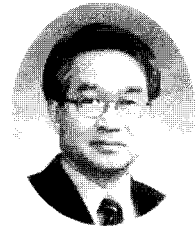


# 특 집

|| 콘크리트 교육의 장래 전망 ||

## 고성능 콘크리트의 내화성능 (고강도 및 섬유보강 콘크리트)

- Fire Resistance of High Performance Concrete  
(High Strength Concrete & Fiber Reinforced Concrete) -



소양섭\*

### 1. 서 론

콘크리트의 내화성능에 대한 다각적인 연구가 1970년대부터 원자로의 안정성 확보차원에서 진행되어 왔으며 특히 콘크리트의 취성과파괴(brittle failure)등에 대한 연구가 많다<sup>1)</sup>. 콘크리트의 내화성이란 화재로부터 보호되고 고열환경에 견디는 재료적 특성 즉 화재온도 1,000 °C 정도의 고온을 30분에서 3시간 정도를 받은 경우 콘크리트 중에 매립된 철근 등 철강을 소정의 온도 이하로 유지하기 위한 피복 역할을 유지하면서 구조물의 큰 변형이나 붕괴 등을 막기 위한 소요 압축강도 및 영계수 등의 성능을 가지고 있는 성질을 말한다.<sup>5)</sup>

한편 콘크리트에 대한 화재의 영향은 여러 가지 경우에 의해 설명되어질 수 있고 이 때의 콘크리트 내구성은 단지 구조물의 건설재료로서의 의미 이상의 구조요소로서 해석되어야 하기 때문에 콘크리트 내화성의 해석은 매우 광범위하고 복잡하다. 일반적으로 콘크리트는 화재시 상당히 오랜 시간 동안 소요의 성능을 유지하며 어떠한 유해 가스나 연기 등을 배출하지 않으므로 다른 재료에 비하여 우수한 저항성능을 지니고 있다고 할 수 있다.

### 2. 콘크리트의 내화성 측정을 위한 실험기준·방법 및 연구동향

콘크리트의 내화실험에 있어서 내화성능은 배합비와 양생방법,

화기에의 노출시간 및 속도 등과 같은 수많은 변수에 의해 영향을 받으므로 화재에 의한 피해를 받지 않는 콘크리트를 만들기 위해서는 콘크리트의 구성 성분, 성분의 거동과 콘크리트의 성능에 대한 영향을 이해하는 것이 필요하다<sup>1),6)</sup>. 콘크리트의 내화성을 연구하는 데 있어서 실험기준은 국제표준으로 인정되고 있는 RILEM Committee 129-MHT(Test Methods for Mechanical Properties of Concrete at High Temperatures)과 ASTM E119, ISO 834, JIS A 1304 등이 있으며 시험의 종류와 연구내용은 <표 1, 2, 3>과 같다.

표 1. 내화시험의 종류

종류	내용
정적상태 시험 (Steady-state test)	<ul style="list-style-type: none"> <li>시험체를 목표 가열 온도까지 서서히 가열하는 방법으로 외부 온도는 시험체의 내부온도가 일정한 온도가 되도록 일정 온도를 유지한다.</li> <li>재료의 성능에 대한 온도의 영향을 파악하는 데 유리</li> </ul>
일시상태시험 (Transient test)	<ul style="list-style-type: none"> <li>시험체 내부에 온도의 변화가 생기도록 하기 위해 주위 온도를 빠르게 가열되도록 한 후 노출시킨다.</li> <li>실제 화재시에 일어나게 될 상황에 대한 거동을 파악하는 데 유리</li> </ul>

### 3. 고강도 콘크리트(HSC)의 내화특성

#### 3.1 고강도 콘크리트의 일반적인 특징

고강도 콘크리트(이하 HSC라 함)는 실리카 폼과 감수제 등과

\* 정회원, 전북대학교 공과대학 건축·도시공학부 교수

표 2. 온도와 하중 종류와의 관계

종류	그림	내용
비응력시험 (Unstressed test)		<ul style="list-style-type: none"> <li>시험체에 어떠한 응력을 가하지 않고 시험체가 임의의 목표 온도에 도달할 때까지 가열하며 안정상태(steady-state)에 이른 후에 재하한다.</li> </ul>
응력시험 (Stressed test)		<ul style="list-style-type: none"> <li>실내 온도에서의 시험체 강도보다 낮은 임의의 강도(보통 약 20 ~ 40%)를 시험체에 재하한 후 실험목표온도까지 가열하는 방법으로 안정상태에 이른 후에 시험체를 실험한다.</li> </ul>
정상상태시험 (Residual property test)		<ul style="list-style-type: none"> <li>시험체를 실험목표온도까지 가열한 후 정적상태에 이를 때까지 유지한 다음 표준온도까지 냉각시킨 후 대기온도에서 실험한다.</li> </ul>

표 3. 온도와 재하방법과의 관계

종류	내용
응력속도조절법 (Stress-rate control)	<ul style="list-style-type: none"> <li>응력이 일정하게 증가한다.</li> </ul>
변형률조정법 (Strain-rate control)	<ul style="list-style-type: none"> <li>변형률이 일정하게 증가한다.</li> </ul>
일정 응력법(creep)	<ul style="list-style-type: none"> <li>응력이 일정하게 유지되어지고 시간에 따른 변형을 측정한다.</li> </ul>
일정변형률법(relaxation)	<ul style="list-style-type: none"> <li>변형률은 일정하게 유지되어지고 시간에 따른 응력을 측정한다.</li> </ul>

표 4. 주요 연구자들의 고성능 콘크리트에 대한 내화특성연구

연구자 및 연대	변수					폭열시 온도분포(°C)
	압축강도(MPa)	온도분포(°C)	가열속도(°C/min)	콘크리트, 골재의 종류	시험체 크기(mm)	
Abrams(1971)	23~45 <sup>1)</sup>	21~871	-	탄산염, 규산염 골재, LWA	75×150*	밝혀지지 않음
Sullivan, Shansar (1982)	38~65 <sup>1)</sup>	20~600	1~1.5	실리카흙, BFS와 골재조합	64×64*	밝혀지지 않음
Hertz(1984)	170 <sup>1)</sup> , 150 <sup>2)</sup>	20~650	1	실리카 폼, 강섬유	100×200*, 57×100*, 28×52*	350~650
Diederichs(1988)	33~114 <sup>1)</sup>	20~850	2, 32	BFS, 실리카 폼, FA, OPC	100×100×100**, 80×300*	밝혀지지 않음
Castillo(1990)	28, 62 <sup>1)</sup> , 31, 63, 89 <sup>2)</sup>	25~800	7~8	OPC	51×102*	320~360
Morita(1992)	20, 39, 59 <sup>1)</sup> , 20, 74 <sup>2)</sup>	20~500	1	-	100×200*	밝혀지지 않음
Hammer(1995)	69~118 <sup>1)</sup>	20~600	2	실리카 폼, LWA, NWA	100×310*	300
Furumura(1995)	21, 42, 60 <sup>1)</sup> , 38, 55, 79 <sup>2)</sup>	20~700	1	-	50×100*	300
Flicetti(1996)	72, 95 <sup>1)</sup>	20~500	0.2	실리카 폼	100×300*, 100×150*, 80×275×500**	밝혀지지 않음
Nourmowe(1996)	38, 61 <sup>1)</sup>	20~600	1	탄산염 골재, 실리카 폼	160×320*, 100×100×400**	밝혀지지 않음

1) 설계강도

2) 내화실험시 측정강도

\* 원통형(D×H)

\*\* 입방체

표 5. NSC와 HSC의 일반적 특성 비교<sup>3)</sup>

항목	HSC	보통강도 콘크리트(NSC)
압축강도(MPa)	91.8	34.9
함수량(중량비 %)	2.95	3.9
공극률	9.4	14.3
200 °C에서의 공극률(%)	9.4	5.8

같은 다양한 혼화재료를 이용하여 콘크리트 플랜트에서 제조되고 있다. HSC의 정의는 그 사용량과 성능의 증진과 더불어 변화해 왔으며, 현재는 ACI 363R-92(1)에서 기존의 재료와 혼화재료를 사용한 콘크리트의 압축강도가 적어도 40 MPa(약 420 kgf/cm<sup>2</sup>) 이상에 이르는 콘크리트를 HSC라 정의하고 있으며, KS에서는 400 kgf/cm<sup>2</sup> 이상을 HSC로 규정하고 있다.<sup>1), 10), 12)</sup>

HSC는 같은 온도에 노출되었을 때 보통강도 콘크리트(이하 NSC라 함)보다 약 20 ~ 30 % 정도의 강도저하가 일어나는 것으로 보고되고 있으며, 낮은 물-시멘트비와 실리카 폼, 고로 슬래그 등과 같은 포졸란 재료를 사용하기 때문에 NSC보다 많은 시멘트계 재료와 더 낮은 투기성으로 인하여 실제 화재에 발생하는 상황과 비슷한 속도로 가열되어질 때 폭열(explorative spalling)을 할 수 있는 가능성이 더욱 크다.<sup>3), 7), 8)</sup>

### 3.2 고온에 노출된 HSC의 역학적 특성

고온에 노출된 HSC의 압축강도나 탄성계수 등과 같은 역학적 성능은 NSC와는 상당한 차이가 있다. 이러한 차이는 100 °C에서 400 °C의 온도에서 가장 두드러지게 나타나며 일반적으로 NSC는 300 °C까지 가열되어질 경우 일반 압축강도에 비하여 약 10 ~ 20 % 정도, 600 °C에서는 60 ~ 75 % 정도의 강도저하가 일어난다. HSC의 경우 강도의 감소는 더욱 현저하여 450 °C 미만에서는 일반 압축강도에 비하여 40 % 정도의 강도저하가 일어

표 6. 각 국가별 HSC 내화특성 연구상황

국가	연구내용	국가	연구내용
스웨덴	<ul style="list-style-type: none"> <li>가열속도, 재하량, 혼화재료에 따른 파괴 경향</li> <li>HSC의 파괴에 대한 폴리프로필렌 섬유 영향</li> <li>온도에 따른 열성능의 분석기법</li> <li>재료의 특성과 구성비</li> <li>HSC 시험체의 시뮬레이션 분석</li> <li>내화실험한 HSC 기둥의 시뮬레이션 분석</li> <li>HPC 보, 슬라브, 기둥의 내화설계법</li> </ul>	이탈리아	<ul style="list-style-type: none"> <li>규산질계 HSC의 내화성능</li> <li>부싯돌(flint)을 이용한 HSC의 내화특성</li> <li>마이크로 콘크리트(<math>f_c = 170 \text{ MPa} \sim 200 \text{ MPa}</math>)의 내화성능</li> <li>대기온도와 <math>500^\circ\text{C}</math>까지의 응력변형도, 압축, 인장강도, 인성지수</li> <li>가열 온도에 따른 HSC의 파괴, 길이 변화,</li> <li>구조물의 구조역학적 거동</li> </ul>
독일	<ul style="list-style-type: none"> <li>HSC(<math>90 \text{ MPa} \sim 100 \text{ MPa}</math>)의 역학적·열적특성</li> <li>UHSC(<math>150 \text{ MPa}</math> 이상)의 역학적·열적특성</li> <li>파괴지수, 역학적 거동</li> <li>전산화 처리 작업</li> </ul>	캐나다	<ul style="list-style-type: none"> <li>full scale의 HSC 기둥 내화설계</li> <li>기둥의 단면크기, 형상, 띠철근의 간격, 양단지지 조건</li> <li>강섬유와 PP 섬유를 이용한 HSC의 내화특성</li> <li>규산질계 골재와 탄산염 골재를 사용</li> </ul>
미국	<ul style="list-style-type: none"> <li>HSC(<math>69 \text{ MPa} \sim 148 \text{ MPa}</math>)의 가열온도에 따른 투기성, 건조율, 함수율, 강도저하, 인성변화, 파괴에너지, 물의 거동, 공극압</li> <li>탄산염 골재와 규산염 골재를 사용한 HSC의 내화특성</li> <li>가열 온도에 따른 열전도, 열확산, 중량 변화</li> <li>보통 콘크리트와 HSC의 내화 특성 비교</li> <li>칼슘알루미늄에이트계 내화 콘크리트의 폭열 시뮬레이션</li> <li>열처리, 콘크리트의 배합비, 화학적 혼화제와 고분자 섬유를 사용한 투기성의 변화</li> </ul>	대만	<ul style="list-style-type: none"> <li>규산질 골재, 규산질 골재와 강섬유 혼입, 탄산염 골재, 탄산염 골재와 강섬유 혼입한 HSC의 내화특성</li> <li>강섬유, 유리섬유, 폴리프로필렌섬유를 혼입한 HSC의 내화특성</li> </ul>
프랑스	<ul style="list-style-type: none"> <li>모델링에 의한 HSC의 파괴거동</li> <li>HSC의 고온에서의 특성</li> <li>화재 피해 평가와 보수 보장법</li> <li>고온에서 콘크리트의 모델링화와 물리적 매커니즘</li> </ul>	노르웨이	<ul style="list-style-type: none"> <li>탄산수소 화염에 의한 해안 콘크리트의 내화특성</li> <li>고강도 LWA 콘크리트의 내화특성</li> </ul>

난다고 보고되고 있다.<sup>11,7),8),9)</sup>

(1) 압축강도

HSC의 압축강도와 온도사이의 관계는 실험방법과 보통 골재와 경량골재 등 골재의 종류에 따라 달라진다.

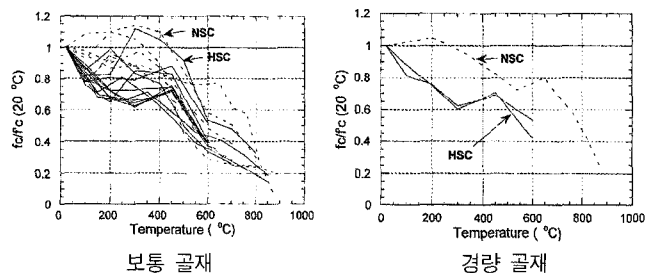
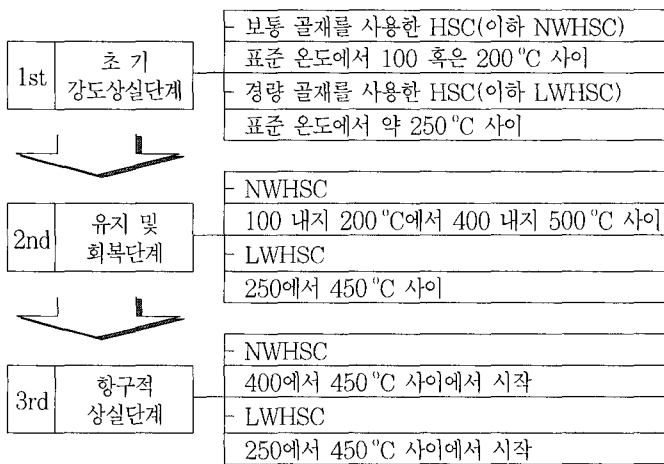


그림 1. 압축강도와 온도의 관계

1) 비응력실험(unstressed tests)은 응력을 가하지 않은 상태에서 가열을 하여 실험을 하는 방법으로 이 방법에 의한 압축강도-온도사이의 관계는 <그림 1>에 나타나 있으며  $100^\circ\text{C}$ 에서 약  $400^\circ\text{C}$  사이 온도에서 HSC의 강도저하가 NSC보다 현저하게 크다는 점을 제외하고는 대체로 비슷한 경향을 보여주고 있다.

2) 정상상태실험(residual properties test)에서 HSC의 압축강도-온도 관계는 <그림 2>에서와 같이 다음 2단계로 특징지어 지는 데 가열온도의 전 분포에 걸쳐 NSC의 압축강도-온도 관계와 다소 비슷한 경향을 보이고 있다.

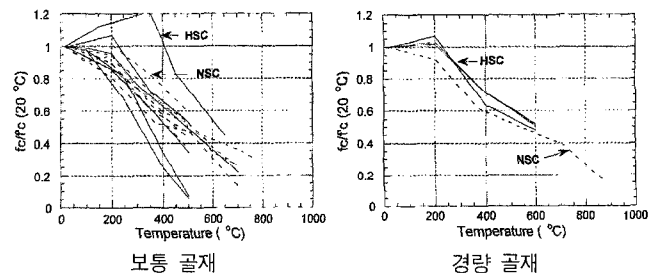
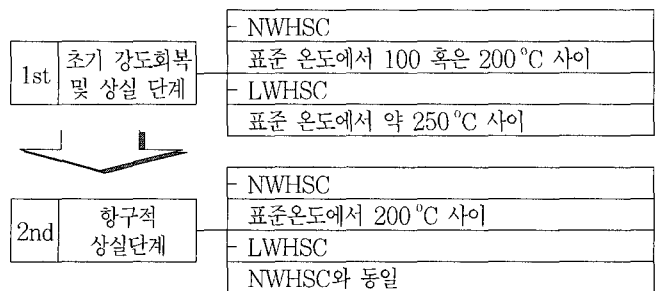


그림 2. 압축강도와 온도의 관계

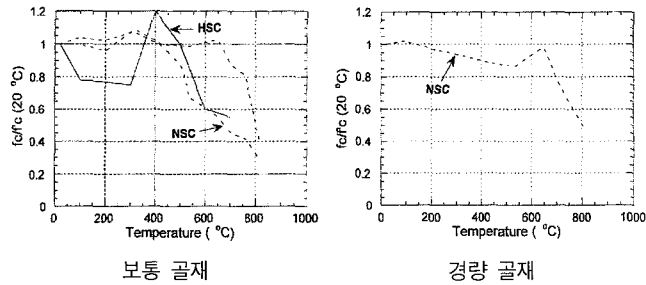
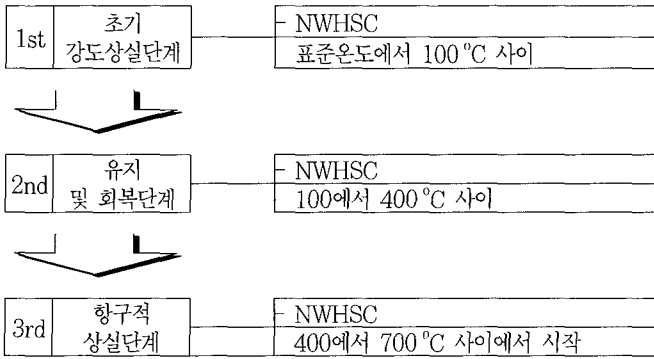


그림 3. 압축강도와 온도의 관계

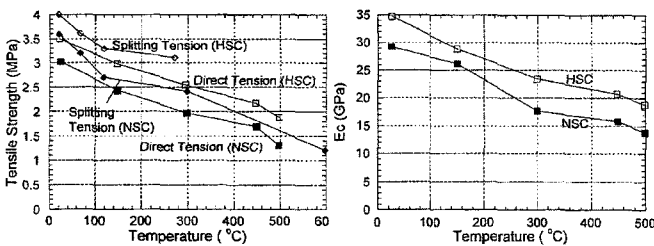


그림 4. 인장강도와 온도의 관계

그림 5. 탄성계수와 온도의 관계

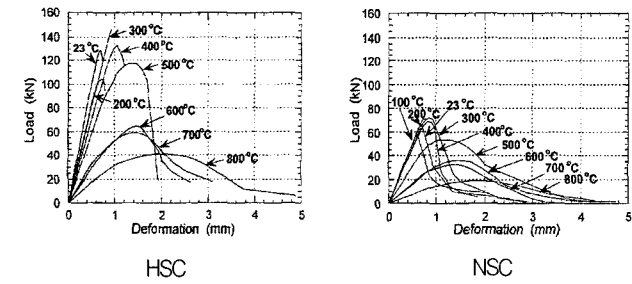


그림 6. 온도에 따른 하중-변형의 관계

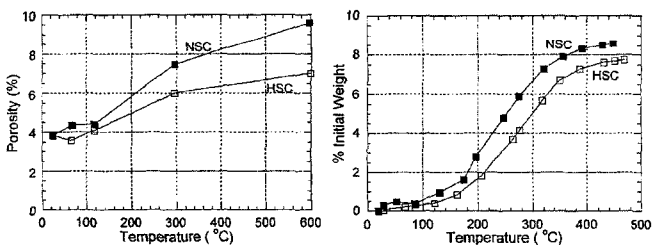


그림 7. 공극률과 온도의 관계

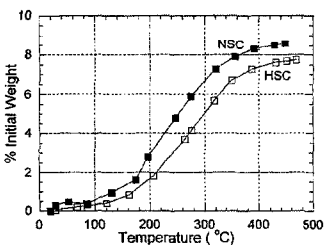


그림 8. 중량변화와 온도의 관계

3) 응력시험(stressed tests)에 의한 HSC의 압축강도-온도 관계는 <그림 3>에 나타나 있으며 다음과 같은 경향을 보여주고 있다.

(2) 인장강도

<그림 4>에서 보이는 것처럼 HSC와 NSC는 온도가 증가함에 따라 거의 선형적으로 인장강도가 감소하는 경향을 보이며, 모든 온도에 걸쳐 HSC의 인장강도가 NSC보다 약 15% 정도 높은 수치를 나타낸다.

(3) 탄성계수

콘크리트의 탄성계수는 구조물의 거동에 영향을 미치며 온도에 의해 직접적으로 영향을 받는다.

HSC와 NSC 모두 탄성계수-온도와의 관계는 대부분 비슷한 경향을 보이고 있으며 NSC와 비교하여 볼 때 <그림 5>에서 보는바와 같이 HSC의 탄성계수는 전 부분의 가열온도에 걸쳐 10~25% 정도 더 크게 나타나고 있다. 탄성계수의 감소 정도는 콘크리트에 사용되는 골재에 따라 달라질 수 있다. 이상의 경향을 일반화하는 관점에서 보면 온도에 따른 강도와 탄성계수의 변화는 비슷한 양상을 보이고 있다.

(4) 응력-변형률

일반적으로 HSC는 NSC보다 기울기가 급한 응력-변형률 곡선을 가지며 이는 HSC의 취성적인 특성 때문이며 이러한 차이는 <그림 6>에서 보는 바와 같이 800°C까지 계속 유지된다.

(5) 공극률

일반적으로 콘크리트의 공극은 강도에 부정적인 영향을 미치며 표준온도 상태에서 HSC의 공극률은 NSC보다 낮다. <그림 7>에서 보는바와 같이 온도에 따른 공극률은 약 25°C에서 120°C 사이에서는 크게 변하지 않으나 120°C 이상으로 점차 온도가 증가함에 따라 NSC의 공극률은 HSC를 훨씬 상회하는 특징을 보인다.

(6) 중량변화

일반적으로 실리카 폼이나 고로 슬래그 등과 같은 혼화재료나 감수제와 같은 화학적 혼화제를 많이 사용한 HSC는 NSC보다 초기 함수량이 적고 투기성이 더 낮기 때문에 각 가열온도분포에 따른 중량변화는 <그림 8>에서 보는바와 같이 HSC보다 NSC가 더 크며 가열온도가 약 110°C에서 350°C의 범위에 있을 때 가장 크게 일어난다.

(7) 화학적 변화와 파괴양상

가열된 시험체를 SEM 분석을 함으로써 시험체의 연대기적 파괴양상을 가시화 할 수 있는데, 각각의 가열온도에서 수화물과 냉각 중에 재형성된 수산화칼슘은 각기 자신들만의 형태학적인 특징을 가진다. 이러한 분석을 통하여 300°C 미만의 온도에서는 CH 결정체와 미수화 시멘트 입자의 경계면을 따라 생기는 작은

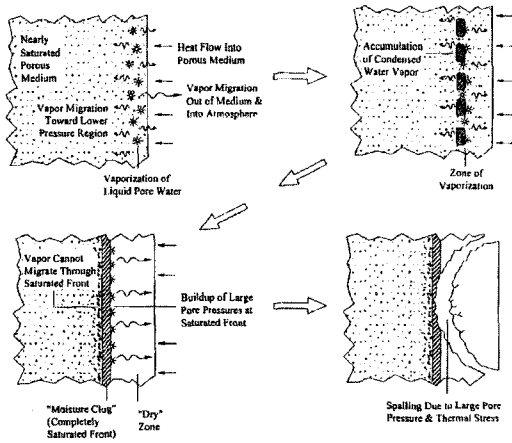


그림 9. HSC의 열에 의한 폭열 개략도<sup>7)</sup>

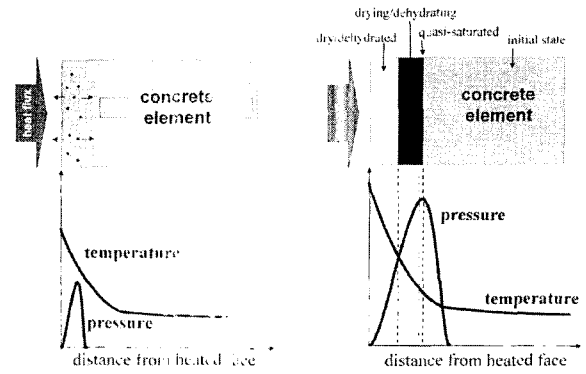


그림 10. 고온에서 콘크리트의 공극압 분포<sup>8)</sup>

균열을 제외하면 큰 균열은 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다. 즉 300 °C 미만의 온도에 노출된 콘크리트는 오직 경계면의 국부균열이 생긴다는 점으로 특징지어지며 300 °C에서 500 °C의 온도에 이르면 골재는 입자 주위에 균열이 발생하며 얇은 단면을 가지는 부재의 경우 등방성의 균열이 발생한다. 500 °C 이상이 되면 수화생성물들은 분해되는 현상을 보이며 시멘트 페이스트는 내부에서, 골재는 입자 주위에서 큰 균열이 발생한다.<sup>11,9)</sup>

### 3.3 고온에서의 HSC의 폭열

화재에 노출된 HSC는 NSC에 비하여 폭열의 경향이나 특징 면에서 다소 다르다. HSC의 밀실한 구조는 수증기나 습기가 이동하기 어려워 콘크리트의 표면근처에 높은 수증기압을 일으킨다. 보통강도 콘크리트의 폭열은 하마씨(Harmathy)에 의해 처음으로 알려졌으며, 화재에 노출된 HSC에 있어서 고려되어야 할 주요 문제점으로 대두되고 있다.<sup>11)</sup>

HSC의 폭열은 1) 함수량의 정도 2) 콘크리트의 밀도 3) 외부 하중에 의한 압축응력과 프리스트레스(prestress) 4) 가열온도의 속도 5) 비대칭적인 온도분포 6) 보통 상태에서의 HSC의 강도 7) 시험체의 치수와 형상 등에 따라 그 경향이 달라지며, HSC의 취성파괴는 일반적으로 다음과 같은 현상에 의해 일어난다.

1. 하마씨에 의해 제안된 습기장애(moisture clog)라 불리는 현상으로 콘크리트의 가열부의 과포수상태에 의해 일어나는 높은 공극압의 생성
2. 구조물 내에 축적되어 있는 열응력의 퍼텐셜 에너지(potential energy)를 불안정하게 배출함으로 인한 취성파괴
3. 골재의 구조적 변형

#### (1) HSC의 폭열과 공극압

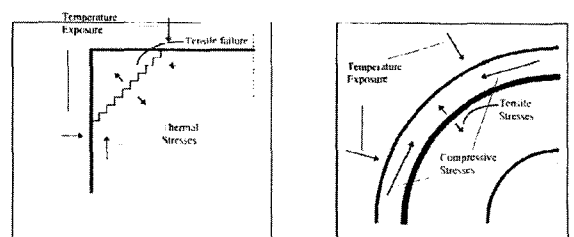
습기장애 현상에 의해 발생하는 공극압의 상승은 콘크리트의 폭열을 유발하는 역할을 한다고 할 수 있지만 과포수상태에 있는 젖은 콘크리트에서만 폭열이 일어난다는 최근의 연구결과를 볼

때 다소의 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

수증기와 공기는 부분적으로 가열면을 통하여 빠져나가지만 동시에 콘크리트의 중심으로 이동한다. <그림 10>에서 볼 수 있는 바와 같이 공극압의 피크는 가열면으로부터 임의의 거리에 떨어진 포수층에서 생기며, 300 °C에서 공극압은 거의 8 MPa까지 이르고 있고 이는 5 MPa 정도의 인장강도를 가지는 HSC가 큰 변형 없이 유지하기에는 너무 높은 수치로써, 이러한 내부 압력으로 인하여 콘크리트는 균열을 발생하게 된다.

#### (2) HSC의 폭열과 열응력

콘크리트는 열전도성이 낮고 비열이 높기 때문에 화재에 노출 되어졌을 경우 급격한 열전이(熱轉移)라는 특징을 나타낸다.<sup>5)</sup> 이러한 현상은 대개 2차원 혹은 3차원적인 열응력을 발생시키며 결국에는 콘크리트의 인장강도에 이르고 때로는 콘크리트의 허용인장응력을 초과하기도 한다. 이러한 인장응력은 단독으로 발생하기도 하나 대부분은 어느 한 방향으로 공극압과 더불어서 발생하여 HSC의 폭열을 일으킨다. <그림 11>은 열응력에 의한 영향을 콘크리트의 형상에 따라 두 가지로 나누어서 해석한 것으로 인장응력은 외부에서 압축 열응력이 발생하여 모서리에서 서로 마주치게 될 때 발생한다. 만약 이러한 인장응력이 콘크리트의 인장강도에 이르게 되면 그림에서 보는 것처럼 콘크리트의 모서리 삼각형의 파편이 떨어져 나가는 현상이 발생하게 된다. 이러한 현



직각의 모서리

원형

그림 11. 열에 의한 콘크리트의 파괴<sup>6)</sup>

상은 방사상으로 인장응력이 발생하는 곡면으로 된 콘크리트에서도 유사하게 일어난다. 이렇듯 콘크리트 폭열의 주된 원인은 열응력의 포텐셜 에너지의 형태로 공급되는 에너지에 의해 일어난다. 따라서 HSC는 NSC보다 훨씬 더 취성적 성질을 가지고 있으므로 NSC보다 폭열할 가능성이 더 크다고 할 수 있다.

(3) 골재의 구조적 변형

고온시에 물리적 혹은 화학적 변화에 의해서 골재가 파열, 분쇄되는 현상으로 NSC에 있어서 골재의 구조적 변형은 일반적으로 부재의 표면에 국한되며 부재의 내화성능에는 큰 영향을 주지는 않는다. <그림 12>에서 보느냐와 같이 350°C, 450°C, 573°C의 경계곡선은 각각 갈철광에서 적철광으로 변환, Ca(OH)<sub>2</sub>의 분해, 석영이 α에서 β로 변환되는 온도를 나타내고 있다.

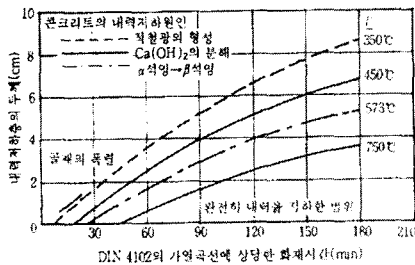


그림 12. 온도에 따른 골재의 변화

4. 섬유보강 HSC의 내화특성

섬유보강의 기본개념은 콘크리트 내에 인장강도가 높고 신율이 큰 섬유를 불규칙하게 분포시켜서 모래와 섬유간의 부착력에 의해 균열 증대를 억제시키며 취성적인 콘크리트의 특성을 연성적으로 전환시키는 것이다.<sup>10,12)</sup>

HSC의 높은 공극압, 열응력에 의한 파괴 등의 열에 의한 성능저하를 보강하기 위해서 HSC의 낮은 투기성을 폴리프로필렌 섬유(polypropylene fiber 이하 PP섬유)를 혼입함으로써 수증기나, 수분, 가스등이 빠져나갈 수 있는 경로를 만들어 주는 방법이 있다. PP 섬유가 열에 의해 녹을 때 HSC의 투기성을 증대시키기 위해서는 액상의 수분, 증기, 가스 등, 물질들의 통로를 확보하기 위해 시멘트 매트릭스 전반에 걸쳐서 PP 섬유가 고르게 분포되어 있어야 하며, 또한 이렇게 고르게 분포된 섬유는 시멘트 매트릭스 내에서 투기성이 좋은 유기적으로 연결된 네트워크를 형성하여야 한다.

표 7. PP 섬유의 일반적 특성<sup>6)</sup>

비중	고체상태	0.93
	액체상태	0.85
두께(μm)		50
폭(μm)		150
길이(mm)		19
용해점(°C)		171
증발점(°C)		341
연소점(°C)		460
열전도율(W/mK)		0.15

계 분포되어 있어야 하며, 또한 이렇게 고르게 분포된 섬유는 시멘트 매트릭스 내에서 투기성이 좋은 유기적으로 연결된 네트워크를 형성하여야 한다.

4.1 중량변화

가열에 의한 HSC가 시간이 지나감에 따라 혼입된 섬유는 열에 의해 가늘어지고 약해져 그 효과가 저하되며, 또 건조-탈수의 과정에 영향을 받는 부분이 콘크리트 두께에 비하여 좁기는 하지만 섬유의 혼입에 의한 중량 변화는 매우 중요한 특성이다. 섬유로 보강한 HSC의 가열에 따른 중량 변화는 섬유의 혼입량이 증가함에 따라 증가한다. 그 이유는 혼입된 섬유에 의해 콘크리트 외부로 수증기, 물, 가스 등이 빠져나갈 수 있는 통로가 만들어지기 때문이다.

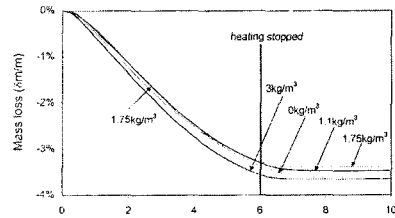


그림 13. 가열 시간에 따른 중량변화

4.2 열적 특성

시간에 따른 섬유보강 HSC 내부의 온도변화는 섬유를 혼입하지 않은 HSC와 비교하여 거의 비슷한 온도 분포를 <그림 14>에서 볼 수 있다. 각 깊이에 따른 온도분포는 섬유의 혼입량과는 무관하며 콘크리트의 열적특성에는 거의 영향을 미치지 않는다. 하지만 섬유의 용해점과 매우 가까운 100°C 이상과 160 ~ 200°C 사이에서는 온도의 상승을 방해하는 안정기(일반적으로 섬유를 혼입하지 않은 HSC는 250°C에서 나타남)의 현상을 보인다. 이러한 현상은 투과성이 향상된 조직 내의 통로를 경유하여 수분이 증발함으로써 퍼텐셜 에너지가 소모되어 일어난다. 따라서 콘크리트 내의 온도가 증가하여 섬유가 용해하게 되면 수분은 섬유를 혼입하지 않은 HSC보다 더 낮은 온도에서 증발할 수 있게 되는 것이다.

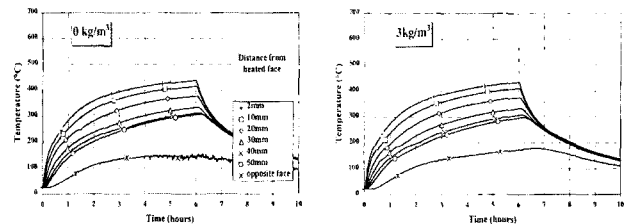


그림 14. 시간에 따른 온도 분포

### 4.3 공극압

열에 의한 HSC내의 공극압에 대한 섬유 혼입의 효과는 다른 특성들에 비하여 두드러지게 나타나고 있는 현상을 <그림 15>에서 볼 수 있다.

섬유보강 HSC의 각 깊이에서의 공극압 피크는 PP 섬유가 수분이 증발하는 온도보다 훨씬 아래인 PP 섬유의 용해점 근처 온도에서 일어나며, 섬유의 혼입량이 증가함에 따라 감소한다. PP 섬유는 용해할 때 거의 10% 정도까지 팽창하여 수분, 수증기, 가스가 외부로 빠져나간 후 비어있는 공간을 감소시키기도 한다.<sup>2)</sup>

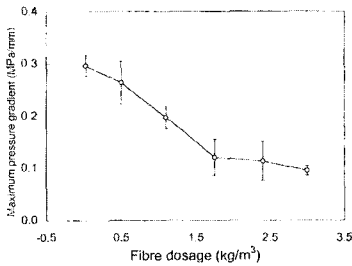


그림 15. 섬유혼입량에 따른 공극압

### 4.4 고온에서 PP 섬유의 거동과 미세균열

일반적으로 PP 섬유의 용해점은 약 170°C 정도로 콘크리트 내의 온도가 PP 섬유의 용해점을 초과하게 되면 <그림 16>에서 보이는 것처럼 용해하여 보이지 않게 되는 데 그 이유는 용해된 섬유는 공극의 직경보다 그 분자량이 크어도 불구하고 네트워크 내로 흡수되어 버리기 때문이다.

PP 섬유를 혼입한 HSC가 400°C에 노출되어질 경우 섬유를 혼입하지 않은 HSC보다 더 많은 균열이 관찰되지만 섬유보강 HSC에서 균열은 전반적으로 약 1μm 이하로 상당히 크기가 작고 잔골재나 굵은골재 사이에서 매우 조밀하게 형성하는 반면에 섬유를 혼입하지 않은 HSC는 균열의 크기가 약 10μm 이상으로 상당히 크며 먼 거리까지 골재와 연결되어 있는 상태를 <그림 17>에서 관찰할 수 있다. 섬유를 혼입한 HSC에서 균열이 더 많이 발생하는 원인으로는 열에 의한 골재의 팽창과 시멘트 페이스트의 결합수와 잉여수의 탈수(dehydration)로 인한 수축현상에 의해 생기는 팽창-수축의 전이단계시 fiber bed가 국부적으로 균열을 응집시키기 때문이며<sup>6)</sup>, 또 다른 이유로는 섬유가 열에 의해 용해할 때 다소 팽창하여 매트릭스 내에 인장응력을 발생시켜 균열을 응집시키기 때문이다.

### 4.5 투기성

<그림 18>에서 보는바와 같이 보통 콘크리트의 투기성은 내부의 온도가 증가함에 따라 외견상 선형적인 증가를 보이는 데 이

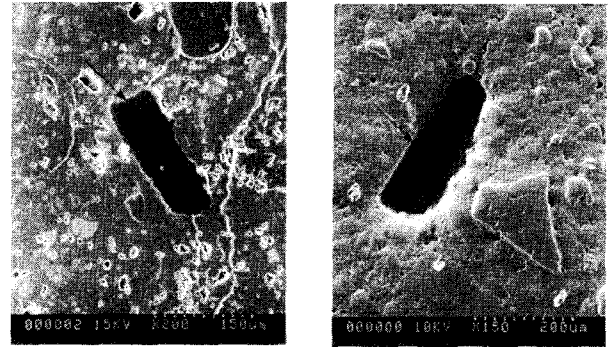


그림 16. 200°C에서 섬유의 용해(HSC 내)

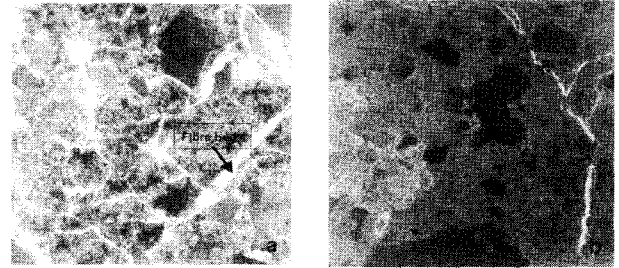


그림 17. 400°C에서 균열

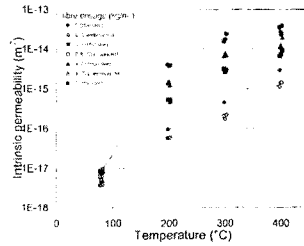


그림 18. 혼입량에 따른 투기성

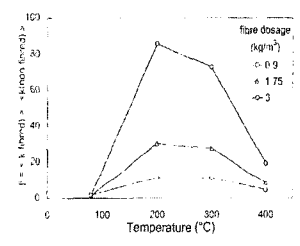


그림 19. Non-fiber HSC에 대한 상대투기성

는 미세구조 내에서 두 가지의 변화 요인에 기인되는 것으로 알려져 있다. 첫 번째 요인은 공극의 크기이며 80°C에서 300°C 사이에서의 공극은 그 크기가 증가하게 되며, 300°C 이상 특히 400°C에서 투기성은 균열에 의해 좌우된다. 따라서, <그림 19>에서 보는바와 같이 PP 섬유를 혼입한 HSC의 투기성은 혼입량( $\alpha_f$ ) = 3 kg/m<sup>3</sup>인 경우 PP 섬유가 용해되는 온도인 약 200°C 이하의 온도에서는 큰 폭으로 증가하지만 PP 섬유가 용해되면 투기계수의 증가폭은 현저히 떨어지게 된다.

## 5. 결론

보통 40 MPa 이상의 압축강도를 발현하는 고강도 콘크리트(HSC)의 내화특성과 열적거동에 대한 내용을 종합하여 보면 다음과 같다.

고온에 노출된 HSC의 열적거동은 보통강도 콘크리트(NSC)와 거의 유사하나 재료 자체의 밀실한 구조와 높은 퍼텐셜 에너지에 의한 취성적 성질로 인해 폭열의 가능성이 NSC보다 매우 높다.

따라서 HSC의 고열에 의한 폭열을 방지하기 위한 대책으로 섬유를 사용할 수 있는데 폴리프로필렌(PP)섬유를 사용하게 될 경우에는 이론적으로 약 2 kg/m<sup>3</sup>의 혼입량이 적당한 것으로 알려져 있으나, 0.9 kg/m<sup>3</sup> 정도로 낮은 혼입량을 사용한 보고도 있어 콘크리트의 고열에 의한 폭열에 대해 섬유가 어떠한 역학적 역할을 하는가에 대한 연구가 더욱 진행되어야 할 것으로 판단된다.

또한, 비록 국내에서는 근래에 철근 콘크리트나 CFT의 내화성과 화재에 대한 구조적 특성 연구는 다소 이루어지고 있지만 콘크리트 재료 자체의 내화성과 열적 거동에 대한 연구가 활발히 연구되지 않고 있어 앞으로 건설 재료를 모듈화하고 선진화를 이루기 위해서는 이 분야에 대한 심도 있는 연구가 절실한 실정이다. □

### 참고문헌

1. Y. Andrberg, "Spalling phenomena of HPC and OC", Proceedings of International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete, NIST, 1997, pp.69-73.
2. Dale P. Bentz, "Fibers, Percolation, and Spalling of High-Performance Concrete", ACI materials journal, May~Jun. 2000, pp.351~359.
3. P. Kalifa, "Spalling and pore pressure in HPC at high temperature", Cement and Concrete Research, Aug. 2000, pp.1916~1927.
4. Zdenek P. Bazant, "Analysis of Pore Pressure, Thermal Stress and Fracture in Rapidly Heated Concrete", NIST, Feb. 1997, pp.155~164.
5. A.M. Neville, "Properties of Concrete", LONGMAN, 1996, pp.374~390.
6. Pierre Kalifa, "High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibers From spalling to microstructure", Cement and Concrete Research, 1. Jun. 2001, pp.1487~1499.
7. "Fire Performance of High-Strength Concrete: A Report of the State-of-the-Art", NIST, Dec. 1996.
8. "International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete", NIST, Gaithersburg, Feb.13~14 1997.
9. N.R. Short, "Assessment of the damaged concrete using colour image analysis", Construction and Building Materials, Aug. 2000, pp.9~15.
10. 한국콘크리트학회, "시멘트·콘크리트의 품질시험 및 품질관리", 제12회 기술강좌, 1999.
11. 한국콘크리트학회, "최신콘크리트공학", 1999.
12. 한국콘크리트학회, "콘크리트표준시방서 해설", 2000.

## 강교 및 콘크리트 교량 현황

도로구분	합계		강교		콘크리트교		기타	
	개소	연장(m)	개소	연장(m)	개소	연장(m)	개소	연장(m)
총계	17,150	1,315,079.5	1,796	352,949.4	15,284	941,806.9	70	20,323.2
고속국도	2,865	317,320.2	788	123,508.3	2,072	181,911.9	5	11,900.0
일반국도	4,024	348,853.8	509	110,909.9	3,501	234,015.3	14	3,928.6
특별, 광역시도	1,231	198,781.7	183	60,265.3	1,026	135,508.4	22	3,008.0
국가지원지방도	826	48,085.1	47	8,546.5	779	39,538.6	-	-
지방도	2,781	139,204.7	105	15,931.4	2,673	123,046.2	3	227.1
시도	1,654	98,809.9	105	20,688.0	1,537	77,208.7	12	913.2
군도	3,769	164,024.1	59	13,100.0	3,696	150,577.8	14	346.3

2000년말 : 강교(1,306개 소, 31만 1,010m), 콘크리트교(14,757개 소, 87만 4,738m)

(자료 : 건설교통부 도로국 도로구조물과)