

## 비정상 열전도 방정식의 수치 해석을 이용한 화재 건물의 안전성 평가

### Safety Assessment of Burned Building using Numerical Calculation of Unsteady Heat Conduction Equation

태 순 호\*

Tea, Soon-ho

이 병 곤\*\*

Lee, Byung-Kon

#### Abstract

Numerical simulation of unsteady heat conduction equation were carried out by finite control volume method using the gas temperature derived from fire model as a boundary value. The reduction of compressive and flexural by heating were calculated from the temperature and the given reduction rate.

It is shown that this method could be well applied to assess the safety of concrete column or beam of the burned building.

#### 국문요약

화재 모델에서 구한 가스층의 온도를 이용하여 비정상 열전도 방정식의 수치해석을 하면 유한 제어 체적을 계산할 수 있으며 가열 온도와 저감율로 열에 의한 압축 및 휨 강도의 저하값을 계산할 수 있다. 또한 이 방법을 이용하여 콘크리트 구조물(기둥, 보등)의 안전성 평가에 잘 적용할 수 있었다.

#### 1. 서 론

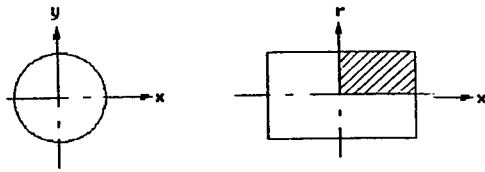
근래 화재 발생 건수와 인명 및 재산 피해는 해마다 증가하여 96년도(1월-10월말 까지 누계) 화재 발생 건수는 23,770건, 인명 피해는 사망 478명, 부상 1,379명 재산피해는 958억원에 달하여<sup>1)</sup>, 방재에 각별한 관심을 갖지 않으면 해마다 귀중한

\* 충북대학교 대학원 안전공학과

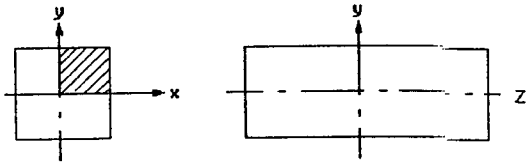
\*\* 충북대학교 안전공학과 교수

인명과 막대한 재산 손실을 가져온다. 화재 원인은 전기, 담배, 불장난, 불티, 가스의 순으로 많으며, 물건별로는 아파트 및 주택, 차량, 공장 및 작업장, 음식점, 점포순으로 많이 발생하였다. 화재가 발생한 건축물은 화재 진압 후 재사용 여부, 보수 가능성등을 규명하기 위해서 철저한 안전성 평가가 이루어져야 하나, 화재 건물의 보나 기둥들에서 직접 시험편을 채취하는 것이 곤란하여 정확한 강도 저하를 알기는 매우 어렵다.





(a) 압축 시험편



(b) 휨 시험편

그림 2 해석 모델과 계산 영역.

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

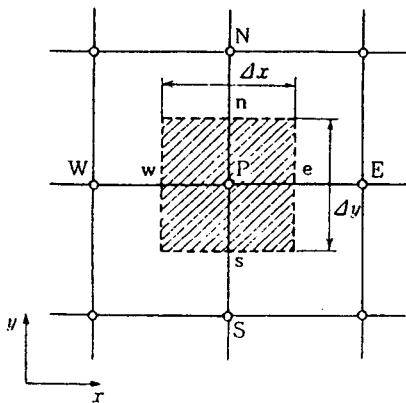


그림 3 직교 좌표의 제어 체적.

그림 3.의 직교 좌표 제어 체적의 차분 방정식은,

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + b \quad (2)$$

여기서,  $a_E = \frac{k_e \Delta y}{(\delta x)_e}$ ,  $a_W = \frac{k_w \Delta y}{(\delta x)_w}$ ,  $a_N = \frac{k_n \Delta x}{(\delta y)_n}$ ,  
 $a_S = \frac{k_s \Delta x}{(\delta y)_s}$ ,  $a_P^0 = \frac{\rho c \Delta x \Delta y}{\delta t}$ ,

$$\Delta V = \Delta x \Delta y, \quad b = a_P^0 T_P^0 + S c \Delta V$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_P^0 - S_P \Delta V$$

격자 분할은  $\Delta x = \Delta y = 7.5$  [mm], 시간 간격은 30초로 하여 Fourier No. ( $\alpha \Delta t / \Delta x^2$ )는 0.4, 이완계 수는 0.5로 하였다. 경계 조건에서 외측 표면은 주어진 온도 값으로 하고, 중심선에서는 대칭 경계 조건을 사용하였다. 경계의 열 유속을 알면 이를 경계 조건으로 이용할 수도 있다.

### 2.2.3 압축 강도 시험 모델과 차분 방정식

압축 강도 시험편은 원통 좌표로서 원주 방향 ( $\theta$ )으로 균일하게 가열되면 열전도는  $r, x$  방향의 2차원이 되며, 이 때의 비정상 열전도 방정식은,

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3)$$

차분방정식은,

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + b \quad (4)$$

여기서,  $a_E = \frac{k_e r_p \Delta r}{\delta x_e}$ ,  $a_W = \frac{k_w r_p \Delta r}{\delta x_w}$ ,

$$a_N = \frac{k_n r_n \Delta x}{(\delta r)_n}, \quad a_S = \frac{k_s r_s \Delta x}{(\delta r)_s}, \quad a_P^0 = \frac{\rho c \Delta V}{\delta t},$$

$$\Delta V = r_p \Delta r \Delta x, \quad b = a_P^0 T_P^0 + S c \Delta V$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_P^0 - S_P \Delta V$$

격자 분할은  $\Delta x = \Delta y = 5$  [mm], 시간 간격은 15초로 하여 Fourier No. ( $\alpha \Delta t / \Delta x^2$ )=0.45 이었다. 경계 조건은 굽힘 시험 모델과 같이 외측 표면은 주어진 온도, 중심선에서는 대칭 경계 조건을 사용하였다. 만일 원주 단면상의  $r, \theta$  방향에 대해 적용하려면 차분식은 참고 문헌(5)에 제시되어 있으며, 사각형 단면의 보나 기둥은 식(1), (2)의 직교 좌표식을 이용하여 계산하면 된다.

## 3. 실 험

수치 해석 결과와 비교하고, 강도 시험을 하기 위하여, 국내산 포틀랜드 시멘트, 한강모래 및 쇠석을 사용하여 시편 중심에 열전대를 위치시키고, 그림 2.와 같은 압축 시험편과 굽힘 시험편

을 제작후 28일간 수온 20℃에서 양생하였다. 전기로를 이용하여 일정한 온도 상승율로 가열하고 Data Logger로 온도를 측정하였다. 압축 강도 및 휨 강도 시험은 LPG가스노에서 직접 1000℃의 화염에 접촉시켜 가열한 후 서냉시켜 강도 시험을 하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1. 압축 시험편의 온도 비교

그림 5.는 원통 좌표의 압축 시험편에 대하여 전기로에서 온도 상승율을 5[℃/min]로 하여 100분후에 500[℃]로 가열한 노내 온도( $T_{amb}$ )와 시험편 내부 온도 및 이 노내 온도를 경계 조건으로 하여 수치 해석한 온도를 비교한 것이다.

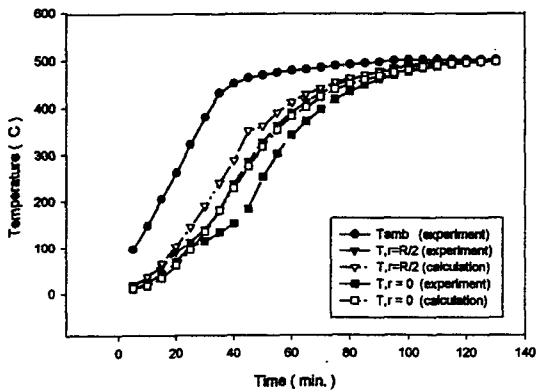


그림 4. 압축 시험편의 각 온도의 비교.

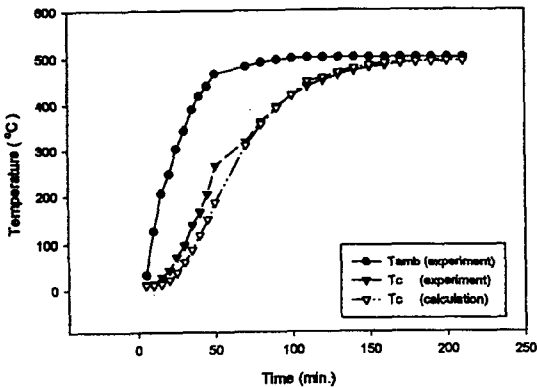


그림 5. 휨 시험편의 각 온도 비교.

그림에서 실제 노 내온도는 일정하게 상승하지 않고 약 400[℃] 정도까지는 급격히 상승하고 그 이후는 500[℃]까지 완만하게 상승하였다. 수치 해석값은 실험값보다 다소 높게 예측되었으나, 노내의 온도 차이, 콘크리트의 물성치, 재질의 불균일 등 실험과 계산시의 오차를 감안하면 매우 근사한 결과로서 실용적으로 충분히 이용할 수 있다고 생각된다.

##### 4.2. 휨 시험편의 온도 비교

그림 6.은 직교 좌표의 휨 시험편에 대하여 압축 시험편과 같은 방법으로 전기로에서 5[℃/min]로 가열하여 500[℃]로 유지한 노내 온도( $T_{amb}$ )와 중심 온도 및 수치 해석한 온도를 비교한 것이다. 수치 해석값은 실험값보다 저온에서 다소 낮게 예측되나 콘크리트가 고온에서 거의 손상된다는 점을 감안하면 해석값과 실험값은 잘 일치한다.

##### 4.3. 압축 시험편의 잔존 압축 강도 비교

태순호 등은<sup>6,7)</sup> 국내산 시멘트와 한강산 잔골재 및 쇄석을 사용한 콘크리트의 가열온도에 대한 압축 강도와 휨 강도의 저하율을 실험하였는데, 표 1.은 각각의 가열 온도에 대한 잔존 압축 강도와 휨강도를 %로 표시한 것이다. 잔존 압축 강도는 약 350[℃]까지는 다소 증가하다가 500[℃]에서 약 60[%]대로 급격히 감소하며, 600[℃] 이상에서는 40[%]이하로 압축 강도의 기

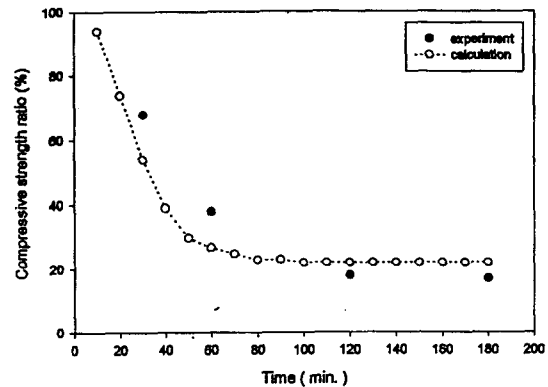


그림 6. 압축 강도의 비교.

표 1. 가열 온도별 압축 강도 및 휨 강도비.

℃	Rm tem.	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Compression	100	118	113	108	91	63	42	26	15	8	0
Flexural	100	96	65	58	45	33	30	28	14	10	0

능을 할 수 없어, 약 500[℃]가 압축 강도 저하의 임계 온도가 됨을 알 수 있다.

그림 6.은 직접 화염에 접촉시켜 가열한 압축 시험편의 강도값과 수치 해석을하여 얻은 온도와 표 1.의 잔존 압축 강도비를 이용하여 계산한 압축 강도를 비교한 것이다. 실험은 강도가 낮아지는 500[℃] 이상의 온도로 상승시키기 위해 LPG가스 노에서 직접 화염에 접촉시켜 가열하고 24시간 상온에서 서냉시켜 압축 시험을 하였다. 계산값은 수치 해석에서 사용한 각 제어 체적의 전체 면적에 대한 비율에 그 제어 체적의 온도에 해당하는 잔존 압축 강도비를 곱한 후 전체를 합산하여 구하였다.

화염 온도는 1분 이내에 1000[℃]로 상승하여 거의 일정하게 유지되며, 노내 온도는 10분 이내에 600[℃]로 상승하여 일정하게 유지되었으며, 시험편의 온도는 화염이 직접 접촉하는 밑부분의 온도와 화염이 적게 접촉하는 윗 부분을 평균하여 10분에 800[℃]로 상승시켜 일정하게 유지하였다. 계산한 압축 강도는 실험값과 잘 일치하였다.

#### 4.4. 휨 시험편의 잔존 휨 강도 비교

그림 7.은 압축 강도와 같이 화염에 접촉시켜 가열한 휨 시험편의 휨 강도 실험값과 수치 해석하여 계산한 값과 비교한 것이다. 실험은 압축 시험편과 같은 노에서 1000[℃]의 화염에 접촉시켜 일정시간 가열 후 휨 시험을 하였다. 그림에서 가열 시간이 작을 때는 근사한 값을 보이거나, 가열시간이 길어지면 실험값은 거의 0으로 떨어지는데 반해 계산값은 이러한 경향을 나타내지 못하였다. 실제로 고온에서 장시간 유지하면 균열이 발생하고 열 크리프 현상으로 그 균열이 성장하여 강도가 현저히 감소하는데, 이러한 차이에 기인하는 것으로 생각된다.

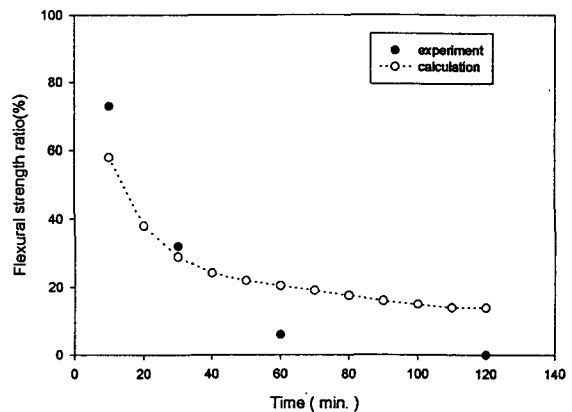


그림 7. 휨 강도의 비교.

그러나 이러한 수치해석을 통하여 열이 얼마나 깊이 침투했는가와 강도가 현저히 낮아지는 500[℃]이상이 얼마나 되는가를 비교적 정확하게 예측할 수 있으며, 화재로 인한 휨 강도 저하도 어느 정도 정량적으로 예측할 수 있음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

기존의 ASET, FIRM 등의 zone 모델 등에서 구한 화재시 상부 연기층의 온도를 경계조건으로 하고 건축물의 콘크리트 보나 기둥 단면에 비정상 열전도 방정식을 적용하여 수치 해석 및 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 수치 해석으로 보나 기둥의 시간별, 위치별 온도를 구한 결과 실험 값과 잘 일치 하였다.

둘째, 비정상 열전도 방정식을 적용한 수치 해석으로도 화재로 인한 구조물의 강도 저하를 정확하게 정량적으로 계산할 수 있었다.

셋째, 수치 해석을 통하여 열이 얼마나 깊이 침투했는가와 강도가 현저히 낮아지는 500[℃] 이상의 온도가 얼마나 되는가를 정확하게 예측할 수 있었다.

## 기 호

$\rho$ : 밀도,  $c$ : 비열,  $k$ : 열전도계수,  $t$ : 시간,  
T: 온도,  $r$ ,  $R$ : 반경

## 참 고 문 헌

1. 한국화재보험협회, "방재와 보험", 97년도 신년호, pp 70, 1997
2. W.D. Walton, "ASET-B: A Room Fire Program for Personel Computers", Fire Technology, Vol.21, No. 4, pp. 293, 1985
3. D.M. Birk, "An Introduction to Mathematical Fire Modelling", Technomic Publishing Co., 1991
4. 명현국, "수치유체공학", pp 12, 한미출판사, 1995
5. 이재현, "열전달 및 유체유동 수치해법", pp 84, 대한교과서, 1988
6. 태순호, 이병곤, "콘크리트의 고온에서의 거동", 한국산업안전학회, 1997. 6
7. 태순호, 이병곤, "가열 콘크리트의 강도 특성과 현상", 한국산업안전학회 1997. 6