

FDS code를 이용한 교량하부창고 화재발생원 영향분석

Investigation of the Fire Source in the Warehouse under Bridge using FDS Code

지 광 습†	이 승 정*	신 연 호**	심 재 원***	김 지 환****
Zi, Goangseup	Lee, Seung-Jung	Shin, Yeon-Ho	Shim, Jae-Won	Kim, Ji-Hwan

요 지

본 연구에서는 FDS code를 이용하여 교량하부창고 화재발생원과 교량높이의 영향을 분석하였다. 헵탄을 이용한 단위 가연물의 연소실험, 실물모형 연소실험 결과와 FDS code를 이용한 해석결과의 비교를 통하여 FDS code의 유효성을 검증하였다. 이를 이용하여 교량하부 표준창고구조물의 실제 화재시나리오를 적용하여 교량높이 및 창고내부 가연물에 따른 콘크리트의 폭렬, 강도손실, 보강철근의 강도손실로 나누어 교량의 화재안전성을 평가하였다. 연구결과, 대부분의 교량이 하부창고화재에 대해 폭렬에 취약한 것을 확인할 수 있었다. 화재강도는 도서류가 가장 강하며 30m 높이 교량에 콘크리트의 강도저하, 폭렬 및 보강철근 강도저하를 가장 크게 발생시킬 것으로 예측되었으며, 고무류 창고화재의 경우 30m 이상 높이의 교량에 대해 화재안전성을 확보할 수 있었다.

핵심용어 : 전산화재해석, FDS code, 연소실험, 라그랑지안 입자모델, 콘크리트 손상, 폭렬, 철근손상

Abstract

In this study, we analysed the effect of the fire source in the warehouse under the bridge and the height of the bridge using FDS code. To compare accuracy of simulation results, we simulated the experimental result with unit combustibles which is heptane as well as the mock-up test. Using this method, we evaluated the fire safety of the bridge which contains spalling and strength damage of concrete as well as damage of reinforcements according to the fire source and the height of the bridge. Most of the bridges are vulnerable to spalling of concrete. The book combustion has the strongest fire intensity which is expected to damage the bridge less than 30m height in the three types of the fire sources. The bridge over the 30m height can ensure the fire safety in the case of the rubber combustion.

Keywords : Computational fire analysis, FDS code, combustion test, Lagrangian particle model, damage of concrete, spalling, damage of reinforcements

1. 서 론

산업의 발전은 물류량의 증가에 따른 물류시스템의 복잡화를 요구하고 있다. 그러나 한정된 국토의 이용은 종합물류서비스 단지의 확보에 어려움을 발생시키며 도심의 외각으로 밀려난 물류시설은 도로망에 대한 접근성이 떨어져 점점 그 효용가치를 상실하고 있다. 이에 따라 2006년 8월 국토해양부는 한국도로공사와 협조하여 화물유통촉진법에 의해 고속

도로변 물류지원시설 개발계획을 포함하는 국가물류기본계획(2006~2020)을 시행하였다(건설교통부, 2006). 이러한 계획으로 도로공사에서는 현재 약 30여개소의 고속도로 교량하부의 창고시설 공사를 검토 중에 있다.

고속도로와 인접한 물류시설은 향상된 접근성과 잉여공간 활용 등의 장점에도 불구하고 화재 발생가능성의 단점을 가지고 있다. 소방방재청 소방정책국 화재조사팀의 통계조사에 의하면 1999년에서 2006년 사이에 물류창고에서 발생한 화

† 책임저자. 정희원 · 고려대학교 건축·사회환경공학부 부교수
Tel: 02-3290-3324 ; Fax: 02-928-7656
E-mail: g-zi@korea.ac.kr

* 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정

** (주)동우기술단 부설연구소 주임

*** 한국도로공사 도로교통연구원 건설기반연구실 책임연구원

**** 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2012년 2월 29일까지 본 학회에 보내주시면 2012년 4월호에 그 결과를 게재하겠습니다.



(a) 캘리포니아 교량화재 (b) 부천고가교 화재
 그림 1 교량화재 피해사례(이정배 등, 2011)

재는 총 7279건으로 매년 평균 약 800건의 물류시설 화재 사건이 발생하였다(소방방재청, 2008). 이러한 고속도로변 물류창고에서 발생하는 화재는 창고시설의 소실 뿐만 아니라 화재로 발생한 고온의 열에 의한 교량하부의 손상에 더 큰 문제를 야기한다. 2007년 4월 미국 캘리포니아에서는 유조차의 전복으로 교량상에서 발생한 화재에 의해 상부 교량이 수십미터 가량 낙교하는 사건이 일어나 교량상의 화재 위험성에 대한 검증과 대책 수립이 시급하다는 우려가 제기되었다. 국내에서도 2010년 외곽순환고속도로상에 있는 부천고가교의 하부에서 발생한 유조차에 의한 화재로 강박스거더에 변형 및 균열이 발생하여 심각한 경제적 손실을 가져왔으며, 1997년 원효대교 접속교, 1999년 우회고가교, 2010년 양산고가교에서도 교량하부의 화재로 인한 피해가 발생되었다(이정배 등, 2011). 화재에 의한 교량의 피해는 그림 1의 예로 확인할 수 있다.

이러한 실제 구조물에 대한 화재사고 위험성의 정량적 평가와 예측, 화재로 인한 구조물의 손상 및 내화성능평가의 실험적 검증 등은 고비용, 고위험성으로 인해 다양한 실제 화재시나리오의 적용이 불가능하다. 이러한 이유로 단위부재수준의 실험연구 결과를 바탕으로 한 전산유체해석(CFD, Computational Fluid Dynamics)을 중심으로 연구가 수행되고 있으며, 현재 전산화재해석은 크게 2차원과 3차원 모델을 사용한 소프트웨어의 사용으로 구분할 수 있다. 2차원 모델을 사용할 경우 사용이 간편하고 계산시간이 빠르기 때문에 실무에서 주로 사용되고 있으나 온도, 연기거동, 열전달, 화재성장에 대한 모사가 정확하지 않기 때문에 미국표준기술연구소(NIST)와 영국 University of Greenwich의 Fire Safety Engineering Group을 중심으로 3차원 모델을 이용한 소프트웨어가 개발되고 있다. 따라서 RANS(Reynolds Averaged Navier Stokes) 기법과 FDS code의 LES(Large Eddy Simulation) 기법을 주로 사용한다(장용준 등, 2007). FDS code의 경우 RANS에 비해 계산시간이 느린 단점이 있으나 화재 유동과 같은 여러 가지 스케일의 와운동(vortex motion)을 해석할 수 있는 장점이 있으며, 국내외의 여러 연구자들에 의해서 그 적합성 및 적용성이 검증되었다(장용준 등, 2007; 신연호 등, 2009; McGrattan 등, 2007). 이러한 소프트웨어를 이용하여 화재를 분석한 사례는 국내외에

다양하게 존재하나 국내에서는 건축구조에 비해 토목구조물의 화재연구가 상대적으로 부족하며 터널화재를 중심으로 진행되었다(이윤환 등, 2005; 지문학 등, 2006; 이계희 등, 2007; 2007; Lee, 1996; Cooper 등, 1999; Hostikka 등, 2003; McGrattan 등, 2004 등).

전산화재해석을 통하여 구조물의 내화성능을 평가 및 예측하기 위해서 구조재료의 고온 특성 및 열 경계조건을 이용한다. 콘크리트의 경우 온도의 증가에 따라 탄성계수가 급격히 감소하며 650°C이상의 온도에 노출될 경우 정상온도 대비 약 50%의 압축강도 손실을 가져온다(김성수 등, 2011; 권영진, 2011). 또한 약 200~350°C에서는 폭발적 폭발에 의한 박리현상이 발생하며, 피복두께 이상의 깊이에 손상을 유발한다고 알려져 있다(최승관 등, 2006). 화재지속시간 또한 주요한 인자이기 때문에 미국과 유럽에서는 화재지속시간을 기준으로 콘크리트 구조물의 온도분포를 제시하고 있다(심재원 등, 2011). 강재의 경우 온도의 증가에 따라 강도 감소가 뚜렷하기 때문에 ASTM에서는 강의 종류에 따른 임계온도를 설정하여 항복강도가 상온 대비 50%미만으로 떨어지지 않도록 제한하고 있다(ASTM, 2009).

본 연구에서는 교량하부 물류창고를 대상으로 교량구조물에 대한 구조물 특성 및 화재원의 종류에 따른 영향을 검토하기 위해 화재원별 실험과 FDS code를 이용하여 전산화재해석을 수행하였다. 단위 가연물 연소실험과 실물모형 연소 실험과 FDS code를 사용한 해석결과와의 비교를 통하여 FDS code의 유효성을 검증하고 콘크리트와 강재의 고온 특성을 이용하여 교량하부 창고화재에 대한 화재손상정도를 평가하였다.

2. FDS code를 이용한 화재분석 시스템 구축

2.1 열전달 모델

레이놀즈수가 큰 유체의 운동은 난류(turbulent flow)에 의해 지배되며 이를 모사하기 위해서는 식 (1)과 같은 Navier-Stokes 방정식을 풀어야 한다. 하지만 직접적인 해를 구하는 것이 불가능하기 때문에 전술한 것과 같이 이산화한 방정식과 난류 모델(turbulent model)을 이용한 수치해석모델을 주로 사용한다. FDS code는 유한차분법과 유한체적법을 혼용한 열전달 해석법을 사용하며 난류유동해석에 LES 모델, DNS 모델을 선택적으로 사용할 수 있다(McGrattan 등, 2007).

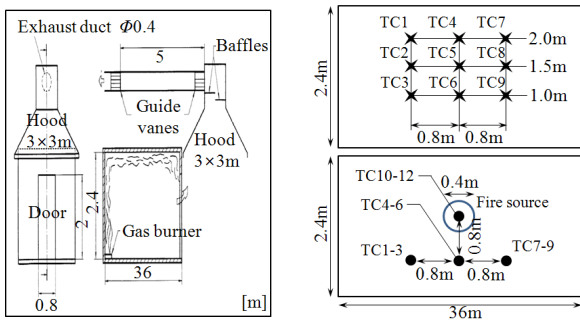
$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = f - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta u \quad (1)$$

여기서, u 는 유속, p 는 압력, $\nu=1/Re$ 는 점성계수, f 는 외력을 의미하며 유체관성력의 비선형성(좌변)과 압력분포가 공간적으로 변화함으로 인해 생기는 힘, 점성효과($\nu\Delta u$), 외력(f) 항으로 구성된다.

2.2 기본 가연물 연소실험에 기반한 모델 구축

2.2.1 단위 가연물 연소실험

FDS code의 적합성을 검증하기 위해 단위 가연물 연소실험을 실시하였다. 실험장치는 한국건설기술연구원에서 제작한 Room corner tester(ISO 9705)를 사용하였으며 그림 2의 (a)에 도시하였다. 이 실험장치는 순연소열이 연소하는데 필요로 하는 산소의 양에 비례하며 산소 1kg이 소비되면 약 $13.1 \times 10^3 \text{kJ}$ 의 열을 방출한다는 원리에 기초한다. 시간별 열방출률은 가연물의 연소생성물을 상부에 설치된 후드에서 흡기하여 측정한다. 열방출률의 측정범위는 $0.1 \text{ MW/m}^2 \sim 1 \text{ MW/m}^2$ 이다. 온도측정을 위한 열전대는 각 지점별 높이 0.5m 간격으로 각 3개소, 총 9개를 그림 2의 (b)와 같이 설치하였다. 가연물은 비교적 물성치가 잘 알려져 있으며, 순물질인 헵탄(C_7H_{16})을 사용하였으며, 가연물을 담은 용기는 두께 2mm의 철판으로 $35\text{cm} \times 35\text{cm} \times 15\text{cm}$ 이다. 헵탄의 연소열이 바닥과 직접 전도되는 것을 방지하기 위해 용기 내부에 2kg의 물을 넣고 그 위에 헵탄 2.84kg을 부어 열방출률이 균일하게 유지되도록 하였다.



(a) 실험장치 (b) 열전대의 위치
그림 2 단위 가연물 연소실험 장치 및 열전대

2.2.2 FDS code 모델

그림 3에는 단위 가연물 화재해석에 사용한 모델을 도시하였다. 모델은 그림 2의 도면을 바탕으로 제작되었으며 $0.05\text{m} \times 0.05\text{m} \times 0.05\text{m}$ 의 요소 414,720개를 사용하였다. 대기온도는 21°C 로 설정하여 700초 동안 해석하였다. 바닥은 단열, 천장은 콘크리트 재질 및 흡기구를 경계조건으로 설정하였고 그 외의 부분은 대기조건을 설정하였다. 천장에

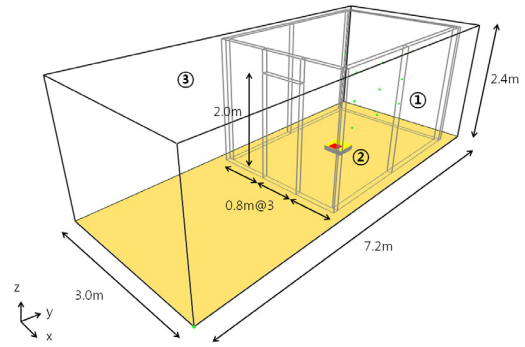


그림 3 단위 가연물 연소실험 모델

표 1 각 물질의 열역학적 특성

구분	헵탄	물	철	콘크리트
방사율	1.0	1.0	1.0	1.0
활성화에너지(kJ/mol)	110039.2		해당없음	
연소수득율	1.0		해당없음	
반응열(kJ/kg)	318		해당없음	
열전도도(W/m/K)	0.140	0.58	45.8	1.7
비열(kJ/kg/K)	2.24	4.19	0.46	0.75
밀도(kg/m ³)	684	1000	7850	2400
끓는점(°C)	98.42	100		해당없음
연소열(kJ/kg)	44566		해당없음	

사용된 흡기구는 $2.835\text{m}^3/\text{s}$ 의 유량을 가지도록 하였다. 해석에 사용된 네 가지 물질의 연소특성을 표 1에 나타내었다.

2.2.3 실험결과 비교 및 분석

FDS code의 적용성 분석을 위해 연소실험에서 측정된 온도결과와 FDS code를 통해 계산한 온도를 비교하였다. 전산화재해석을 위해서는 모사할 화재시나리오에 적합한 연소모델을 선택해야 한다. FDS code에서는 직접 연소모델을 사용하는 방법과 라그랑지안 입자모델을 이용하는 방법이 있으며 그림 4에 두 모델의 차이를 간략하게 도시하였다. 직접 연소모델은 가연물을 직접 모델링하여 연소를 해석하는 모델로 평평한 표면 위로 누출된 액체 pool의 모델링에 대해서는 액체로서 유동해석을 수행하지만 연소에 있어서 액적에 대한 특성 값, 즉 가연물의 소비량에 직접적으로 영향을 주는 인자에 대해서는 제어가 불가능하다. 또한 연소반응이 일어나는 가연물의 양 조절이 불가능하다는 단점이 있다. 반면에 라그랑지안 입자모델은 액적분사가 가능하기 때문에 각종 노즐 및 스프링클러와 같이 방출량을 제어할 수 있는 장치의 모사가 가능하다. 본 연구에서는 직접 연소모델과 라그랑지안 입자모델 모두를 사용하여 연소실험을 모사한 후 그 결과를 비교하여 적합한 연소모델을 선택하였다.

그림 5는 직접 연소모델을 사용한 경우 열전대 TC1에서

의 시간에 따른 온도변화와 열방출률을 비교한 것이다. 열전 대 중 화염에 의한 직접적인 영향이 비교적 적으며 대기유동에 의해 시간별 온도변화가 정상상태에 도달한 대표적인 결과 값을 도시하였다. 화재유동은 실험과 해석결과 모두 점화와 동시에 빠른 연소속도를 가지는 성장기를 거쳐 정상상태에 도달하여 일정한 온도를 유지하는 일반적인 액체 pool 화재성장곡선과 비슷한 경향성을 보인다. 정상상태에서의 온도 차이는 약 50℃로 실험측정치의 약 28%의 오차를 보인다. 실험결과와 비교할 때, 전체 발열량의 차이는 미소하며 해석 결과에서는 화재 초기에 연소반응이 집중되어 있음을 알 수 있다. 이러한 문제점에 대하여 Dejoan 등은 천장에 개구부가 없는 실내화재모사에 있어서 FDS code는 화재성장속도를 지나치게 빠르게 예측함으로써 적절하지 못한 결과를 도출해낸다고 지적하고 있다(Dejoan 등, 2005). 이는 벽 근처에서 유동예측이 떨어지는 LES 기법의 단점 때문인 것으로 판단된다. 이러한 단점을 보완하기 위해서는 벽 근처에서의 요소 크기를 조밀하게 만들거나 가급적 벽체에 의한 영향이 적고 대규모 화재로 인해 난류유동이 자유로운 개방공간에 대한 해석을 수행해야 한다고 권장하고 있다(McGrattan

등, 2007).

대칭조건에 의해 TC1과 TC7, TC2와 TC8, TC3과 TC9의 시간별 온도변화가 정확히 일치하였다. $h=2.5\text{m}$ 의 실험결과대비 정상상태 온도의 오차비율은 $h=2.0\text{m}$ 일 때 더 낮았으며 $h=1.5\text{m}$ 의 결과 값은 화재성장속도가 실험결과보다 느리며 정상상태 온도의 오차비율은 더 커진 것으로 나타났다.

직접 입자모델을 사용한 경우 연소되는 가연물의 양이 실제보다 큰 점을 조절하기 위해 전체 연소시간에 대한 가연물(헵탄)의 평균 연소량을 정해 이를 라그랑지안 입자모델을 이용한 헵탄액적의 분사를 통한 연소반응 모사에 사용하였다.

라그랑지안 입자를 이용한 연소반응 모사를 위해서는 액체 pool과 가연물을 별개로 모델링한다. 실제 연소반응을 지배하는 부분은 가연물(헵탄) 입자의 방출량이며, 액체 pool은 열전도 및 대류에 의한 열손실 계산에만 사용된다. 액체 pool의 연소는 표면에서 증발되는 혼합연료가 산소와 반응하는 과정이다. 라그랑지안 입자모델을 사용하기 위해서 몇 가지 입력변수가 필요하다. 입자의 평균 지름은 Rosin-Rammler와 log-normal의 조합으로 분사된 액적 크기의 분포를 지배하는 인자로 $250\mu\text{m}$ 를 사용하였으며, 액적 분사간격은 0.02초 분사속도는 0.1m/s, 헵탄의 입자질량플럭스는 전체 헵탄 pool의 양(2.84kg)에서 헵탄 pool의 표면적($0.35\text{m}\times 0.35\text{m}$)와 평균유효연소시간(690초)를 나누어 얻은 $0.03359\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ 를 대입하였다.

라그랑지안 입자모델을 이용한 전산화재해석의 결과를 그림 6에 도시하였다. 화재유동은 직접 연소모델에 비해 실험값에 근접하는 경향을 보인다. 실험과 해석결과 모두 전술한 일반적인 액체 pool 화재성장곡선과 유사한 경향성을 보이며

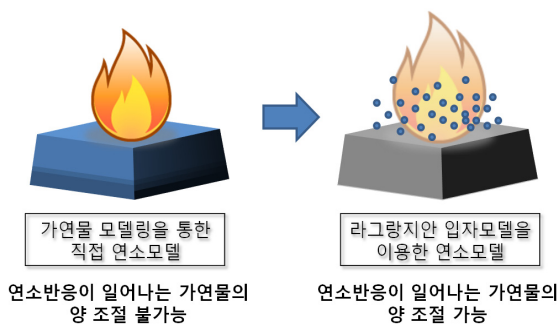


그림 4 직접 연소모델과 라그랑지안 입자 모델

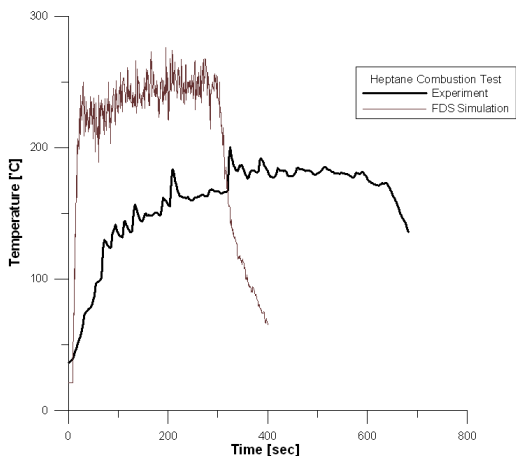


그림 5 직접 연소모델을 사용한 해석결과 : TC1의 시간별 온도변화 비교

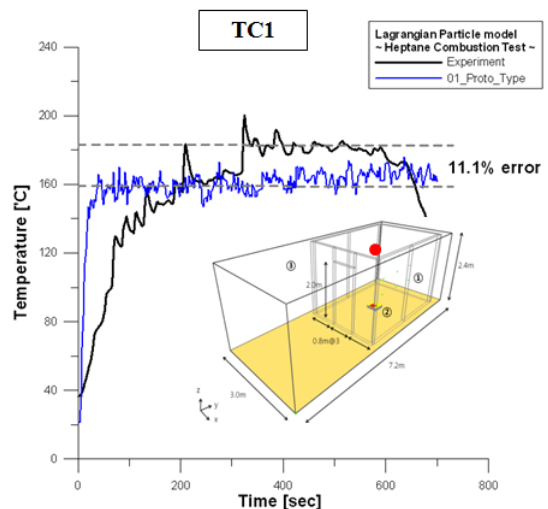


그림 6 라그랑지안 입자모델을 사용한 해석결과 : TC1의 시간별 온도변화 비교

가연물의 양이 합리적으로 조절되었기 때문에 시간별 온도변화가 실험값에 매우 근접한다. 따라서 본 연구에서는 교량하부 창고화재 해석에 라그랑지안 입자모델을 사용하였다.

2.3 실물모형 연소실험 기반 모델 구체화

2.3.1 실물모형 연소실험

실물모형 실험에 대한 FDS code의 적합성을 검증하기 위해 한국건설기술연구원에서 제작한 Large Scale Calorimeter를 사용한 실물모형 연소실험을 수행하였다. 실험장치는 1.3m의 틀 위에 3m×3m×2.4m의 가연성 EPS 샌드위치 패널을 이용한 창고모형으로 그림 7의 (a)와 같다. 내부 가연물은 250kg 상당의 옷을 사용하였으며 실험방법은 단위 가연물 연소실험과 같다.

EPS 샌드위치 패널은 단열성능이 좋고 경량이며, 자체강도와 내구성이 강하며 제작비용이 매우 저렴한 특징을 지닌다. 하지만 화재 시 심재가 쉽게 용융하며 연소가스가 발생하고 열분해에 의해 발생하는 가연성 기체에 의한 화염전파가 용이하여 화재성능이 취약하다. 이와 같은 EPS 샌드위치 패널을 이용한 구조물 화재의 특징은 플래시오버(flash over) 현상의 발생에 있다. 플래시오버는 건축물의 실내에서 발화로부터 화재가 서서히 진행하다가 시간이 경과함에 따라 대류와 복사현상에 의해 일정 공간 내에 열과 가연성 가스가 축적되고 발화온도에 이르게 되어 일순간에 폭발적으로 전체 공간이 화염에 휩싸이는 화재현상을 말한다. 플래시 오버는 일시에 화염이 실내 전체로 퍼지는 폭발적인 착화현상이므로 실제 화재상황에 있어서 그 위험성이 큰 만큼 가장 중요하게 살펴봐야 하는 부분이다. 그림 7의 (b)에 실물모형 연소실험에서 플래시오버의 발생 전·후의 모습을 나타내었다.



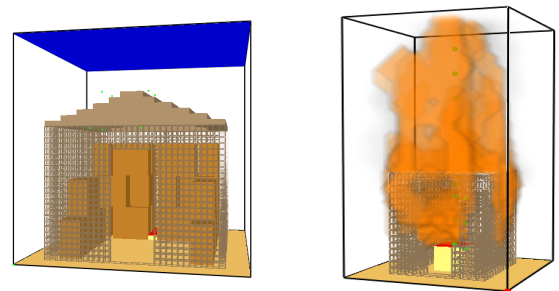
(a) 실험장치 (b) 플래시오버 전·후
그림 7 실물모형 연소실험

2.3.2 실험결과 비교 및 분석

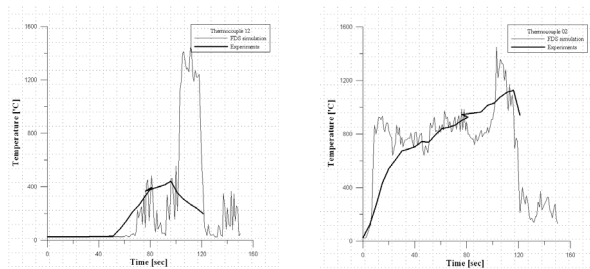
실물모형 화재해석에 사용된 모델은 그림 8과 같다. 점화원은 후면 바닥의 0.2m×0.9m 넓이에 1L의 헵탄을 120초의 전체 해석시간동안 균등하게 분사시켜 해석하였다. EPS 샌드위치 패널의 열분해온도는 스티로폼의 기본값인 350℃로 설정하였다(Philip 등, 2005).

그림 9의 (a)는 실외의 지상으로부터 3.2m에 위치한 열전대에서의 시간별 온도변화로 플래시 오버로 인한 대기온도의 변화에 가장 민감한 지점이다. 해석결과 실험결과와 거의 동일한 시점에서 플래시 오버가 발생한 것을 볼 수 있다. 그림 9의 (b)는 실내의 온도변화로 실험을 적절히 모사함을 확인할 수 있다. 하지만 플래시오버 현상 발생 이전의 온도구배는 해석결과가 더 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 상대적으로 밀폐된 공간에서 수행된 화재해석에 대한 FDS code가 갖고 있는 문제점으로 파악된다. 하지만 가연물 발열량 걱정은 최성기 온도의 비교결과 최대오차 25% 이내로 합리적인 값으로 수행된 것으로 판단된다.

플래시오버 이후 온도가 급격히 상승했다가 짧은 정상상태 구간을 거쳐 급격히 하강하는 경향은 EPS 샌드위치 패널의 모델의 연소속도가 제어되지 않고 초기에 급격히 이루어져 내부 가연물의 연소속도에 영향을 주었기 때문으로 판단된다. 이러한 오류를 피하기 위해서는 EPS 스티로폼 패널의 물성치를 화재 시나리오에 적합한 값을 선택해야 한다. 본 해석과 같이 금속판으로 쌓인 EPS 스티로폼 패널의 열분해



(a) 해석 모델 (b) 플래시오버 발생모사
그림 8 실물모형 화재해석 모델



(a) 시간별 실외 온도변화 (b) 시간별 실내 온도변화
그림 9 실물모형 화재해석 결과

온도 및 밀도가 보통 스티로폼 조각의 경우보다 더 높게 선택해야 하는 것으로 판단된다. 밀도의 경우 전체 EPS 스티로폼 패널 면에 대한 가연성 물질의 양을 결정하며 이 값이 상승할 경우 정상상태 화재지속시간이 증가하는 경향을 가진다. 실제 EPS 스티로폼 패널의 단위중량은 일반 스티로폼 조각의 단위중량보다 크기 때문에 이러한 결론은 타당하며, 신뢰도 있는 문헌조사 값에 바탕을 둔 값을 선택하는 것이 중요하다. 열분해온도의 경우도 보통 스티로폼 조각의 경우보다 높게 선택함으로써 EPS 스티로폼 패널의 플래시오버로 인한 연소속도를 느리게 제어할 수 있다. 이는 밀도의 선택과 같은 이유로 보통 스티로폼 조각에 비해 EPS 스티로폼 패널의 경우 노출면에 금속판이 존재함으로써 스티로폼의 발염연소를 막고 연소속도의 지연효과를 가져오기 때문에 보통 스티로폼 조각의 경우보다 더 높은 열분해온도를 선택하는 것은 타당하다.

3. 교량하부창고 화재해석

3.1 화재해석 개요

교량하부 물류창고의 화재시나리오가 교량하부 온도변화에 주는 영향을 분석하기 위해 내부 적재물 및 교량 높이에 따른 화재해석을 수행하였다. 본 연구의 대상이 되는 창고는 가로 42m, 세로 28m, 높이 8.5m의 크기를 가지며 벽체의 두께는 50cm이다. 대상 창고모형의 최대적재량을 검토하여 그림 10과 같이 해석모형을 작성하였다. 대상 가연물은 2m×2m×2m(중앙부) 및 1m×2m×2m(측면부) 크기의 상자형 구조로 모델링하였으며, 총 적재량은 1,728m³이다. 각 적재물 층간에는 두께 50cm의 철제 프레임을 모델링하였고, 화물적재작업의 공간확보를 위한 3m의 열간 간격을 가정하였다. 표 2와 같이 내부 가연물의 적재물품의 종류와 교량 높이를 변수로 설정하였으며 가연물별 입력 물성치는 SFPP 방화공학핸드북 등을 참고하여 표 3과 같이 설정하였다(한국화재보

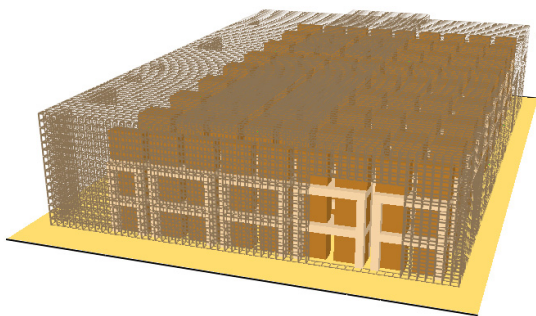


그림 10 교량하부창고 화재 해석모델

표 2 검토대상 변수조건

적재물품	교량높이	창고벽체
도서, 신문류	20m	스티로폼 (EPS)
고무, 타이어류	25m	
의류	30m	

표 3 가연물별 입력 물성치

입력 물성치	의류	도서류	고무류
방사율	1.0	0.9	0.9
연소반응률	1.0	1.0	1.0
연료수득률	1.0	1.0	1.0
열전도도(W/m/K)	0.1	0.05	0.29
비열(kJ/kg/K)	1.0	1.4	1.465
밀도(kg/m ³)	46.5	1,160	1,050
열분해온도(℃)	400	233	181
연소열(kJ/kg)	30,000	19,700	23,900

협협회, 2005; McGrattan 등, 2007).

해석결과의 분석대상은 시간간격 1초마다 ① 교량하부 표면온도 ② 교량하부 표면깊이 5mm 내부온도 ③ 교량하부 표면깊이 40mm 내부온도로 설정하였다. 온도계산은 FDS code가 제공하는 1차원 비정상 열전달 계산으로 교량하부 표면에 대한 수직방향으로의 열전달 결과로부터 계산하였다. 표면온도는 화재시나리오별 화재성장에 대한 경향성 분석을 위한 것이며, 5mm 깊이 내부온도는 콘크리트 폭렬에 대한 영향검토를 위하여 계산하였고, 40mm 깊이 내부온도는 온도상승에 따른 평균 보강철근 피복두께깊이의 콘크리트 및 보강철근의 강도손실 영향을 검토하기 위한 것이다. 각 온도 계산점은 교량 표면으로부터 각 깊이별 로 각각 30개소(가로 방향으로 8m 간격으로 6개소, 세로방향으로 6m 간격으로 5개소)에서 계산하였다.

3.2 손상분석 방법

각 화재시나리오에 의한 콘크리트 및 강재의 손상수준에 대한 검토를 위해 분석기준을 설정하였다. 손상수준 분석은 해석결과로 얻은 시간별 온도변화 그래프를 사용하였으며 대표적인 해석결과 그래프와 손상평가기준을 그림 11에 도시하였다. 그림 11에 도시된 것과 같이 손상평가는 콘크리트의 폭렬손상, 강도손실, 보강철근의 강도손실로 나누어 수행될 수 있다.

3.2.1 콘크리트 폭렬

콘크리트의 폭렬은 전술한 것과 같이 약 200~350℃에서 발생한다. 폭렬을 지배하는 물리적인 특성은 콘크리트 내부의 자유수 증발에 의한 공극압력의 상승이며 주요 영향인자

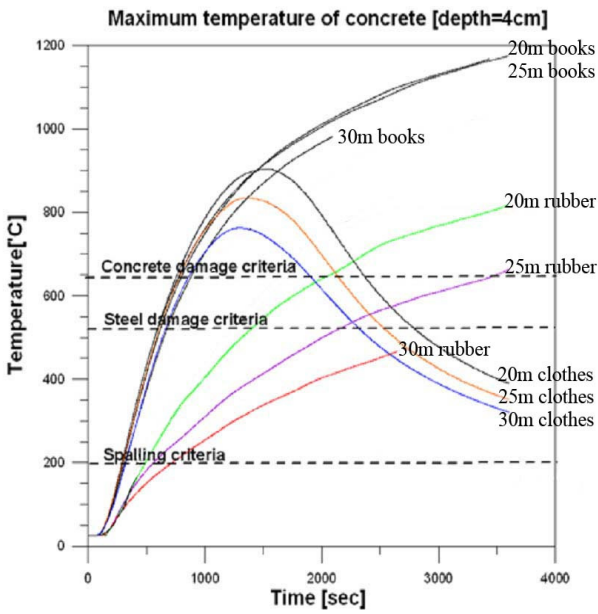


그림 11 대표적인 해석결과 및 손상평가 기준

로는 강도, 공극비, 밀도, 하중 크기, 상대습도 등이 있으나 이러한 다양한 변수를 모두 고려할 수 없기 때문에 대상 가열면(표면 깊이 5mm, 40mm)을 고정하여 폭발온도(최저온도 200℃) 이상의 온도지속시간을 분석기준으로 설정할 수 있다.

3.2.2 콘크리트 강도손실

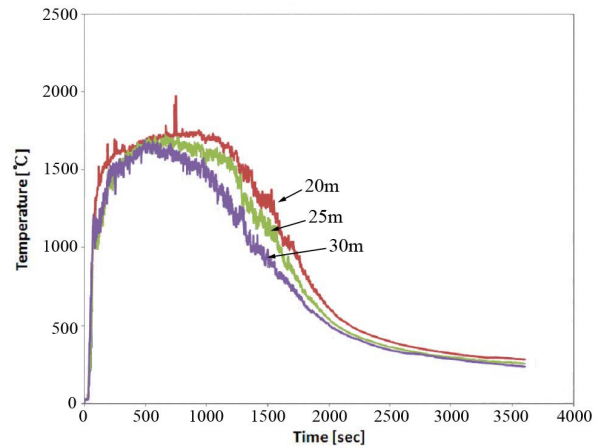
콘크리트의 압축강도는 골재의 조성, 밀도에 따라 변하므로 본 연구에서는 가장 일반적으로 사용되는 보통강도-표준중량 규산염 골재 콘크리트에 대해 평가기준을 선택하였다. 일반적인 콘크리트의 경우 650℃를 기준으로 압축강도가 50%까지 저하되며 이후 온도상승에 따라 급속도로 압축강도가 저하되는 경향을 보이며 폭발과 마찬가지로 임계온도 이상 지속시간은 성장기-최성기-쇠퇴기를 거치는 일반적인 화재특성으로 미루어 압축강도 저하정도를 대표하는 특성으로 선택할 수 있다. 따라서 압축강도가 급격히 저하되는 650℃를 기준으로 각 변수조건별 교량 중앙부에 대해 임계온도 이상 지속시간을 분석할 수 있다.

3.2.3 보강철근 강도손실

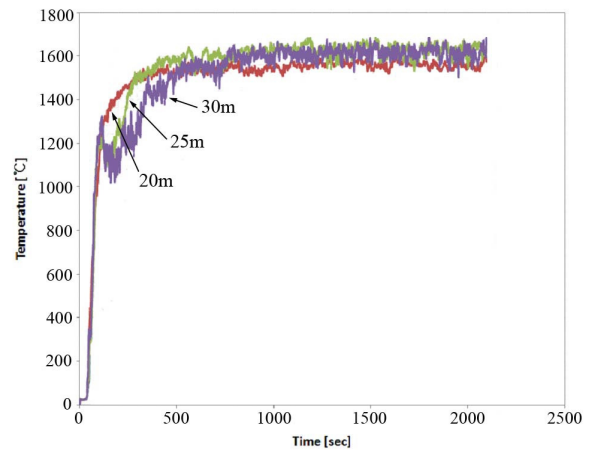
보강철근의 경우 비균질 혼합물인 콘크리트와는 다르게 고온조건에 대한 재료거동의 응답이 빠르게 발생하며 손상유무의 판별이 명확하다. 따라서 각 변수조건별 콘크리트 피복두께 깊이(40mm)에서의 시간별 온도변화 계산결과를 이용해 ASTM에서 규정한 보강철근 임계온도(538℃) 초과여부를 판별할 수 있다(ASTM, 2009).

3.3 해석결과

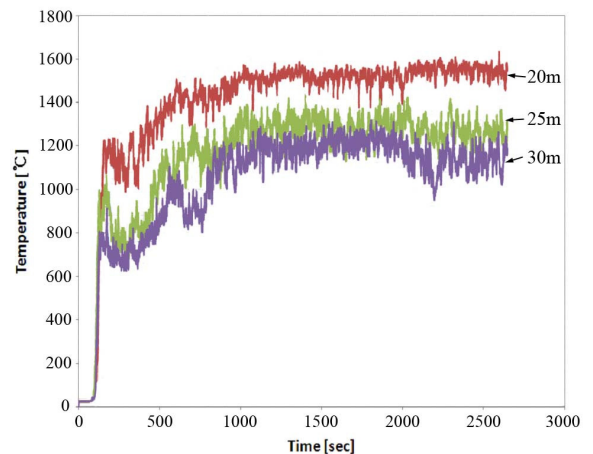
각 가연물별 교량높이에 따른 교량하부의 30개의 각 층점 중 최성기 온도가 가장 높은 점을 최대표면온도로 선택하여 분석하였다. 그림 12에 도시된 온도분포와 같이 전반적으로 교량높이가 높아질수록 최대온도가 낮아지는 것을 볼 수 있



(a) 의류 화재해석

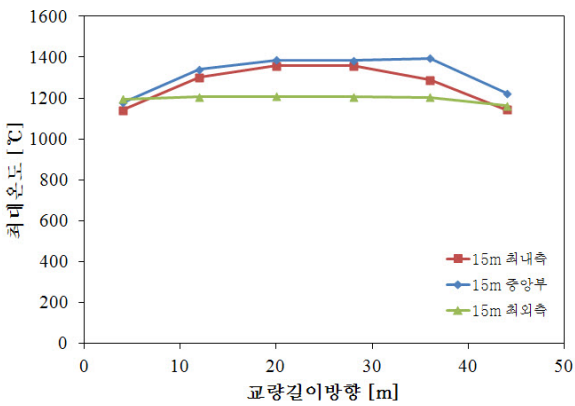


(b) 도서류 화재해석

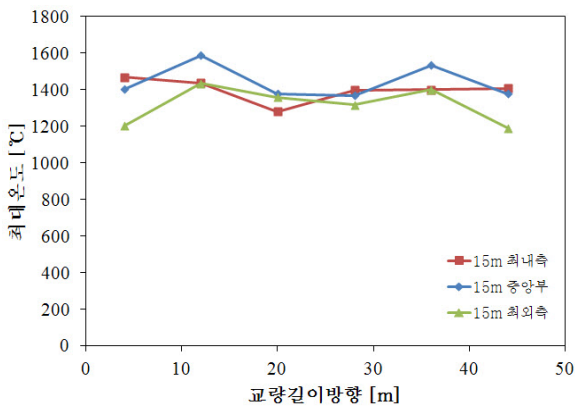


(c) 고무류 화재해석

그림 12 교량높이별 최대표면온도



(a) 의류 화재해석



(b) 도서류 화재해석

그림 13 교량 폭방향 최대표면온도

다. 연소경향성은 각 가연물별 특성으로서 의류화재의 경우 화재강도가 초기에 집중되어 있는 것을 볼 수 있으며 도서류 및 고무류의 경우는 최성기에 도달한 후 해석시간동안 화재강도가 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 의류화재의 경우 약 1,000초 가량 최성기가 진행되었으며 도서류의 경우 1,700초 이상, 고무류의 경우 1,800초이상 최성기가 지속된 것으로 나타났다.

전체 해석시간은 3,600초로 통일시켜 수행하였으나 의류와 도서류 일부를 제외한 나머지 해석수행이 비정상적으로 종료된 경우가 있어 표본 자료값 개수의 통일을 위해 콘크리트 폭발, 강도저하, 보강철근 강도저하에 대한 대푯값 추출과 손상평가는 최저 해석수행 시간인 2,100초로 통일시켜 수행하였다.

각 가연물 및 교량높이별 교량하부 최내측, 중앙부, 최외측을 대상으로 교량 폭방향 위치에 따른 최대표면온도를 그림 13에 도시하였다. 각 측점은 해석좌표 기준으로 길이방향 4.5m(최내측), 16.5m(중앙부), 28.5m(최외측)의 측점을 대상으로 한다. 검토결과 가연물과 교량높이변수에 대해 중앙부의 표면온도가 가장 높은 것으로 나타났으며 이어서 최

내측, 최외측의 순서로 표면온도 분포를 보였다. 이는 창고입구부근(최외측 방향)의 작업차량 동선 및 작업공간확보를 위해 창고벽체에서 4.5m의 여유공간을 두고 가연물을 적재한 반면 최내측 방향의 적재물은 창고벽체와 0.5m의 여유공간을 두어 모델링했기 때문에 상대적으로 중앙부 및 창고 내측에 화재가 집중된 것으로 판단된다. 또한 점화원을 창고 내측 중앙부에 위치시켜 발화점에 가까운 것 또한 중앙부의 최대표면온도가 다른 부분에 비해 가장 높게 나타난 이유로 판단된다. 따라서 폭발손상 및 콘크리트 강도저하검토를 위한 대푯값을 교량길이방향 중앙부 온도분포로 선택하였다.

3.3.1 콘크리트 폭발손상 검토

각 가연물에 따른 교량높이별 중앙부 5mm 깊이 위치의 임계온도 200°C이상 지속시간을 그림 14에 도시하였다. 화재 성장기 구간에 대한 추세선으로부터 임계온도를 초과하는 구간에 대해 고려하였으며 온도 그래프상 노이즈에 의한 일시적인 온도저하는 고려하지 않았다. 자료표본의 개수를 맞추기 위해 전체 해석시간을 2,100초로 설정하여 분석한 결과, 의류는 평균 1,800초, 도서류는 1,750초, 고무류는 1,600초의 폭발온도 지속시간을 보이는 것으로 나타났다. 또한, 화재초기 성장기 10분 이내에 교량 중앙부에 대해 모든 종류의 가연물 화재로 인한 폭발피해가 발생될 것으로 예측되며, 각 가연물별 화재에 따른 폭발 온도 지속시간의 최대 차이는 200초로써 큰 차이를 보이고 있지 않으나 화재성장 경향성으로 미루어 해석시간을 증가시킬 경우 도서류의 폭발 지속시간이 가장 클 것으로 판단된다. 그림 12의 각 가연물별 최대표면온도 분포를 고려할 때 의류화재는 전체 구간에 대해 쇠퇴기를 거치고 있으며 도서류화재는 최성기에 머물러 있기 때문에 해석시간을 2시간 이상으로 늘릴 경우 도서류화재에 의한 손상이 가장 클 것으로 예측된다. 높은 화재강도가 초기에 집중된 의류에서는 교량높이에 대해 비슷한 폭발온도 지속시간을 나타내는 것으로 판단된다. 반면 도서류와 고무류 화재의 경우 높이별로 폭발온도 지속시간의 편차가 존재한다.

3.3.2 콘크리트 강도손상 검토

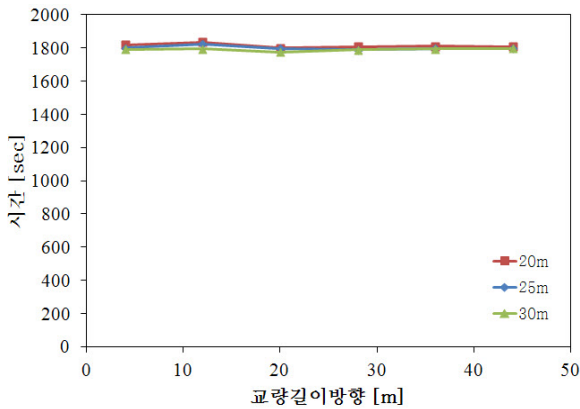
각 가연물에 따른 교량높이별 중앙부 40mm 깊이 위치의 임계온도 650°C이상 지속시간을 그림 15에 도시하였다. 폭발손상온도에 비해 강도손상온도는 측점이 깊으며(40mm) 임계온도가 상대적으로 높게 설정되어 있어 가연물별, 교량높이별 경향성을 뚜렷하게 확인할 수 있다. 그림 15와 같이 교량높이가 높을수록 콘크리트 강도손실에 대한 안전성이 높아지는 것을 볼 수 있으며 고무류 화재의 경우 30m이상의

높이에 대해 화재안전성을 확보할 수 있다. 도서류 화재강도는 2,100초간의 해석시간 내에 쇠퇴없이 최성기가 유지되어 교량높이에 무관하게 강도손실 온도이상 지속시간을 유지하는 것으로 판단된다. 이 경우 역시 해석시간이 2시간 이상으로 증가할 경우 교량높이에 따른 강도손실 온도의 경향성이 나타날 것으로 예측된다. 의류와 고무류의 경우 초기에 집중되어 쇠퇴기를 거치는 화재경향성으로 인해 지속적인 열 전달이 이루어지지 않아 양 단부에서 급격히 온도가 하강하는 경향이 나타났다. 이는 화염에 의한 직접적인 영향이 작

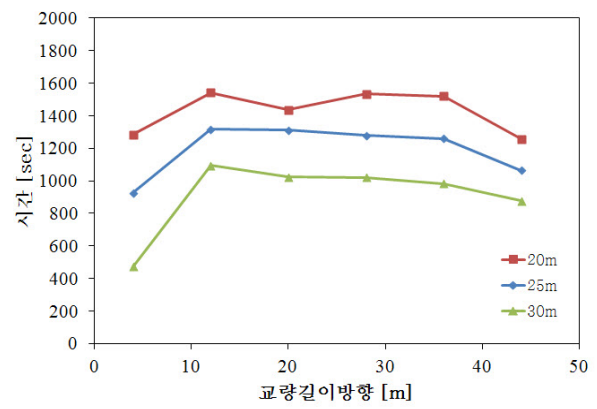
은 높은 교량에서 더욱 두드러지게 나타난다.

3.3.3 보강철근 강도손실 검토

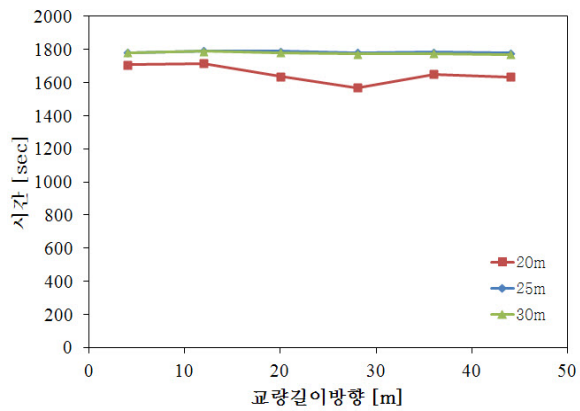
깊이 40mm 온도분포에 대해 각 30개소의 온도측점을 대상으로 고온상태에 대한 응답이 즉각적인 철근의 특성을 고려하여 가연물별 임계온도 538℃ 초과여부를 유, 무로 구별해 초과부위에 대해서는 손상으로 판단하였으며 그 결과를 표 4에 나타내었다. 손상범위는 도서류 화재와 의류 화재에 대해서 거의 비슷한 수준의 손상이 발생했음을 확인할 수 있



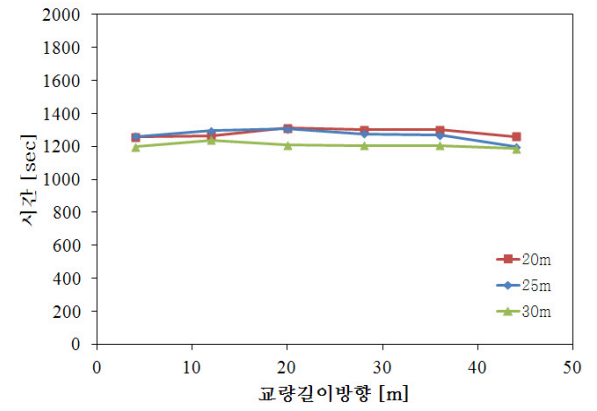
(a) 의류 화재해석



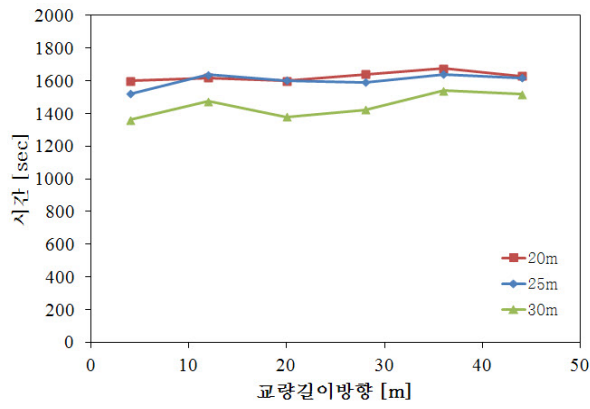
(a) 의류 화재해석



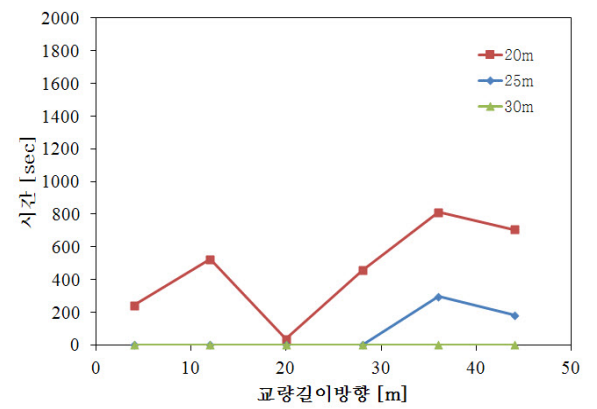
(b) 도서류 화재해석



(b) 도서류 화재해석



(c) 고무류 화재해석



(c) 고무류 화재해석

그림 14 교량높이별 중앙부의 콘크리트 폭열온도 지속시간

그림 15 교량높이별 중앙부의 콘크리트 강도손실 온도 지속시간

표 4 보강철근 강도손실

교량 높이	의류	도서류	고무류
20m	전구간 손상	전구간 손상	28개소(93.3%)
25m			19개소(63.3%)
30m	29개소(96.6%)		6개소(20.0%)

다. 고무류의 경우 교량 높이가 상승함에 따라 손상구간이 급격히 감소하며, 콘크리트 강도손실 검토결과와 종합해 보았을때 고무류 창고화재 시나리오에 대해 30m이상 교량의 화재안전성을 확보할 수 있다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 FDS code를 이용하여 교량하부 화재발생원과 교량높이의 영향을 분석하였다. 헵탄을 이용한 단위 가연물의 연소실험과 FDS code를 이용한 해석결과의 비교를 통해 FDS code의 적합성을 검증하였으며, 이를 이용하여 교량하부창고 화재발생원에 대한 화재해석을 수행하였다. 본 연구 결과 다음과 같은 결론이 얻어졌다.

- ① FDS code의 유효성 검증을 위해 단위가연물 연소실험 및 실물모형 연소실험 수행결과와 해석결과를 비교하였다. 비교 결과 전산화해석코드로 선택한 FDS code의 유효성이 검증되었으며, 이를 이용해 플래시오버 현상과 같은 실제 상황에 가까운 화재시나리오를 적용할 수 있음을 확인하였다.
- ② FDS code를 이용해 교량하부 표준창고구조물의 실제 화재시나리오를 적용하여 폭발, 콘크리트의 강도손실, 보강철근의 강도손실로 나누어 교량 높이 및 창고 내부 가연물(의류, 도서류, 고무류)별로 나누어 해석을 수행하였다. 일반적인 콘크리트 구조물의 폭발손상을 고려하기 위해 해석모델별 폭발온도 지속시간을 산정해 폭발손상을 평가하였으며, 대부분의 20~30m 교량이 하부창고화재에 대해 폭발에 취약한 것을 확인할 수 있었다. 각 가연물별 화재시나리오에서 화재강도는 도서류가 가장 강하고 최성기 유지시간이 길며 대상교량 높이 변수 전체에 대해 콘크리트의 강도저하, 폭발 및 보강철근 강도저하를 가장 크게 발생시킬 것으로 예측되었다. 고무류 창고화재의 경우 30m이상 높이의 교량에 대해 화재안전성을 확보할 수 있었다.
- ③ 본 논문의 연구결과는 교량하부의 깊이방향에 대해 1차원 비정상 열전달 해석을 수행하였기 때문에 이에 따른 결과에 대해 NIST는 FDS code가 가진 약 5~20% 정도의 원초적인 오차를 인정하고 있다. 따라서 3차원 비정상 열전달 해석에 대한 추가적인 연구로 오

차를 줄이는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 한국도로공사 실물모형 화재실험, 내화실험 및 화재피해모사 DB구축 용역 사업과 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2011-0003166) 지원으로 이루어진 것으로, 본 연구를 가능하게 한 한국도로공사와 한국연구재단의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (2006) 국가물류기본계획 수정계획.
- 권영진 (2011) 콘크리트 건축구조물의 화재 피해사례 및 손상 정도 분석, 콘크리트학회지, 23(3), pp.44~46.
- 김성수, 박광필 (2011) 화재에 의한 콘크리트 구조물의 손상, 콘크리트학회지, 23(3), pp.29~31.
- 소방방재청 소방정책국 화재조사팀 (2008) 화재발생총괄표.
- 신연호, 유용호, 심재원, 지광습 (2009) 헵탄연소실험을 이용한 FDS code의 적용성 분석, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.381~384.
- 심재원, 김낙영, 유병옥, 박영호 (2011) 콘크리트 터널 및 지하구조물의 화재 피해사례 및 손상평가, 콘크리트학회지, 23(3), pp.39~43.
- 이계희, 김선훈 (2007) 박리를 고려한 지하박스구조물의 화재 하중해석Ⅱ, 한국전산구조공학회 논문집, 20(4), pp.485~492.
- 이계희, 최익창 (2007) 박리를 고려한 지하박스구조물의 화재 하중해석Ⅰ, 한국전산구조공학회 논문집, 20(4), pp.477~483.
- 이운환, 양준언, 김종훈, 김운형 (2005) 화재모델 CFAST를 이용한 원전 화재구역의 CCDP 평가(Ⅱ), 한국화재소방학회 논문집, 19(3), pp.20~27.
- 이정배, 김일곤, 차철준 (2011) 콘크리트 교량의 화재 피해사례 및 손상분석, 콘크리트학회지, 23(3), pp.32~38.
- 장용준, 박원희 (2007) 철도터널 화재 유동에 사용되는 FDS code의 적용성 분석, 한국철도학회 논문집, 10(2), pp.224~230.
- 지문학, 이병곤 (2006) 원전 화재방호구역의 화재위험 분석을 위한 FDS 적용성, 한국화재소방학회 논문집, 20(4), pp.13~18.
- 최승관, 김형준 (2006) 화재시 콘크리트 구조물 폭발 거동 연구, 건설기술정보, pp.22~27.
- 한국화재보험협회 (2005) SFPF 방화공학 핸드북 1, 한국화재보험협회.

- 한국화재보험협회** (2005) SFPPF 방화공학 핸드북 2, 한국화재보험협회.
- ASTM E119.** (2009) Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials, ASTM.
- Cooper, L.Y. Franssen, J.M.** (1999) A Basis for Using Fire Modeling with 1-D Thermal Analyses of Partitions to Simulate 2-D and 3-D Structural Performance in Real Fires, *Fire Safety Journal*, 33(1999), pp.115~128.
- Dejoan, A. Jang, Y.J., Leschziner, M.A.** (2005) Comparative LES and Unsteady RANS Computations for a Periodically-Perturbed Separated Flow Over a Backward-Facing Step, *Journal of Fluids Engineering (ASME)*, 127, pp.872~878.
- Hostikka, S., Keski-Rahkonen, O.** (2003) Probabilistic Simulation of Fire Scenarios, *Nuclear Engineering and Design*, 224(2003), pp.301~311.
- McGrattan, K.B., Bouldin, C.** (2004) Simulating the Fires in the World Trade Center, *International Interflam Conference, 10th Proceedings. 2*, pp.999~1008.
- McGrattan, K.B., Hostikka, S., Floyd, J.E., Klein, B.W.** (2007) Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide 3: Validations, *NIST*.
- McGrattan, K.B., Hostikka, S., Floyd, J.E., Baum, H.R., Rehm, R.G., Mell, W., McDermott, R.** (2007) Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide 1: Mathematical Model, *NIST*.
- McGrattan, K.B., Klein, B.W., Hostikka, S., Floyd, J.E.** (2007) Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide, *NIST*.
- Lee, H.P.** (1996) Thermal Stress Analysis of a Waste Storage Container, *Computers and Structures*, 61(2), pp.197~224.

- 논문접수일 2011년 10월 28일
- 논문심사일 2011년 11월 8일
- 게재확정일 2011년 11월 21일