

화재에 대한 콘크리트구조물의 안전성 해석

방명석*

*충주대학교 안전공학과

A Safety Analysis on the Fire Endurance of Concrete Structures

Myung-Seok Bang*

*Department of Safety Engineering, Chungju National University

Abstract

Fire disasters have frequently happened in concrete structures, which resulted in severe structural damages and unsafety. In this case, the method which had evaluated the safety of damaged structures was often unaccepted from most of stakeholders and engineers. The objective of this study is to develop the procedure and method to be able to determine the safety. Numerical simulation was applied to produce the maximum temperature and temperature distribution. Nextly, temperature propagation analysis was performed to plot temperature gradients at each depth and location. The material strength curve versus temperature was applied to determine the safety of concrete structures damaged by fire. The maximum temperature should be calibrated considering real fire records ; magnitude, intensity, situation etc. The results shows that the selected procedure and method was applicable and practical.

Keywords : Fire, Concrete Structure, Strength, Safety, Temperature, Simulation

1. 서론

2003년에 발생하여 큰 인적·물적 피해와 함께 교통 중단과 같은 사회적 비용을 발생시킨 대구 지하철 화재와 최근(2010.12.13.)에 경기도 부천시 서울외곽고속도로 중동IC하부 공간에서 발생한 화재는 구조물의 주요부재가 파단됨으로서, 안전상 철거가 불가피해짐에 따라서 수 개월간 지하철과 고속도로가 폐쇄되는 막대한 경제·사회적 피해가 발생하였다. 이러한 주요 구조물의 화재피해는 인명과 재산피해는 물론, 하루에 200,000대 이상의 차량이 통행하는 핵심교통시설의 사용중단이라는 중대한 문제를 야기하고 있다. 후속 대책에 있어서도 화재피해를 받은 범위와 정도의 규명은 재개통을 위한 복구와 보강의 범위와 예산·기간 등을

결정하는데 매우 중요하다. 따라서 화재피해를 받은 구조물의 정확한 안전성 평가방법의 개발은 매우 필요하다. 화재피해를 받은 구조물의 안전성 평가를 위해서는 발생한 화재에 의한 온도분포곡선이 필요하며, 이 온도곡선을 구하기 위해서는 화재에 의한 열방출량이 필요하다. 열방출량은 화재가 발생한 시설물의 종류, 위치, 공간상황 등에 따라서 다르다. 예를 들어서 부천 중동IC화재사고는 지면에서 교량하면까지 10m 이상떨어져 있고 개방된 공간이었으나, 유조차의 기름이 전소될 때까지 온도가 1000°C 이상 오르고 화재가 1.5시간이상 지속되어 발열량이 커지면서 강재가 파단되고 콘크리트가 폭발되는 피해가 발생하였다. 시설물의 종류나 위치에 따른 화재규모를 산정하기 위해서 최근에 많은 연구가 진행되었다. Ko 등1)~3)은 화재

† 교신저자: 방명석, 충북 충주시 대학로 50 충주대학교 안전공학과

M · P: 011-9727-2817, E-mail: mabang@cjnu.ac.kr

2011년 3월 1일 접수; 2011년 6월 7일 수정본 접수; 2011년 6월 9일 게재확정

에 대한 수치모사를 실시하여 화재의 위치나 규모에 따라서 그 특성과 문제점을 분석하였다. Lim 등4)은 콘크리트 부재실험을 통하여 화재발생 시 콘크리트 재료의 물성변화를 분석하였고, Bang5)은 화재피해를 받은 강구조물의 내화해석방법을 연구하였다. 화재에 의한 최고온도나 온도분포를 구하기 위해서는 직접 화재 실험을 실시하는 방법이 있으나 시간과 비용이 많이 필요하므로, SFPE6)등의 발열량 실험결과를 FDS프로그램7)등으로 수치모사-용(numerical simulation)하여 산출하고, 이렇게 구한 최고온도나 온도분포 데이터를 활용하여 내화해석을 실시한다. ASTM 1198)에서는 최고온도 1000°C인 표준온도가열곡선을 설계용으로 제시하고 있다. Bang5)의 연구에서 SFPE의 발열량을 이용하여 FDS로 산출한 최고온도는 ASTM 119의 최고온도보다 매우 작다. 실제로 화재 시 최고온도는 유사한 공간조건하에서도 다를 수 있다.

본 연구에서는 콘크리트구조물의 내화해석을 수행하여 안전성을 평가하는 방법을 연구하였다. 대부분이 콘크리트구조인 지하철 정거장에서 화재가 발생한 경우를 가정하여 FDS를 이용하여 최고온도와 온도분포를 구한 후, 최고온도 1000°C로 보정한 온도곡선을 적용하였다. 즉, 본 연구에서도 실제 현장에서 가장 위험한 경우를 가정하여 수치모사한 결과를 기초로 수치해석을 실시하였다.

2. 화재 시 재료의 물성 변화

2.1 콘크리트

콘크리트는 압축강도에 저항하는 대표적인 구조재료로, 고온 가열되는 콘크리트에서 압축강도의 변화는 매우 중요하다. 또, 콘크리트의 압축강도는 다른 강도나 탄성계수와 상관성이 높고 콘크리트의 역학적 성질을 나타내는 대표적인 지표로서 활용되고 있다. <Fig. 1>은 ACI216R-89 (Reapproved 2001)9)에서 제시하는 온도별 콘크리트의 강도감소율이다. 여기에서는 설계 기준강도의 40%(stressed to 0.4fc') 하중을 가하거나, 하중을 가하지 않은 상태(unstressed)에서 온도를 상승시키면서 실험한 압축강도의 변화와, 무하중 상태에서 화재온도를 겪은 후 실험한 잔류압축강도(unstressed residual)의 변화를 보여주고 있다. 온도가 100°C까지는 상온의 경우에 비하여 그다지 변화가 없지만, 200°C를 초과하면 강도의 저하가 현저하게 되고, 온도가 500°C정도가 되면 강도는 상온의 경우의 1/2정도까지 저하된다. 고온에서 콘크리트의 탄성계수는 압축강

도와 같이 온도가 높아짐에 따라서 저하비율이 커지게 된다. 그러나 저하비율은 압축강도의 경우보다 크고, 온도가 400°C에서 상온에 비하여 약 30%, 500°C에서 20% 정도까지 저하된다. 화재 발생 후 구조물의 안전성을 검토하기 위해서는 <Fig. 19>을 이용하여 온도가 변했을 때의 부재의 공칭강도를 산정한다.

콘크리트의 열전도율은 구성 재료의 열전도율에 의해 결정되며 시험시의 열전도율에 영향을 미치는 주요인은 함수량, 골재의 종류, 배합비 및 시멘트의 종류, 온도와 공기량 등에 따라 다르다. 본 연구에서는 EUROCODE 210)에서 제시한 다음식을 이용하여 온도에 따른 열전도율(λ_c)과 비열(C_c)을 산출하였다.

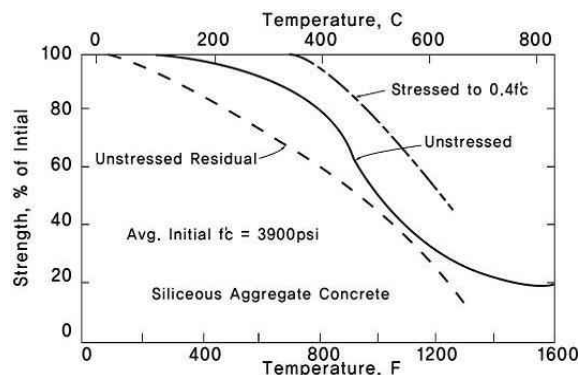
$$\lambda_c = 2 - 0.24 \left(\frac{\theta}{120} \right) + 0.012 \left(\frac{\theta}{120} \right)^2 \quad (1)$$

$$C_c = 900 + 80 \left(\frac{\theta}{120} \right) - 4 \left(\frac{\theta}{120} \right)^2 \quad (J/kgK) \quad (2) \quad \text{여기서,}$$

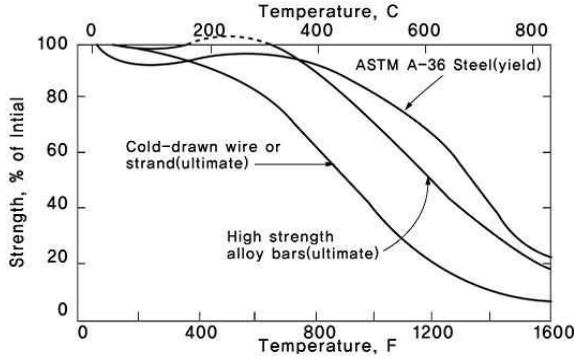
θ 는 온도($20^\circ\text{C} < \theta \leq 1,200^\circ\text{C}$)이다.

2.2 강재

<Fig.2>는 온도변화에 따른 철근의 인장강도(High strength alloy bar)와 항복강도(ASTM A-36 steel), 그리고 강선(wire)의 인장강도 변화를 나타낸 것이다. 약 130~200°C까지는 강재의 성질에 큰 변화가 일어나지 않지만 약 200°C를 초과하면 강재의 거동은 비선형적인 특성을 나타낸다. 온도가 증가함에 따라 철근의 강도가 저하되고 약 500°C 이상에서는 심한 변화가 시작된다. 극한강도는 100~300°C 사이에서 변형시효(strain aging)에 의해서 일시적으로 소폭 증가하는 특이한 현상을 보이나 그 이상의 온도에서는 강도가 감소하며 약 600°C 정도에서 극한강도와 항복강도는 상온에서의 강도에 절반정도로 감소된다.



<Fig. 1> Strength versus temperature of concrete member



<Fig. 2> Strength versus temperature of structural steel

2.3 내화설계 기준

국내의 내화설계기준으로는 국토해양부11)와 한국표준협회12)에서 제정한 기준이 적용되고 있으나, 주로 건설용 재료나 자재의 내화성 평가기준이 대부분이며, 구조물의 내화해석이나 설계를 위한 기준은 미미하다.

즉, 온도변화에 따른 강도, 탄성계수, 기타 물성치 등이 제시된 기준이 없다. 따라서 구조물의 내화해석이나 내화설계 시에는 외국의 기준(ACI 216R-2001, ASTM E119, EUROCODE 2, NEPA 22013))을 이용하는 실정이다. 본 연구에서도 콘크리트와 철근의 강도, 표준온도곡선, 열전도계수, 구조물의 내화시간(슬래브 2시간, 보와 기둥 3시간)을 적용하는 경우에 외국의 기준을 사용하였다.

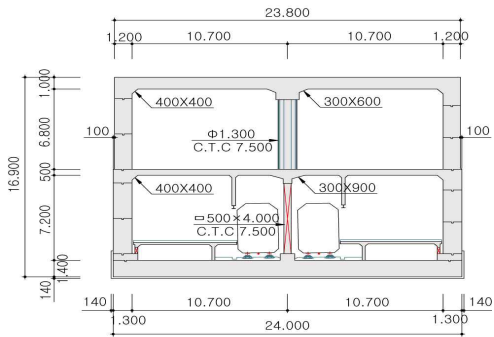
3. 내화 해석 및 결과

3.1 수치모사(Numerical smulatton)

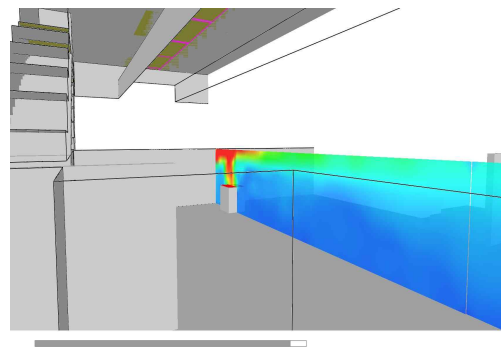
내화해석을 위해서는 화재에 따라 다른 조건하에서 측정된 발열량이나 표준온도가열곡선이 필요하나, 국내에서는 다양한 조건하에서의 시험결과가 없고 이 시험결과로 결정된 설계기준이 없으므로, 외국의 시험결과를 이용하여 해당 화재에 대한 수치모사를 통해서 결정해야 한다. 즉, 화재 시 최대발열량을 결정하고 이를 이용하여 FDS프로그램 등으로 온도가열곡선을 구한다.

본 연구에서는 FDS프로그램으로 SFPE에서 지하철 화재 시험을 통해서 제시하는 발열량 값을 이용하여 수치모사운용을 하였다. 내화해석은2003년에 대형화재가 발생한 대구지하철을 모델로 선정하였고 Fig. 3은 해석 대상의 단면도이다. 지하 2층 플랫폼에서 화재가 발생한 조건하에서 <Fig. 4>처럼 수치모사하였으며, <Fig. 5>와 같은 온도가열곡선을 구하였다. 비정상상태(unsteady state)에서 20분(1200초) 동안 LES (Large

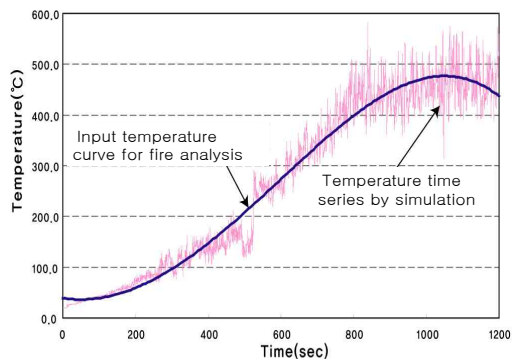
eddy simulation) 모델을 선택하여 산출하였다. 그러나 대구지하철 화재 시 현장에서 측정된 최대온도는 1000 °C로 알려져 있어 SFPE 실험값으로 구한 최대온도와는 차이가 크다. 따라서 SFPE의 시험결과인 정상적인 발열량으로는 대구지하철처럼 최대 1000°C에 도달할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 <Fig. 4>의 모델에서 최대온도가 1000°C에 도달할 때 까지 입력 발열량을 증가시키면서 온도분포를 구하였다. 발화지점은 <Fig. 3>에 있는 지하2층 승차장이며 화재 수치모사는 승강장 전체길이(170m)에 대하여 실시하였다. 해석결과에 의한 지하 2층 상부천정의 온도분포는 <Fig. 6>과 같으며, 실제로 화재현장사진인 <Fig. 7>과 비교한 결과 온도분포와 파손형태는 상관도가 높음을 보여 준다.



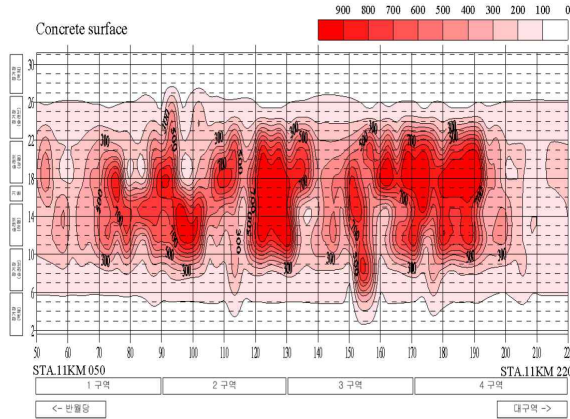
<Fig. 3> Subway section for numerical analysis



<Fig. 4> Numerical simulation of fire diffusion at platform



<Fig. 5> Temperature curve versus time



<Fig. 6> Thermal distribution on the upper slab by fire simulation



<Fig. 7> Real photography of damaged upper slab

3.2 온도전달해석(Temperature propagation analysis)

화재는 지하 2층 승강장에서 발생하였고 이 단면에 대해서 화재에 대한 온도해석을 실시하였다. 구조모델링의 범위는 화재 시 온도가 콘크리트구조물을 통해서 주변 지반으로 전달되므로 주변지반도 지하철 유효폭만큼 모델링하였다. 콘크리트의 두께가 1.0m 이상이므로 콘크리트를 통과하여 배면토로 전달되는 온도는 결과적으로 작으나, 배면토를 모델링함으로써 해석상 발생할 수 있는 불연속성에 의한 오류를 방지하였다. 온도하중에 대한 구조해석은 범용프로그램인 ABAQUS14)를 사용하였고, 콘크리트와 지반은 열전달 유효요소인 DC2D4를 선택하였다. 벽체 두께 중 화재원이 있는 안쪽은 철근피복 두께가 3cm이므로 20cm까지는 2cm 두께마다 모델링하고, 20cm 밖에는 해석시간을 고려하여 5cm 두께로 모델링 하였다.

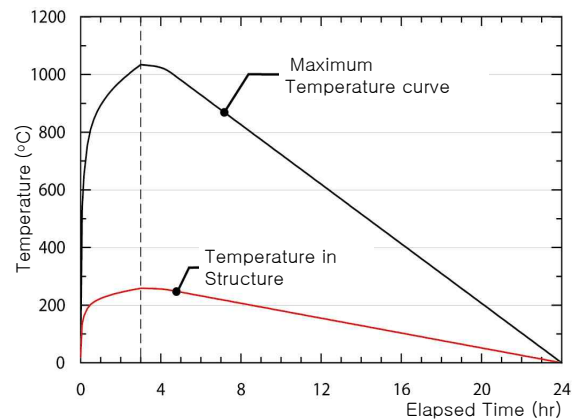
구조해석을 위한 온도하중은 Fig. 6에서 보듯이 최대 1000°C의 분포를 갖고, 본 연구에서는 <Fig. 4>에

서 모사운동하는 것처럼 최대온도가 1000°C에 도달하였을 때 온도이력곡선을 <Fig. 8>과 같이 산정하였다.

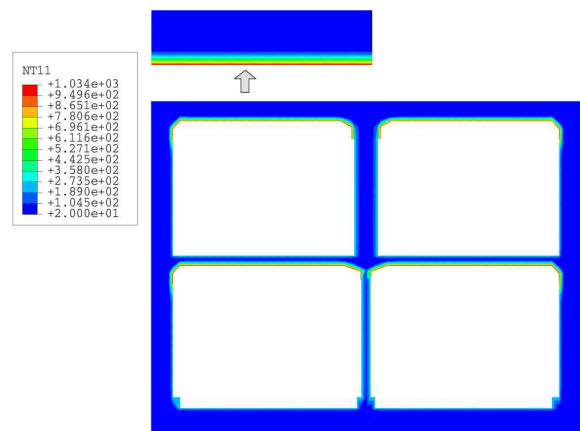
이는 ASTM E119에서 제시된 온도이력곡선이 SFPE의 시험결과를 근거로 결정된 것이므로 본 연구의 해석결과인 <Fig. 8>과 같다. 이때 콘크리트 구조물 내의 대기온도(temperature in structure)는 ACI 216R -2001에서 제시하는 대로 콘크리트 표면온도(maximum temperature)의 1/4로 가정하였다.

내화온도해석 시 콘크리트와 주변지반의 열전도율과 비열은 식 (1),(2)을 이용하여 산출하고, 밀도는 2,500 kg/m³, 포아송비는 0.17, 열팽창계수는 1.0×10⁻⁶/°C를 적용하였다.

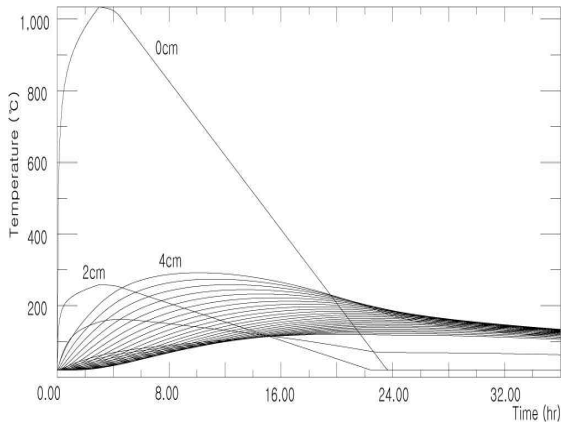
내화해석을 통하여 구한 지하철정거장 전체의 최대 온도분포도는 <Fig. 9>와 같고, 중앙슬래브(두께 50cm)의 2cm 깊이 별 온도분포는 <Fig. 10>과 같다. 중앙슬래브는 바로 하부의 지하2층에서 화재가 발생하여 화재피해가 가장 크게 발생한 부위이다. 슬래브의 온도전파는 표면에서 4cm까지 급속히 변화하나, 4cm보다 깊어지면서 온도가 300°C이하로 작아진다.



<Fig. 8> Input temperature curve for temperature propagation analysis



<Fig. 9> Max. temperature distribution diagram

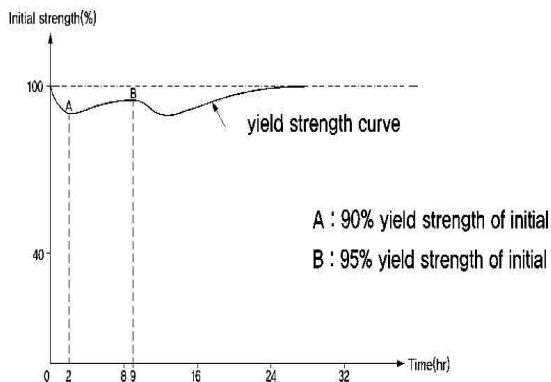


<Fig. 10> Temperature curves by each depth of middle slab

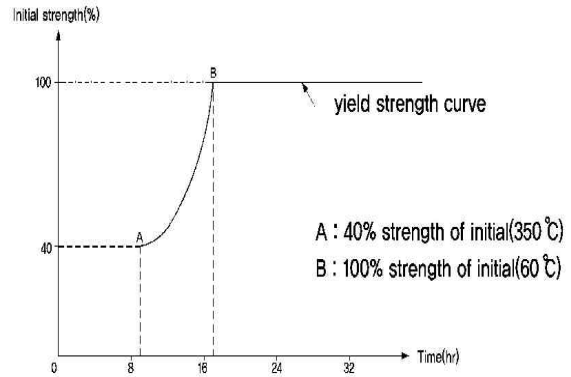
철근의 피복두께가 3cm이므로 철근의 위치에서는 약 300°C가 된다. 최대발화온도 이후 표면에 가까울수록 급속히 냉각되나, 4cm보다 깊은 콘크리트 내부에서는 최대온도 정도가 하루 이상 동안 지속된다. <Fig. 1>에서 알 수 있듯이 700°C 이상에서는 압축강도(stressed to 0.4fc')가 50%이하로 줄어들게 되는데, 작용하는 하중은 줄어들지 않으므로 안전에 문제가 된다. <Fig. 7>는 대상구조물의 중앙부에 폭발이 대부분 발생하여 피복콘크리트가 대부분 탈락되고 철근이 노출되어 있음을 알 수 있는데, <Fig. 10>에서 보듯이 피복두께 3cm 이내의 온도가 300~1000°C이므로 콘크리트와 철근이 손상 정도와 일치함을 알 수 있다.

3.3 안전성 평가

<Fig. 11>과 <Fig. 12>는 화재가 발생한 시점부터 32시간이 경과하여 철근과 콘크리트가 상온으로 돌아온 시점까지의 강성의 변화를 온도해석 결과를 토대로 산정한 것이다.



<Fig. 11> Residual strength ratio per initial strength of steel vs. time



<Fig. 12> Residual strength ratio per initial strength of concrete vs. time

철근의 피복두께가 3cm인 지점에서 <Fig. 10>에 의하면 최대 300°C에 도달하였으므로, <Fig 2>에서 강도손실을 검토해 보면 온도 250°C 에서 10%, 300°C에서 5% 발생함을 알 수 있다. 그러나 콘크리트는 표면에서 최대온도가 1000°C에 도달하며, <Fig. 1>에서 보는 것처럼 700°C 이상에서는 강도를 상실하므로 화재 후 8시간이 경과하면 온도가 700°C 이하로 식으면서 잔류강도가 회복됨을 <Fig. 11>은 보여준다. 그러나 온도가 700°C 정도에서는 콘크리트에 폭발이 발생하므로 철근도 이 순간부터 화염에 노출될 가능성이 있다. 그러나 철근은 다시 온도가 상온으로 돌아오면 강도가 대부분 회복되므로 실제로 강도에는 문제가 없다. 따라서 화재에 대한 온도해석은 화재에 의한 콘크리트의 깊이별 온도분포가 매우 중요하며, 이 온도가 일정이상으로 발생하면 폭발 같은 단면손상이 발생하여 안전에 심각한 영향을 미치게 된다. 상대적으로 철근은 폭발이 발생한 콘크리트가 화재 중에는 탈락하지 않고 온도차단벽 역할을 하다가, 화재진압 시 살수를 할 때 수분공급에 의하여 탈락하므로 <Fig. 11>, <Fig. 12>와 같은 온도이력과 강도이력을 겪게 되며, 철근의 파단 같은 심각한 안전문제가 발생하지 않는다.

4. 결론

본 연구를 통해서 콘크리트구조물의 내화안전성 검토절차를 제시하고 검증하였다. 수치모사응용으로 화재의 최대온도와 온도분포를 구한 후, 이를 입력자료로 온도전달해석을 통해서 콘크리트부재의 깊이별 온도를 구하였다. 깊이에 따른 콘크리트와 철근의 강도를 온도별 강도변화곡선에서 검토하여 화재 후 안전성을 판단할 수 있었다. 수치해석으로 산출된 결과와 실제 현장의 피해사례를 비교한 결과는 본 연구에서 제

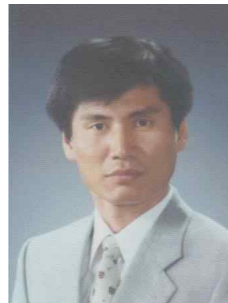
시된 방법이 유용함을 알 수 있다. 국내기준에는 부재나 재료차원의 내화인증기준은 있으나, 구조물에 대한 내화설계기준이 없어서 안전검토 시에 외국기준을 적용하고 있고, 원인규명 시 논란의 여지가 있으므로 시급히 내화설계기준이 마련되어야 함을 알 수 있다.

5. 참 고 문 헌

- [1] 고경찬, 박외철, “화재크기에 따른 실내화재의 수치연구. -I.중심형 화재”, 한국안전학회지, 제18권, 제1호(2003) : 18-22
- [2] 박준, 고경찬, 박외철, “실내 프로판화재의 시뮬레이션”, 한국안전학회 2004 춘계학술 발표회논문집 (2004) : 453-458
- [3] 고경찬, 박외철, “ FDS를 이용한 실내화재모사의 문제점. - I. 벽면형 및 모서리형 화재”, 한국안전학회지, 제19권, 제3호 (2004) : 9-13
- [4] 임초롱, 정철현, 김유석, “화재 시 온도증가로 인한 RC슬라브의 강도특성”, 한국안전학회지, 제25권, 제4호(2010) : 48-60
- [5] 방명석, “지하철정거장의 화재에 대한 강구조물의 내화해석”, 한국안전학회지, 제25권, 제6호(2010) : 123-127
- [6] SFPE(Society of Fire Protection Engineers), “SFPE Handbook of Fire Protection Engineering”, U.S.A., 1995
- [7] K. McGrattan, R. McDermott, J. Floyd, S. Hostikka, “Fire Dynamic Simulator (FDS), User’s Guide, Ver .5.5” ,NIST. U.S.A., 2010 : 1-216
- [8] ASTM E119, “Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials”, U.S.A., 1995
- [9] ACI Committee 216, “Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements”, ACI 216R-89, ACI, Detroit, U.S.A., 1989
- [10] EUROCODE 2, “Design of Concrete Structures Part 1-2 : General rules - Structure fire design”, 2004
- [11] 국토해양부, “내화구조의 인정 및 관리기준 ; 고시 제2008-154호”,(2008) : 1-23
- [12] 한국표준협회, “건축구조부재의 내화시험방법: KS D 2257-6”, 1999 : 1-11
- [13] NEFA(National Fire Protection Association), “Building Construction and Safety Code”, U.S.A., 2003
- [14] Dassault Systèmes(DS), “ABAQUS 6. 10”, Paris, France, 2010

저 자 소 개

방 명 석



서울대학교 토목공학과에서 학사 취득. 한국과학기술원에서 토목공학과 석사, 박사 학위 취득, 현재 충주대학교 교수로 재직 중.
관심분야: 구조안전, 건설안전 등

주소: 충북 충주시 대학로 50