



FDS에 의한 목재 및 지하철 화재의 열 및 연기 거동 시뮬레이션

손윤석* · 단승규 · 이봉우** · 권성필** · 신동일 · *김태욱

명지대학교 화학공학과, *한국철도기술연구원, **한국소방산업기술원[†]
(2010년 10월 28일 접수, 2010년 12월 27일 수정, 2010년 12월 27일 채택)

Simulation of Heat and Smoke Behavior for Wood and Subway Fires by Fire Dynamics Simulator(FDS)

Yun Suk Sonh* · Seung Kyu Dan · Bong Woo Lee**
Seong Pil Kwon** · Dong Il Shin · *Tae Ok Kim

Department of Chemical Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea
^{*}Korea Railroad Research Institute, ^{**}Korea Institute of Fire Industry & Technology
(Received 28. October. 2010, Revised 27. December. 2010, Accepted 27. December. 2010)

요 약

본 연구에서는 CFD 기반의 화재시뮬레이터인 FDS에 의해 화재에서 열 및 연기 거동을 해석하는 방법을 제시하기 위하여 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교하였고, FDS 시뮬레이션의 그리드 크기변화에 대한 사고결과의 민감도 분석을 실시하였다. 목재 화재에서는 실험에서 얻은 열화상 이미지와 FDS 시뮬레이션을 비교한 결과, 최대온도에서도 약 4.3 %의 적은 오차를 나타내어 FDS에 의해 화재현상을 해석할 수 있었다. 또한 지하철 화재에서 그리드 크기변화에 대한 FDS 결과의 민감도를 분석한 결과, FDS 시뮬레이션의 그리드 크기를 28(L)×28(W)×14(H)보다 작게 하는 경우에는 연기 온도, CO 농도 및 가시거리의 시뮬레이션 결과가 거의 일정한 값을 나타내어 본 연구에서 설정한 화재 모델링으로 FDS에 의해 화재현상을 해석할 수 있음을 알 수 있었다.

Abstract - In this study, to propose the analysis method of heat and smoke behavior of fire using the CFD-based fire simulator FDS, comparison of the simulation results against the experimental results and the sensitivity of the results to the grid sizes have been investigated. For the wood fire, thermal images captured from the experiments were compared against the FDS simulations, and the maximum temperatures agreed in ~4.3 % error, showing the applicability of FDS in the interpretation of the fire phenomena. In the aspect of the sensitivity to the grid size for the subway fire, FDS results of smoke temperature, CO concentration and visibility converged and showed no distinct changes for the grid size < 28(L)×28(W)×14(H), guaranteeing that the FDS fire model set in this research could interpret the fire phenomena successfully.

Key words : fire simulation, wood fire, subway fire, fire dynamics simulator (FDS), computational fluid dynamics (CFD)

1. 서 론

최근에는 초고층 빌딩과 지하 생활공간이 급증하고 있으며, 이들 시설이나 공간에서 화재가 발생하는 경우에는 인명의 피난과 소화활동의 곤란 등

으로 피해규모가 대형화로 직결될 수 있기 때문에 이에 대한 방재대책이 관심분야로 대두되고 있다. 특히, 지하공간이나 지하철과 같은 밀폐된 공간에서 화재가 발생하는 경우에는 연소에 의해 생성된 CO와 같은 독성물질에 의한 인명피해가 매우 치명적일 뿐만 아니라, 연기가 가시거리를 감소시켜 사람들이 출구를 찾는 것을 방해하기 때문에 피해를

[†]주저자:kimto@mju.ac.kr

확대시킬 수 있다[1-3].

따라서 화재로 인해 생성되는 연기, 열, 연소가스 등의 유동현상을 사전에 공학적으로 해석하여 인명과 재산 피해를 최소화하고, 화재를 체계적으로 제어·소화할 수 있는 방재시스템을 설계하기 위한 방안으로, CFD(computational fluid dynamics)를 이용한 화재 연구가 활발하게 진행되고 있다. CFD는 실험을 수행하지 않고도 유동현상을 해석할 수 있을 뿐만 아니라 매개변수 해석을 통해 설계에 소요되는 시간을 감소시킬 수 있는 장점이 있기 때문에 유체현상, 반응계, 방화설계 등의 다양한 분야에서 사용이 증가하고 있다[4]. 특히, 일반적인 유체역학 문제에서는 평균값의 레이놀즈(Reynolds) 수를 사용하는 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 모델을 사용한 CFD로 난류현상을 해석하지만, 화재 시뮬레이션에서는 큰 규모의 난류가 대부분의 에너지를 가지고 있기 때문에 이를 위주로 해석하는 것이 매우 중요하다[5].

화재현상을 해석하는데 많이 사용되고 있는 FDS (fire dynamics simulator)는 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발한 CFD 기반의 소프트웨어로[6], 난류해석은 규모가 큰 난류 에너지를 위주로 계산하는 LES(large eddy simulation) 모델을 사용하고[5], 사용된 모델의 데이터는 일정한 크기의 공간에서 연기의 온도나 속도를 반복적으로 실험하여 측정된 값을 사용하고 있다[7,8].

본 연구에서는 CFD 기반의 화재시뮬레이션 프로그램인 FDS Ver. 5.3.0을 이용하여 목재 및 지하철 화재에서 열 및 연기 거동을 시뮬레이션하였다. 이를 위해 목재 화재실험에 대한 열화상 이미지와 FDS에 의한 시뮬레이션 이미지를 비교하였고, 지하철 화재에서는 FDS 시뮬레이션 방법에 대한 사고결과와 민감도 분석을 통해 화재 거동해석에 FDS의 적용성을 검토하였다.

II. 이론

연소반응인 화재에서는 열 발생과 함께 연기가 생성되기 때문에 화재를 모델링하기 위해서는 연소현상 뿐만 아니라 열 및 연기의 거동에 대한 수학적 해석이 필요하다. 특히, FDS는 화재에 의한 열 및 연기 거동을 시뮬레이션하기 위해 난류모델, 혼합분율 연소모델, 복사모델과 가시도모델을 사용하고 있다.

2.1. 난류모델

CFD를 사용하여 Navier-Stokes 방정식의 해를 완벽하게 얻는 것은 현재의 시점에서 불가능하며,

반드시 물리적인 고찰과 수학적 모델이 필요하다. CFD에서 난류현상을 시뮬레이션하기 위해 사용하는 주요 모델에는 RANS, LES, DNS(direct numerical simulation) 등이 있으며, FDS는 난류모델 중에서 LES와 DNS 기법만을 사용한다[5].

유체역학이나 CFD 이론에서 뉴턴유체에 적용하는 일반적인 지배방정식은 식 (1) ~ 식 (4)와 같다[9].

$$\text{Mass balance : } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = m_b^{\prime\prime\prime} \quad (1)$$

Momentum balance :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla P = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} \quad (2)$$

Energy balance :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot \rho h_s \mathbf{u} = \frac{DP}{Dt} + \dot{q}^{\prime\prime\prime} - \dot{q}_b^{\prime\prime} - \nabla \cdot \dot{\mathbf{q}} + \epsilon \quad (3)$$

$$\text{Ideal gas law : } P = \frac{\rho RT}{W} \quad (4)$$

여기서 t 는 시간, ρ 는 밀도, \mathbf{u} 는 속도 벡터, ∇ 는 방향 벡터, P 는 압력, T 는 온도, $m_b^{\prime\prime\prime}$ 는 입자의 증발 속도, \mathbf{g} 는 중력가속도, \mathbf{f}_b 는 외부의 힘 벡터, $\boldsymbol{\tau}_{ij}$ 는 전단응력(stress tensor), h_s 는 온도변화에 따른 엔탈피($h_s = \sum Y_\alpha h_{s,\alpha}$)이고, 각 종(species)의 엔탈피($h_{s,\alpha}$)는 $h_{s,\alpha}(T) = \int_{T_0}^T C_{p,\alpha}(T) dT$ 와 같이 질량분율(Y_α)과 열용량($C_{p,\alpha}$)의 함수로 나타낼 수 있다. 또한 $\dot{q}^{\prime\prime\prime}$ 는 단위부피당 열 방출속도, $\dot{q}_b^{\prime\prime}$ 는 입자의 열 방출속도, $\dot{\mathbf{q}}$ 는 전도와 복사에 의한 열 플럭스, ϵ 는 소산율(dissipation rate), R 은 기체상수 그리고 W 는 혼합기체의 분자량이다.

지배방정식의 매개변수는 주로 난류모델인 $k-\epsilon$ 모델을 사용하는데[10], $k-\epsilon$ 모델은 주로 공학분야에서 난류경계층을 대상으로 많은 실험적인 측정을 통해 확인된 모델로, 본 연구에서 사용된 Smagorinsky 모델[11]은 다음과 같다.

$$\mu_{LES} = \rho (C_s \Delta)^2 \left(2 \overline{S_{ij}} \cdot \overline{S_{ij}} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \overline{\mathbf{u}})^2 \right) \quad (5)$$

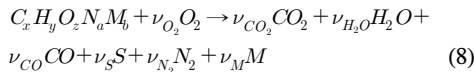
$$k_{LES} = \frac{\mu_{LES} C_p}{Pr} \quad (6)$$

$$(\rho D)_{LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc} \quad (7)$$

여기서 μ 는 와점성(turbulent viscosity), k 는 열전도도(thermal conductivity), D 는 확산계수(diffusivity), C_s 는 Smagorinsky 상수, Δ 는 셀의 길이, S_{ij} 는 대칭적인 변형률, Pr 는 Prandtl 수 그리고 Sc 는 Schmidt 수이다.

2.2. 연소모델

FDS에서 사용하는 혼합분율 연소모델은 원료와 연소 생성물을 최초 및 최종 결과의 반응식만으로 수식화한 것으로, 연소 시에 생성된 연기의 분율은 원료와 산소 및 연소 생성물의 비율로 나타낸다[12].



식 (8)에서 질소는 N_2 의 형태로만 존재하며, M 은 연소생성물의 종당 평균 물질량, S 는 연기 그리고 ν_i 는 i 성분의 화학양론계수로, 연기와 CO 의 화학양론계수는 각각 식 (9) 및 식 (10)과 같다. 또한 연소 생성물은 산소와 반응하지 않으며, 식 (11)에서와 같이 탄소(C)와 수소(H)의 결합을 1이라고 가정한다.

$$\nu_S = \frac{W_F}{W_S} y_S \quad (9)$$

$$\nu_{CO} = \frac{W_F}{W_{CO}} y_{CO} \quad (10)$$

$$W_S = Y_H W_H + (1 - Y_H) W_C \quad (11)$$

여기서 Y_H 는 수소의 질량분율, F 는 연료, y_i 와 W_i 는 i 성분의 수율과 분자량이며, 연기 또는 CO 의 수율은 환기조건의 불꽃실험값을 사용한다.

따라서 임의의 공간벡터, \mathbf{x} 와 시간, t 에서 혼합물의 질량분율, $Z(\mathbf{x}, t)$ 는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Z = Y_F + \frac{W_F}{x W_{CO_2}} Y_{CO_2} + \frac{W_F}{x W_{CO}} Y_{CO} + \frac{W_F}{x W_S} Y_S \quad (12)$$

여기서 Y_i 는 질량분율이고, x 는 연소반응의 전 화율이다. 따라서 Z 에 대한 질량수지식 (13)에 의해 임의의 공간과 시간에서 연료와 연소생성물의 질량분율을 산출할 수 있다.

$$\rho \frac{DZ}{Dt} = \nabla \cdot \rho D \nabla Z \quad (13)$$

2.3. 복사모델

FDS에서는 식 (14)와 같이 완전 복사체 또는 흑체에 적용하는 복사모델을 사용한다[5].

$$I_b(x) = \frac{\sigma T(x)^4}{\pi} \quad (14)$$

여기서 $I_b(x)$ 는 흑체의 복사강도이고, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수($5.67 \times 10^{-11} \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}^4$)이다.

2.3. 가시도모델

연기는 화재 시 열에 의한 피해 이전에 가시도 감소를 일으킬 수 있으며, 빛은 주로 그을음이나 타르의 응축물에 의한 연기에 의해 감쇄된다. 이때, 빛의 흡수와 산란으로 연기 중에서 가시도가 감소되는 정도는 식 (15)의 Bouguer 법칙[13]에 의해 산출할 수 있다.

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\alpha \dot{s}) \quad (15)$$

여기서 I 는 연기를 통과한 빛의 광도, I_0 는 처음 방출된 광도, α 는 감광계수(m^{-1}) 그리고 \dot{s} 는 투과된 길이이다.

III. 화재 모델링 및 시뮬레이션

화재의 주요 현상인 연기 거동과 연기 온도, 일산화탄소 농도 및 가시거리의 변화를 시뮬레이션하기 위하여 다음과 같은 절차를 수행하였다.

3.1. 화재 시나리오

목재 화재에서 가연물의 크기나 양은 소방법 중 수동식 소화기의 형식승인 및 검정기술기준(KOFEIS 0101) 제4조(A급화재용소화기의 소화성능시험)를 참고하여 결정하였다[14]. 즉, 대기에 개방된 상태에서 400 mm 높이의 철재앵글의 연소대 위에 크기 30 mm×35 mm×90 mm의 목재 44개를 26단으로 쌓아 올린 제1모형(2단위 모형)에 3-5 l의 석유를 사용하여 발화하였다.

지하철 화재에서는 가장 피해가 클 것으로 생각되는 최악의 시나리오와 가장 빈번하게 일어나는 사고에 대해 화재 시나리오를 작성하였다. 즉, 지하철 한 칸의 크기는 20 m(L)×3 m(W)×2.75 m(H)이고, 지하철 좌측에서 2 m가 떨어진 첫 번째 의자에서 1000 kW의 점화원으로 화재가 발생하며, y방향으로는 양쪽에 출입문(피난구)이 있으나 출입문이 열리지 않은 무풍상태로 가정하였다.



Fig. 1. Modeling of the wood fire.

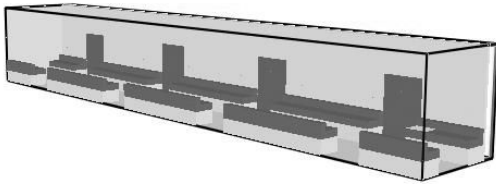


Fig. 2. Modeling of the subway fire.

3.2. 화재 모델링

화재 모델링에서는 대상공간의 크기를 너비(L)와 폭(W) 그리고 높이(H)에 따라 정하고, 문이나 창문 등 환기구의 크기나 개수와 위치를 설정한 후 밀폐공간인지 개방공간인지를 결정한다. 따라서 3-1절의 화재 시나리오에 의하여 화재 모델링한 결과는 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다. 이때, 목재 화재의 그리드 크기, 즉 mesh 배열은 52(L)×48(W)×100(H)으로 하여 전체 그리드 수가 249,600개이었으며, 지하철의 그리드 크기는 28×28×14를 기준으로 하여 전체 그리드 수가 10,976개이었다.

3.3. 화재 시뮬레이션

목재 화재에서 발화원은 목재(C=3.4, H=6.2, O=2.5, soot=0.01 kg/kg)이고, 경계조건은 콘크리트(밀도=2.20×10³ kg/m³, 비열=1.2 W/m·K)로 설정하였으며, 시뮬레이션 시간은 100초로 하였다. 그리고 지하철 화재의 발화원은 사고발생 빈도를 고려하여 폴리우레탄 폼(N=6.3, H=7.1, NO=2.1, soot=0.01 kg/kg, CO soot=0.06 kg/kg) 의자이고, 지하철 내의 바닥, 벽면 및 지붕은 철판(밀도=7.85×10³ kg/m³, 비열=45.8 W/m·K)으로 하였으며, 시뮬레이션 시간은 1000 초이었다.

이와 같은 경계조건과 환경조건(1기압, 20℃, 상대 습도 = 40%, 바람속도 = 0 m/s)에서 FDS Ver. 5.3.0을 이용하여 화재현상을 시뮬레이션하였다.

3.4. 화재 모델링 확인

3.2절과 같이 설정한 화재 모델링을 확인하기 위하여 목재 화재에서는 실험에 대한 열화상 이미지와 FDS를 사용한 시뮬레이션 이미지를 비교하였고, 지하철 실내화재에서는 시뮬레이션 방법, 즉 그리드 크기 변화를 기준조건인 28×28×14에서 31×28×14와 28×31×14로 변화시키면서 시뮬레이션 방법에 따른 열 및 연기 거동(연기 온도, 일산화탄소 농도, 가시거리)의 민감도를 해석하였다.

IV. 결과 및 고찰

4.1. 목재 화재에서 실험 및 시뮬레이션 결과 비교

목재 화재에서 화재 시나리오에 따라 제1모형(2단위 모형)에 대한 화재실험을 수행하고, 열화상 카메라를 이용하여 측정된 결과는 Fig. 3과 같이 최대온도가 957.31℃를 나타내었다. 그리고 3-2절 및 3-4절의 화재 모델링 및 시뮬레이션에 의한 FDS 시뮬레이션 결과는 Fig. 4와 같이 최대온도가 약 1000℃를 나타내었다. 따라서 목재 화재에서 최대 온도에 대한 실험결과와 FDS 시뮬레이션 결과는 약 43℃의 온도 차이, 즉 약 4.3%의 매우 적은 오차를 나타내어 본 연구에서 설정한 화재 모델링으로 FDS에 의해 화재현상을 해석할 수 있었다.

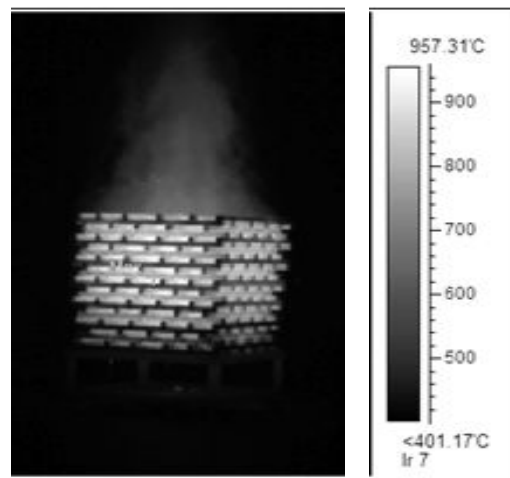


Fig. 3. Thermal image of the wood fire.

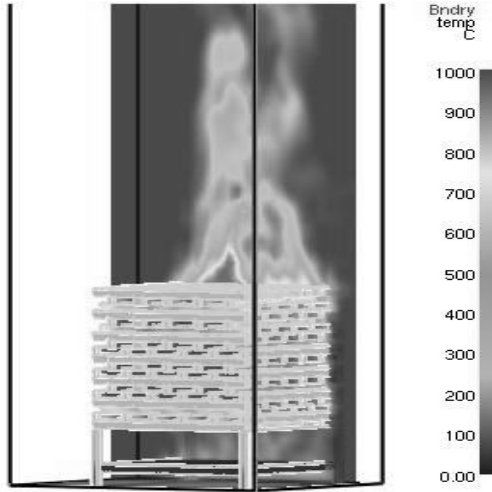


Fig. 4. FDS simulation result of the wood fire.

4.2. 지하철 화재에서 시뮬레이션 방법에 따른 사고결과와 민감도 분석

지하철 화재에서 3-2절 및 3-4절의 화재 모델링 및 시뮬레이션에 의해 연기의 거동을 기준조건의 그리드 크기에서 FDS로 시뮬레이션한 결과는 Fig. 5와 같다. 시뮬레이션 결과, 약 20초 이내에 발화지점의 반대편 벽면에 연기가 도달하고, 천장에 연기층을 형성하며 하강하기 시작하여 약 160초 이후에는 바닥면에 도착하였으며, 약 600초에서는 실내의 모든 공간에 연기가 축적되었다.

따라서 그리드 크기를 변화시키면서 시뮬레이션에 따른 사고결과, 즉 연기 온도, CO 농도 및 가시거리의 민감도를 분석하였으며, 그 결과는 Fig. 6 ~ Fig. 8과 같다.

Fig. 6에서와 같이 2 m 높이에서 산출한 연기의 평균온도는 약 100초까지는 급격히 상승하고, 그 이후에는 서서히 증가하였으며, 약 500초 이후에는 연기의 하강 및 분산으로 연기온도가 급격히 감소하고 있다. 이때, 연기온도는 그리드 크기에 따라 최대 약 20 °C 이내에서 변화하였으며, 온도변화의 경향도 거의 동일하였다. 또한 Fig. 7에서와 같이 발화지점에서 7.5 m가 떨어진 1.5 m 높이에서 CO 농도는 그리드 크기가 31×28×14인 경우 약 400~550초에서 최대농도가 다른 그리드 크기에 비해 약간 높았으나, 다른 시간에서는 거의 동일한 값을 나타내었다. 이와 같은 경향은 발화지점에서 7.5 m가 떨어진 1.5 m 높이에서 가시거리의 변화를 나타낸 Fig. 8에서도 거의 동일하였다.

이상과 같이 FDS를 사용한 화재 시뮬레이션에서

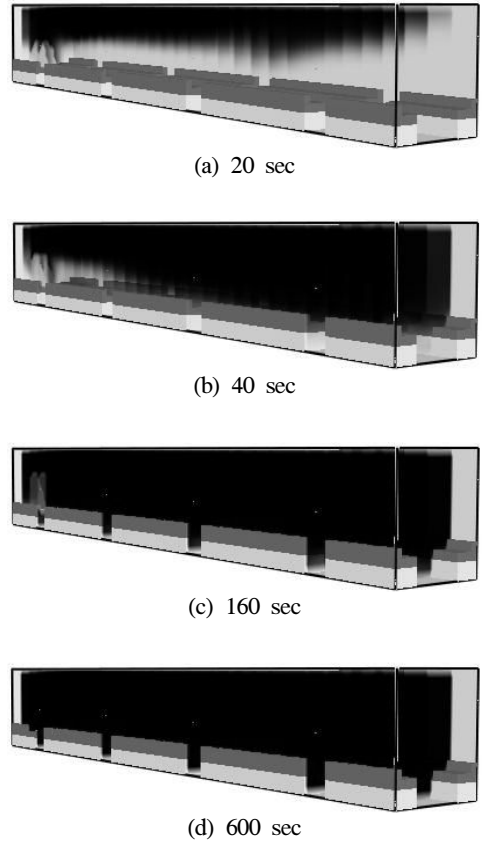


Fig. 5. Smoke movements in the subway fire at the reference grid size.

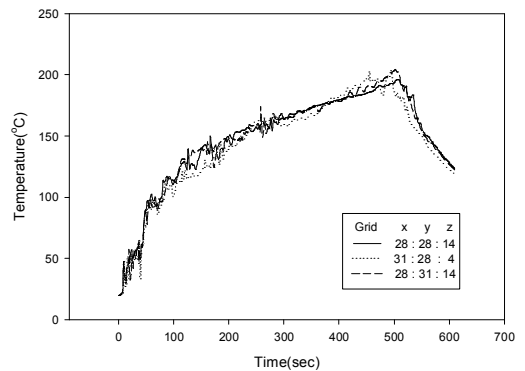


Fig. 6. Variations of mean temperatures of the upper smoke with grid sizes at 2.0 m height in the subway fire.

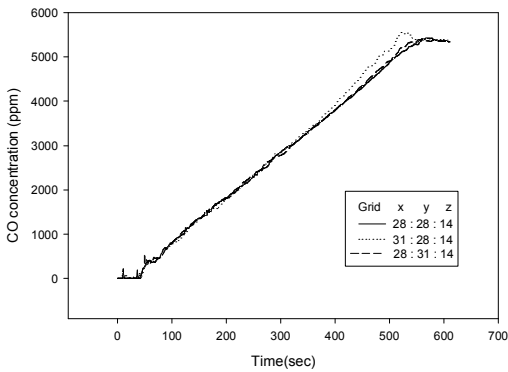


Fig. 7. Variations of maximum CO concentrations with grid sizes at 1.5 m height and 7.5 m distance in the subway fire.

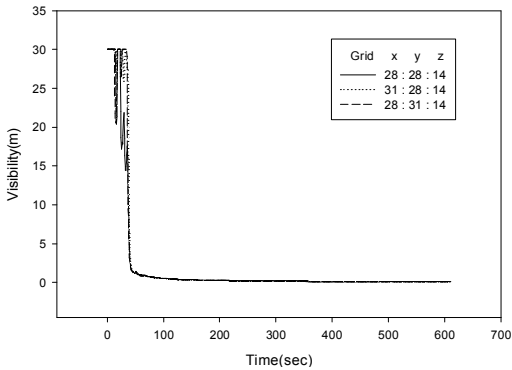


Fig. 8. Variations of visibilities with grid sizes at 1.5 m height and 7.5 m distance in the subway fire.

설정된 그리드 크기(28×28×14)를 보다 작게 하는 경우에는 연기 온도, CO 농도 및 가시거리의 시뮬레이션 결과가 거의 동일한 값을 나타내어 목재 및 지하철 화재에서 설정한 화재 모델링으로, FDS에 의해 화재현상을 잘 해석할 수 있음을 알 수 있었다.

따라서 본 연구에서 제시한 화재 모델링 및 시뮬레이션 방법으로 지하철 실내에서와 같은 밀폐공간의 화재 등에 대해 화재 시나리오를 설정하고, FDS를 사용하여 열 및 연기 거동을 시뮬레이션한 다음에 시뮬레이션 결과로부터 방재계획을 수립하거나 연기 제어 또는 스프링클러, 감지기 등의 설치와 같은 방화설계에 도움을 줄 수 있는 자료를 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

V. 결론

CFD 기반의 화재시뮬레이터인 FDS를 사용하여 목재 및 지하철 화재에서 열 및 연기 거동을 시뮬레이션하고, 실험결과와 비교 및 FDS의 그리드 크기 변화에 대한 사고결과의 민감도 분석을 실시하였다. 그 결과, 목재 화재에서 실험에서 얻은 열화상 이미지의 최대온도와 FDS 시뮬레이션 결과는 약 4.3 %의 매우 적은 오차를 나타내었다. 또한 지하철 화재에서 FDS 시뮬레이션의 그리드 크기를 28×28×14보다 작게 하는 경우에는 연기 온도, CO 농도 및 가시거리의 시뮬레이션 결과가 거의 일정한 값을 나타내어 본 연구에서 설정한 화재 모델링으로 FDS에 의해 화재현상을 해석할 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 정국삼, “지하가 시설의 방화대책”, *산업안전기술지*, **1**(1), 34-39, (2001)
- [2] Gossard, W. H., “Some major accident investigations of fires in underground rail rapid transit systems”, *Fire Safety J.*, **8**, 9-14, (1984)
- [3] Bulter, K. M. and Mulholland, G. W., “Generation and transport of smoke components”, *Fire Technol.*, **40**, 149-76, (2004)
- [4] Chow, W. K., “Application of computational fluid dynamics in building engineering”, *Build. Environ.*, **31**, 425-436, (1996)
- [5] McGrattan, K. B. and Forney, G. P., *Fire Dynamics Simulator(Ver. 5) Technical- Reference-Guide*, National Institute of Standard and Technology Special Publication 1019, Gaithersburg, MD, (2008)
- [6] McGrattan, K. B. and Forney, G. P., *Fire Dynamics Simulator (Version 4.07) Users’ Guide*, NIST Special Publication 1019, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, (2006)
- [7] Friday, P. A. and Mowrer, F. W., *Comparison of FDS Model Predictions with FM/SNL Fire Test Data*, NIST GCR 01-810, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, (2001)

- [8] Sutula, J., "Applications of the fire dynamics simulator in fire protection engineering consulting", *Fire Protect. Eng.*, **14**, 33-43, (2002)
- [9] Anderson, D. A., Tammehill, J. C., and Pletcher, R. H., *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*. Hemisphere Publishing Corporation, Philadelphia, Pennsylvania, 11-15, (1984)
- [10] Lumley, J. L., "Computational modeling of turbulent flow", *Adv. Appl. Mech.*, **18**, 123-176, (1978)
- [11] Smagorinsky, J., "General circulation experiments with the primitive equations", *Mon. Weather Rev.* **91**, 99-165, (1963)
- [12] Mulholland, G. W. and Croarkin, C., "Specific extinction coefficient of flame generated smoke", *Fire Mater.*, **24**, 227 - 30, (2000)
- [13] DiNenno, P. J., *Smoke Visibility*, The SFPE handbook of fire protection engineering, 3rd ed., Society of Fire Protection Engineers and National Fire Protection Association, MA, (2002)
- [14] KOFEIS 0101 제4조(A급화재용소화기의 소화성능시험)