

P-13

고강도 콘크리트의 폭발발생 및 폭발저감 메커니즘에 관한 문헌적 고찰

A Study on the Mechanism of Explosive Spalling and Spalling Prevention Methods of High-Strength Concrete in Fire Temperature

정희진* · 이재영* · 김재환** · 한병찬** · 권영진***

Jung, Hee Jin* · Lee, Jae Young* · Kim, Jae Hwan** · Han, Byung Chan** · Kwon, Young Jin***

Abstract

Nowadays, the use of high strength concrete has become increasingly popular. Thus, the theory of this study gives a definition of HSC mechanism through study factors of spalling occurrence of HSC and solutions of failure mechanism. During the fire goes on, building structure using HSC causes explosive spalling and finally it gets to the breaking of the structure down. As a result of this failure mechanism, it remains to be investigated to prevent from explosive spalling of HSC and needs to provide basic problems of HSC at high temperature.

keywords : mechanism, spalling, high strength concrete

1. 서론

경제의 발전과 건축기술의 발전으로 인하여 초고층의 건축구조물이 증대되어왔으며, 이러한 초고층구조물에는 공간확보 및 내구성 증진을 위한 고강도콘크리트(High Strength Concrete, 이하 HSC)의 사용은 불가피하였다. 이러한 HSC의 발전은 1970년대 고성능감수체의 개발과 더불어 연구가 계속되어왔으며, 1990년대부터 국내 초고층구조물에 적용되어 왔다. 그러나 이러한 HSC의 경우 일반강도콘크리트(Normal Strength Concrete, 이하 NSC)와 달리 화재 시와 같은 고온의 환경에 노출되었을 때 폭음을 동반한 폭발(Spalling)현상이 발생된다는 것을 많은 연구자들에 의해 밝혀졌으며^{1~4)} 국내의 경우에는 본 연구 이외의 그 문제점을 지적하였고 그 대책으로 강구한 결과^{5~7)} 2008년도에 새로운 내화안전 규정이 제정하기에 이르렀다.¹²⁾ 또한 World Trade Center 및 원저타워 화재사례를 통해서 폭발저감 및 내화성능 확보의 필요성을 나타내었다. 이에 따라서 각국의 선진국에서는 고강도콘크리트의 폭발발생에 대한 메커니즘과 그에 대한 폭발대책에 관한 연구가 지속되고 있다. 그러므로 본 연구는 고강도콘크리트의 내화성능확보를 위한 국내의 폭발메커니즘에 대한 연구동향과 이에 따른 폭발저감대책에 관한 연구 동향에 대하여 조사하고자 한다.

2. 고강도 콘크리트의 폭발에 관한 연구

2.1 고강도 콘크리트의 폭발에 관한 국외 연구 동향

아래의 표 1.은 유럽 및 세계 각국에서 발표된 고강도 콘크리트의 폭발발생 메커니즘에 대한 보고내용 중 대표적인 메커니즘을 일부 정리하여 나타낸 것으로써, 내용에서와 같이 고온의 환경에 노출된 고강도 콘크리트에서 발생하는 폭발방지에 대한 연구는 지금까지 다양하게 진행되어 왔는데, 그 중 폭발발생 메커니즘과 폭발방지 메커니즘을 규명하고자 한 학자들 중에는 대표적으로는 Long T. Phan²⁾, Gary R. Consolazio³⁾ 및 Pierre Kalifa⁴⁾ 등의 폭발 및 폭발방지에 메커니즘에 관한 연구 보고가 현재까지 가장 유력한 메커니즘으로 주장되어지고 있다.

* 학생회원 · 호서대학교 소방방재학과 E-mail: heejin0303@hanmail.net

** 비회원 · 에이엠에스엔지니어링 기술이사 · 공박

*** 정회원 · 호서대학교 소방방재학과 · 교수

표 1. 폭렬발생 메커니즘과 폭렬방지 메커니즘의 규명

연구자	년도	연구제목	연구내용
ACI committee ¹⁾	1919	콘크리트의 내화성능에 관한 보고	골재 종류, 피복두께, 횡구속 조건 등에 따른 고온시 구조체의 붕괴 시간 측정
W.J. Copier	1983	일반 및 경량콘크리트의 폭렬특성에 관한 연구	다양한 경량골재를 사용한 콘크리트의 폭렬 특성 분석
A.N. Noumowe	1994	고강도 콘크리트에 미치는 고온의 영향	일반 강도 및 고강도 콘크리트의 폭렬특성 및 온도변화에 따른 골극구조 분석
N. Khoylou	1996	콘크리트 함수율이 폭렬특성에 미치는 영향	함수율, 모세관 공극, 수화물, 콘크리트 투수성 등의 복합적 요소에 의한 폭렬 특성 분석
F.A. Ali	2001	화재시 고강도 콘크리트 기둥의 폭렬	폭렬발생의 열화 모델 제시 및 폭렬방지를 위한 적정 함수율 분석
Pierre Kalifa ⁴⁾	2001	PP섬유 혼입에 따른 폭렬방지	섬유 혼입에 의한 폭렬방지 메커니즘 제안 및 최적의 섬유 혼입량 결정
A. Meda	2002	고강도 콘크리트의 고온시 거동	폭렬발생 가능 온도범위 분석 및 폭렬사태 분석
Long T. Phan ²⁾	2002	고온시 고성능 콘크리트의 폭렬 특성	폭렬발생 가능온도 및 폭렬발생의 원인 분석과 섬유 혼입에 따른 폭렬방지 공법
K.D. Hertz	2003	화재시 고온에 노출된 콘크리트의 한계 특성	다양한 콘크리트 배합 조건에서 폭렬 특성 분석 및 폭렬방지 대책 제시

2.2 국의 HSC의 폭렬발생 및 방지 메커니즘

(1) Long T. Phan (폭렬발생 메커니즘)

Long T. Phan²⁾은 NIST의 한 보고서에서 시간경과에 따른 온도변화를 측정하였고, 그 결과 각각의 수열단 계에서 나타나는 3부분의 특징적 구간을 분석하여 폭렬발생 메커니즘을 규명하고자 하였다.

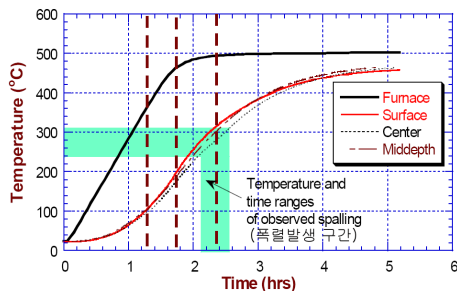


그림 1. 콘크리트 온도이력

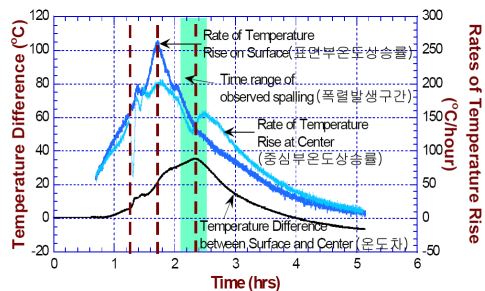


그림 2. 온도상승률 및 온도이력 차

그림 1, 2는 Ø100×200 mm 원주형 공시체를 제작하여 표면, 중심부 및 표면과 중심부 사이에 각각 1개씩 총 3개의 열전대를 설치한 후, 6시간 내화시험 동안 측정한 온도이력 결과를 나타낸 것이다. 실험결과에서 보듯이 측정 위치에 따라 가열시험 동안 각기 다른 온도상승률을 나타내었는데, 그림 1, 2에서 수직점선으로 표시한 3부분에서와 같이 특징적인 구간이 관찰되었다. 내용은 (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)와 같다. 이러한 3부분의 구간은 가열시험동안 발생하는 단계별 수증기 상태의 변화, 잉여수와 결합수의 이동과 증발의 과정과 연관이 있다. 부재의 중심과 표면에서 발생하는 1,2 번째의 구간은 그림 1에서와 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 이동하게 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 구간과 일치하고, 이 시점에서 폭렬이 발생한다.

(2) Gary R. Consolazio (폭렬발생 메커니즘)

Gary R Consolazio³⁾는 1990년대 많은 학자들에 의해 보고된 문헌들의 고찰을 통해 그림 1과 같이 폭렬발생 메커니즘을 모델화 하였다. 본 모델은 현재까지 지배적으로 많은 학자들에 의해 보편화 되고, 인식되어온 폭렬 발생의 기본 메커니즘으로 그 내용은 다음과 같다.

본 모델은 크게 4단계로 분류되어 있는데, 1단계는 그림 1-(a)와 같이 고열이 고온의 환경에 노출된 콘크리

트 안쪽 공극 속으로 침투(heat flow)하게 되면, 내부 공극 속에 존재하는 물(liquid pore water)이 수증기화(vaporization)되어 일부는 밖으로 이동하지만, 대부분은 압력이 낮은 내부로 이동하게 된다. 2단계에서는 그림 1-(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 1-(c)와 같이 수증기 축적층을 형성하게 되는데, 이때부터 이 부분의 압력이 증가하기 시작하며, 내부의 수증기와 외부에서 발생된 수증기는 모두 이 부분에서 축적된다. 마지막 4단계에서는 수증기 축적층 영역의 압력이 계속적으로 상승하여 결국 콘크리트의 인장력을 상회하면서 부재 표면이 박리 및 탈락되는 폭렬(Spalling)현상이 발생하게 된다.

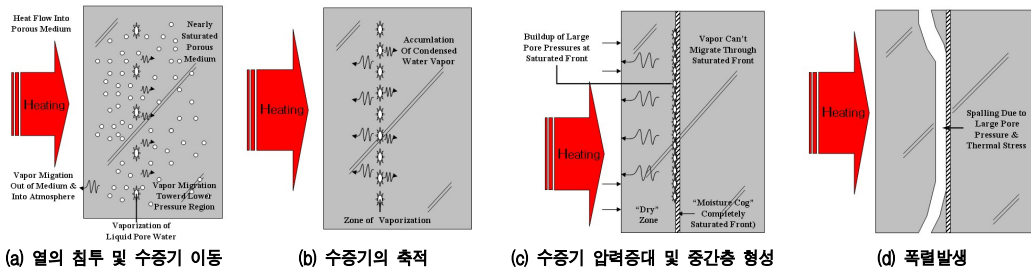


그림 1. 폭렬발생 메커니즘

(3) Pierre Kalifa(폭렬방지 메커니즘)

Pierre Kalifa⁴⁾는 PP섬유에 대한 폭렬방지 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 측정하였다.

실험결과 내화시험 중 콘크리트의 온도변화는 섬유의 혼입량은 관계가 없다는 것을 증명하였고, 시간 경과에 따른 콘크리트의 내부 압력 변화는 섬유 혼입량 증가에 따라 현저히 줄어들었다. 즉, Pierre Kalifa가 제안한 섬유를 이용한 폭렬방지 메커니즘은 콘크리트에 혼입된 섬유는 상호간의 매트릭스를 통하여 연결되어 존재하게 된다. 그러나 혼입량이 작을 경우에는 이러한 연결 상태가 좋지 못하여 다른 매트릭스 조직을 통해 네트워크를 형성하게 된다. 여기서 또 다른 매트릭스 조직이란 콘크리트 내부에 발생하는 공극을 의미하는데, 모세관 공극, 천이지대(Interfacial Transition Zone)균열공극 및 기타 미세 공극 등이 해당된다. 즉 이러한 네트워크 형성은 화재시 발생하는 수증기 압력을 원활히 외부로 배출시켜 폭렬을 방지한다는 이론이다.

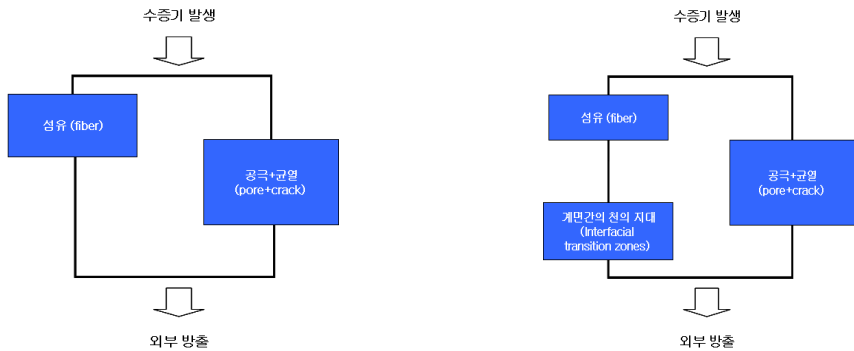


그림 2. 콘크리트 내부 수증기압의 배출 네트워크

2.3 고인성 내화모르타르(ECC)의 폭렬방지 메커니즘

본 연구실에서는 기존 고강도 콘크리트의 폭렬저감 메커니즘을⁸⁾ 바탕으로 콘크리트의 폭렬저감대책의 일환으로 고인성 내화모르타르를 이용한 고강도콘크리트의 폭렬저감공법에 관한 실험적 연구를 진행 하였으며, 메커니즘을 제안하였다. 그림 5-(a)는 ECC를 피복함으로써 고강도 콘크리트의 폭렬방지 및 수열온도 저감을 나타낸 내화메커니즘으로써 HSC의 표층부에 내화층을 형성하여 화재시 HSC의 수열온도를 저감하고, 내부의 수증기압을 배출함으로써 폭렬을 방지하며, 화염에 의한 열적 충격 및 차열 성능을 확보하는 방안을 들

수 있다. 그림 5-(b)는 ECC의 내화특성을 확인하기 위한 실험의 수열온도 데이터의 일례로써, 설계기준강도 80 MPa의 고강도 콘크리트 기둥부재(500*500*800 mm)의 화재실험 및 내화피복부재의 온도특성을 분석을 위한 평판부재 내화피복 실험을 통하여 폭발을 방지 및 차열성능을 확인하였고, 실험결과를 통하여 50 mm 내부 철근위치에서 수열온도를 약 350℃이하로 저감시키는 것으로 확인되었다.^{9~10)}

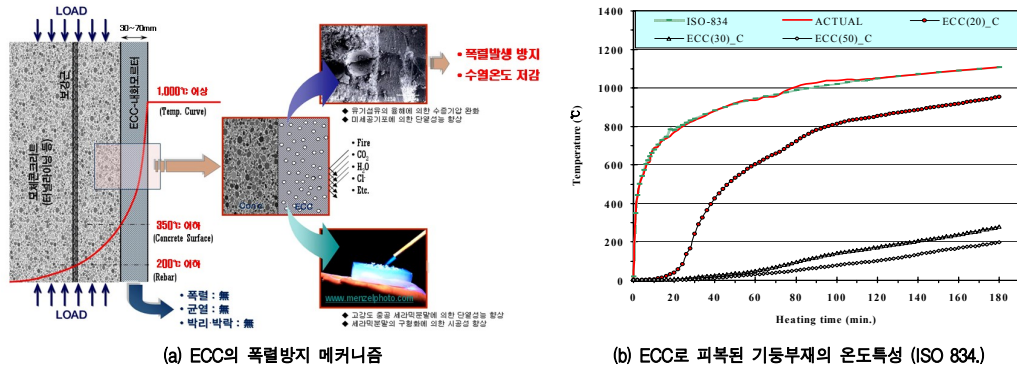


그림 3. ECC의 폭발 메커니즘 및 온도특성

3. 결론

본 조사에서는 국의 학자들에 의해 주장되고 있는 고온의 환경에 노출된 고강도 콘크리트의 폭발 메커니즘에 대하여 이론적으로 분석하여 기술하였으며, 기존 학자들에 의해 보편적으로 받아들여졌던 폭발 메커니즘 이론에서는 고강도 콘크리트의 폭발발생 원인으로 내부 수증기 압력과 구성 재료의 열팽창계수 차에 의한 열응력을 중요한 요소로 검토하였다. 따라서 이를 바탕으로 본 연구실에서는 고강도 콘크리트의 폭발저감 메커니즘 및 고인성 내화모르타르의 피복공법을 통하여 폭발저감 및 내화특성을 확인 할 수 있었다. 그러나 폭발저감대책에 앞서 폭발이 발생하는 최초시점, 콘크리트 조성물의 팽창 그리고 콘크리트 내부 수증기의 이동량에 대한 근본적인 분석은 이루어지지 않고 있다. 따라서 이를 규명하기 위한 정량적인 실험적 연구가 지속되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. ACI Committee on Fireproofing, Report of committee on fireproofing, 1919, pp. 335 ~ 338.
2. Long T. Phan, High performance concrete at high temperature - an overview, 2002, NIST report
3. 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.
4. 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.
5. 권영진, 고성능콘크리트의 폭발현상과 대책에 관한 연구동향 한국콘크리트학회지 제7권 제 3호, 2005.5
6. 권영진, 내화구조의 구조로써 콘크리트의 한계성능과 초고층 주거시대를 맞이하여 한국화재소방학회 하계 세미나자료집, 2005.8
7. 권영진, 내화재료및 구조로써 콘크리트의 한계성능과 초고층 주거시설의 화재안전성 한국콘크리트 학회 17권 5호, 2005.9
8. 한병찬, 권영진, 김재환, “화재온도를 받는 고인성·고내화성 시멘트 복합체의 거동”, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 19, No. 2, pp. 189-197(2006)
9. 이재영, 한병찬, 김재환, 권영진 “터널구조물의 내화성을 위한 고인성 내화모르타르의 내폭렬 성능 평가” 화재소방학회 춘계 학술발표논문집. pp. 89-94. 2007.
10. 이재영, 신이철, 김재환, 한병찬, 강석표, 권영진 “고인성 내화보수모르타르의 피복두께에 따른 고강도 RC부재의 내화성능에 관한 연구” 화재소방학회 추계 학술발표논문집. pp. 89-94. 2007.
11. 허영선, 초고강도 콘크리트의 내화성에 미치는 영향요인 분석 및 폭발 메커니즘 규명 청주대학교 석사학위논문, 2006.
12. Korea Building Code 고강도콘크리트 구조내화설계 지침서안, 2008.