

A-03

화재 시 콘크리트의 열특성계수가 비정상 열전달해석에 미치는 영향

An Effectiveness of Temperature-Dependency Thermal Properties in Transient Thermal Analysis of Concrete Structures Exposed to Fire

이재영* · 한병찬** · 김재환** · 권영진***

Lee, Jae Young* · Han, Byung Chan** · Kim, Jae Hwan** · Kwon, Young Jin***

Abstract

This paper is currently being conducted to develop a nonlinear finite element analysis methods for predicting the structural behavior of reinforced concrete structures, exposed to fire. The changes in thermal parameters are discussed from the point of view of changes of structure and chemical composition due to the high temperature exposure. Although, this study considers codes standard fire for reinforced concrete frame, any other time-temperature relationship can be easily incorporated.

key words : Reinforced concrete structures, Nonlinear transient heat flow analysis, nonlinear FEA, DIANA, Fire

1. 서 론

철근콘크리트 구조는 열전도율 및 열확산계수가 현저히 낮아 우수한 내화구조로 인식되었기 때문에 화재 이후에도 간단한 보수보강을 통하여 구조물이 재사용 되어왔다. 그러나 철근콘크리트가 장시간 고온에 노출되었을 경우에는, 심각한 성능저하 및 손상이 발생할 가능성이 매우 높다.

그러나 재료의 열적 특성 및 단위 부재해석에 관한 연구만으로는 지지조건이나 초기응력상태, 단면내의 열응력을 고려한 구조물의 거동이나 강도저하의 정도를 파악하기 힘들다. 또한, 단위부재가 아닌 구조물의 내화성능을 실험적으로 규명하는 것은 그 규모 및 경제적 측면에서 한계가 있으며, 이러한 구조에 대한 해석적 연구의 필요성이 제기되고 있다. 따라서 일반적으로 열전달 해석적 기법은 일반적으로 비정상 온도분포해석(Nonlinear transient heat flow analysis)을 이용하고 있다. 그러나 비정상 온도분포해석에 있어서는 콘크리트와 철근에 대한 온도의존성 열특성성을 온도함수로 치환하여 이를 고려하는 방법은 아직까지 정량화되어 있지 않으며, 이러한 여러 시간의존성 열특성 계수가 비정상 열전달해석에 미치는 영향에 관한 연구가 미진한 상태이다.

그러므로 본 연구에서는 이러한 온도의존성 열특성 계수가 비정상온도분포 해석에 미치는 영향 및 각 변수들이 골조의 비선형 거동에 미치는 영향을 분석함으로써 내화성능 평가방법의 정립 및 화재에 대한 안전성 검토를 위한 기초 자료를 제시하고자 하였다.

2. 대상 콘크리트 구조물의 해석 개요

2.1 골조의 유한요소 모델링 개요

비정상 열전달해석 시 콘크리트의 시간의존성 열특성 계수가 해석에 미치는 영향을 분석하기 위하여 대상 콘크리트 구조물 해석을 수행하였다. 그림 1은 본 연구에서 대상으로 한 철근콘크리트 구조물에 대한 유한요소(FE) 모델링 개요를 나타낸 것이다. 대상구조물은 경간 8,000 mm, 층고 6,000 mm의 1경간을 대칭성을 고려하여 4,000×3,000×200 mm(1/8)로 분할하여 경계조건을 부여하였다. 요소분할(Mesh)은 100×100 mm를 기준으로 화재에 직접 노출되는 부분을 세분화하였다. 요소는 콘크리트의 경우 3D Solid 요소(CHX60), 철근의 경우 DIANA의 "Embedded Reinforcements"를 적용하였으며, 온도 하중을 고려하기 위하여 경계면은 가상의 요소(BQ4HT)로 모델링하였다. 해석에 사용된 재료모델은 각

* 학생회원 · 호서대학교 소방방재학과 E-mail: ljy0003@hanmail.net
 ** 비회원 · 에이엠에스엔지니어링 · 기술이사 · 공박
 *** 정회원 · 호서대학교 소방방재학과 · 교수

각 Drucker-Prager($c=8.08, \sin \phi=0.5, \sin \psi=0.5$)와 Von Mises 항복조건을 만족하는 계수를 결정하여 적용하였으며 역학적 특성은 표 1과 같다. 또한, 경계해석 조건으로는 ISO 834(KS F 2257)를 이용하였다.

표 1. 분석에 사용되는 콘크리트의 역학적 특성

Objects	E_c (GPa)	f_c (MPa)	f_t (MPa)	Expansion coef.	Time Dependence
Concrete	28	25	2.2	1.2E-5	Fig.2-3
Reinforcement	210	400	400	1.2E-5	Fig.4-5

2.2 시간의존성 열특성계수의 적용

콘크리트와 철근의 온도에 따른 열적특성계수는 그림 2 및 3과 같다. 시간의존해석을 위하여 비열과 열전도율에 대한 온도의 영향을 살펴보면 다음과 같다. 비열은 골재의 밀도와 함수량으로 결정되며, 온도가 증가하게 되면 수분증발과 골재의 성분 변화 시 잠열에 의하여 비열 증가가 나타나게 된다.

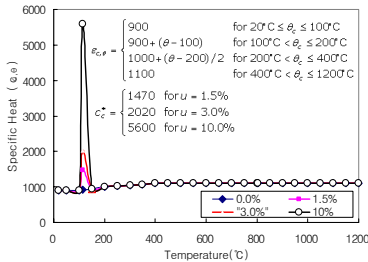


그림 2. 콘크리트의 함수율에 따른 비열 C_p (J/kg°C)

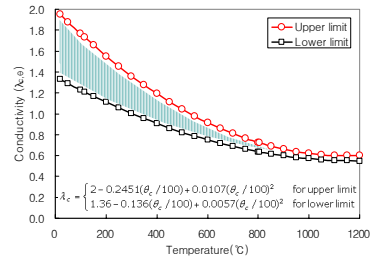


그림 3. 콘크리트의 열전도율 λ (W/m²°C)

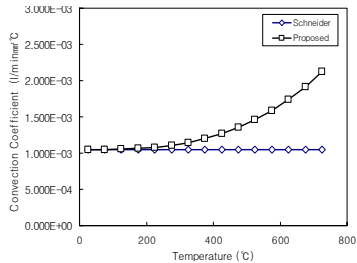


그림 4. 콘크리트 열전도의 등가열전달계수 (J/min · mm²°C)

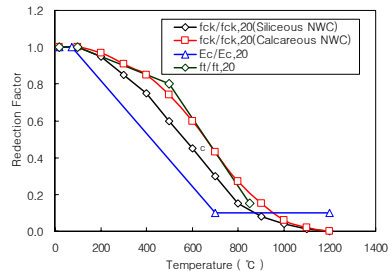


그림 5. 콘크리트의 다른 역학적 특성

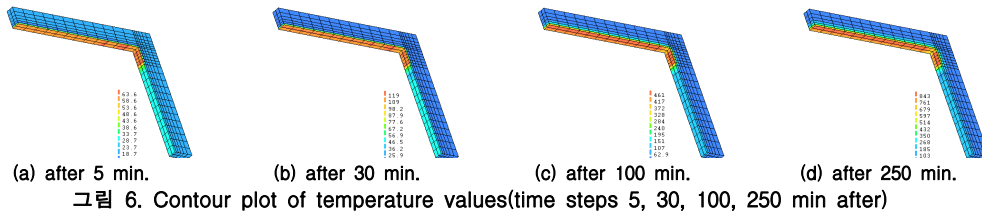
그림 2는 EuroCode 2에서 제시하고 있는 콘크리트의 비열에 대한 온도함수를 나타낸 것으로, 콘크리트는 115°C 근처에서 콘크리트 내 함유된 수분의 증발에 의한 비열의 변화를 고려하고 있으며, 함수율에 따라 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 콘크리트의 열전도율(Thermal Conductivity, W/m°C)은 사용골재의 종류, 비중, 콘크리트 강도 등에 따라 많은 차이를 보이는데 일반적으로 0.8~2.0 W/m°C 값을 갖으며, 간편 해석의 경우 1.3 W/m°C로 규정하고 있다.¹⁾ 그러나 열전도율 또한 온도의존성을 갖으며 이러한 열전도율의 온도함수가 여러 연구자들에 의해 제안되었다.²⁾³⁾ 그림 3은 EuroCode 2⁴⁾에서 콘크리트의 열전도율을 온도함수로 나타낸 것으로 1.36~2.3 W/m°C 범위에 있음을 알 수 있다. 또한 고온 조건에서 공기 중의 대류와 복사 에 의한 열전달 경계조건 또한 주요 영향인자가 된다. 열전달 경계조건은 콘크리트 표면의 수분정도, 기압 차에 의한 공기의 이동속도, 열전달 면적, 온도 의존성 등을 갖기 때문에 값의 결정이 매우 어렵다. 일반적으로 100°C 이하에서는 내부 23 W/m²°C, 외부 9 W/m²°C를 이용하고 있으며, Khan 등은 20 W/m²°C를 제안하고 있다.⁵⁾ 그러나 이는 화재와 같은 고온 환경에서의 값이 아니며, 대류 경계만을 대상으로 한 것이므로, 본 연구에서는 다음과 같이 대류경계와 복사열 경계를 고려한 등가 열전달계수(Equivalent heat transfer coefficient)의 적용성을 평가하고자 하였다.

이상과 같은 온도의존성 콘크리트 표면 열전달계수(등가열전달계수)를 그림 4에 나타내었다. 그림에서와 같이 대류 및 복사를 고려한 등가 대류계수의 경우 온도차가 크기 않은 초기에는 기존 제안식⁶⁾과 유사한 값을 가지지만 온도차가 커지는 경우 등가 대류계수의 값이 크게 증가하고 있음을 알 수 있다.

3. 해석결과 및 분석

3.1 해석결과

그림 6은 비정상 온도분포해석 결과에 대하여 온도이력에 대한 골조 내 깊이별 온도 및 그 분포를 나타낸 것이다. 해석결과 골조의 열전달 특성은 250분에 표면온도가 852℃에 이르는 것을 나타냈으며, 철근의 온도(피복으로부터 50 mm)는 120분(2시간)후 251℃로써 콘크리트의 피복두께가 충분한 내화성능을 발현하고 있음을 알 수 있었다. 그러나 화재가 지속되게 되면 180분에는 350℃, 250분에는 448℃까지 상승하는 것으로 나타났다.



3.2 온도의존성 열특성계수의 영향 분석

(1) 등가 열전달계수에 대한 비교분석

철근콘크리트 골조 경계면의 온도경계조건에 대하여 대류계수가 일정한 경우와 등가 대류계수를 적용하는 경우를 비교분석하여 그림 7에 나타내었다. 그림으로 부터 가열 후 초기(50분)에는 대류계수에 의한 콘크리트의 온도특성이 큰 차이를 보이고 있지 않지만, 약 50분 이후에 등가 대류계수를 적용하는 경우가 큰 온도 특성을 보이고 있음을 알 수 있었다. 특히 250분에는 676℃와 859℃(등가 대류계수 적용)로써 27%이상의 온도상승이 예측되었다. 전술한 바와 같이 등가대류계수는 열의 대류특성과 복사특성 및 온도의존성을 고려한 것으로, 보다 실제상황을 근접하게 구현하고 있다고 판단되며, 구조물의 열 해석 시 기존의 일정 대류계수를 적용하는 경우 실제 온도를 과소평가할 가능성이 있을 것으로 판단되었다.

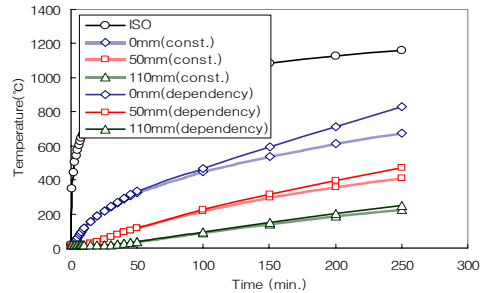


그림 7. Comparison to convection coefficients

(2) 콘크리트 함수율

그림 8은 콘크리트 내에 포함되어 있는 수분량(함수율, 그림 2)에 따른 온도해석 결과를 나타낸 것이다. 그림으로

부터 콘크리트 내의 함수율이 클수록 온도 상승 구배는 완만한 것으로 나타났다. 특히 그림 8(b)에서 함수율이 10%인 경우 온도 115℃부분에서 잠열에 의한 열용량의 급격한 변화로 인하여 온도구배가 매우 완만

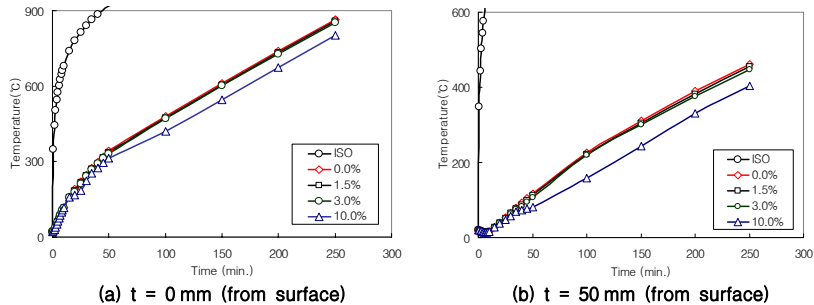


그림 8. 함수율에 따른 온도특성 비교

한 것을 확인할 수 있었다. 그러므로 구조물의 열해석 시에는 콘크리트 내부의 함수율에 대한 적절한 평가를 통하여 보다 정확한 해석이 가능할 것으로 판단되었다.

(3) 열전도율 및 열용량의 온도시간 의존성 특성 비교

콘크리트의 열전도율 및 열용량의 온도시간의존성 $\gamma \cdot \mu$ 에 대한 분석을 위하여 표 2와 같이 열전도율 및 열용량이 일정한 경우(I), 각각이 온도의존성을 갖는 경우(II, III) 그리고 모두 온도의존성을 갖는 경우(IV) 총 4가지에 대하여 해석을 하였다. 해석조건은 모든 경우에 대하여 콘크리트 함수율 3%와 등가대류계수를 적용하였다.

표 2. Time dependency of thermal characteristics

Case No.	Thermal Conductivity (J/min · mm ² ·°C)	Thermal Capacity (J/mm ² ·°C)	Note
I	Const.(6.33E-1)	Const.(2.07E-3)	Consider to Equivalent convection coefficients moisture content by weight u =3.0%
II	Time Dependency	Const.(2.07E-3)	
III	Const.(6.33E-1)	Time Dependency	
IV	Time Dependency	Time Dependency	

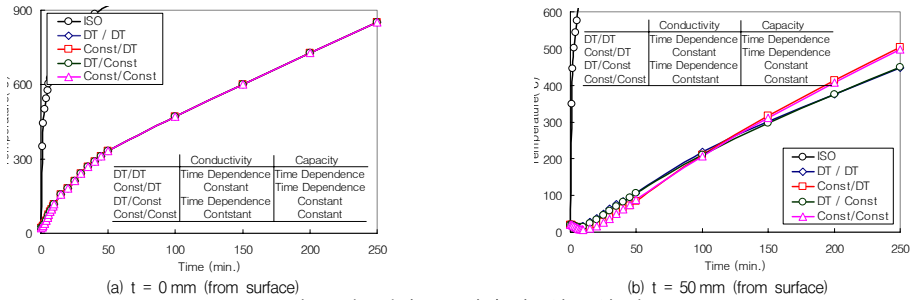


그림 9. 열용량의 온도시간 의존성 특성 비교

그림 9에 콘크리트 표면 및 50 mm 깊이의 온도에 대한 해석결과를 나타내었다. 콘크리트 표면은 그림 10(a)와 같이 열전도율 및 열용량의 온도의존성 유무에 관계없이 유사한 값을 나타내었다. 그러나 50 mm 깊이의 온도에 대한 해석결과에서는 상이한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 먼저 온도 포락선 특성에 있어서는 I, III과 II, IV가 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다. 또한 초기에는 해석 II, IV의 온도 구배가 I, II의 경우보다 높지만 약 100분 부터는 이와는 반대의 현상을 관찰 할 수 있었다. 이를 통하여 열전도율 및 열용량에 대한 온도의존성을 고려하여 열 해석 및 평가를 하는 경우 초기상태에서 화재로 인한 부재내부의 온도분포를 보다 안정적으로 평가할 수 있을 것으로 판단되었다.

4. 결 론

화재 등의 고온 환경에서 시간의존성 열특성계수가 비정상온도분포 해석에 미치는 영향 및 각 변수들이 골조의 비선형 거동에 미치는 영향을 분석하고자 한 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 연구에서 수행된 고온 환경하의 철근콘크리트 구조물에 대한 비정상 온도분포해석 및 비선형 FEA해석 기법은 온도에 따른 재료의 열적, 역학적 성능 및 화재-온도곡선을 자유롭게 고려할 수 있으며, 추후 관련해석에 용이하게 사용될 수 있을 것으로 판단되었다.
- (2) 등가 대류계수는 열의 대류특성과 복사특성 및 온도의존성을 고려한 것으로, 화재에 의한 철근콘크리트 구조부재의 열전달 특성을 보다 실제상황에 근접하게 구현할 수 있을 것으로 판단되었다.
- (3) 해석을 통하여 콘크리트 내에 포함된 수분이 온도 상승 구배를 완화시키는 것을 확인할 수 있었으며, 이를 통하여 구조물의 열해석 시 함수율에 대한 적절한 평가를 통하여 보다 정확한 화재의 구현이 가능할 것으로 판단되었다.
- (4) 콘크리트의 열전도율 및 열용량에 대한 온도의존성을 고려함으로써 열해석 시 초기상태에서 화재로 인한 부재내부의 온도분포를 보다 안정적으로 평가할 수 있을 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. Eurocode2, "Design of Concrete Structures Part 1, 2 General Rules-Structural Fire Design", DO ENV 1992, 1996
2. T.Z. Harmathy, "Fire Safety Design and Concrete", Lingman Scientific & Technical, 1993
3. CEB Bulletin D' Information No. 208(RILEM-Committee 44-PHT), "Fire Designing of Concrete Structures", 1991
4. Eurocode4, "Design of composite steel and concrete structures Part 1,2 ", Structural Fire Design, CEN/TC250/SC4, N39, prENV 1994-1-2, Second Draft, 1992
5. Khan, A. A., Cook, W. D. and Mitchell, D.(1998), "Thermal properties and transient thermal analysis of structural members during hydration", ACI Materials Journal, pp. 293-302, 1998
6. U. Schneider, et al, "Concrete at High Temperatures- A General Review", Fire Safety Journal, pp 55-68, 1987
8. 한병찬, 권영진, 김재환, 신영수, 최은규, "온도의존성 열특성 계수를 고려한 화재에 노출된 철근콘크리트 구조의 해석적 연구" Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.19, No.3, pp. 283~292, June, 2007