

## 고온을 받은 고강도 콘크리트의 강도특성

윤현도<sup>1)\*</sup> · 김규용<sup>2)</sup> · 한병찬<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>충남대학교 <sup>2)</sup>일본 건축연구소 재료연구그룹  
(2002년 3월 10일 원고접수, 2002년 8월 7일 심사완료)

## Strength Properties of High-Strength Concrete Exposed at High Temperature

Hyun-Do Yun<sup>1)\*</sup>, Gyu-Yong Kim<sup>2)</sup>, and Byung-Chan Han<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea

<sup>2)</sup> Dept. of Building Materials and Components, Building Research Institute(BRI), Japan

(Received March 10, 2002, Accepted August 7, 2002)

### ABSTRACT

A review is presented of experimental studies on the strength performance of concrete exposed at short-term and rapid heating as in a fire and after cooling. Emphasis is placed on concretes with high original compressive strengths, that is, high-strength concrete(HSC). The compressive strength-temperature relationships from the reviewed test programs are distinguished by the test methods used in obtaining the data(unstressed, unstressed residual strength, and stressed tests) and by the aggregate types(normal or lightweight). The compressive strength properties of HSC vary differently with temperature than those of NSC. HSC have higher rates of strength loss than lower strength concrete in the temperature range of between 20 °C to about 400 °C. These difference become less significant at temperatures above 400 °C. Compressive strengths of HSC at 800 °C decrease to about 30 % of the original room temperature strength. A comparison of test results with current code provisions on the effects of elevated temperatures on concrete compressive strength and elastic modulus shows that the CEN Eurocodes and the CEB provisions are unconservative.

**Keywords :** fire performance, high-strength concrete, high temperature, thermal behavior, compressive strength

### 1. 서 론

고성능 감수제(water reducing admixtures) 및 실리카 흙(silica fume)과 같은 다양한 혼화제 개발과 이를 이용한 고강도 콘크리트 제조 기술개발에 따라 고강도 콘크리트는 레미콘 공장에서도 쉽게 제조할 수 있는 일반적인 건설재료로 인식되고 있다. 최근 국내의 기술로 시공된 말레이시아 무역센터(KLCC)에 압축강도 800 kgf/cm<sup>2</sup>급, 서울 도곡동 타워팰리스(tower palace)에 500 kgf/cm<sup>2</sup>급의 고강도 콘크리트가 저층부 기둥, 벽체 및 기초 등에 적용되는 등 국내외적으로 고강도 콘크리트의 사용은 점차 일반화되고 있는 추세에 있다.

2001년 9월 11일 2대의 점보기가 충돌하는 테러에 의한 미국 경제의 상징적인 의미를 갖는 세계무역센터(world trade center)의 붕괴는 건축물의 안전성 확보를 위하여 주요 구조부재의 정적 및 동적하중하에서 구조적인 성능뿐만 아니라 화재 등에 의한 열적특성도 고려해야할 중요한 요인이라는 교훈을 주었다. 특히 건설재료중 콘크리트

는 내화재료로 분류되고 있으므로 콘크리트의 내화특성에 대한 연구는 현재 목재 및 강재와 같은 다른 비내화 구조 재료에 비하여 상대적으로 많이 진행되고 있지 못한 실정이다<sup>2)</sup>. 하지만 노출온도가 콘크리트의 강도특성에 끼치는 영향에 대한 연구는 1940년대부터 시작되었으며<sup>3)</sup> 노출온도에 따른 무근 콘크리트의 압축강도, 탄성계수 및 인장강도 등과 같은 재료적인 특성과 노출온도에 따른 철근콘크리트 보, 기둥 및 슬래브의 구조성능에 끼치는 영향에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 이러한 연구결과는 철근콘크리트 구조부재의 내화기준 특히, 유럽 CEB 내화설계 기준<sup>4)</sup>에 기초자료로 활용되기도 하였다.

유럽 기준과 같이 현재 각 국에서 규정된 내화설계기준은 다소 제한된 보통강도 콘크리트의 내화실험결과를 근거로 하고 있다. 그러나 고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트에 비하여 낮은 물시멘트비를 갖으므로 콘크리트의 고강도화는 재료의 고밀도화 및 낮은 투수성을 피할 수 없다. 따라서 고온으로 가열시 폭발(explosive spalling)의 위험성이 높아 노출온도에 따른 강도특성은 보통강도 콘크리트와는 다르게 나타날 것이다. 고강도 콘크리트가 많은 건축물에 적용되고 있는 현시점에서 고강도 콘크리트의 내열특성 특히, 내화설계 및 화재 진화후 기존 건축물

\* Corresponding author

Tel : 042-821-5622 Fax : 042-823-9467

E-mail : wiseroad@cnu.ac.kr

의 안전성 평가시 요구되는 노출온도에 따른 고강도 콘크리트의 잔여 압축강도 특성은 시급히 구명되어야 할 연구 주제이다.

이에 본 연구에서는 기존 내화실험결과<sup>5-13)</sup>를 근거로 420 kgf/cm<sup>2</sup>급 이상인 고강도 콘크리트의 노출온도에 따른 압축강도특성을 구명하고 아울러 현행 각 국의 내화 기준 및 설계식의 고강도 콘크리트에의 적용 가능성을 검토하므로써 철근콘크리트 건축물의 내화설계기준 작성 또는 보통강도 콘크리트를 근거로 규정된 기존 내화설계기준의 개정을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

## 2. 내화실험방법

본 연구에서 고강도 콘크리트의 내화성능을 분석하기 위하여 수행된 기존 연구결과를 근거로 분석하여 보면 노출온도에 따른 고강도 콘크리트의 강도특성을 평가하기 위하여 일반적으로 재하(stressed), 비재하(unstressed) 및 비재하 잔여강도(unstressed residual strength) 내화실험 방법이 주로 적용되고 있다. 재하 내화실험은 Fig. 1(a)과 같이 가열전 시험체에 압축강도의 20~40% 범위 하중을 선재하(pre-loading)하고 가열하는 동안 하중을 일정하게 유지하는 방법이다. 목표온도에 도달될 때까지 일정한 속도로 가열하고 목표온도에 도달된 후 5~10분 정도 지속적으로 목표온도를 유지하여 시험체에 균일한 온도분포가 되도록 한다. 이후 시험체가 파괴될 때까지 하중 또는 변형률을 설정된 속도로 증가시켜 노출온도에 따른 고강도 콘크리트의 압축강도 및 탄성계수의 변화를 평가하는 방법이다. 이러한 실험방법은 기둥 및 보의 압축 콘크리트의 내화성능을 평가하는 데 주로 적용되고 있는 실험방법이다.

비재하 내화실험은 Fig. 1(b)과 같이 선재하 없이 목표 온도까지 일정속도로 가열한 후 시험체가 균일한 온도상태에 이르면 파괴시까지 설정된 속도로 하중 또는 변형률을 증가시키는 내화실험방법이다. 이러한 실험방법은 작은 선재하 하중을 받은 부재 또는 보의 인장축 콘크리트의 내화성능을 평가하는 데 적용되는 실험방법이다. 비재하 잔여강도 내화실험 방법은 Fig. 1(c)과 같이 시험체에 선재하 하지 않고 목표온도까지 설정된 속도로 가열한 후 시험체가 균일한 온도분포 상태에 이르면 가열속도와 동일한 속도로 상온까지 서서히 냉각시킨다. 이후 상온상태에서 시험체에 파괴시까지 응력 또는 변형률을 증가시키는 방법으로 전술한 방법과는 달리 화재 발생후 콘크리트가 보유한 강도특성을 평가하는데 적합한 실험방법이라 할 수 있다.

## 3. 고강도 콘크리트의 내화특성

### 3.1 기준에서 규정하는 콘크리트의 내화특성

각 국 기준 및 위원회에서 보통 또는 고강도 콘크리트에 국한하지 않고 고온에 노출된 콘크리트의 일반적인 강도특성을 제안하고 있으며 각 국 기준에서 규정하고 있는 내용은 다음과 같다.

#### 3.1.1 CEN

CEN(comite europeen de normalisation)<sup>14)</sup>에서는 가열 온도에 따른 콘크리트의 상온 압축강도 보유율을 Fig. 2와 같이 골재의 종류에 따라 다르게 규정하고 있다. Fig. 2

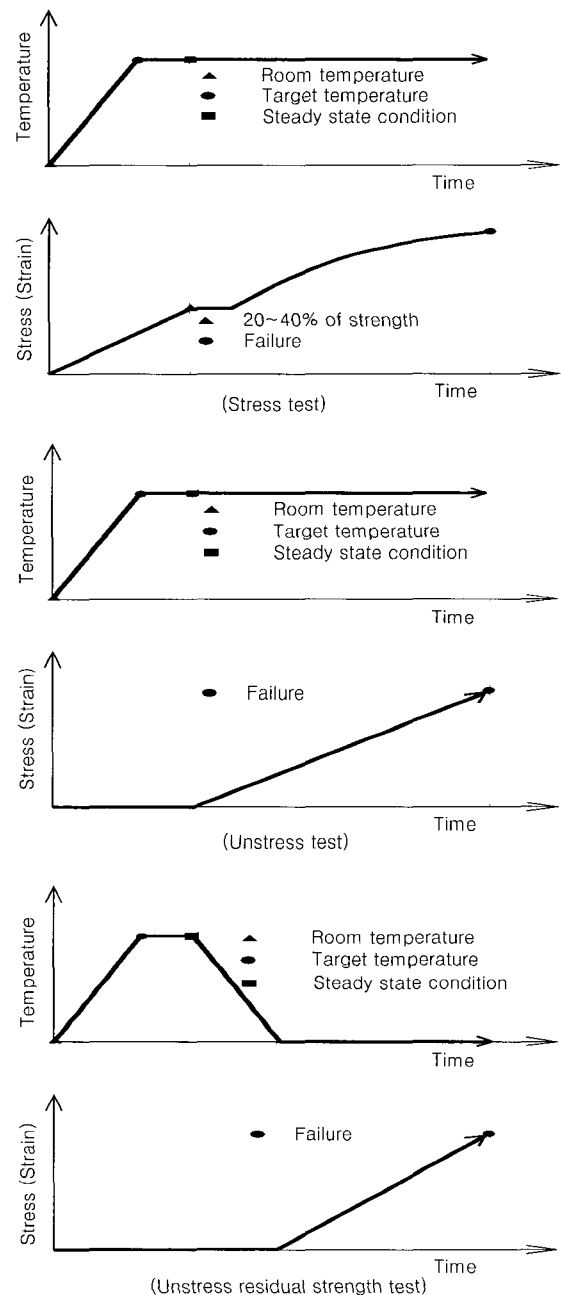


Fig. 1 Temperature test methods

에 의하면 천연골재 콘크리트의 경우 노출온도가 증가됨에 따라 경량골재 콘크리트에 비하여 압축강도가 다소 급격히 저하되는 것으로 규정하고 있다. 특히, 천연골재 콘크리트의 경우 노출온도가 증가됨에 따라 상온시 압축강도보다 낮은 압축강도를 보유하는 반면 경량골재 콘크리트에 있어서 노출온도 300°C까지 상온시 압축강도를 보유하고 있는 것으로 규정하고 있다.

### 3.1.2 ACI

ACI 216R-89<sup>43)</sup>에서는 슬래브, 보, 벽체 및 기둥과 같은 철근콘크리트 건축물의 내화성능을 결정하기 위하여 건축재료(콘크리트와 강재)의 특성에 관한 자료와 구조설계에 이러한 특성을 고려할 수 있는 방법을 제시하고 있다. 전술한 유럽기준과는 다르게 ACI 216R에서는 콘크리트의 노출온도에 따른 압축강도, 탄성계수 및 전단탄성계수를 노출온도에 대한 함수로 제안하고 있지 않다. 노출온도에 따른 콘크리트의 압축강도에 대하여 단순히 Abrams(1971)에 의해 수행된 공시체에 대한 재하, 비재하 및 비재하 잔여강도 내화실험결과를 인용하여 소개하는 정도이다. 또한, 노출온도에 따른 콘크리트의 탄성 및 전단탄성계수 변화에 대해서는 보통강도 콘크리트에 대한 Cruz(1966)의 내화실험결과로부터 고온에서 콘크리트의 탄성계수는 골재종류 및 콘크리트 압축강도에 의해 큰 영향을 받지 않는다는 결론을 제시하고 있는 정도이다.

### 3.1.3 CEB(RILEM Committee 44-PHT)

RILEM 위원회 44-PHT는 화재로 인한 열이 콘크리트의 물성에 끼치는 영향을 구명하기 위하여 1977년 ISO 기술위원회 92에 의해 구성되었다. 이들에 의해 작성된 RILEM 보고서는 후에 CEB(comites euro-international du beton)<sup>4)</sup>에 포함되었으며 CEB에서는 노출온도 및 냉각조

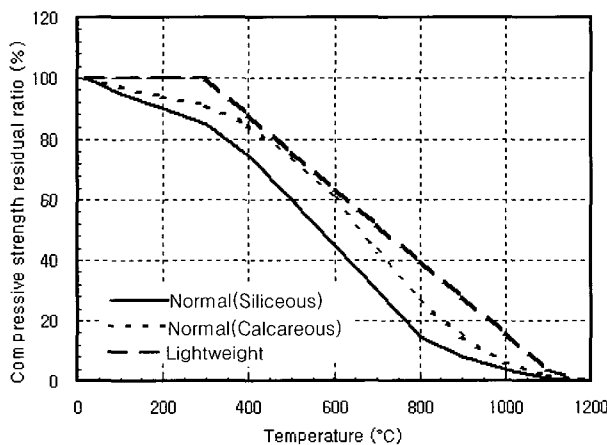


Fig. 2 Compressive strength at high temperature (CEN)

건에 따른 콘크리트 압축강도 및 잔여 압축강도, 탄성계수 따른 압축강도 변화는 골재의 종류에 따라 Fig. 3과 같이 규정하고 있으며 탄성계수 및 인장강도 변화는 Fig. 4 및 5와 같이 규정하고 있다.

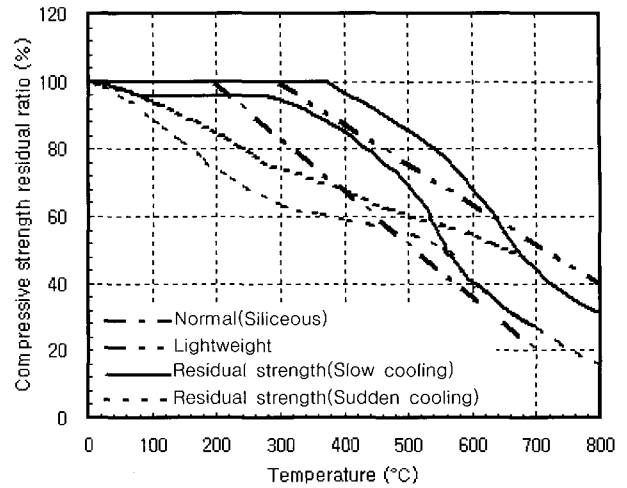


Fig. 3 Compressive strength at high temperature (CEB)

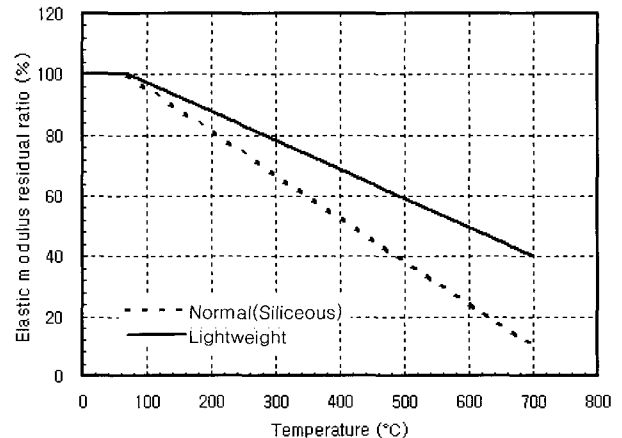


Fig. 4 Elastic modulus at high temperature (CEB)

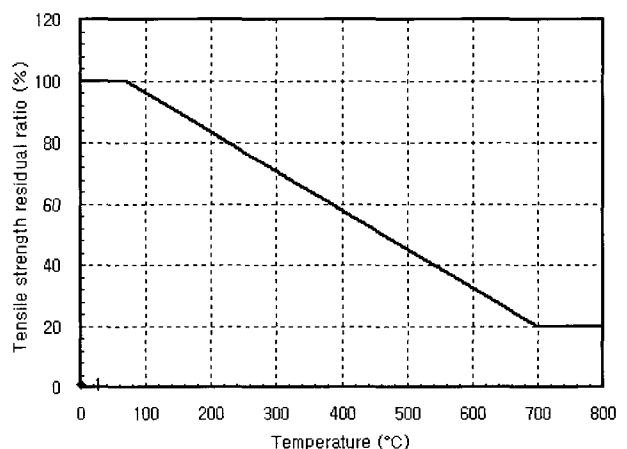


Fig. 5 Tensile strength at high temperature (CEB)

### 3.1.4 CRSI

CRSI<sup>16)</sup>에서는 철근콘크리트 부재의 내열특성을 산정하는 합리적인 방법을 개발하기 위하여 철근콘크리트 부재의 내화특성에 대한 자료를 제시하고 있다. 전술한 ACI 216R 및 RILEM과 유사하게 CRSI에서 고온에 노출된 콘크리트의 특성은 1960년대 수행된 연구결과를 근거로 하고 있다.

## 3.2 고강도 콘크리트의 내화특성 연구현황

본 연구에서 선정된 압축강도 420kgf/cm<sup>2</sup> 이상의 고강도 콘크리트에 대한 Castillo<sup>5)</sup>, Hertz<sup>6)</sup>, Diederichs<sup>7)</sup>, Hammer<sup>8)</sup>, Sullivan<sup>7)</sup>, Morita<sup>10)</sup>, Furumura<sup>11)</sup>, Felicetti<sup>12)</sup> 및 Noumowe<sup>13)</sup> 등의 연구는 2장과 같은 내화실험방법을 적용한 원주형 및 큐빅 공시체에 대한 내화실험결과이다. 현재까지 고강도 콘크리트의 노출온도에 따른 강도특성을 구명하기 위하여 수행된 기존 연구내용을 요약하여 정리하면 다음과 같다.

### 3.2.1 Castillo

Castillo와 Durani<sup>5)</sup>는 1종 포틀랜드 시멘트와 천연강도래와 석회암 쇄석을 사용한 물시멘트비 32.7%, 설계기준 강도 630kgf/cm<sup>2</sup>(62.1Mpa)인 고강도 콘크리트를 대상으로 내화실험을 수행하였다. 사용된 시험체는 51×102 mm의 원주형 공시체이며 최대 굽은 골재크기는 9.5 mm이고 재하 및 비재하 내화실험방법이 적용되었다. 시험체의 가열 속도는 7~8 °C/분으로 100 °C에서 800 °C까지 100 °C씩 증가시켰다.

### 3.2.2 Hertz

Hertz의 고강도 콘크리트 내화실험에서는 노출온도, 시험체 크기, 화재시 콘크리트의 폭발을 억제하기 위하여 콘크리트에 혼합된 강섬유율(14~20%) 등을 주요 변수로 하였다. 내화실험 연구<sup>4)</sup>에서는 압축강도 1,530 kgf/cm<sup>2</sup>인 실리카흙을 혼합한 콘크리트에 대하여 1 °C/분 가열속도로 목표온도 20, 150, 350, 450 및 650 °C까지 가열하고 다시 1 °C/분 속도로 냉각시켜 상온에 이른 수일 후 비재하 잔여강도 실험방법을 적용하였다.

### 3.2.3 Diederichs

비재하 실험방법을 적용하여 실리카흙, 플라이 애쉬 및 고로 슬래그를 사용한 1,170 kgf/cm<sup>2</sup>인 고강도 콘크리트의 내화성능을 평가를 위한 실험<sup>5)</sup>이 1988년 Diederichs 등에 의해 실시되었다. 압축강도, 시험체 형상(원주형 또는 큐빅형) 및 가열속도(2 °C/분 또는 32 °C/분)를 주요 변수로

하였으며 각 시험체는 850 °C까지 가열되었다.

### 3.2.4 Hammer

Hammer<sup>8)</sup>는 1995년 압축강도(700~1200 kgf/cm<sup>2</sup>)인 고강도 콘크리트에 대하여 골재의 종류(경량골재 및 쇄석), 재령(90일 또는 150일) 및 가열온도(20, 100, 200, 300, 450, 및 600 °C) 등을 주요변수로 100×310 mm인 원주형 시험체를 제작하여 비재하 내화실험을 실시하였다.

### 3.2.5 Sullivan

Sullivan와 Shanshar<sup>7)</sup>은 경량골재와 쇄석을 사용한 압축강도 670kgf/cm<sup>2</sup>인 콘크리트의 64×64 mm 원주형 시험체에 대한 비재하 및 비재하 잔여강도실험을 실시하였다. 비재하 잔여강도 실험은 50, 80, 100, 120, 200, 300, 450, 520 및 600 °C까지 1 °C/분의 속도로 가열한 후 9~22시간 동안 안정된 상태에 이르도록 하고 이후 상온까지 냉각한 후 파괴시까지 재하하였다. 비재하 실험에서는 1.5 °C/분 속도로 가열한 후 목표온도에 이르러 2~6시간 동안 온도를 일정하게 유지하여 안정상태에 이르도록한 후 재하하였다.

### 3.2.6 Morita

Morita, Saito 및 Kumagai<sup>10)</sup>는 압축강도 606 kgf/cm<sup>2</sup>인 콘크리트에 대한 비재하 잔여강도 내화실험을 실시하였다. 100×200 mm 원주형 시험체를 1 °C/분 속도로 각각 200, 350 및 500 °C까지 가열한 후 60분 동안 목표온도를 유지하여 안정상태에 이르게 한 후 상온에서 파괴시까지 재하하여 가열온도에 따른 압축강도 및 탄성계수를 평가하였다.

### 3.2.7 Furumura

Furumura, Abe 및 Shinohara<sup>11)</sup>는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 압축강도 430 및 610 kgf/cm<sup>2</sup>인 50×100 mm 원주형 시험체에 대하여 비재하 및 비재하 잔여강도 내화실험을 실시하였다. 각 시험체는 100~700 °C범위에서 100 °C씩 증가시켜 목표온도로 설정하였고 모든 시험체가 안정상태에 이르도록 2시간 동안 목표온도를 일정하게 유지하였다. 목표온도하에서 평균 압축강도 및 탄성계수와 온도의 상관관계, 콘크리트의 응력-변형률 관계를 평가하였다.

### 3.2.8 Felicetti

Felicetti, Gambarova, Rosati, Corsi와 Giannuzzi<sup>12)</sup>는 실리카흙을 사용한 설계기준강도 730~970 kgf/cm<sup>2</sup>인 고강도 콘크리트에 대한 비재하 잔여강도 실험방법을 적용하

여 가열온도에 따른 압축강도, 탄성계수, 인장강도 및 응력-변형률 관계의 변화를 평가하였다.

### 3.2.9 Noumowe

Noumowe, Clatres, Debicki와 Costaz<sup>13)</sup>는 고온에 노출된 고강도 콘크리트의 역학적 특성을 구명하기 위하여 실험 및 해석적인 접근방법을 적용하였다. 압축강도 390 및 620 kgf/cm<sup>2</sup>인 160×320 mm 원주형, 100×100×400 mm 큐빅 시험체에 대하여 비재하 잔여강도 실험방법을 적용하였다. 목표온도 150, 300, 450, 500 및 600 °C까지 1 °C/분 속도로 가열하고 목표온도를 1시간동안 유지하여 시험체를 안정상태에 이르도록한 후 다시 상온까지 냉각하여 압축강도, 쪼갬 및 직접인장강도를 평가하였다.

## 3.3 고온에 노출된 고강도 콘크리트의 강도 특성

### 3.3.1 압축강도

콘크리트를 구성하는 골재종류 및 내화실험방법별 노출온도에 따른 고강도 콘크리트의 압축강도 변화를 비교하여 나타내면 Fig. 6~8과 같다. Fig. 6은 Fig. 1(a)과 같은 온도 및 재하(상온 압축강도의 40%)조건하에서 천연골재를 사용한 고강도 콘크리트의 압축강도 변화를 나타낸 것이다. 재하 내화실험 조건하에서 고강도 콘크리트에 대한 실험결과가 적어 일반적인 경향의 분석은 곤란하지만 Castillo의 실험결과에 의하면 노출온도 300 °C까지 압축강도는 다소 감소되며 큰 변화는 보이지 않으나 300 °C이후 400 °C에 이르러 오히려 압축강도가 증가되는 특성을 보이고 있다. 그러나 500 °C이후 급격하게 강도가 저하되는 특성을 보이고 있다. Fig. 7은 Fig. 1(b)과 같은 온도 및 재하이력 조건(비재하 내화실험)하에서 고강도 콘크리트의 노출온도에 따른 압축강도 변화를 비교하여 나타낸 것으로 Fig. 7(a)에 나타난 바와 같이 천연골재를 사용한 고강도 콘크리트의 경우 가열온도 400 °C까지 가열온도가

증가됨에 따라 압축강도는 다소 완만하게 저하되는 특성을 보이고 있다. 그러나 Fig. 6과 같은 재하 내화실험결과와 같이 노출온도 500 °C이후 급격하게 압축강도가 저하

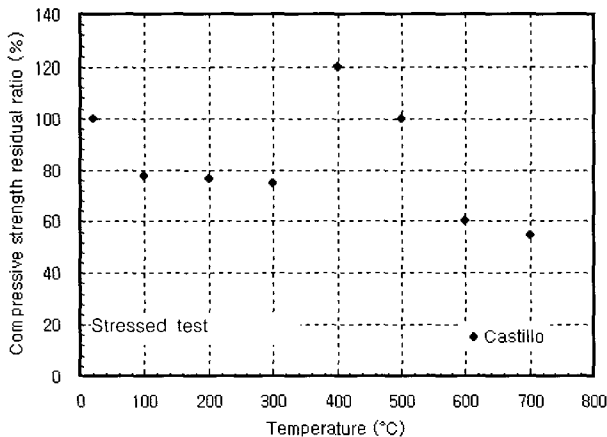
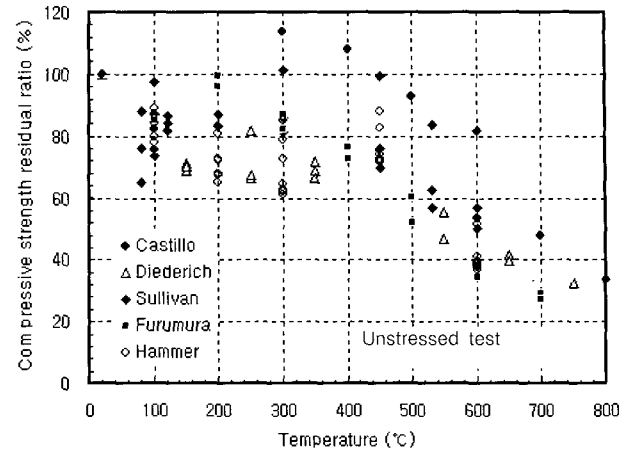
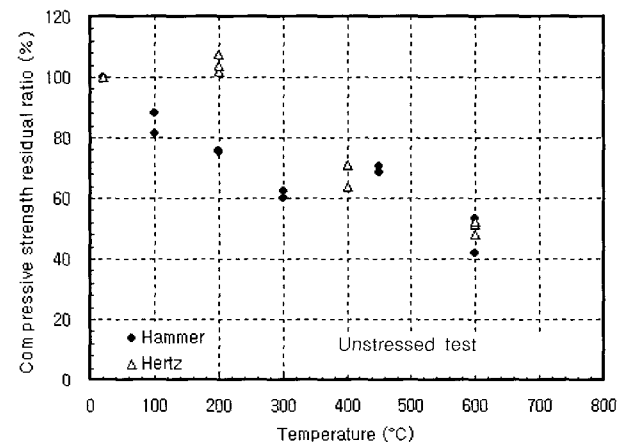


Fig. 6 Variation of compressive strength(stressed test)



(a) Normal weight aggregate concrete



(b) Lightweight aggregate concrete

Fig. 7 Variation of compressive strength (unstressed test)

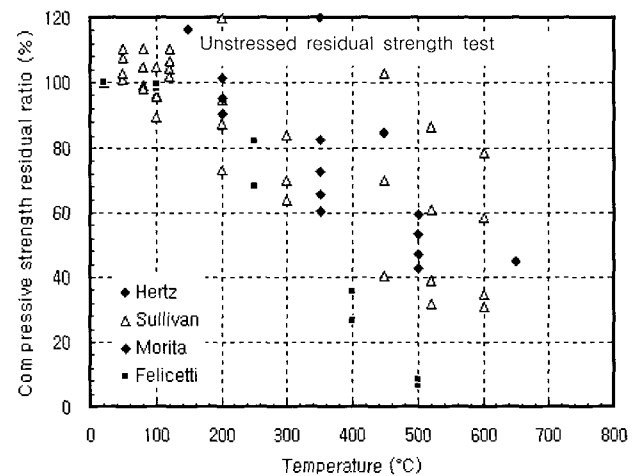


Fig. 8 Variation of compressive strength(residual test)

되어 700 °C에 이르러 상온의 50%까지 저하되었다. Fig. 7(b)은 경량골재를 사용한 고강도 콘크리트의 가열온도에 따른 압축강도 변화를 나타낸 것으로 천연골재를 사용한 고강도 콘크리트에 비하여 가열온도가 증가됨에 따라 압축강도는 현저하게 저하되는 경향을 보이고 있다.

Fig. 8은 천연골재를 사용한 고강도 콘크리트에 대하여 Fig. 1(c)과 같이 목표온도까지 가열하여 안정상태에 이르게 된 후 다시 가열속도와 동일하게 상온까지 냉각시켜 고강도 콘크리트의 잔여 압축강도에 대한 측정값을 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 실험자료는 다소 분산된 양상을 보이고 있으나 Fig. 6 및 7과 같은 재하 및 비재하 내화실험결과와 유사한 경향을 보였다. 비재하 잔여 강도실험시 노출온도 350 °C까지 상온에서 고강도 콘크리트가 보유하는 압축강도의 60%이상 보유하고 있는 반면 350 °C를 초과함에 따라 잔여 보유 압축강도는 급격하게 저하되는 특성을 보이고 있다.

이상과 같은 Fig. 6 및 7로부터 화재시 고강도 콘크리트의 압축강도는 주변온도가 400 °C까지 상승할때까지 상온에서 콘크리트 압축강도의 60%이상 보유할 수 있으나 400 °C를 초과하게 되면 급격하게 압축강도가 저하되어 800 °C에 이르러 상온 압축강도의 20~30%내외만을 보유하는 것으로 나타났다. Fig. 8로부터 화재에 의해 고온에 노출된 후 다시 상온까지 냉각된 고강도 콘크리트는 고온하에서 콘크리트가 보유하는 강도에 비하여 다소 낮게 나타날 것으로 판단된다. 따라서, 고강도 콘크리트를 사용한 건축물에서 구제 콘크리트가 화재 등으로 인하여 고온에 노출될 경우 화재 진화후 상온으로 다시 냉각된 고강도 콘크리트의 압축강도는 화재시 구제가 노출된 온도에 따라 현저하게 변화되므로 화재를 경험한 철근콘크리트 건축물의 재사용 여부에 대한 검토시 이에 대한 세심한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

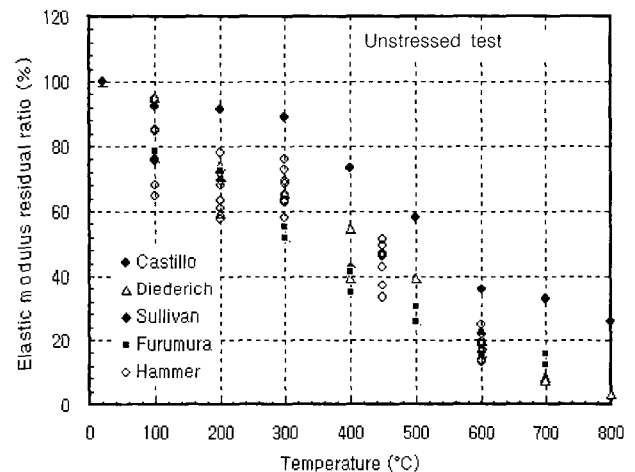
### 3.3.2 탄성계수

탄성계수는 부재의 처짐 및 응력산정에 중요한 영향을 끼치는 인자로 골재종류 및 내화실험 방법별로 노출된 온도에 따른 고강도 콘크리트의 탄성계수 변화를 비교하여 나타내면 Fig. 9 및 10과 같다. 재하 실험 결과에 대한 자료는 현재 문헌상에 보고된 자료가 없어 본 절에서는 비재하 및 비재하 잔여강도에 대한 내화실험결과로부터 고강도 콘크리트의 노출온도별 탄성계수변화에 대하여 검토한다.

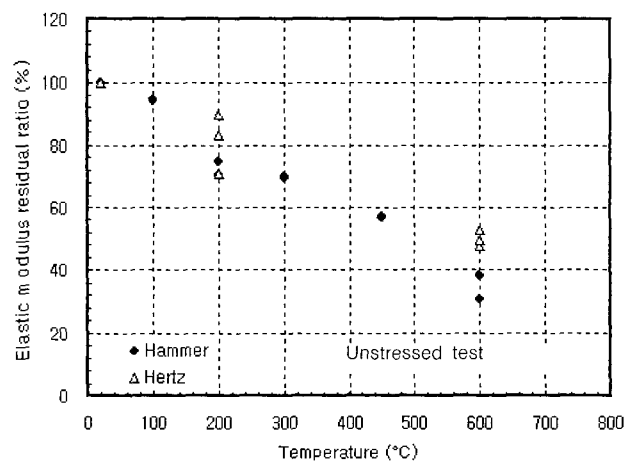
Fig. 9는 천연 및 경량골재를 사용한 고강도 콘크리트에 대한 비재하 내화실험결과로부터 구한 노출온도에 따른 탄성계수의 변화를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 천연 및 경량골재 모두 유사한 경향을 보이고 있으며 고강도 콘크리트의 노출온도가 증가됨에

따라 탄성계수는 감소되었다. 노출온도 400 °C에서 골재종류에 따른 보유 탄성계수값은 경량 및 천연골재 콘크리트에서 각각 상온의 58%, 30%로 나타났으며 400 °C이후에도 노출온도가 증가됨에 따라 급격하게 저하되는 경향을 보이고 있으며 이러한 경향은 경량 보다 천연골재 콘크리트에서 현저하였다.

Fig. 10은 천연골재를 사용한 고강도 콘크리트의 비재하 잔여강도 내화실험으로부터 구한 노출온도에 따른 탄성계수의 변화를 각 연구자들의 실험결과를 비교하여 나타낸 것이다. 노출온도 350 °C에 이를 때까지 Fig. 10은 비재하 내화실험 결과인 Fig. 9와 유사한 경향을 보이고 있으나 노출온도 350 °C이후 비재하 잔여강도 내화실험시 고강도 콘크리트의 탄성계수는 비재하 내화실험결과보다 노출온도가 증가됨에 따라 급격하게 감소되는 경향을 보이고 있다. 특히 노출온도 500 °C에서 비재하 및 비재하 잔여강도 내화실험에서 각각 상온 탄성계수의 24% 및 5%로 노출온도 350 °C이후 큰 차이를 보이고 있다.



(a) Normal weight aggregate concrete



(b) Lightweight aggregate concrete

Fig. 9 Variation of elastic modulus(unstressed test)

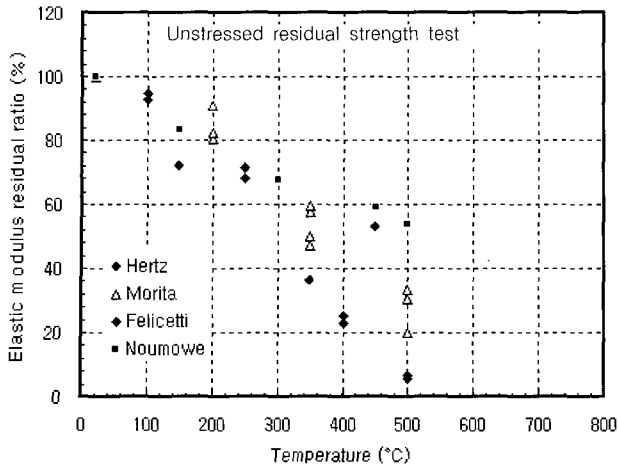


Fig. 10 Variation of elastic modulus(residual test)

이상과 같이 고강도 콘크리트의 노출온도에 따른 탄성계수는 콘크리트에 사용된 골재종류 및 내화실험방법에 따라 다소 차이를 보이고 있으며 천연골재를 사용한 고강도 콘크리트의 350 °C 이상의 노출온도에 따른 탄성계수 변화는 비재하 내화실험 경우 보다 비재하 잔여강도 내화실험시 급격히 저하되는 경향을 보이고 있다. 따라서 화재 발생시보다 화재 진화후 콘크리트의 탄성계수 저하는 현저할 것으로 판단되므로 화재를 경험한 건물의 내하력 평가시 이에 대한 고려가 요망된다.

### 3.3.3 인장강도

Fig. 11은 Noumowe에 의해 상온 압축강도가 각각 386 kgf/cm<sup>2</sup>(38.1 MPa) 및 618 kgf/cm<sup>2</sup>(61.1 MPa)인 보통강도와 고강도 콘크리트에 대하여 비재하 잔여강도 내화실험에 의한 쪼갬 및 직접 인장강도 실험결과를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 노출온도에 따른 고강도 콘크리트의 직접 및 쪼갬 인장강도 특성은 고강도 및 보통강도 콘크리트에서 유사한 경향을 보이고 있다. 보통 및 고강도 콘크리트 모두에서 직접인장강도가 쪼갬 인장강도보다 높게 나타났으며 인장실험방법과 무관하게 노출온도가 증가됨에 따라 인장강도는 저하되는 경향을 보였으며 이러한 경향은 보통강도 보다 고강도 콘크리트에서 현저하게 나타났다.

### 3.4 고강도 콘크리트에 기준의 적용 가능성 검토

유럽기준인 CEN과 RILEM 위원회(CEB) 설계 제안 곡선의 고강도 콘크리트에 적용 가능성을 검토하기 위하여 3.2절과 같은 노출온도에 따른 고강도 콘크리트의 압축강도, 탄성계수 및 인장강도 변화를 비교하여 Fig. 12~14에 각각 나타내었다.

Fig. 12는 천연 및 경량골재를 사용한 고강도 콘크리트

의 재하, 비재하 및 비재하 잔여강도 실험결과와 유럽기준을 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 12(a)에 나타난 바와 같이 천연골재를 사용한 고강도 콘크리트의 노출온도 상온에서 400 °C범위에서 압축강도는 재하 및 비재하 내화실험시 유럽기준에 의해 과대평가되는 경향이 있으나 400 °C이상에서는 다소 안전측이므로 적용 가능성이 있는 것으로 판단된다. 잔여 강도 실험결과는 노출온도 상온에서 200 °C범위까지 적용 가능하지만 그 이상의 온도에서는 과대평가되는 경향이 있어 적용 가능성이 결여된 것으로 판단된다. 경량골재를 사용한 고강도 콘크리트에 대한 내화실험결과는 제한된 연구결과로 인하여 비재하 내화실험결과만을 유럽기준 설계곡선과 비교하여 보면 유럽기준은 실험결과를 과대평가하는 경향이 있어 이에 대한 적용 가능성이 결여된 것으로 판단된다.

Fig. 13은 골재종류 및 실험방법에 따른 노출온도별 고강도 콘크리트의 탄성계수 변화를 유럽기준과 비교하여 나타낸 것으로 노출온도에 따른 탄성계수 변화의 전반적인 경향은 양호하게 나타내고 있으나 천연골재를 사용한 고강도 콘크리트의 노출온도에 따른 탄성계수를 과대평가하는 경향을 보이고 있어 적용 가능성이 결여된 것으로 판단된다. 반면 제한된 실험결과를 근거로 판단하여 볼 때 경량골재를 사용한 고강도 콘크리트의 노출온도에 따른 탄성계수 변화는 유럽기준에 의해 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 14는 노출온도에 따른 천연골재를 사용한 보통 및 고강도 콘크리트의 인장강도 변화를 실험결과와 유럽기준을 비교하여 나타낸 것이다. 기준곡선은 노출온도 60 °C에서 150 °C 범위에서 고온에 노출된 콘크리트의 인장강도를 다소 과대평가하는 경향이 있으나 150 °C이상으로 노출된 보통 및 고강도 콘크리트의 인장강도는 안전측으로 예측하고 있는 것으로 판단된다.

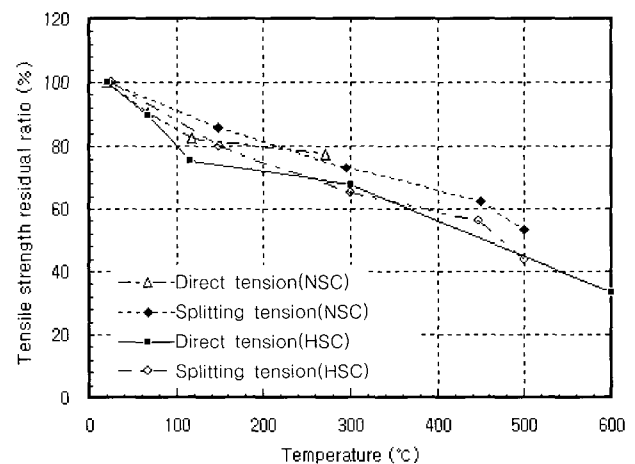
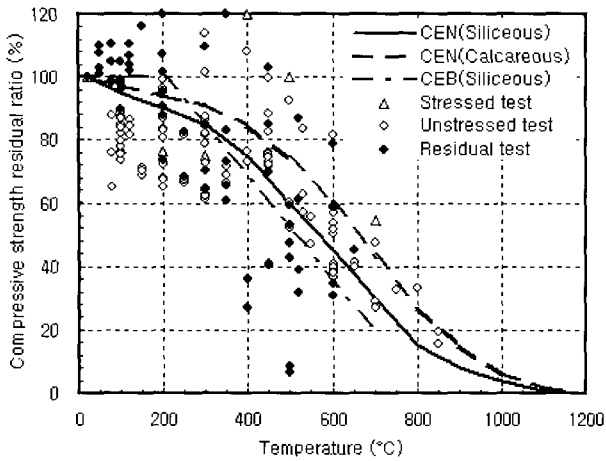
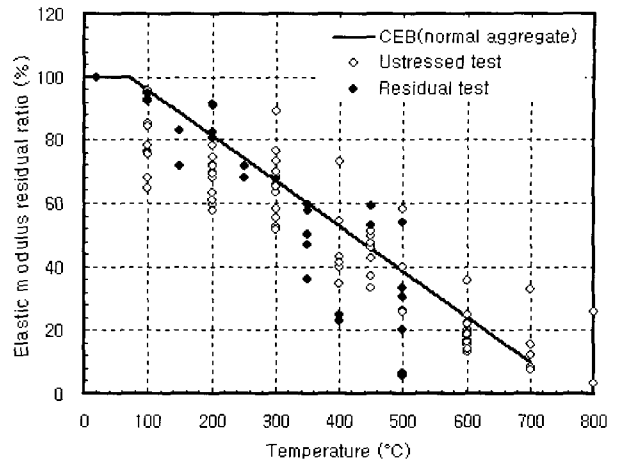


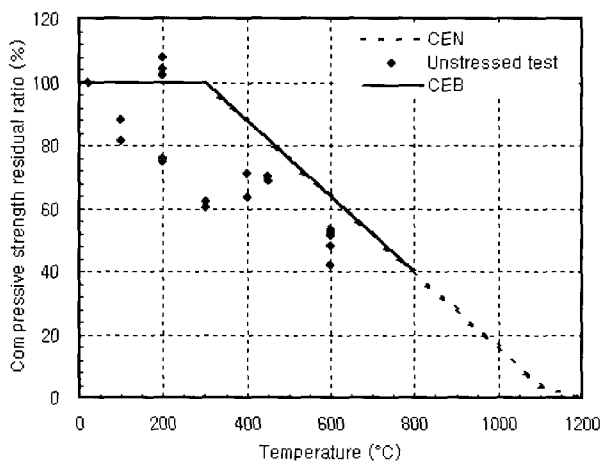
Fig. 11 Variation of tensile strength (residual test)



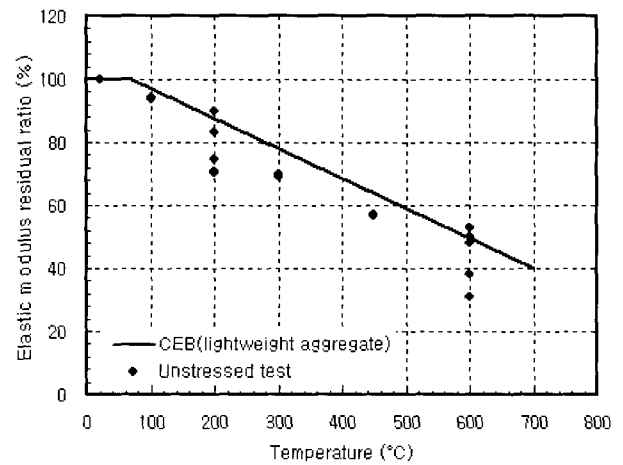
(a) Normal aggregate concrete



(a) Normal aggregate concrete



(b) Lightweight aggregate concrete



(b) Lightweight aggregate concrete

Fig. 12 Comparison of code and test results for compressive strength

Fig. 13 Comparison of code and test results for elastic modulus

### 3.5 고강도 콘크리트의 잔여 압축강도 추정식 제안

고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 구조물에서 화재 진압후 구조적인 안전성 평가시 필연적으로 대두되는 문제는 화재시 고온에 노출된 고강도 철근콘크리트 부재의 잔여강도를 평가하는 것이다. 이를 위하여 기본적으로 요구되는 자료는 화재시 경험한 노출온도에 따른 고강도 콘크리트 및 철근의 응력-변형률 특성, 잔여 압축강도 및 탄성계수 등이다. 본 연구는 고온에 노출된 고강도 콘크리트 부재의 내력평가를 위한 일련된 연구로 본 논문에서는 기존연구자의 내화실험결과를 근거로 천연골재를 사용한 고강도 콘크리트의 노출온도에 따른 비재하 잔여 압축강도 및 탄성계수를 평가할 수 있는 추정식을 제안하고자 한다.

#### 3.5.1 압축강도

Fig. 15는 노출온도 및 냉각조건에 따라 CEB에서 규정하고 있는 잔여 압축강도와 기존 실험결과를 근거로 제안된 추정선을 비교하여 나타낸 것이다. 잔여 압축강도에 대한 유일한 기준인 CEB와 기존 실험결과(1°C/분 속도로급

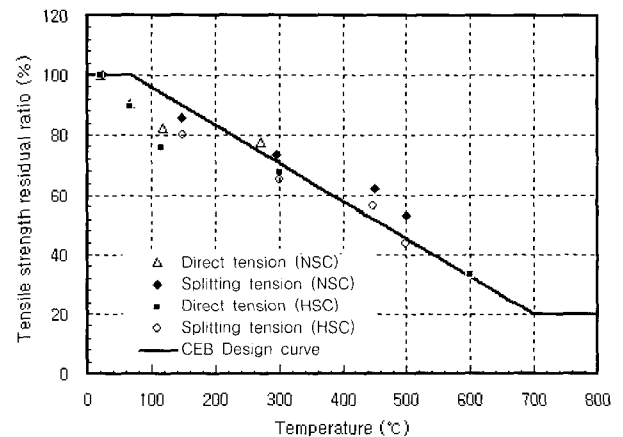


Fig. 14 Comparison of code and test results for tensile strength

냉되지 않은 조건)를 비교하여 보면 CEB에서는 서서히 냉각시 300°C까지 잔여 압축강도가 현저히 저하되지 않는 것으로 평가하고 있다. 그러나 기존 실험결과에 의하면 150°C 초과시 선형적으로 급격하게 저하되는 경향을



보이고 있다. 본 논문에서는 다소 분산되고 제한된 기존 실험결과를 근거로 추정선을 제안하였다.

실험결과를 근거로 제안된 추정선은 실험결과에서 나타난 경향을 양호하게 묘사하고 있으나 추정선과 실험결과와의 상관성을 높이기 위해서는 보다 많은 실험결과에 대한 축적이 요구되고 있다.

### 3.5.2 탄성계수

현행 어느 기준에서도 화재 발생후 고온에 노출된 콘크리트의 잔여 탄성계수를 추정할 수 있는 방법을 제안하고 있지 않다. 유일하게 노출온도에 따른 탄성계수 변화를 제안하고 있는 CEB 기준, 실험결과 및 실험결과를 근거로 본 연구에서 제안한 추정선을 비교하여 Fig. 16에 나타내었다. 실험결과를 근거로 제안된 추정선과 CEB 기준은 유사한 경향을 보이고 있으나 300 °C 이후 급격한 저하를 보이고 있는 실험결과를 추정선이 보다 양호하게 묘사하고 있다. 또한 실험결과와 상관성도 양호하게 나타났다.

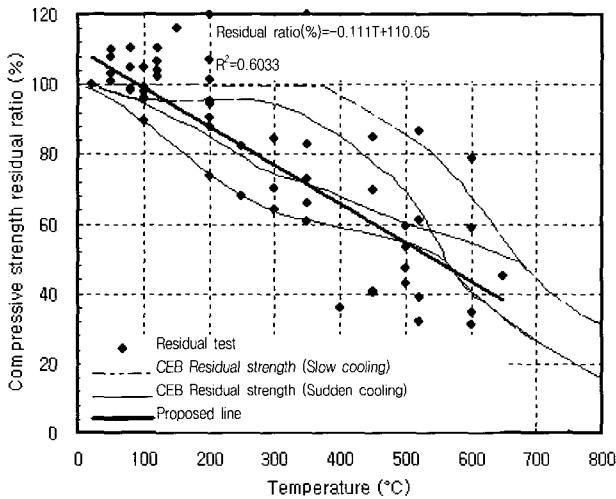


Fig. 15 Residual compressive strength

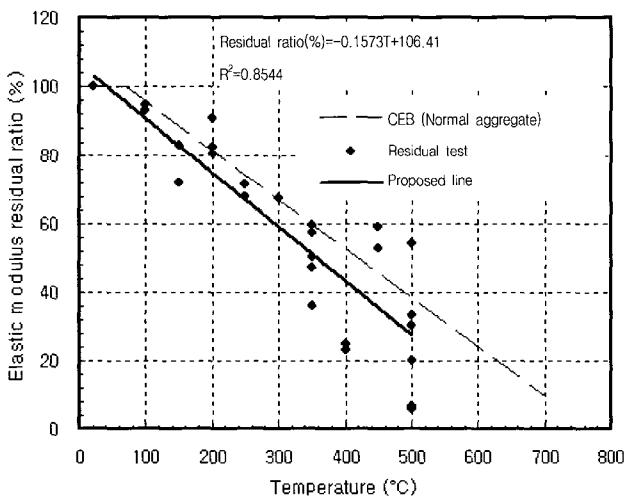


Fig. 16 Residual elastic modulus

## 4. 결 론

420 kgf/cm<sup>2</sup>급 이상인 고강도 콘크리트에 대한 제한된 기존 내화 실험연구에 대한 분석 및 각국 기준의 설계곡선과 비교함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 비재하 및 재하 내화실험에서 노출온도가 증가됨에 따라 고강도 콘크리트의 압축강도는 노출온도 20 °C 이후 400 °C에 이를 때까지 강도 변화가 적은 안정적인 상태를 유지하고 있으며 이후 노출온도가 증가됨에 따라 급격하게 압축강도가 저하되었다. 비재하 잔여강도 실험에서는 20 °C 이후 200 °C 범위에서 미소한 강도증가 또는 저하 특성을 보이며 200 °C 이후 노출온도가 증가됨에 따라 급격하게 압축강도가 저하되는 경향을 보였다.

2) 상온에서 300 °C까지 노출온도가 증가됨에 따라 고강도 콘크리트의 탄성계수는 다소 완만한 감소를 보이나 노출온도 300 °C 이후 급격히 저하되는 경향을 보였다.

3) 노출온도가 증가됨에 따라 천연골재 고강도 콘크리트의 압축강도 및 탄성계수는 경량골재에 비하여 보다 급격하게 저하되는 특성을 보였다. 노출온도와 고강도 콘크리트의 인장강도 관계는 콘크리트의 압축강도와 무관하게 유사한 경향을 보이고 있으며 노출온도 500 °C에서 상온의 50%내외로 저하되었다.

4) 유럽기준(CEN) 및 RILEM 위원회(CEB)에 의해 제안된 압축강도 및 탄성계수와 노출온도 관계 곡선은 420 kgf/cm<sup>2</sup>급 이상의 고강도 콘크리트에 적용시 고온에 노출된 콘크리트의 강도특성을 과대 평가하는 경향이 있어 주의가 요하며 향후 이에 대한 보완 연구가 요망된다.

## 감사의 글

본 연구는 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터(STRESS)의 연구비 지원에 의한 연구의 일부입니다.

## 참고문헌

1. Phan, L. T., "Fire Performance of High-Strength Concrete : A Report of the State-of-the-Art," Building and Fire Research Laboratory, NISTIR 5934. 1996.
2. 한국콘크리트학회, "화재와 콘크리트," 한국콘크리트학회지, 2002, pp.9~45.
3. Menzel, C. A., "Tests of the Fire Resistance and Thermal Properties of Solid Concrete Slabs and Their Significance," *Proceedings, ASTM* Vol. 43, 1943, pp.1099~1153.
4. Comites Euro-International Du Beton, "Fire Design of Concrete Structures - in accordance with CEB/FIP Model Code 90 (Final Draft)," *CEB Bulletin D'*

- Information*, No. 208, July 1991, Lausanne, Switzerland.
5. Castillo, C. and Durrani, A. J., "Effect of Transient High Temperature on High-strength Concrete," *ACI Material Journal*, Vol. 87, No. 1, 1990, pp.47~53.
  6. Hertz K. "Danish Investigations on silica Fume Concretes at Elevated Temperatures," *Proceedings, ACI 1991 Spring Convention*, Boston, MA, March pp.17~21.
  7. Diederichs, U., Jumppanen, U. M., Penttala, V., "Material Properties of High Strength Concrete at Elevated Temperatures," IABSE 13th Congress, Helsinki, 1988.
  8. Hammer, T. A., "High-Strength Concrete Phase 3, Compressive Strength and Elastic Modulus at Elevated Temperatures," SP6 Fire Resistance, Report 6.1, *SINTEF Structure and Concrete*, STF70 A95023, 1995.
  9. Sullivan, P. J. E. and Sharshar, R., "Performance of Concrete at Elevated Temperatures(as measured by the reduction in compressive strength)," *Fire Technology*, Vol. 28, No. 3, 1992, pp.351~359.
  10. Morita, T., Saito, H., and Ku,agai, H., "Residual Mechanical Properties of High Strength Concrete Members Exposed to High Temperature - Part 1. Test on Material Properties," *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting*, AIJ, Niigata.1992.
  11. Furumura, F., Abe, T., Shinohara, Y., "Mechanical Properties of High Strength Concrete at High Temperatures," *Proceedings of the Fourth Weimar Workshop on High Performance Concrete: Material Properties and Design*, held at Hochschule fur Architektur und Bauwesen(HAB), Weimar, Germany, October 4-5, 1995, pp.237~254.
  12. Felicetti, R., Gambarova, P. G., Rosati, G. P., Corsi, F., Giannuzzi, G., "Residual Mechanical Properties of High-Strength Concretes Subjected to High-Temperature Cycles," *Proceedings, 4th International Symposium on Utilization of High-Strength High-Performance Concrete*, Paris, France, 1996, pp.579~588.
  13. Noumowe, A. N., Clastres, P., Debicki, G. and Costaz, J. L., "Thermal Stresses and Water Vapor Pressure of High Performance Concrete at High Temperature," *Proceedings, 4th International Symposium on Utilization of High-Strength /High-Performance Concrete*, Paris, France, 1996.
  14. Comite Europeen de Normalisation, "prENV 1992-1-2: Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-2 : Structural Fire Design," CEN/TC 250/SC 2, 1993.
  15. ACI, "Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Element," ACI 216R-89. 1989.
  16. Concrete Reinforcing Steel Institute, "Reinforcing Concrete Fire Resistance," CRSI, 1980.

## 요 약

본 연구에서는 건축물에 발생된 화재와 같이 단기간에 빠르게 가열되는 조건하에 고강도 콘크리트의 압축강도특성을 구명하기 위하여 기존의 내화실험결과를 수집 및 분석하며 아울러 현행 노출온도에 따른 압축강도의 상관관계 기준식의 고강도 콘크리트에 적용 가능성을 검토하고자 한다. 노출온도에 따른 고강도 콘크리트의 압축강도 변화 특성은 내화실험방법(재하, 비재하 및 비재하 잔여 강도실험) 및 골재종류(천연 및 경량골재)에 따라 다르게 나타나므로 실험방법 및 골재종류별로 나누어 비교 및 분석하였다. 고강도 콘크리트의 압축강도 특성은 보통강도와는 노출온도에 따라 다르게 나타났으며 노출온도 약 20℃에서 400℃ 범위에서 보통강도 콘크리트보다 급격하게 압축강도가 저하되었으며 400℃ 이상에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 800℃에서 고강도 콘크리트의 압축강도는 상온 압축강도의 30%까지 감소되었다. 노출온도에 따른 압축강도 및 탄성계수 변화에 대한 실험 결과와 유럽 기준을 비교하여 볼 때 현행 기준식은 안전측이지 못하므로 화재에 노출된 고강도 콘크리트의 압축강도 및 탄성계수 평가에 적용 가능성이 결여된 것으로 평가되었다.

**핵심용어** : 내화성능, 고강도 콘크리트, 고온, 열거동, 압축강도