

고강도콘크리트의 내화특성 및 폭발현상

Thermal Properties and Explosive Spalling for High Strength Concrete



송훈*
Hun Song



고정원**
Jeong-Won Ko



菅原 進***
Shinichi Sugahara

1. 서 론

건축물의 초고층화 및 인텔리гент화가 급속히 진전되어 구조체 인 콘크리트도 고강도화 및 고성능화가 요구되고, 특히 초고층 건축물에서의 고강도콘크리트(high strength concrete, 이하 HSC) 적용은 급격한 진전을 이루고 있다. 현재 HSC에 관한 많은 연구와 시행이 이루어져 설계기준강도 80 MPa급의 콘크리트를 적용한 건축물이 등장하였고, 외국의 경우는 130 MPa급의 초고강도 콘크리트(ultra high strength concrete, 이하 UHSC)의 적용사례가 보고되는 등 점차 40 MPa 이상의 HSC의 적용이 보편화되고 있는 추세이다.¹⁻³⁾ 이와 더불어 HSC 적용에 따른 폭발현상에 대한 안전대책으로 “HSC 기둥보의 내화성능 관리기준”이 국토해양부(고시 2008-334호)로부터 마련되어 이미 시행중인 상황에서 50 MPa 이상의 HSC의 내화성능 확보를 위한 다각적인 연구가 한층 더 요구되고 있다.⁴⁾

이에 본고에서는 HSC의 내화특성 및 내화성능의 바로미터가 되는 폭발현상에 영향을 미치는 요인에 대하여 이론적·실험적으로 고찰하고자 한다. 또한 이를 토대로 향후, 보다 합리적인 HSC의 폭발현상에 대한 대처방안을 마련하는데 기여하고자 한다.

2. HSC의 내화 특성

2.1 고온에 의한 화학적 특성 변화

화재에 의한 HSC의 화학적 특성 변화는 100°C 이하에서 콘크리트 내부의 공극에 존재하는 수분의 증발과 콘크리트의 수화 생성물인 규산칼슘수화물(이하 C-S-H), 수산화칼슘, 에트린자이트, 모노설페이트 등의 탈수에 따른 반응으로 나타난다. 콘크리트의 주요 생성물인 C-S-H는 결정도가 낮은 겔상으로 화학조성은 일정치 않으며 100~300°C에서 탈수한다. 또한, 에트린자이트, 모노설페이트 등도 대부분 300°C 이하에서 탈수하고 수산화칼슘은 450~550°C에서 분해되어 결합수가 탈수한다.

<그림 1>은 고온가열에 따른 X선 회절 분석 결과로서 온도가 증가함에 따라 에트린자이트(2θdeg.=9°) 및 수산화칼슘(2θ deg.=18°, 34°)의 강도 값이 감소하고 있음을 확인할 수 있었는데, 특히 수산화칼슘은 600°C 이상의 고온에서 강도값이 확연히 감소하였다. 수산화칼슘은 450~550°C에서 탈수하여 CaO로 변화하는데 결정의 크기에 따라 분해속도는 다르게 나타나고 300~400°C의 온도에서 장시간 노출되는 경우 서서히 분해된다. <그림 1>의 XRD의 결과에서도 600°C로 가열한 경우 수산화칼슘의 피크가 현저하게 감소함을 알 수 있으며 600°C 이하의 온도에서도 온도가 증가함에 따라 피크세기는 점차적으로 감소하는 경향을 보인다. 화재에 의한 콘크리트의 열열화 깊이는 마감재의 품질 및 두께에 의해 크게 좌우되고 화재성상과 밀접한 관련을 가지므로 콘크리트 중의 수산화칼슘이 열분해된 깊이로서 당시의 화재온도나 경과시간을 추정하기도 한다.

<그림 2>는 고온가열에 따른 TG-DSC 분석 결과로서 90~

표 1. 수화생성물의 온도에 따른 영향⁶⁾

수화생성물	온도에 따른 영향
규산칼슘수화물 (CaO-SiO ₂ -H ₂ O : C-S-H)	미세한 저 결정질로 흡착수 및 조직 내에 모세관수를 포함하고 있으며 100~300°C에서 탈수하며 C-S-H 개개의 성상을 명료하게 구분할 수는 없음
수산화칼슘 (Ca(OH) ₂)	450~550°C에서 탈수하여 CaO로 되지만 결정의 크기에 의해 분해속도가 다르며 300~400°C 온도에서 서서히 분해
에트린자이트 (AFt, C ₃ A ₃ CSH ₃₂)	100°C 이하 및 100°C, 160~180°C의 온도에서 큰 피크와 250~270°C의 온도에서 작은 피크를 보이며 단계적으로 탈수
모노설페이트 (AFm, C ₃ ACSH ₁₂)	50~150°C, 200°C, 300°C 부근에서 3단계로 탈수하며 생성물은 C ₄ A ₃ S와 CaO로 전환
석고 (CaSO ₄ ·2H ₂ O)	이수석고는 130°C 부근에서 반수석고로, 160°C 부근에서 무수석고로 변화

* 정희원, 요업기술원 세라믹건축본부 선임연구원
songhun@kicet.re.kr

** 정희원, 대우건설기술연구원 건축연구팀 전임연구원

*** 도쿄이과대학 교수, 도쿄대학 명예교수

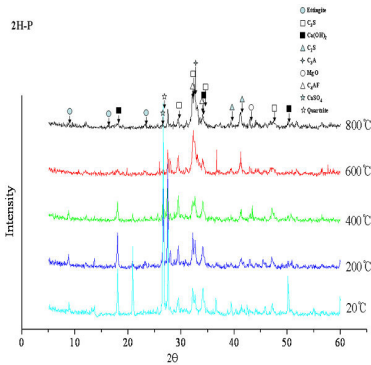


그림 1. 고온가열에 따른 XRD 변화

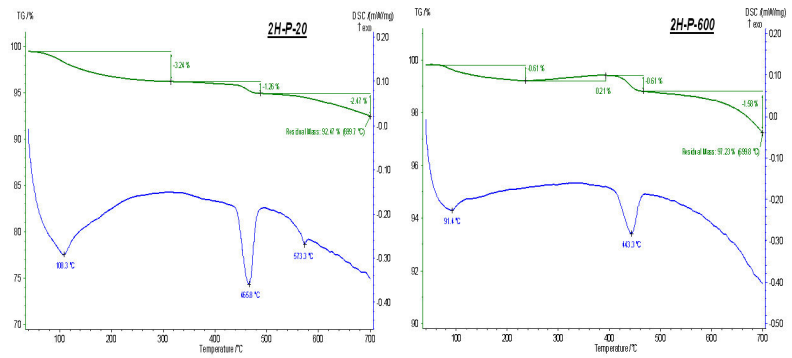


그림 2. 고온가열에 따른 TG-DSC 변화(좌 : 상온, 우 : 600°C)

108°C 부근에서 나타나는 에트린자이트 및 450°C 부근에서 나타나는 수산화칼슘의 존재를 확인할 수 있는 흡열피크가 뚜렷하게 나타났다.

하지만, 600°C로 가열한 시험체의 경우 흡열피크가 크게 줄었고 특히 이미 대부분의 수산화칼슘이 CaO+H₂O로 분해되어 450°C 부근에서의 흡열피크는 크게 감소하였다.^{5,6)}

2.2 고온에 의한 역학적 특성 변화

고온시 HSC의 역학적 특성은 재료물성의 변화 및 변형 특성에 의해서 결정된다. 즉, 시멘트 수화생성물의 분해 및 각종 골재의 물리·화학적 변형에 의한 강도저하와 시멘트 수화생성물을 구성하는 화학적 결합수의 분해 및 세공구조에 분포되어 있는 물리적 흡착수, 자유수 등의 수분증발에 기인한 수축거동에 따른 강도저하를 들어 설명할 수 있다. 또한, 콘크리트라는 복합재료의 특성상 각 재료의 열·수분거동 및 미세구조 특성에 의해서 국부적인 내부응력이 발생하게 되고, 정도에 따라서는 균열진전과 콘크리트의 파괴에 주된 요인이 된다.

2.2.1 압축강도

일반적으로 화재시 HSC의 역학적 특성 규명에 대표적으로 적용되는 압축강도 시험방법에는 두가지 방법이 널리 이용되고 있다. 가열과 함께 하중을 재하하는 열간시험 방법과 가열 후 상온에서 서냉시킨 후 하중을 재하하는 냉간시험 방법이 있다. 열간시험의 경우, <그림 3>과 같이 100~200°C 부근에서 급격한 강도저하 현상이 나타나며, 냉간시험의 경우에는 열간시험 결과와는 반대로 100~200°C 부근에서 상온시의 강도를 상회하는 강도증진 현상이 나타난다. 이상의 결과에 대한 구체적인 원인은 아직 명확히 밝혀지지 않았으나, 냉간시험에 따른 강도증진에 대해서는 100~200°C 온도범위에서 오토클레이브와 같은 고온·고압현상에 의한 미수화 시멘트의 수화촉진이 원인일 것으로 추측

된다. 즉, 100~200°C의 고온영역에서 발생하는 수증기가 HSC의 치밀한 세공내에서 이동이 억제됨에 따라 HSC 내부가 고온·고압환경에 노출되는 것에 기인한다. 열간시험의 가열시간이 약 3~4시간으로 짧게 진행됨에 반하여, 냉간시험의 경우 가열에서 측정까지 약 15~20시간 이상이 소요됨으로, 미수화 시멘트의 수화에 필요한 시간확보가 가능하다.

또한, 400°C 이상의 온도범위에서 강도저하 현상이 현저히 나타나며, 500°C에서는 상온시 강도의 약 50% 이하, 800°C에서는 상온시 강도의 약 20% 이하의 잔존압축강도를 나타내는 것으로 보고된다.^{7,18)}

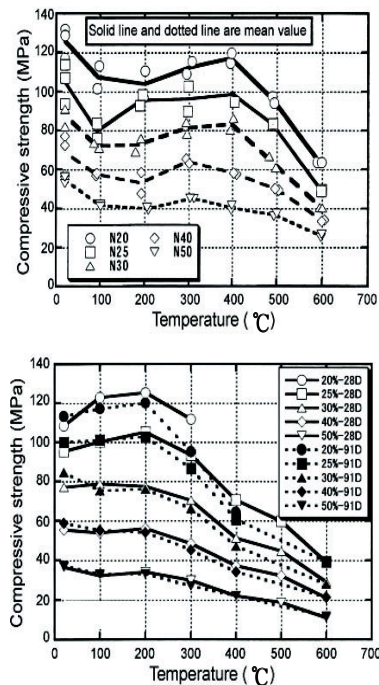


그림 3. 온도별 압축강도(위 : 열간시험, 아래 : 냉간시험)

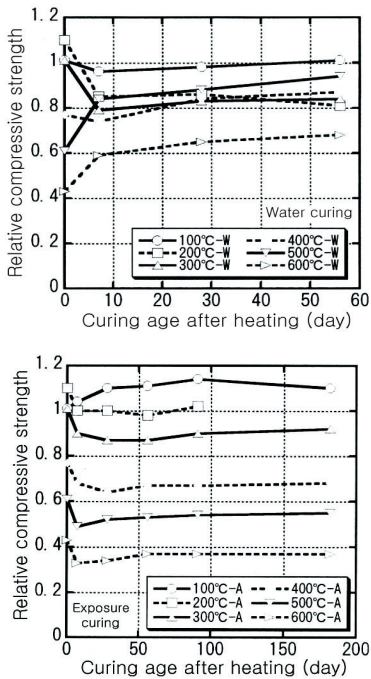


그림 4. 온도별 압축강도(위 : 수중양생, 아래 : 기중양생)

2.2.2 탄성계수

고온시 온도상승에 따른 콘크리트의 탄성계수 변화는 압축강도와 동일한 경향을 나타내며, 온도상승과 함께 콘크리트 탄성계수가 저하함을 알 수 있다. 또한, 800°C 이상의 고온영역에서는 거의 "0"의 값을 나타내는 것으로 보고된다. 온도상승에 따른 탄성계수의 저하는 골재·시멘트 종류, 물시멘트비, 가열 중 하중재하 유무 등에 의해서 차이를 보이나, 일반적으로 시멘트 종류의 영향은 매우 미미한 것으로 알려져 있다.¹⁹⁾ 탄성계수도 압축강도와 동일하게 열간시험 방법과 냉간시험 방법에 따라 상이한 결과를 보인다. Ichinose의 연구에 의하면, 열간시험에 의한 탄성계수 값이 냉간시험에 의한 탄성계수 값보다 약 0.2~0.4 정도 큰 탄성계수 잔존비를 나타내는 것으로 보고하였다. 이러한 결과는 가열시간의 차이에 따른 함수율 차이가 원인이라고 분석하고 있다.¹⁸⁾

2.2.3 응력-변형관계

콘크리트의 응력-변형관계에 있어서 가장 큰 영향요인은 골재의 종류이며, 특히 응력-변형곡선의 초기구배는 골재종류에 따른 영향을 크게 받는다. 그러나 중국변형은 골재종류에 따른 영향은 거의 없는 것으로 보고된다. 또한, 가열과 함께 지속하중이 작용하는 열간시험의 경우에는 압축강도 및 탄성계수가 현저히 증가하는 경향을 보이며, 중국변형은 감소하는 경향을 보인다.¹⁹⁾

2.2.4 고온을 받은 콘크리트의 강도회복^{11,20-22)}

고온시 콘크리트의 역학적 특성파괴에 중요한 이유는 화재피해를 받은 콘크리트 부재의 비손상이 확인된 상태에서 재사용을 고려할 경우, 콘크리트부재의 잔존내력의 예측이 필요하기 때문이다. <그림 4>에 나타난 바와 같이, 온도가 500°C 이하인 경우에는 가열 후 수중양생을 실시함에 따라 상온시의 약 80%의 강도회복을 나타내며, 약 70%의 탄성계수 회복이 가능한 것으로 보고되고 있다. 그러나 기중양생의 경우, 300°C 이상의 고온이력을 받은 콘크리트는 장기간의 양생기간을 거치더라도 강도회복 현상은 나타나지 않는다.¹¹⁾ 따라서, 건축물의 재사용 관점에서 볼 때, 화재 후의 콘크리트 부재의 강도저하가 발생된 경우 강도회복을 기대하기는 어렵다고 판단된다.

3. HSC의 폭발현상

3.1 폭발현상에 영향을 미치는 요인

고온시 콘크리트의 폭발현상은 콘크리트의 배합, 골재종류, 가열속도, 부재의 단면크기, 구속조건, 콘크리트의 표면함수율 등에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다.¹²⁾ 특히, HSC 및 함수율이 높은 경량골재 콘크리트는 화재시 폭발이 발생하기 쉽다.

거시적인 관점에서 보면, 콘크리트 부재가 가열을 받음과 동시에 팽창거동을 하지만, 기둥과 보의 경우 양단이 구속되어 있으므로, 콘크리트부재 표층부의 온도구배가 증가함에 따라 표층부에서 압축응력이 발생하여 압축파괴가 일어난다는 주장이 있으며,²⁴⁻²⁶⁾ 콘크리트 표층부에 위치한 골재의 팽창과 골재를 감싸고 있는 시멘트페이스트의 수축이 구속됨으로서 골재와 시멘트페이스트 계면에서 발생하는 열응력이 폭발을 유발하는 주요 원인으로 설명하고 있다.¹³⁾ 이상의 내용은 주로 열응력설에 국한된 폭발메커니즘을 설명하는 내용이다.

한편, 최근 연구동향으로 미시적인 관점에서 살펴보면, 고온가열에 의해 콘크리트 표층부에는 급격한 온도구배가 나타나며, 표층부로부터의 수증기압에 의해 수증기압이 증가되어 내부응력이 콘크리트 부재의 열팽창에 의한 변형응력(열응력) 및 고온열화 등과 복잡하게 관계되어 폭발이 발생한다고 보고된다.⁸⁾

더욱이, Hertz에 의하면, HSC라 하더라도 중량함수율이 3~4% 이하의 저함수율의 경우에는 폭발이 발생할 가능성이 낮다고 기술함과 동시에 열응력설 만으로는 폭발을 설명하는데 한계가 있음을 피력하였다.¹²⁾ 이는 HSC부재 내부에서 발생하는 수증기압의 영향이 고함수율 범위에서 보다 크게 영향을 미치기 때문으로 분석된다. 즉, 콘크리트는 다공질 재료이며, 항상 수분을 포함하고 있기 때문에 HSC의 폭발메커니즘을 구명하기 위해서는 고

온가열을 받는 콘크리트 내부의 수분이동 및 폭렬과 연관되는 요인을 이해하고, 미시적인 관점으로부터 현상을 파악할 필요가 있다. 이상을 종합하여, HSC의 폭렬에 영향을 미치는 요인은 다음과 같다.

3.1.1 함수율

함수율은 폭렬을 일으키는 주요인자의 하나이다. 즉, 전술한 바와 같이 저함수율에서는 폭렬의 발생확률이 매우 낮으며, 함수율의 증가에 따라 폭렬발생 가능성도 함께 높아짐으로서 함수분포의 상태는 매우 중요하다.^{14-16,26)}

3.1.2 골재종류

콘크리트의 열팽창은 골재의 열팽창에 의존함에 따라, 선펡창계수가 높은 골재를 사용할 경우에는 콘크리트의 열변형응력(열응력)이 크게 작용한다.¹⁹⁾

3.1.3 가열속도

가열속도가 빠를수록 폭렬발생 확률은 높아진다. 콘크리트가 화재와 같은 급격한 고온가열을 받으면, 콘크리트의 표층부로부터 수분의 증발속도가 가속화 되며, 그에 따른 수증기압의 증가속도가 빨라진다. 따라서, HSC와 같이 치밀한 조직구조에서는 증가하는 수증기의 이동이 억제되어 수증기압력(내부응력)의 증가속도가 한층 가속화됨으로서 폭렬발생 확률이 높아진다.¹⁰⁾

3.1.4 구속조건

구조부재인 기둥·보의 경우 양단이 구속상태이기 때문에 급격한 가열을 받을 경우 표층부에서 압축응력이 발생하게 되며, 이러한 경우에 폭렬의 발생가능성이 높아진다고 보고된다. 일반적으로 폭렬현상은 구조부재의 압축영역에서 발생될 가능성이 높다고 알려져 있다.²⁴⁻²⁶⁾

3.1.5 단면크기

콘크리트 단면크기에 따른 폭렬 메커니즘에 대해서는 아직까지 명확하게 밝혀지지 않았으나, 일반적으로 구조부재의 단면크기가 클수록 폭렬 발생이 완화된다고 알려져 있다.¹²⁾ 이는 콘크리트의 단면크기가 클수록 콘크리트의 열용량은 비례적으로 증가하며, 전체 단면적 대비 콘크리트의 고온전도면적 (3시간 내화시험 기준 : 깊이 60 mm 이하) 비율이 낮기 때문에, 저온부 불포수층을 통한 중심부로의 수분이동 영향이 표층부에서의 수증기압(표층부 내부응력) 증대를 완화시킬 수 있을 것으로 판단된다.¹⁰⁾

3.1.6 콘크리트 배합

콘크리트의 배합조건에 따라 세공분포 상태가 변화하기 때문에 콘크리트의 배합은 폭렬에 영향을 미친다. 특히, 낮은 물시멘트비 또는 실리카폼과 같은 미분말의 결합제를 적용할 경우, 총공극량이 저하하며, 세공경이 작아짐으로서 콘크리트의 폭렬 위험성은 증가한다.^{6,9)}

3.2 열·수분 이동 및 수증기압의 영향

화재와 같은 급격한 가열에 콘크리트가 노출되었을 경우, 콘크리트의 표층부와 중심부사이에서 온도구배가 발생하게 된다. 이러한 온도구배는 콘크리트의 열전도 특성에 따라 변화하게 되며, 일반적으로 보통강도 콘크리트(normal strength concrete, 이하 NSC)와 HSC로 구분하여 설명할 수 있다. NSC의 경우에는 표층부에서 수분이동이 원활하게 일어나며, 표층부의 건조가 비교적 빠른 속도로 진행된다. 온도구배 또한 <그림 5>의 W/C 55%와 같이 직선적인 형태를 나타낸다. 이는 표층부에서의 수증기압 상승에 의해 일부는 외기로 수분이 방출되나, 중심부로의 압밀유동 현상에 의해 액상수와 수증기 동시이동이 발생함에 따라 수분이동이 매개가 되는 현열이동이 열전도 속도를 증가시킨 것으로 추측된다.

반면, HSC의 경우에는 표층부근에서 온도의 정류현상이 발생하게 되며, 전 영역의 경우 다음 <그림 5>의 W/C 25%와 같은 S자 형태를 나타내는 것을 알 수 있으며, 표층부의 건조속도 또한 지연됨을 알 수 있다. 이는 HSC의 조직이 밀실하기 때문에 수분의 이동통로가 되는 세공구조의 연결성이 저하되어 NSC와는 반대로 수분의 이동이 억제되며, 표면부근에 존재하는 수분이 완전히 증발하는데 에너지가 대량으로 소비되는 것이 원인으로 판단된다. 즉, 밀폐된 공간에서의 압력상승은 액상수의 비등온도를 현저하게 상승시키며, 이에 따라 액상수의 비등에 소비되는 에너지 또한 현저히 증가하게 된다. 따라서 온도의 정류 현상이 발생하는 구간에서는 이러한 잠열현상이 영향을 미치는 것으로 추론할 수 있다.¹⁰⁾

이러한 현상은 HSC의 수증기압에 의한 폭렬현상을 관찰함으로써 설명이 가능하다. <그림 6>의 A시뮬체는 HSC의 폭렬 발생시 발생하는 온도저하 현상을 나타내는 결과이다. 즉, 폭렬에 의한 표층부 박락현상이 발생하는 시점에서 폭렬부위의 온도가 일순간 저하하다 다시 상승하는 경향을 나타낸다. 이는 전술한 바와 같이 세공구조 내에 고립된 액상수가 고온에 의해 발생된 균열진전에 의해서 세공압력이 개방(수증기압 저하)됨으로 인하여 높은 열에너지를 포함하고 있는 액상수가 순간적으로 증발(잠열 효과 => 열에너지 소비)과 함께 폭렬이 발생함으로써 온도저하가 발생된 것으로 설명할 수 있다.¹⁰⁾

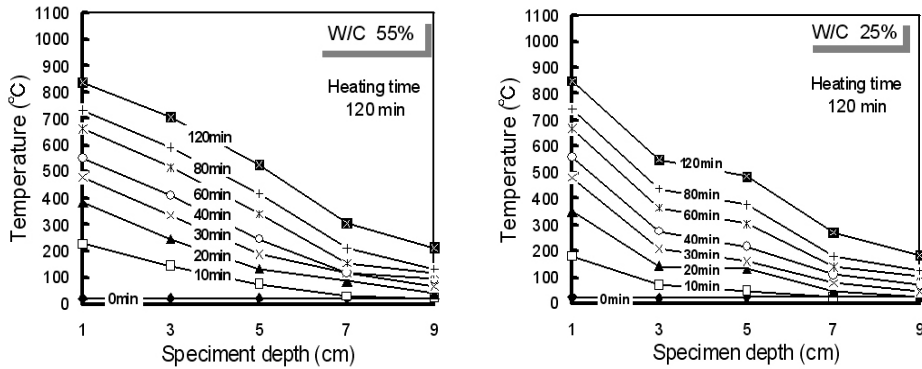


그림 5. 콘크리트의 강도별 열전도 특성(좌 : f_c 40 MPa, 우 : 80 MPa)

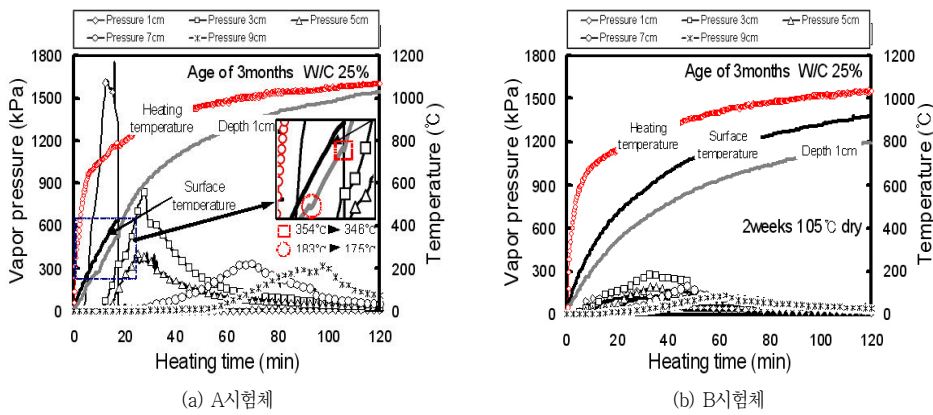


그림 6. 함수율의 차에 따른 HSC의 수증기압 변화 및 폭발시 온도변화

3.3 열-수분 이동과 폭발과의 관계

현재 대다수의 연구자들은 HSC의 폭발현상이 수증기압, 열응력, 고온열화 등의 원인이 복합적으로 작용하여 발생하는 것으로 이해하고 있으며, 이러한 시각이 보편·타당할 것으로 판단된다. 그러나 HSC의 폭발에 미치는 영향인자 중 과연 어느 인자가 직접적인 영향을 미치는가에 대해서는 깊은 고찰이 필요하다.

즉, HSC가 건설현장에 중요 구조부재에 대량으로 적용되고 있는 현 상황에서 화재시 폭발문제에 대한 해결방안을 모색하는 것이 매우 큰 과제로 여겨지고 있으며, 이를 해소하기 위해서는 직접적인 영향인자에 대한 체계적이고 구체적인 구명이 필요하다.

최근 많은 연구자들이 수분의 영향을 검토하는 과정에서 고온시의 수분거동이 세공구조의 연결성에 의존하며, 이러한 미세구조의 연결성은 수분이동에 의한 불포수층이 포수층으로 변화함에 따른 세공구조의 연결성 저하와 수증기압의 상승을 폭발의 주된 요인으로 평가하고 있다.^{10,17)}

<그림 7>은 설계기준강도 80 MPa급(28일강도 104 MPa)의 HSC를 대상으로 28일간 표준양생 후 2개월 이상 기중양생한

시험체(A시험체)와, 동일한 양생을 거친 후 2주간 건조기에서 105°C로 건조한 시험체(B시험체)를 대상으로 KS F 2257(ISO 834)의 표준가열시험을 수행한 결과이다.

A시험체의 경우는 가열시험 시작으로부터 8분과 17분에 2차례의 폭발이 발생하였으나, B시험체의 경우는 2시간 가열하는 동안 폭발현상이 발생하지 않았다.

이는 <그림 6 및 7>에서도 알 수 있듯이 A시험체의 경우 상대 함수율이 70%이상으로서 높게 나타나 이에 따른 세공층의 포수층 점유율 상승으로 인한 수분이동 역제가 수증기압의 상승으로 이어져 폭발이 발생한 것으로 판단된다.

한편, B시험체의 경우에는 장기적인 강제건조에 의해 콘크리트의 상대함수율이 현저하게 낮아져 수증기압의 상승이 억제되었으며, 세공층의 불포수층 분포가 증가하였기 때문에 조직이 치밀한 HSC임에도 불구하고 수분이동이 원활하게 이루어져, 수증기압이 완화된 것을 알 수 있다.¹⁰⁾

이처럼, 콘크리트중의 수증기압 증대는 수분이동 현상에 크게 의존하는 것을 알 수 있으며, 수분이동이 원활히 이루어질 경우에는 수증기압이 완화되지만, 반대로 세공조직의 치밀성 증대 및

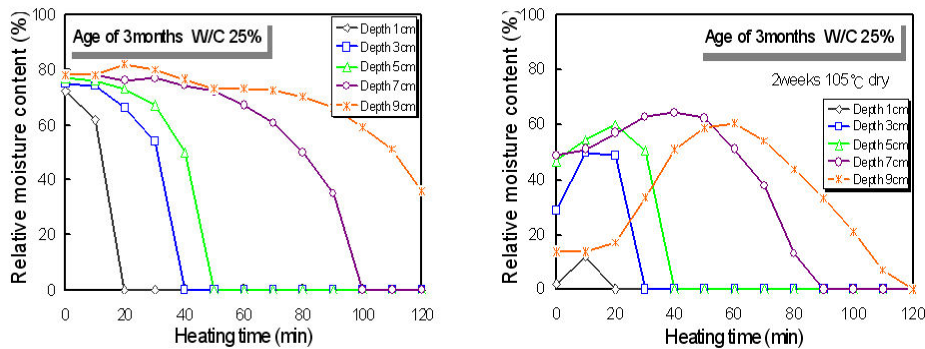


그림 7. 함수율의 차에 따른 HSC의 수분이동 변화

함수율 증가에 따라 대량의 수증기압 발생과 함께 포수층의 분포가 높은 경우는 수분이동이 억제되어 수증기압이 급격하게 상승함으로서 폭발발생 가능성이 높아진다.

4. 폭렬과 내화성능

4.1 폭렬과 열열화깊이

콘크리트 구조물의 화재에 의한 성능저하는 폭렬과 열열화깊이에 의해 종합적으로 판단할 수 있다. 콘크리트 부재는 폭렬현상에 의한 단면결손으로 부재온도가 급격하게 상승하며 부재의 온도상승은 단면결손 정도에 의해 온도분포가 다르게 나타난다. 콘크리트 부재에 팍이웃이나 표층부에 한정하여 폭렬이 발생한 경우 기존의 성능설계에 의한 내화성능의 추정이 가능하나 화재발생 초기부터 종료시까지 연속적으로 폭렬이 발생한 경우 내화성능의 검증 및 판단에는 주의가 필요하다.

열열화깊이는 폭렬이 발생하지 않는 경우 화재경과시간 및 화재온도와 밀접한 관계를 가진다. 화재경과시간과 화재온도가 유사한 경우 콘크리트의 종류에 상관없이 열열화깊이는 거의 유사하며 초기에 폭렬이 발생한 경우 다소 차가 발생하지만 폭렬이 발생한 깊이만큼 등온선도 증가하게 된다.

<그림 8>은 단면결손에 의한 열열화깊이의 증가와 비재하 시험방법에 의한 온도 측정위치를 나타낸 것이며 폭렬의 예상깊이가 예측 가능한 경우 철근의 피복두께를 고려한 부재설계가 가능하다.

4.2 폭렬과 내화성능

구조부재의 내화성능은 비손상성이 주요성능으로 제시되며 구조내력상의 지장을 가져올만한 변형이나 응해, 단면손상이나 파괴 등이 발생하지 않아야 하며 화재시의 필요한 내력을 확보할 것을 요구하고 있다. 내화성능에 대한 평가는 표준화재 조건에

- 1. 폭렬에 의한 등온선도의 증가
- 2. 비재하 온도판정
평균 : 538℃, 최고 : 649℃ 이하

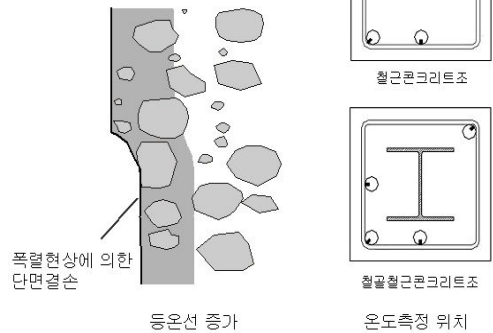



그림 8. 열열화깊이 및 온도측정 위치⁴⁾

노출시킨 부재에 대해 비손상성, 차열성, 차염성 등의 성능기준을 만족하는 시간으로 내화성능을 평가한다. 재하시험의 경우 성능기준은 최대변형 및 최대변형속도이며 비재하 시험의 경우 부재내부의 평균 및 최고온도이므로 설령 부재에 폭렬이 발생하더라도 허용범위 이내에서 제어한다면 성능기준을 만족하는 것을 의미한다.

즉, 비재하 시험을 고려한 내화설계상의 폭렬제어는 유발요인으로부터 폭렬이 발생하더라도 주 철근의 온도상승을 허용범위인 평균 538℃와 최고 649℃ 이하로 억제하는 방안이며 내화 마감층의 형성과 폭렬에 유효한 공법을 적용함으로써 대책을 마련할 수 있다.

5. 결 론

철근콘크리트 구조는 내화구조로서 화재에 대해 비교적 안전하며 내화성능이 우수한 구조로 인식되었다. 또한 실제로도 수많은 콘크리트 구조물에 화재피해가 발생하더라도 피해부위의 보수

및 보강 조치 후 재사용되고 있으며 구조물의 현저한 손상사례 또한 찾아보기 힘들다. 그러나 국내에서도 초고층 구조물에 HSC의 사용이 현저하게 증가하고 있고 내화성능에 관한 관리기준 또한 마련됨에 따라 성능 확보를 위한 신공법 적용 및 재료개발이 필요하다. 전절에서 기술한바와 같이 HSC의 폭렬은 열 및 수증기의 이동과 밀접한 관련을 지니므로 이를 효율적으로 제어하기 위한 열의 차단이 필요하다. 폭렬을 저감하기 위한 여러 대책과 기술이 개발되고 있는 현시점에서 유효한 제어공법의 개발과 적극적 활용이 기대되며 기술력 확보를 위한 일련의 연구가 필요하다. 

참고문헌

1. 한국콘크리트학회, 철근콘크리트구조물의 내화특성, 한국콘크리트학회, 2005.
2. 대한건축학회, 고강도콘크리트 구조내화설계, 대한건축학회, 2008.
3. 한국건설기술연구원, 건축물 내화설계 기술개발, 한국건설기술연구원, 2004.
4. 고강도콘크리트의 기동보의 관리기준, 국토해양부고시 2008- 334호.
5. 요업기술원, 내화성 고강도콘크리트 제조기술에 관한 기초연구, 요업기술원, 2007.
6. 송훈 외, “고강도콘크리트의 세공구조 변화와 가열온도와의 상관성,” 대한건축학회논문집, 2006. 9.
7. 김홍열, 고온 영역에서 고강도콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구, 박사학위 논문, 2003.
8. 한천구 외, “고강도콘크리트의 폭렬발생 및 방지 메커니즘,” 콘크리트학회지, 2007.
9. 송훈, 고온에 노출된 실리카폼 혼입 고강도콘크리트의 공극구조 변화, 한국콘크리트학회, 2004. 10.
10. 고정원 외, “화재가열환경하에 있는 콘크리트층의 열과 수분이동에 의한 세공구조의 거동 및 폭렬메커니즘에 관한 연구,” 대한건축학회논문집, 2007.12.
11. Chi-Sun Poon etc., “Strength and Durability Recovery of Fire-Damaged Concrete after Post-Fire-Curing,” *Cement and Concrete Research*, No. 31, 2001, pp. 1307~1318.
12. Hertz, K. D., “Limits of Spalling of Fire-Exposed Concrete,” *Fire Safety Journal*, 2003, pp. 103~116.
13. Schneider, U., “Concrete at High Temperatures-A General Review,” *Fire Safety Journal*, 1988, pp. 55~68.
14. Kalifa, P. etc., “Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures,” *Cement and Concrete Research*, No. 30, 2000, pp. 1915~1927.
15. Bažant, Z. P., etc., *Finite Element Program for Moisture and Heat Transfer in Heated Concrete*, Nuclear Engineering and Design, 1981, pp. 61~70.
16. Khoury, G. A., etc., “Fire Design of Concrete, Material, Structure and Modeling,” *Proceedings of the first fibcongress*, Osaka, 2002, pp. 99~118.
17. Gary R. Consolazio, “Measurement and Prediction of Pore Pressure in Saturated Cement Mortar Subjected to Radiant Heating,” *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 5, 1998.
18. 一瀬賢一, “高温加熱下の高強度コンクリートの力学的性質に関する研究,” 博士学位論文, 2003, 55 pp.
19. Schneider, U., (森永繁, 林章二, 山崎庸行訳) : 콘크리트의 열적性質, 技報堂出版, 1983.
20. 岡島達雄, 他, セメント硬化体の弾性定数および超音波伝播速度に及ぼす含水率の影響, セメント技術年報, No.35, 1981, pp. 126~129.
21. 田中弘文, 他, セメント硬化体の加熱後の性質と再水和, セメント技術年報, No. 36, 1982, pp. 45~48.
22. 宮本圭一, 他, “超高強度コンクリートの高温加熱後の力学的性質,” 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)A-2, 2005, pp. 53~54.
23. 一瀬賢一, 川口徹, 長尾覚博, 河辺伸二, “高温加熱を受けた高強度コンクリートの強度回復,” 콘크리트学年次論文集, Vol. 25, No. 1, 2003.
24. 熊谷正人, 他, “耐火物の熱衝撃による破壊現象の研究,” 窯協年会, 講演原稿集, 1978, pp. 51~54.
25. 鈴木弘茂, 高温セラミック材料, 日刊工業新聞社, 1995.
26. 長尾覚博, 他, “高温を受けるコンクリート部材の水分移動と圧力形成に関する模型実験,” 日本建築学会構造系論文報告集, No. 452, 1993, pp. 1~10.

◇◇◇ 원고 모집 안내 ◇◇◇

「콘크리트학회지」는 콘크리트 관련 학문과 기술에 대한 정보를 제공하기 위해 발행되고 있습니다. 본 학회지를 통해서 연구 결과, 경험한 사례 등을 콘크리트 관련 기술자들과 함께 나누길 원하시는 분께서는 다음과 같은 형태로 참여하실 수 있습니다. 여러분의 옥고를 기다리겠습니다.

- 원고 주제 : 포토에세이(사진, 서예, 시 등), 특집기사, 기술기사, 공사기사, 원로와의 대화, 해외번역기사, 해외연구소 소개, 국제학술대회 참가기, 현장탐방, 논단, 우리회사소개 등
- 원고 분량 : 글씨크기 11pt, 줄간격 160%, A4용지 4매 ~ 6매 내외
- 보내실 곳 : E-mail : mjh@kci.or.kr