

화해를 입은 철근콘크리트 기둥의 구조성능 저하

Deterioration of Structural Capacity of Fire-Damaged Reinforced Concrete Column

이 차 돈* 신 영 수** 홍 성 곁*** 이 승 환****
Lee, Chadon Shin, Yeong Soo Hong Sung Gul Lee Seung Whan

ABSTRACT

The degree of changes in mechanical properties of fire-damaged reinforced concrete column depends mostly on sectional geometry, duration exposed to fire, and moisture containment. In order to reasonably assess the deterioration of structural capacity of fire-damaged reinforced concrete column, it is necessary to develop a theoretical model predicting column behavior based on nonlinear heat transfer equation in addition to the traditional mechanics. This research focuses on the development of theoretical model to predict moment-curvature relations of fire-damaged reinforced column. The model is used for the assessment of structural capacity of fire-damaged column in terms of moment-curvature relations and PM interaction curves.

1. 서론

철근콘크리트기둥이 화해를 입는 경우, 단면을 구성하는 콘크리트와 철근의 물성이 변하게 되며 이에 따라 기둥의 단면성능도 변하게 된다¹⁻³⁾. 화해를 입은 철근콘크리트의 기둥의 역학적 거동은 구성 콘크리트강도, 철근강도, 피복두께와 철근의 배근형상 등과 관련한 기둥의 기하학적 형상, 화해를 입은 시간, 함수율, 기둥 단부의 구속조건 등에 따라 영향을 받는다²⁻⁵⁾. 일반적으로 건축물에 화재가 발생할 경우, 1시간에서 2시간, 길게는 3시간까지도 화재가 지속된다. 따라서 화해를 입은 철근콘크리트 기둥에 대한 실험과 이론연구를 통하여 화해를 입은 기둥의 거동을 규명하고 잔존강도를 예측하며 이에 대한 보강법을 제시하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 화해를 입은 기둥의 잔존강도를 예측하기 위한 이론모델을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 기존에 발표된 열전달식의 수치해석적 모델 및 콘크리트와 철근의 잔존강도 모델식을 적용하여 기둥 단면의 모멘트-곡률을 추적할 수 있는 수치해석적 모델을 개발하였다. 개발된 모델을 이용하여 본 연구에서 설정한 표준기둥단면의 화해 정도에 따른 모멘트-곡률의 변화 및 기둥의 P-M 상관도에 미치는 영향을 정량적으로 고찰하고자 하였다.

2. 기둥 휨-곡률 모델 개발

본 절에서는 기둥 단면의 모멘트-곡률 관계를 추적할 수 있는 수치해석 모델 개발에 대하여 기술하였다.

*정회원, 중앙대학교 건축공학과 교수

**정회원, 이화여자대학교 건축학과 교수

***정회원, 서울대학교 건축학과 교수

****정회원, 중앙대학교 건축공학과 석사과정

2.1 열전달식의 수치해석 모델

화해를 입은 기둥 단면 내의 온도변화는 아래와 같은 비선형 열전달 식에 의하여 결정된다.

$$\frac{\partial^2(kT)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(kT)}{\partial y^2} = \rho c \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1)$$

여기서, k : 콘크리트의 열전도율, T : 콘크리트 온도 (°C), τ : 시간, ρ , c : 밀도 및 열용량

상기의 비선형 열전달식은 가상의 다이아몬드형 격자로 나뉜 기둥 단면에 대하여 유한차분법을 적용한 T.T.Lie²⁾의 식을 아래와 같이 사각형 격자로 나뉜 기둥 단면에 대한 유한차분법으로 수정하였다. 본 연구에서 수정, 제시한 수치해석모델은 사각형 격자의 4개의 절점에서 온도를 측정한다.

$$T_{m,n}^{j+1} = T_{m,n}^j + \frac{\Delta \tau}{[(\rho_c c_c)_{m,n}^j + \rho_w c_w \phi_{m,n}^j](\Delta \xi)^2} \left\{ \left(\frac{k_{m-1,n}^j + k_{m,n}^j}{2} \right) (T_{m-1,n}^j - T_{m,n}^j) \right. \\ \left. + \left(\frac{k_{m+1,n}^j + k_{m,n}^j}{2} \right) (T_{m+1,n}^j - T_{m,n}^j) + \left(\frac{k_{m,n+1}^j + k_{m,n}^j}{2} \right) (T_{m,n+1}^j - T_{m,n}^j) + \left(\frac{k_{m,n-1}^j + k_{m,n}^j}{2} \right) (T_{m,n-1}^j - T_{m,n}^j) \right\} \quad (2)$$

여기서, ρ_c , c_c : 비선형 콘크리트 밀도 및 열용량, $k_{m,n}^j, T_{m,n}^j = j$ -time step에서의 (m,n) 절점의 콘크리트 열전도율과 온도

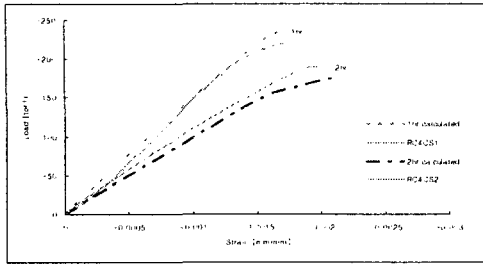
2.2 모멘트-곡률 모델

기둥의 모멘트-곡률 모델은 단면에 일정한 축하중이 가하여질 경우에 다음과 같은 알고리즘을 적용하여 모멘트-곡률 관계를 산정하였다.

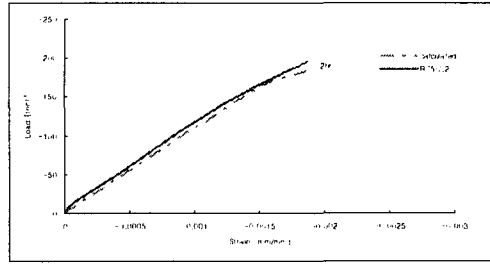
1) 축하중(P) 및 곡률의 증가분($d\phi$)을 입력한다. 2) 초기 곡률을 영(0)으로 한다 ($\phi = 0$). 3) 곡률(ϕ)이 최종 곡률에 이르기까지 다음을 반복한다: (3.1) 곡률을 증가시킨다 ($\phi = \phi + d\phi$); (3.2)

$P = \sum P_{i,j}$ 조건이 만족되도록 기둥 중심부의 변형률(ϵ_c)을 bisection 법에 기초하여 수치해석적으로 조절한다. 여기서, $P_{i,j}$ = 철근을 포함한 기둥 단면의 cell ij에서의 축력 및 모멘트이다; (3.3) 만일 상기의 조건이 만족되면 곡률과 모멘트를 프린트하고 (3.1) 단계로부터 반복 계산한다. 기둥 단면의 온도분포는 유한차분법에 따라 단면의 가상 절점에 대하여 구하게 된다. 그러나 cell의 크기가 클 경우에 셀의 절점에서의 온도차이가 크게 날 수 있으므로 이에 대한 보정이 필요하다. 따라서 단면내부 특정 cell 내부의 온도분포는 Gaussian Integration의 integration points를 이용하여 산정하였다. 주어진 기둥 중심에서의 변형률과 곡률에 근거하여 단면의 변형률을 산정한 후 각 cell의 축력과 모멘트를 합산하여 단면 전체의 축하중과 모멘트 내력을 산정하였다. 화해를 입은 콘크리트 및 철근의 응력-변형률 모델은 T.T.Lie에 의하여 제시된 모델을 적용하였다²⁾.

그림 1은 본 연구에서 실물크기 철근콘크리트 기둥을 가열실험 한 후의 잔존축강도 실험 결과를 본 연구에서 개발한 이론모델 예측치와의 비교를 나타낸다. 개발된 모델은 실험치를 잘 예측함을 알 수 있다.



(a) 피복두께 40mm, 1시간 및 2시간 가열



(b) 피복두께 50mm, 2시간 가열

그림 1. 이론모델 예측치와 실험치와의 단순축하중-축변형률 비교 ($f_{ck} = 250\text{kgf/cm}^2$, $\rho = 0.0063$)

3. 화재 정도에 따른 구조성능 저하

3.1 모멘트-곡률

본 절에서는 2절에서 개발한 모델을 이용하여 화재 정도에 따른 기둥의 휨-곡률 변화와 P-M 상관도의 변화를 이론적으로 고찰하고자 하였다. 기둥은 ISO⁶⁾에서 제시한 가열곡선에 따라 일정시간 가열된 것으로 하였다.

그림 2는 화해를 입은 기둥단면의 잔존 모멘트-곡률 및 P-M 상관도의 변화를 고찰하기 위하여 선정된 기준단면을 나타낸다. 사용된 콘크리트의 강도는 $f_{ck} = 300\text{kgf/cm}^2$ 이며 철근의 항복강도는 $f_y = 4,000\text{kgf/cm}^2$ 이다. 그림 3은 표준기둥이 화해를 받지 않은 경우 ($T = 20^\circ\text{C}$), 30분 동안 화해를 받은 경우, 1시간 동안 화해를 받은 경우, 그리고 2시간 동안 화해를 받은 경우의 피복두께(40mm 및 50mm)에 따른 모멘트-곡률 관계를 나타낸다.

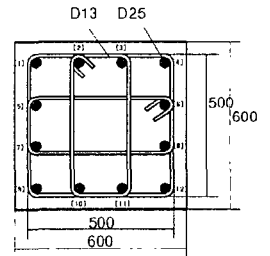


그림 2. 기준 기둥 단면도

화해를 장시간 받은 기둥일수록 1) 휨강성이 저하되며, 2) 최대휨내력이 감소하는 현상을 나타내고 있다. 2시간 화해를 입은 기둥의 경우, 항복 시의 강도는 화해를 입지 않은 기둥에 대하여 거의 반 정도의 내력만을 확보하는 것으로 나타났다. 그러나 피복두께의 차이는 모멘트-곡률 관계에 큰 영향을 미치지 않음이 고찰되었다. 일반적으로 콘크리트 재료 자체는 화해를 장시간 받아 높은 온도에 노출될수록, 강도저하를 나타내나 재료물성은 연성적으로 변화하게 된다. 철근의 경우, 화재 정도에 관계없이 연성은 유지된다. 그림 3에 의하면 철근콘크리트 기둥의 경우, 이러한 재료 물성의 변화로 인하여 화재에 장시간 노출되어 기둥 단면의 내부 온도가 많이 올라간 경우에도 연성이 유지됨을 살펴볼 수 있다.

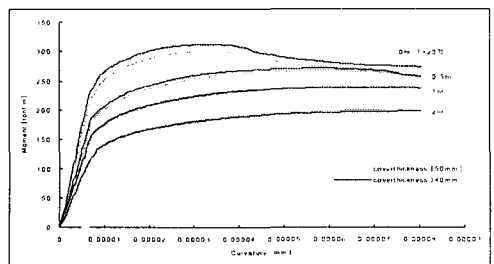


그림 3. 피복두께 및 화재정도에 따른 모멘트-곡률의 변화

3.2 P-M 상관도

그림 4(a)는 $f_{ck} = 300\text{kgf/cm}^2$, $\rho = 0.04$, $\gamma = 0.8$ 이고 정방형 기둥의 단면적 크기가 $A_o = 25 \times 25\text{cm}^2$ 및 이의 4배, 9배인 정방형 기둥 단면에 대한 P-M 상관도를 나타내고 있다. 전반적으로 모든 기둥단면에 대하여 가열시간이 클수록 조합잔존내력($\sqrt{P^2 + M^2}$)은 감소함을 볼 수 있다. 그림 4(b)에 의하면 특히 작은 단면일수록 그 감소율이 증가함을 볼 수 있다. 2시간 화해를 입은

경우, $9 \times A_o$ 크기의 단면을 갖는 기둥은 75.3%의 조합잔존내력을 유지하는 반면 A_o 단면의 기둥은 31.9% 정도의 조합잔존내력만을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

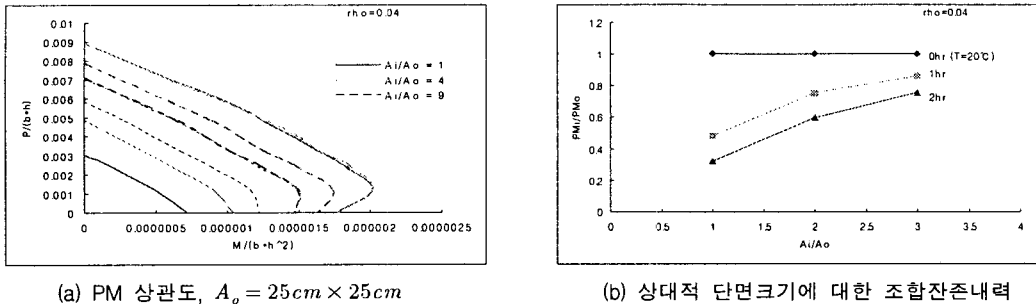


그림 4 화재정도에 따른 P-M 상관도

3. 결론

- (1) 개발된 모델의 예측치와 실험치는 잘 일치하였다.
- (2) 화해를 장시간 받은 기둥일수록 휨강성이 저하되며, 최대 휨내력이 감소하는 현상이 나타났으며 화해가 기둥의 연성을 감소시키지는 않았다.
- (3) 2시간 정도의 장시간 화해를 입은 기둥의 경우, 기둥의 휨항복강도는 화해를 입지 않은 기둥에 대하여 거의 반 정도의 내력만을 확보하였다.
- (4) 피복두께의 차이는 모멘트-곡률 관계에 큰 영향을 미치지 않았다.
- (5) 2시간 화해를 입은 경우, $75 \times 75\text{cm}^2$ (또는 $9 \times A_o$) 크기의 단면을 갖는 기둥은 75.3%의 조합잔존내력을 유지하는 반면 $25 \times 25\text{cm}^2$ (또는 A_o) 크기의 단면을 갖는 기둥은 31.9% 정도의 조합잔존내력만을 확보하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설기술연구원에서 위탁시행 한 건설기술연구개발사업 「화재피해를 입은 고강도 및 일반강도 철근콘크리트 부재의 구조적 성능규명 및 보수」에 관한 산·학·연 공동개발사업으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다. [과제번호 : R&D/2001-제안 E-04]

참고 문헌

1. N. G. Zoldners, "Effect of High Temperature on Concrete Incorporating Different Aggregate", ASTM, Material Journal, Vol.889, No.1, pp.47-53, 1990.
2. Lie, T. T., Lin, T. D., Allen, D. E., and Abrams, M. S., "Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns," National Research Council Canada Division of Building Research, 1984.
3. "화재피해를 입은 고강도 및 일반강도 철근콘크리트 부재의 구조적 성능 규명 및 보수", 건설교통부, 한국건설기술연구원, 2003.3월.
4. T. D. Lin., R. I. Zwiern., R. G. Burg., T. T. Lie. and R. J. McGrath., "Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns," PCA Research and Development Bulletin RD101B, Portland Cement Association, 1992.
5. N. Yamazaki, M. Yamazaki, M., Mochida, T., Mutoh, A., Miyashita, T., Ueda, M., Hasegawa, T., Sugiyama, T., Hirakawa, K., Kikuchi, R., Hiramoto, M., Saito, K., "Structural Behavior of Reinforced Concrete Structures at High Temperatures," Nuclear Engineering and Design, Vol.156, 1995, pp.121~138.
6. Draft International Standard ISO/FDIS 834-1 :1999(E).