

# 고온에 노출된 철근콘크리트 기둥의 거동 해석

## Analysis of RC Columns under High Temperature

이 지 응\*      홍 성 곁\*\*  
Lee, Ji-Woong      Hong, Sung-Gul

### ABSTRACT

This paper presents the behaviors of reinforced concrete columns under high temperature. When columns are exposed high temperature, temperature distribution of a section becomes nonlinear and it is calculated by using finite difference method(F.D.M.). The interaction curves show the strength of columns at various exposure times. The strength of columns decreases according to the increase of the exposure time and the decrease of concrete cover.

### 1. 서론

산업화·도시화에 따른 건축물의 밀집과 고층화의 환경에서 화재 재해 발생은 인명피해 및 재산 피해에 치명적인 결과를 가져올 수 있다. 화재 발생을 사전에 억제하는 방재 연구와 더불어 화재발생 후 화재의 원인조사와 구조물의 재사용 여부 또는 보강 필요성, 자산의 평가의 과학적인 근거를 위해 신뢰성 있는 안전성 평가에 대한 연구가 필요하다.

콘크리트 부재가 화재 등으로 인해 고온에 노출될 경우 부재는 부분적 혹은 전체적인 열손상을 받게 된다. 재료의 역학적 특성의 변화에 대한 연구와 주위 대기의 대류 및 부재 내에서의 열전도를 고려한 열전달에 대한 열역학적인 이해를 토대로 부재의 온도분포 정보를 얻는다. 그리고 얻어진 온도분포를 이용하여 구조시스템의 일부와 전체 구조 시스템의 응력을 추정할 수 있으며 화재발생 후 구조물의 내화성능, 붕괴 가능성 등을 평가할 수 있다.

본 연구에서는 고온에 노출된 철근콘크리트 기둥이 시간이 경과함에 따라 갖게 되는 온도분포와 그에 따른 기둥의 거동을 산정하고자 한다.

### 2. 온도 분포 해석

#### 2.1. 유한차분법

고온에 노출된 경우 기둥 단면 내의 온도는 비선형으로 분포하게 된다. 이러한 비선형의 온도 분포를 T. T. Lie가 제안한 유한차분법을 이용하여 시간에 따라 산정하였다.

\* 정회원, 서울대학교 건축학과 대학원

\*\* 정회원, 서울대학교 건축학과 교수

### 2.1.1. 단면 내부

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

### 2.2.2. 경계면

$$T_{1,n}^{j+1} = T_{1,n}^j + \frac{2\Delta\tau}{[(\rho_c c_c)_{1,n} + \rho_w c_w \phi_{1,n}^j] (\Delta\xi)^2} \left\{ \left( \frac{k_{2,(n-1)}^j + k_{1,n}^j}{2} \right) (T_{2,(n-1)}^j - T_{1,n}^j) + \left( \frac{k_{2,(n+1)}^j + k_{1,n}^j}{2} \right) (T_{2,(n+1)}^j - T_{1,n}^j) \right\} + \sqrt{2}\Delta\xi\sigma\epsilon\epsilon_c [(T_{1,n}^j + 273)^4 - (T_{2,(n-1)}^j + 273)^4]$$

## 2.2 온도 분포 해석 결과

그림 1은 표준화재온도에 따라 가열한 실험체에서 측정된 온도와 해석한 온도를 비교한 것이다. 가열 초기에는 절 맞으나 100℃ 근처에서 차이를 보이기 시작하는데, 이는 실험체 제작 시점과 실험 시작 시점 사이의 간격이 좁아서 콘크리트 내의 함수율이 높았기 때문일 것으로 추측된다. 이 점을 제외한 나머지 온도 변화는 전반적으로 잘 예측할 수 있다고 판단된다. 그림 2와 그림 3은 각각 가열 후 1시간과 3시간이 경과한 후의 단면의 온도 분포이다.

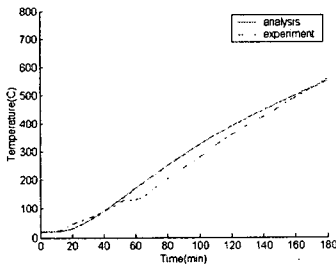


그림 1 해석온도와 실험온도

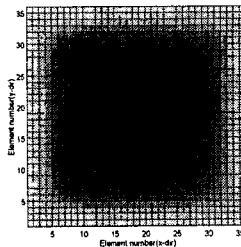


그림 2 온도 분포(1시간 경과)

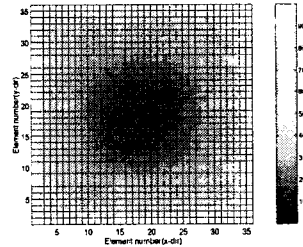
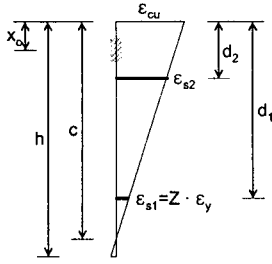


그림 3 온도 분포(3시간 경과)

## 3. P-M 상관도

### 3.1. 개요

압축축의 최대 변형율을  $\epsilon_{cu}$ 로 고정시켜 두고, 인장 철근의 변형율을 변화시킨다(아래 식에서  $Z$ 를 변화시킨다). 각각의 변형율에 대해서 단면에 발생하는 축력과 모멘트를 계산하여 도시함으로써 P-M 상관도를 구할 수 있다.



$$c = \left( \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} - Z\epsilon_y} \right) d_1 \quad \epsilon_{si} = \left( \frac{c - d_i}{c} \right) \epsilon_{cu}$$

$$f_{si} = \epsilon_{si} E_s (T_{si}) \quad \text{단, } (-f_y \leq f_{si} \leq f_y)$$

$$C_c = \sum_{i=1}^{n_c} 0.85 f_c'(T_i) dA \quad (n_c : \text{압축영역에 해당하는 요소의 개수})$$

$$F_{si} = (f_{si} - 0.85 f_c'(T_{si})) A_{si}$$

$$P = C_c + \sum F_{si}$$

$$M = \sum_{i=1}^{n_c} 0.85 f_c'(T_i) dA \left( \frac{h}{2} - x_c \right) + \sum F_{si} \left( \frac{h}{2} - d_i \right)$$

### 3.1. 재료 특성

그림 4와 그림 5는 콘크리트와 철근의 온도에 따른 응력-변형률 관계이다. 철근은 항복할 때의 변형률이 일정한 반면, 콘크리트는 온도가 높아짐에 따라 연성이 증가해서 최대 변형률이 증가한다. P-M 상관도를 그리는데 있어서 이러한 최대 변형률의 증가를 고려해 주어야 한다. 그림 6은 단면 전체에 균일한 변형이 발생한다는 가정 하에서 구한 평균 응력과 변형률의 관계를 나타낸 것으로, 여기서 얻어지는 최대 변형률을 P-M 상관도에 이용하였다.

$$\sigma_{section} = \frac{\sum_1^n \sigma_c(T_i, \epsilon_{section}) dA}{A} \quad \epsilon_{cu,t} = \epsilon_{max,t} \left( \frac{\epsilon_{cu,0}}{\epsilon_{max,0}} \right)$$

$\epsilon_{max,t}$ 는 시각 t에서 단면에 최대 응력이 발생할 때의 변형률이며,  $\epsilon_{cu,0}$ 은 고온에 노출되지 않은 경우, 즉 상온(20°C)에서의 최대변형률 0.003이다.

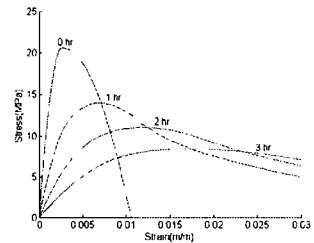
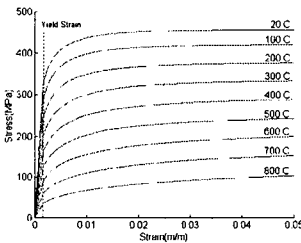
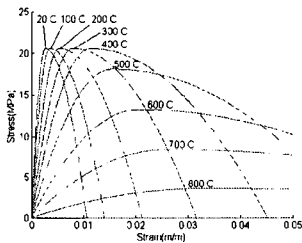


그림 5 콘크리트의 응력-변형률 관계    그림 6 철근의 응력-변형률 관계    그림 7 단면의 응력-변형률 관계

### 3.2. 결과

각각의 Z값에 대해서, 그리고 순수압축과 순수인장 상태에서 단면에 발생하는 축력과 모멘트의 크기는 표 1에 정리하였으며, P-M 상관도는 그림 8과 같다. 고온에 노출된 시간이 길어질수록 기둥의 강도, 특히 축인장강도가 저하된다. 또한 피복두께가 4cm인 경우가 5cm인 경우보다 강도의 저하가 더 크다.

표 1 인장철근의 변형률에 따른 단면의 축력과 모멘트

|           |     | Z                    | 순수압축   | 0      | -1     | -10     | -50     | 순수인장    |
|-----------|-----|----------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| 0시간<br>경과 | 4cm | P( $\times 10^6$ N)  | 2.4002 | 1.9404 | 1.1467 | -0.0202 | -0.3235 | -0.3699 |
|           |     | M( $\times 10^6$ Nm) | 0      | 0.0745 | 0.1355 | 0.0530  | 0.0112  | 0       |
|           | 5cm | P( $\times 10^6$ N)  | 2.4002 | 1.8792 | 1.1065 | -0.1136 | -0.3253 | -0.3699 |
|           |     | M( $\times 10^6$ Nm) | 0      | 0.0813 | 0.1360 | 0.0421  | 0.0110  | 0       |
| 1시간<br>경과 | 4cm | P( $\times 10^6$ N)  | 1.7807 | 1.5736 | 1.2145 | 0.4162  | -0.1605 | -0.1971 |
|           |     | M( $\times 10^6$ Nm) | 0      | 0.0416 | 0.0766 | 0.0734  | 0.0088  | 0       |
|           | 5cm | P( $\times 10^6$ N)  | 1.7544 | 1.5365 | 1.1695 | 0.3952  | -0.1991 | -0.2314 |
|           |     | M( $\times 10^6$ Nm) | 0      | 0.0495 | 0.0834 | 0.0757  | 0.0082  | 0       |
| 2시간<br>경과 | 4cm | P( $\times 10^6$ N)  | 1.2988 | 1.2141 | 1.0384 | 0.4293  | -0.0637 | -0.0880 |
|           |     | M( $\times 10^6$ Nm) | 0      | 0.0173 | 0.0355 | 0.0489  | 0.0050  | 0       |
|           | 5cm | P( $\times 10^6$ N)  | 1.2857 | 1.1843 | 0.9885 | 0.4017  | -0.1046 | -0.1200 |
|           |     | M( $\times 10^6$ Nm) | 0      | 0.0238 | 0.0429 | 0.0516  | 0.0044  | 0       |
| 3시간<br>경과 | 4cm | P( $\times 10^6$ N)  | 0.9360 | 0.9088 | 0.8379 | 0.4009  | 0.0053  | -0.0382 |
|           |     | M( $\times 10^6$ Nm) | 0      | 0.0065 | 0.0141 | 0.0309  | 0.0058  | 0       |
|           | 5cm | P( $\times 10^6$ N)  | 0.9315 | 0.8929 | 0.8014 | 0.3809  | -0.0376 | -0.0605 |
|           |     | M( $\times 10^6$ Nm) | 0      | 0.0103 | 0.0196 | 0.0331  | 0.0038  | 0       |

4. 결론

본 연구에서는 표준화재에 노출된 기둥의 온도 분포를 산정하고, 노출 시간에 따른 기둥의 강도 저하를 P-M 상관도를 통해 알아보았다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) T.T. Lie가 제안한 유한차분법을 이용하여 고온에 노출된 철근콘크리트 기둥 단면의 온도 분포를 예측할 수 있다.
- (2) 화재에 노출된 시간이 길어질수록 콘크리트의 강도는 저하된다. 3시간 동안 노출될 경우, 기둥의 강도는 중심축하중 강도의 경우 39.0%와 38.8%, 균형과괴시의 조합강도의 경우 73.8%와 74.64%, 축인장강도의 경우 10.3%와 16.4%로 저하된다.(강도 저감 비율은 피복두께 4cm, 5cm 순)
- (3) 화재에 노출되지 않은 경우, 피복두께의 차이는 기둥의 강도에 큰 크게 영향을 미치지 않는다. 그러나 화재에 노출되면 피복두께가 작은 경우 기둥의 강도가 보다 빨리 저하된다. 따라서 내화성능을 높이기 위해서는 어느 정도의 피복두께를 확보해야 한다.

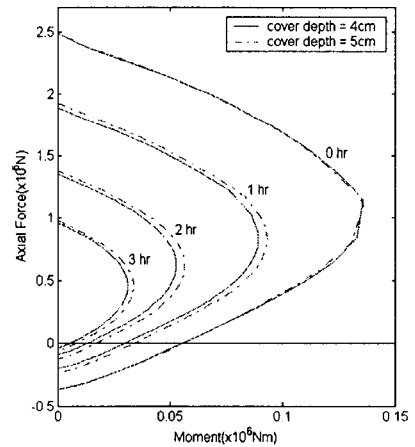


그림 8 P-M 상관도

따라서 내화성능을 높이기 위해서는 어느 정도의 피복두께를 확보해야 한다.

참고문헌

1. T. T. Lie, T. D. Lin, D. E. Allen, M. S. Abrams, "Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns", National Research Council Canada Division of Building Research, February 1984.
2. Andrew H. Buchanan, "Structural Design for Fire Safety", University of Canterbury, July 2000.