

지하철정거장 화재에 대한 강구조물의 내화해석

방 명 석

충주대학교 안전공학과

(2010. 7. 27. 접수 / 2010. 11. 30. 채택)

A Numerical Analysis of Steel Structures on a Subway Station Fire

Myung-Seok Bang

Department of Safety Engineering, Chungju National University

(Received July 27, 2010 / Accepted November 30, 2010)

Abstract : A fire disaster is very serious in the closing space like subway station. In this study, the simulation on fire diffusion is performed to get the temperature history curve, which is used for the fire resisting structural analysis. Most of subway stations are built by the reinforced concrete structure, but recently steel structures are selected for the larger space or beauty. Steel structures relatively have more weaknesses against fire, so it is necessary to develop the method for evaluating fire-resisting capacity in this kind of structures. The developed method is applied to the subway station in Daegu city. It shows that the developed method can be used to simulate the fire disaster and to get the temperature history curve and evaluate the safety of steel structures against the fire.

Key Words : fire, steel structure, subway station, fire history curve, fire-resisting analysis

1. 서 론

2003년에 발생한 대구지하철 중앙로역에서의 화재는 Table 1에 보여주는 것처럼 인명피해만 582명(사망 150명, 실종 286명, 부상 146명)에 달하는 대형 화재였다. 지하철과 같은 밀폐공간에서의 화재는 크게 Pre-flash over와 Post-flash over로 구분할 수 있다. 일반적으로 화재발생 시 인명의 피해가 발생하는 구간은 Pre-flash over이다. 화재안전에 대한 대책은 크게 3단계로 나눌 수 있다. 화재발생 즉시 이용자에게 화재의 발생을 알리는 경보시스템과, 이용자의 생명에 직접적으로 영향을 미치게 되는 연기의 발생을 화재 공간내부로 제한하는 것을 목적으로 하는 연소확대 방지시스템, 이용자의 안전공간으로의 대피를 원활하게 유도하는 피난시스템으로 구별된다. Post-flash over구간에서의 내화성능을 확보하고자 하는 목표는 주로 구조물의 붕괴방지와 구호활동자의 생명보호이고, 이를 달성하기 위해서 고열이 발생할 수 있는 구조물의 기둥, 보 그리고 바닥판의 주요 구조부에 내화피복을 실시한다.

화재의 위험도는 구조물의 종류 및 규모 등에 따라서 다르게 설정되어 있으며, 각 국가별로 화재의 발생크기의 정도, 화재진압기술 및 수준 등을 종합적으로 판단하여 설정되어 있다. 내화 성능평가는 크게 표준화재와 자연화재로 분류할 수 있다. 표준화재에 의한 내화성능평가방법은 모든 구조물의 화재발생 크기를 동일시키고 지속적으로 화재의 크기가 증가된다고 가정하므로 실제 화재를 모사하는 데는 한계가 있다. 또한 국내기관^{1,2)}이나 시험소 별로 실시되는 내화성능시험결과가 서로 다른 결과를 보이고 있는 등 내화성능 평가의 대표성을 나타내는 데에도 문제점이 있다고 지적되어 오고 있다. 따라서 이러한 표준화재의 문제점을 보완하기 위해서 개발된 개념이 자연화재이다. 자연화재에 대한 내화성능 평가기술은 스웨덴을 중심으로 발전되었다. 자연화재는 주어진 건물의 용도에 따라서 발생되어지는 화재의 크기를 예측하고, 예측된 화재의 크기를 열원으로 구조물의 안전성을 평가하는 공학적인 기술로서 성능적 내화법규의 핵심을 이루고 있다. 이와 같은 공학적 내화설계에 의한 성능적 사고는 화재의 발생규모에 따라 적절한 화재안전전략을 구축할 수 있으므로 불필요한 비용을 절감할 수 있고, 초기의 구조적 디자인성을

¹ To whom correspondence should be addressed.
msbang@cjnu.ac.kr

부각시킬 수 있으므로 특수 시설물에 많이 적용되고 있다.

본 연구에서는 2003년 대구지하철 화재사고처럼 지하철 정거장에서 화재가 발생한 경우에 강구조물의 내화해석 및 안전성을 분석하는 방법을 연구하였다. 일반적으로 지하철정거장은 철근콘크리트 구조가 대부분이나, 설계조건상 공간확보가 필요하거나 미관이 중요한 경우에 강구조로 건설된다. 철근콘크리트구조와 달리 강구조는 화재에 대해서 취약하다고 알려져 있으므로 강구조로 건설된 지하철 정거장에 대한 내화성능의 연구가 필요하다. 본 연구에서는 강재의 온도에 따른 물성변화를 평가하기 위하여, 비교적 폐쇄적인 지하철정거장 구간에서 화재모사운용(fire simulation)을 실시하여 온도이력곡선을 산출하였다. 산출된 온도이력곡선을 이용하여 강구조물에 대한 내화해석을 수행함으로써 강재내부의 온도분포와 열응력분포를 구하고 구조적안전성을 검토하였다. 정거장 화재 시 온도이력곡선은 SFPE(Society of Fire Protection Engineers Handbook) 시나리오를 적용한 FDS프로그램³⁾을 이용하여 산출하였다. FDS를 이용한 실내화재모사에 관한 연구는 Kim and Ryou⁴⁾, Ko and Park^{5,6)} 등이 수행하여 많은 문제점을 지적하고 해석방향도 제시하고 있다. 열전달 및 열응력 해석에는 범용해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 구조물의 내화안전성을 평가하였다.

2. 화재 시 강재의 물성 변화

강재의 경우 고온에 노출되는 상황은 화재가 발생한 경우나 용접을 시행할 때이며 이러한 고온에서는 강도와 강성이 변화한다.

Fig. 1은 고온에서의 인장강도, 항복강도 및 강성의 변화를 나타낸 것이다. 약 130~200℃까지는 강재의 성질에 큰 변화가 일어나지 않지만 약 200℃를 초과하면 강재의 거동은 비선형적인 특성을 나타낸다. 온도가 증가함에 따라 강도와 강성이 저하되고 약 500℃ 이상에서는 심한 변화가 시작된다. 인장강도는 100~300℃ 사이에서 변형시효(strain aging)에 의해서 일시적으로 소폭 증가하는 특이한 현상을 보이나 그 이상의 온도에서는 강도가 감소하며 약 600℃ 정도에서 인장강도와 항복강도는 상온에서의 강도에 절반정도로 감소된다. 강성의 변화는 강재 변형과 직접적인 관계가 있으므로 매우 중요하다. 600℃ 정도에서의 강성은 상온에서의 60% 정

Table 1. Fire disasters at domestic subway stations

년 도	국 가	역사 명	사고원인	피해 상황
1996	서울	을지로4가역	용접작업	경미
1997	서울	시청역	본선배수펌프장 합선 및 누전	17분의 여객 중단, 역사 정전
1999	서울	신림역과 신대방역 사이	재활용품 집하장 화재	교각 및 코핑천치부 열변상
1999	서울	동작역	화재	동작역 가건물 전소
2000	서울	동대문운동장역	배기환기구화재 (용접작업)	즉시 조치
2001	서울	고속터미널역	전기실 화재 (원인불명)	배전반 설비 교체
2001	서울	지축역에서 구파발역 사이	교각하부 화재 (원인불명)	교각 부분손상
2003	대구	중앙로역	방화	사망 약 150명, 부상 146명, 실종 286명
2003	부산	서면역	배전반 누전	배전반 설비 교체

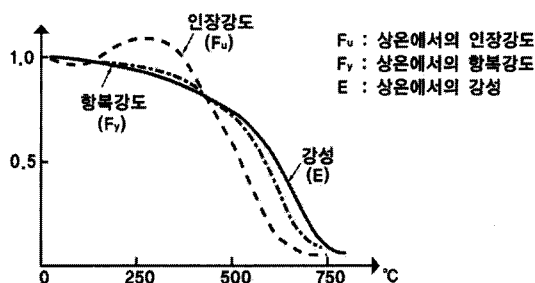


Fig. 1. Strength/stiffness versus temperature of structural steel.

도로 감소된다. 또한 온도가 250~300℃의 온도에서는 강재의 크리프(creep) 현상도 증가된다.

3. 내화 해석 및 평가

3.1. 해석 방법

화재해석에 사용되는 지배방정식은 식 (1) 연속 방정식, 식 (2) 성분보존방정식, 식 (3) 운동량 보존 방정식, 식 (4) 에너지보존방정식, 식 (5) 상태방정식으로 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

$$\rho \left(\frac{\partial Y_a}{\partial t} + u_j \frac{\partial Y_a}{\partial x_j} \right) = \rho \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial Y_a}{\partial x_j} \right) + S_a \tag{2}$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial (p - p_0)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} + \rho g \delta_{ij} \tag{3}$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial p_0}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + Q \quad (4)$$

$$p_0 = \rho RT \quad (5)$$

여기에서 t 는 시간, x 는 거리, ρ 는 밀도, u 는 속도, Y_a 는 질량분률, D 는 확산계수, S_a 는 고형생성을, μ 는 점성계수, δ 는 두께, I_b 는 복사강도, C_p 는 비열, k 는 열전도율, Q 는 열방출량, T 는 절대온도, p 는 압력, R 은 기체상수를 나타낸다. 난류 해석에 있어서 DNS(Direct Numerical Simulation)와 LES(Large Eddy Simulation) 방법이 있으나, DNS 계산의 경우 화재 공간 전체를 해석하기에는 지나치게 많은 격자를 요구하기 때문에 본 연구에서는 LES 모델을 적용하였다. LES 모델은 필터링을 통하여 필터의 폭보다 큰 와류들(large eddies)의 유동은 직접 해석하고, 작은 와류들(small eddies)은 유동의 형태에 독립적으로 모델링하게 된다. 본 해석에서 사용된 필터링에는 가우시안 필터(Gaussian filter)와 모자 필터(top hat filter) 중 모자 필터를 사용하였다. Smagorinsky상수(C_s)와 난류 Prandtl수(Pr_t)는 $C_s = 0.18$ 과 $Pr_t = 0.2$ 를 사용하였다. 연소모델에는 유한화학반응률모델(finite rate chemical reaction model)과 혼합분율연소모델(mixture fraction combustion model)이 있다. DNS모델에서는 격자의 간격이 산소와 연료의 확산을 직접 해석할 수 있을 정도로 조밀하기 때문에 유한화학반응률모델을 적용하고, LES모델에서는 종(species)의 확산을 직접 해석하기에 격자가 성기기 때문에 혼합분율연소모델을 적용한다. 본 연구에서는 LES모델을 이용하므로 혼합분율연소모델을 적용하였고 격자에 따라 필터 크기가 변화하게 된다. 덕트유동과 같은 일반적인 유동 계산에 적용되는 LES의 계산 격자의 크기는 Kolmogorov 길이척도 보다는 크고 Energy containing eddy를 적절히 묘사할 수 있는 정도이어야 한다. 그러나 본 지하철 정거장 화재의 경우에 관심의 대상이 벽 근처와 같이 미세한 난류의 구조를 파악하는 것이 아니기 때문에, 경제적인 계산을 위해 상대적으로 성긴(coarse) 30×30×40 격자크기를 사용하였다.

3.2. 화재 해석 및 결과 분석

1) 온도시간이력곡선

화재의 발생위치는 정거장에서 가장 화재발생 가능성이 큰 대합실 중심부의 피난계단 벽에 위치한 가판대로 설정하였다. 이 이유는 정거장에서 가판

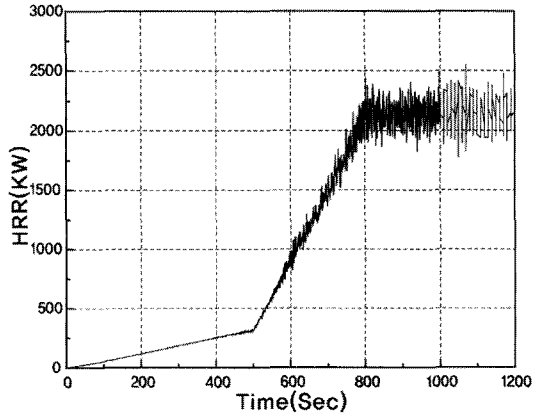


Fig. 2. Heat curve by SFPE experimental results.

대는 인화재나 발열기를 사용하므로 화재발생빈도가 상대적으로 높은 장소이기 때문이다. 정거장의 화재강도는 Fig. 2와 같이 SFPE의 가판대의 실험결과인 발열량 곡선을 적용하였다. 실험결과는 최악의 상황을 고려하여 안전율(하중확대계수)를 2정도 고려하여 산출한 발열량곡선(Fig. 2)의 최대 2.5MW 발열량을 해석조건으로 적용하였다.

본 연구에서 화재에 대한 시나리오로는 정거장에 스크린도어(PSD: Platform Screen Door)가 설치

Table 2. Input condition for fire analysis

구분	내용	
연산상태	시간에 따른 비정상상태(unsteady state)	
해석시간	20분(1200초)간 비정상상태(unsteady state)	
유동모델	- 3차원 유한체적법(finite volume method)을 이용한 형상구성 - Navier-Stoke 방정식을 적용한 유동 계산 - 난류모델은 LES(large eddy simulation) 적용	
경계조건	초기온도	15[°C]
	압력	101,325[Pa]
	중력가속도	9.81[m/s ²]

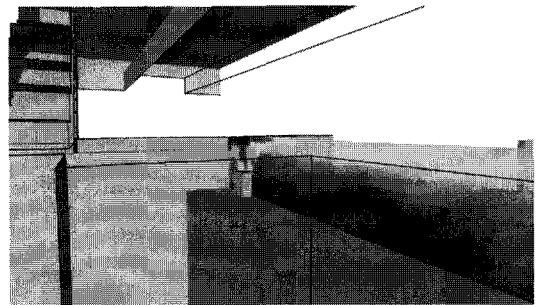


Fig. 3. Numerical simulation of fire diffusion.

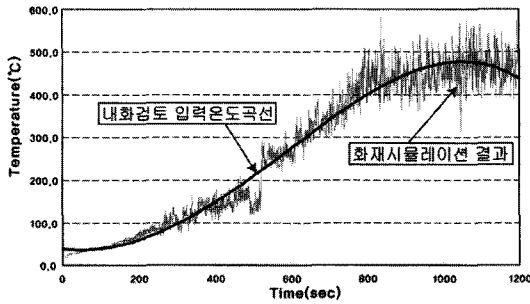


Fig. 4. Temperature vs Time Curve for Fire Analysis.

되어 승강장내 화재 발생 시 선로로의 전파는 발생하지 않는 것으로 가정한다. 또한 승강장 상단의 개구부로 연기가 모두 배출되며, 승강장내 화재 발생시 열차는 무정차 통과하면서 스크린도어는 전폐되는 것으로 가정한다. 화재해석을 위한 입력조건은 Table 2와 같다.

Fig. 3은 화재확산을 모사운동(simulation)하고 있는 그림이고, Fig. 4는 모사운동결과로 구한 내화해석용 입력온도곡선이다.

2) 강구조물의 내화 수치해석

현재 건설 중인 대구지하철 312정거장은 주부재가 SM570 및 SM520B, 부부재가 SM400B로 주요 구조부재가 강재로 이루어진 강구조물로서, 본 연구를 위한 수치해석모델로 선정하여 내화해석을 수

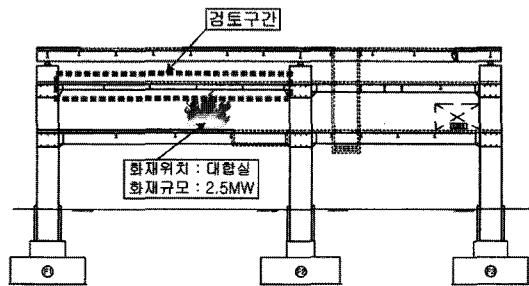


Fig. 5. Fire site and checking members at subway station.

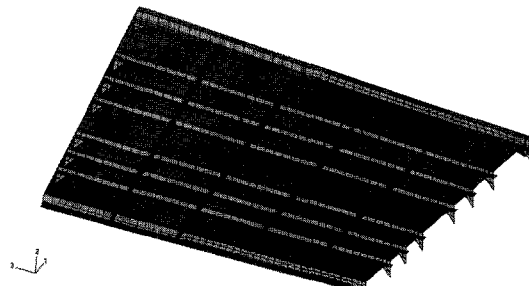


Fig. 6. Numerical analysis model of steel slab.

행하였다. 열전달과 열응력해석을 위해서 Fig. 4의 내화검토용 온도이력곡선을 입력자료로 이용하였다. 범용유한요소해석프로그램인 ABAQUS의 온도-변형 연계해석요소인 8절점 SHELL요소(S8RT)를 사용하였다. 본 과업의 내화해석을 위한 검토단면 및 유한요소모델은 Fig. 5 및 6과 같다.

정거장 구조용 강재에 대하여 열전달/열응력 해석을 수행한 결과, 직접적으로 화재를 받는 위치에서 최대온도 194°C가 발생하였고, 화재 후 구조물에 발생하는 응력은 부재의 접합부와 단부에서 대체적으로 크게 발생하였다. 구조물에 발생하는 온도 및 응력분포도는 Fig. 7 및 8과 같고, Fig. 9처럼 최대응력 발생부위에서 안전성을 검토하였다. 정거장 구조용 강재의 최대응력 발생위치에서의 검토 결과는 Table 3과 같다. 허용응력은 Fig. 1에서 최

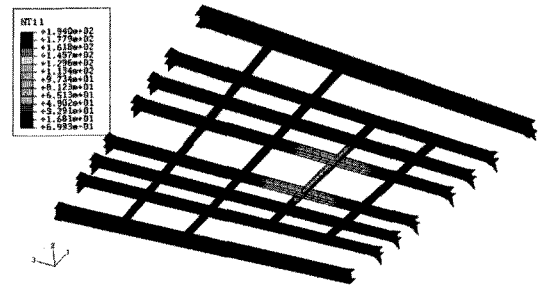


Fig. 7. Temperature distribution diagram of steel members.

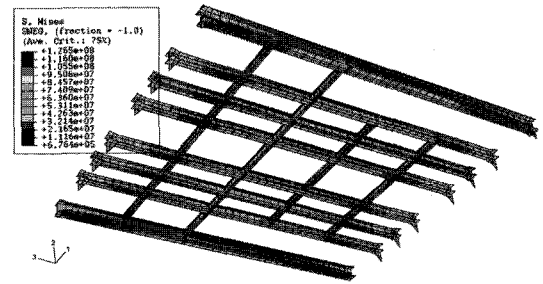


Fig. 8. Stress distribution diagram of steel members.

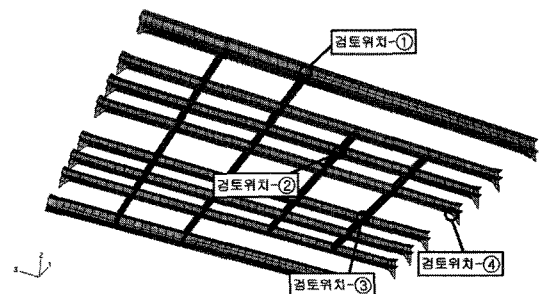


Fig. 9. Check points of steel members for structural safety.

Table 3. Safety check in maximum stress points of steel members(unit, MPa)

검토 위치	강종	발생응력	강재허용응력 (f_{sa})	적용허용응력 ($0.95f_{sa}$)
①	SM520	102	210	199.5
②	SM400	105	140	133.0
③	SM400	84	149	133.0
④	SM570	127	260	247.0

대온도 194℃일 때 약 5% 정도 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 최대응력이 발생하는 검토위치의 최대응력이 모두 허용응력 이내로 나타나 내화안전성이 확보된 것을 알 수 있다.

4. 결론

강구조로 건설된 지하철 정거장과 같은 폐쇄적 공간에서 화재가 발생한 경우에 대해서 화재의 확산을 모사운동하여 온도이력곡선을 산출하였다. 또한 이 온도이력곡선을 이용하여 내화해석을 수행하여 강부재들의 내부온도분포와 열응력분포를 산정하였다. 본 연구에서 개발된 내화성 평가방법은 지하철 정거장의 화재발생 시에 안전진단방법으로 유용하게 적용할 수 있음을 보여주었다. 본 방법은 콘크리트구조물의 내화해석에도 적용이 가능할 것으로 판단되며 이에 대한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) 국토해양부, “내화구조의 인정 및 관리기준; 고시 제2008-154호”, pp. 1~23, 2008.
- 2) 한국표준협회, “건축구조부재의 내화시험방법: KS D 2257-6”, pp. 1~11, 1999.
- 3) K. McGrattan, R. McDermott, J. Floyd, S. Hostikka, “Fire Dynamic Simulator(FDS), User's Guide, Ver. 5.5”, NIST. U.S.A., pp. 1~216, 2010.
- 4) S.H. Kim, H.S. Ryou, “An experimental and numerical study on fire suppression using a water mist in an enclosure”, Building and Environment J., Vol. 38, pp. 1309~1316, 2003.
- 5) 고경찬, 박외철, “화재크기에 따른 실내화재의 수치연구. - I. 중심형 화재”, 한국안전학회지, 제18권, 제1호, pp. 18~22, 2003.
- 6) 고경찬, 박외철, “FDS를 이용한 실내화재 모사의 문제점. - I. 벽면형 및 모서리형 화재”, 한국안전학회지, 제19권, 제3호, pp. 9~13, 2004.