. England, *The effect of moisture on spalling of normal and high strength concretes*, *Proceedings of the CCMS symposium, Chicago Illinois*, 1996.
10. George C. Hoff, *Fire Resistance of High-Strength Concretes for Offshore Concrete Platforms*, *ACI Materials Journal*, Vol.163, 1996, pp. 53 ~ 88.
11. Gary R. Consolazio, Michael C. McVay, Jeff W. RishIII, *Measurement and prediction of pore pressures in saturated cement mortar subjected to radiant heating*, *ACI Materials Journal*, Vol.95, 1998, pp. 525 ~ 536.
12. Damian A. Crozier and Jay G. Sanjayan, *Tests of Load-Bearing Slender Reinforced Concrete Walls in Fire*, *ACI Materials Journal*, Vol.97, 2000, pp. 243 ~ 251.
13. F.A. Ali, D.O. Connor, A. Abu-Tair, *Explosive spalling of high-strength concrete columns in fire*, *Magazine of concrete research*, 2001, pp. 197 ~ 204.
14. Pierre Kalifa, Gregoire Chene, Christophe Galle, *High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres From spalling to microstructure*, *Cement & Concrete Research* 31,

- 200, pp. 1487 ~ 1499.
15. N.R.Short, J.A. Purkiss, S.E. Guise, *Assessment of fire damaged concrete using colour image analysis*, *Construction & Building Materials* 15, 2001, pp. 9 ~ 15.
  16. A. Meda, P.G. Gambarova, M. Bonomi, High - performance concrete in fire exposed reinforced concrete sections, *ACI Structural Journal*, Vol.99, 2002, pp. 277 ~ 287.
  17. Long T. Phan, *High performance concrete at high temperature - an overview*, 2002, NIST report
  18. K.D. Hertz, Limits of spalling of fire-exposed concrete, *Fire Safety Journal* 38, 2003, pp. 103 ~ 116.
  19. F. Hernández-Olivares, G.Barluenga, *Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete*, *Cement & Concrete Research* 34, 2004, pp. 109 ~ 117.
  20. S.L. Suhaendi, T. Horiguchi, and N. Saeki, Residual Stress and Permeability of Hybrid Fiber-Reinforced High-Strength Concrete Exposed to High Temperature, *ACI Materials Journal*, Vol.228, 2005, pp. 1097 ~ 1108.
  21. Gai-Fei Peng, Wen-Wu Yang, Jie Zhao, Ye-Feng Liu, Song-Hua Bian, Li-Hong Zhao, *Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures*, *Cement & Concrete Research* 36, 2006, pp. 723 ~ 727.
  22. Jianzhuang Xiao, H. Falkner, On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures, *Fire Safety Journal* 41, 2006, pp. 115 ~ 121.
  23. M.Y. Koca, G. Ozden, A.B. Yavuz, C. Kincal, T. Onargan, K. Kucuk, Changes in engineering properties of marble in fire-exposed columns, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 43, 2006, pp. 520 ~ 530.
  24. Y.F. Fu, Y.L. Wong, C.S. Poon, C.A. Tang, *Numerical tests of thermal cracking induced by temperature gradient in cement-based composites under thermal loads*, *Cement & Concrete Research*(article in press).
  25. 이병열, 화재시 고성능 콘크리트의 폭발방지에 관한 연구, 청주대학교 박사학위논문, 2001.
  26. 두산산업개발(주), 화재시 고성능 콘크리트의 폭발방지 및 내화성능 향상 공법 개발, 2005 산학 공동연구, 청주대학교 산업과학연구소, 2005.
  27. 허영선, 초고강도 콘크리트의 내화성에 미치는 영향요인 분석 및 폭발 메커니즘 규명, 청주대학교 석사학위논문, 2006.

도서소개



구조동역학

저 자 : 김상대, 김명한  
 출판사 : 도서출판 대가  
 발행일 : 2006년 10월 25일  
 총쪽수 : 602면  
 정 가 : 25,000원

내용 : 구조동역학은 지진하중을 받는 구조물의 내진해석과 내진설계의 이론적인 바탕을 제공하는 학문으로서, 구조공학의 여러 분야 중에서도 가장 중요한 영역 중의 하나입니다. 이 책을 통하여 저자들은 구조동역학의 다양한 이론을 내진설계에 초점을 맞추어 독자들, 특히 구조설계 엔지니어들이 명확하게 이해할 수 있도록 서술하였습니다. 또한 내진설계 분야에 관심이 있는 구조공학 전공의 학부생과 대학원생에게 적절한 입문서가 될 수 있도록 계획하였습니다.

[목 차]

1. 단자유도계 구조물의 반응
2. 탄성 반응 스펙트럼
3. 다자유도계 구조물의 반응

4. 지진하중을 받는 구조물의 반응
5. 내진설계 기준과 정적해석법
6. 동적 내진구조 해석
7. 구조물의 진동제어