고온하에서 철근콘크리트부재의 온도해석
Thermal Analysis of Reinforced Concrete Members at High Temperature

이태규*
Lee, TaeGyu

ABSTRACT

In this paper, the prediction method of internal temperature for high strength concrete members at high temperature is presented. Finite element method is employed to facilitate thermal analysis for any position of member. In case of water evaporates inside the concrete member by high temperature, the evaporation heat that absorb surrounding temperature is occurred. This effect of the evaporation heat is applied. And the model equations of the material characteristics of high strength concrete by high temperature are proposed.

To demonstrate the validity of this numerical procedure, the prediction by the proposed algorithm is compared with the test results of other researchers. The proposed algorithm is good agreement with experimental results including the phenomenon that temperature by the evaporation heat is lost.

1. 서 론

콘크리트는 철도노반 구조물뿐만 일반 토목 구조물, 건축 구조물 등 모든 구조물에 폭넓게 적용되어 사용되고 있다. 특히 최근에 들어 각종 구조물의 대형화 추세에 따라 장대교량, 특수교량, 고층 건축물 등이 다양하게 활용되고 있으며 이에 따라 고강도 및 고성능 콘크리트의 사용이 필수적으로 되어가고 있는 추세에 있다. 다른 구조물들과 마찬가지로 콘크리트 구조물 역시 일반적으로 사용성(serviceability)과 안전성(safety)을 만족시키는 조건에서 설계를 하게 되지만, 고강도 콘크리트의 경우 화재 발생시 인명피해와 재산손실에 직접적인 영향을 미치기 때문에 일정한 수준 이상의 내화성능을 확보할 필요성이 절실히 제기되고 있다. 이에 따라 화재에 대한 안전성(fire safety)도 중요한 설계조건으로 급부상되고 있으며, 본 연구에서는 화재와 같은 고온을 받는 철근콘크리트 부재에 대한 온도해석을 수행하고자 한다.

2. 기화열을 고려한 온도해석

2.1 열전달 평가

철근콘크리트 기둥이 화재에 노출되는 동안의 열전달 특성 변화에 따른 성능저하를 평가하기 위해서는 고온에서의 열전도율, 비열, 열팽창률 등 재료의 물리적 특성 평가와 압축강도 저감계수, 탄성계수 저감계수, 응력-변형률 곡선 및 크리프 변형 등 재료의 역학적 특성 평가가 필요하며, 이러한 값들을 바탕으로 하여 가열온도, 하중 등 실제 화재성상과 동일한 조건에서 콘크리트 내부온도 상승에 따른 열전달 거동 해석이 요구된다.

* 우송대학교 철도건설환경공학과, 정회원
E-mail : tglee@wsu.ac.kr
TEL : (042)629-6714 FAX : (042)636-2672

또한 화재발생시 콘크리트 내부의 수분이 고온으로 인하여 증발하게 되며, 이로부터 증기압이 발생하게 된다. 액체가 기화하여 기체로 변화될 때 주변의 열을 흡수하게 되는데 이와 같이 주위로 부터 흡수한 열을 기화열이라 한다. 일반적으로 100℃의 물 1kg을 수증기(기체)로 만드는 데 필요한 기화열은 539kcal이다. 기화열은 액체의 분자 사이의 힘을 제거하여 분자를 따로따로 이산시키기 위해 사용하는 에너지이므로 온도를 상승시키는 효과가 없는 숨은 열의 일종이며, 온도에 따라 다소 변화되는 것으로 알려져 있다. 이와 같이 소진되는 열이 포함된 열전달 평형방정식은 비정상상태(transient)로 표현되며, 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+q^B= -\rho_c c_u \frac{\partial T}{\partial c}\frac{\partial c}{\partial t} \qquad (2.1)$$

열전달 해석과정에서 재료의 물리적인 특성으로 평가되는 열전도율 및 비열의 모델은 다음과 같이 도표 1에 나타난 수식을 사용하였으며, 고온에서의 변화량은 EuroCode 2의 모델식[1]을 적용하였다.

도표 1. 재료의 열적 특성치

특성치	표준온도(20℃)에서의 값	고온에서의 변화량
열전도율 λ (kcal/m·hr·℃)	$\lambda = \frac{\sum \lambda_i \cdot v_i}{v} \times r_{\text{final}}$ 여기서, λ_i, v_i : 각 구성성분의 열전도율과 체적 v : 콘크리트의 전체체적 r_{final} : 콘크리트의 최종 수화도	$\lambda = 1.17-0.117\left(\frac{T}{100}\right)+0.0049\left(\frac{T}{100}\right)^2$
비열 c (kcal/kg·℃)	$c = \frac{1}{\rho}[r_{\text{final}}(c_c w_c + c_f w_f + c_w w_w) + c_s w_s + c_g w_g]$ 여기서, c_i, w_i : 각 구성성분의 비열과 중량비 ρ : 콘크리트의 단위중량	$c = \begin{cases} 0.215 & 0 \leq T \leq 100℃ \\ 0.191+2.39\times10^{-4}T & 100 < T \leq 200 \\ 0.215+1.19\times10^{-4}T & 200 < T \leq 400 \\ 0.263 & T > 400℃ \end{cases}$

2.2 콘크리트 내부의 수분량 평가

기화열을 고려한 콘크리트 부재의 온도해석을 수행하기 위해서는 각 해석시간에 존재하는 콘크리트 내부의 수분량을 정확하게 파악하는 것이 매우 중요하다. 따라서 Fick의 확산법칙에 근거한 별도의 수분확산 해석 프로그램을 개발하여 사용하였으며, 이로부터 임의의 온도해석시간에 대한 콘크리트 부재 내부의 각 위치에서의 수분량을 산정하고 이 값을 열전달 평가시 적용하였다.

3. 가열실험 및 결과비교

3.1 개요

화재에 의한 철근콘크리트의 부재내 온도분포를 파악하기 위하여 도표 2와 같은 실험변수를 선택하였

다. 축방향 철근비와 띠철근 간격은 동일하게 하였으며, 폭렬 저감을 위하여 폴리플로필렌(PP) 섬유를 사용하고, 길이는 10mm, 사용량은 0.2vol%로 계획하였다. 콘크리트 압축강도는 80MPa로 설정하였다.

표 2 실험 변수

시험체 크기(mm)	철근비(%)	띠철근 간격(mm)	섬유 상세		
			직경	길이	혼입량
305×305×700	2.1	150	40μm	10mm	0.2vol%
500×500×700	2.0	150			
700×700×700	2.0	150			

표 3 콘크리트 배합비

설계강도 (MPa)	W/B (%)	S/a (%)	unit weight (kg/m^3)						SP
			W	C	FA	SF	S	G	
80	25	42.0	165	515	99	46	629	878	13.2

표 4 콘크리트 물성치

섬유길이 (mm)	slump flow (cm)	air content (%)	compressive strength (MPa)	
			28 day	test (91 day)
10	56/57	2.0	90	111

단면 305×305mm의 경우 모서리 축방향 철근은 D19, 중간 축방향 철근은 D16을 사용하였으며, 단면 500×500mm의 경우 모서리 축방향 철근은 D22, 중간 축방향 철근은 D19을 사용하였고, 단면 700×700mm의 경우 모든 축방향 철근을 D25를 사용하였다. 그리고 띠철근은 D10을 사용하였으며, 피복두께는 40mm이다[2].

3.2 가열 실험

온도 평가를 위하여 주철근 및 콘크리트 내부에 그림 1과 같이 열전대를 설치하고 콘크리트를 타설한 후 시험 시까지 기중 양생을 실시하였다. 가열 실험은 콘크리트 타설 후 91일이 경과한 시점에서 방재시험연구원의 비가력 내화시험 가열로를 사용하여 가열실험을 실시하였다. 가열은 각 시험체당 1회씩 실시하였으며, 가열온도는 ISO-KS 곡선을 준용하여 3시간 동안 행하였다.

3.3 결과 비교

단면의 크기에 따라 콘크리트 내부로의 온도변화를 살펴보면 단면 305×305mm에서는 가열 후 60분 정도에서부터 콘크리트 중앙부에서 수분 증발로 인한 기화가 발생되고 있으며, 단면 500×500mm에서는 가열 후 약 160분 정도에서 콘크리트 중앙부에서 기화가 발생되고, 단면 700×700mm에서는 실험 종료시간인 180분까지도 콘크리트 중앙부에서는 온도변화가 거의 발생되지 않고 있음을 알 수 있다.

온도변화는 화재에 직접 접하는 표면 부위에서 급격한 온도상승이 발생하며, 이에 따라 콘크리트 내부의 수분이 증발하면서 주위의 열을 흡수하는 기화열 진행시간도 짧은 기간 내에 완료되고 있다. 이에 반해 콘크리트 내부에서는 온도상승효과가 표면에 비하여 느리기 때문에 기화열 진행시간도 상대적으로 길게 진행되고 있음을 알 수 있다.

해석결과에서도 이와 같이 실제적으로 발생되는 기화열에 의한 열소진 현상이 뚜렷이 보여지고 있으며, 실험치와도 유사한 거동을 보이고 있는 것으로 나타나고 있다.

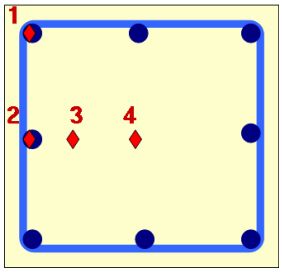

그림 1 열전대 설치 위치

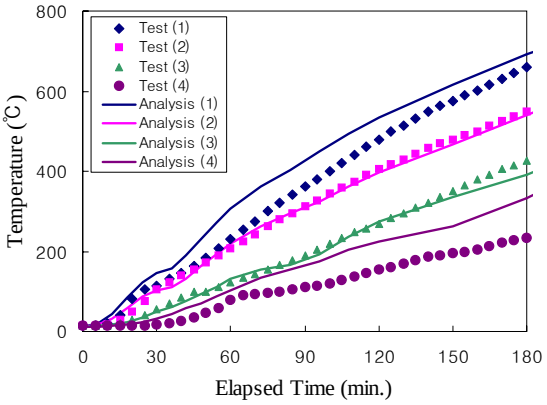

그림 2 온도 분포(305×305mm)

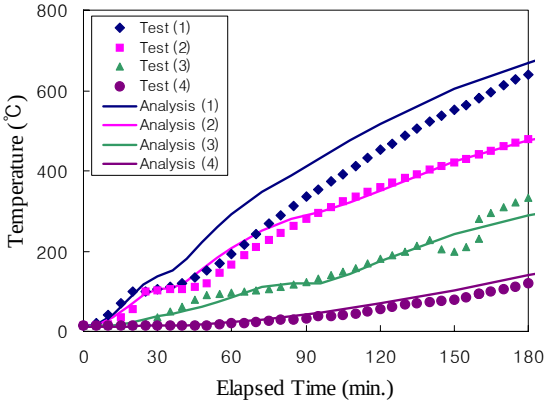

그림 3 온도 분포(500×500mm)

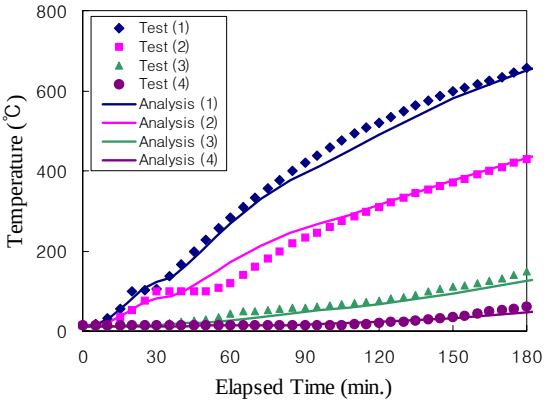

그림 4 온도 분포(700×700mm)

4. 결 론

1) 고온에 의하여 콘크리트 내부의 수분이 증발하면서 주위의 열을 흡수하는 기화열을 고려한 온도해석 기법을 개발하였다.
2) 기화열을 고려하기 위하여 별도의 수분확산 루틴을 개발하여 임의의 해석시간에서의 콘크리트 내부 수분량을 산정하여 열전달 평가에 적용하였다.
3) 실제 실험에 의한 결과와 비교해 보면 기화열에 의한 열소진 현상을 잘 예측하고 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07 차세대고속철도 A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. British Standard Institution, "EuroCode 2 : Design of Concrete Structures", 2002.
2. "건축구조물에 사용되는 고강도 콘크리트 기둥의 내화성능 개선연구“, 삼성물산(주) 건설부문, 2006.