



## 갤러킨 유한요소해석 방법을 이용한 열전도 해석 모델 구축에 관한 연구

강승구\* · 김동준\* · 이재영\*\* · 原田和典\*\* · 한병찬\*\*\* · 권영진\*\*\*\*  
 호서대학교 소방방재학과\* · 교토대학 건축공학과\*\* · 우송정보대학  
 건축공학과 교수\*\*\* · 호서대학교 소방방재학과 교수\*\*\*\*

### A study on the analysis model of heat conduction using the Galerkin Method

Kang Seung-Goo\* · Kim Dong-Jun\* · Lee Jae-Young\*\* · Harada  
 Kazunori\*\* · Han Byung-Chan\*\*\* · Kwon Young-Jin\*\*\*\*  
 Dept. Fire & Disaster Prevention of Hoseo Univ\* ·  
 Dept, Architectural Engineering, Kyoto University\*\* ·  
 Dept. Architectural Engineering Woosong College\*\*\* ·  
 Prof. Fire & Disaster Prevention of Hoseo Univ\*\*\*\*

#### 요 약

본 연구는 비선형·비정상 온도분포해석에 대하여 갤러킨 유한요소해석 방법을 응용하고 2차원 삼각형 요소를 사용하였다. 이에 대하여 실험값과 해석값을 비교한 결과 모든 실험체에서 0.96~1.03의 차이가 있었으며 10%의 오차 범위안에 있었다.

#### 1. 서 론

전세계적으로 콘크리트는 열전도율 및 열확산계수가 현저히 낮아 내화구조로 인식되어 왔다. 이에 콘크리트의 해석방법이나 내화시간 규정 확인 등을 통하여 내화성능을 확보하여 왔으며<sup>1)</sup> 화재 이후에도 간단한 보수보강을 통하여 구조물이 재사용 되어왔다.

하지만, 콘크리트가 장시간 고온에 노출되는 경우 심각하게 성능이 저하되며, 콘크리트 부재의 유효단면 감소, 폭렬현상 등 철근이 고온에 직접 노출되어 이로 인한 붕괴의 기능성 등이 여러 사고사례 및 연구를 통하여 알려지면서 이에 대한 관심이 증가하고 있다.<sup>2)</sup>

특히, 콘크리트 재료의 건축 구조물의 내화성능을 실험적으로 규명하는 것은 그 규모 및 경제적 측면에서 한계가 있으며, 이에 대한 해석적 연구가 필요하다. 이에 따라 기존 연구에서는 유한차분법이나 유한요소법과 같은 근사해석기법을 이용한 콘크리트 부재의 내화성능 평가방법이 제시되었다.<sup>3,4)</sup> 유한차분법에 의한 콘크리트의 열전달 모델<sup>5)</sup>은 차분

법이 갖는 시간의 수렴 조건에 대한 한계로 화재 등과 같이 급격한 온도변화를 나타내는 부재의 해석에서 안정성에 대하여 문제가 있다.

따라서 본 연구는 화재 등과 같은 고온 환경에 대하여 철근콘크리트 구조물의 내화성능에 관한 해석적 연구의 일환으로 갤러킨 유한요소해석 방법을 이용한 비선형 비정상 온도분포해석(Nonlinear transient heat flow analysis) 기법을 제시하였으며, 실규모 슬래브의 1면 내화실험을 실시하여 수치해석 모델의 검증과 유효성을 확인하여 내화성능 평가방법 정립 및 화재에 대한 안전성 검토를 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

## 2. 열전도 수치해석

### 2.1 모델링 개요

실험체는 4000×600×180의 슬래브 형태로 다음 Fig 1과 같이 제작하였으며, Table 1은 내화가열실험의 계획을 나타낸 것이다. 내화 가열 실험 후 해석기법의 구축은 FORTRAN 90을 이용하였으며, 비정상 유한요소 해석 기법을 위해 일본 교토대학의 原田가 제작한 열전도모델을 사용하였다. Fig 1에 모델링에 대한 개요를 나타내었으며, 크기는 190x180mm를 대상으로 3절점 삼각형 요소를 이용하였다. 또한 요소분할은 20x20mm를 기준으로 경계부분에 급격한 온도구배를 고려하여 1/2로 분할하였다.

### 2.2 경계조건의 검토

내화 실험시 경계조건  $q_e$ 에 대하여 여주 방재시험연구원의 가열로의 크기4×3×1.6m, 체적  $V=19.2\text{m}^3$ , 표면적  $A=46.4\text{ m}^2$ , 평균 복사 길이  $\bar{L}=3.6(V/A)=1.49\text{ m}$  이고, 사용연료는 경유( $k=0.43\text{ m}^{-1}$ )이므로 식 (1)과 같으며,

Table 1. List of Specimens

Specimen	fck(MPa)/ fy(MPa)	Specimens Size(mm)	Heating Rate	W/B (%)
RC-F1	30/410	600*180 *4,000(H)	1hr*I	4.9
RC-F2			2hr*II	
RC-F3			2hr*I	

※ S: Sand, G: Gravel, FA: Fly ash, A: Admixtures \*I ( $T_{\infty} = 510t^{1/6} + 20$ ), \*II ( $T_{\infty} = 345\log(8t + 1) + 20$ )

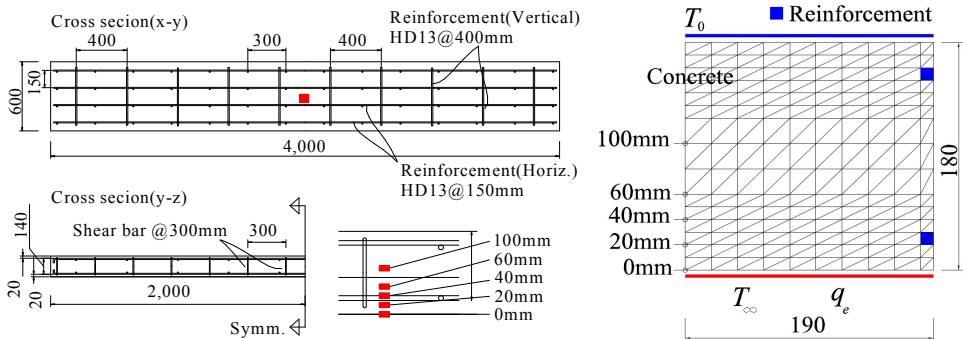


Fig 1. Analysis model for Specimens

$$\epsilon = 1 - e^{-k\bar{L}} = 0.4731 \quad (1)$$

다음으로  $q_h$ 에 대해서는, 강제대류, 가열면에 열 유속이 평행하게 작용하는 난류, 유속  $u_\infty = 8 \text{ m/s}$ 로 가정하면, 다음 식(2)와 같이 대류계수의 화제는 강제 대류 열전달이고, 난류이므로 평균 너셀트 수  $N_u$ 를 이용하였다. 이에  $3 \times 10^5 < Re_x < 3 \times 10^6$ ,  $13.4 < h < 33.3$ 범위에 존재한다. 이에따라 평균값  $h=23$ 을 이용하였으며, 경계조건은 식 (3)과 같다.

$$N_u = 0.037Pr^{1/3}Re_x^{4/5} \quad (\text{난류}) \quad (2)$$

$$q_e = (23 + \alpha_R)(T_\infty - T_0), \quad \alpha_R = 0.4731(5.6667 \times 10^{-8})(T_\infty^2 + T_0^2)(T_\infty + T_0) \quad (3)$$

$$\lambda_C(t) = \begin{cases} \xi[1.5 - (0.5/800)T] & (\lambda > 1.0) \\ \xi & (\lambda < 1.0) \end{cases}$$

$$\lambda_S = 40$$

$$\rho_C C_C(t) = \begin{cases} \rho_C(930) & (T < 90) \\ \rho_C(930) + \rho_C w_t \frac{(590 \times 4,190)}{20} & (90 \leq T < 110) \\ \rho_C(930) & (T \geq 110) \end{cases} \quad (4)$$

$$\rho_S C_S = 7,850(482)$$

재료의 열적 특성값은, 콘크리트( $\lambda_C$ ,  $\rho_C C_C(t)$ )와 철근( $\lambda_S$ ,  $\rho_S C_S$ )에 대한 고려값으로 온도·시간의존 열적특성을 온도함수로 치환하였으며, 다음 식(4)과 같이 나타낼 수 있다.

### 3. 해석기법을 사용한 화재성상예측

#### 3.1 실험결과치와 해석치 비교

실험결과와 해석결과를 다음 Table 2와 나타내었다. 해석결과와 비율(Exp/Ana)은 RC-F1의 30분(=0.84)를 제외한 모든 실험체에서 0.96~1.03의 차이가 있었으며 10%의 오차 범위안에 있었다.

Table 2. Verifications; Internal temperature distribution of Specimens

Specimen	Ambient Temp.	Temperature distribution												
		mm	30min		Exp/Ana	60min		Exp/Ana	90min		Exp/Ana	120min		Exp/Ana
			Exp.	Ana.		Exp.	Ana.		Exp.	Ana.		Exp.	Ana.	
RC-F1	II 60min	0	757.5	787.6	0.96	953.5	956.1	1.00						
		20	313.3	373.0	0.84	555.9	579.3	0.96						
		40	162.8	132.9	1.22	341.7	324.7	1.05		-			-	
		60	102.6	59.9	1.71	144.7	150.0	0.96						
		100	25.6	24.5	1.05	70.6	48.9	1.44						
RC-F2	I 120min	0	674.3	686.4	0.98	867.0	861.2	1.01	941.9	945.5	1.00	1011.4	1000.9	1.01
		20	320.1	310.3	1.03	532.3	519.3	1.03	648.6	632.8	1.03	730.5	713.4	1.02
		40	146.7	110.7	1.33	303.6	288.6	1.05	411.8	406.0	1.01	491.9	490.6	1.00
		60	97.2	52.4	1.85	131.6	129.9	1.01	207.5	243.2	0.85	273.1	324.2	0.84
		100	32.9	23.5	1.40	93.4	46.3	2.02	96.7	75.9	1.27	109.0	114.7	0.95
RC-F3	II 120min	0	785.4	787.6	1.00	964.4	956.1	1.01	1056.8	1046.5	1.01	1091.4	1110.3	0.98
		20	377.1	373.0	1.01	578.2	579.3	1.00	704.7	703.2	1.00	785.2	793.7	0.99
		40	161.1	132.9	1.21	317.6	324.7	0.98	429.3	451.5	0.95	515.0	544.6	0.95
		60	125.9	59.9	2.10	176.8	150.0	1.18	260.1	270.6	0.96	338.4	361.5	0.94
		100	57.0	24.5	2.33	100.7	48.9	2.06	119.3	77.1	1.55	140.1	124.5	1.13

### 3.2 변수에 따른 해석 결과

다음 Fig 2-a는 실험 결과값과 해석값을 통하여 유효성을 확인 후 표준화재 가열곡선 (ISO 834)의 시간별(1,2,3,4시간) 온도분포 해석결과, 슬래브(철근위치 20mm)의 ISO834 2시간에 의한 온도는 729°C, 기둥(철근위치 40mm)의 경우 ISO834 3시간은 641°C가 나타나, 내화성능 기준인 547°C에 만족하지 못하였다. 또한 Fig 2-b와 같이 함수율의 변화에 따른 해석결과는 상변화에 따른 잠열의 영향으로 수열온도의 구배가 작아지는 특성을 나타내어 효용성이 클 것으로 판단된다.

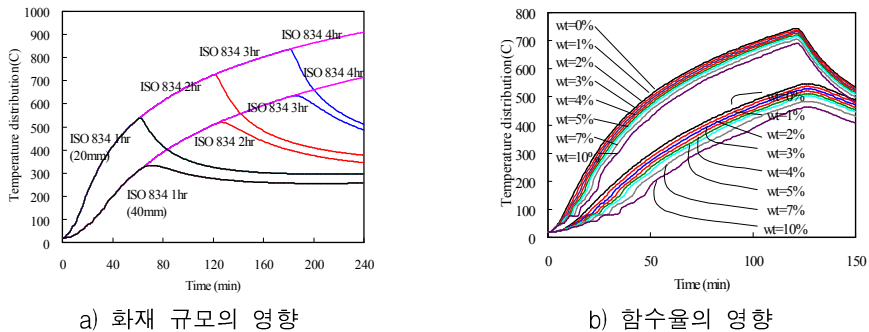


Fig 2. The Effects of heating rate and time(ISO 834) in reinforce concrete member

### 3. 결론

갤러킨 유한요소해석 방법을 응용한 비선형·비정상 온도분포해석 기법 구축 및 해석을 통하여 실험치와 해석결과치의 비율(Exp/Ana)은 RC-F1의 30분(=0.84)를 제외한 모든 실험체에서 0.96~1.03의 차이가 있었으며 10%의 오차 범위안에 있었다. 이에 대하여 수분이 동 및 이를 통해 추가되는 증발속도를 고려한다면 향후 화재성상에 근사한 예측이 가능하다고 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 2011년 건설교통기술연구개발사업 11첨단도시C01지원에 의하여 수행하였으며, 관계 자께 감사드립니다.

### 참고문헌

1. T.Z. Harmathy, "Fire Safety Design and Concrete", Lingman Scientific & Technical, (1993)
2. Kodur V., "World Trade Centre Disaster-Building performance Investigation", CSCE workshop at Toronto, (2003)
3. 이차돈, 신영수, 이승환, 이창은, "화재에 노출된 철근콘크리트 기둥의 수치해석적 열전달 모델", 한국콘크리트학회 논문집, 제 17권, 제 6호, (2005), pp871-878
4. 한병찬, 권영진, 김재환, 신영수, 최은규, "온도의존성 열특성계수를 고려한 화재에 노출된 철근콘크리트 골조의 해석적 연구", 한국콘크리트학회 논문집 제 19권, 제 3호, (2007), pp, 283-292.
5. 原田和典, "2次元有限要素法による熱傳導解析プログラム", 京都大學博士論文, (1989)