

B-10

건물화재에 적용되는 CFD(Computational Fluid Dynamics) 프로그램들의 비교연구

김우석, 이수경*

(주)한국방재엔지니어링 부설연구소, *서울산업대학교 안전공학과

A Comparative Study on CFD(Computational Fluid Dynamics) Programs Applied to Building Fire Scenario

Woo-Seok Kim, Su-kyung Lee*

*Korea Fire Protection Eng. Co., Ltd., Dept. of Safety Eng. *Seoul National Univ. of Technology*

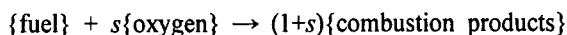
1. 서론

화재 CFD Model들의 발전은 현대 PBD(The Performance-Based Fire Safety Design)에 중요한 요소로서 작용하고 있다. 그러나 각각의 화재 CFD 모델들이 각각 특정 분야에 대한 적용 한계를 가지고 있고 기능상의 상이함으로 인해 해당 프로그램에 대한 기본지식이 없으면 연구하고자 하는 과제에 적용하기가 어렵다. 본 연구에서는 가장 널리 알려지고 많이 사용되어지는 JASMINE Model과 FDS Model의 Numerical Equation들과 주요 기능들을 비교하고 Case Study를 통하여 차이점을 제시하고자 한다. 물론 프로그램이 계속 발전되는 상황이고 더 많은 기능들이 추가될 것이라는 점은 간과할 수 없으나 한순간에 많은 변화가 있을 것은 아니라는 것을 고려한다면 이 연구를 통해 화재CFD에 입문하게 되는 학생들이나 프로그램을 선택해야 하는 입장에 있는 분들에게 유용한 자료로 제시될 것이다.

2. 주요 Physical Model Eq.

(1) Combustion Eq. of JASMINE 3.23

One-step Reaction



where,

s : Stoichiometric oxygen to fuel ratio.

Density

$$\rho = \frac{p w_{mix}}{RT} \quad (1)$$

Where,

w_{mix} : Mean molecular mass of the gas mixture

p : Thermodynamic pressure

R : Universal gas const.(8314 J/kg⁻¹K⁻¹)

K : Temperature (Kelvin)

Temperature

$$T = T_0 + \frac{h - \Delta H_{fu} m_{fu}}{c_p} \quad (2)$$

Where,

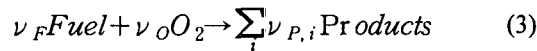
T_0 : Reference Temp.(°C)

ΔH_{fu} : Heat of combustion of fuel

$\overline{c_p}$: Mean specific heat

(2) Combustion of FDS 3.1

General Combustion Reaction



Where,

ν_i : Stoichiometric coefficients

Mixture Fraction

$$Z = \frac{s Y_F - (Y_O - Y_O^\infty)}{s Y_F^I + Y_O^\infty} ; s = \frac{\nu_O M_O}{\nu_F M_F} \quad (4)$$

Where,

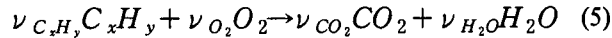
Z : Mixture fraction

Y_O : Mass fraction of oxygen

Y_O^∞ : Mass fraction of oxygen in the ambient

Y_F^I : Mass fraction of fuel in the fuel stream

M_F, M_O : Fuel & oxygen molecular weight

Finite-rate Reaction (DNS)

위와 같은 산소와 Hydrocarbon의 반응을 고려하여 다음과 같이 반응속도를 나타낸다.

$$\frac{d[C_xH_y]}{dt} = -B[C_xH_y]^a [O_2]^b e^{-E/RT} \quad (6)$$

3. 기능 비교에 의한 적용성 분석

건축물 화재를 평가하는데 주로 사용되는 기능을 비교하여 의한 적용성의 차이를 분석하면 다음과 같다.

- (1) Hydrodynamic Model의 경우 JASMINE 3.23은 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)을 사용하여 Eddy 모델을 해석하는데 단점을 드러내는 반면, FDS 3.1의 경우 LES(Large Eddy Simulation), DNS (Direct Numerical Simulation)을 모두 적용할 수 있다.
- (2) JASMINE 3.23에서는 기본적인 연소모델을 두 가지로 선택할 수 있다. 연료의 Mixture Fraction(f)에 의해서 전달방정식이 풀이되는 Flamesheet Model과 Fuel Mixture Fraction과 함께 Fuel Mass Fraction(m_{fu})을 포함하여 풀이하는 Eddy Break-up Model로 선택된다.

FDS 3.1의 경우 Mixture Fraction Combustion Model을 기본적으로 사용하며, Finite-rate Reaction과 Premixed Combustion Model을 적용할 수 있다.

- (3) Grid의 생성은 JASMINE3.23의 경우 Cartesian Grid 방식을 사용하며 Grid Generator 라는 프로그램을 사용하는데 이것은 정·직육면체의 구조물을 설정하는데 매우 유용하다.

FDS 3.1의 경우 FFTs를 적용하기 위한 $2^i 3^m 5^n$ 의 해를 사용하며, 복잡한 형태를 지니는 구조물에서 Multi-mesh를 생성할 수 있는 장점과 너무 많은 셀을 가지게 될 수 있는 단점이 있다.

- (4) FDS 3.1에서는 Fire Spread를 적용할 수 있어 화재전파에 의한 실제 화재를 모사하는데 매우 유용하다.
- (5) 두 Model에서 Text Data를 얻게 되는 기본적인 해석방법의 차이로 일반 화재실험과 같은 점단위 결과를 얻고자 할 때에는 FDS 3.1가 유용하다.

(6) Non-Rectangular Geometry를 적용할 수 있는 범위가 FDS 3.1의 경우에 명령어 적용으로 매우 광범위 하게 적용되며, JASMINE 3.23의 경우에는 설정창에 의한 Stairway, Fan 등에 국한되어 사용된다.

그외에 I-Section, 구조체의 영향을 분석하는 Boundary Quantities , Creating or Removing Obstruction, Particle Flow, Room Array 기능 등 건축 모델링에 적용되는 많은 기능들에 차이가 있다.

Table 1. JASMINE 3.23과 FDS 3.1의 기능상 비교

구분	JASMINE 3.23	FDS 3.1	비고
Hydrodynamic Model	RANS	LES, DNS	RANS모델은 난류 모사에 제한을 가짐
Combustion Model	Flamesheet Model Eddy Break-up Model	Mixture Fraction Model, Finite-rate Reaction(DNS)	
Grid Generation	Staggered Cartesian (Grid Generator)	2'3"5"의 해	FDS 3.1 : 복잡한 구조물 설정시 Multi-Mesh 설정
Fire Spread	Multi-fire Source	Ignition Temperature	JASMINE3.23 : 다른 화원에 열 전달에 의한 Ignition Time을 알아야만 적용가능
Monitoring Method	Monitor(점) Region(공간)	Thermocouple(점)	JASMINE3.23 : Monitor는 한점만 설정가능
Non-rectangular Geometry	Stairway Fan에 기본적용	SAWTOOTH 매개변수	JASMINE 3.23 : 기본 건축구조물에 적용 불가능
I-Section	설정창	기능 없음	FDS 3.1 : 보통 OBST와 동일
Boundary Quantity	Text Result	Thermocouple, Boundary File	JASMINE 3.23 : 각각의 Block에 대한 최대, 최소, 평균값을 제시. 세부시간대별 분석 불가능.
Creating or Removing Obst.	불가능	Time 설정 Detector와 연동	
Room Array	설정창	불가능	

4. Case Study

화재시나리오에 의한 각 Case의 수행으로 어떠한 결과 값이 생성되는지 비교하여본다. 데이터 입력에 의한 오차를 줄이기 위해 Heat Release Rate의 크기는 5초 단위로 0.0001kW단위까지 입력하였으며 화원에 대한 물성(物性)은 임의로 주어지지 않고 두 Model Database에 포함된 값을 적용하였다.

(1) Room Corner Test Model

해석공간의 크기는 3.6m(Length) × 2.4m(Height) × 2.4m(Width)이고, 구조체는 완전한 내화구조물로 설계하였으며, 바람에 의한 영향은 없는 것으로 가정하고, 0.8m(Width) × 2.0m(Height)의 Doorway를 주었다.

화원은 Propane Gas Burner를 적용하기 위해 두 프로그램에서 다음과 같이 설정하였다.

FDS 3.1에서 발열량을 $400kW/m^2$ 으로 주고 면적을 $0.1m^2$ 으로 설정, 얻어진 Heat Release Rate를 JASMINE 3.23에 Variable Area Option적용하여 입력하였다.

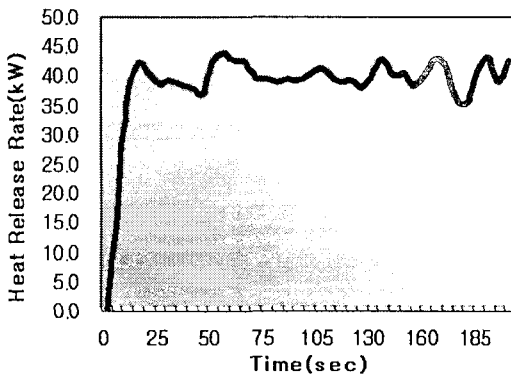


Fig. 1. 화원의 설정

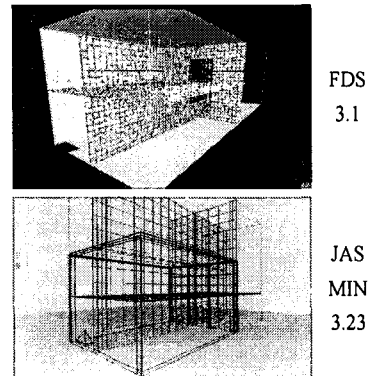


Fig. 2. Grid Setting

1) Mixture Fraction(FDS)과 Fuel Mixture Fraction(JASMINE)으로 표현되는 값들은 Fig. 3에서는 한 공간에서 약 2배 정도의 차이를 보여주고 있다.

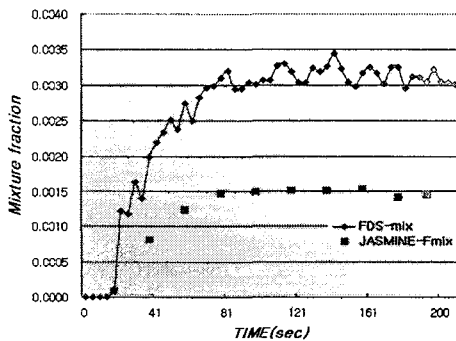
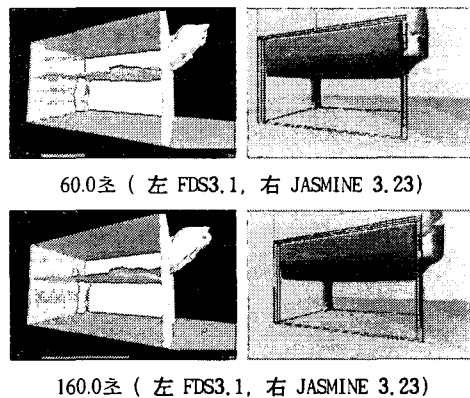


Fig. 3. Mixture Fraction Graph



160.0초 (左 FDS3.1, 右 JASMINE 3.23)

Fig. 4. Smoke Flow

곡선상에서 초기 급격한 상승 후 약 85초 이후부터 Steady 상태를 보여주는데

JASMINE 3.23에서는 약 0.0015, FDS 3.1에서는 0.003~0.0035의 값에서 변화를 보여준다. 그러나 Graphic에 의한 결과는 비슷한 흐름과 분포를 보였다

2) Default 값이 적용된 Propane Burner를 사용한 공간 내부온도의 비교에서는 JASMINE 3.23에서 온도가 더 높게 나타났다.

개구부 상부에서 온도가 Steady가 되는 80초 이후부터 약 20℃ 정도의 차를 보여준다. Contour Map에서 보이는 온도는 천장면의 온도가 JASMINE 3.23의 경우 165~238℃의 분포를 보여주며, FDS 3.1의 경우에는 95℃ 이상의 분포를 보여준다.

개구부 주위의 온도에서도 JASMINE 3.1의 경우 93~165℃의 분포를 보이며, FDS 3.1은 72.5~80.0℃의 온도층을 형성한다. 즉, JASMINE 3.23이 FDS 3.1보다 더 높은 온도층을 형성하고 있음을 알 수 있다.

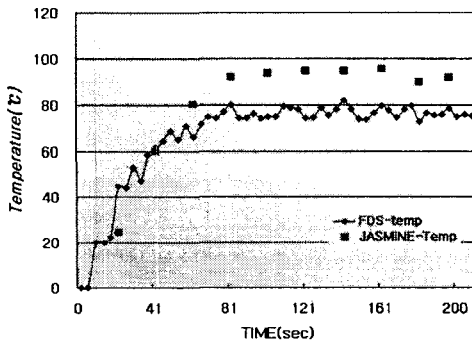


Fig. 5. Temperature Graph

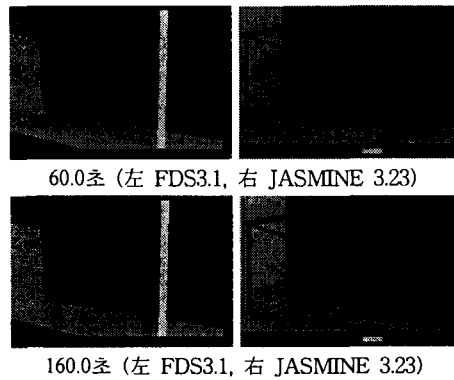


Fig. 6. Temperature

(2) Slope Ceiling Model

Case Study 2에서는 Slope Ceiling 구조를 설정하여 SAWTOOTH 기능의 사용 유무에 따라 FDS 3.1의 결과가 어떻게 변화하고 JASMINE 3.23과 비교하여 어떤 결과 차이를 보이는지를 살펴보았으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) Smoke Field의 경우 SAWTOOTH 기능 적용 유무에 따른 FDS 3.1의 결과값 차이는 거의 없었으며, JASMINE 3.23이 FDS 3.1보다 높은 Mixture Fraction 값을 나타내었으나 공간 내 분포는 유사하였다.
- 2) Velocity의 경우 SAWTOOTH 기능 적용 유무에 따른 FDS 3.1의 결과값의 변동이 매우 심하게 나타났으며, RANS Model의 JASMINE 3.23보다 더 변화가 심한 것으로 나타났다.
- 3) 공간내부 온도 변화에서 SAWTOOTH기능 적용 유무에 따른 FDS 3.1의 결과 값은

유사하게 나타났으며, Contour Map분석에서는 JASMINE 3.23에서의 온도 분포가 FDS 3.1보다 전체적으로 높게 나타났다.

참고문헌

1. National Institute of Standards and Technology(NIST), "Fire Dynamics Simulator (Version 3) - User's guide", NIST, 2002.
2. National Institute of Standards and Technology (NIST), "Fire Dynamics Simulator (Version 3) - Technical Reference Guide" , NIST, pp. 8~11, 2002.
3. The Electric Power Research Institute (EPRI), "Fire Modeling Code Comparisons", EPRI, pp.1-1~15, 1998.
4. Society of Fire Protection Engineers (SFPE), "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (Third Edition)", SFPE, pp.3- 195 ~208, 2002.
5. S.D Miles, S. Kumar, "Technical Description of JASMINE", BRE, pp. 1~8.