

# 火재와 철근콘크리트 구조부재의 구조거동

|| 화재와 콘크리트 ||

## 화재와 철근콘크리트 구조부재의 구조거동

- Behavior of RC Structures under Fire -



홍성길\*

### 1. 서 언

산업화에 따른 인구 집중현상의 결과 도심지의 밀집형 고층주거형 구조물에 발생할 수 있는 화재는 인명과 경제적인 손실을 가져올 수 있으므로 이에 대한 체계적인 방재 시스템을 요구한다. 구조공학적인 측면에서 내화 특성은 화재에 대한 최후의 방어선으로서 구조적인 안정성을 유지하여야 한다. 화재로 인한 구조부재의 파괴는 구조체의 강성 및 강도저하가 주요 원인으로 근처 다른 구조부재의 파괴로 발전하면서 종국적으로 전체 구조물이 붕괴할 수도 있다.

구조물의 내화성능은 내화시간, 내화온도, 그리고 강도의 측면에서 평가할 수 있다. 콘크리트 구조물은 내화시간과 강도를 평가하는 것이 일반적이다. 그러나 부재의 거동을 정확히 파악할 필요가 있는 경우 구조해석의 접근을 요구한다. 화재로 인해 발생하는 구조역학적인 정보를 추적하는 구조해석은 화재 발생시 구조 부재의 온도의 분포 파악, 재료의 비선형 특성, 그리고 주변 경계조건의 취급에 대한 해석 방법을 요구하고 있다. 화재에 대한 구조해석을 위한 주요한 요소는 다음과 같다.

- 시간에 따른 온도하중의 변화
- 화재 하중의 시나리오
- 온도에 따른 전도율의 변화
- 열팽창의 고려
- 탄성계수의 변화

#### - 항복강도의 변화

#### - 강도의 변화

#### - 소성거동

#### - 구조성능의 소멸

#### - 냉각과정에 대한 고려

화재 발생시의 구조물은 부재 단면 내의 온도분포와 부재의 거동은 개별적으로 발생한다고 충분히 가정할 수 있으므로 대개의 경우 화재시 구조 부재 해석은 온도분포해석과 부재단면해석을 각각 독립적으로 보고 해석을 수행한다. 다음 <그림 1>은 화재에 구조물 해석의 흐름을 보여준다.

### 2. 온도분포의 해석

화재로 발생하는 열량은 구조체에 전달되어 재료의 온도를 상승시킨다. 온도의 상승은 재료의 역학적 특성을 변화시킨다. 온도 상승에 대하여 부재의 구조거동을 추적하기 위해서는 구조체의 온도분포의 정보가 필요하다. 즉 온도분포는 재료의 특성의 정보를 근거로 구조물을 시간별 재료 비선형을 고려한 구조해석을 수행한다. 온도는 열의 정량적인 표현으로 열역학 법칙에 따라 단위질량에 대한 온도의 단위변화는 평면상의 각 방향 전도에 의한 열량과 같다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$-\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{Q}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

\* 정회원, 서울대학교 건축학과 교수

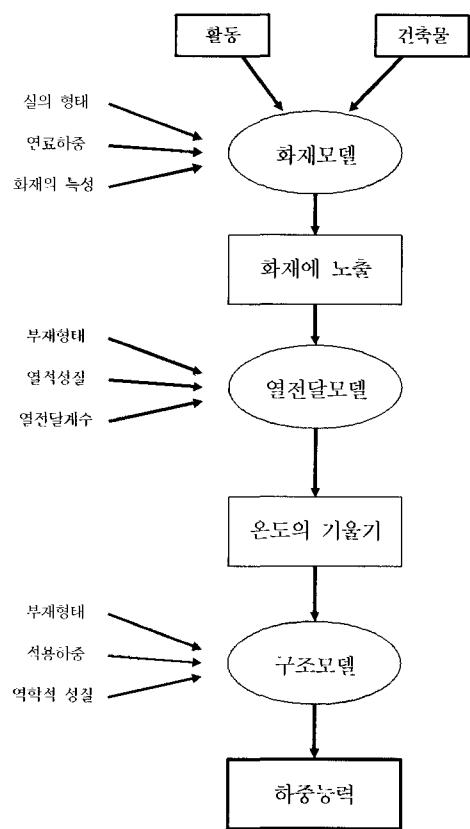


그림 1. 화재에 노출된 부재의 강도를 구하는 순서도

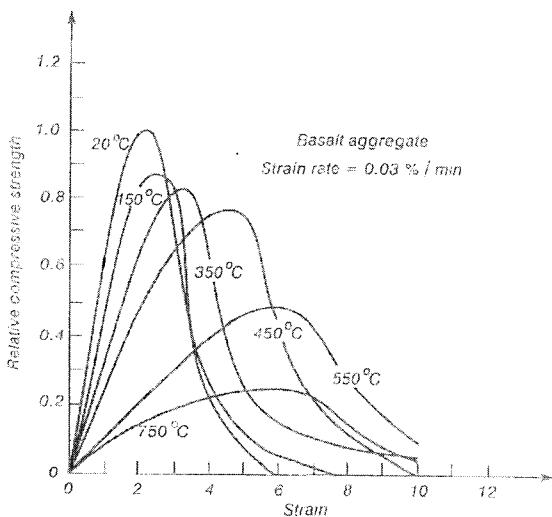


그림 2. 온도가 상승할 때, 콘크리트의 응력-변형률 곡선

### 3. 온도 상승에 따른에 콘크리트 재료의 특성

콘크리트 재료의 역학적 특성의 주요한 변화는 온도 상승에 따라 압축강도와 탄성계수의 저하에 있다. <그림 2>는 온도변화에 따라 변하는 응력도-변형률의 곡선이며 여러 연구자들은 실

험결과를 토대로 <그림 3>과 같이 적절한 곡선을 제시하고 있다. <그림 4>와 <그림 5>는 BS 8110에서 제시한 온도 상승에 따른 압축강도와 탄성계수 저하를 나타낸다.

### 4. 부재 해석

상온 범위에서 온도의 변화로 인한 응력해석은 부재의 재료특성의 변화를 무시할 수 있기 때문에 열팽창으로 인한 효과만을

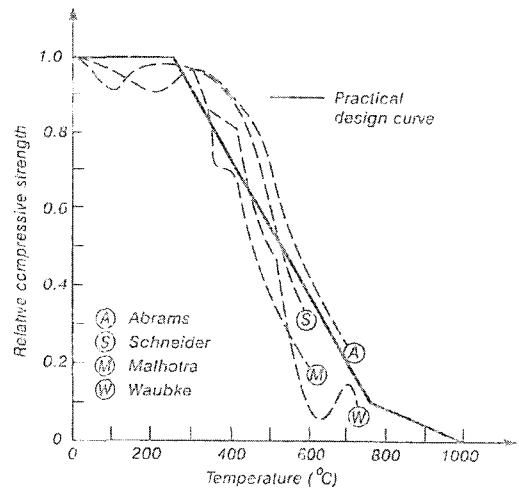


그림 3. 온도 변화에 따른 감소하는 압축강도(Schneider, 1988)

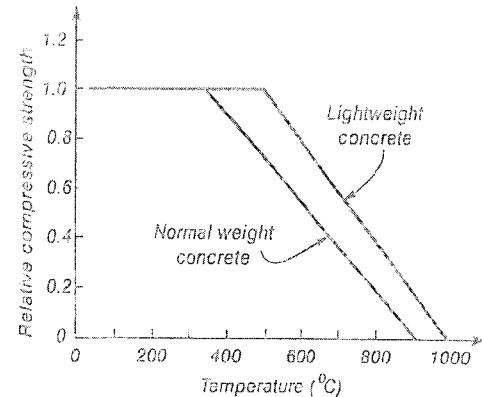


그림 4. 온도 변화에 따른 설계 압축강도

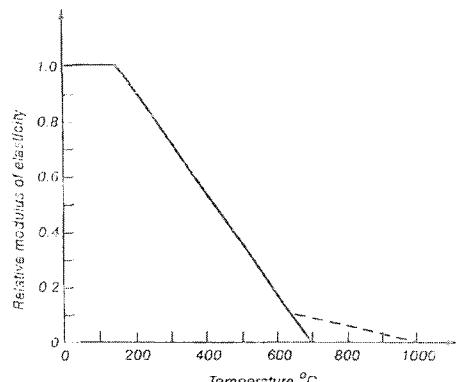


그림 5. 온도 변화에 따른 설계 탄성계수

고려한 응력해석이 가능하다. 온도가 상승하면 열팽창에 의해 길이 방향으로 길이가 자유롭게 증가하나 기하학적인 구속조건으로 내부응력이 발생한다. 보 부재의 경우 단면의 평면유지법칙으로 열팽창 변형률에 대하여 적합조건을 만족하기 위하여 내부응력이 발생한다. 변형률의 최종분포는 선형적으로 나타나며 온도에 의한 변형률과의 차이가 응력으로 작용한다. 이와 같은 이해가 화재로 인한 구조물 해석방법의 매우 중요한 첫 걸음이다. 이를 그림으로 표현하면 다음과 같다. 우선 온도 분포에 따라 보 단면의 파이버(또는 미소단면) 자유 변형률이 <그림 6>과 같이 나타난다. 최종적인 변형률은 선형적으로 표현되며 변형률의 차이에 재료의 탄성계수를 곱한 값이 내부응력분포로 표현된다.

화재가 발생하면 상당한 고열 상태로 콘크리트의 미세구조의 변화로 크립 등 다른 중요한 영향이 발생하나 여기서는 간편하게 오로지 열팽창과 재료의 탄성률과 강도의 변화를 고려하여 설명하기로 한다. 온도가 상승하면 주어진 부재의 변위, 응력상태에 대한 정보를 필요로 한다.

다음은 Poh, K.W.와 Bennetts, I.D.의 "Analysis of Structural Members under Elevated Temperature Conditions [Journal of Structural Engineering]", Vol 121(4)]에서 제시한 해석의 기본적인 틀 속에서 설명하기로 한다. 부재해석을 수행하기 위해서 일반적으로 아래와 같은 가정이 필요하다.

a. 부재해석을 위해서 부재(member)는 아래의 <그림 6>과 같이 전체 길이를 몇 개의 보 요소(element)들의 합으로 보면, 각 분절된 부재의 중앙지점에서 단면을 고려하면, 단면에는 미소면적(subarea)을 갖는 작은 부분들의 조합으로 나타낼 수 있다. 각 미소면적의 온도와 변형, 응력은 인접요소단위에 영향을 미치지 않는다고 가정하며 미소면적은 파이버(fiber)와 유사한 개념으로 이해할 수 있다. 우선 <그림 6>에서 Level 1의 미소단면에 대한 모델에서 평면적으로 합하면 Level 2의 단면적으로 표현되고 이를 길이 방향으로 연결하면 부재를 이 게 된다.

b. 요소(element)와 미소면적(subelement)의 구분은 열원이 부재에 미치는 방법에 따라서 <그림 8>과 같이 구분하여 볼 수 있다. 1차원적 전달방식이란 화재의 열원으로부터 부재내부의 온도분포가 x축 만으로 전달되는 것이고 2차원적 전달방식이란 x, y축 양방향으로 온도가 전도되는 것을 의미한다. 그러므로 화재 열원과 부재의 관계에 따라 적절한 전달방식을 결정한다. <그림 7>은 계산 단계와 주요한 변수를 변형률과 응력으로 분류한 도표이다. 2개의 루프(loop)에서 각각의 레벨(level)의 변수를 적합조건식과 평형조건식 그리고 재료의 구성방정식을 이용하여 계산한다.

변형률은 자유 변형률과 응력에 관련된 변형률의 합으로 표현된다.

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{mechanical} + \varepsilon_{thermal} \quad (2)$$

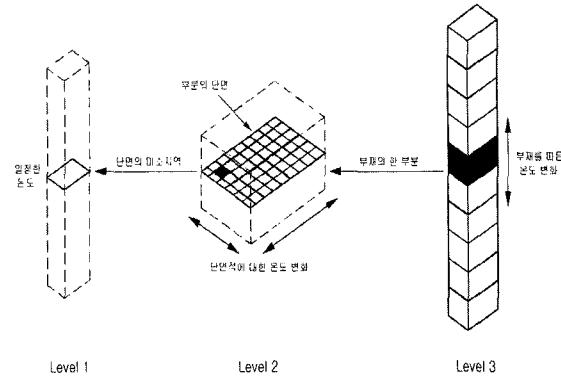


그림 6. 기하학적 부재해석 단위

### 1) 열팽창 변형률과 보 단면의 변형률 분포

우선 각각의 파이버의 변형률은 온도변화량과 열팽창 계수곱으로 표현되며 길이 방향으로 자유롭게 발생한다.

$$\varepsilon_{thermal} = \alpha_t T(x, y) \quad (3)$$

최종적인 변형률은 베르누이 가설에 따르면 보 단면의 변형률 분포는 선형적이므로

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_z + \phi_y x_i + \phi_x y_i \quad (4)$$

2) 응력을 발생시키는 변형률: 보 단면의 최종적인 변형률과 열팽창, 크립 등에 의한 자유 변형률의 차이 값이다. 이를 재료의 탄성계수를 곱하면 미소단면에 작용하는 축력으로 계산한다.

$$\varepsilon_{mechanical} = \varepsilon_{total} - \varepsilon_{thermal} \quad (5)$$

이를 재료의 탄성계수를 곱하면 미소단면에 작용하는 축력으로 계산한다.

$$f_i = \sigma_i a_i \quad (6)$$

여기서  $\sigma_i$ 의 값은 재료, 온도, 하중조건에 따라 다르며 이에

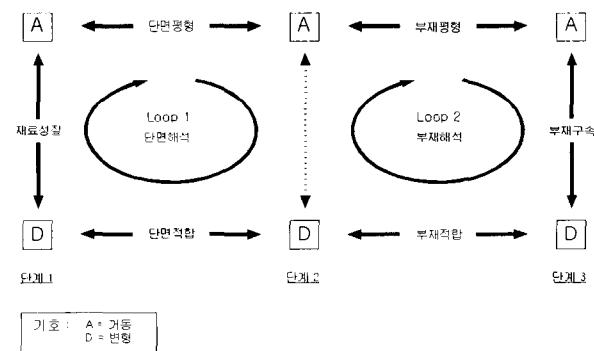


그림 7. 하중(A)과 변형(D)의 관계 및 해석 방법

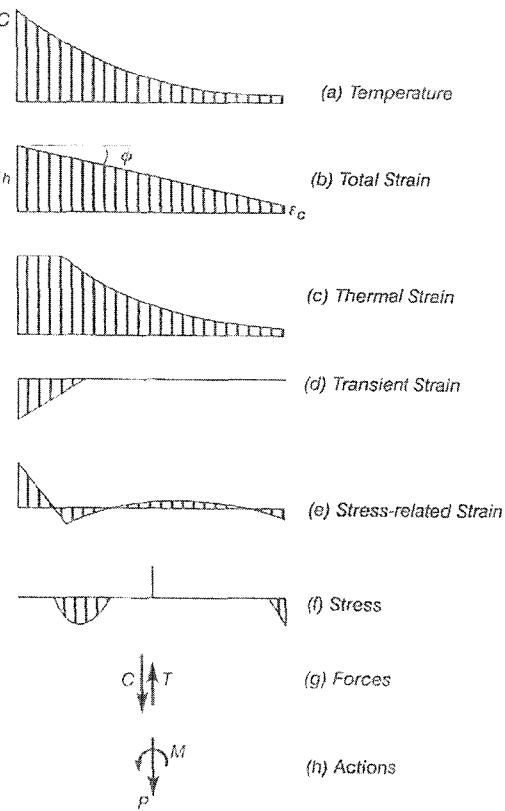


그림 8. 화재에 노출된 콘크리트 벽체의 내부응력과 힘  
(O'Meagher and Bennetts 1991)

대한 일반식을 정리하면 아래와 같다

$$\sigma_i = \begin{cases} g(\varepsilon_i^\sigma, T_i); \text{ loading} \\ E_{Ti}(\varepsilon_i^\sigma - \varepsilon_i^{pl}); \text{ unloading and reloading} \\ h(\varepsilon_i^\sigma, T_i); \text{ reversed loading} \end{cases} \quad (7)$$

이상에서 구한 응력을 탄성 부분과 비탄성 부분으로 분류하면 다음 단계에서 계산 상 유리하므로 다음 식으로 미소응력을 분리 한다.

$$f_i^c = f_i - s_i \varepsilon_i^\sigma \quad (8)$$

### 3) 평형조건

이상에서 구한 응력은 평형조건을 만족시키기 위하여 미소변위(subelement)가 n개에 대하여 합력을 표현할 수 있다.

$$p_z = \sum_{i=1}^n f_i \quad m_y = \sum_{i=1}^n f_i x_i \quad m_x = \sum_{i=1}^n f_i y_i \quad (9)$$

〈그림 8〉은 온도분포에 따른 전체변형률, 온도변형률, 시멘트페이스트의 팽창으로 이루어진 transient 변형률 분포에 의한 내부 응력의 분포를 보여준다.

외력에 대하여 평형조건식을 구성하면 아래의 식처럼 행렬식으

로 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} p_z \\ m_y \\ m_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n s_i & \sum_{i=1}^n s_i x_i & \sum_{i=1}^n s_i y_i \\ \sum_{i=1}^n s_i x_i & \sum_{i=1}^n s_i x_i^2 & \sum_{i=1}^n s_i x_i y_i \\ \sum_{i=1}^n s_i y_i & \sum_{i=1}^n s_i x_i y_i & \sum_{i=1}^n s_i y_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_z \\ \phi_y \\ \phi_x \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i^o - \varepsilon_i^d) s_i \\ \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i^o - \varepsilon_i^d) s_i x_i \\ \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i^o - \varepsilon_i^d) s_i y_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n f_i^c \\ \sum_{i=1}^n f_i^c x_i \\ \sum_{i=1}^n f_i^c y_i \end{pmatrix} \quad (10)$$

위 식을 간단한 매트릭스 형태로 표현하여 주어진 값과 미지수를 구해보자. [S]는 단면의 탄성-강성 매트릭스, D는 단면의 변형인 축변형률과 곡률, B는 자유변형률로 야기되는 자기 평형력의 합, 마지막으로 C는 비탄성 영역의 보정값이다.

$$A = [S] D + B + C \quad (11)$$

### 4) 보단면의 축변형률과 곡률분포

여기서 하중변화에 따른 단면의 변형률과 곡률은 아래식으로 구할 수 있다.

$$D = [S]^{-1} (A - B - C) \quad (12)$$

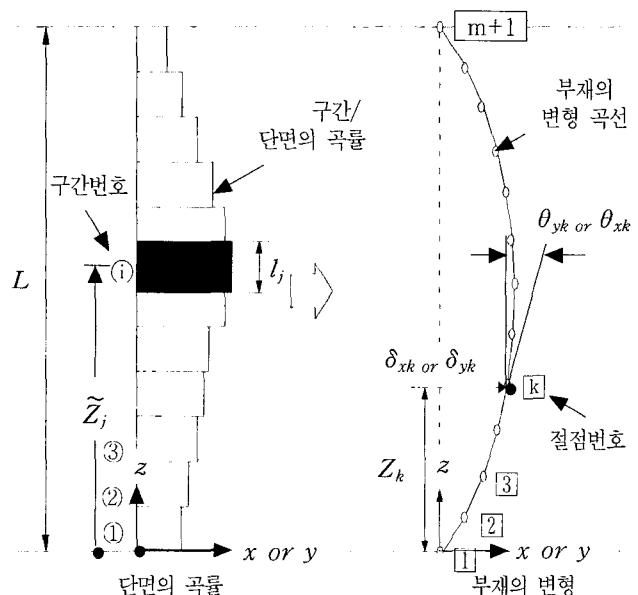


그림 9. 단면의 곡률로부터 부재 변형 계산

5) 이상에서 구한 각 단면의 축변형률과 곡률은 〈그림 9〉에서 보여주는 것과 같이 탄성하중법에 따라 부재의 변형인 회전각과 치짐량을 계산할 수 있다.

$$\theta_{xk} = \theta_{xk}^o + \frac{1}{L} \sum_{i=1}^m C_{ki}^{\theta} \phi_{xi} \quad (13)$$

$$\theta_{yk} = \theta_{yk}^o + \frac{1}{L} \sum_{i=1}^m C_{ki}^{\theta} \phi_{yi} \quad (14)$$

$$\delta_{xk} = \delta_{xk}^o + \frac{1}{L} \sum_{i=1}^m C_{ki}^{\delta} \phi_{xi} \quad (15)$$

$$\delta_{yk} = \delta_{yk}^o + \frac{1}{L} \sum_{i=1}^m C_{ki}^{\delta} \phi_{yi} \quad (16)$$

$$\delta_{zk} = \sum_{i=1}^k \varepsilon_{zi} l_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k (\theta_{xi} - \theta_{xi}^o)^2 + (\theta_{yi} - \theta_{yi}^o)^2 l_i \quad (17)$$

## 5. 내화설계를 위한 부재강도

고온에 노출된 콘크리트 부재의 설계는 재료의 강도저하를 고려하는 것을 제외하고는 상온에서의 부재설계방법과 대동소이하다. 복잡한 계산 작업 대신 Anderberg는 400 °C 이하에서는 90 %의 강도, 400 °C와 600 °C 사이의 경우 70 %의 강도, 600 °C 이상에서는 강도를 전혀 발현하지 못하는 것으로 가정하여 실용적으로 강도를 산정할 수 있으나 얇은 부재에는 적절하지 않다. <그림 12>와 <그림 13>은 화재로 감소된 보의 폭과 철근의 인장 강도를 표현한다. 축소된 유효 콘크리트 단면은 <그림 14>에서 제시된 도표를 이용할 수 있다.

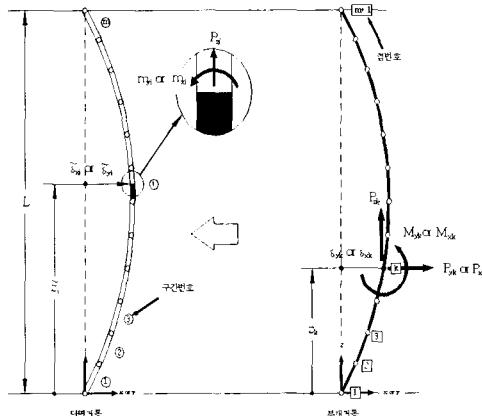


그림 10. 부재(member)단면에서의 해석

6) 부재력과 부재변형의 관계는 평형조건과 부재의 강성을 이용하여 최종적으로 구한다.<그림 10>

이상의 계산 과정과 변수의 관계는 <그림 11>에 표현되어 각 루프(loop)에서 필요한 반복 계산을 수행하여야 한다.

## 6. 결언

본 소고는 열팽창에 따른 역학적인 해석과 콘크리트 재료의 강도 및 탄성계수의 저하에 초점을 맞추어 구조해석의 방법을 설명하였다. 고온의 조건하의 콘크리트 부재의 정확한 거동은 온도 분포의 정확성, 콘크리트 재료의 열에 대한 크립, 수분의 영향 등에 대한 연구가 필요하다. 또한 화재 발생 장소 주위의 온전한 구조물에 의한 구속조건의 효과도 사실상 화재 발생시 구조물 해

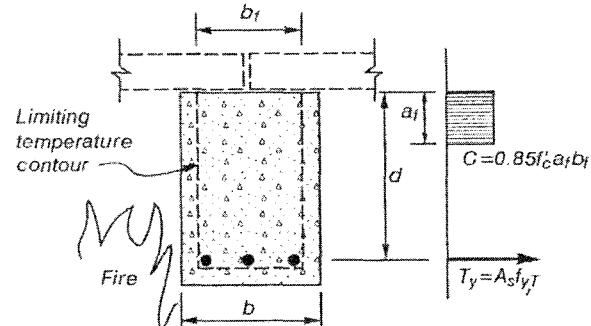


그림 12. 화재에 노출된 단순지지보

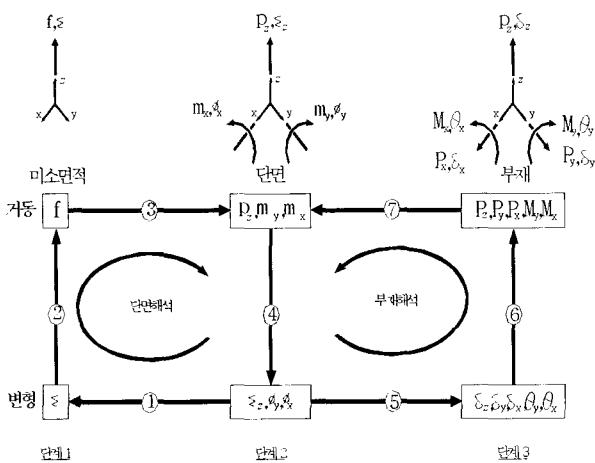


그림 11. 해석방법 및 순서도

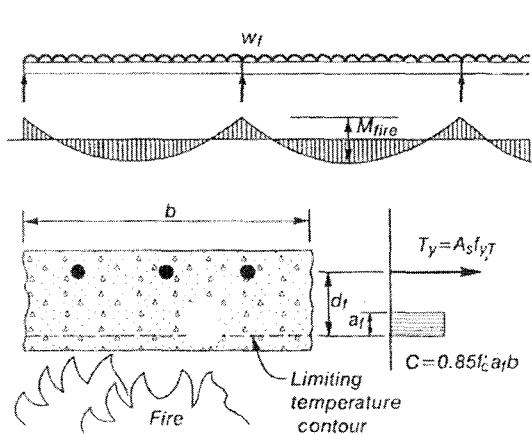
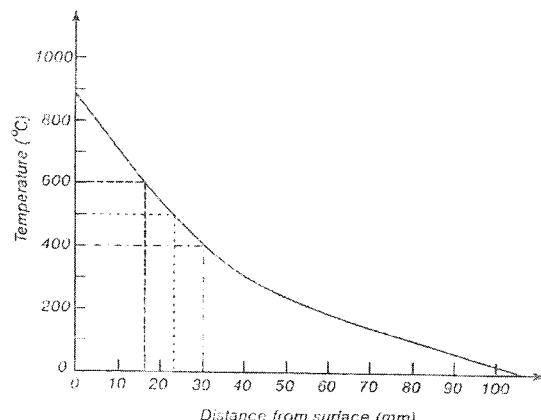
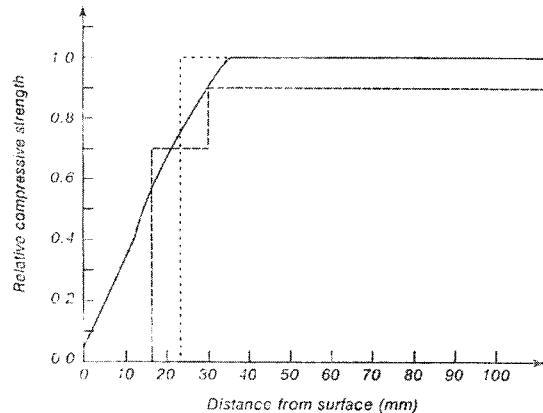


그림 13. 화재에 노출된 연속 슬레이브의 단부



(a) 콘크리트 슬래브의 온도 변화



(b) 압축강도의 감소율

그림 14. 온도 상승에 따른 압축강도의 감소율(콘크리트 슬래브)

석의 중요한 분야이다. 화재시 발생하는 기동 파괴에 대한 주요 원인 중에 하나는 열팽창으로 발생하는 길이 방향의 구속력이 압축력으로 작용한 좌굴파괴이다. 이러한 기동에 대한 거동 및 강도에 대한 연구가 필요하다. 또한 우리나라의 주거용 건물의 주요한 부재인 벽체의 화재시 거동에 대한 연구도 시급하다. 화재시 부재의 망설이 전체 구조물의 붕괴로 발전할 가능성성이 높은 경우도 종종 있다. 이와 같은 연쇄 붕괴 현상에 대한 연구는 도시 방재 저감의 큰 테두리 안에서 다루어야 할 연구과제 중에 하나이다. ■

### 참고문헌

1. A. H. Buchanan, "Structural Design for Fire Safety", John Wiley & Sons, 2001

2. M.S. Abrams/Editor, "Fire Safety of Concrete Structures", ACI SP-80, ACI, 1983.
3. T. Z. Harmathy, "Fire Safety Design and Concrete", Longman Science & Technical, 1993.
4. A. H. Buchanan/Editor, "Fire Engineering Design Guide", CAE, University of Canterbury, 1994.
5. L. C. S. Lim, "Stability of Precast Concrete Tilt Panels in Fire", Thesis of ME, University of Canterbury, 2000.
6. T. D. Lin, R.I. Zwiers, R.G. Burg, T.T. Lie, and R.J. McGrath, "Fire Resistant of Reinforced Concrete Columns", Research and Development Bulletin RD 101B, PCA, 1992.
7. L. T. Phan, "Fire Performance of High-Strength Concrete: A report of the State-of-the-Art", NISTIR 5934, NIST, 1996.
8. T. T. Lie/Editor, "Structural Fire Protection", ASCE, 1992.

## “콘크리트 교육”에 대한 특별 발표회 안내

본 학회에서는 봄 학술발표회 기간에 “콘크리트 교육 발전”을 위한 특별 발표회를 가질 예정입니다.  
많은 관심과 참여 부탁드립니다.

■일 시 : 2002년 5월 11일(토) 오후 13:30 ~

■장 소 : 중앙대학교 안성캠퍼스