

## 증기압 및 크리프 모델을 사용한 고강도콘크리트 부재의 내화성능평가 Fire Resistance Behaviour of High Strength Concrete Members with Vapor Pressure and Creep Models

이태규

Tae-Gyu Lee

우송대학교 철도건설환경공학과  
(2010. 3. 25. 접수/2010. 8. 16. 채택)

### 요 약

본 연구는 고강도 콘크리트 부재의 고온 하에서의 내화성능을 평가하기 위하여 증기압 및 크리프를 고려한 해석적 모델들을 제시하였다. 내화성능의 평가는 열팽창, 수분확산, 크리프 모델 및 구조해석을 통하여 폭발진행과 내화시간의 2가지 단계로 구분하였으며, 해석프로그램을 사용하여 사전제하조건에서부터 화재에 따른 부재의 폭발 및 파괴까지의 전반적인 해석을 수행하였다. 이러한 해석적 모델 및 해석프로그램의 정확성을 검증하기 위하여 해석적 결과와 다른 연구자들에 의한 여러 가지의 실험데이터와 비교하였으며, 그 결과 해석프로그램은 하중, 단면조건, 부재길이, 콘크리트 강도 등 여러 가지 변수들에 대하여 고강도 콘크리트 부재의 내화성능을 해석적으로 잘 평가하고 있는 것으로 나타나고 있다.

### ABSTRACT

A numerical model considering the vapor pressure and the creep models, in the form of a analytical program, for tracing the behavior of high strength concrete (HSC) members exposed to fire is presented. The two stages, i.e., spalling procedure and fire resistance time, associated with the thermal, moisture flow, creep and structural analysis, for the prediction of fire resistance behavior are explained. The use of the analytical program for tracing the response of HSC member from the initial pre-loading stage to collapse, due to fire, is demonstrated. The validity of the numerical model used in this program is established by comparing the predictions from this program with results from others fire resistance tests. The analytical program can be used to predict the fire resistance of HSC members for any value of the significant parameters, such as load, sectional dimensions, member length, and concrete strength.

**Key words** : High strength concrete, Fire resistance, Vapor pressure, Creep

### 1. 서 론

콘크리트는 일반 토목 구조물뿐만 건축 구조물 등 모든 사회기반 구조물에 폭넓게 적용되어 사용되고 있다. 특히 최근에 들어 각종 구조물의 대형화 추세에 따라 장대교량, 특수교량, 고층 건축물 등이 다양하게 건설되고 있으며 이에 따라 고강도 및 고성능 콘크리트의 사용이 필수적으로 되어가고 있는 추세에 있다.

다른 구조물들과 마찬가지로 콘크리트 구조물 역시 일반적으로 사용성(serviceability)과 안전성(safety)을 만

족시키는 조건에서 설계를 하게 된다. 특히 콘크리트가 고강도화 할수록 화재 발생과 같은 고온 조건에서 인명 피해와 재산손실에 직접적인 영향을 미치기 때문에 일정한 수준 이상의 내화성능을 확보할 필요성이 절실히 제기되고 있으며 이에 따라 고온 하에서의 안전성(fire safety)도 중요한 설계조건으로 급부상되고 있는 상황이다.

화재와 같은 고온 하에서의 안전성은 결국 구조물의 내화성능(fire resistance)으로 평가되며, 내화성능은 고온 하에서의 구조부재의 하중저항성능으로 정의된다. 지금까지의 연구결과에 따르면 구조물의 내화성능은 콘크리트 압축강도, 내부 습도, 치밀성, 구조물의 크기와 형상, 사용재료, 하중조건, 화재발생조건 등에 따라

매우 큰 차이를 보이는 것으로 알려져 있다.<sup>1,2)</sup>  
 고강도 콘크리트의 경우 단위수량의 감소로 인하여 추가적인 혼화재료를 첨가하여 소요의 작업성(workability)을 확보시키고 있다. 그러나 이러한 낮은 물-시멘트비의 사용으로 인하여 공극률(porosity)이 작게 되고, 투수성(permeability)이 낮아지며, 치밀성(density)이 증가하게 된다. 이 경우 화재와 같은 고온이 발생되면 내부 수분의 증발로 증기압이 형성되며, 이 증기압으로 인하여 콘크리트의 저항력이 감소하게 되어 결국에는 폭발(explosive spalling)을 유발시킨다. 폭발은 급작스러운 온도 상승으로 인하여 콘크리트 부재 표면이 심한 폭음과 함께 폭발적으로 파열(바리 및 탈락)되는 현상으로, 구조물에 치명적인 내력저하를 초래하여 결국에는 구조물의 붕괴로까지 이어지는 대형사고의 원인이 되기도 한다.

따라서 본 연구에서는 고온에서의 열전달, 수분이동, 증기압, 크리프를 모두 고려한 해석적 알고리즘을 개발하고자 하며, 이로부터 전체 변형률을 산정한 후 폭발 진행상황과 구조물의 내화시간을 예측하는 내화성능 평가를 수행하고자 한다.

## 2. 내화성능의 평가과정

고강도 콘크리트의 폭발은 Harmathy<sup>3)</sup>에 의해 처음으로 알려졌으며, 화재에 노출된 콘크리트에 있어서 고려되어야 할 주요 문제점으로 평가되고 있다. 고강도 콘크리트는 열전도성이 낮고 비열이 높기 때문에 열에너지의 소산이 용이하지 않아 화재 시 가열된 콘크리트는 국부적으로 열응력이 집중되며, 콘크리트의 내부 온도 상승에 따라 100~200°C에서 자유공극수가 방출되어 Figure 1과 같이 노출면에 인접한 층의 수분이 상

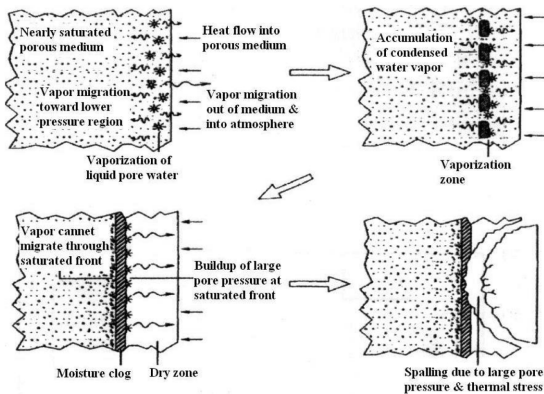


Figure 1. Fundamental concept of explosive spalling.

대적으로 온도가 낮은 내부로 이동하고, 인접 층의 공극으로 재흡수 된다. 이러한 메커니즘으로 인하여 부재 표면 건조층의 두께가 증가하고 바로 안쪽에 상당한 두께의 습기 방해층(moisture clog)이 형성된다. 이로 인하여 콘크리트 내부의 증기압(vapor pressure)이 증가하여 강한 압력을 받게 되며, 수증기가 열을 받으면 더욱 팽창하게 된다. 재료의 투수성이 상대적으로 높으면 부재 내부 쪽으로 압력이 분산되어 전체적으로 안정 상태가 되지만, 투수성이 낮으면 습기 방해층에서의 압력이 계속적으로 증가하게 된다. 이 과정에서 Figure 2와 같이 증기압의 정점(peak)은 가열면으로부터 임의의 거리에 떨어진 포수층에서 발생하며, Phan<sup>4)</sup>에 의하면 300°C에서 증기압은 거의 8MPa까지 도달하는 것으로 알려져 있다. 이는 약 5MPa 정도의 인장강도를 가지는 고강도 콘크리트가 큰 변형이 없이 유지하기에는 너무 높은 압력으로 이러한 내부압력으로

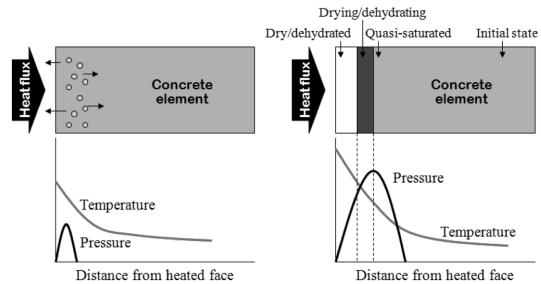


Figure 2. Distribution of vapor pressure.

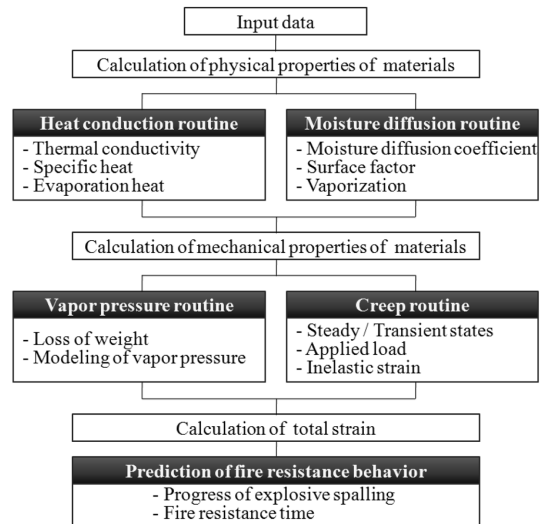


Figure 3. Overall layout of analytical process.

인하여 콘크리트의 건조축이 큰 소리를 내며 터져나가는 폭렬이 급작스럽게 발생하는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서 개발한 내화성능평가 프로그램의 전반적인 루틴은 Figure 3과 같다. 화재와 같은 고온을 받는 경우의 콘크리트 부재의 열전달 해석이나 수분이동 해석과 같은 구조해석기법<sup>5)</sup>에 관해서는 기존에 많이 알려져 있기 때문에 구체적인 언급은 생략하기로 한다. 그림에서 보는 바와 같이 최종적인 구조물의 내화성능평가는 폭렬진행상황과 내화시간으로 구분하였다. 폭렬진행상황은 앞서 언급된 다른 연구자들의 연구결과에서 나타난 바와 같이 콘크리트 내부의 전체 변형률이 콘크리트의 인장변형률을 초과하게 되면 폭렬이 발생되고 이후 시간에 따라 진행되는 것으로 평가하였으며, 내화시간은 부재의 압축변형률이 현행 설계기준<sup>6)</sup>에서 규정하고 있는 콘크리트의 최대 압축변형률인 0.003에 도달하는 시간으로 설정하여 해석을 수행하였다.

### 3. 고온에서의 변형률 산정

고온에 노출되는 경우에서의 콘크리트의 전체 변형률에 대한 구성모델은 Haksever<sup>7)</sup>의 단순모델, Schneider<sup>8)</sup>의 3변형 구성인자 모델, Anderberg<sup>9)</sup>의 4변형 구성인자 모델, Terro<sup>10)</sup>의 다항식 모델 등 다양한 모델들이 제시되어 있다. 그러나 이러한 모델들은 사용되는 변수들이 직접적인 실험에 의하여 산정되는 변수들이 대부분이고, 콘크리트의 열적 특성을 우선시하여 대부분의 인자들을 온도 함수로만 설정하였기 때문에 효과적인 적용성에 다소 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같이 콘크리트의 전체 변형률에 대한 새로운 구성모델을 사용하였다.

콘크리트의 전체 변형률( $\epsilon_{tot}$ )은 Anderberg의 4변형 구성인자 모델을 기본으로 하였으며, 보다 광범위하고 실제적인 적용을 위하여 고온에서의 증기압 및 수분이동을 포함한 다음과 같은 형태로 제안하였다.

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_{\sigma}(T, \sigma) + \epsilon_{vp}(T, H, f_{ck}) + \epsilon_{hu}(T, H) + \epsilon_{sc}(T, H, f_{ck}) + \epsilon_{\alpha}(T, H, f_{ck}, \alpha) \quad (1)$$

여기서,  $\epsilon_{\sigma}$ 는 하중에 의한 탄성 변형률,  $\epsilon_{vp}$ 는 증기압 변형률,  $\epsilon_{hu}$ 는 수분이동 변형률,  $\epsilon_{sc}$ 와  $\epsilon_{\alpha}$ 는 정상상태 및 비정상상태의 크리프 변형률이다.

#### 3.1 증기압 변형률

콘크리트의 열팽창률은 온도가 증가함에 따라 커지는 것으로 알려져 있으며, 1990년 초에는 주로 상온에서의 콘크리트 온도변화에 대한 실험을 위주로 수행하

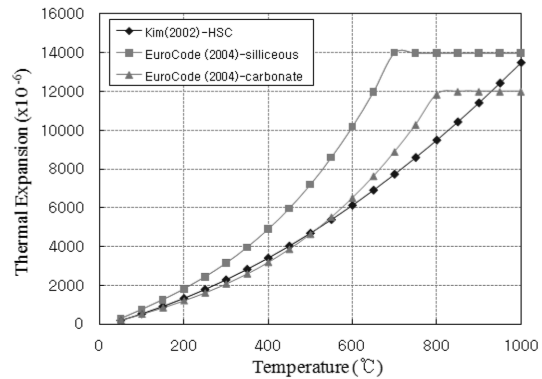


Figure 4. Thermal expansion coefficient models of concrete under high temperature.

여 왔으나, 2000년 이후 고온에서의 콘크리트에 대한 실험이 진행되면서 수분의 증발에 의한 증기압의 영향이 함께 포함되어 열팽창률의 값은 Figure 4와 같이 큰 폭으로 증가하는 경향으로 바뀌게 되었다.

하지만 이와 같은 열팽창률 모델을 그대로 내화해석에 적용할 경우 수분함유량이나 증발정도에 의한 영향 등을 고려할 수 없기 때문에 콘크리트 내부압력을 과다하게 평가하여 기존의 내화실험결과에 의한 폭렬양상과는 부합되지 않는 결과가 나타나게 된다.

따라서 본 연구에서는 열팽창률이 아닌 실제 증기압을 그대로 모델링하여 변형률로 산정하는 다음과 같은 방식을 제안하였다.

콘크리트는 기본적으로 공극을 가지고 있는 재료이며, 대부분의 공극은 수분을 포함하고 있다. 이 수분은 대부분 시멘트의 수화반응에 관여하지 않는 자유수를 의미한다. 이와 같이 콘크리트 내부에 존재하는 수분은 콘크리트가 고온을 받게 되면 수분의 이동 및 증발에 의하여 결국에는 콘크리트의 중량손실을 가져오게 된다. 따라서 이러한 중량손실이 바로 액상의 수분이 기화하여 증기로 변환되는 과정이기 때문에 Noumowe<sup>11)</sup>의 중량손실에 대한 실험결과와 동일한 기율기를 가지는 형태로 증기압 변형률을 식(2)와 같이 제안하였다. 한편 600°C 이상에서는 더 이상의 중량손실이 발생되지 않기 때문에 액상의 수분이 모두 기화하였고 가정하여 일정한 값을 가지는 것으로 모델링하였으며 이를 그림으로 나타내면 Figure 5와 같다.

$$\epsilon_{v, \max} = \frac{\epsilon_v}{1 + \left( \frac{1 - 0.00162T}{0.55} \right)^8} \times 10^{-6} \quad (2)$$

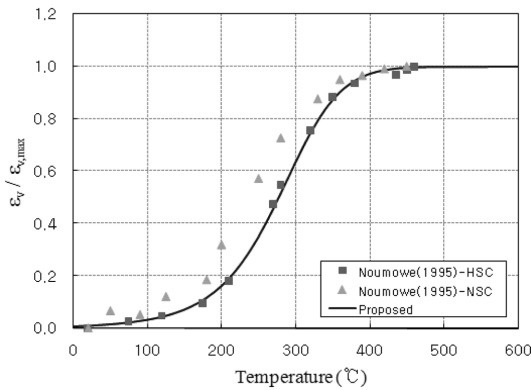


Figure 5. Strain by vapor pressure.

여기서,  $\epsilon_{v,max}$ 는 완전건조상태의 극한변형률이다.

한편 철근의 경우는 고온에서의 열팽창률은 온도가 증가함에 따라 커지는 것으로 알려져 있으며, 그 값의 편차는 콘크리트와는 다르게 일반적인 값( $10 \times 10^{-6} \text{mm/mm}^\circ\text{C}$ )의 약 2배 정도에 달하는 값 차이가 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 Eurocode<sup>12)</sup>의 제안식을 적용하였다.

$$\epsilon_{vp} = \alpha \Delta T = (0.00675T + 10.8) \times 10^{-6} \times \Delta T \quad (3)$$

### 3.2 수분이동 변형률

수분이동 해석프로그램<sup>13)</sup>에 의한 해석을 수행하면 시간에 따른 각 위치에서의 함수량(moisture content)이 계산되며 이를 상대습도(relative humidity)로 환산하여 다음과 같이 변형률로 산정하게 된다.

$$\epsilon_{hu} = \epsilon_{hu,0} \left[ 1 - \left( \frac{H}{100} \right)^2 \right] \times 10^{-6} \quad (4)$$

여기서,  $\epsilon_{hu,0}$ 는 완전건조상태의 극한변형률, H는 상대습도(%)이다.

### 3.3 크리프 변형률

콘크리트 크리프는 기본적으로 두 가지 형태로 구분된다. 첫째는 콘크리트 내부의 수분이 외부로 유출되지 않는 조건에서 일반적인 크리프라고 불리는 정상상태 크리프(steady state creep)로서 이는 단지 재료의 특성에 따라 영향을 받게 된다. 둘째는 콘크리트 내부의 수분이 온도 및 대기환경의 영향을 받아 외부로 유출되는 경우로 이를 비정상상태 크리프(transient state creep)라고 하고 이것은 실험체의 크기, 외부환경, 표면상태와 같은 다양한 인자들에 의하여 영향을 받게 된다.

#### 3.3.1 정상상태 크리프

정상상태 크리프는 열적 안정상태에서 콘크리트에 하중이 재하될 때의 시간과 변형의 관계로 정의된다. 일반적인 작용응력( $2/3f_{ck}$ ) 하에서 응력과 크리프의 관계는 선형의 관계로 인식되고 있지만, 고온에서의 실험결과에 따르면 크리프의 변형증가는 반드시 선형적인 관계는 아닌 것으로 밝혀지고 있다. Anderberg와 Thelandersson<sup>14)</sup> 및 Thienel과 Rostasy<sup>15)</sup>에 의한 연구결과에 따르면 크리프 변형은 100~300°C 사이는 변화가 없으나 약 400~450°C 정도에서 급작스러운 변화를 보인다고 알려져 있지만 아직까지 상용화된 모델은 없다.

따라서 본 연구에서는 기존의 Terro, Khoury, Anderberg의 실험결과들<sup>9,10,16)</sup>을 분석하여 200°C까지는 크리프 변형이 동일하다고 가정하고 200°C 이상부터는 Figure 6과 같이 조금씩 비선형성이 발휘되어 약 400~500°C 정도에서 급격한 변화를 보이는 다음의 식을 제안하였다.

$$\epsilon_{sc}/\epsilon_{sc,20} = 10 - 1 \times 10^{-7}(T - 200)^{2.56} \quad (5)$$

여기서,  $\epsilon_{sc}$ 는 온도변화에 따른 정상상태의 크리프 변형률,  $\epsilon_{sc,20}$ 는 20°C에서 정상상태의 크리프 변형률로 기존의 모델식(KCI, fib, CEB-FIP, ACI, B3 등)을 적용한다.

#### 3.3.2 비정상상태 크리프

비정상상태 크리프 변형은 Anderberg와 Thelandersson<sup>14)</sup>에 의해서 처음으로 확인되었으며, 이는 수분의 영향에 의한 응력 변화 및 골재와 시멘트-모르타 매트릭스와의 상반된 열적 특성에 따라 발생하게 된다. 또한 비정상상태 크리프 변형은 최초로 가열된 콘크리트에 대해서만 나타나게 되며, 반복적인 가열 및 냉각된 콘크리트에서는 발생되지 않는 것으로 알려져 있다. 이후

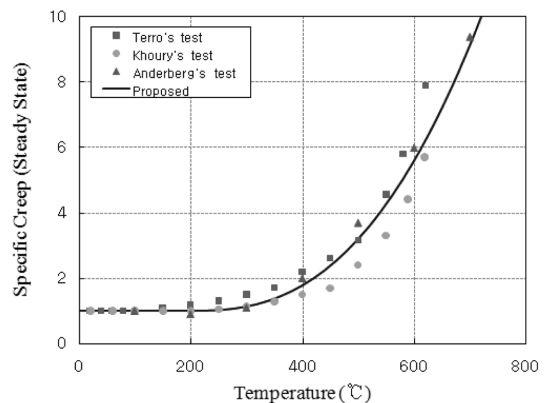


Figure 6. Specific creep in steady state.

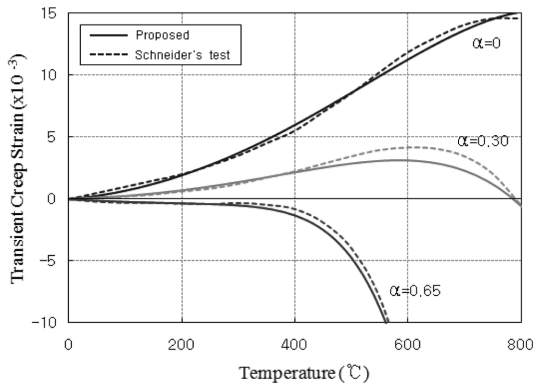


Figure 7. Transient creep.

많은 연구자들에 의하여 가열속도, 사용골재 등 다양한 영향에 관한 연구가 진행되고 있으나 아직까지 구체적인 모델이나 적용방법이 발표된 적은 없는 실정이다.

따라서 이와 같은 조건에서 본 연구에서는 Schneider<sup>8)</sup>에 의한 비정상상태 크리프 변형에 관한 실험에 대한 수치해석으로부터 다음과 같이 모델식을 제안하였으며, 이를 그림으로 나타내면 Figure 7과 같다.

$$\epsilon_{tc} = -0.004 \left( \frac{T}{T_c} \right)^C + x_1 T^2 + x_2 T \quad (6)$$

여기서,  $T_c = 200[1 - \alpha^5]$

$C = 4\alpha^2 - 0.34\alpha + 5.3$

$x_1 = [2.82 \exp(-2.87\alpha)] \times 10^{-5}$

$x_2 = -0.01\alpha + 0.004$

$\alpha$ 는 재하하중비( $P/P_0$ ),  $P$ 는 재하되는 하중량,  $P_0$ 는 부재의 최대저항력이다.

#### 4. 실험치와의 비교

##### 4.1 Kodur 등에 의한 실험

Kodur 등<sup>17)</sup>은 고강도 콘크리트에 대한 내화거동 파악을 위하여 일련의 실험들을 수행하였으며, 이중에서 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 THC4와 THC8에

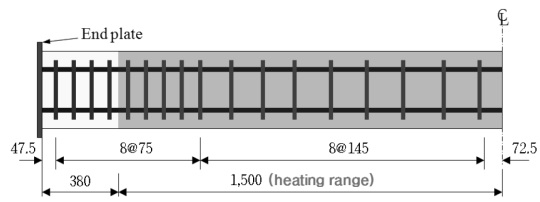


Figure 8. Shape of specimen by Kodur.

대하여 비교를 수행하였다.

시험체는 305 × 305mm 정사각형 단면에 Figure 8과 같이 길이 3,760mm로 제작되었으며, 가력 시험을 위한 시험체의 재하조건은 Table 1과 같다. 한편 이 실험에서는 주철근을 단부철판(End plate)에 용접으로 고정시키고, 단부철판을 다시 하중가압판(Loadng head)에 볼트로 체결하고 난 후 하중을 가력하는 방법으로 실험이 수행되었다.

모든 시험체는 ACI 규준에 의하여 설계되었으며, 주철근은 4-D25, 띠철근은 D10을 사용하였고, 철근의 항복강도는 주철근과 띠철근이 각각 420MPa, 280MPa이다. 골재는 THC4는 실리카 골재를, THC8은 탄산암 골재를 사용하였다.

가열실험을 위하여 1,000ton 용량의 내열로에 시험체를 두고 3,000mm의 기둥 길이에 대하여만 Figure 9와 같은 ASTM E119-88<sup>18)</sup>의 가열온도 조건에 따라 가열을 실시하였으며, 재하하중은 모두 시험체 가열 45분전에 재하되었다.

THC4와 THC8에 대한 처짐에 따른 실험치를 본 연구에서의 해석결과와 비교하여 보면 Figure 10에서와 같다. 그림에서 보면 THC4와 THC8은 강도만 0.2MPa의 차이를 보이고 다른 조건은 모두 같지만 사용 골재(THC4: 실리카 골재, THC8: 탄산암 골재)만이 다른데 해석적으로는 골재의 차이를 구분하지 못하여 단지 0.2MPa의 강도 차이만에 대하여 결과가 도출되었기 때문에 해석결과에서는 두 그래프가 거의 그대로 겹치는 것으로 나타나고 있다.

또한 실험시작 후 2시간 정도까지의 결과를 보면 해석결과에서는 기화열로 인한 열손실로부터 열응력의

Table 1. Loading Condition of Specimen by Kodur

Type	Dimension (mm)	Concrete strength (MPa)		Resistance (kN)	Test load (kN)	Load intensity $\alpha$ (%)
		28 day	Test day			
THC4	305 × 305	60.6	99.6	5515.2	2000	36.3
THC8	305 × 305	60.4	72.7	5499.8	2000	36.4

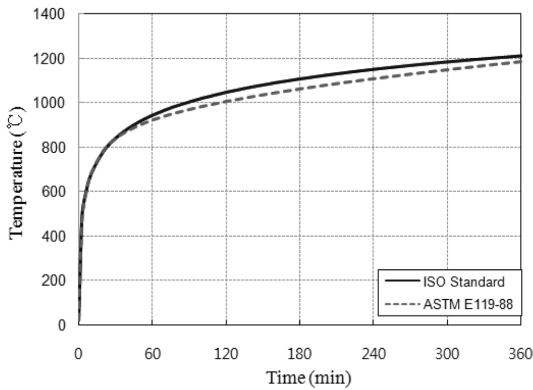


Figure 9. Heat condition.

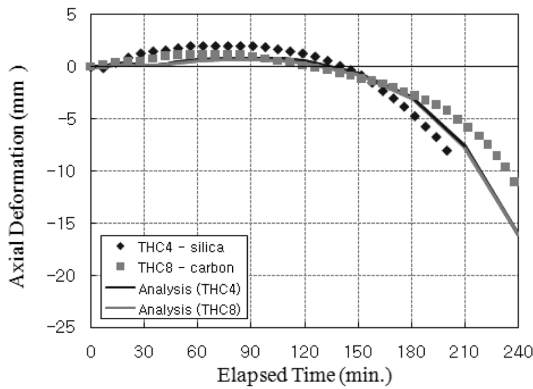


Figure 10. Deformations of specimen THC4 & THC8.

감소가 이루어지고 이에 따라 처짐이 줄어드는 결과를 보이고 있는 반면 실험치에서는 거의 완만한 곡선의 형태를 보이고 있어 온도상승에 의한 기둥의 팽창에서 해석결과와 실험치가 약 1~2mm 정도 차이를 보이고 있다. 이는 실험에서 단부를 가압판에 정착시키는 방식을 적용하여 열손실에 의한 콘크리트 부재의 응력감소 효과가 처짐으로 제대로 반영되지 못하였기 때문인 것으로 판단된다.

내화시간에 대한 비교는 Table 2에서와 같이 실험에 의해서는 사용되는 골재의 차이가 반영되어 THC4와

Table 2. Fire Resistance Time of Specimens by Kodur

Specimen	Fire resistance time		
	Test	Analysis	
	THC4	3 hr. 22 min.	3 hr. 25 min.
THC8	over 4 hr.	3 hr. 20 min.	

Table 3. Spalling Procedure of Specimens by Kodur

Specimen	Test		Analysis	
	Time (min.)	Spalling (mm)	Time (min.)	Spalling (mm)
THC4	15~30	40	10 20	10 40
THC8	15~30	19.5	10 20	10 40

THC8의 두 가지 경우의 내화시간이 약 1시간 정도 차이가 나는 것으로 나타났지만 해석에서는 골재의 차이를 구분하지 못하여 두 가지 경우의 내화시간이 거의 같게 나타나고 있다.

가열 이후의 기둥의 폭렬진행상황을 살펴보면 Table 3과 같이 THC4 및 THC8의 경우 해석적으로는 가열 이후 10분에서 10mm의 폭렬이 발생되고, 20분에서 피복두께인 40mm까지 폭렬이 진전되는 것으로 평가되었다. 실제 실험결과를 보면 15분에서 폭렬이 시작되어 약 30분 정도에 이르기까지 각기 40mm와 19.5mm의 폭렬이 발생된 것으로 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서의 폭렬진행상황에 대한 예측은 실제 실험결과와 비교해 볼 때 골재 종류에 따른 특성을 반영하지는 못하였지만 이를 제외한 전반적인 거동 형태는 유사하게 예측하고 있음을 알 수 있다.

4.2 菊田愨美 등에 의한 실험

菊田愨美 등<sup>19)</sup>은 고강도 콘크리트 및 초고강도 콘크리트의 내화거동 파악을 위하여 일련의 실험들을 수행하여 그 결과를 발표하였다.

시험체는 Figure 11과 같이 400×400mm 정사각형 단면에 길이는 3,600mm로 제작되었으며, 주철근은 12-D19, 띠철근은 D9를 배치하였다. 철근의 항복강도는 주철근과 띠철근이 모두 798.5MPa이다. 모든 시험체에는 폭렬 감소를 위하여 띠철근을 80mm 간격으로 3가닥씩을 사용하였다.

재하하중에 따른 내화성능 결과의 차이를 파악하기

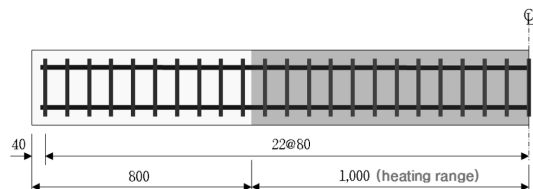
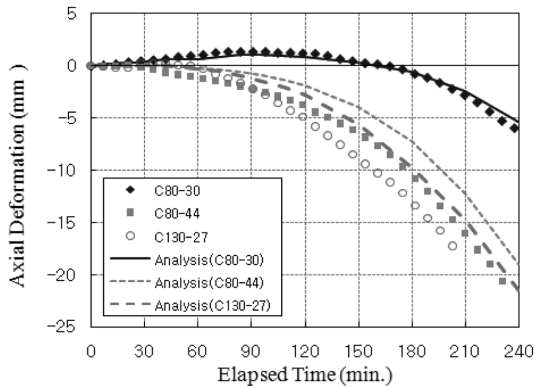


Figure 11. Shape of specimen by 菊田愨美.

**Table 4.** Loading Condition of Specimens by 菊田 愨美

Column	Concrete Strength at 28 day (MPa)	Test day (day)	Resistance (kN)	Test load (kN)	Load intensity (%)
C80-30	77.3	239	13,006.0	3,710	28.5
C80-44	77.3	266	13,006.0	5,443	41.8
C130-27	126.5	258	19,554.9	5,443	27.8



**Figure 12.** Deformations of specimen C80 & C130.

위하여 Table 4와 같은 재하조건들에 대한 실험을 수행하였다. 가열은 기둥 전체에 모두 가열하지 않고 기둥의 중간 부분인 2,000mm에 대해서만 실시하였다. 가열조건은 Figure 9에서의 ISO Standard<sup>20</sup> 가열온도 조건에 따라 실시하였으며, 가열시간은 4시간까지만 적용하고 그 이후에는 실험을 종료하였다.

처짐의 경우를 살펴보면 Figure 12에서와 같이 각 설계강도별로 서로 다른 재하하중을 가하여 하중에 따른 처짐의 변화 양상을 보여주고 있다. 먼저 C80에 의한 처짐변화를 살펴보면 재하율 30%인 경우(C80-30) 거의 수평적인 완만한 처짐 곡선의 형태를 나타내며 해석결과와 실험치의 거동은 거의 정확하게 일치하고 있는 것으로 나타나고 있다. 재하율 44%인 경우(C80-44)에는 재하율 30%에 비하여 곡선의 기울기가 급격히 저하되고 있으며 이는 실험치 및 해석결과에서 모두 나타나고 있다. 이러한 원인은 고온에서의 콘크리트 비정상상태 크리프에 기인하는 것으로 콘크리트 강도와 하중 재하율에 따라 콘크리트의 거동이 확연히 다른 특성을 그대로 보여주고 있다고 할 수 있다.

C130에 대해서는 실험에 의한 처짐 곡선을 살펴보면 매우 급격히 처짐이 증가하는 양상을 보여주고 있다. 해석결과에 있어서도 실험치보다는 다소 완만하지만 역시 급격한 처짐의 증가를 보여주고 있다.

실험치들에 대한 내화시간 비교는 Table 5와 같다.

**Table 5.** Fire resistance time of specimens by 菊田 愨美

Specimen	Fire Resistance Time	
	Test	Analysis
C80-30	over 4 hr.	over 4 hr.
C80-44	over 4 hr.	over 4 hr.
C130-27	3 hr. 25 min.	3 hr. 6 min.

**Table 6.** Spalling procedure of specimens by 菊田 愨美

Specimen	Test		Analysis	
	Time (min.)	Spalling (mm)	Time (min.)	Spalling (mm)
C80-30	-	25	6	20
C130-27	9~36	40	35	40

C80에서 재하율 30%와 44%인 경우 모두 해석결과 및 실험치의 내화시간이 4시간을 초과하고 있는 것으로 나타나고 있다. 반면 C130의 경우를 보면 처짐에서는 해석결과가 실험치보다 다소 작은 경향을 보이고 있음에도 내화시간은 오히려 해석결과가 더 짧게 나타나고 있는데, 이는 해석적으로 내화시간 산정에서의 파괴 기준을 강도설계법의 의하여 설정하였던 것에 기인하는 것으로 사료된다. 즉 강도설계법에 의한 모델조건을 사용하여 파괴 기준을 변형률 0.003으로 설정하였는데 이 기준이 초고강도 콘크리트가 되면 실제 파괴시점과 달라지는 것으로 판단된다.

가열 이후의 기둥의 폭발진행상황을 살펴보면 Table 6과 같다. C80은 재하율 30%에 대한 폭발량만 언급되어 있어 구체적인 시간을 비교할 수는 없으나 해석에 의한 폭발예측결과와 거의 일치하고 있는 것을 알 수 있다. C130의 경우에는 해석에 의한 폭발예측결과와 실제 실험치가 거의 정확하게 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 해석에 의한 폭발예측결과는 부재의 실제 폭발진행상황을 잘 모사하고 있는 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 고강도 콘크리트의 내화성능평가를

위하여 콘크리트 내부의 열전달 및 수분이동, 고온에 의한 증기압, 정상상태 및 비정상상태 크리프 모델을 모두 포함한 해석적 알고리즘을 개발하였다.

기존에 사용되던 열팽창률을 적용하지 않고 증기압을 그대로 모델링하여 적용하는 방법을 사용하므로써 해석결과의 정밀성을 향상시켰으며, 하중 재하율에 따른 정상상태 및 비정상상태 크리프 모델을 제안하여 임의의 가력상태에 대해서도 해석을 수행할 수 있는 기법을 제안하였다.

또한 내화성능평가에 있어서 본 논문에서는 내화시간과 폭렬진행양상의 2가지에 대하여 고려하였으며, 화재에 따른 부재의 폭렬에서부터 최종적인 파괴에 이르기까지의 전반적인 해석이 가능하도록 하였다.

이러한 해석적 결과를 다른 연구자에 의한 실험치와 비교하였으며, 실험치와의 비교결과 내화시간 및 폭렬진행양상에 대하여 본 해석결과는 실제 실험치의 전반적인 거동특성을 거의 유사하게 예측하고 있는 것으로 평가되었다.

### 참고문헌

- 강석원, “고온에 노출된 철근콘크리트 보 및 기둥의 수치해석”, 박사학위논문, 서울대학교(2001).
- 김홍열, “고온영역에서 고강도 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구”, 박사학위논문, 건국대학교(2002).
- M.S. Harmathy, “Fire Safety Design and Concrete”, Longman Science and Technical(1993).
- L.T. Phan, “Fire Performance of High Strength Concrete”, A Report of the State-of-the-Art, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD(1996).
- 최창근, “유한요소법”, 테크노 프레스, p.650(2002).
- 한국콘크리트학회, “콘크리트구조설계기준”, 한국콘크리트학회(2007).
- A. Haksever and C. Ehm, “Application of Biaxial Concrete Data for Bearing Members under Fire Attack”, Fire Safety Journal, Vol.12, pp.109-119(1987).
- U. Schneider, “Properties of Materials at High Temperatures - Concrete”, RILEM Committee 44(1985).
- Y. Anderberg, “Modeling of Steel Behavior”, Fire Safety Journal, Vol.13, pp.17-26(1988).
- M.J. Terro, “Numerical Modeling of the Behavior Concrete Structures in Fire”, ACI Structural Journal, pp.183-193(1998).
- A.N. Noumowe and P. Clastres, “Debicki, G, and Costaz, J.I., High Performance Concrete for Serve Thermal Conditions”, Proceedings of the International Conference on Concrete under Serve Conditions, CONSEC 95, pp.1129-1140(1995).
- European Standard, “Eurocode2: Design of Concrete Structures - Part 1, 2: General Rules-Structural Fire Design”, England(2004).
- 이태규, “화재시 내부증발을 고려한 콘크리트의 수분이동”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.23, No.5, pp.17-23(2009).
- Y. Anderberg and S. Thelandersson, “Stress and Deformation Characteristics of Concrete”, Experimental Investigation and Material Behavior Model, Bulletin 54, Sweden(1976).
- K.H. Thienel and F.S. Rostasy, “Strength of Concrete Subjected to High Temperature and Biaxial Stress: Experiments and Modeling”, Materials and Structures, Vol.28, pp.575-581(1995).
- G.A. Khoury, “Effect of Fire on Concrete and Concrete Structures”, Structural Engineering and Materials, Vol.2, No.4, pp.429-447(2000).
- V.K.R. Kodur and S. Mohamed, “Thermal Properties of High Strength Concrete at Evaluated Temperature”, CANMET-ACI-JCI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Japan, pp.467-480(1998).
- American Society for Testing and Materials, “Standard Methods of Fire Endurance Tests of Building Construction and Materials”, ASTM E119-88, Philadelphia, PA(1990).
- 菊田愨美, 平島夫, 吉田正友, “上形英樹, 超高强度鐵筋コンクリート柱の耐火性に關する解析的研究”, コンクリート工學年次論文集, Vol.25, No.2, pp.187-192(2003).
- ISO Technical Committee 92, Properties of Materials at High Temperatures, RILEM Committee 44(1985).