

헵탄연소실험을 이용한 FDS code의 적용성 분석

The Applicability Analysis of FDS code using Heptane Combustion

신연호* · 유용호** · 심재원*** · 지광습****

Shin, Yeonho · Yoo, Yongho · Shim, Jae Won · Zi, Goangsoup

1. 서 론

도로 내 화재발생은 인명피해뿐만 아니라 구조물의 손상 및 붕괴로 인해 소요되는 보수비용과 교통두절로 인한 사회간접자본의 소모 등 국가 전체에 큰 혼란을 발생시킨다. 이러한 중요성에도 불구하고 교량구간과 같은 개방구조에 대한 화재연구는 매우 적고, 일반적인 방재대책 연구수준에 머물러 있다. 이와 같은 화재연구는 제한된 조건에 대한 실험연구가 불가능하며 그 규모에 있어서 실물화재구현이 어려우며 비용이 많이 드는 어려움이 있다. 반면, 컴퓨터 프로그램을 이용한 전산유체해석(CFD)은 다양한 변수조건 및 제한된 환경에 대해 화재 모델링이 가능하며, 실험에 비해 상대적으로 적은 시간과 비용이 소모되기 때문에 최근 각국에서는 이를 이용한 모델링 기법이 개발되기 시작했다. 시뮬레이션 기법으로는 LES기법, RANS기법, DNS기법이 주류를 이루며 각 기법의 장단점에 따라 적용가능한 범위가 달라진다. 미국 표준기술연구소(NIST)에서 개발한 FDS code는 LES기법을 사용하고 있으며 개방구조의 대규모 화재에 적합한 것으로 알려져 있다. 본 연구는 교량구조와 같은 대규모 개방구조의 화재해석수행에 선행해 단위 가연물 연소실험결과 시뮬레이션을 이용한 계산결과와의 비교를 통해 FDS code의 적용성을 분석하는데 목적이 있다.

2. 단위 가연물 연소실험

FDS code를 이용한 연소 시뮬레이션 결과의 비교를 위해 단위 가연물 연소실험을 수행했다. 실험장치는 Room corner tester(ISO 9705)를 사용하였으며, 단위 가연물은 비교적 물성치가 잘 알려져 있으며 순물질인 헵탄(C_7H_{16})을 사용하였다. 가열로 내부에 열전대를 설치하여 시간별 온도변화를 측정하고, Room corner tester를 이용해 시간별 열방출률을 측정하여 FDS code의 적용성 분석의 기초자료로 활용하였다.

2.1 실험 개요

Room Corner Tester의 기본 원리로는 “순연소열은 연소하는데 필요로 하는 산소의 양에 비례하며, 산소 1kg이 소비되면 약 13.1×10^3 kJ의 열이 방출된다”는 관계를 이용한다. 가연물의 연소생성물을 상부에 설치된 후드에서 흡기하여 시간별 열방출률을 측정한다. 열방출률의 측정범위는 $0.1MW/m^2 \sim 1MW/m^2$ 이다.

실험장치의 제원은 그림 1과 같으며 가열로의 정중앙부에 가연물을 위치시켜 연소시켰다. 가연물은 두께 2mm의 크기 $35mm \times 35mm \times 15mm$ 의 철제용기에 담아 연소시켰으며, 헵탄의 연소열이 바닥과 직접 접촉하여 전도되는 것을 방지하기 위해 용기 내부에 2kg의 물을 넣고 그 위에 헵탄 2.84kg(4.152ℓ)을 넣어 연소시 열방출률이 균일하게 유지되도록 하였다. 온도측정을 위한 열전대는 그림 2와 같이 각 지점별 높이 0.5m간격으로 각 3개소(0.5m, 1.0m, 1.5m), 총 9개의 열전대를 설치하였으며 참고용 열전대로 화원 중앙 직상부에 3개소를 더 설치하여 시간별 온도측정을 하였다.

* 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 · E-mail : planet_earth@korea.ac.kr - 발표자

** 한국건설기술연구원 화재및설비연구센터 선임연구원 · 공학박사

*** 정희원 · 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원 · 공학박사

**** 정희원 · 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수 · 공학박사 · E-mail : g-zi@korea.ac.kr

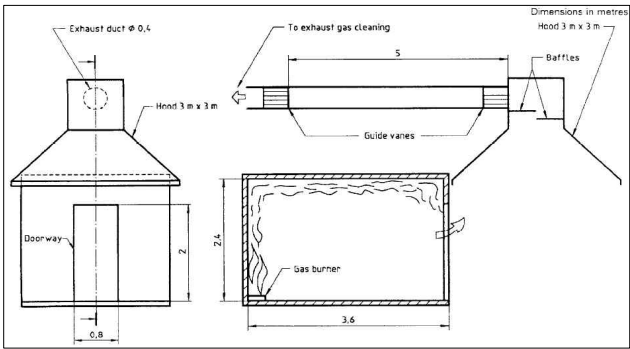


그림 2. Room corner tester

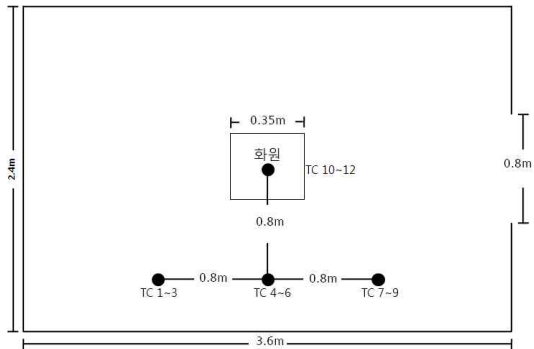


그림 3. 열전대 위치 (Top view)

3. 연소 시뮬레이션

3.1 분석 프로그램

본 연구에서는 헵탄연소에 따른 화재유동을 해석하기 위해 미국 표준기술연구소(NIST)에서 개발한 FDS(Fire Dynamics Simulator, version 5.2.0) code를 사용하였다. FDS code는 LES(Large Eddy Simulation)기법을 이용하여 3차원 비정상 화재모델의 난류유동을 해석한다. 연구결과에 따르면 LES는 대규모의 와류(vortex)가 발생하고 비정상 유동(unsteady flow) 현상이 지배하는 일반적인 화재유동모사에 가장 적합하다고 알려져 있다[1]. 이런 장점은 본 연구의 최종목표인 교량에서의 화재와 같은 대규모 화재모사에 일치하기 때문에 FDS code를 선택하였다.

3.2 유동조건

단위 가연물 연소실험의 모사를 위해 그림 3과 같이 시뮬레이션 모델을 구성하였다. 가열로의 벽체는 콘크리트로 구성하였으며 중앙에는 물과 헵탄을 담은 두께 2mm의 철제용기를 모델링하고 입구 상부에는 3m×3m의 면적에 흡기조건을 부여해 후드에 의한 대기유동조건을 모사했다. FDS에서는 경사를 가지는 구조체의 모사가 불가능하여 $Q = 2.835\text{m}^3/\text{s}$ 의 유량의 후드를 균일하게 9등분하여 중앙부에 유속을 집중한 평면구조로 모델링하였다.

격자간격은 X방향으로 144개, Y방향으로 60개, Z방향으로 48개의(총 414,720개) 격자를 사용하였으며 각 Brick은 0.05m×0.05m×0.05m로서 FDS에서 제안하는 격자조건을 충족시켰다. 최소 격자크기조건에 의해 가연물의 높이는 0.1m로 모델링하였으며, 이에 따라 상대적으로 철제용기 및 열전대의 위치도 0.05m 높게 모델링하였다. 이는 가열로에 비해 상대적으로 매우 작은 크기인 가연물의 격자민감도 때문에 선택한 방법이다. 헵탄 및 물은 상부표면에서부터 0.0339m, 0.01632m의 층두께를 할당하였다. 각 물질의 열역학적 특성에 대한 입력값은 다음과 같다.

표 2. 수치해석에 사용된 물성

| 물성 | 헵탄 | 물 | 철 | 콘크리트 |
|-----------------|----------|------|----------|------|
| 방사율 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 활성화에너지 [kJ/mol] | 110039.2 | | 가연물에만 해당 | |
| 연소수득율 | 1.0 | | 가연물에만 해당 | |
| 반응열 [kJ/kg] | 318 | | 가연물에만 해당 | |
| 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/m3] | 684 | 1000 | 7850 | 2400 |
| 끓는점 [°C] | 98.42 | 100 | 액체에만 해당 | |
| 연소열 [kJ/kg] | 44566 | | 가연물에만 해당 | |

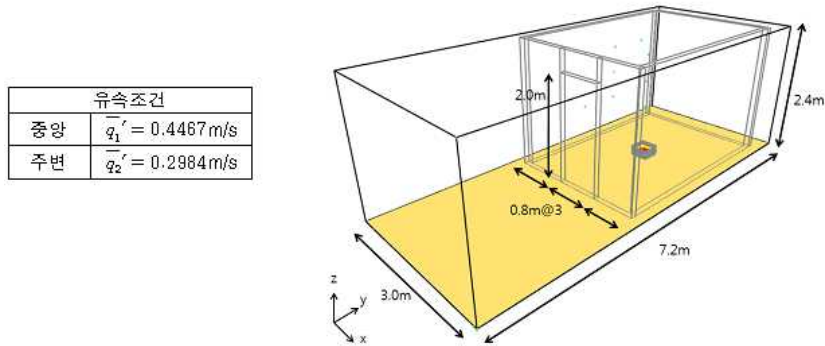


그림 4. Room corner tester의 3차원 모델

4. 결과 및 고찰

화재유동해석을 위한 FDS code의 적용성 분석을 위해 연소실험에서 측정한 온도결과와 시뮬레이션을 통해 계산한 온도를 비교하였다. 그림 4는 열전대 TC1에서의 시간에 따른 온도변화를 비교한 것으로, 열전대 중 화염에 의한 직접적인 영향이 비교적 적으며 대기유동에 의해 시간별 온도변화가 정상상태에 도달한 대표적인 결과값이다. 화재유동은 실험과 해석결과 모두 점화와 동시에 빠른 연소속도를 가지는 성장기를 거쳐 정상상태에 도달하여 일정한 온도를 유지하는 일반적인 액체pool 화재성장곡선과 비슷한 경향성을 보인다.

정상상태에서의 온도차이는 약 50°C로 실험측정치의 약 28%의 오차를 보여주고 있다. NIST에서는 FDS의 원초적인 오차범위를 5~20%정도로 인정하고 있으며 이는 격자민감도에 상관없이 비슷한 수준을 보여주는 것으로 알려져 있다. FDS에서의 격자크기는 계산시간과 정확도에 직접적으로 영향을 주기 때문에 적절한 격자크기의 선정이 필수적이다. 본 연구에서 사용된 0.05m×0.05m×0.05m 크기 이외의 격자크기에 대해서 해석을 수행한 결과 조밀한 격자크기를 사용한 경우 해석결과에 노이즈가 감소하며 결과값의 격자민감도는 감소하지만 해석시간의 큰 증가를 유발하며 100만개 이상의 Brick에 대해서는 기억용량의 부족으로 해석이 불가능했다. 조악한 격자크기는 'Numerical Instability Error'를 발생시키는 원인이 되며 수렴성 문제를 발생시켜 화재유동이 정상상태에 도달하지 않기 때문에 FDS code를 이용한 화재유동해석에 있어서 격자크기의 선정은 가장 중요한 사항이다.

기존연구에 의하면 천장에 개구부가 없는 실내화재모사에 있어서 FDS code는 화재성장속도를 지나치게 빠르게 예측함으로써 적절하지 못한 결과를 도출해낸다고 지적하고 있다[2]. 그림 4와 그림 5에서도 나타나 있듯이 실제화재성장에 비해 시뮬레이션 결과의 화재성장속도가 현저하게 빠르다. 이는 벽 근처에서 유동에

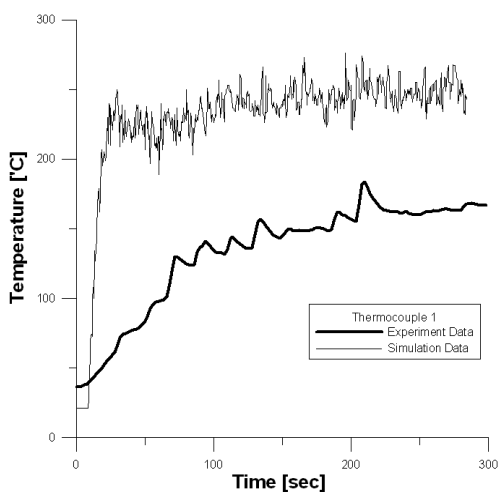


그림 5. TC1의 시간별 온도변화

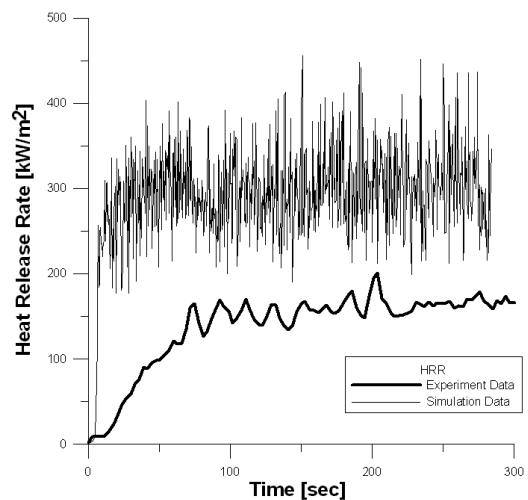


그림 6. 시간별 열방출률

측이 떨어지는 LES기법의 단점 때문인 것으로 판단된다. 이러한 단점을 보완하기 위해서는 벽 근처에서의 격자크기를 조밀하게 하거나 가급적 벽체에 의한 영향이 적고 대규모 화재로 인해 난류유동이 자유로운 개방공간에 대한 해석을 수행해야 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 화재유동모사를 위한 FDS code의 적용성 분석을 위하여 헵탄연소실험을 통한 시간별 온도 및 열방출률 변화를 FDS code를 이용한 시뮬레이션 결과와 비교하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실험결과와 시뮬레이션결과 모두 일반적인 액체pool 화재성장곡선의 경향성을 따라 화염이 성장하여 정상상태에 도달하는 것을 알 수 있었다.
2. 정상상태에서의 온도는 실험측정치와 약 28%의 오차를 보이고 있으나 FDS code자체의 오차범위에서 크게 벗어나지 않았으며 적절한 격자길이의 선택을 통해 보완할 수 있을 것으로 판단된다.
3. 실험에 비해 시뮬레이션의 화재성장속도가 현저하게 빠른 것은 벽 근처에서 유동예측이 떨어지는 LES 기법의 단점이 원인이라고 추정된다.
4. 개방공간에 대한 해석에서는 빠른 화재성장속도의 단점이 보완되므로 교량과 같은 개방구조의 토목구조물에 대한 화재해석에 대해 FDS code가 적용 가능함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2009년 한국도로공사 도로교통연구원 《교량하부 화재발생원에 대한 내화방안 및 기준수립사업》으로 이루어진 것으로 본 연구를 가능케 한 한국도로공사에 감사드립니다.

참고문헌

1. 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)*, Vol. 127, pp.872-878.
2. 고경찬, 박외철. (2003) 화재크기에 따른 실내화재의 수치연구 - I. 중심형 화재, *산업안전학회지*, 제19권, 제1호, pp.18-22
3. NIST, (2008) Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide.