

가열조건에 따른 철근콘크리트 부재의 휨 강도에 관한 해석적 연구

이상호^{1)*} · 허은진¹⁾

¹⁾부산대학교 건축공학과

(2000년 12월 3일 원고접수, 2001년 4월 3일 심사완료)

Numerical Study on Flexural Strength of Reinforced Concrete Members Exposed to Fire

Sang-Ho Lee^{1)*} and Eun-Jin Heo¹⁾

¹⁾ Dept. of Architecture Engineering, Pusan National University, Pusan, 609-390, Korea

(Received on December 3, 2000, Revised on April 3, 2001)

ABSTRACT

This paper describes a numerical method to evaluate the flexural strength of reinforced concrete members exposed to fire. An analytical method is developed for the moment-curvature relationship for the cross section which is subjected to high temperature. The method performs heat-transfer analysis for the cross sections and subsequently performs numerical analysis using the stress-strain relationships of concrete and reinforcing steel in various heat conditions.

The results of the numerical studies are ; 1) the residual flexural strength exposing at high temperature is affected by the heating time, the depth of concrete cover and reinforcement ratio, 2) the residual flexural strength after exposed at high temperature is recovered of its original strength at minimum ratio of reinforcement, while members having half of maximum ratio and maximum ratio of reinforcement do not recover its original strength, 3) furthermore, the concrete may reach its maximum capacity before reinforcement yields in reinforced concrete members having maximum ratio of reinforcement.

Keywords : reinforced concrete, flexural strength, stress-strain relationship, heat-transfer analysis, heating condition

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

최근 우리나라에 발생하는 화재의 건수는 1년 동안 무려 30,000건 정도이며, 전기, 담배, 방화 등에 의해 주택 및 아파트, 차량, 공장, 음식점 등의 순서로 건축물에서 많이 발생하고 있다¹⁾. 이와 같은 이유로 화재시 혹은 화재 후의 철근콘크리트 구조물의 붕괴위험성, 보유 성능 및 재사용의 여부 등 구조성능에 관한 평가가 구조물의 안전성 및 경제성에 있어서 중요하지만, 이들 화재를 입은 건축물의 구조적 성능 평가에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다.

철근콘크리트 구조물의 내화설계 규정 및 지침에 있어서, 우리나라에서는 부재별 피복두께만을 규정하고 있으며²⁾, 미국에서는 내화설계 지침서로서 부재별 피복두께와 온도에 따른 각 재료의 기계적 성질을 파악하여 부재의

거동 해석에 적용하도록 하고 있다³⁾. 그러나, 최근의 연구에서는 고온의 가열시간이 재료 및 부재의 잔존내력에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으며⁴⁻⁶⁾, 대부분 화재에 대한 재료 및 부재의 거동이 고온으로 가열된 후 냉각한 상태에서 측정된 것으로 고온을 받을 때의 재료 및 부재의 거동 파악이 불분명하다. 즉, 재료 레벨에서는 고강도 재료의 특성 및 적용 여부가, 부재 레벨에서는 휨·전단 거동 및 축력-모멘트 관계 등이 명확하게 나타나 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 화재와 같이 고온에 대한 철근콘크리트 부재의 휨 거동을 가열온도 및 지속시간을 가열시 및 가열 후로 나누어서 거동을 파악함으로써 철근콘크리트 부재에 대한 합리적인 내화설계법의 정립을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

1.2 연구방법

본 연구의 방법으로는 먼저 가열온도 및 온도의 지속시간, 가열시 혹은 가열 후를 고려한 재료의 응력-변형률 관계를 정립한 다음, 2차원 비정상 열전도 방정식

* Corresponding author

Tel : 051-510-2359 Fax : 051-514-2230

E-mail : sangho@hyowon.pusan.ac.kr

(unsteady - state heat transfer equation)을 이용한 부재 단면 내부의 온도분포를 해석한다. 가정된 재료의 응력-변형률 관계와 해석된 단면 내부의 온도분포를 부재의 모멘트-곡률 관계 해석에 적용하여 기존의 실험결과와 본 해석결과를 비교 검토함으로써 해석방법의 신뢰성을 검증한다. 또한, 검증된 해석방법을 이용하여 각종 가열조건이 철근콘크리트 부재의 휨 거동에 미치는 영향을 파악 검토한다.

2. 해석방법

2.1 콘크리트의 응력-변형률 관계

고온에 대한 콘크리트의 응력-변형률 관계에 대하여는 연구가 어느 정도 진행되어 있으나, 보통강도에서 고강도까지 적용할 수 있는 연구결과는 부족한 편이다. 또한, 대부분의 연구가 가열 후를 대상으로 한 것으로 가열시의 거동에 대하여 그대로 적용하기가 어려운 실정이다. 따라서, 가열온도를 고려한 기존의 여러 평가방법 중에서 보통강도에서 고강도까지 적용하여 실제의 콘크리트의 응력-변형률 관계와 유사하다고 판단되는 제안식을 본 연구에서 적용하고자 한다. 고온에 대한 콘크리트의 응력-변형률 관계는 Euro-Code식⁹⁾이 있으며, 식(1)과 같이 나타낸다.

$$\sigma_c(T) = f_{cT} \cdot \frac{\epsilon_c(T)}{\epsilon_{cl}(T)} \cdot \frac{3}{2 + \left(\frac{\epsilon_c(T)}{\epsilon_{cl}(T)}\right)^3} \quad (1)$$

여기서,

$\sigma_c(T)$: 온도 T °C에서의 콘크리트 응력

f_{cT} : 온도 T °C에서의 콘크리트 압축강도

$$(f_{cT} = r_{cT} \cdot f_{ck})$$

r_{cT} : 온도 T °C에서의 압축강도 잔존율(Table 1)

f_{ck} : 상온시의 콘크리트 압축강도

$\epsilon_c(T)$: $\sigma_c(T)$ 일 때의 변형률

$\epsilon_{cl}(T)$: 온도 T °C에서의 콘크리트 압축강도일 때의 변형률(Table 1)

西垣太郎¹⁰⁾의 연구에 의하면, Euro-Code의 응력-변형률 곡선으로부터 압축강도 잔존율 및 압축강도일 때의 변형을 기존의 실험데이터^{7,8)}와 비교한 결과, 압축강도의 잔존율에 있어서, 온도 400 °C이하의 기존의 실험데이터는 200

°C 부근에서 압축강도가 약간 증가하는 경향이 있으나, Euro-Code식에서는 감소하는 경향을 나타내어 약간 상반된 경향을 나타냈다. 또한 압축강도일 때의 변형률은 기존의 실험데이터에 대해 약간 과대평가를 하는 경향이 두드러졌다.

西垣太郎¹⁰⁾은 Euro-Code식의 이러한 단점을 보완하기 위하여, 콘크리트의 압축강도가 238~875 kgf/cm² 범위의 기존 실험 데이터와 Euro-Code의 비교 검토한 후 기존의 식을 수정하여 식(2)로 나타내었다.

$$\sigma_c(T) = f_{cT} \cdot \frac{\epsilon_c(T)}{\epsilon_{cl}(T)} \cdot \frac{n}{(n-1) + \left(\frac{\epsilon_c(T)}{\epsilon_{cl}(T)}\right)^n} \quad (2)$$

여기서, n : 콘크리트 압축강도의 계수

$$(n = 0.0057 \cdot f_{ck} + 1)$$

또한, 식(2)의 f_{cT} 에 적용되는 r_{cT} 는 400 °C를 전후로 하여 식(3), (4)와 같이 나타내었다.

• $20 \leq T \leq 400$

$$r_{cT} = 1 + \left(\frac{3.36}{f_{ck}^{0.235}} - 1\right) \times \frac{T-20}{380} \quad (3)$$

• $400 < T$

$$r_{cT} = 3.36 \times f_{ck}^{-0.235} + 0.00158 \times (400 - T) \quad (4)$$

또한, 온도 T °C일 때의 콘크리트의 압축강도에 대한 변형률은 750 °C 이하에서는 식(5)를 사용하며, 750 °C 이상에서는 750 °C일 때의 변형률을 사용한다.

• $T \leq 750$

$$\epsilon_{cl}(T) = -4.38 \times 10^{-11} T^3 + 5.45 \times 10^{-8} T^2 - 9.06 \times 10^{-6} T + 2.72 \times 10^{-3} \quad (5)$$

• $750 \leq T$

$$\epsilon_{cl}(T) = \epsilon_{cl}(750) \quad (6)$$

Fig. 1에서와 같이 콘크리트의 압축강도는 대체로 400 °C 이후에 강도 저하가 크며, 특히 가열시간별 강도 저하는 어느 정도 차이가 있는 것으로 알려져 있기 때문에 식(3), (4)의 r_{cT} 를 그대로 사용하기에 어려운 점이 있다. 따라서 가열온도 및 가열시간을 고려한 r_{cT} 를 평가하기

Table 1 $\sigma_c(T) / f_{ck}$ and $\epsilon_{cl}(T)$ on Euro-Code

Temperature(°C)	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$\sigma_c(T) / f_{ck}$	1.0	0.95	0.9	0.85	0.75	0.6	0.45	0.3	0.15	0.08	0.04	0.01	0.00
$\epsilon_{cl}(T)$	0.0025	0.0035	0.0045	0.006	0.0075	0.0095	0.0125	0.014	0.0145	0.015	0.015	0.015	0.015

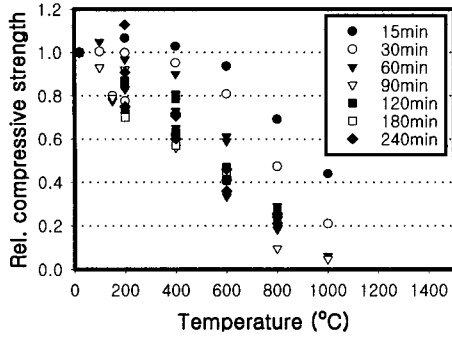


Fig. 1 Concrete compressive strength vs. temperature

위하여 본 연구에서는 가열 후에 측정된 89개의 데이터^{4~6)}를 이용하여 400 °C를 전후로 r_{cT} 에 대하여 회귀 분석한 결과, 다음의 식(7), (8)과 같이 정식화하며, 또한 가열 중에 대해서는 200~600 °C의 범위에서 식(7), (8)에 식(9)를 더한다. 이러한 이유는 가열 후에는 열응력으로 인한 미세 균열의 발생 및 물리적·화학적 변화로 인하여 가열 중의 압축강도보다 감소하기 때문이라 할 수 있다.

$$\cdot 20 \leq T \leq 400$$

$$r_{cT} = 1.005 - \frac{(2.868 + 0.0351H)}{10^4} \cdot T + \frac{6.67}{10^5} H + \alpha \quad (7)$$

$$\cdot 400 < T$$

$$r_{cT} = 1.2304 - \frac{(8.5023 + 0.0301H)}{10^4} \cdot T - \frac{H}{10^4} + \alpha \quad (8)$$

$$\alpha = 0.0002 \times T + 0.1167 \quad (9)$$

여기서, T : 가열온도(°C)

H : 가열시간(분)

식(1)~(2) 및 식(5)~(9)을 사용한 콘크리트의 응력-변형률 관계의 신뢰성 검증을 위하여 기존의 실험 데이터^{3),11)}와 비교 검토하고자 한다. 콘크리트의 압축강도는 보통강도(180 kgf/cm²) 및 고강도(550 kgf/cm²)로서 가열 후에 대하여 나타낸 것으로 가열조건을 실험조건과 동일하게 하였다. Fig. 2 및 Fig. 3에서와 같이 각 가열조건에 따른 콘크리트의 응력-변형률 관계를 비교적 정확하게 평가하고 있다.

2.2 철근의 응력-변형률 관계

가열온도의 영향을 받는 철근의 강도 잔존율은 어느 정도 파악되어 있으나, 응력-변형률 관계에 대한 모델화는 아직 정립되어 있지 않다. 따라서, 온도의 영향을 받는 철

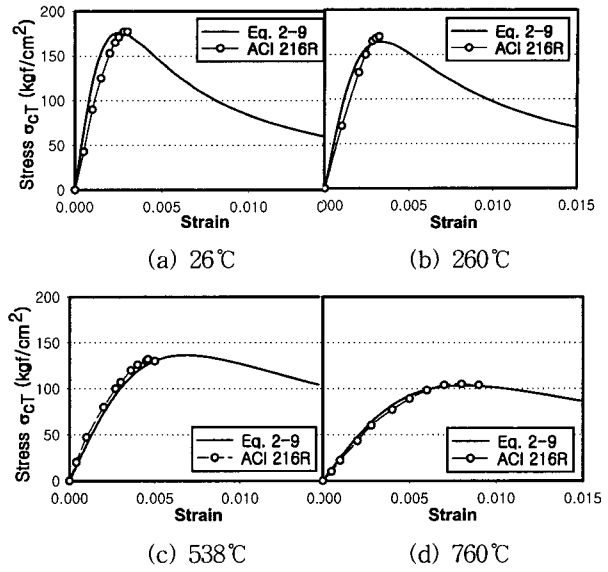


Fig. 2 σ - ϵ curve (concrete, $f_{ck} = 180 \text{ kgf/cm}^2$)

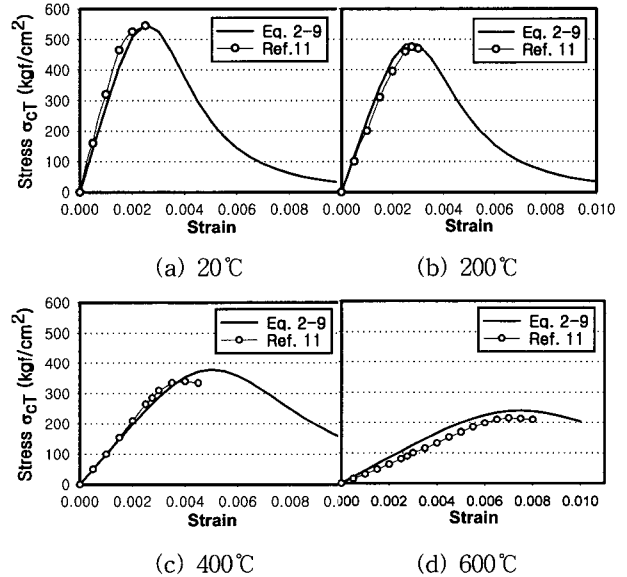


Fig. 3 σ - ϵ curve (concrete, $f_{ck} = 550 \text{ kgf/cm}^2$)

근의 응력-변형률 관계를 Bi-linear 모델로서, 경화역의 강성을 탄성계수의 1/100으로 가정하면 식(10), (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\cdot 0 \leq \epsilon_T \leq \epsilon_{yT}$$

$$f_{sT} = E_{sT} \cdot \epsilon_T \quad (10)$$

$$\cdot \epsilon_{yT} < \epsilon_T$$

$$f_{sT} = f_{yT} + \frac{E_{sT}}{100} \cdot (\epsilon_T - \epsilon_{yT}) \quad (11)$$

여기서, f_{sT} : 온도 T °C에서의 철근의 응력

ϵ_T : 응력 f_{sT} 에 대한 변형률

ϵ_{yT} : 응력 f_{yT} 에 대한 변형률

온도에 대한 철근의 항복강도 f_{yT} 및 탄성계수 E_{sT} 는 식(12), (13)과 같다.

$$f_{yT} = r_s \cdot f_y \quad (12)$$

$$E_{sT} = r_E \cdot E_s \quad (13)$$

여기서, f_y : 상온에서의 철근의 항복강도

E_s : 상온에서의 철근의 탄성계수

가열시간별 철근의 강도 잔존율 r_s 에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이므로, 가열온도에 대한 철근의 항복강도 잔존율 및 탄성계수 잔존율은 기존의 식¹²⁾을 사용하며, 식(14) 및 식(15)와 같다.

$$r_s = \begin{cases} 1.0 & (20 \leq T \leq 300) \\ 1.57 - 0.0019 \cdot T & (300 \leq T < 826) \end{cases} \quad (14)$$

$0 \leq T \leq 649$

$$r_E = 1.01 - 0.0158e^{0.0064T} \quad (15)$$

또한, 가열 후에 대해서는 600°C 정도까지의 온도를 받은 철근에 대하여 강도가 거의 회복되므로 그 때의 항복강도 잔존율은 식(16)으로 가정한다¹³⁾.

$$r_s = \begin{cases} 1.0 & (20 \leq T \leq 600) \\ 1.375 - 6.25 \times 10^{-4} T & (600 < T) \end{cases} \quad (16)$$

식(10)~(16)을 사용한 철근의 응력-변형률 관계에 대한 기존의 실험 데이터와 비교한 결과는 Fig. 4에서와 같이 실험 결과를 비교적 정확하게 평가하고 있다.

2.3 부재단면내의 온도분포 계산

부재 단면 내의 온도분포 산정은 부재의 휨 거동 해석 시 콘크리트 및 철근의 각 위치별 온도를 파악하고, 그 때의 응력-변형률 관계를 적용함으로써 보다 정확한 해석이 가능하다.

부재 단면 내의 온도분포 산정은 식(17)의 2차원 비정상 열전도 방정식을 사용한다¹⁴⁾. 여기서, 콘크리트의 열전도율 K 은 2.35 kcal/mhr°C, 비열 c 은 0.22 kcal/kg°C, 밀도 ρ 는 2.3 t/m³로 가정하여 적용하며, 콘크리트에서는 발열이 없다고 가정한다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{\rho c} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (17)$$

임의 위치 (i, j) 에서의 온도는 식(18)과 같이 전진차분하여 각 단위시간별로 반복하여 구할 수 있다.

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{K}{\rho c} \left\{ \frac{T_{i+1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j+1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} \right\} \quad (18)$$

여기서,

$T_{i,j}^{n+1}$: 임의 위치 (i, j) 에서 구하고자 하는 온도

부재 단면 내의 온도분포 산정에 대한 비교 대상 시험체^{15,3)} 일람은 Table 2와 같으며, 측정위치는 Ref. 15의 경우는 정사각형 단면으로서 폭의 중심에서 깊이 방향으로 2cm 간격으로 하였으며, Ref. 3의 경우는 폭 및 깊이의 중심에서 단면 내부로 측정하였다. Fig. 5 및 Fig. 6는 실험결과와 열전도 해석의 결과를 비교한 것으로서, 외부면에서는 온도차가 어느 정도 있지만, 내부로 갈수록 거의 비슷한 분포를 나타냄을 알 수 있다.

Table 2 Details of test

B ^{cm} ×D ^{cm}	Heating condition	Time (hr)	Heating face	Ref.
50×50	JIS A 1304	1, 3	all	15
30×46	ASTM E 119	1, 2	except for upper	3

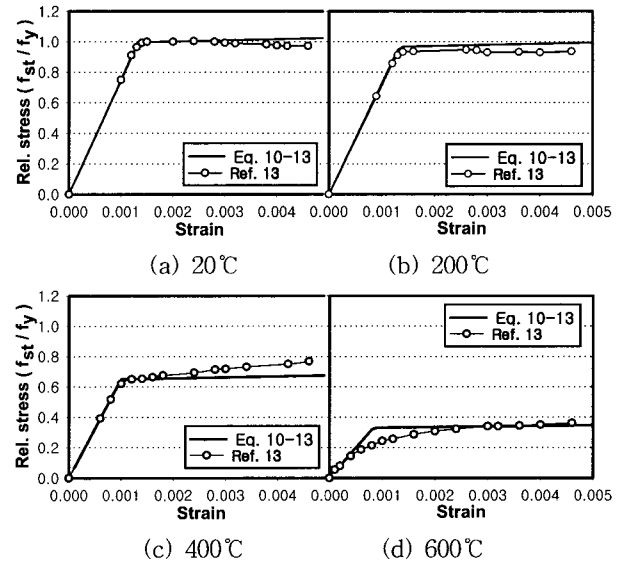


Fig. 4 σ - ϵ curve (steel, $f_y = 4,000 \text{ kgf/cm}^2$)

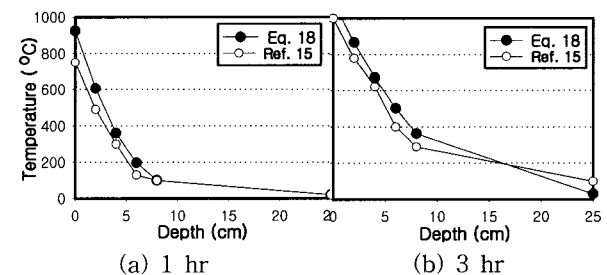


Fig. 5 Comparison on analysis and Ref. 15

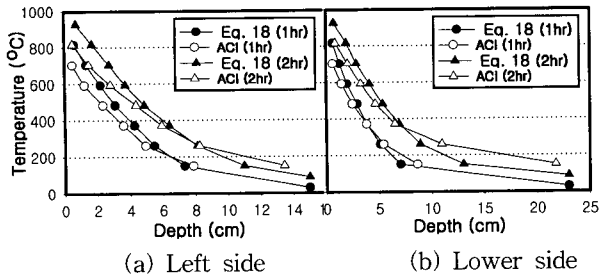


Fig. 6 Comparison on analysis and Ref. 3

2.4 휨 부재의 모멘트-곡률 관계 해석

휨 부재의 모멘트-곡률 관계를 해석하기 위해서는 먼저 부재 단면의 온도 분포의 산정 및 곡률 증분, 중립축 위치를 가정한다. 임의의 layer에 대하여 내부와 외부의 온도 분포가 다르게 나타나므로, 단면 폭을 충분히 적은 크기 (본 연구에서는 단면폭의 1/100배로 가정함)의 블록을 형성하여 곡률에 대한 임의 구간의 변형률 및 구간 내 각 블록의 온도에 대하여 콘크리트의 응력-변형률 관계를 적용하여 임의 구간의 응력을 산출한다(Fig. 7).

철근의 경우에는 배근 단 수 및 각 단의 위치와 개수를 파악하여 각각의 위치에서의 곡률에 대한 변형률과 온도를 철근의 응력-변형률 관계에 적용하여 응력을 산출한다. 이들 응력으로 가정된 중립축에 대한 축력 및 곡률에 대한 모멘트를 산정하며, 해석의 흐름도는 Fig. 8과 같다.

3. 해석방법의 신뢰성 검증

본 해석방법의 신뢰성을 검증하기 위해서 상온에 대해서는 부재의 크기 및 인장철근비를 변수로 한 기존의 실험결과⁶⁾를, 고온에 대해서는 1100°C 정도의 온도에 노출된 실험결과¹⁷⁾를 본 해석방법에 적용하여 비교 분석한다.

상온에 대한 시험체의 일람 및 재료의 성질을 Table 3 및 Table 4에 나타낸다. 실험결과는 각 모멘트를 항복모멘트 M_y 로 나누어 무차원화시킨 값을 사용하여 Fig. 9에 나타낸다. 초기부터 항복까지의 거동이 비교적 잘 일치하고, 항복 모멘트에 대한 최대 모멘트 값은 평균 1.006, 표준편차가 0.062로 잘 일치한다. 그러나, 해석에서 최대모멘트일 때의 곡률을 과소 평가하는 경향을 나타내는데, 단면의 압축 부분의 끝단의 변형률을 해석에서는 0.003일 때 종료하도록 하였으나, 실험에서는 부재가 파괴에 이를 때까지 하중을 가하였기 때문에 시험체의 횡보강근으로 인하여 연성이 어느 정도 확보된 결과라 할 수 있다.

가열실험과의 비교에서는 실험 자료의 부족으로 콘크리트의 압축강도가 950 kgf/cm²인 부재실험에 대해서만 적용하였으며, 시험체의 일람은 Table 5에 나타낸다. 최대모멘트값을 비교한 결과는 실험값이 1.2 tf·m 해석값이 1.05 tf·m로 실험치/해석치 값이 1.14로 비교적 잘 일치하였다.

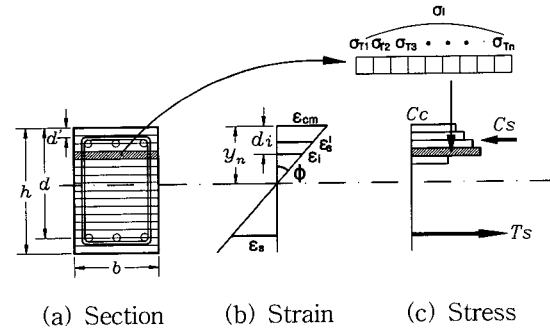


Fig. 7 Numerical method of $M-\phi$ relationship

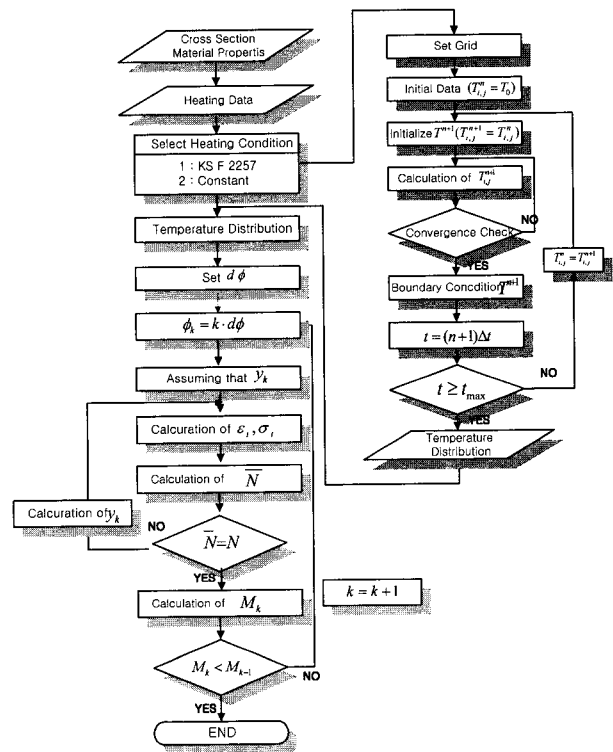


Fig. 8 Flow chart

Table 3 Details of specimens (Ref. 16)

Specimen	B (cm)	D (cm)	d (cm)	ρ_t (%)	ρ_c (%)
J1	30.48	27.94	25.4	0.0183	0.0018
J6	7.620	15.24	15.7	0.0036	0.0147

Table 4 Strength of materials (Ref. 16)

Specimen	f_{ck} (kgf/cm ²)	f_y (kgf/cm ²)
J1	291.2	4,844
J6	272.0	4,868

Table 5 Details of specimens (Ref. 17)

B (cm)	D (cm)	d (cm)	Ratio of span (a/d)	ρ_t (%)	ρ_c (%)
15	20	17	5	2.22	0.39

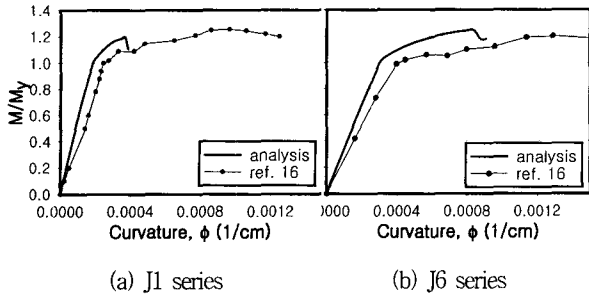


Fig. 9 Comparison on analysis result and Ref. 16

4. 변수해석

4.1 해석개요

본 연구의 해석방법을 이용하여 가열조건 및 단면조건이 철근콘크리트 부재의 휨 거동에 미치는 영향을 파악하기 위한 변수해석을 하고자 한다.

해석대상 시험체의 형상, 치수 및 배근은 극한강도설계법¹⁸⁾을 바탕으로 단면의 크기를 폭 40 cm, 깊이 70 cm로 설계하였으며, 사용된 재료의 성질에 대해서는 Table 6에 나타낸다.

가열조건은 표준내화가열곡선¹⁹⁾에 따른 가열과 소정의 온도를 일정시간 지속시키는 2종류로 나누어 해석한다. 가열시간은 표준내화가열곡선에 대해서는 0, 1, 2시간을, 일정온도를 지속시키는 조건에 대해서는 1, 2, 3, 4시간으로 하여 가열시 및 가열 후 상온으로 온도가 회복되었을 때에 대하여 해석한다. 단면조건은 인장철근비와 피복두께로 나누며, 인장철근비의 경우는 최소철근비, 최대철근비의 50%, 최대철근비(균형철근비의 75%)의 3종류, 피복두께의 경우에는 내화 구조물에 요구되는 피복두께인 5 cm를 기준으로 ± 1 cm하여 4, 5, 6 cm의 3종류로 나누어 해석한다. 따라서, 총 126개의 시험체를 해석대상으로 하였으며, 전체적인 변수 일람은 Table 7에 나타낸다.

4.2 표준내화가열곡선에 대한 해석결과

표준내화가열곡선은 Fig. 10과 같으며, 1시간 및 2시간 가열시 단면내 온도분포는 Fig. 11과 같다. 1시간 가열시는 피복 부분의 온도가 약 600 °C 이상이며, 중앙부분에는 온도가 높지 않은 편이다. 그러나, 2시간 가열시는 피복부분이 800 °C 이상으로 철근이 받는 온도가 높으며 중앙부분도 1시간 가열시에 비해 온도가 상당히 높은 편이다. 각 인장철근비 별로 피복두께, 가열시간을 변수로 하여 가열시와 가열 후에 대하여 부재의 휨 거동을 파악한 결과를 Fig. 12~14에 나타낸다.

전체적으로 가열시간이 없을 때의 모멘트-곡률 관계는 피복두께가 커질수록 응력 중심간 거리의 감소로 항복모멘트 및 최대모멘트의 크기가 약간 감소하는 반면, 최대모멘트일 때의 곡률은 증가한다.

Table 6 Properties of materials (Unit : kgf/cm²)

Concrete		Reinforcement	
f_{ck}	E_c	f_y	E_s
300	2.1×10^9	4,000	2.1×10^9

Table 7 Variables

Heating method	Time (hr)	Condition	p_t (%)	Cover depth (cm)
KS F 2257	0, 1, 2	Exposing	ρ_{min}	4
			$0.5 \rho_{max}$	5
Constant (400 °C)	1, 2 3, 4	Exposed	ρ_{max}	6

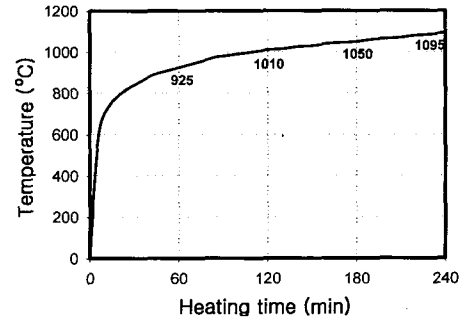


Fig. 10 Standard fire curve for KS F 2257

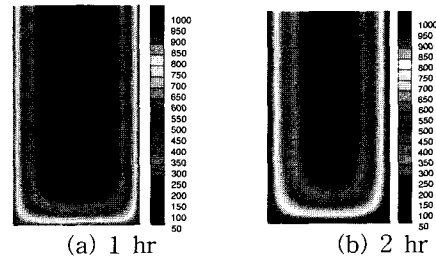


Fig. 11 Temperature distribution (KS F 2257)

Fig. 12는 최소철근비일 때의 부재의 모멘트-곡률 관계를 나타낸다. 1시간 가열시에는 피복두께가 4 cm일 때 내력이 거의 없이 곡률만 증가하였으며, 5 cm일 때는 약 65% 정도, 6 cm일 때는 약 50% 정도 감소한다. 2시간 가열시에는 피복두께 5, 6 cm에 대해 내력이 없이 곡률만 증가한다. 가열 후에는 피복두께에 관계없이 1시간 가열 후에는 상온의 항복모멘트 및 최대모멘트의 약 90% 정도, 2시간 가열 후에는 약 80% 정도 회복하나, 그 때의 곡률은 2시간에 대해서는 약 50% 정도 감소한다.

Fig. 13은 최대철근비의 50%일 때를 나타낸다. 최소철근비일 때와는 달리 1시간 가열시 각 피복두께에 대하여 20~50% 정도의 내력이나, 피복두께 4 cm일 때의 최대모멘트시 곡률이 피복두께가 5, 6 cm일 때보다 2~3배 정도 크다. 또한 2시간 가열시는 피복두께가 6 cm일 때를 제외하고는 내력이 거의 없다. 가열 후에는 피복두께에 관계없이 1시간 및 2시간 가열후에 대하여 40~50% 정도의 강도 회복을 나타내지만, 최대모멘트시의 곡률은 상온의 30% 정도로 콘크리트가 철근보다 먼저 파괴되었다고 할 수 있다.

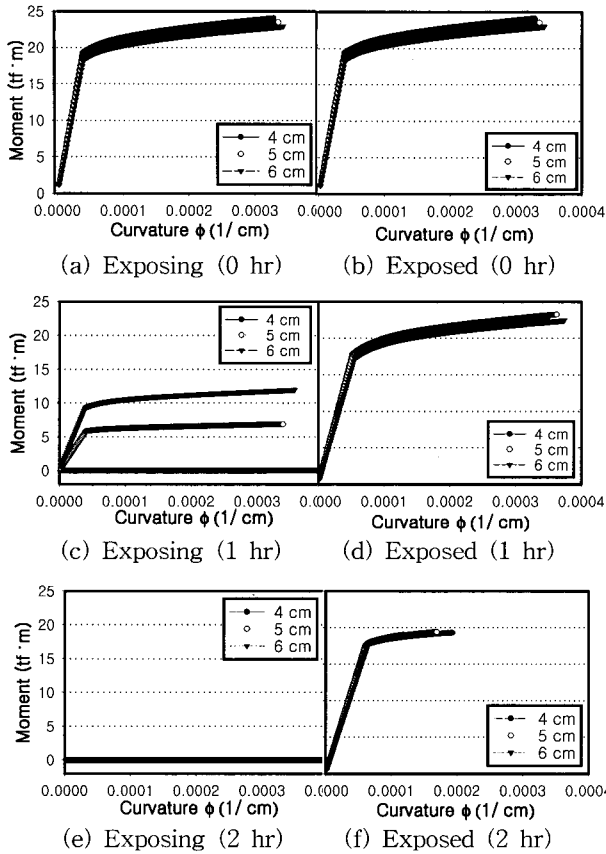


Fig. 12 $M-\phi$ curve (ρ_{min} , KS F 2257)

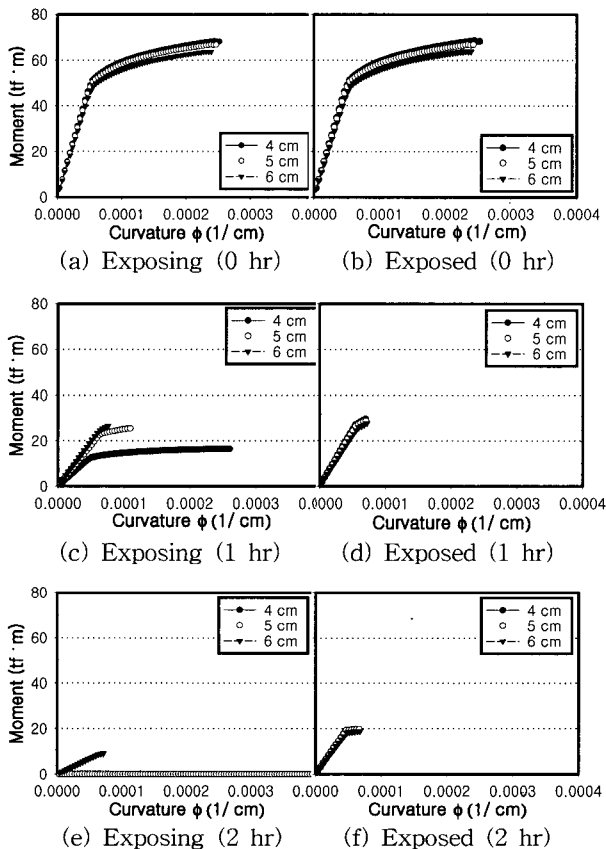


Fig. 13 $M-\phi$ curve ($0.5\rho_{max}$, KS F 2257)

Fig. 14는 최대철근비일 때를 나타낸다. 가열시 및 가열 후에 대하여 비슷한 양상을 나타내나, 1시간 가열시는 피복 두께가 4 cm일 때 최대철근비의 50 %일 때보다 최대모멘트시의 곡률이 많이 감소한다.

전체적으로는 인장철근비가 커질수록 가열시 및 가열 후의 항복모멘트 및 최대모멘트는 가열시간에 관계없이 거의 비슷한 값을 나타내며, 최대모멘트시의 곡률이 작다. 이러한 경향은 부재의 압축단의 최대변형률이 0.003에 도달하기 전에 콘크리트가 먼저 파괴되기 때문이다.

4.3 일정 온도를 지속한 경우의 해석결과

여기에서는 일정온도에 대하여 가열시간 및 피복두께를 변수로 하여, 가열시 및 가열 후에 대하여 해석한다. 가열시는 콘크리트 및 철근의 강도 변화가 각각 300°C 혹은 400°C를 기점으로 두드러지게 나타나며, 가열 후에는 200~600°C의 온도를 받는 콘크리트와 철근이 상온에서 강도 회복이 일어나는 경향이 있다. 따라서, 이러한 조건을 고려한 범위 내의 온도를 400°C로 정하여 가열시간에 따른 부재의 휨 거동을 파악함으로써 1000°C정도의 가열을 받을 때와 비교 검토 하고자 한다. 가열방식은 KS F 2257¹⁹⁾에 따라 소정의 온도까지 온도를 상승시켜, 도달 후에는 400°C의 일정 온도로 지속시킨다.

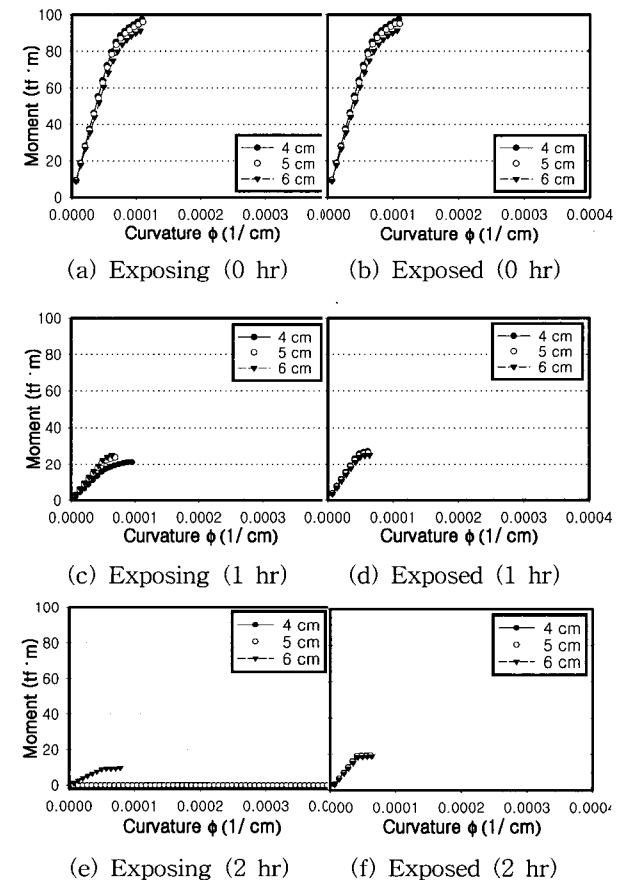
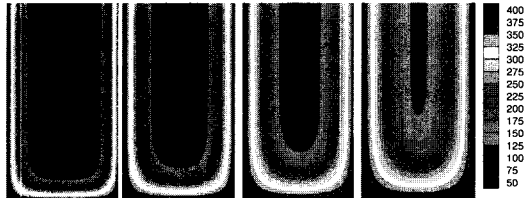


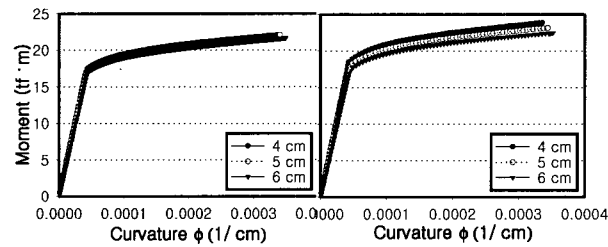
Fig. 14 $M-\phi$ curve (ρ_{max} , KS F 2257)

가열시간에 따른 부재 단면 내부의 온도분포를 Fig. 15에 나타낸다. 1시간 가열시는 50 °C 이하의 비교적 온도의 영향을 적게 받은 부분이 단면의 50% 정도를 차지하고 있으며, 2시간 가열시는 25% 정도, 3시간 이후는 거의 나타나지 않는다. 또한, 피복부분의 온도는 가열시간이 커질수록 증가하여 1시간에 대해서는 약 200 °C 이상, 2시간 이상부터는 약 300 °C 이상으로 철근이 받는 온도가 높아진다.

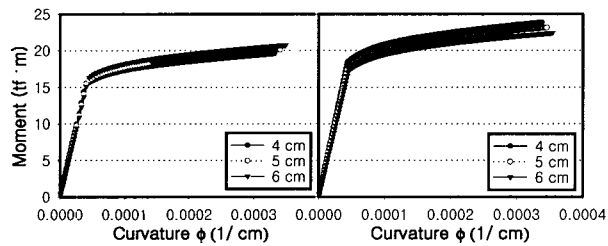


(a) 1 hr (b) 2 hr (c) 3 hr (d) 4 hr

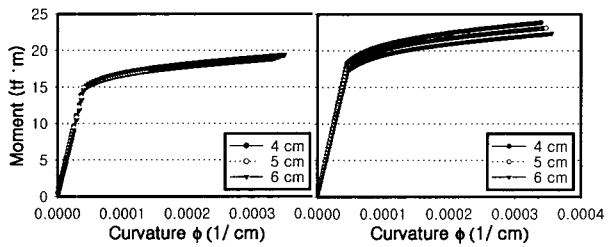
Fig. 15 Temperature distribution (constant)



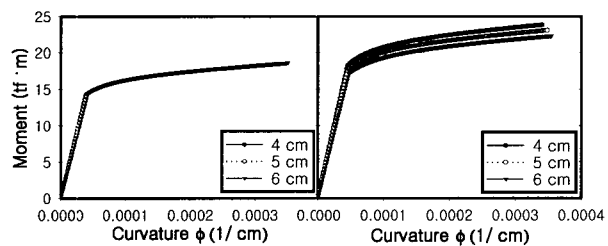
(a) Exposing (1 hr) (b) Exposed (1 hr)



(c) Exposing (2 hr) (d) Exposed (2 hr)



(e) Exposing (3 hr) (f) Exposed (3 hr)

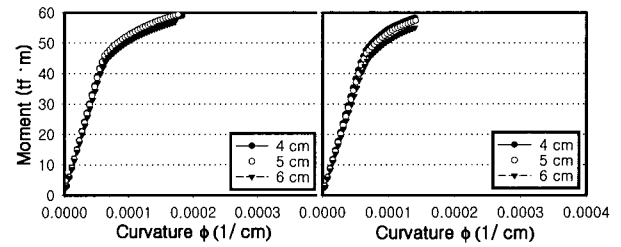


(g) Exposing (4 hr) (h) Exposed (4 hr)

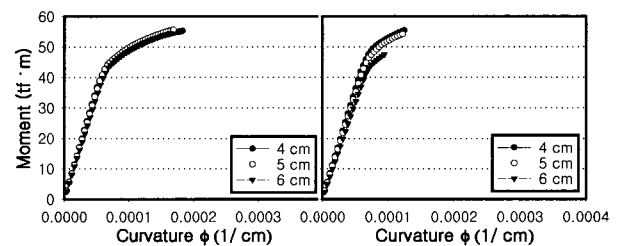
Fig. 16 $M-\phi$ curve (ρ_{\min} , constant)

Fig. 16은 최소철근비일 때의 모멘트-곡률 관계에 대하여 나타낸다. 1시간 가열에 대해 4시간 가열시에는 항복모멘트 및 최대모멘트는 약 10~20% 정도로 감소하였으며, 가열 후에는 가열시간에 관계없이 피복두께 별로 거의 비슷하게 나타나는데, 이는 가열시간과 관계없이 부재 내부의 온도가 대체적으로 300 °C 이하로서 가열시는 콘크리트 및 철근의 내력 저하가 거의 없으며, 가열 후의 콘크리트 및 철근의 강도는 거의 상온의 상태로 회복되었기 때문이다.

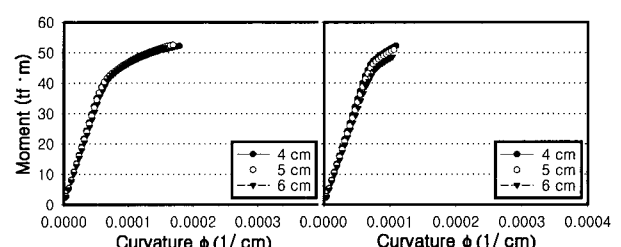
Fig. 17은 최대철근비의 50%일 때, 가열시 및 가열 후에 대하여 나타낸다. 가열시는 피복두께에 상관없이 가열시간 별로 항복모멘트 및 최대모멘트가 약간씩 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 가열시간이 길어질수록 최대모멘트시의 곡률이 감소한다. 가열 후에는 최대모멘트일 때의 곡률이 가열시간이 1시간일 때는 약 17%, 2시간일 때는 약 28%, 3



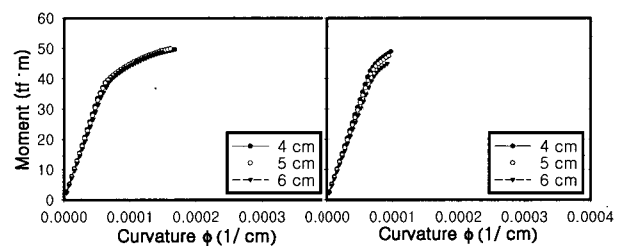
(a) Exposing (1 hr) (b) Exposed (1 hr)



(c) Exposing (2 hr) (d) Exposed (2 hr)



(e) Exposing (3 hr) (f) Exposed (3 hr)



(g) Exposing (4 hr) (h) Exposed (4 hr)

Fig. 17 $M-\phi$ curve ($0.5\rho_{\max}$, constant)

시간은 약 39%, 4시간은 약 44% 정도로 가열시보다 크게 감소한다.

Fig. 18은 최대철근비일 때의 가열시 및 가열 후의 모멘트-곡률 관계로서 피복두께와 관계없이 가열시간에 따라 최소철근비 및 최대모멘트의 50%일 때보다 모멘트의 감소가 크다. 가열 후의 최대모멘트는 가열시보다 약 10% 정도 낮으며, 그 때의 곡률도 약간 작게 나타난다.

전체적으로는 인장철근비가 클수록 항복모멘트시 곡률이 크게 되지만, 최대모멘트시의 곡률은 크게 감소한다. 또한, 최소철근비일 때는 가열 후에 모멘트가 대체적으로 약간씩 증가하는 반면, 최대철근비일 때는 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 원인은 가열후 콘크리트 및 철근의 강도는 어느 정도 회복이 되나, 인장철근비가 크게 되면 철근보다 콘크리트가 먼저 압축파괴되어 취성적인 경향을 나타내기 때문이라 생각되어 진다.

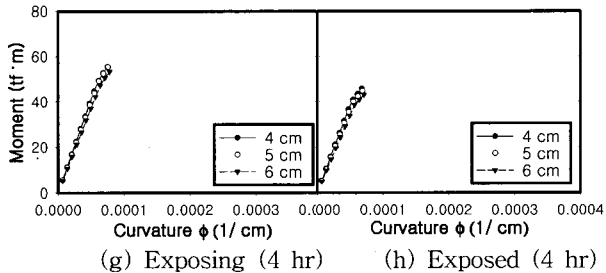
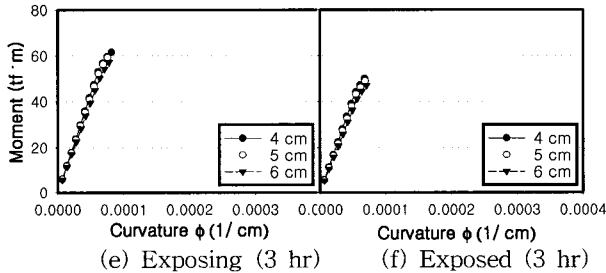
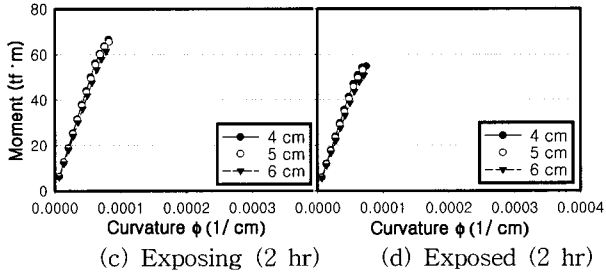
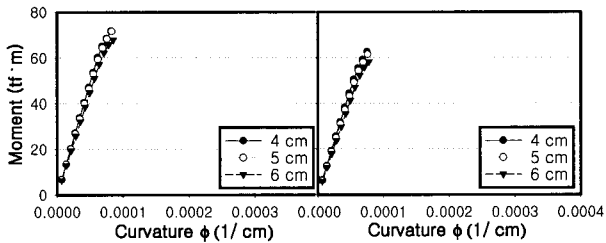


Fig. 18 $M-\phi$ curve (ρ_{max} , constant)

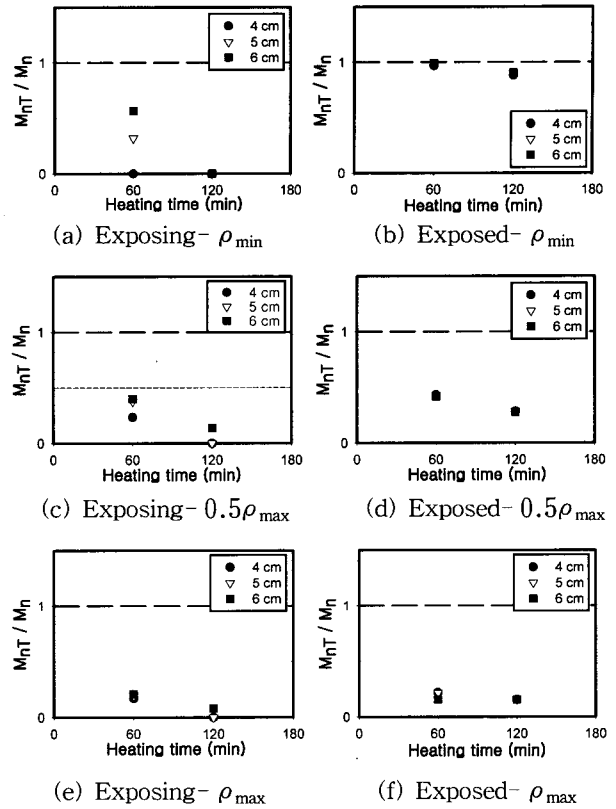


Fig. 19 M_{nT}/M_n vs. heating time(KS F 2257)

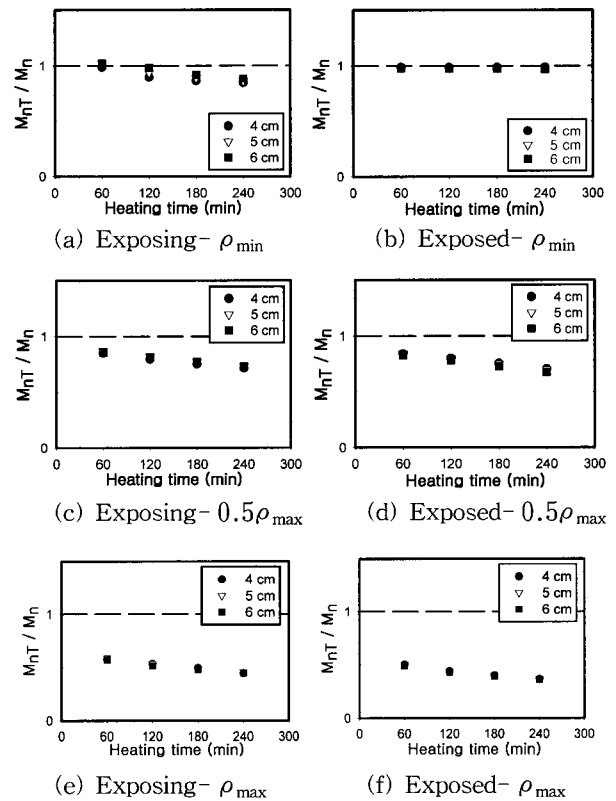


Fig. 20 M_{nT}/M_n vs. heating time(constant)

4.4 최대내력의 비교

가열시 및 가열 후의 가열조건 및 단면조건에 따른 휨 강도(M_{nT})를 상온의 휨 강도(M_n)에 대하여 비교 검토하여 내력 저하의 정도를 파악하고자 한다. Fig. 19는 표준내화가열곡선에 대한 휨 강도의 저하를, Fig. 20은 일정 가열온도를 지속하였을 때의 휨 강도의 저하 정도를 나타낸다. 표준내화가열곡선에 대해서는 가열시에 대해 피복두께의 영향이 크게 드러나고 있으나, 가열 후에 대해서는 피복두께의 영향이 적고, 인장철근비가 클수록 휨 강도의 저하율이 크게 나타나고 있다. 일정 가열온도를 지속시켰을 경우에 대해서는 표준내화가열곡선에 따른 가열방식에 비해 상대적으로 온도가 낮으므로 피복두께의 영향은 그다지 크지 않다. 또한 인장 철근비가 커질수록 휨 강도의 저하율이 크게 나타난다. 특히 가열 후에 대하여 인장 철근비가 커질수록 휨 내력의 저하가 크게 되는 것은 냉각되는 과정에서 콘크리트의 강도는 상온 및 가열시 보다 더욱 저하하게 되나, 철근은 어느 정도 회복됨으로써 철근의 인장과피보다 콘크리트의 압축과피가 선행되어 취성적인 경향을 나타내기 때문이라 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 고온에 노출된 철근콘크리트 부재에 대한 휨 거동을 평가하는 해석방법을 제안하고 타당성을 검증한 후, 제안된 해석방법을 이용하여 변수해석을 수행한 결과를 비교 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 콘크리트 및 철근의 응력-변형을 관계와 단면 내부의 온도분포 산정 방법을 정립하고, 철근콘크리트 부재의 모멘트-곡률 해석에 적용하여, 가열조건에 따른 휨 거동을 파악하기 위한 해석방법을 제안하였다.

2) 제안된 해석방법을 이용하여 부재의 모멘트-곡률 관계에 적용한 결과, 상온에 대해서는 항복모멘트에 대한 최대모멘트 값의 실험치/해석치의 평균이 1.006, 고온에 대해서는 최대 모멘트에 대한 실험치/해석치가 1.14로서, 본 연구에서 제안한 해석 방법의 신뢰성이 검증되었다.

3) 가열시에 대한 변수해석의 결과, 가열시간이 길어질수록 내력 저하가 크게 나타났으며, 가열온도가 높아질수록 피복두께의 영향이 크게 나타났다. 또한 인장철근비가 커질수록 휨 강도의 저하율이 현저하게 나타났다.

4) 가열 후에 대한 변수해석 결과, 최소철근비의 경우에는 가열시의 강도가 상온에 가깝게 회복되는 경향을 나타냈지만 인장철근비가 커질수록 회복되지 않는 경향을 나타냈다. 또한, 인장철근비가 커질수록 가열시보다 취성적인 경향을 나타냈다.

철근콘크리트 부재의 내화특성을 충분히 파악하기 위해

서는 가열시 혹은 가열 후에 대한 해석적 연구와 더불어 많은 실험적 연구가 필요하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 부산대학교 학술연구조성비(4년과제)에 의한 연구로 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. 행정자치부, "99火災統計年報", 1999.
2. 건설교통부, "콘크리트구조설계기준", 1999.
3. ACI 216R-89, "Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements," 1989.
4. 조재열, "고온에 노출된 콘크리트의 잔류압축강도 특성에 관한 연구," 서울대학교 토목공학과 석사학위논문, 1995.
5. 오창희, 강병희, "고溫受熱콘크리트의 性狀에 관한 實驗的 研究(II)," 대한건축학회논문집, 제5권 4호, 1989. 8, pp.285-292.
6. Mohamedbhai G. T. G., "Effect of Exposure Time and Rates of Heating and Cooling on Residual Strength of Heated Concrete," *Magazine of Concrete Research*, Vol.38, No.136, 1986, pp.151~158.
7. 古村, 安部, 彦原, 戶祭, 黒羽, 小久保, "Mechanical Properties of High Strength Concrete at High Temperatures," 東工大研究所報, 1993.
8. 古村, 吳, 安部, 金, "Simple Formulation of Stress-strain Relationship of Concrete at Elevated Temperature," *AIJ構造系論文報告集*, 1988. 2.
9. Sandor Popovics, et al, "A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curve of Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol.3, 1973, pp.583~599.
10. 西垣太郎 外 5人, "高溫時におけるコンクリートの力學的特性のモデル化," 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1995, pp. 71~72.
11. 小久保 勳 外 5人, "高溫度におけるコンクリートの力學的性質," 日本建築學會學術講演梗概集, 1988. 10, pp.728~729.
12. Harmathy, T. Z., "Fire Safety Design and Concrete," Longman Scientific & Technical, 1993.
13. 河出源七, 新訂建築學大系21, 建築防火論, 建築學大系編輯委員會, 景國社, 1978.
14. Hoffmann, K. A., and S. T. Chiang, "Computational Fluid Dynamics for Engineers," Engineering Education System(EES), 1993.

15. 井上明人 外 3人, “高强度コンクリートの耐火性の評価に関する研究(第3報, 柱部材を想定した試験體による實驗),” 日本建築學會學術講演梗概集, 1992. pp.401~402.
16. Corley, W. G., “Rotational Capacity of Reinforced Concrete Beams,” *Proceedings of the ASCE*, Vol.92, ST5, 1966, pp.121~146.
17. Jensen, J. J., et al., “Fire Resistance and Residual *HSC Exposed to Hydrocarbon Fire*,” NIST Special Publication 919, NIST, 1997.
18. 대한건축학회, “콘크리트 구조설계기준 건축구조물설계예제집,” 2000.
19. 한국표준협회, “건축구조부분의 내화시험방법(KS F 2257),” 1993.

요 약

본 연구는 화재에 노출된 철근콘크리트 부재의 휨 강도를 평가하기 위한 해석적 연구로서, 고온을 받는 단면에 대한 모멘트-곡률 관계를 구하는 것이다. 해석적 방법으로는 부재 단면에 대한 열전도 해석을 수행한 후 여러 가지 가열 조건에 대한 콘크리트와 철근의 응력-변형률 관계를 이용하여 모멘트-곡률 관계의 해석을 수행한다.

본 연구의 해석 결과는 다음과 같다.

- (1) 고온에 대한 철근콘크리트 부재의 잔존 휨 강도는 가열시간, 콘크리트 피복두께, 인장철근비의 영향을 받는다.
- (2) 고온을 받은 후의 잔존 휨 강도는 최소 철근비일 때는 상온시의 강도를 회복하지만, 최대 철근비의 50%일 때와 최대 철근비 일 때는 회복하지 않는 경향을 나타낸다.
- (3) 최대 철근비를 가진 철근콘크리트 부재는 가열 후 냉각상태에 대하여 철근이 항복하기 전에 콘크리트가 한계상태에 도달하는 경향을 나타낸다.

핵심용어 : 철근콘크리트, 휨 강도, 응력-변형률 관계, 열전달 해석, 가열조건