

P - Δ 영향을 고려한 화해를 입은 기둥의 거동

Structural Behavior of Fire-Damaged Reinforced Columns with P - Δ Effect

이차돈* 이창은*

Lee, Cha Don* Lee, Hang Eun*

ABSTRACT

The paper discusses the general behavior of fire-damaged slender reinforced concrete columns on the basis of results obtained from parametric studies. Effects of slenderness ratio, concrete strength, cover thickness, reinforcement ratios, exposed time to fire, and eccentricity on the ultimate capacity of fire-damaged column are theoretically observed. With the increase of slenderness ratio, similar tendency of relative strength reduction was observed between fire-damaged columns and columns at room temperature.

1. 서론

화해에 따른 철근콘크리트 기둥의 손상의 정도는 기둥의 콘크리트 강도, 철근의 강도 및 철근비, 단면의 크기, 피복두께, 가열 시간, 가열 시 축력의 크기 등의 영향을 받는다. 특히 기둥이 세장할 경우 P-Δ 영향으로 인하여 기둥의 내력은 더욱 감소하게 된다. 화해를 입은 단주에 대한 실험 및 이론 연구는 다양한 연구자들의 의하여 수행된 바 있으며 화해를 입지 않은 세장한 철근 콘크리트 기둥에 대한 연구도 꾸준히 발표되고 있다. 그러나 세장한 철근 콘크리트 기둥이 화해를 입은 경우에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 화해를 입은 세장한 철근 콘크리트 기둥에 대한 거동을 이론적으로 규명하기 위해서는 열전달식(heat transfer)에 대한 수치해석적인 모델과 이를 적용하여 P-Δ 영향을 함께 고려할 수 있는 모델이 필요하다. 본 연구에서는 화해를 입은 세장한 철근콘크리트 기둥의 구조적 거동에 대한 해석적 모델을 제시하였으며 이를 이용하여 화해를 입은 세장한 철근 콘크리트 기둥의 상대내력의 변화를 화해를 입지 않은 기둥의 상대내력과 이론적으로 비교하고자 하였다. 주요 변수로는 세장비, 콘크리트 강도, 피복두께, 철근비, 화해시간, 편심의 크기 등을 고려하였다.

2. 화해를 입은 세장한 기둥의 거동 해석 모델

2.1 단면 내 온도 추적

일반적으로 이차원에서의 비선형 열전달식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \bar{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1)$$

상기식은 유한차분법을 적용하여 다음과 같이 유도된다[5].

* 중앙대학교 건축공학과

$$T_{m,n}^{p+1} = T_{m,n}^p + \frac{\Delta\tau}{\rho_w c_w \phi_w} \left\{ \frac{1}{4(\Delta x)^2} [k_{x,m+1,n}^p \cdot T_{m+1,n}^p - 8k_{m,n}^p \cdot T_{m,n}^p + k_{x,m-1,n}^p \cdot T_{m-1,n}^p] \right. \\ \left. + \frac{1}{4(\Delta y)^2} [k_{y,m,n+1}^p \cdot T_{m,n+1}^p - 8k_{m,n}^p \cdot T_{m,n}^p + k_{y,m,n-1}^p \cdot T_{m,n-1}^p] \right\} \quad (2)$$

2.2 P-Δ 영향을 고려한 기둥 모델 해석

제한한 기둥의 구조적인 거동을 추적하기 위해 Newton-Raphson method을 기본으로 한 비선형 해석 방법을 사용하였다. 본 모델에서는 양단이 핀으로 구속된 기둥에 대해서 적용하였고, 기둥의 대칭성을 이용하여 기둥의 길이 반을 사용하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 기둥 길이의 반을 N_c 개의 요소로 분할하였다. 기둥은 편심 e 만큼 떨어진 곳에서 편심하중(P^k)과 하중단계 k 가 증가함에 따라 단부 모멘트($P^k \cdot e$)를 받고 있다.

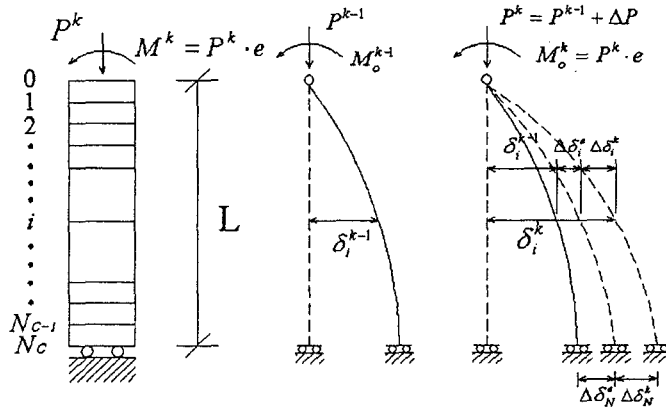


Fig. 1 Column analysis including the P-Δ effect

하중단계 k 에서 i 번째 단면의 초기 모멘트는 다음과 같이 계산된다.

$$M_{i,o}^k = P^k \times e + P^k \times \delta_{i,o}^k \quad (3)$$

여기서, P^k =하중단계 k 에서의 축하중, e =편심, $\delta_{i,o}^k$ =하중단계 k 에서의 i 번째 단면의 초기 변위이다. 이 때 각단면의 변위는 일정한 하중상태에서 Newton Raphson의 반복적인 방법을 통해서 구한 기둥 단면의 중심에서의 변형률과($\epsilon_{ci,j}^k$) 곡률($\phi_{i,j}^k$)을 이용하여 변위를 구하게 된다.

2.3 재료 모델

콘크리트의 응력-변형률 모델은 Nisigakitarou[1]가 제시한 다음식을 적용하여 구한다.

$$\sigma_c(T) = r_{cT} \cdot f_{ck} \cdot \frac{\epsilon_c(T)}{\epsilon_{c1}(T)} \cdot \frac{n}{(n-1) + \left(\frac{\epsilon_c(T)}{\epsilon_{c1}(T)} \right)^n} \quad (4)$$

철근의 응력-변형률은 참고문헌[2]에서 제시한 다음식을 적용하여 구할 수 있다.

$$f_y = \frac{f(T, 0.001)}{0.001} \varepsilon_s \quad \text{for } \varepsilon_s \leq \varepsilon_p \quad (5a)$$

$$f_y = \frac{f(T, 0.001)}{0.001} \varepsilon_p + f(T, (\varepsilon_s - \varepsilon_p + 0.001)) - f(T, 0.001) \quad \text{for } \varepsilon_s > \varepsilon_p \quad (5b)$$

2.4 실험치와의 비교

본 연구에서 개발된 모델은 Fig.2 에 나타난 바와 같이 다양한 세장비 및 재료특성, 단면크기를 갖는 기존 기둥의 실험치 [3,4]를 잘 예측하였다.

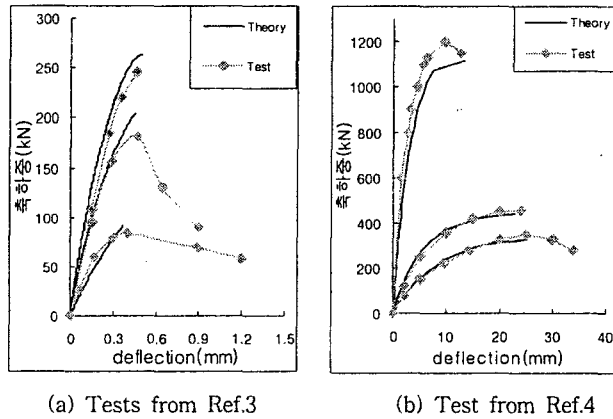


Fig. 2 Comparisons with test results

3. 모델에 의한 변수 영향 고찰

전 절에서 개발된 이론모델을 이용하여 콘크리트 압축강도, 피복두께, 철근비, 편심, 세장비가 다른 철근콘크리트 기둥이 화해를 입을 경우에 대하여 이론적으로 고찰하였다. 편심길이(e)는 기둥 춤에 대하여 0.1, 0.25, 0.5를 적용하였다. 변수고찰에 적용된 기둥의 단면은 Fig. 3 과 같고 변수별 기둥명은 <Table 1> 에 나타내었다.

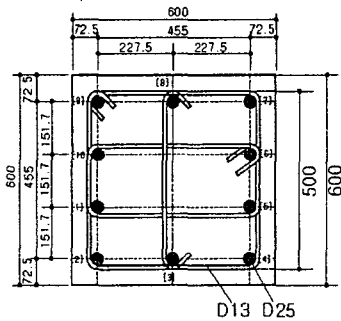


Fig. 3 Standard column section used for parametric studies

Table 1. Column properties for parametric studies.

기둥명	콘크리트강도(MPa)	철근비(ρ)	편심(m)	피복두께(m)
L1M4	30	0.0148	150	40
M1M4	60	0.0148	150	40
H1M4	90	0.0148	150	40
M1M5	60	0.0148	150	50
M2M4	60	0.028	150	40
M1L4	60	0.0148	60	40
M1H4	60	0.0148	300	40

3.1 콘크리트 압축강도(f_{ck}) 영향

Fig. 4는 화재 입은 기둥 내 콘크리트 압축강도가 각각 30 MPa 및 90MPa인 경우, 세장비 차이에 따른 상대내력의 변화를 나타낸다. 화재시간은 최대 2시간이며 철근비는 $\rho = 0.0148$, 편심은 $e/h=0.25$, 피복두께는 4cm인 경우이다. 세장비가 증가함에 따라 감소되는 상대내력의 형태는 화재입은 기둥의 경우와 화재입지 않은 경우가 유사한 형태를 나타내나 화해를 입은 기둥의 경우 콘크리트 강도와 상관없이 그 상대내력의 감소가 화해를 입지않은 기둥에 비하여 큼을 알 수 있다.

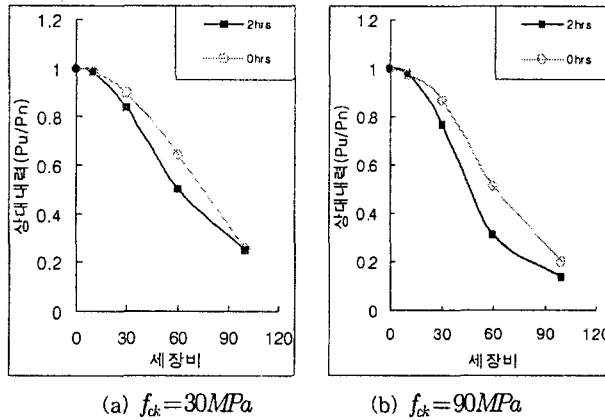


Fig. 4 Reduction of relative strength for different concrete compressive strengths

Fig. 5(a)에 의하면 세장비가 30인 기둥의 경우, 콘크리트 강도가 30MPa에서 90MPa로 3배 증가할 때, 화해를 입지 않은 기둥의 극한내력은 2.33배 증가하나 화해를 2시간 입은 경우, 1.5배로 그 증가분이 감소함을 알 수 있다. Fig. 5(b)에 의하면 세장비가 100인 경우에 기둥의 극한내력은 1.5배 증가하나 화해를 2시간 입은 경우, 1.20배 만큼 감소함을 알 수 있으며 또한 2시간 화재 시 세장한 고강도 기둥의 경우 그 내력이 일반강도의 내력과 유사하게 됨을 볼 수 있다. 따라서 고강도 기둥의 경우, 세장비가 큰 경우, 급격한 내력의 저하를 나타냄을 알 수 있다.

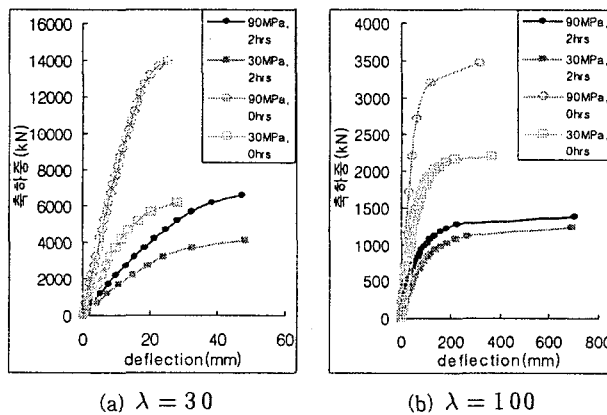


Fig. 5 Load vs. lateral deflection curves for different compressive concrete strengths and exposure time to fire.

3.2 피복 영향

Fig. 6은 화재 입은 기둥 내 콘크리트 압축강도가 60MPa인 경우, 세장비 차이에 따른 상대내력의 변화를 나타낸다. 화재시

간은 0시간 및 2시간이며 철근비는 $\rho = 0.0148$, 편심은 $e/h=0.25$ 인 경우이다. 피복두께는 4cm 및 5cm 이다. 그림 3에 나타난 바와 같이 피복두께의 차이에 의한 상대내력의 변화는 미소함을 알 수 있다.

3.3 철근비 영향

Fig. 7은 화재 입은 기둥 내 콘크리트 압축강도가 60MPa인 경우, 세장비 차이에 따른 상대내력의 변화를 나타낸다. 화재시간은 0시간 및 2시간이며 철근비는 $\rho = 0.0148$, $\rho = 0.028$, 편심은 $e/h=0.25$ 인 경우이다. 피복두께는 4cm이다. 화해를 입지 않은 경우와 화해를 2시간 입은 경우, 세장비가 증가함에 따라 철근비에 상관없이 유사한 내력저하를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 철근비가 작은 기둥의 경우, 세장비가 30 보다 큰 경우에 화해를 입은 기둥의 상대내력 저하가 나타나나 철근비가 큰 기둥의 경우에는 모든 세장비에 대하여 화해를 입은 기둥의 상대내력 저하를 나타내고 있다. 또한 철근비가 큰 기둥의 경우, 화재와 상관없이 세장비 증가에 따른 상대내력저하가 더 많이 발생함을 알 수 있다.

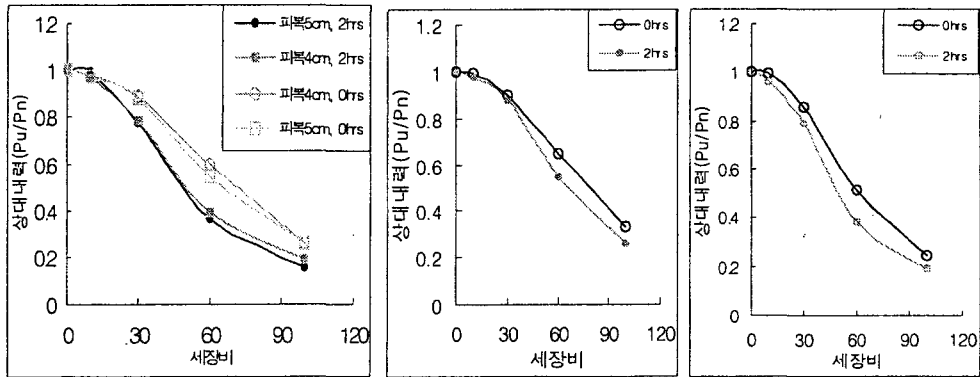


Fig. 6 Reduction of relative strength for different cover thickness

Fig. 7 Reduction of relative strength for different reinforcement ratios

3.4 편심의 영향

Fig. 8은 콘크리트 압축강도가 60MPa인 경우, 편심의 변화에 따른 상대내력의 변화를 나타낸다. 화재시간은 0시간 및 2시간이며 철근비는 $\rho = 0.0148$, 편심비는 $e/h=0.1, 0.25, 0.5$ 인 경우이다. 피복두께는 4cm이다. 화해를 입지 않은 경우 편심이 증가할수록 내력의 감소가 증가한다는 것을 알 수 있다. 반면에 화해를 2시간 가한 경우에는 편심이 증가할수록 내력의 감소가 증가하다가 세장비가 더욱 커지게 되면 편심이 큰 기둥의 상대내력 감소가 둔화되는 것이 나타남을 볼 수 있다.

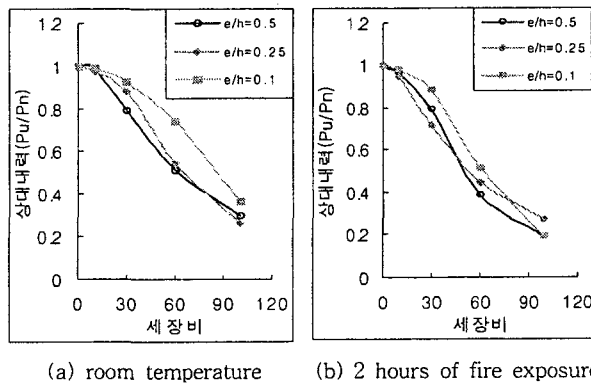


Fig. 8 Reduction of relative strength for different eccentricities

4. 결론

화해를 입은 기둥의 세장비에 따른 거동을 이론적으로 고찰하였다. 이를 위하여 비선형 열전달식에 의한 단면 내 온도변화를 추정하였으며 이에 근거하여 화해를 입은 기둥의 $P-\Delta$ 영향을 고려할 수 있는 모델을 개발하였다. 개발된 모델을 이용한 변수고찰 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 개발된 모델은 화해를 입지 않은 세장한 기둥의 축하중-횡변위 관계를 잘 예측하였다. 그러나 추후 실험을 통하여 화해를 입은 기둥에 대한 모델의 검증이 필요하다.
2. 일반적으로 화해를 입은 기둥의 세장비 증가에 따른 상대내력 감소는 화해를 입지 않은 기둥의 경우와 유사한 감소 경향을 나타낸다.
3. 일반강도를 적용한 콘크리트 기둥에 비하여 고강도 콘크리트를 사용한 기둥이 화해를 입을 경우, 세장비 증가에 따른 내력 감소가 더욱 증가한다.
4. 피복두께의 차이(4cm 및 5cm)에 따른 내력변화는 거의 없으므로 피복두께의 영향은 거의 없다고 할 수 있다.
5. 화해 여부와 상관없이 철근비가 상대적으로 큰 기둥의 경우, 세장비 증가에 따른 상대내력의 감소가 철근비가 상대적으로 적은 기둥보다 크다.
6. 화해를 입은 기둥의 경우, 세장비가 커짐에 따라 편심이 큰 기둥의 내력저하가 둔화된다.

참고문헌

1. Nisigakitarou 外 5 人., "高温時における コンクリートの力學的的特性のモデル化", 日本建築學會大會 學術子講演梗概集, 1995. 8, pp. 71-72.
2. Lee, S.H., and Hu, E.J., "철근콘크리트 휨 부재의 내화성능에 관한 해석적 연구", 부산대학교, 공학석사 학위논문, 2001.
3. 김진근, 양주경, "Buckling Behavior of slender Reinforced High-Strength Concrete Columns", 한국콘크리트학회지, 1993. 6, pp. 129-139.
4. Rangan B.V. and Lloyd N.A., "Studies on High-Strength Concrete Columns under Eccentric Compression", ACI Structural Journal, November-December, 1996, pp. 631-638.
5. Lee, C.D., and Lee, S.H.m, "Fire-Damaged Structural Behavior of Normal Strength Reinforced Concrete Columns in Full Scale", 중앙대학교, 공학석사 학위논문, 2003.