

고온에서의 RC보 거동해석

Analysis of RC beams under high temperature

홍성걸*

김형도**

서연주***

Sung-Gul Hong

Hyung-Do Kim

Youn-Joo Seo

ABSTRACT

This study is performed to analyze of reinforced concrete beams under fire and to calculate remaining strength. The analysis is based on the assumption that plane section remains plane after bending due to load and non-linear temperature increases. Finite difference method is used to find temperature field in a section. The residual strength is attained considering the effect of temperature rise on the mechanical properties of concrete, self-equilibrium stress and reduced section. Further research in much needed on the material models of concrete since it governs temperature distribution and theoretical results.

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

화재로 인한 인명 및 재산 피해는 막대한 국가적 손실을 초래한다. 대부분 국가들의 내화기준은 화재 온도시간에 따라 구조 부재들의 피복두께 및 최소치수를 규정하고 있다. 이러한 방법은 내화성능을 검토하고 설계하는데 가장 쉽게 접근할 수 있는 방법이지만 하나 개개의 특수한 편차를 고려하기에는 적절하지 않다. 콘크리트 부재가 화재 등으로 인해 고온에 노출될 경우 부재는 부분적 혹은 전체적인 열손상을 받게 되며, 손상부위의 심도와 분포에 따라서 부재의 재사용 여부가 결정된다. 구조물 내화성능을 산정하기위해 부재의 거동, 잔여강도에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

화재 발생 후 건물의 전반적인 해체가 필요하거나 부분적인 피해가 발생한 경우 보수 및 보강이 가능하다. 이를 위하여 화재의 정도, 변형, 재료의 열화에 대한 정도를 결정할 수 있는 해석방법이 필요하다. 부재의 열손상 정도는 콘크리트의 역학적 특성의 변화에 대한 연구와 주위 대기의 대류 및 부재 내에서의 열전도에 의한 온도분포를 이용하여 부재와 시스템의 응력 및 변위를 추정할 수 있으며 화재발생 후 구조물의 붕괴 가능성 및 잔여강도를 종합적으로 평가할 수 있다. 본 연구는 기초 실험 자료와 이론식을 이용하여 철근 콘크리트 부재의 내화 성능을 평가함을 그 목적으로 한다.

* 서울대학교 건축학과 부교수

** 서울대학교 건축학과 석사과정

*** 서울대학교 건축학과 박사과정

2. 화재 모델 및 콘크리트 역학적 모델

표준 화재 곡선은 식 (1)과 같다[1]. 그림 1은 표준 화재 곡선과 실험시 가열온도그래프와의 차이를 보이고 있다. 기존의 연구에서 온도상승에 따른 콘크리트의 압축강도, 철근의 인장강도와 영계수의 저감비율은 그림 2와 같다[1].

$$T = 345 \log(8t + 1) + 20 \quad (1)$$

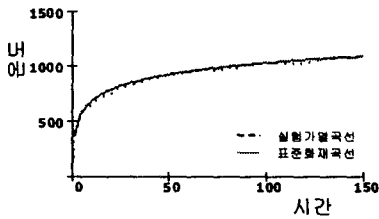


그림 1 표준 화재 곡선

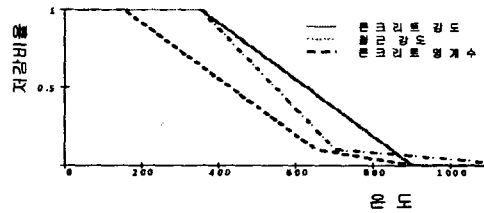


그림 2 온도에 따른 재료성질 저감비율

3. 열해석을 위한 단순보 모델링

3.1 화재해석 가정

화재 발생시 하중을 받는 보부재의 경우 온도상승 후 기하학적인 적합조건을 만족하기 위하여 단면이 여전히 평면유지법칙을 따른다고 가정한다. 그러므로 변형률에 대하여 최종분포는 선형으로 나타나며 온도에 의한 변형률과의 차이가 자체평형응력(Self-equilibrating stress)으로 작용한다[2]. 재료의 열적, 역학적인 성질변화가 온도 분포에 영향을 미치지 않으므로 온도분포 해석과 구조거동 해석은 독립적으로 계산할 수 있다(그림 3). 화재가 발생하면 고열상태에서 콘크리트의 미세구조가 변화하므로 크립 등 다른 영향이 발생하나 여기서는 열팽창, 재료의 탄성률, 강도의 변화만을 고려한다.

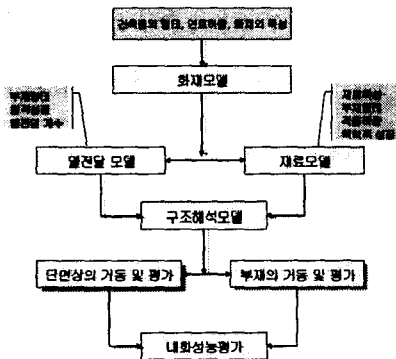


그림 3 화재 해석 순서도

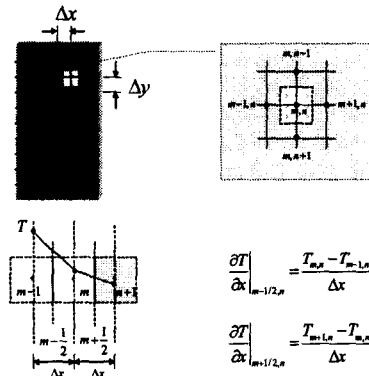


그림 4 유한차분법 개념도

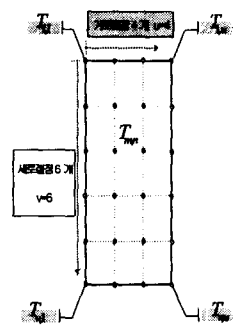


그림 5 유한차분 모형

3.2 온도분포해석

열전달이론에서 열역학 제 1 법칙인 에너지 보존법칙이 적용된다. RC부재에서 열에너지 발생률을 무시한 열확산방정식(Heat diffusion equation)은 식 (2)과 같다[3].

$$-\left[\frac{\partial q_x}{\partial x} dx + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz\right] = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (2)$$

여기서 ρ 는 밀도, c_p 는 비열계수, $\rho c_p \cdot \partial T / \partial t$ 는 단위체적당 열에너지의 단위시간 변화율이다.

보 실험체를 그림 5와 같이 단면을 유한개의 요소로 보고 각 영역의 중심에 절점(Node)을 설정하여 유한차분법으로 수치해석 한다. 각 절점은 영역을 대표하며, 절점의 온도는 해당 영역 내에 균일하게 작용한다고 가정한다. 단위 깊이를 가정하고, 절점수가 충분히 많다면 절점사이의 온도차를 선형관계로 볼 수 있다. 절점의 위치는 표 1과 같이 3가지로 분류된다. 비정상 상태의 각 절점의 유한 차분 방정식은 표 2와 같다.

표 1 유한차분해석의 절점 위치

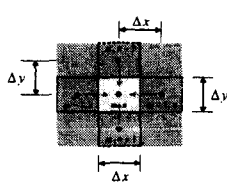
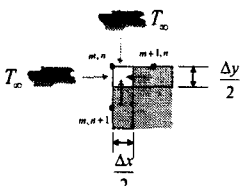
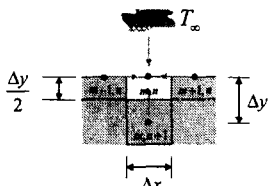
내부절점	모서리 절점	한쪽 면을 외기에 접한 절점
		

표 2 절점위치에 따른 비정상 상태의 유한 차분방정식

절점 위치	비정상 상태의 유한 차분방정식
내부 절점	$F(T_{m+1,n}^{p+1} + T_{m-1,n}^{p+1} + T_{m,n+1}^{p+1} + T_{m,n-1}^{p+1}) - (1+4F)T_{m,n}^{p+1} = -T_{m,n}^p$
모서리 절점	$2F \cdot T_{m,n+1} + 2F \cdot T_{m+1,n} - (1+4F+4F \cdot B)T_{m,n} = -4F \cdot B \cdot T_{\infty} - T_{m,n}^p$
한쪽면 외기에 접한 절점	$2F \cdot T_{m,n-1} + F \cdot T_{m+1,n} + F \cdot T_{m-1,n} - (1+4F+2F \cdot B)T_{m,n} = -2F \cdot B \cdot T_{\infty} - T_{m,n}^p$

여기서 k 는 열전달계수, h 는 대류계수이며 $\Delta x = \Delta y$ 임을 고려하여 $F = \frac{k}{\rho c_p} \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2}$, $B = \frac{h \cdot \Delta x}{k}$ 로 치환하였다. 구하려는 시각(p+1)에 해당되는 절점의 온도는 편의상 표기를 생략하고 이전온도의 값을 사용하는 부분에만 이전시각(p)의 표시를 하였다.

모든 절점의 열전달방정식을 이와 같이 알아냈다면 전체절점의 온도 값을 포함하는 행렬식을 얻을 수 있다. 표면 절점의 온도를 알고 있으므로 식 (3)처럼 행렬을 수정하여 계산한다.

$$[unknownvalues] = [coefficientmatrix]^{-1} \times [knownvalues] \quad (3)$$

여기서 $[unknownvalues]$ 는 구하려는 절점의 온도 값이다.

3.3 단순보 해석

3.3.1 단면해석

단면을 충분한 개수의 섬유(fiber)의 집합으로 본다면 비선형 온도분포에 의해서 부재 단면에서도 비선형 온도변형률이 발생한다. 하지만, 비선형 변형률은 부재의 적합조건을 만족하지 못한다. 그러므로 평면유지법칙을 적용하여 온도변형률에 추가 변형이 발생하는 균일 또는 선형 변형률이 된다.

$\epsilon_{equivalence}$ 는 등가의 선형 변형률이다(그림 6). 결국 단면에서의 전체 변형률은 온도 변형률과 하중에

관련된 변형률의 합으로 표 3처럼 표현된다.

표 3 비선형 온도 자유변형률과 선형 변형률의 비교

비선형 온도 자유변형률	선형 단면 변형률
$\epsilon_{thermal} = \epsilon_{fiber} = \alpha(T_{fiber}) \cdot T_{fiber}$	$\epsilon_{Thermal} = \epsilon_{equivalence} = \epsilon_{axial} + \phi_y x_i + \phi_x y_i$
$\epsilon_{total} = \epsilon_{load} + \epsilon_{thermal}$	$\epsilon_{total} = \epsilon_z + \phi_y x_i + \phi_x y_i$

선형의 온도 변형률의 곡률과 축변형은 자체평형응력 조건을 만족하는 값이어야 한다(그림 7). 자체 평형응력은 선형 변형률과 비선형 변형률의 차이로 발생하고 식 (5)의 조건을 만족해야 한다.

$$\sigma_{self-equilibrating, i} = E_i (\epsilon_{fiber, i} - \epsilon_{equivalence, i}) \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{N \cdot V} P_i = \sum_{i=1}^{N \cdot V} \sigma_i \cdot dA_i = 0 \quad \sum_{i=1}^{N \cdot V} M_i = \sum_{i=1}^{N \cdot V} \sigma_i \cdot dA_i \cdot dis_i = 0 \quad (5)$$

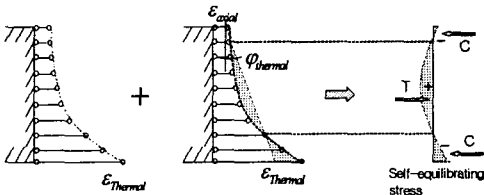


그림 6 선형변형률 개념도

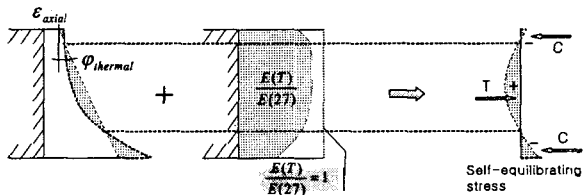


그림 7 자체평형응력 개념도

3.3.2 처짐 이력곡선

단순보의 경우 양단의 구속조건이 없으므로 온도상승에 의한 부재의 변형은 온도하중에 의한 변형이 아니다. 곡률에 기초한 최대 처짐식은 식 (6)과 같다. 실험체의 보 길이 방향으로 동일한 가열조건이므로 부재 전체 길이에서 곡률은 상수로 볼 수 있다.

실제 부재 해석에서는 길이에 따른 곡률의 값이 다르겠지만, 부재를 길이방향으로 잘게 쪼개어 각 요소의 곡률은 일정한 상수로 볼 수 있다(그림 8). 요소의 개수 n을 짝수로, 외부하중과 화재온도를 좌우대칭으로 가정하여 연속구간에서 구간 i의 좌측 처짐 각과 구간 i+1의 우측 처짐 각은 동일하다는 경계조건으로 최대 변위는 식 (7)과 같다.

$$\delta_{\max(z=L/2)} = -\frac{1}{2} \phi \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^2 \quad (6)$$

$$\delta_{\max} = \int_{L/2}^L \theta dz = \sum_{i=1}^n (A_i) = \left(\frac{L}{n}\right)^2 \left(2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \phi_j - \sum_{i=1}^n \phi_i \right) \quad (7)$$

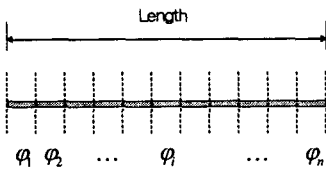


그림 8 실제 부재에서 곡률 모형

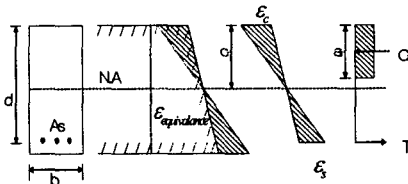


그림 9 고온에서의 변형률 및 강도

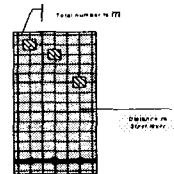


그림 10 모멘트 모형도

3.3.3 공칭모멘트의 시간이력곡선

온도상승이 발생하였을 때 공칭모멘트의 저감비율은 재료모델의 변화와 역학적인 모델의 변화에 따른다. 철근과 콘크리트의 강도가 저감되는 재료모델의 변화에 의해 동일한 단면에서도 공칭모멘트의 저감이 발생한다. 역학적 모델의 변화는 단면 내 존재하는 자체평형응력을 잔류응력으로 보고 단면감소의 효과까지 고려된 공칭모멘트 저감이 발생한다. 온도상승의 경우 단면의 변형률과 응력은 그림 9와 같다. 평형조건으로 식 (8)에 의해 콘크리트요소의 개수 m 을 계산한다. 공칭모멘트 계산은 식 (9)에 따른다.

$$\sum_{i=1}^m A c_i f'_c(T_i) = \sum_{i=1}^n A s_i f_y(T_i) \quad (8)$$

$$M n_T = \sum_{i=1}^m A c_i (f'_c(T_i) - \sigma_{equivalence}) y_i \quad (9)$$

4. 이론식과 실험값의 비교 분석 및 고찰

파괴가 발생할 때까지 가열한 두 개의 실험체를 의 실험값으로 이론적 해석 값과 비교 분석하였다. 고려하였다. 실험의 변수는 피복두께(40mm, 50mm)이고 실험체는 공칭인장강도가 4000kg/cm²인 스티립(D10), 주근(D22) 철근을 사용하였고 콘크리트는 공칭강도 210kg/cm²를 사용하였다. 실험체 상세는 그림 (11)에 나타내었다. 피복두께 50mm의 실험체의 각 위치별 온도곡선은 그림 (12)와 같이 증가형태가 유사하였고 피복두께에 따른 처짐값은 그림 (13)과 같다.

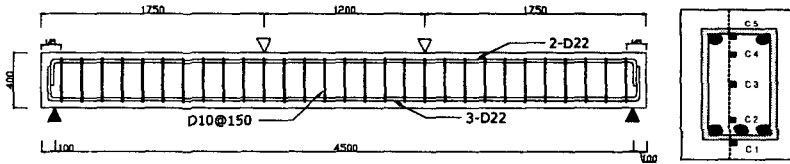


그림 11 실험체 상세도

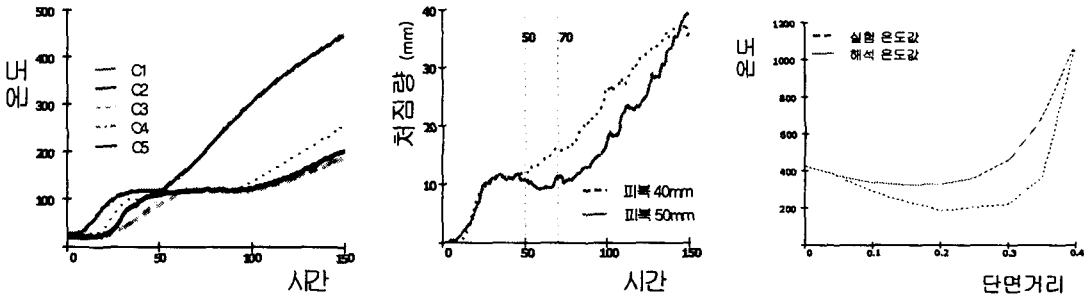


그림 12 단면 위치별 온도곡선 그림 13 피복두께에 따른 처짐값 그림 14 해석온도와 실험값의 비교

콘크리트 단면의 온도분포를 해석하기 위해 밀도(1860kg/m³), 비열(780J/kg · K), 열전도율(0.72 W/m · K)의 물성값은 참고문헌[3]에서 인용하였고 그 결과는 그림 14와 같다. 실험온도와 해석온도의 차이가 발생하는 것은 콘크리트 물성값에 기인한다. 실제로 열전도율에 0.8저감계수를 곱하면 실험값에 무척 유사함을 알 수 있었다.

선형 변형률의 기울기로부터 구한 이론적인 처짐양을 그림 15에서 실험값과 비교해 보았다. 초기 이론적인 처짐값과 실험값의 차이는 온도분포가 실험값보다 크게 나온 것에 기인하지만, 후반의 처짐

값의 차이는 이론적인 변형률이 고온에서 재료의 파괴 없이 계속적인 변형이 발생한다고 보는 가정이 온도상승에 따른 공칭모멘트능력이 재하된 모멘트보다 작아서 생긴 실험체의 파괴현상을 고려치 않음으로 발생한다.

이론적인 공칭모멘트의 저감은 온도증가에 따른 강도저감에 의해 크게 지배되고 단면의 감소로 인해 저감효과가 더욱 빠르게 진행되었다. 그림 16에서 실험체의 처짐 속도가 증가하는 150분과 이론적 공칭모멘트 저감이 발생한 75분의 차이는 실제 실험체 철근의 온도상승이 이론적인 해석보다 현저히 낮았고, 실험체 공시체 강도시험을 통해서 공칭강도 210kg/cm^2 이상의 강도가 발현되었으며, 콘크리트의 연속체 특징을 해석에 충분히 반영하지 못함에 따른다.

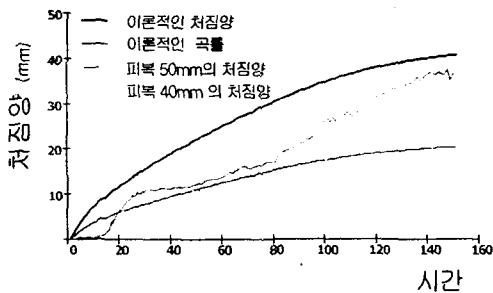


그림15 처짐양 비교

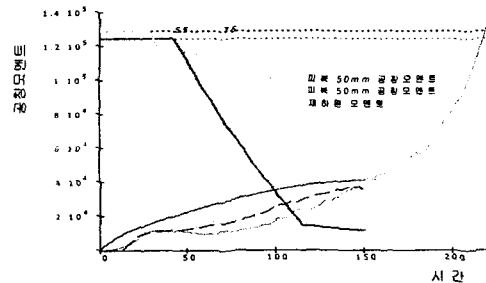


그림 16 공칭 모멘트 비교

5. 결론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 고온을 받는 철근 콘크리트 보의 변형은 충분히 선형적으로 볼 수 있다.
2. 이론적인 온도분포 값과 실험값의 차이는 콘크리트물성값에 크게 의존한다.
3. 초기 이론적인 처짐값과 실험값의 차이는 온도분포가 실험값보다 크게 나온 것에 기인하지만 진행과정은 매우 유사함을 보인다.
4. 이론식에 의한 보 부재의 내화성능은 실험값에 비해 과소하게 평가 되었다. 이는 온도분포와 실제 실험체의 강도와 해석강도의 차이 등에 따른다.
5. 고온의 콘크리트 모델에 따라서 열분포와 해석 값이 많이 좌우되므로 재료모델에 대한연구가 앞으로 많이 필요하다.

참고문헌

1. Andrew H Buchanan. Structural Design for Fire Safety. John Wiley & Sons Ltd. 2000.
2. A. Ghali and R. Favre. Concrete Structures: Stress and Deformation. E & FN SPON..1994.
3. Frank P. Incropera and David P. Dewitt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. NewYork. Wiley. 1996.