



온도의존성 열특성 계수를 고려한 화재에 노출된 철근콘크리트 골조의 해석적 연구

한병찬^{1)*} · 권영진²⁾ · 김재환¹⁾ · 신영수³⁾ · 최은규³⁾

¹⁾AMS 엔지니어링 ²⁾호서대학교 ³⁾이화여자대학교

Temperature-Dependency Thermal Properties and Transient Thermal Analysis of Structural Frames Exposed to Fire

Byung-Chan Han¹⁾, Young-Jin Kwon^{2)*}, Jae-Hwan Kim¹⁾, Yeong-Soo Shin³⁾, and Eun-Gyu Choi³⁾

¹⁾AMS Engineering Co. Ltd., Daejeon, 305-764, Korea

²⁾Dept. of Emergency Management Engineering, Hoseo University, Asan 336-795, Korea

³⁾Dept. of Architectural Engineering, Ewha University, Seoul 120-750, Korea

ABSTRACT A research projects is currently being conducted to develop a nonlinear finite element analysis methods for predicting the structural behavior of reinforced concrete frame structures, exposed to fire. As part of this, reinforced concrete frames subjected to fire loads were analyzed using the nonlinear finite-element program DIANA. Two numerical steps are incorporated in this program. The first step carries out the nonlinear transient heat flow analysis associated with fire and the second step predicts the structural behavior of reinforced concrete frames subjected to the thermal histories predicted by first step. The complex features of structural behavior in fire conditions, such as thermal expansion, plasticity, cracking or crushing, and material properties changing with temperature are considered. A concrete material model based on nonlinear fracture mechanics to take cracking into account and plasticity models for concrete in compression and reinforcement steel were used. The material and analytical models developed in this paper are verified against the experimental data on simple reinforced concrete beams. The changes in thermal parameters are discussed from the point of view of changes of structure and chemical composition due to the high temperature exposure. Although, this study considers codes standard fire for reinforced concrete frame, any other time-temperature relationship can be easily incorporated.

Keywords : reinforced concrete frame, effect of fire, nonlinear transient heat flow analysis, nonlinear FEA, DIANA

1. 서 론

인명과 재산의 손실과 더불어 시설의 파손 또는 붕괴, 그리고 대외 이미지 실추 등 막대한 직·간접적인 경제적 손실을 유발시키는 화재는 국내의 경우 약 35,000건/년 정도가 발생하고 있으며, 이중 대부분이 철근콘크리트 구조물에서 발생하고 있다. 지금까지 철근콘크리트는 열전도율 및 열확산계수가 현저히 낮아 우수한 내화 구조로 인식되었기 때문에 화재 이후에도 간단한 보수 보강을 통하여 구조물이 재사용 되어왔다. 그러나 철근콘크리트가 장시간 고온에 노출되었을 경우에는, 심각한 성능저하 및 손상이 발생할 가능성이 매우 높다. 특히 부재 단면의 감소, 폭렬에 의한 철근의 직접적 고온 노출 등은 구조물의 안전에 큰 위해가 되며, 화재 이후 구조물의 재사용 여부

를 결정하기 위한 잔존 성능의 결정, 필요시 보수·보강에 대한 방법론 측면에서도 실험·해석적 연구가 필요하다고 할 수 있다. 한편, 국내의 기존 연구는 구조물의 단위 부재별 내화 성능에 관한 실험 연구나 거시적 관점의 해석 연구가 주를 이루고 있다^{1,2)}. 그러나 재료의 열적 특성 및 단위 부재 해석에 관한 기존 연구만으로는 지지 조건이나 초기응력 상태, 단면 내의 열응력을 고려한 구조물의 거동이나 강도 저하의 정도를 파악하기 힘들다. 또한 단위 부재가 아닌 구조물의 내화 성능을 실험적으로 구명하는 것은 그 규모 및 경제적 측면에서 한계가 있어, 이러한 구조에 대한 해석적 연구의 필요성이 제기되고 있다.

그러므로 본 연구는 화재 등과 같은 고온 환경을 경험하는 철근콘크리트 구조물의 열적 거동 특성을 해석적으로 구명하기 위하여 비선형 유한요소해석 (finite element analysis, 이하 FEA) 기법을 도입하였으며, 범용 유한요소해석 프로그램인 DIANA를 이용하여 화재 곡선 하중 (온도 이력 하중)을 받는 철근콘크리트 골조의 비선형 FEA

*Corresponding author E-mail : hanbyungchan@yahoo.com

Received September 25, 2006, Accepted March 5, 2007

©2007 by Korea Concrete Institute

를 수행하였다. 해석 기법은 먼저 외부 열원의 영향에 의한 비정상 온도 분포 해석 (nonlinear transient heat flow analysis)을 수행하고 그 결과를 이용한 비선형 FEA를 수행하였다. 비정상 온도 분포 해석에 있어서는 콘크리트와 철근에 대한 온도의존성 열적 특성을 온도 함수로 치환하여 이를 고려하였으며, 비선형 FEA에서는 온도에 따른 재료의 역학적 비선형성과, 균열에 대한 파괴 역학적 관점을 도입하였다. 한편 해석 방법에 대한 신뢰성 검증을 위하여 단순보의 내화 실험을 실시하여 본 해석 기법의 타당성을 검증하였다. 해석 결과의 분석은 사용 재료의 시간의존 열적 특성이 비정상 온도 분포 해석에 미치는 영향 및 각 변수들이 골조의 비선형거동에 미치는 영향을 분석하였으며, 이를 종합하여 화재에 의한 골조의 거동 특성을 파악함으로써 내화 성능 평가 방법의 정립 및 화재에 대한 안전성 검토를 위한 기초 자료를 제시하고자 하였다.

2. 재료의 열적·역학적 특성

2.1 콘크리트의 열적 특성

철근콘크리트가 고온에 노출되는 경우 열적 특성값은 온도에 따라 크게 변화한다. 즉, 콘크리트 내에 존재하는 물 (물리적 흡착수 및 결정수)이 위상 변화하면서 유발되는 잠열이나 수증기의 확산 등에 의해 밀도, 비열, 열전도율에 영향을 미치게 된다. 콘크리트의 열용량 (thermal capacity, J/m^3)에 대한 시간의존 해석을 위하여 밀도와 비열에 대한 온도의 영향을 살펴보면, 밀도는 Fig. 1과 같이 온도가 증가할수록 감소하는 특성을 보인다.⁵⁾ 한편 기존 연구¹⁾에서는 온도 범위 500~1,000°C에서 소석회의 분해, 석영질의 변태, 탈탄산반응 및 C-H-S 상분해 등에 의해 밀도가 크게 감소하는 것으로 보고하고 있으나 본 연구에서는 규준에 근거하여 이를 고려하지 않았다.

비열은 골재의 밀도와 함수량으로 결정되며, 온도가 증가하게 되면 수분 증발과 골재의 성분 변화 시 잠열에 의하여 비열 증가가 나타나게 된다. Fig. 2는 규준^{5,8)}에서 제시하고 있는 콘크리트의 비열에 대한 온도 함수를 나타낸 것으로, 콘크리트는 115°C 근처에서 콘크리트 내

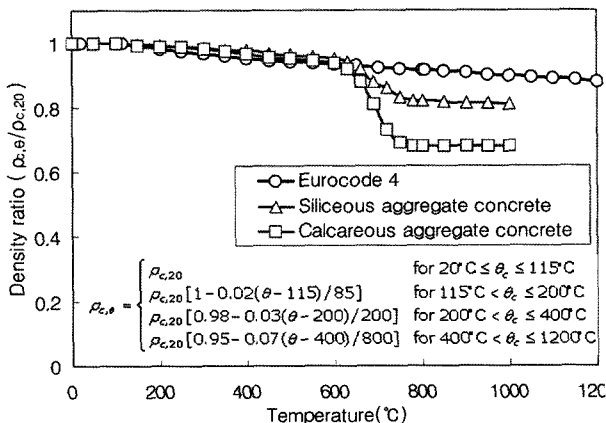


Fig. 1 The variation of density of concrete $\rho_{c,\theta}$

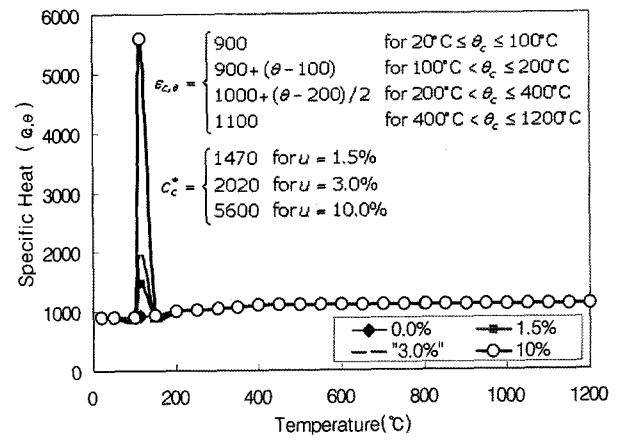


Fig. 2 The specific heat of dry concrete $C_{c,\theta}$ (J/kg°C)

함유된 수분의 증발에 의한 비열의 변화를 고려하고 있으며, 함수율에 따라 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

열전도율 (thermal conductivity, W/m^2C)은 사용 골재의 종류, 비중, 콘크리트 강도 등에 따라 많은 차이를 보이는데 일반적으로 0.8~2.0 W/m^2C 값을 갖으며, 한편 해석의 경우 1.3 W/m^2C 로 규정하고 있다⁹⁾. 그러나 열전도율 또한 온도의존성을 갖으며 이러한 열전도율의 온도 함수가 여러 연구자들에 의해 제안되었다^{3,7)}. Fig. 3은 규준⁸⁾에서 콘크리트의 열전도율을 온도 함수로 나타낸 것으로 1.36~2.3 W/m^2C 범위에 있음을 알 수 있다.

2.2 콘크리트의 열대류 및 복사에 대한 경계 조건

고온 조건에서 공기 중의 대류와 복사에 의한 열전달 경계 조건 또한 주요 영향인자가 된다. 공기와의 경계 조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = h(T_f - T_s) \quad (1)$$

여기서 T_f 와 T_s 는 각각 화재 온도와 콘크리트 표면 온도, h 는 콘크리트 표면 열전달 계수이다. h 는 콘크리트 표면의 수분 정도, 기압 차에 의한 공기의 이동 속도, 열전달 면적, 온도의존성 등을 갖기 때문에 값의 결정이 매우 어렵다. 일반적으로 100°C 이하에서는 내부 23 W/m^2C , 외

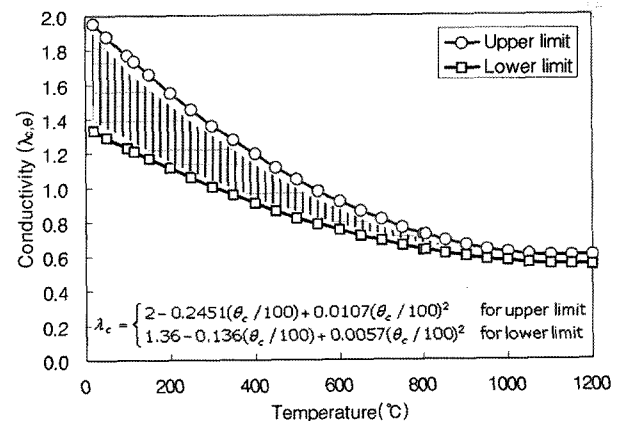


Fig. 3 The thermal conductivity of concrete λ_c (W/m^2C)

부 $9 \text{ W/m}^{20}\text{C}$ 를 이용하고 있으며, Khan 등은 $20 \text{ W/m}^{20}\text{C}$ 를 제안하고 있다⁹⁾. 그러나 이는 화재와 같은 고온 환경에서의 값이 아니며, 대류 경계만을 대상으로 한 것이므로 본 연구에서는 다음과 같이 대류경계와 복사열 경계를 고려한 등가 열전달 계수 (equivalent heat transfer coefficient)를 수정·제안하였다. 콘크리트의 열대류 및 복사에 관한 경계 조건은 대류 경계 (열전달 경계) q_c 와 복사열 경계 q_r 의 합으로 고려할 수 있으며 다음과 같다.

$$q_e = q_c + q_r \quad (2)$$

$$q_c = h_c(T_f - T_s) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} q_r &= \varepsilon\sigma(T_f^4 - T_s^4) \quad (4) \\ &= \varepsilon\sigma(T_f^2 + T_s^2)(T_f + T_s)(T_f - T_s) \\ &= \alpha_r(T_f - T_s) \end{aligned}$$

여기서,

$$\alpha_r = \varepsilon\sigma(T_f^2 + T_s^2)(T_f + T_s) \quad (5)$$

그러므로 콘크리트의 열전도에 관한 등가 열전달 계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_e = (h_c + \alpha_r)(T_f - T_s) \quad (6)$$

여기서, h_c 는 대류계수 = $15 \text{ W/m}^{20}\text{C}$, σ 는 슈테판 볼츠만 상수 = $5.6697 \times 10^8 \text{ W/m}^2\text{K}$, ε 은 콘크리트 표면 복사율 = 0.8이다. 이상과 같은 온도의존성 콘크리트 표면 열전달 계수 (등가 열전달 계수)를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서와 같이 대류 및 복사를 고려한 등가 대류 계수의 경우 온도차가 크기 적은 초기에는 기존 제안식⁹⁾과 유사한 값을 가지지만 온도차가 커지는 경우 등가 대류 계수의 값이 크게 증가하고 있음을 알 수 있다.

2.3 온도를 고려한 사용 재료의 역학적 특성

철근콘크리트 구조물의 콘크리트 및 철근이 고온을 경험하는 경우 제 역학적 특성이 변화하며, 일반적으로 압축강도 및 인장강도, 탄성계수는 감소하고 최대 강도시

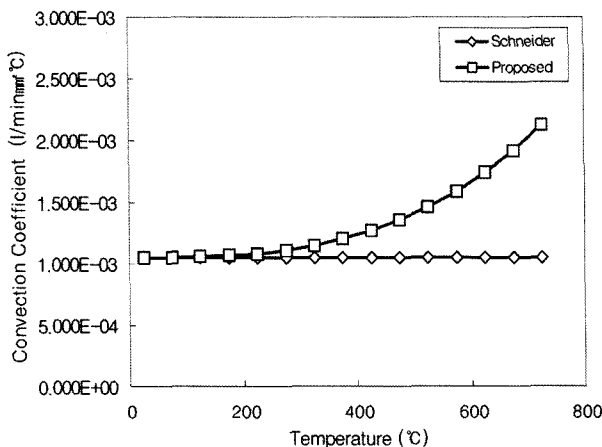


Fig. 4 The thermal convection coefficients ($\text{J/min}\cdot\text{mm}^2\cdot^\circ\text{C}$)

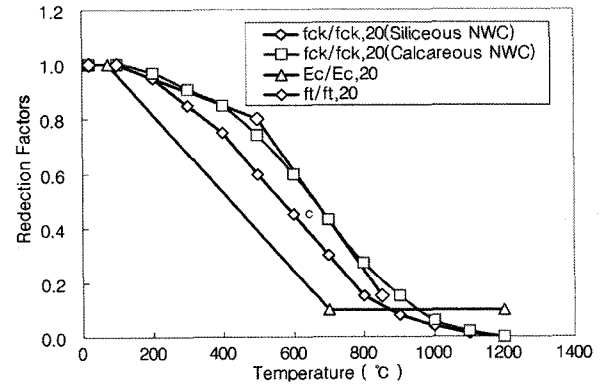


Fig. 5 Reduction factors for mechanical properties of concrete

변형률은 증가하게 된다. Fig. 5는 콘크리트의 온도에 따른 역학적 특성을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 탄성계수의 경우 75°C 이후부터 선형적으로 감소하여 700°C 이상온도의 10%로 감소하는 것으로 가정하였으며, 인장강도의 경우는 식 (7)을 이용하였다.

$$f_{ck}(\theta) = k_{c,t}(\theta)f_{ck,t} \quad (7)$$

여기서 $k_{c,t}$ 는 다음과 같다.

$$k_{c,t}(\theta) = \begin{cases} 1.0 & (20 \leq \theta \leq 100^\circ\text{C}) \\ 1.0 - \frac{\theta - 100}{500} & (100 \leq \theta \leq 600^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (8)$$

열팽창 계수는 크리프를 무시한 변형 구속이 없을 때의 온도에 따른 열변형률을 규준에 근거하여 적용하였다^{5,8)}.

철근의 경우에도 역학적 성능인 인장강도, 비례한도, 탄성계수는 Fig. 6과 같이 온도에 따른 함수로 가정하여 이를 고려하였다.

3. 해석 모델링

3.1 해석 개요

해석은 Fig. 7과 같이 화재가 발생하는 경우 철근콘크

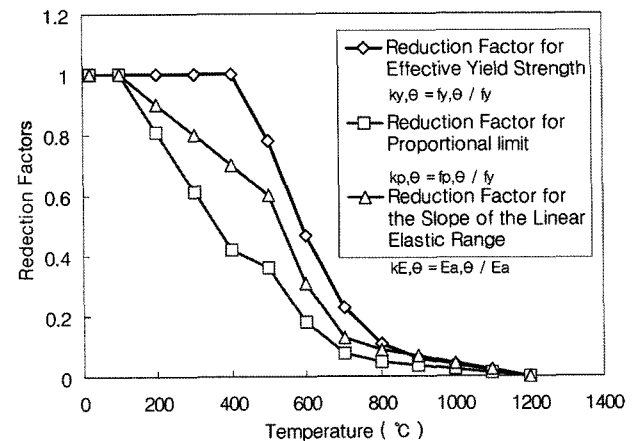


Fig. 6 Reduction factors for mechanical relationship of carbon steel

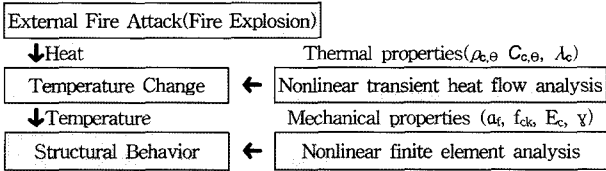


Fig. 7 Analysis procedures (heat transfer and nonlinear finite element analyses)

리트 골조의 열전달에 대한 비정상 온도 분포 해석과 이러한 결과로 얻은 각 절점에서의 온도 정보를 이용한 비선형 FEA로 구성된다. 비정상 온도 분포 해석에 있어서는 콘크리트와 철근에 대한 온도의존성 열적 특성을 온도 함수로 치환하여 이를 고려하였으며, 전술한 기준에서 제시한 특성값을 이용하였다. 비선형 FEA에서는 온도에 따른 재료의 역학적 비선형성과, 균열의 발생 및 진전에 대한 파괴 역학적 관점을 도입하여 이를 모델링하였다.

3.2 시간의존 비정상 온도 분포 해석

범용 유한요소해석 프로그램인 DIANA에서 열전달 해석 시 도입되는 열 $q(t)$ 는 식 (9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q(t) = c(T, r) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (9)$$

여기서, $c(T, r)$ 는 열용량이며 수치 근사 해석으로,

$$r_m = \frac{Q_m}{Q_n} \quad (10)$$

$$Q_m \approx \sum_{i=1}^m c(T_i^*, r_i^*) \Delta T_i, \quad m = 1, 2, \dots, n$$

여기서,

$$\Delta T_i = T_i - T_{i-1} \quad (11)$$

$$r_i^* = \frac{r_{i-1} + r_i}{2}, \quad T_i^* = \frac{T_{i-1} + T_i}{2}$$

이다. 본 연구에서는 비정상 온도 분포 해석을 수행하기 위하여 화재 온도 곡선과 각각의 재료에 대한 열적 특성을 온도 함수로 변환하여 이를 고려하였다.

3.3 열응력을 고려한 비선형 유한요소해석

비선형 FEA를 위하여, 구성 재료인 콘크리트와 철근은 각각 비선형 파괴 역학, 균열 및 소성 모델을 이용하여 3차원으로 모델링하였다. 여기서 콘크리트의 균열은 분산 균열 모델 (smeared crack concept)을 이용하였다. 분산 균열 모델에서 균열은 최대 주인장응력이 인장강도에 도달하면 다른 주응력과는 독립적으로 주응력에서 주변으로 균열이 시작되는 것으로 가정하였다 (constant stress cutoff criterion). 또한 균열의 방향이 결정되면 체적에 발생한 균열에 대하여 응력-변형을 관계에 의해 결정되는 것으로 하였으며, 추가된 균열은 Fig. 8과 같이 같은 방향이

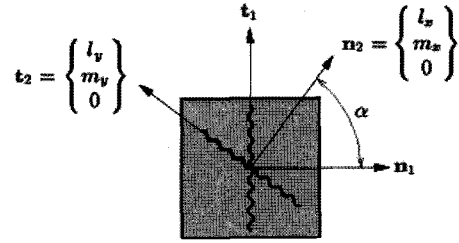


Fig. 8 Multi-directional fixed crack model

지만 기 발생된 균열에서 최소의 각으로 억제되는 것으로 가정하였다 (multi-directional fixed crack model).

콘크리트의 최대 강도 이후 연화 곡선 (stress softening)에 대한 이상화는 이직선 응력-균열 개구 관계에 대한 Gylltoft의 제안치를 이용하였으며 다음과 같다.

$$\epsilon_u = \frac{w_u}{l_{element}} = \frac{4G_f}{f_t l_{element}} \quad (12)$$

파괴에너지 G_f 와 인장강도 f_t 는 극한 균열 열림 w_u 의 값을 계산하는데 이용하였다. 사용된 콘크리트의 인장강도는 CEB-FIP 모델 기준을 이용하였으며 다음과 같다.

$$f_t = 0.30 (f_{ck})^{2/3} \quad (13)$$

콘크리트 재료의 압축 거동은 탄소성 모델을 이용하였고, 탄성 응력 상태의 한계는 Drucker-Prager 항복면을 도입하였으며, 항복이 일단 발생하면 관련된 소성흐름 법칙에 의하여 등방성 경화 특성을 따르는 것으로 가정하였다. DIANA에서 이러한 항복면을 정의하는 계수는 응력 상태, 내부 마찰각 θ , 점착력 c 이다. 콘크리트의 내부 마찰각은 약 $\theta = 30^\circ$, 점착력 c 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$c = f_{ck}(\epsilon_{uniaxial}^p) \frac{1 - \sin \theta}{2 \cos \theta} \quad (14)$$

여기서 $f_{ck}(\epsilon_{uniaxial}^p)$ 는 표준 압축강도시험을 통해 얻을 수 있으며, 본 연구에서는 검증의 경우 재료 시험 결과를, 골조 해석의 경우 기준에서 제안하고 있는 콘크리트 구성 방정식을 이용하였다. 사용된 철근은 Von Mises 항복 기준과 등방성 변형 경화를 고려한 구성 방정식을 고려하였다.

4. 검증 실험

본 연구에서의 비정상 온도 분포 해석과 비선형 FEA의 적합성을 검증하고 철근콘크리트 부재의 열적 거동 특성을 구명하기 위하여 검증 실험을 실시하였다.

4.1 실험 개요 및 시험체

시험체는 피복두께 (40 mm, 50 mm)와 가열 시간 (60분, 120분, 파괴 시까지)을 주요 변수로 하여 총 6개를 제작하였으며, 시험체 일람은 Table 1과 같다. 시험체의 크기는 250×400×5,000 mm의 복근 직사각형 단순보로 상부 및 하부에 SD40급 D22 2개 및 3개를 배근하였다. 또한 전

Table 1 List of specimens

Specimen	f_{ck} (MPa)	f_y (MPa)	Cover depth (mm)	Load (kN)	Heating time min
L-4	20	400	40	87.0	60
S-4	20	400	40	87.0	120
F-4	20	400	40	87.0	Up to failure
L-5	20	400	50	87.0	60
S-5	20	400	50	87.0	120
F-5	20	400	50	87.0	Up to failure

단 파괴를 방지하기 위하여 SD40급 D10 철근을 150 mm 간격으로 배근하였으며, 내부 온도를 측정하기 위하여 열전대를 하부 주철근 및 시험체 중앙에 설치하였다 (Fig. 9). 재료시험 결과 콘크리트의 압축강도는 20.5 MPa로, 철근의 인장강도는 410 MPa로 나타났다.

가열 실험을 위한 시험체의 설치 사항은 Fig. 10과 같다. 시험체는 수평 가열로에 단순지지 상태로 설치한 후 4점재하 방식으로 가력하였다. 먼저 실제 하중 상황을 가정하기 위하여 초기 하중을 87 kN (사무실 용 1.0DL+0.4LL) 가력한 후, 하중 유지 상태에서 ISO 834 (KS F 2257) 기준을 따라 가열하였으며, 가열 시간은 변수별로 60분, 90분 그리고 파괴 시까지 지속하였다.

4.2 실험 결과

피복 40 mm와 피복 50 mm의 거동 차이를 보기 위하여 파괴 시 (ISO 733 기준, $L^2/400a$)까지 가열한 결과, 피복 두께 40 mm의 경우 (F-4)는 151분, 피복 두께 50 mm의

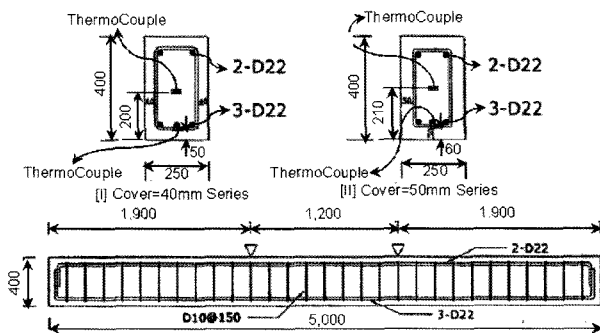


Fig. 9 Basic details for specimen and thermocouple

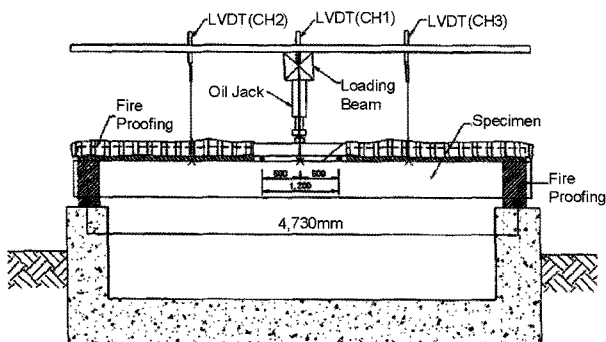


Fig. 10 Experimental test set-up and measurements

경우 (F-5)에는 225분이 소요되었으며 이때의 철근 온도는 약 500°C였다. 처짐 특성 또한 F-4 시험체의 경우는 가열 시작 80분 후 부터 처짐이 급격히 상승하였으며, F-5는 약 100분 이후부터 급격히 증가함으로써 증가된 피복두께가 열의 전달 분포를 지연시키고 있음을 알 수 있었다.

가열 시간에 따른 결과를 분석해 보면 60분 동안 가열한 시험체 (S-4, S-5)는 철근의 온도가 약 120°C, 처짐이 약 16 mm 안팎으로 구조물에 큰 영향을 주지 않고 안전한 범위 내에 들어왔다. 그러나 120분 이상 가열하였을 때는 철근의 온도 및 처짐이 급격히 상승하였으며 120분에서 철근의 온도는 약 300°C였다. 한편 피복두께 및 가열 시간에 관계없이 모든 시험체의 온도상승구배 특성은 110~130°C 부분에서 콘크리트 내에 함유된 잉여수의 잠열 및 수분이동에 의하여 온도 변화가 없는 구간이 나타났다.

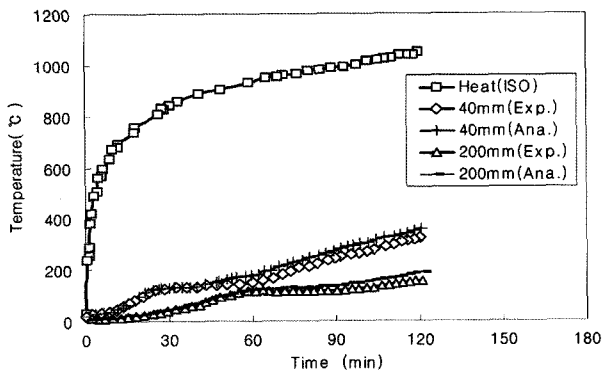
4.3 해석 기법의 검증을 위한 모델링

본 연구에서의 비정상 온도 분포 해석과 비선형 FEA 기법의 적합성을 검증하기 위하여 시험체를 대상으로 모델링 및 해석을 실시하였다. 요소 분할은 50×50 mm를 기준으로 콘크리트는 3D solid (CHX60)요소, 철근은 DIANA의 “embedded reinforcement” 요소를 적용하였으며, 온도 하중을 고려하기 위한 경계면은 가상의 요소 (BQ4HT)로 모델링하였다. 또한 재료의 열적 특성값은 전술한 기준에 근거하여 입력하였으며, 역학적 특성값은 상온에서의 재료 시험을 근거로 온도에 따른 특성값을 적용하였다. 콘크리트 함수율은 공시체를 동일 조건에서 가열한 후 중량비로 평가한 것으로 5.4%로 나타났다. 대류 계수는 가열로 내 조건을 고려하여 $h_c = 400 \text{ W/m}^2\text{C}$ 로 가정한 후, 본 연구에서 제안한 온도 이력에 따른 등가 대류 계수를 적용하였다.

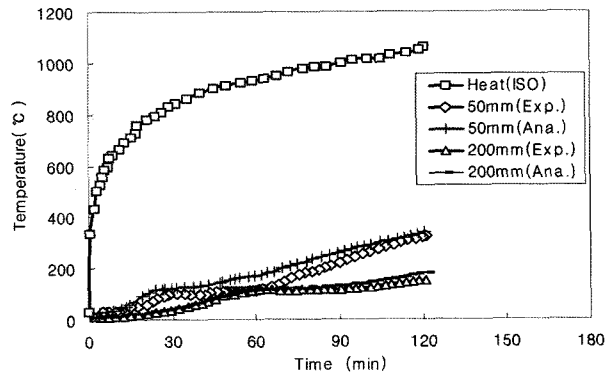
4.4 해석 결과 및 검증

Fig. 11 및 Table 2는 해석 및 실험 결과를 비교한 것으로, 시험체의 온도 이력 곡선과 해석 곡선으로 부터 해석 기법은 온도 이력을 매우 유사하게 추정하고 있음을 알 수 있다. 특히 해석 결과를 가열 시간별 (30분, 60분, 120분)로 분석해보면 (Table 2), 실험 결과에 대한 해석 결과의 비는 0.92~0.99로써 해석 결과가 실험 결과보다 크게 예측하고 있으나 오차는 10% 내에 있음을 알 수 있다.

한편 비선형 FEA 및 실험 결과에 대한 비교 분석을 Fig. 12 및 Table 3에 나타내었다. 그림으로 부터 처짐은 실험 결과와 해석 결과가 매우 유사함을 알 수 있으며, 시간별 처짐에 대한 실험값 대 해석값의 비 또한 0.8~1.07 (Table 3)로 나타났다. 이러한 검증을 통하여 본 연구에서 DIANA를 통하여 해석된 비정상 온도 분포 해석과 비선형 FEA는 보 내의 온도 분포 특성과 이로 인한 구조물의 거동 특성을 매우 유사하게 추정할 수 있어, 구조물(골조)로의 해석이 가능할 것으로 판단되었다.

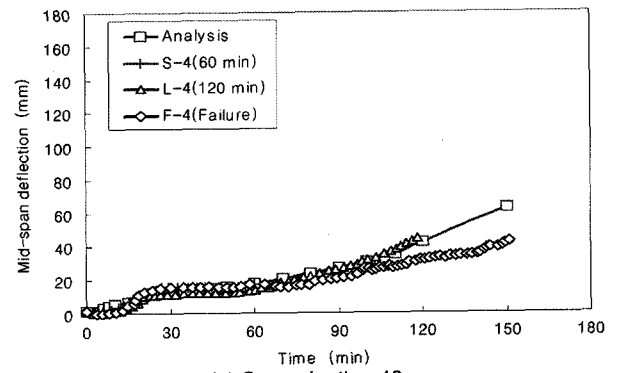


(a) Heating time= 120 min, Cover depth=40 mm(L-4)

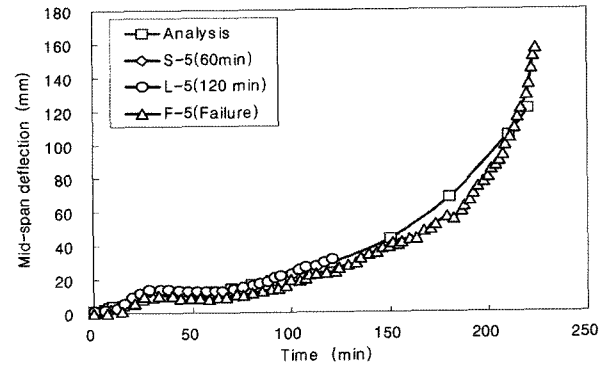


(b) Heating time= 120 min, Cover depth=50 mm(L-5)

Fig. 11 Internal temperature distribution of specimens



(a) Cover depth = 40 mm



(b) Cover depth = 50 mm

Fig. 12 Fire exposed time-deflection curve in specimens

Table 2 Verifications-temperature in reinforcement

Specimen	Temperature								
	30 min			60 min			120 min		
	Exp. (°C)	Ana. (°C)	Exp./Ana.	Exp. (°C)	Ana. (°C)	Exp./Ana.	Exp. (°C)	Ana. (°C)	Exp./Ana.
L-4	122.3	131.5	0.93	140.6	17.84	0.95	-	-	-
S-4	124.5	131.5	0.95	143.1	148.3	0.96	295.8	302.2	0.98
F-4	121.2	131.5	0.92	139.5	148.3	0.94	299.4	302.2	0.99
L-5	115.1	122.5	0.94	119.5	135.2	0.88	-	-	-
S-5	112.2	122.5	0.92	118.4	135.2	0.88	237.3	246.8	0.96
F-5	113.4	122.5	0.93	120.1	135.2	0.89	240.5	246.8	0.97

Table 3 Verifications-deflections on temperature step

Specimen	Deflection								
	30 min			60 min			120 min		
	Exp. (mm)	Ana. (mm)	Exp./Ana.	Exp. (mm)	Ana. (mm)	Exp./Ana.	Exp. (mm)	Ana. (mm)	Exp./Ana.
L-4	13.24	14.24	0.93	16.45	17.34	0.95	-	-	-
S-4	13.21	14.24	0.93	16.05	17.34	0.93	44.36	41.45	1.07
F-4	13.54	14.24	0.95	16.61	17.34	0.96	31.75	41.45	0.77
L-5	13.63	12.15	1.12	16.41	15.02	1.09	-	-	-
S-5	12.69	12.15	1.04	15.94	15.02	1.06	31.46	35.54	0.88
F-5	12.41	12.15	1.02	15.87	15.02	1.06	28.49	35.54	0.80

5. 철근콘크리트 골조의 해석

5.1 골조의 유한요소 모델링 개요

검증된 비정상 온도 분포 해석과 이를 고려한 비선형 FEA

를 철근콘크리트 골조의 해석으로 확장하고자 하였다. Fig. 13은 본 연구에서 대상으로 한 철근콘크리트 골조에 대한 유한요소(FE) 모델링 개요를 나타낸 것이다.

대상 골조는 경간 8,000 mm, 층고 6,000 mm의 1경간을 대칭성을 고려하여 4,000×3,000×200 mm (1/8)로 분

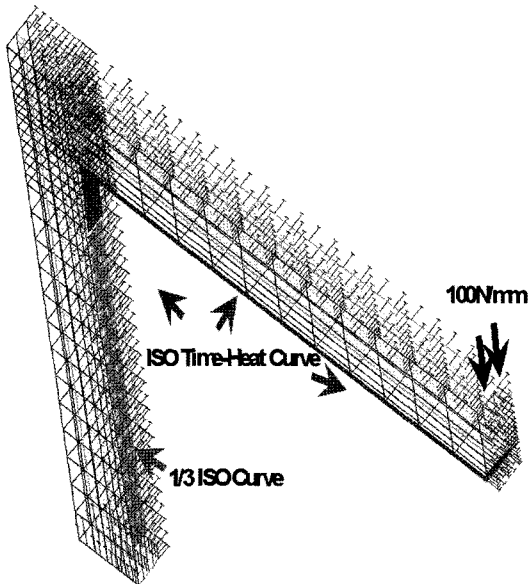


Fig. 13 FE mesh and modeling of RC frame

할하여 경계 조건을 부여하였다. 요소분할 (mesh)은 100×100 mm를 기준으로 화재에 직접 노출되는 부분을 세분하였다. 요소는 콘크리트의 경우 3D solid 요소 (CHX60), 철근의 경우 DIANA의 “embedded reinforcements”를 적용하였으며, 온도 하중을 고려하기 위하여 경계면은 가상의 요소 (BQ4HT)로 모델링하였다. 해석에 사용된 재료 모델은 각각 Drucker-Prager ($c = 8.08, \sin\phi = 0.5, \sin\psi = 0.5$)와 Von Mises 항복 조건을 만족하는 계수를 결정하여 적용하였으며 역학적 특성은 Table 4와 같다. 또한, 콘크리트와 철근의 온도에 따른 역학적 특성값은 Figs. 5 및 6의 계수를 이용하였으며, 콘크리트는 폭발이 발생하지 않는 것으로 가정하였다.

해석에 이용된 온도 이력은 Fig. 14와 같은 여러가지 시간-온도 관계 곡선 중에서 건축물의 온도 해석에 이용되

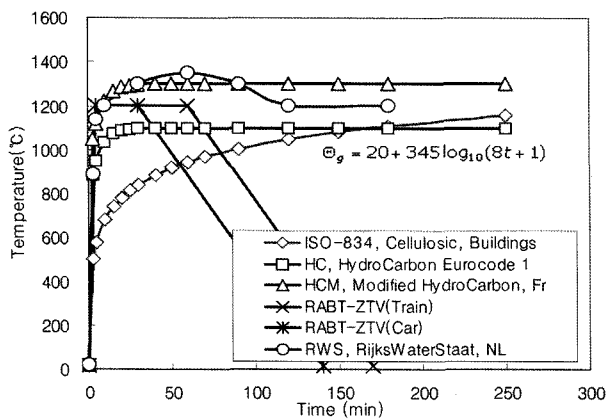


Fig. 14 Time-temperature curve (ISO-884, KSF 2257)

고 있는 ISO 834 (KS F 2257)를 이용하였다. 온도하중은 Fig. 13에 나타난 바와 같이 상부 및 접합부가 화재에 직접 노출되는 것으로 가정하여 온도 이력을 적용하고, 기둥의 나머지 부분은 도입 온도 이력의 1/3이, 측면은 1/10이 작용하는 것으로 가정하였다. 하중은 상부에서 100 N/mm (사무실 재하 하중 적용)가 작용하는 것으로 하였으며 모든 부재에 초기 온도 조건은 20°C로 가정하였다. 또한 해석 단계에서 수렴을 위한 반복 조건 (iteration method)은 수정 Newton-Raphson 방법을 이용하였다.

5.2 해석 결과 및 분석

5.2.1 비정상 온도 분포 해석결과

Figs. 15 및 16은 비정상 온도 분포 해석 결과에 대하여 온도 이력에 대한 골조 내 깊이별 온도 및 그 분포를 나타낸 것이다.

해석 결과 골조의 열전달 특성은 250분에 표면온도가 852°C에 이르는 것으로 나타났으며, 철근의 온도 (피복으로부터 50 mm)는 120분 (2시간) 후 251°C로써 콘크리트의 피복두께가 충분한 내화 성능을 발현하고 있음을 알 수 있었다. 그러나 화재가 지속되게 되면 180분에는 350°C, 250분에는 448°C까지 상승하는 것으로 나타났다.

1) 등가 열전달계수에 대한 비교 분석

철근콘크리트 골조 경계면의 온도 경계 조건에 대하여 대류 계수가 일정한 경우와 본 연구에서 제안한 등가 대류계수를 적용하는 경우 (Fig. 4)를 비교 분석하여 Fig. 17에 나타내었다. 그림으로 부터 가열 후 초기(~50분)에는 대류 계수에 의한 콘크리트의 온도 특성이 큰 차이를 보이고 있지 않지만, 시간이 경과 (50분 이후)하면서 등가 대류 계수를 적용하는 경우가 큰 온도 특성을 보이고 있

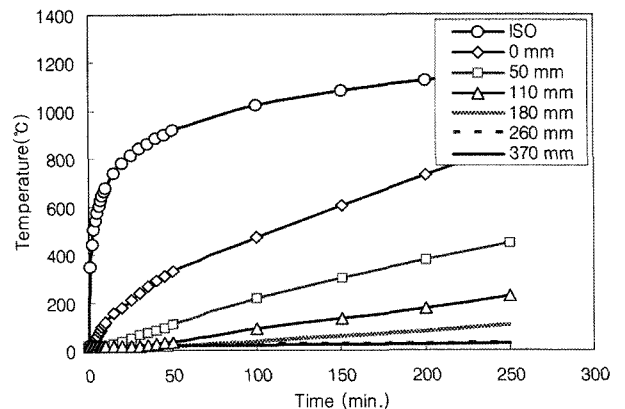


Fig. 15 Temperature evolution through the frame thickness

Table 4 Material properties for concrete used in analysis

Objects	E_c (GPa)	f_c (MPa)	f_t (MPa)	Expansion coef.	Time dependence
Concrete	28	25	2.2	1.2E-5	Fig. 5
Reinforcement	210	400	400	1.2E-5	Fig. 6

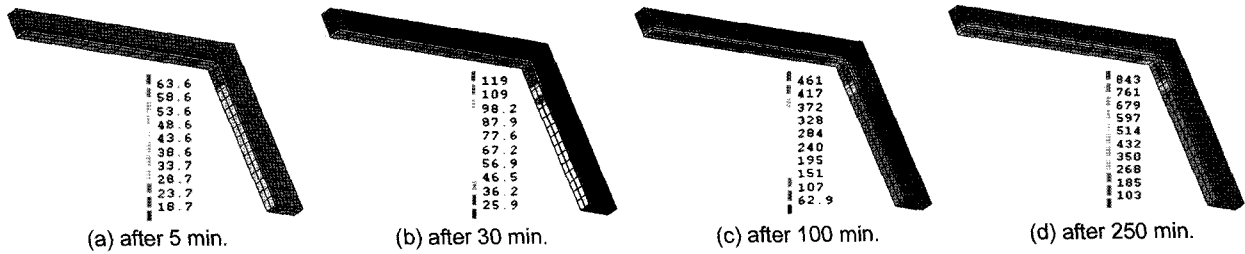


Fig. 16 Contour plot of temperature values (time steps 5, 30, 100, 250 min after)

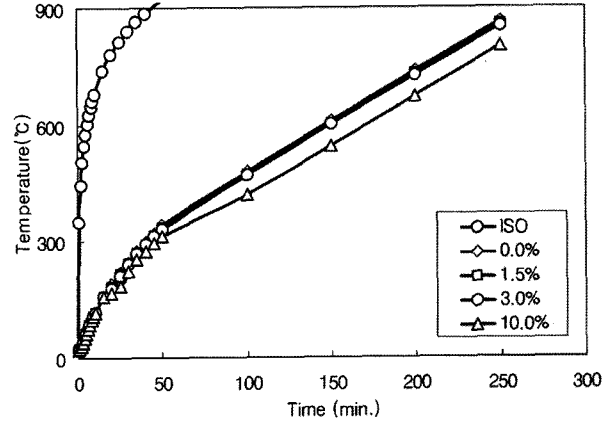
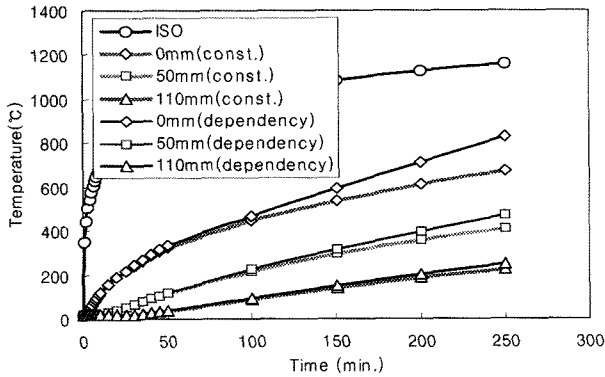


Fig. 17 Comparison to convection coefficients

음을 알 수 있었다. 특히 250분에는 676°C와 859°C (등가 대류계수 적용)로써 27% 이상의 온도상승이 예측되었다. 전술한 바와 같이 등가 대류 계수는 열의 대류 특성과 복사 특성 및 온도의존성을 고려한 것으로, 보다 실제 상황을 근접하게 구현하고 있다고 판단할 수 있으므로, 구조물의 열 해석 시 기존의 일정 대류 계수를 적용하는 경우 실제 온도를 과소평가할 가능성이 있을 것으로 판단되었다.

2) 콘크리트 함수율

Fig. 18은 콘크리트 내에 포함되어 있는 수분량 (함수율, Fig. 2)에 따른 온도 해석 결과를 나타낸 것이다. 그림으로부터 콘크리트 내의 함수율이 클수록 온도상승 구배는 완만한 것으로 나타났다. 특히 Fig. 18(b)에서 함수율이 10%인 경우 온도 115°C부분에서 잠열에 의한 열용량의 급격한 변화로 인하여 온도구배가 매우 완만한 것을 확인할 수 있었다. 그러므로 구조물의 열 해석 시에는 콘크리트 내부의 함수율에 대한 적절한 평가를 통하여 보다 정확한 해석이 가능할 것으로 판단되었다.

3) 열전도율 및 열용량의 온도시간의존성 특성 비교 콘크리트의 열전도율 및 열용량의 온도시간의존성 유·

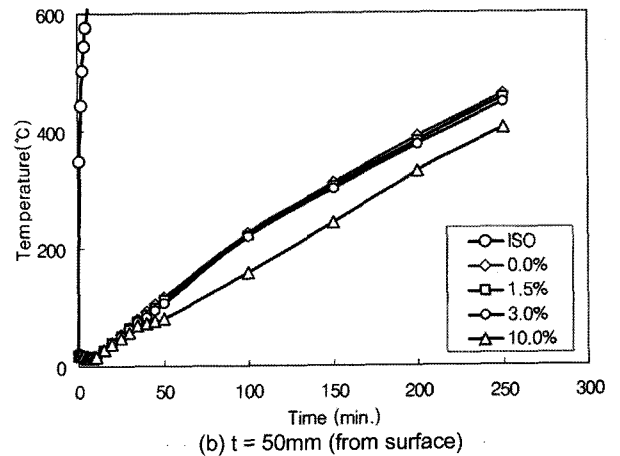


Fig. 18 Comparison to moisture content of concrete

무에 대한 분석을 위하여 Table 5와 같이 열전도율 및 열용량이 일정한 경우 (I), 각각이 온도의존성을 갖는 경우 (II, III) 그리고 모두 온도의존성을 갖는 경우 (IV) 총 4가지에 대하여 해석을 실시하였다. 해석 조건은 모든 경우에 대하여 콘크리트 함수율 3%와 등가 대류 계수를 적용하였다. Fig. 19에 콘크리트 표면 및 50 mm 깊이의 온도에 대한 해석 결과를 나타내었다. 콘크리트 표면은 Fig. 19(a)와 같이 열전도율 및 열용량의 온도시간의존성 유무에

Table 5 Time dependency of thermal characteristics

Case no.	Thermal conductivity (J/min mm°C)	Thermal capacity (J/mm ³ °C)	Note
I	Const.(6.33E-1)	Const. (2.07E-3)	Consider to equivalent convection coefficients moisture content by weight u =3.0%
II	Time dependency	Const. (2.07E-3)	
III	Const.(6.33E-1)	Time dependency	
IV	Time dependency	Time dependency	

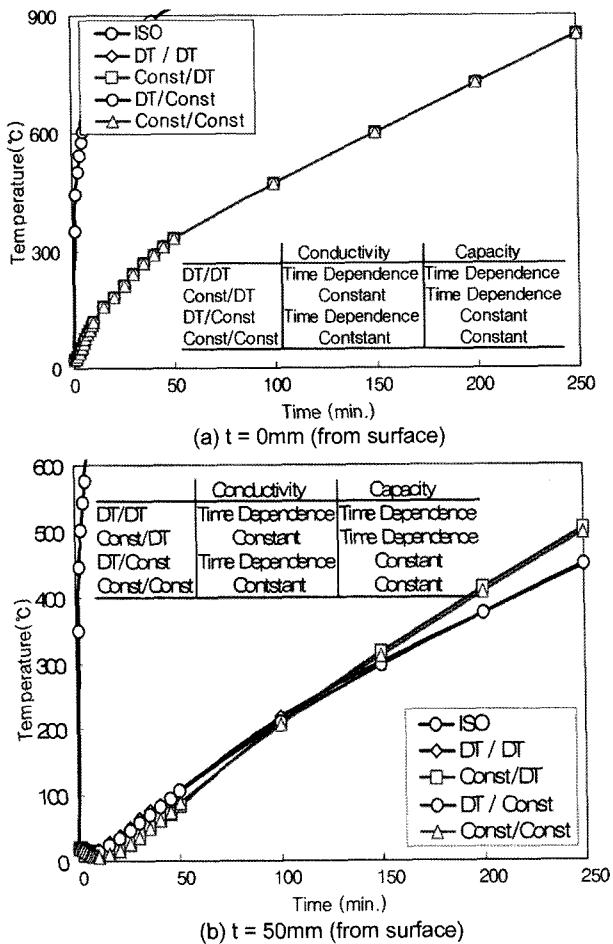


Fig. 19 Comparison to time dependency of thermal characteristics in concrete

관계없이 유사한 값을 나타내었다. 그러나 50 mm 깊이의 온도에 대한 해석 결과 (Fig. 15(b))에서는 상이한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 먼저 온도 포락선 특성에 있어서는 I, III과 II, IV가 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다. 또한 초기에는 해석 II, IV의 온도 구배가 I, II의 경우보다 높지만 약 100분 이후 부터는 이와는 반대의 현상을 관찰 할 수 있었다. 이를 통하여 열전도율 및 열용량에 대한 온도의존성을 고려하여 열해석 및 평가를 하는 경우 초기 상태에서 화재로 인한 부재 내부의 온도 분포를 보다 안정적으로 평가할 수 있을 것으로 판단되었다.

5.2.2 비선형 FEA 결과

Figs. 20 및 21은 대상 골조의 비선형 FEA 결과 및 온도 이력 지속 시간에 따른 중앙부 처짐을 나타낸 것이다. Fig. 20(a) 및 (b)로부터, 대상 골조는 일정 하중 (중앙부 100 N/mm) 작용 시에도 부재 내의 온도구배 상승에 따른 중앙부 처짐이 증가하는 것을 알 수 있으며, 이때의 온도에 의한 주응력 (Fig. 20(c))은 우각부 모서리에서 가장 크게 나타나고 있었다. 대상 골조의 보의 중앙부 처짐을 분석해 보면 (Fig. 21) 온도 하중을 고려하지 않은 상태에서의 비선형 해석 결과 (5.18 mm)에 비하여, 온도하중을 고려하는 경우 지속 시간 100분시 32.8 mm, 200분시 62.2 mm, 250분시 74.1 mm로써 각각 7.1배, 12.0배, 14.3 배 증가하는 것으로 나타나 화재가 발생하는 경우 중앙부 처짐이 급격하게 증가하는 특성을 잘 나타내고 있었다. 또한, 규준에 의한 골조 하부 비구조 부재의 피해 한계 처짐 (partition damage, $L/1,000$) 및 사용성 한계상태 (serviceability limit, $L/480$)에 대한 비교에서는 화재 발생 이후 각각 13분, 50분에 이러한 처짐을 초과하는 것으로 나타나 철근콘크리트 구조체가 장시간 화재에 노출되는 경우 구조물이 심각한 붕괴 상태에 도달할 가능성도 있는 것으로 분석되었다.

6. 결 론

화재 등의 고온 환경에서 철근콘크리트 구조물의 열적

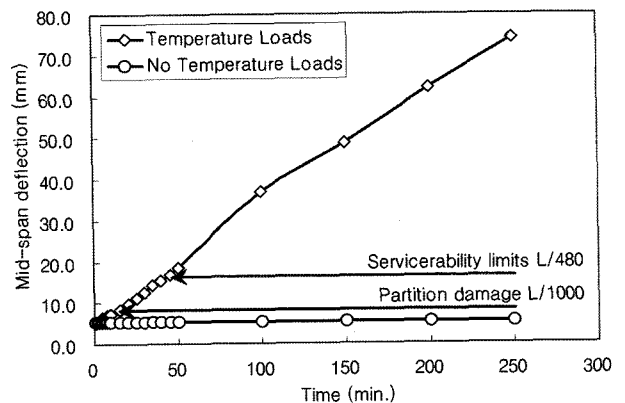


Fig. 21 Comparison to mid-span deflection

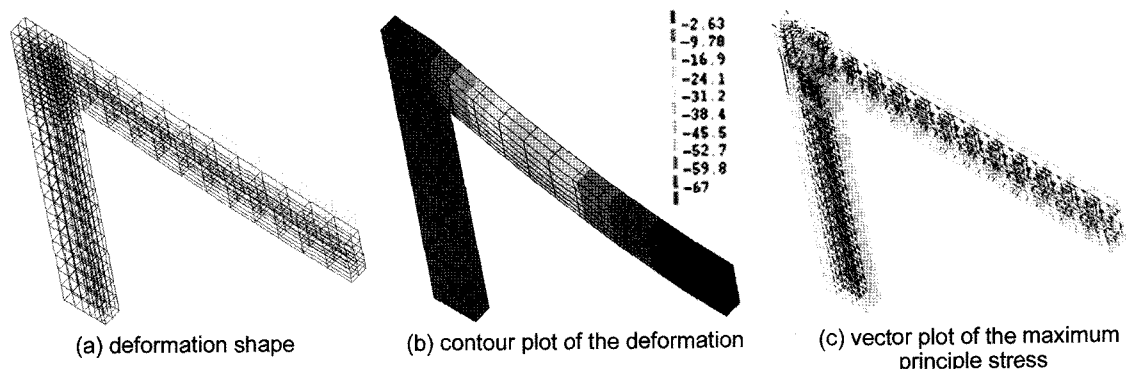


Fig. 20 Nonlinear FEA of RC frames (after 250 min)

특성 및 거동을 구명하기 위해 수행된 비정상 온도 분포 해석 및 비선형 FEA를 통하여 다음 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구에서 수행된 고온 환경하의 철근콘크리트 구조물에 대한 비정상 온도 분포 해석 및 비선형 FEA 해석 기법은 온도에 따른 재료의 열적, 역학적 성능 및 화재-온도 곡선을 자유롭게 고려할 수 있으며, 추후 관련 해석에 용이하게 사용될 수 있을 것으로 판단되었다.
- 2) 본 연구에서 제안한 등가 대류 계수는 열의 대류 특성과 복사 특성 및 온도의존성을 고려한 것으로, 화재에 의한 철근콘크리트 구조 부재의 열전달 특성을 보다 실제 상황에 근접하게 구현할 수 있을 것으로 판단되었다.
- 3) 해석을 통하여 콘크리트 내에 포함된 수분이 온도 상승 구배를 완화시키는 것을 확인할 수 있었으며, 이를 통하여 구조물의 열 해석 시 함수율에 대한 적절한 평가를 통하여 보다 정확한 화재의 구현이 가능할 것으로 판단되었다.
- 4) 콘크리트의 열전도율 및 열용량에 대한 온도의존성을 고려함으로써 열 해석 시 초기 상태에서 화재로 인한 부재 내부의 온도 분포를 보다 안정적으로 평가할 수 있을 것으로 판단되었다.
- 5) 온도 하중을 고려한 비선형 FEA 해석 결과 철근콘크리트 골조 내 보의 중앙부 처짐은 사용 한계상태를 규정 내화 시간 내에 초과하게 되며, 철근콘크리트 구조체가 장시간 화재에 노출되는 경우 구조물이 심각한 붕괴 상태에 도달할 가능성도 있는 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 (R01-2004-000-10348-0)지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 강석원, 홍성걸, “고온에서의 콘크리트 재료모델과 콘크리트부재의 열거동 해석”, 콘크리트학회 논문집, 13권 3호, 2001, pp.275~286.
2. 한상훈, 이상호, “고온을 받는 철근콘크리트 보 및 기둥 부재의 강도저하에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 논문집, 20권, 7호, 2004, pp.3~12.
3. Harmathy, T.Z. *Fire Safety Design and Concrete*, Lingman Scientific & Technical, 1993.
4. 日本コンクリート工學協會, 콘크리트構造物に火災安全性研究委員會報告書, 2002.6, pp.95~96.
5. Eurocode2, *Design of Concrete Structures Part 1, 2 General Rules-Structural Fire Design*, DO ENV 1992, 1996.
6. Khan, A. A., Cook, W. D., and Mitchell, D., “Thermal Properties and Transient Thermal Analysis of Structural Members During Hydration”, *ACI Materials Journal*, Vol. No. 1998, pp.293~302.
7. CEB Bulletin D' Information No. 208(RILEM-Committee 44-PHT), “Fire Designing of Concrete Structures”, 1991.
8. Eurocode4, “Design of composite steel and concrete structures Part 1,2”, *Structural Fire Design*, CEN/TC250/SC4, N39, prENV 1994-1-2, Second Draft, 1992.
9. U. Schneider. et al, “Concrete at High Temperatures-A General Review”, *Fire Safety Journal*, Vol.1, No.1, 1987, pp.55~68.

요 약 본 연구는 화재에 노출된 철근콘크리트 구조물의 열적 특성 및 구조 거동을 예측할 수 있는 비정상 온도 분포 해석 및 비선형 유한요소해석 기법 개발에 관한 것으로서, 범용 유한요소해석 프로그램인 DIANA를 이용하여 화재에 의한 고온을 받는 철근콘크리트 구조에 대한 수치해석을 수행하고 그 결과를 비교분석하였다. 고온을 받는 철근콘크리트 골조에 대한 수치해석은 시간의존 비정상 온도 분포 해석과 비선형 유한요소해석의 2단계로 진행된다. 비정상 온도 분포 해석에서는 열전도율, 열용량, 열팽창계수에 대한 시간의존 변수를 온도 함수로 표현하여 이를 고려하였으며, 비선형 유한요소해석에 있어서는 콘크리트의 비선형성과 균열을 고려하기 위하여 파괴 역학적 관점을 도입하였다. 또한 철근콘크리트 단순보에 대한 내화 실험을 실시하여, 재료의 열적 특성 및 해석 기법에 대한 검증을 실시하였다. 이러한 해석 기법을 철근콘크리트 골조로 확장하여 열에 의한 콘크리트 및 철근의 역학적 물성 변화 요인을 고려한 해석을 통하여 각각의 변수에 대한 비교 분석을 수행하였다. 본 연구에서의 고온 환경하의 철근콘크리트 구조물에 대한 비선형 유한요소해석기법은 온도에 따른 재료의 열적 특성 및 역학적 성능 및 화재-온도 곡선을 자유롭게 입력하여 고려할 수 있으며, 추후 관련 해석에 용이하게 사용될 수 있을 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 철근콘크리트 골조, 화재 효과, 비정상 열전달 해석, 비선형 유한요소해석, DIANA