고강도 콘크리트의 내화 특성에 관한 기존연구 고찰 및 실험적 연구

State-of-the-Art Research and Experimental Assessment on Fire-Resistance Properties of High Strength Concrete

김 우 석¹⁾ 강 현 구^{2)*} 김 화 중³⁾
Woo-Suk Kim Thomas H.-K. Kang Wha-Jung Kim

Abstract

This paper reviews past literatures relevant to fire-resistance properties of high strength concrete and investigates spalling mechanism of high strength concrete in fire. First, literatures were reviewed on spalling occurrence and fire-resistance methods. Second, a chemical change of concrete components in an elevated temperature was presented. Finally, the mechanism of the spalling occurrence and spalling resistance were examined in terms of hybrid fiber content. The focus of the experimental study as part of this research is to investigate the effects of fire on the variation of thermal properties of high strength concrete, which tends to be used in super tall buildings. This experimental study was devised to investigate the fire-resistance performance of high strength concrete containing hybrid fibers. A total of 48 test specimens were exposed to high temperature ranging from 100°C to 700°C, including room temperature (~20°C). Test results provide valuable information regarding fire-resistance properties of strength concrete with 100 MPa or greater.

Keywords : High strength concrete, Fire-resistance properties, Hybrid fiber

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

2014년 현재 고강도 콘크리트의 수요가 국내외 초고층 건축물의 급부상으로 인해 빠르게 증가하는 추세 (trend)에 있고 그에 따라 100MPa급 이상의 고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 (RC) 구조물이 국내에서도 다양하게 설계·시공되고 있다. 일반적으로 콘크리트는 다른 구조재료에 비해 열전도율과 열 확산계수가 현저히 낮아 대표적인 내화구조재료로서 널리 사용되어지고 있으나, 화재시 콘크리트 내부온도가 600°C 이상이 되면 급격한 재료물성의 내력저하 (strength degradation)가 발생하는 것으로 알려져 있다. 더욱이 보통강도 콘크리트에 비해 낮은 물시멘트비 (w/c ratio)와 치밀한 콘크리트 미세조직구조를 가진 고강도 콘크리트는 화재시 내

부 수증기압 증가 및 내부 열응력 증가에 의한 폭렬 (spalling) 현상과 공극량 증가에 의한 내력저하가 발생하기 때문에 이에 따른 원인 분석과 대책이 절실하게 필요한 실정이다.

이에 국내외 다수의 연구자들은 화재발생시 고강도 콘크리트의 폭렬문제를 해결하기 위하여 다양한 폭렬발생 메커니즘을 분석하고 폭렬방지 공법 개발 및 내화공법의 현장적용 사례 등에 관한 연구를 진행하였다. 이러한 폭렬현상을 방지하기 위한 방안으로는 콘크리트의 온도상승을 억제하는 방법, 내부 수증기를 빠르게 배출시키는 방법, 횡구속 등을 통해서 콘크리트의 비산을 억제하는 방법 등이 있다. 이중 내부 수증기를 빠르게 외부로 배출시키는 방법으로서 콘크리트 비빔시 폴리프로필렌섬유 (PP섬유: Poly-Propylene fiber)를 혼입하여 화재시 섬유가 녹아 생긴 통로 (path)를 통해 내부 수증기를 배출하고 수증기압을 낮추어 폭렬을 방지하는 방법이 가장 경제적이고 안전한 방안으로 보고되었다 (Kalifa

1) 정회원, 금오공과대학교 건축학부 교수
2) 정회원, 서울대학교 건축학과 교수, 교신저자
3) 정회원, 경북대학교 건축토목공학부 교수

* Corresponding author : tkang@snu.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2014년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

et al., 2000; Xiao and Falkner, 2006; Noumowe et al., 2009; Kim et al., 2011a; Kim et al., 2011b; Han et al., 2002; Han et al., 2003; Han et al., 2006; Pei et al., 2006; Han et al., 2007; Han et al., 2009).

하지만 아직까진 고강도 콘크리트의 고온 특성에 관한 연구가 상당히 부족하고 그 실험방법에 대해서도 제대로 정립되지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 선행된 국내외 문헌들을 조사하고 그 연구결과를 토대로 하여 국내실정에 맞는 가장 적절한 설계변수를 선정하고 온도별 (100℃~700℃)로 가열하여 고강도 콘크리트의 온도별 열적 특성 변화를 파악하여 궁극적으로 고온에서의 고강도 콘크리트 재료 모델을 개발하는데 있어 그 기초적 자료를 제공하고자 한다.

1.2 연구의 내용 및 방법

본 연구는 초고층 건축물의 고강도 콘크리트의 화재시 폭발 현상의 방지를 위해 일정량의 섬유를 고강도 콘크리트에 혼입한 뒤, 상온 (약 20℃)에서 700℃까지 가열하여 가열 온도에 따른 고강도 콘크리트의 열적 특성 변화를 규명하고자 하였다. 그 일환으로 총 48개의 100MPa급 고강도 콘크리트 공시체에 고강도 콘크리트의 폭발을 방지하기 위해 PP섬유와 나일론섬유 (NY섬유: **N**Ylon fiber)를 혼합한 하이브리드 섬유 (HB섬유: **H**yBrid fiber)를 혼입하여 제작한 후 냉간상태에서 온도변화에 따른 내화실험을 진행한 후 최종적으로 냉간 상태에서의 압축강도와 탄성계수 및 응력-변형률의 관계를 통한 고강도 콘크리트의 역학적 특성 및 내화특성을 분석하고자 하였다.

2. 기존연구 고찰

화재시 폭발 현상의 방지 및 고온에서의 고강도 콘크리트 특성에 대한 국·내외 연구는 다음과 같다. 우선 국외의 연구내용을 살펴보면 Phan and Carino (2002)는 시간경과에 따른 고강도 콘크리트의 온도변화를 측정하였고, 그 결과 각각의 수열단계에서 나타나는 단계별 수증기 상태의 변화와 잉여수와 결합수의 이동과 증발의 과정을 분석하여 폭발발생 메커니즘을 규명하였다. 그 주요 내용으로는 콘크리트의 내부온도가 100℃에서 잉여수가 빠르게 증발하였고, 180℃에 도달하였을 때 상당한 양의 결합수가 증발하여 공시체 중심부의 온도 상승률 저하를 유발하였으며 공시체 중심부의

온도가 270℃에 이르렀을 때 표면과 중심부 사이에 가장 큰 온도차를 나타내었다는 것이다.

Castillo and Durrani (1990)는 62.8MPa, 89MPa의 고강도 콘크리트에 대하여 사전재하 (preloaded)와 사전비재하 (unloaded) 상태로 나누어 실험하였고 고온시 고강도 콘크리트의 열적 특성을 규명하기 위해 승온 온도를 7~8℃/min으로 설정하여 100~800℃ 구간사이에서 온도를 단계별 (100℃)로 상승시키며 내화실험을 진행하였다. 그 결과 고강도 콘크리트는 400℃에서 점진적으로 강도 손실을 보이며 800℃에 도달하였을 때는 상온 (23℃)의 30%정도로 강도가 저하되며 사전재하를 적용한 경우 강도의 손실을 경감시키는데 이 점이 있다고 발표하였다.

Consolazio et al. (1998)은 기존 연구를 토대로 하여 폭발 발생 메커니즘을 모델화하였는데, 그 모델은 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 나타나듯이 우선 화염이 고온에 노출된 콘크리트 안쪽 공극 속으로 침투하게 되면 내부 공극 속에 존재하는 물이 수증기화되어 일부는 밖으로 이동 (증발되어 없어짐)하지만 대부분은 압력이 낮은 내부로 이동하게 되고, 내부로 이동한 수증기는 가열 면으로부터 일정한 거리에 축적된다. 시간경과에 따라 연속적으로 쌓인 수증기가 축적층을 형성하게 되고 수증기 축적층 영역의 압력이 계속적으로 상승하여 결국 콘크리트의 인장력을 상회하면서 부재 표면이 박리 및 탈락되는 폭발현상이 발생하게 된다는 것을 이론적으로

Fig. 1 Sequence of steps leading to fire induced spalling (Adopted: Consolazio et al. (1998))

증명하였다.

Hammer (1995)는 고온시 경량골재와 일반쇄석을 사용한 69~118MPa까지의 고강도 콘크리트에 대한 연구를 수행하였다. 온도 300℃에서 다량의 수증기가 방출됨으로써 폭렬에 의한 파괴가 발생하였고, 300℃ 이상의 온도에서는 탄성계수가 빠른 비율로 감소하였으며 경량골재를 사용한 고강도 콘크리트의 강도 손실은 일반골재를 사용한 고강도 콘크리트의 강도 손실과 비교하여 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

Hertz (1992)는 고강도 콘크리트에 폭렬현상을 방지하기 위해 14~20%정도의 실리카폼 (압축강도 170MPa)을 혼입한 고강도 콘크리트에 승온 온도 1℃/분으로 650℃까지 상승시킨 후 1℃/분 속도로 천천히 냉각시켜 상온에 이르게 한 뒤 최종적으로 냉간상태에서의 내화실험을 수행하여 고강도 콘크리트의 폭렬 발생 가능성과 폭렬방지 대책에 관한 연구내용을 발표하였다.

Husem (2006)은 실리카폼과 고성능 감수제를 사용한 보통 마이크로 콘크리트를 제작하여 200℃, 400℃, 600℃, 800℃, 1000℃에서의 압축강도와 휨강도를 측정하였다. 고온가열을 받은 시험체를 물과 공기중에 식혀 냉간 상태에서의 실험을 진행하였고, 상온 (20℃)에서 200℃까지는 강도가 감소되지만 200℃에서 400℃까지는 강도가 증가하고 400℃이후 다시 강도가 급격히 감소한다고 보고하였다. 또한 300℃이전까지는 시멘트 페이스트와 골재에 고온이 미치는 영향이 적지만, 300℃이후 시멘트 페이스트와 골재에 상당한 변화가 발생한다고 발표하였다.

Kalifa et al. (2000; 2001)은 고온시 PP섬유를 혼입한 콘크리트의 공극 구조 및 수증기압 변화와 섬유 네트워크형성 모식도 등을 통해 PP섬유에 대한 폭렬방지 메커니즘을 규명하고자 하였다. 콘크리트에 혼입된 섬유는 상호간의 매트릭스 (모세관 공극, 천이지대 균열공극 등)를 통하여 연결되어 네트워크를 형성하게 되는데 이러한 네트워크 형성은 화재시 발생하는 수증기압을 원활히 외부로 배출시켜 폭렬을 방지한다는 것을 규명하였다.

Xiao and Falkner (2006)는 고강도 콘크리트에서 PP섬유의 내화성능을 검증하기 위하여 100×100×100mm의 큐브공시체와 100×100×515mm의 시험체를 설계강도 50, 80, 100MPa로 설정하여 상온 (20℃)에서 900℃까지의 온도에서 고강도 콘크리트의 내화성능 실험을 수행하였다. 상온일 때 103.1MPa를 기준으로 200℃에서 95MPa, 400℃에서 102.8MPa를 나타내었고 400℃ 이후 급격한 강도 감소가 나타난다고 보고하였다. 이는 고온에 노출된 고강도 콘크리트의 잔존 압축강

도 (residual compressive strength)는 일률적으로 저하하는 것이 아니라 상온에서 400℃까지의 범위 내에서 불규칙적인 저하가 발생되었는데, 이는 섬유가 녹아 콘크리트 내부에 공극을 형성하여 수증기가 외부로 배출되었기 때문이다.

국내에서 발표된 연구내용을 살펴보면 Song et al. (2004)은 고온에 노출된 실리카 폼을 혼입한 고강도 콘크리트의 공극구조변환을 보고한 바 있다. 승온 온도 800℃까지의 실험을 통해 가열온도가 증가할수록 공극도 증가하고 전공극률은 가열 온도에 따라 동일한 경향을 보이고 있으며 물의 증발 및 시멘트 수화물의 탈수에 기인하여 공극분포의 증감 폭이 커진다는 것을 밝혀냈다.

Hong and Yang (2005)은 고온에서 60MPa급 고강도 콘크리트의 역학적 특성 및 폭렬 특성을 파악하기 위해 가열온도, 가열 지속시간, 냉각 방법 등에 따른 실험을 수행하였다. 주요 변수인 가열온도는 20, 100, 200, 450, 600, 800℃로 차이를 두고, 가열 지속 시간을 24MPa급 보통강도 콘크리트의 경우 30분으로 하고, 60MPa급 고강도 콘크리트의 경우 30, 60, 120분으로 설정하였다. 가열 직후 콘크리트 공시체의 냉각 방법으로는 서냉법과 급냉법을 실시하였는데 고온에 노출된 보통강도 콘크리트는 800℃에서 폭렬하지 않고 미세 균열만 발생하는 것으로 나타난 반면에 고강도 콘크리트의 경우에는 가열온도 450℃에서 가열 지속시간 30분에 이를 때 폭렬 현상이 발생하는 것을 밝혀냈다. 또한, 콘크리트의 강도가 높아질수록 비열 및 열전도율이 높아 동일 가열 시간에 더 높은 온도를 유지하였고 냉각 속도도 더 빠르게 나타난다는 사실을 규명하였다.

Kim et al. (2008)은 고강도 콘크리트의 폭렬 방지를 위해 공시체의 가열조건, 재하 방법을 달리해서 고강도 콘크리트의 역학적 특성을 알아봄으로써 내화능설계의 기초데이터 구축을 위한 연구를 진행하였다. 연구결과 상온과의 비교시 100℃에서는 압축강도 (80~85%)와 탄성계수 모두 감소하다가 200℃ 범위에서는 압축강도가 대략 10%정도 상승한 후 300℃이후 압축강도가 지속적으로 감소하였는데 특히 강도가 높을수록 고온하에서 압축강도가 큰 폭으로 감소한다는 것을 실험을 통해 규명하였다. 또한 Kim et al. (2011a)은 고온을 받은 100MPa 이상 고강도 콘크리트의 역학적 특성에 관한 골재의 영향을 규명하기 위해 잔골재율, 굵은 골재의 최대 크기 및 물결합재비 (w/b ratio)를 주요 변수로 하여 고강도 콘크리트의 열적 거동에 관한 실험을 수행하였다. 그 결과 500℃의 온도에서 가열된 고강도 콘크리트의 잔존 역학적 특성은 주요 변수에 영향을 받는 것으로 나타났다.

Kim et al. (2005)은 콘크리트의 내부온도가 목표온도 (20, 100, 200, 300, 400, 600, 800℃)에 도달하였을 때 보통강도 콘크리트와 고강도 콘크리트 각각의 열적 특성을 분석하였고 화재시 강도별 역학적 특성 모델을 제시하였다. 또한 Kim et al. (2010)은 폭렬 저감재인 PP섬유와 강섬유 (steel fiber)를 혼입한 하이브리드 섬유 (FC섬유: Fiber-Cocktail fiber)를 사용한 고강도 콘크리트의 구조적 안전 성능을 평가하고자 하였으며 고강도 콘크리트의 내화성능을 평가하기 위하여 평가의 기준이 되는 탄성계수의 역학적 모델을 제시하였다. 그 결과를 살펴보면, 40~100MPa급 고강도 콘크리트 구조부재에서 탄성계수의 손실은 보통강도 콘크리트와 고강도 콘크리트 모두 상온과 100℃의 온도 범위에서 나타났고, 탄성계수는 보통강도와 고강도 콘크리트 모두 100℃에서 300℃의 온도 범위에서 급격하게 감소하는 경향을 나타낸 후 300℃ 이상의 범위에서 보통강도 콘크리트와 고강도 콘크리트 공히 영구적인 탄성계수의 손실 현상이 나타났다.

한편 청주대학교 한천구 교수의 연구실은 화재시 고강도 콘크리트의 내화 특성변화에 관하여 다년간 상당수의 연구를 진행하였다. 주요 연구 성과들을 살펴보면 우선 Han et al. (2002)은 초고층 건축물의 폭렬 현상 방지를 위한 PP섬유의 혼입률 및 시험체의 크기 변화에 따른 폭렬 현상 및 강도 특성을 파악하여 내화성능 향상을 검토하였다. 그 연구결과 중 가열 후 잔존 압축강도를 살펴보면 PP섬유 무혼입 콘크리트의 경우 상온시 압축강도의 55% 전후로 나타났고, PP섬유 0.05% 이상을 혼입한 공시체의 경우에는 65% 전후로 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 이로써 PP섬유를 혼입하였을 경우 폭렬 현상의 방지 효과뿐만 아니라 잔존 압축강도에 대해서도 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 Han et al. (2003)은 PP섬유 혼입 및 메탈라스 횡구속에 의한 고성능 콘크리트의 폭렬방지에 관한 화재를 가정한 내화 실험을 통하여 폭렬방지 성상 및 잔존내력 등을 검토하였다.

2006년에 Han et al. (2006)은 현재 실무에서 적용되고 있는 고성능 RC 기둥과 메탈라스로 횡구속하고 내화 PC판을 마감재로 부착한 PP섬유 혼입 기둥부재를 대상으로 3시간 재하 가열시험을 실시하여 화재시 고성능 콘크리트 구조물의 폭렬 및 내화성능을 검토하였고, Pei et al. (2006)은 60MPa급 고강도 콘크리트의 화재시 PP섬유의 혼입률 변화에 따른 콘크리트의 기초적 특성과 화재를 상정한 내화실험을 실시한 후 폭렬성상 및 잔존 압축강도 특성 등을 검토하였다. 또한 Han et al. (2006)은 기존 선행연구의 실험 결과를 토대로 폭렬방지에 효과가 있는 것으로 알려진 PP섬유와

친수성 재료로서 유동성 개선을 기대할 수 있는 폴리비닐알콜섬유 (PVA섬유: PolyVinyl Alcohol fiber)에 대한 실험을 수행하였는데, 섬유혼입률 변화에 따른 콘크리트의 기초적 특성 분석을 위하여 공시체 및 Mock-up 부재 실험체를 3시간 내화실험하여 폭렬방지 성능 및 잔존 압축강도 성능 등의 내화특성을 검토하였다. 그 결과 40MPa급 고성능 콘크리트에서 PP 섬유 및 PVA 섬유의 혼입률을 0.1% 이상으로 배합할 경우에 양호한 폭렬 방지 성능을 보이는 것으로 나타났다.

2007년에 Han et al. (2007)은 초고층 건축물의 고강도 콘크리트의 화재 발생 시 콘크리트 폭렬 현상 방지를 위한 연구의 일환으로 폭렬 현상에 영향을 미치는 콘크리트 공극 구조 및 폭렬 발생의 영향 요인을 고찰하여 폭렬 발생 메커니즘을 규명하고자 하였다. 이 연구의 주요 실험 변수로 물결합재비 (w/b ratio), 혼화제 종류, 공기량, 굵은 골재 최대치수, 함수율, 성형방법 등 각 요소별 변수를 2~3가지 수준씩 계획하여 총 14가지 조건으로 실험을 진행하였다. 실험결과 다량의 공기량을 함유한 공시체와 낮은 함수율 및 실리카 폼을 사용하지 않은 시험체에서는 0.05%의 섬유혼입률 (V_f)에서도 폭렬이 방지되는 것으로 나타났고 이를 통해 콘크리트 조직 내의 거대 공극, 수분 함유량 및 밀실한 (dense) 공극 구조 형성은 화재 시 폭렬과 높은 연관성이 있다는 것을 증명하였다. 또한 WPB (Waterway Passages by Bleeding water: 블리딩 수에 의한 공기 이동 통로)에 의한 폭렬 발생에 대한 가설을 입증하였는데 콘크리트 조건에서의 박리 폭렬 (exfoliation spalling)과 모르타르에서의 전단 폭렬 현상, 그리고 원심 성형에 의한 시험체의 폭렬 방지 현상의 세 가지 가설을 입증함으로써 WPB에 의한 폭렬 메커니즘을 이 연구를 통해서 규명하였다. 또한 Pei et al. (2007)은 화재시 실드 터널, 침매 터널과 같이 콘크리트 자체가 구조체로서 콘크리트의 안전성이 중요시 되는 도로터널의 폭렬방지를 목적으로, 섬유의 종류 및 혼입율 변화에 따른 콘크리트의 기초적 특성과 화재를 상정한 내화시험을 실시한 후 폭렬성상 및 잔존 압축강도 특성을 검토하였다.

2008년에 Han et al. (2008a)은 고강도 콘크리트에 폴리머 수지의 분말상, 섬유상으로서의 형태, 폴리머 종류 및 혼입율 변화에 따른 콘크리트의 기초적 특성분석과 화재를 상정한 내화실험을 실시한 후 폭렬 성상 및 잔존 압축강도 특성 등을 검토하였다. You and Han (2008)은 석유화학제품이나 화학물질로 이루어진 물질이 연소할 때의 화재를 상정한 탄화수소 온도가열 곡선을 적용하여 공시체 조건하에서 유기섬유의 종류 및 혼입율 변화에 따른 고강도 콘크리트의 역학적 특성 및

Table 1 Summary of main parameters used as experimental design factors of high strength concrete at high temperatures

Classification	High strength concrete							Spalling prevention fiber				Test methods	
	Comp. strength (MPa)	w/c ratio or w/b ratio (%)	Fly ash	Silica Fume	Blast furnace slag	HR WR	AE	PP	NY	PVA	Steel Fiber	Heating rate	Heating Temperature (°C)
Phan & Carino (2002)	41–98	22–57	×	○	×	○	×	×	×	×	×	5°C/min	25(RT), 100, 200, 300, 450, 600
Hertz (1992)	40, 70	35, 60	×	○	×	×	×	×	×	×	○	1°C/min	300, 400, 500, 600
Kalifa et al. (2001)	105, 110	30	×	○	×	○	×	○	×	×	×	1°C/min	23(RT), 200, 300, 400
Kalifa et al. (2000)	91.8±0.8	34	×	○	×	○	×	×	×	×	×	1°C/min	450, 600, 800
Castillo & Durrani (1990)	63, 89	33	×	×	×	○	×	×	×	×	×	7–8°C/min	23(RT), 100–800 (with 100°C per step)
Hammer (1995)	69–118	27, 36	×	○	×	○	×	×	×	×	×	2°C/min	20(RT), 100, 200, 300, 450, 600
Husem (2006)	71	30	×	○	×	○	×	×	×	×	×	5.5°C/min	23(RT), 200, 400, 600, 800, 1000
Xiao & Falker (2006)	50, 80, 100	25, 30, 34	×	○	○	○	×	○	×	×	×	NA	20(RT), 100–900 (with 100°C per step)
Arioz (2007)	44, 52	40, 50, 60	×	×	×	×	×	×	×	×	×	20°C/min	200, 400, 600, 800, 1000, 1200
Janotka & Bagel (2002)	49–52	35	×	×	○	×	×	×	×	×	×	NA	20, 40, 60, 100, 200, 400, 600, 800
Noumowe et al. (2009)	45(LW), 70, 72	30	×	○	×	○	×	○	×	×	×	1°C/min	20(RT), 200, 600
Yang et al. (2009)	40	58	×	×	×	○	×	×	×	×	×	2.5°C/min	400, 500, 550, 600
Song & Soh (2004)	42–76	35, 45, 55	×	○	×	○	×	×	×	×	×	13°C/min	20(RT), 200, 400, 600, 800
Hong & Yang (2005)	60	32	×	×	×	○	×	×	×	×	×	13°C/min	20(RT), 100, 200, 450, 600, 800
Kim, G. Y. et al. (2008)	40, 60, 80	25, 32, 46	○	○	×	○	×	×	×	×	×	0.77°C/min	20(RT), 100–700 (with 100°C per step)
Kim, Y. S. et al. (2011a)	120, 150	15, 20	○	○	×	○	×	○	×	×	×	N.A.	20(RT), 500–1hour, 500–3hour
Kim, Y. S. et al. (2011b)	40–50	35, 42	×	×	×	○	×	○	×	×	×	N.A.	20(RT), 500–1hour, 500–3hour
Kim, H. Y. et al. (2005)	49	32	×	×	×	○	×	×	×	×	○	N.A.	20(RT), 100, 200, 300, 400, 600, 800
Kim, H. Y. et al. (2010)	40, 50, 60, 80, 100	18–35	○	○	×	○	○	×	×	×	×	0.2–0.3 MPa	20(RT), 100–700 (with 100°C per step)
Han et al. (2002)	48	35	×	×	×	○	×	○	×	×	×	N.A.	Standard heating curve of ISO 834
Han et al. (2003)	40, 60	30, 40	○	×	×	○	×	○	×	×	×	N.A.	Standard heating curve of ISO 834
Han et al. (2006a)	50	34	○	×	×	○	×	○	×	×	×	N.A.	Standard heating curve of ISO 834
Han et al. (2006b)	50	34	○	×	×	○	×	○	×	○	×	N.A.	Standard heating curve of ISO 834
Pei et al. (2006)	60, 80	25, 35	○	○	×	○	○	○	×	×	×	N.A.	Standard heating curve of ISO 834
Han et al. (2007)	41–108	15, 25, 35	○	○	○	○	×	○	×	×	×	N.A.	Standard heating curve of ISO 834
Pei et al. (2007)	50	34	×	×	×	○	○	○	○	○	×	N.A.	Standard heating curve of ISO 834
Han et al. (2008a)	50	25	○	○	×	○	○	○	×	○	×	N.A.	Standard heating curve of ISO 834
You & Han (2008)	50	34	×	×	×	○	○	○	○	○	×	N.A.	Standard heating curve of ISO 834
Han et al. (2008b)	60–80	25	○	○	×	○	○	○	○	×	×	N.A.	Standard heating curve of ISO 834
Han et al. (2009)	60–100	25	○	○	○	○	○	○	×	×	×	N.A.	Standard heating curve of ISO 834
Jung et al. (2009)	88, 93	25	○	○	×	○	○	○	○	×	×	N.A.	Standard heating curve of ISO 834
Li et al. (2010)	40	34.2	○	×	×	×	○	○	×	×	○	N.A.	200, 400, 600, 800
Han, M. C. et al. (2011)	71	25	○	○	×	×	×	○	○	×	×	N.A.	20(RT), 100, 200, 450, 600, 800
This test	100	15	○	×	×	○	×	○	○	×	×	2°C/min	20(RT), 100–700 (with 100°C per step)

폭렬 성상을 검토하였다. 이러한 공시체 실험결과를 토대로 300×300×600mm의 모의 기둥부재와 1,000×4,750×200mm의 모의 슬래브부재를 제작하여 폭렬성상, 온도이력 등 내화성능을 검토하였다. 또한 Han et al. (2008b)은 화재 시 고성능 콘크리트의 폭렬 방지 및 내화성능 향상 방안과 관련하여 NY섬유와 PP섬유 혼입에 따른 최적의 섬유길이조합 및 섬유혼입률을 규명하였다.

2009년에 Han et al. (2009)은 고강도 콘크리트에 필요한 혼화재인 플라이애시, 고로슬래그 미분말, 실리카 폼, 석회석 미분말, 시멘트 킬른 더스트 등과 같은 혼화제 종류를 주요 변수로 하여, 폭렬방지용 유기섬유인 폴리프로필렌 섬유의 혼입을 변화에 따른 콘크리트의 기초적 특성과 내화특성을 검토하였다.

Han and Choi (2011)는 PP섬유와 NY섬유를 혼입한 60MPa 급 고강도 콘크리트가 화재에 노출되는 동안 콘크리트 재료의 물성변화 및 미세구조 변화에 관한 평가를 위해 상온조건부터 800℃까지의 광범위한 온도변화에 따른 비재하조건에서 콘크리트의 제반 역학적 특성 및 주사형 전자현미경분석(SEM분석: Scanning Electron Microscope analysis), 포로시미터 및 X선 회절분석(XRD: X-Ray Diffraction) 등을 이용한 미세구조를 분석하였다. 그 결과 300℃까지는 상온과 비슷하거나 조금 높게 나타나고 300℃ 이후 강도가 급격하게 저감하여 800℃에서는 상온 압축강도의 대략 40%내외만을 보유한다고 발표하였다.

Kim and Park (2011)은 고열을 받은 콘크리트의 색상변화, 압축강도, 탄성계수, 크리프와 같은 콘크리트의 성능변화와 시차열분석에 의한 화재 온도분석, XRD를 통해 콘크리트의 성분 및 조직의 변화를 관찰하였는데, 가열온도 20~800℃에서 1시간 가열하면 200℃ 이하에서 극단적인 압축강도 저하가 발생하고 400℃ 이상에서는 급격한 강도저하현상이 나타나며 약 700℃에서는 상온 압축강도의 약 20~40%까지 압축강도가 저하한다고 발표하였다.

기존 연구 분석결과 고강도 콘크리트의 내화 특성에 관한 국내외 관심은 초고층건축의 급부상과 맞물려 지속적으로 증가하고 있지만 아직까지 100MPa급 이상의 (초)고강도 콘크리트의 실험 연구는 아직까지 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 100MPa급 이상의 (초)고강도 콘크리트의 내화 특성을 분석하기 위해 Table 1에 나타난 국내외 여러 연구자들의 주요 실험 변수를 분석하여 가장 최적의 변수를 설정하여 실험 연구를 수행하였다.

3. 내화실험

3.1 내화실험 계획 및 사용재료

본 연구에서는 고온 가열을 받은 고강도 콘크리트의 역학적 특성(압축강도, 잔존 압축강도, 탄성계수 등)을 연구하기 위해 먼저 초고층 건축의 시공 조건을 고려하여 물결합재비(w/b ratio)를 15%로 설정하였으며 Table 2의 조건으로 배합하였다. 배합설계에는 결합재로 플라이애쉬(fly ash)와 실리카 폼(silica fume)을 사용하였고 각 결합재의 물리적·화학적 성질은 Table 3과 Table 4에 나타내었다. 또한 화재 시 폭렬 현상의 방지재로서 그 성능이 입증된 재료인 NY와 PP섬유를 혼용한 HB섬유를 사용하였는데 특히 NY섬유는 유동성 및 공기량 측면에서 양호하고 폭렬방지 및 섬유단가에 의한 경제성은 PP섬유가 우수하다고 기존 연구결과에서 보고하고 있다(Han et al., 2008b). 따라서 본 연구에서는 콘크리트의 폭렬방지효과와 함께 작업성(workability)을 종합적으로 고려하여 HB섬유 혼입률(HB fiber volume fraction: V_{HB})을 0.05%로 설정하여 모든 배합에 적용하였다. 본 연구에서 사용된 HB섬유의 물리적 특성은 Table 5와 같으며 그 형상은 Fig. 2와 같다.

Table 2 Mixture proportion

W/B (%)	S/A (%)	AE/C (%)	Weight Mixture (kg/m ³)							
			C	W	FA	SF	S	G	NY	PP
15	35	2	800	168	120	200	382.6	710	3.15	2.275

Table 3 Chemical composition and physical properties of fly ash

Chemical composition (%)						
SiO_2	$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	MgO	SO_3	Moisture content (%)	L.O.I* (%)	Na_2O
58.2	87.7	1.1	0.3	0.2	5.2	0.8
Physical Properties						
Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Stability (%)	Compressive strength ratio (%)	Dry shrinkage ratio (%)		
2.21	4,061	0.2	92	0.023		

* L.O.I: Loss On Ignition (Ig-loss)

Table 4 Chemical composition and physical properties of silica fume

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	L.O.I (%)	Chemical composition (%)				
			SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO
2.20	200,000	1.50	96.4	0.25	0.12	0.38	0.1

Table 5 Physical properties of HB fibers (consisting of PP and NY fibers)

Type	Density (g/cm ³)	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)	Melting point (°C)	Fiber dia. (μm)	Fiber length (mm)
PP	0.91	325	3,400	160	6	6
NY	1.15	896	4,500	210	12	6

(a) PP fibers (SEM analysis)

(b) NY fibers (SEM analysis)

Fig. 2 HB fibers (mixing of PP fibers and NY fibers)

Table 6 Chemical composition and physical properties of cement

Chemical composition (%)								
SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	L.O.I
21.5	3.1	62.3	2.9	1.9	6.5	0.32	0.18	1.3
Physical Properties								
Density (g/cm ³)	Blaine (m ² /g)	Setting time (min)		Compressive strength (MPa)				
		Ini.	Fin.	3days	7days	28days		
3.15	3,302	208	351	27.3	38.7	56.4		

본 연구를 위해 사용된 시멘트는 KS F 5201의 규격을 만족하는 1종 보통 포틀랜드 시멘트이며 화학적, 물리적 성질은 Table 6과 같다. 골재는 최대크기 10mm의 쇄석을 굵은 골재로 천연 모래와 부순 모래를 1:1 비율로 혼합한 골재를 잔골재로 사용하였다.

사용된 굵은골재 및 잔골재의 입형은 비교적 균질하며 골재의 강도 역시 양호한 수준으로 그 물리적 특성을 Table 7에 나타내었다. 또한 본 연구에서 사용되는 HB섬유를 콘크

Table 7 Physical properties of aggregates

Classification		Density (g/cm ³)	Fineness modulus	Absorption ratio (%)	Unit weight (kg/m ³)	Passing ratio of 0.08mm sieve (%)
Fine aggregate	river sand	2.60	2.21	0.46	1,518	0.30
	crushed sand	2.60	3.26	0.46	1,684	0.32
Coarse aggregate	crushed stone	2.61	6.55	0.58	1,564	0.40

Table 8 Physical properties of chemical admixture

Classification	Ingredient	Type	Color	Density (g/cm ³)
Superplasticizer	Polycabonic acid	Fluid	Dark-brown	1.14

리트에 혼입했을 경우, 콘크리트의 유동성이 낮아지므로 시멘트 입자의 분산성이 우수한 Table 8과 같은 화학적 성질을 가진 고성능감수제 (유동화제)를 첨가하였다.

3.2 실험방법

냉간 상태에서의 고강도 콘크리트의 열적 특성을 파악하기 위해 가열 시험을 진행하기 전에 함수량을 조정하고, 항온 항습실에서 양생시킨 공시체에 대하여 압축강도를 측정하였다. 제작된 총 48개의 공시체중 3, 7, 28일 강도 측정용 공시체를 제외한 33개의 공시체는 각 공시체 마다 함수량이 다르기 때문에 고온 가열시간에 따른 차이를 나타낼 것으로 사료되는 바 모든 공시체의 함수율을 동일하게 조정하기 위해, 먼저 건조기에서 일정한 온도로 가열하여 콘크리트 공시체내의 수분을 제거하였다. 즉, 제작된 총 48개의 공시체의 질량을 측정 한 뒤 105±2°C에서 72시간동안 가열로 내에서 가열하여 콘크리트 공시체내의 모든 수분을 제거하였다. 함수량 조절전 콘크리트 공시체의 질량과 수분제거 후 공시체의 질량은 Table 10에 나타내었고 콘크리트 건조과정은 Fig. 3과 같다.

실험에 사용한 공시체는 Fig. 4와 같은 인스트론형 MTS-815 재하장치를 사용하여 압축강도를 측정하였다. 가열 조건은 현재 국내 건축구조부재의 내화 시험방법인 KS F 2357-1, 4, 5, 6, 7에서 규정하고 있는 표준가열 온도곡선 조건에 따라 콘크리트 시험체를 가열하였다.

화재를 상정한 가열시험은 공시체를 종류별로 나누어 가열로 내부에 수직으로 놓고, 타이머를 작동하여 설정온도를 지속하였다. 본 연구의 가열을 위한 장치는 최대 용량 300kN인 인스트론형 MTS-815 재하장치에 전기 가열로 (muffle furnace: max 900°C)를 설치하여 가열할 수 있도록 하였다. 이 시험

Table 9 Experimental design

Experimental design factor		Experiment level
Mixture	w/b ratio (%)	15
	Target slump flow (mm)	600±100
	Target air content (%)	3.0±1.0
	Fiber type	HB (NY+PP)
	V_{FB} (%)	0.05
Experiment	Heating temperature (°C)	RT (20°C), 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700°C
	Fresh concrete	Slump Flow Air content Unit weight
	Hardened concrete	Before heating (20°C) Compressive strength (@3,7,28days) Stress-strain (@28days) Modulus of elasticity (@28days)
		After heating Residual compressive strength (@28days) Stress-strain (@28days) Modulus of elasticity (@28 days)

Fig. 3 Specimens in electric furnace

Table 10 Measured weights of specimen before sinking and specimen after soak

ID	Weight of specimen before sinking (g)	Weight of specimen after soak (g)	ID	Weight of specimen before sinking (g)	Weight of specimen after soak (g)
1	480	471	18	496	477
2	479	474	19	475	470
3	476	470	20	489	482
4	480	468	21	480	470
5	482	472	22	487	477
6	483	474	23	485	476
7	491	471	24	478	466
8	476	472	25	482	471
9	496	476	26	488	474
10	485	478	27	480	473
11	468	467	28	483	471
12	475	473	29	484	472
13	482	479	30	479	462
14	485	476	31	497	475
15	488	477	32	484	468
16	483	471	33	488	472
17	489	476	-	-	-

Fig. 4 MTS-815 testing machine and muffle furnace

Fig. 5 Mini-SEM system

체를 가열로안에 위치시키고 시험체를 RILEM에서 권장하고 있는 승온 온도 2°C/분으로 하여 50분간 가열, 10분간 대기기를 반복하여 1시간당 100°C 상승을 유지하며, 상온 (20°C) 부터 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700°C 까지 공시체를 가열하였다. 가열에 따른 콘크리트 온도를 측정하기 위하여 K 타입 열전대 (NiCr-Ni, 온도 측정 범위: -200~1370°C)를 사용하였고, 목표 온도에 도달 후에 120분간 목표 온도를 유지시켜 콘크리트 공시체의 내부까지 표면과 동일한 온도를 갖 추도록 한 후, 상온에서 12~24시간동안 천천히 냉각시켰다. 그 후 고강도 콘크리트의 잔존 압축강도 및 탄성계수, SEM 형상 등과 같은 내화특성을 실험을 통해 분석하였다.

또한 SEM 촬영을 위해 압축강도 측정 후 Fig. 5의 주사전자 현미경 (Mini-SEM: SNE-3200M model)을 사용하여 시료기 위에 카본 테이프를 붙이고 해당 공시체 시편을 카본 테이프 위에 정착시킨 후 에어 브러쉬로 불필요한 성분을 제거하였다. 그 후 시료를 코팅하기 위해 Fig. 5의 Ion sputter coater-MCM-100에 넣고 2분간 진공 상태를 유지하고 30초간 코팅작업을 진행한 후 Mini-SEM system으로 공시체를 정밀하게 관찰하였다.

4. 실험결과

4.1 잔존 압축강도

고온에서의 콘크리트 압축강도는 콘크리트의 열적 특성을

(a) Before test (b) After test

Fig. 6 Residual compressive strength test at 700°C

Fig. 7 Residual compressive strength according to elevated temperatures

분석하는데 있어 가장 중요한 특성중 하나로 본 연구에서는 고온 가열을 받은 콘크리트 공시체를 24시간동안 상온에서 방치한 후 공시체의 잔존 압축강도를 측정하기 위해 KS F 2405에 따라 Fig. 6과 같이 셋업하여 압축강도 실험을 진행하였다.

Fig. 7은 고강도 콘크리트의 가열 온도에 따른 냉간 상태에서의 압축강도를 측정한 결과를 나타낸 그래프이다. 각 온도별 압축강도의 변화추이를 살펴보면 상온 (20°C)에서의 압축강도 128MPa에서 100°C~200°C를 거치면서 압축강도가 40% 이상이 감소하면서 줄어들다가 200°C 이후부터는 조금씩 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 압축강도의 감소율 역시 상온~100°C의 구간에서는 9%, 100~200°C 구간에서는 30%가량 압축강도가 낮아졌고, 그 후 200°C 이후부터 600°C까지 가열 온도에 따른 압축강도 양상은 가열온도가 100°C씩 상승할 때 마다 약 9~10% 가량 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이후 600~700°C 구간에서는 이전단계보다 약 50%

Fig. 8 Modulus of elasticity according to elevated temperatures

정도 압축강도가 낮아져 최종적으로 48MPa의 압축강도를 나타내었다. 이는 상온시 압축강도와 비교할 때 약 38%에 해당하는 압축강도값이며 이와 같은 강도추이는 기존 고강도 콘크리트의 실험연구결과에서도 비슷한 양상으로 나타났다.

4.2 탄성계수

Fig. 8은 온도에 따른 탄성계수 (modulus of elasticity)의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 나타나듯이 상온에서의 탄성계수는 공시체 압축강도 변화 양상과 같이 100°C에서는 약 10%, 200°C에서는 약 17%가량의 감소가 나타났다.

200°C~700°C사이에서의 탄성계수의 변화를 살펴보면, 200°C에서의 급격한 탄성계수 감소 현상은 나타나지 않았지만 700°C까지 지속적으로 탄성계수가 감소하는 현상이 나타났다. 따라서 탄성계수는 공시체에 노출되는 온도가 증가할수록 감소되는 경향을 나타냈으며, 이는 노출온도에 따른 시멘트 페이스트와 골재의 상이한 수분 증발과 서로 다른 탄성 거동에 의한 것으로 사료된다.

4.3 SEM 분석

상온 (20°C)~300°C까지 가열된 공시체에는 크게 구별되는 차이점이 발견되지 않았고, 200°C와 300°C에서는 가열 후 녹지 않은 섬유를 발견할 수 있었다. Fig. 9에서 나타나듯이 200°C에서는 일부 섬유가 녹은 것으로 보였고, 녹지 않은 섬유와 시멘트 페이스트의 큰 균열이 서로 만나고 있는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 10에서 보듯이 400°C에서 여러 배율로 확대하여 정밀하게 관찰하였으나 섬유가 전혀 나타나지

Fig. 9 Cross-sectional image of fiber reinforced cement paste observed through SEM

Fig. 10 SEM image analysis of cement paste at 400°C

않았는데 이로 인해 400°C 이상의 고온에서 고강도 콘크리트에 함유된 HB섬유가 녹아서 화재시 발생하는 공시체 내부의 수증기압이 외부로 빠져 나가는 통로 (path) 역할을 하여 폭발이 방지되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 400~700°C에서는 섬유가 모두 전소되어 전혀 발견되지 않았으며, 가열 온도가 높을수록 공시체 시편의 열화가 심해져 판상형태로 변화하고 공극량, 크기, 형태가 변화하는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

고온을 받은 고강도 콘크리트 내화 특성 및 역학적 성질에 대한 기존 연구들을 분석하여 100MPa급 고강도 콘크리트에 대한 최적의 주요 변수들을 설정하였다. 이를 토대로 가열 조건에 따른 고강도 콘크리트의 역학적 특성 변화에 관한 연

구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 고온을 받은 고강도 콘크리트 내화 특성에 관한 기존 국내외 연구자들의 연구문헌을 고찰한 결과 고강도 콘크리트의 잔존 압축강도는 700°C에서 상온 압축강도의 20~40% 수준을 나타내었는데 본 연구의 실험결과에서도 38%의 범위로 나타나 이를 다시 한 번 검증할 수 있었다.
- (2) 가열 온도에 따른 잔존 압축강도를 분석한 결과 상온 (20°C)에서의 고강도 콘크리트의 압축강도와 비교하여 100°C 이후 잔존 압축강도가 점진적으로 저하하기 시작하며, 200~700°C까지 지속적으로 강도가 저하하는 것을 확인할 수 있었다. 특히 600°C 이후에서는 공시체내에 소성 변형만이 발생하게 되는데 이를 통해 600°C 이상이 고온에 노출된 고강도 콘크리트의 급격한 성능저하가 발생하는 시점으로 유추해 볼 수 있다.
- (3) 온도에 따른 콘크리트의 탄성계수를 평가한 결과, 잔존 압축강도의 변화 양상과 유사하게 100°C~200°C에서 급격하게 감소를 하다가 200°C 이후부터는 지속적으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다.
- (4) 400°C 이상의 고온에서 고강도 콘크리트에 함유된 하이브리드섬유가 녹아서 화재시 발생하는 공시체 내부의 수증기압이 외부로 빠져 나가는 통로 (path) 역할을 하여 폭발이 방지되는 것을 실험적으로 확인할 수 있었다.

하지만 아직까지 100MPa 이상의 고강도 콘크리트의 내화 성능을 검증하는 연구가 미비한 실정이고 더 많은 실험 데이터 수집 및 연구결과 분석을 통해 고강도 고온 재료모델의 개발이 요구되는 바이다.

감사의 글

이 연구는 서울대/한국연구재단 연구비 (2012005905), 금오공과대학교 학술연구비 (2013-104-165), 그리고 국토교통부가 주관하고 국토교통과학기술진흥원이 시행하는 2014년도 첨단도시개발사업 09첨단도시A01 과제에 의하여 지원된 논문으로 이에 감사를 드립니다.

References

1. Arioz, O. (2007), Effects of Elevated Temperatures on

- Properties of Concrete, *Fire Safety Journal*, 42, 516-522.
2. Castillo, C., and Durrani, A. J. (1990), Effect of Transient High Temperature on High-Strength Concrete, *ACI Materials Journal*, 87(1), 47-53.
 3. Consolazio, G. R., McVay, M. C., and Rish III, J. W. (1998), Measurement and Prediction of Pore Pressures in Saturated Cement Mortar Subjected to Radiant Heating, *ACI Materials Journal*, 95(5), 525-536.
 4. Hammer, T. A. (1995), High-Strength Concrete Phase 3, Compressive Strength and E-modulus at Elevated Temperatures, Fire Resistance, SP-6, STF70-A95023, Report 6.1, SINTEF Structures and Concrete.
 5. Han, C. G., Han, M. C., and Heo, Y. S. (2007), New Proposal for Spalling Mechanism in High Strength Concrete, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 23(11), 109-117 (in Korean, with English abstract).
 6. Han, C. G., Han, M. C., Kim, W. K., and Lee, J. S. (2009), Effect of Admixture Types and PP Fiber on the Development of Spalling Resistance of High Strength Concrete, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 25(11), 105-112 (in Korean, with English abstract).
 7. Han, C. G., Hwang, I. S., Lee, J. S., and Kim, K. M. (2006a), Spalling and Fire Enduring Properties of High Strength RC Column Subjected to Axial Load Depending on Fiber Contents, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 18(1), 83-90 (in Korean, with English abstract).
 8. Han, C. G., Hwang, Y. S., and Jung, D. W. (2003), Performance of Spalling Resistance of High Performance Concrete with PP Fiber Contents and Lateral Confinement, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 19(1), 61-68 (in Korean, with English abstract).
 9. Han, C. G., Jee, S. W., Kim, K. M., Heo, Y. S., and Kim, S. H. (2006b), Investigation of Fire Resistance Performance of High Performance Concrete Containing PP & PVA Fiber, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 22(10), 77-84 (in Korean, with English abstract).
 10. Han, C. G., Kim, S. S., Kim, S. S., and Jang, K. H. (2008b), Preventing Spalling of High Performance Concrete Depending on the Length Variation and Contents of NY & PP Fibers, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 24(11), 69-76 (in Korean, with English abstract).
 11. Han, C. G., Yang, S. H., Han, M. C., and Pei, C. C. (2008a), The Influence of Polymer Contents and Appearance on Spalling Prevention of High Strength Concrete, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 24(5), 93-100.
 12. Han, C. G., Yang, S. H., Lee, B. Y., Hwang, I. S., and Jun, S. C. (2002), Properties of Fire Resistance of High Performance Concrete with Varying Contents of Polypropylene Fiber and Specimen Size, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 14(4), 449-456 (in Korean, with English abstract).
 13. Han, M. C., and Choi, H. K. (2011), The Effect on Mechanical Properties and Micro-structure of High Strength Concrete at Elevated Temperatures, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 27(3), 123-130 (in Korean, with English abstract).
 14. Hertz, K. D. (1992), Danish Investigations on Silica Fume Concrete at Elevated Temperatures, *ACI Materials Journal*, 89(4), 345-347.
 15. Hong, S. W., and Yang, K. H. (2005), An Evaluation on the Variation of Mechanical Properties of High-Strength Concrete Subjected to High Temperature, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 21(12), 43-50 (in Korean, with English abstract).
 16. Husem, M. (2006), The Effects of High Temperature on Compressive and Flexural Strengths of Ordinary and High-Performance Concrete, *Fire Safety Journal*, 41, 155-163.
 17. Janotka, I., and Bagel, L. (2002), Pore Structures, Permeabilities, and Compressive Strengths of Concrete at Temperatures up to 800°C, *ACI Materials Journal*, 99(2), 196-200.
 18. Jung, H. K., Son, H. J., Lee, B. H., Han, M. C., Yang, S. H., and Han, C. G. (2009), Spalling of the High Strength Concrete Depending on Specimens Size, *Proceedings of the Architectural Institute of Korea*, 29(1), 571-574 (in Korean, with English abstract).
 19. Kalifa, P., Chene, G., and Galle, C. (2001), High-Temperature Behaviour of HPC with Polypropylene Fibres from Spalling to Microstructure, *Cement and Concrete Research*, 31, 1487-1499.
 20. Kalifa, P., Menneteau, F. D., and Quenard, D. (2000), Spalling and Pore Pressure in HPC at High Temperatures, *Cement and Concrete Research*, 30, 1915-1927.
 21. Kim, G. Y., Kim, Y. S., Lee, T. G., Park, C. K., and Lee, S. H. (2008), Evaluation for Mechanical Properties of High Strength Concrete at High Temperature by Stressed Test and Unstressed Test, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 20(5), 583-592 (in Korean, with English abstract).
 22. Kim, H. Y., Chae, H. S., Jeon, H. K., and Youm, K. S. (2010), Proposal for the Model and Properties of Compressive Strength at High Temperature for the High Strength Concrete Mixed with Fiber Cocktail, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, 22(1), 605-608 (in Korean, with English abstract).
 23. Kim, H. Y., Seo, C. H., and Shin, H. J. (2005), An Experimental Study on the Mechanical Properties by Compressive Strength Areas at High Temperature, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 21(7), 55-66 (in Korean, with English abstract).
 24. Kim, S. S., and Park, K. P. (2011), Fire Damages and Deterioration of Concrete Structures, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 23(3), 28-31 (in Korean).
 25. Kim, Y. S., Choi, H. G., Ohmiya, Y., and Kim, G. Y. (2011), Effect of Aggregate on Mechanical Properties of Ultra-High Strength Concrete Exposed to High Temperature, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 23(4), 431-440 (in Korean, with English abstract).
 26. Kim, Y. S., Lee, T. G., Nam, J. S., Park, G. Y., and Kim, G. Y. (2011), A Study on the Residual Mechanical Properties of Fiber Reinforced Concrete with High Temperature and Load, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 23(3), 321-330 (in Korean, with English abstract).
 27. Li, Z. M., Shin, Y. S., No, S. R., Cho, C. H., and Kim, J. S. (2010), A Study on Fire Resistance Properties of High Strength Concrete Mixed Fiber, *Proceedings of the*

-
- Architectural Institute of Korea*, 30(1), 251-252 (in Korean, with English abstract).
28. Noumowe, A. N., Siddique, R., and Debicki, G. (2009), Permeability of High-Performance Concrete Subjected to Elevated Temperature (600°C), *Construction and Building Materials*, 23, 1855-1861.
 29. Pei, C. C., Noh, S. K., Han, M. C., Lee, J. H., Ahn, T. S., and Han, C. G. (2007), A Fundamental Study on the Fire Resistance Performance of Tunnel Concrete Depending on with Various Fiber Types and Adding Ratios, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, 19(1), 895-898 (in Korean, with English abstract).
 30. Pei, C. C., Yoo, S. Y., Jee, S. W., Hann, C. P., Yang, S. H., and Han, C. G. (2006), Spalling Resistance of 60MPa High Strength Concrete, *Proceedings of the Architectural Institute of Korea*, 26(1), 361-364 (in Korean, with English abstract).
 31. Phan, L. T., and Carino, N. J. (2002), Effects of Test Conditions and Mixture Proportions on Behavior of High-Strength Concrete Exposed to High Temperatures, *ACI Materials Journal*, 99(5), 54-66.
 32. Song, H., and Soh, Y. S. (2004), Variation of Pore Structure of High Strength Concrete Including Silica Fume Exposed to High Temperature, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 16(5), 597-604 (in Korean, with English abstract).
 33. Xiao, J., and Falkner, H. (2006), On Residual Strength of High-Performance Concrete with and without Polypropylene Fibres at Elevated Temperatures, *Fire Safety Journal*, 41, 115-121.
 34. Yang, H., Lin, Y., Hsiao, C., and Liu, J. Y. (2009), Evaluating Residual Compressive Strength of Concrete at Elevated Temperatures Using Ultrasonic Pulse Velocity, *Fire Safety Journal*, 44, 121-130.
 35. You, J. Y., and Han, C. G. (2008), The Influence of Polymer Contents and Appearance on Spalling Prevention of High Strength Concrete, The 4th Collection of Excellent Graduation Paper of the Architectural Institute of Korea, 4(1), 55-58 (in Korean, with English abstract).
- Received : 01/27/2014
Revised : 02/25/2014
Accepted : 02/28/2014

요 지

본 연구에서는 우선 화재에 노출된 고강도 콘크리트의 내화특성과 폭렬 메커니즘을 규명한 기존 국내외 연구자들의 연구문헌들을 심도 깊게 고찰하였다. 그 후 고온을 받은 고강도 콘크리트에 대한 국내외 연구자들의 주요 실험 변수를 분석하여 가장 최적의 변수를 설정하였으며 이를 토대로 하여 100MPa급 고강도 콘크리트의 내화 특성을 규명하기 위한 내화실험을 계획하였다. 또한 기존 연구의 실험결과를 분석한 결과 폭렬방지에 효과가 있는 것으로 알려져 있는 PP섬유와 친수성 재료로서 시멘트 입자와 부착성능이 우수하고 워커빌리티를 개선할 수 있는 NY섬유를 혼합한 신재료 HB섬유를 섬유혼입률 0.05%로 정해 배합설계에 반영하였다. 이러한 배합설계로 타설한 총 48개의 공시체를 28일 양생기간 후 온도변화 (100°C~700°C)에 따른 고강도 콘크리트의 역학적 특성을 분석하기 위해 화재를 받은 후 냉간상태에서의 내화실험을 수행하였으며 이를 통해 고강도 콘크리트의 내화 특성을 분석하였다.

핵심 용어 : 고강도 콘크리트, 내화 특성, 하이브리드 섬유