

수정된 체적열원모형을 이용한 실내 화재의 연기농도 예측

김 성 찬, 이 성 혁*

미국 표준과학 연구원, *중앙대학교 기계공학부

Numerical Prediction of Smoke Concentration in a Compartment Fire by Using the Modified Volumetric Heat Source Model

Sung Chan Kim, Seong Hyuk Lee*

Building & Fire Research Laboratory, National Institute of Standards & Technology, Gaithersburg 20899, USA

*School of Mechanical Engineering, Chung Ang University, Seoul 156-756, Korea

(Received December 27, 2005; revision received February 23, 2006)

ABSTRACT: The present study investigates the characteristics of fire-driven heat flows and gas concentration in a compartment fire by using the modified VHS model (MVHS). The main idea of this model is to add some source terms for combustion products and oxygen consumption to the original VHS model for providing more accurate and useful information on gas concentration distributions as well as thermal fields. It is found that the present MVHS model shows fairly good agreement with the experimental data and the eddy breakup combustion model. The tilting angle of fire plume calculated by MVHS is larger than that of EBU model because the fire source of VHS is affected by ventilating flow less than EBU. However, this discrepancy is apparently reduced in the downstream region of fire source.

Key words: Compartment fire(실내 화재), Volumetric heat source(체적열원, VHS), Smoke concentration(연기농도), Eddy breakup (EBU) Model(에디분열모델)

기 호 설 명

하첨자

ΔH_C : 연소열 [kJ/kg]

\dot{m} : 질량 생성/소멸률 [kg/s]

\dot{q} : 단위체적당 발열량 [kW/m³]

Q : 발열량 [kW]

V_F : 열원체적 [m³]

F : 연료

O_2 : 산소

P : 생성물

1. 서 론

그리스 문자

ν : stoichiometric 상수

산업사회의 발달과 함께 화재발생으로 인한 인명 및 재산피해는 매년 꾸준한 증가추세를 보이고 있으며 건물공간 내부의 화재안전을 확보하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 건축물 내부의 화재안전을 확보하기 위해서는 화재발생으로 인한 화염전파 및 연기거동에 대한 물리적 현상이해를 바탕으로 화재제어 시스템을 설계하여야 한

† Corresponding author

Tel.: +82-2-820-5254; fax: +82-2-814-9476

E-mail address: shlee89@cau.ac.kr

다. 이러한 화재거동에 해석은 실험에 의한 직접 측정이나 수치해석기법을 이용한 모사를 통하여 이루어져 왔다. 그러나 최근 컴퓨터 성능의 급속한 발전과 함께 유체유동, 열 및 물질전달, 연소 등 복잡한 화재현상을 해석하는 수치모델이 발달함에 따라 화재거동의 해석에 Field 모델의 사용이 급증하고 있다. 수치모델에 의해 화재를 해석하기 위해서는, 적절한 화원의 모사가 무엇보다 중요하다. 화원의 모사방법에는 크게 (1) 화학반응을 고려하여 화원에서 발생된 발열량과 연소생성물을 직접 해석하는 연소모델을 이용하는 방법과 (2) 화재영역으로 가정된 체적에 대하여 열원(heat source)을 제공하여 화재공간 내부의 열전달을 해석함으로써 화재특성을 파악하는 체적 열원(volumetric heat source, VHS)모델 등으로 나눌 수 있다.

최근 미국 표준과학원(NIST)의 McGrattan 등은 대와동 모사(LES) 기반의 혼합분율(mixture fraction) 연소모델을 적용한 화재전용 해석프로그램(Fire Dynamics Simulator, FDS)을 개발하여 타당성을 검증하였으며 다양한 화재설계 분야에 직접 이용되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 그러나 FDS 모델은 LES 모델을 적용하고 있기 때문에 많은 격자를 필요로 하며 직교정렬 격자계(orthogonal structured grid system)를 사용하기 때문에 곡면이나 기하학적 형상이 복잡한 공간에 대하여 적용이 어렵다. 이러한 기하학적 정보의 차이는 화재유동 해석을 바탕으로 건물의 구조해석과 같은 응용계산시 통일된 격자계를 사용할수 없는 단점이 있다. Xue et al.⁽⁴⁾은 VHS 모델, eddy break up (EBU) 모델, pre-PDF 모델 등 세 가지 화재모델을 이용하고 서로 다른 기하학적 공간에 대하여 예측된 열유동장을 실험결과와 비교 분석하였다. 각 모델에 의해 계산된 결과는 화재발생 공간특성에 따라 실험결과와 다소 차이를 보였으며 화재특성을 잘 묘사할 수 있는 연소모델의 필요성을 언급했다.

일반적으로 화재현상에 대한 수치해석결과는 구조해석이나 대피, 피난 등의 위험도 평가에 직접적으로 이용될 수 있기 때문에 해석결과가 정확해야 하고 경제적인 계산이 요구된다. 따라서 VHS 모델은 적용이 간단하고 해의 안정성이 뛰어나기 때문에 화재설계 분야에서 널리 이용되고 있다.

화재현상의 해석에 있어서 가장 기본이 되는

입력조건은 화원의 발열량(heat release rate)이다. VHS 모델은 주어진 발열량을 직접 화원에 적용하여 공간의 열적 특성을 해석한다. 또한, 연소모델을 직접 적용하는 경우, 해의 불안정성과 많은 계산용량이 필요한 반면, VHS 모델은 비교적 간단하게 화재거동을 해석할 수 있는 장점이 있다. 그러나 VHS 모델은 주어진 발열량에 따라 나타나는 열유동장의 정보로부터 화재거동 특성을 간접적으로 파악해야 하는 문제점이 있다. 다시 말해 화재해석에 있어서 연소생성물의 거동에 대한 정보가 열유동장에 대한 정보 만큼이나 중요함에도 불구하고 기존의 VHS 모델은 이산화탄소나 일산화탄소 등 연소생성물의 분포나 공간 내의 산소량을 예측하는 데에 있어서 제한적이다.

따라서 본 연구는 stoichiometric 상태에서 연소소모량에 따른 연소생성물의 생성률과 산소 소모율을 물질생성 및 소멸항으로 VHS 모델에 적용하고 종의 보존방정식(species conservation equation)을 해석함으로써 기존 VHS 모델에 얻어지는 열유동장뿐만 아니라 화재발생으로 인한 생성물의 거동을 동시에 예측하고자 한다. 수정된 VHS 모델(MVHS)에 의해 얻어진 열유동 및 농도장은 실험 결과 및 다른 연소모델에 의해 예측된 결과와 비교하여 MVHS 모델의 타당성을 평가하고자 한다.

2. 수치해석방법

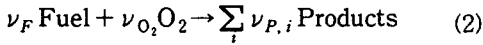
2.1 MVHS 모델

VHS 모델은 주어진 발열량(Q)을 가정된 화염영역에 에너지생성항을 추가함으로써 화원을 모사하게 된다. 각 미소격자에서의 단위체적당 발열량(\dot{q})은 다음과 같다.

$$\dot{q} = \frac{Q}{V_F} \quad (1)$$

여기서, V_F 는 화염으로 가정된 열원의 체적을 나타낸다. 기존의 VHS 모델에서는 화재에 의해 발생된 열에너지는 단위체적당 발열량으로 환산하여 화원부의 미소체적 내에 균일하게 분포하게 된다. 그러나 기본적으로 VHS 모델은 연소반응에 의한 생성물은 고려하지 않고 주어진 열원에 의한 고온의 공기가 부력유동을 형성하며 공간 내

부로 전파되는 것으로 가정하여 기본적인 운동량 및 에너지방정식만을 고려한다. 본 연구에서 제시된 MVHS 모델은 열원에 의한 부력유동 이외에 연소생성물의 거동을 파악하기 위하여 열원 내에서 연소반응에 따른 각 종(species)의 단위체적당 질량생성률을 계산하고 이를 열원체적의 질량생성항으로 고려하여 종의 방정식을 전체 유동장에 대하여 추가로 계산함으로써 열유동장과 농도장을 동시에 해석한다. 연소반응식의 일반 형태는 다음과 같다.



탄화수소계 연료에 대하여 완전연소를 가정하면 주어진 발열량을 발생시키기 위하여 소모되는 연료의 연소율은 다음과 같다.

$$\dot{m}_F = \frac{Q}{\Delta H_C} \quad (3)$$

여기에서, ΔH_C 연료의 연소열을 나타낸다. 완전연소반응에서 연소되는 연료의 양에 대한 산소의 소모율은 다음과 같이 계산된다.

$$-\dot{m}_{O_2} = -\dot{m}_F \frac{\nu_{O_2} MW_{O_2}}{\nu_F MW_F} \quad (4)$$

MW 와 ν 는 종의 분자량과 stoichiometric 상수를 각각 나타낸다. 따라서 체적열원 내에서 연료와 산소의 반응에 의해 생성되는 연소생성물의 생성률은 다음과 같다.

$$\dot{m}_{P,i} = \dot{m}_F \frac{\nu_{P,i} MW_{P,i}}{\nu_F MW_F} \quad (5)$$

체적열원 내 각 계산격자에 대하여 에너지 및 물질의 생성과 소멸을 적용하기 위해서는 단위체적당 에너지생성항과 질량생성항을 적용함으로써 초기 주어진 발열량 조건에 따른 전체 반응의 에너지 및 질량평형을 맞추게 된다.

2.2 에디 분열 모델

본 연구에서는 MVHS 모델의 타당성을 확보하

기 위해, 일반적으로 화재연소해석에 널리 이용되고 있는 에디 분열(Eddy break-up, EBU) 모델을 이용한 수치해석을 수행하고 결과를 상호 비교한다. EBU 모델은 물질간 화학반응이 무한히 빠르며 난류유동장에 의해 주로 결정된다고 가정한다. 이 모델에서 반응률은 반응물과 생성물을 함유한 난류와동의 소산율과 관련되며 난류와동의 소산율은 난류에너지 소산율과 난류운동에너지의 비(ϵ/k)에 비례하는 것으로 가정한 모델이다.^(5,6) 반응에 의한 i 종의 생성률은 다음 식에 의해 계산되며 작은 값을 취하게 된다.

$$R_{i,k} = -\nu_{i,k} MW_i A \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{Y_R}{\nu_{R,k} MW_R} \quad (6)$$

$$R_{i,k} = -\nu_{i,k} MW_i A B \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{\sum_P Y_P}{\sum_P \nu_{P,k} MW_P}$$

여기서 A 와 B 는 경험상수로 각각 4.0과 0.5의 값을 가진다. 따라서 연소는 난류가 존재하는 조건($k/\epsilon > 0$)에서 발생하며 연소의 초기화를 위한 점화원은 필요로 하지 않는다.

2.3 해석조건

수치해석 대상은 Steckler et al.⁽⁷⁾에 수행된 일반화재실 실험으로서 이 실험은 발열량에 대한 정보가 명확하고 세라믹 단열소재를 사용하여 벽면 열손실이 상대적으로 적다. 또한 정상상태에서의 공기유입량 및 열유동 결과를 제공하기 때문에 수치해석 프로그램의 평가에 널리 이용되고 있다. Fig.1에서 보는 바와 같이 화재실의 크기는 가로 2.8 m, 세로 2.8 m, 높이 2.18 m이며, 환기조

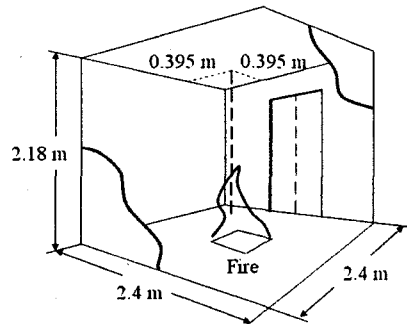
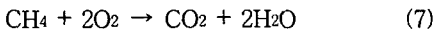


Fig. 1 Schematic of the fire compartment.

건은 화재실의 한쪽 벽면에 폭 0.74 m, 높이 1.8 m의 출입구가 존재하는 가장 일반적인 경우를 선택하였다. 화재실 내부의 온도는 출입구 쪽의 모퉁이와 출입구에 설치된 열전대 트리에 의해 측정되었으며 화재실 내외부의 유출입 유량을 측정하기 위하여 출입구의 높이방향으로의 유속이 측정되었다. 화원은 화재실의 중앙에 위치하고 있으며 화원의 크기는 0.3m×0.3m이다. 사용 연료는 메탄이며 발열량은 62.9kW이다. 메탄의 연소열은 50,000 kJ/kg을 적용하였고 완전연소시 반응식은 다음과 같다.



수치해석은 상용 열유동 수치해석 프로그램인 FLUENT 6.0을 이용하였고 난류유동장 해석에 사용된 난류모델은 부력생성항이 포함된 수정 $k-\epsilon$ 모델을 적용하였다. 복사열전달의 해석은 P-1 복사모델을 적용하였으며, VHS 모델 사용시 기상의 흡수계수(absorption coefficient)는 0.315로 가정하였다.⁽⁸⁾ 속도와 압력의 연결은 SIMPLEC 알고리즘을 이용하였고 밀도변화는 이상기체의 상태방정식에 의해 계산되었다. VHS 모델에 적용된 열원체적의 높이는 0.3m로 가정하였다. EBU 연소모델에서 입구에서의 연료유입량은 식(1)에 의해 결정되며 메탄의 질량분율은 1.0으로 가정하였다. Fig. 2는 수치해석에 이용된 계산격자를 나타낸다. 본 연구에서는 화재실 내부뿐만 아니라 출입구를 통한 열유동장을 비교하기 때문에 계산영역을 화재실 외부까지 확장하였다. 외부경

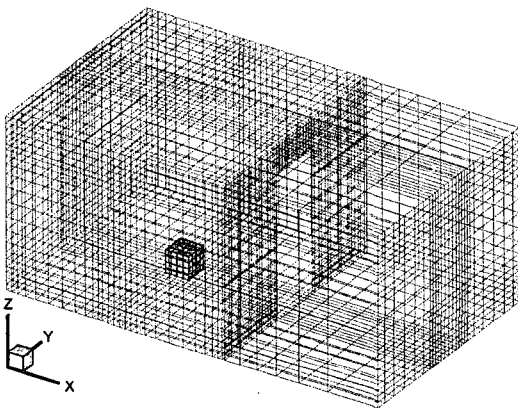


Fig. 2 Grid system of fire compartment.

계는 압력경계조건으로 처리하였고 바닥 및 벽면은 단열조건을 가정하였다. 계산격자는 약 25,000개이고, 1초의 시간간격으로 화재발생 이후 200초까지 계산하는 데 소요된 시간은 Pentium IV 2.4GHz를 이용하여 약 3시간 정도 소요되었다.

3. 계산결과 및 고찰

본 연구에서는 MVHS 모델에 의해 예측된 열유동장의 타당성을 검토하기 위해 실험 결과와 EBU 모델, 그리고 체적열원만을 고려한 기존의 VHS 모델결과와 상호 비교하였다.

Fig. 3은 화재실 내부 모퉁이에서의 수직방향 온도분포를 나타낸다. 기존 VHS와 MVHS 모델의 수치해석 결과는 거의 동일하게 나타났다. 이것은 연기 중에서 연소생성물이 차지하는 비중이 극히 작고 대부분 질소와 산소와 같이 공기성분이 주를 이루고 있기 때문에 연기의 비열이나 확산계수 등이 공기와 큰 차이가 없기 때문이다. 전체적으로 수치해석의 온도분포가 실험 결과에 비해 상대적으로 높게 예측하고 있다. 고온 연층부의 경우, VHS 모델은 10°C 이내의 온도차를 예측한 반면, EBU 모델은 VHS 모델에 비해 약간 더 상향 예측함을 볼 수 있다. 실험의 경우, 고온 연층부와 저온 하층부 사이 급격한 온도구배를 보이고 있으나 수치해석 결과에서는 상대적으로 완만한 구배를 나타내고 있으며 이 구간에서 가장 큰 상대오차를 보이고 있다.

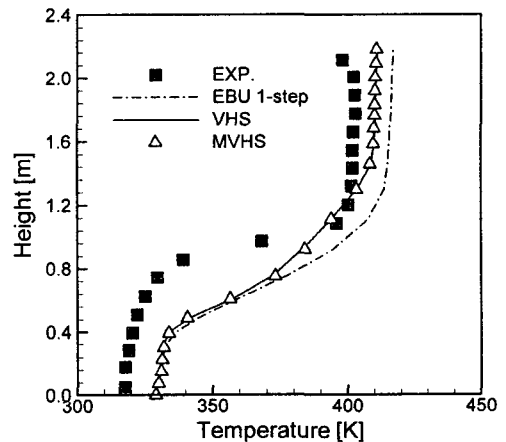


Fig. 3 Temperature profiles at the corner thermocouple tree.

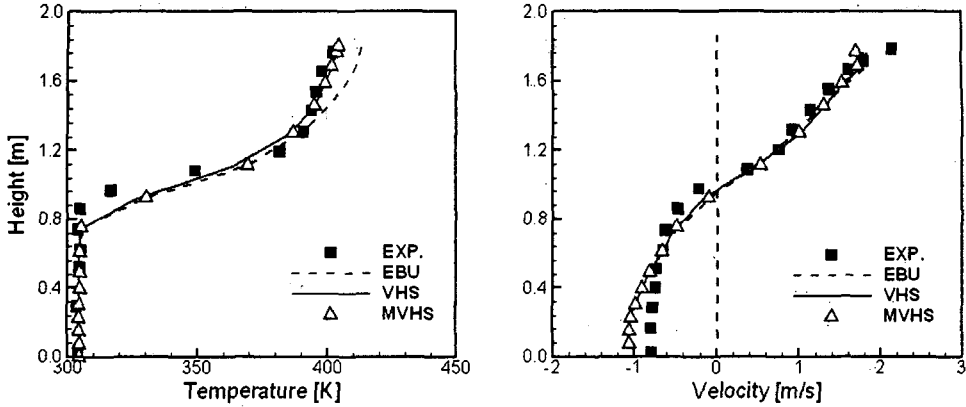


Fig. 4 Temperature and velocity profiles at the doorway.

Fig. 4는 출입구 중앙에서의 높이에 따른 온도 분포와 속도분포를 비교하였다. 상층부의 온도분포는 실험과 수치해석 결과 모두 10°C 내에서 EBU 모델에 비해 보다 정확한 예측을 하고 있다. 하층부의 경우 거의 동일한 온도분포를 보이는데 이것은 연층과 유입공기층의 경계인 중립높이(neutral height)를 기준으로 상부를 통해서는 화재실의 연기가 빠져나가고 하부에서는 외부의 공기가 화재실로 유입됨으로써 하부의 수치방향의 온도가 거의 일정하게 유지된다. 출입구를 통한 상부 연층부와 하층부 경계구간의 온도구배는 비교적 실험결과를 잘 따르고 있으나 실험과 수치해석 결과의 차이는 이 부분에서 가장 크게 나타났다. 이것은 여러 가지 원인이 있었으나 속도구배 및 밀도차에 의해 발생하는 혼합영역에 대한 난류모델의 부정확성의 영향이 큰 것으로 판단된다. 출입구에서의 유출입 속도분포는 기존 및 수정된 VHS 모델들의 경우, 유입공기의 속도를 다소 상향 예측하고 있으나 전체적으로 수치해석 결과가 실험 결과에 잘 일치하고 있다. 중립층의 높이는 실험에서 약 1m이며 수치해석의 결과가 약 0.1m 정도 낮게 예측하고 있으나 비교적 신뢰할 만한 결과를 제공하고 있다.

Fig. 5는 EBU 모델과 MVHS 모델에 의해 예측된 화재실 모퉁이에서의 높이에 따른 산소와 이산화탄소의 농도분포를 나타내고 있다. 이산화탄소의 경우 상층부에서 EBU 모델이 VHS 모델에 비해 약 5% 정도 상향예측하고 있으며 상대적으로 산소농도는 확장된 VHS 모델이 다소 높게 예측하고 있으나 하층부에서의 산소 및 이산

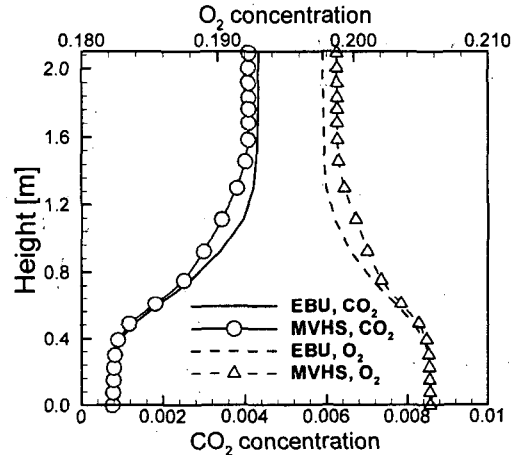


Fig. 5 Gas concentrations at the room corner

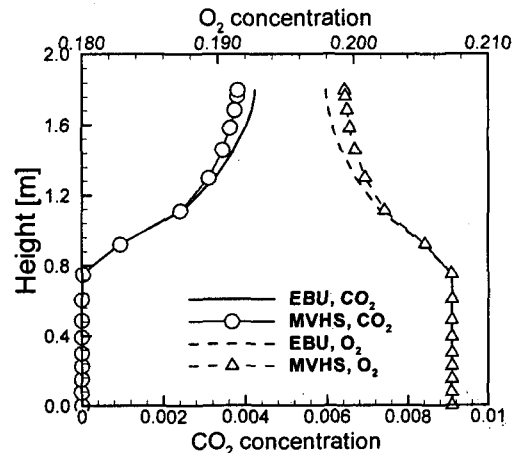


Fig. 6 Gas concentrations at the doorway.

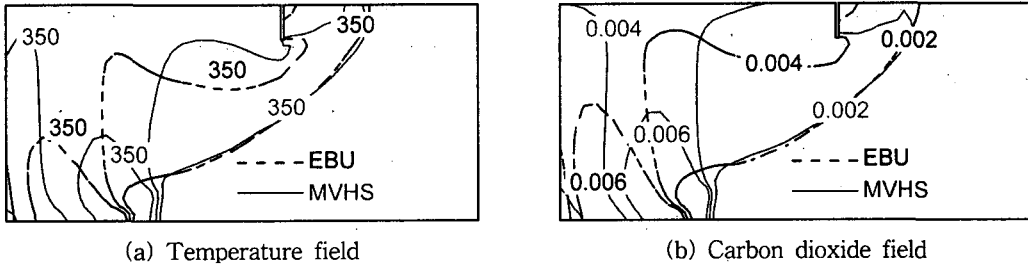


Fig. 7 Comparison of temperature and CO₂ fields between EBU and MVHS models.

화탄소 농도는 매우 유사한 결과를 보이고 있다. MVHS 모델에 의해 예측된 상층부와 하층부의 경계의 농도구배는 EBU 모델에 비해 상대적으로 낮게 나타났다.

Fig. 6은 출입구 위치에서 높이에 따른 이산화탄소와 산소의 농도를 각각 나타내고 있다. 앞의 결과와 마찬가지로 MVHS 모델에 의해 예측된 이산화탄소 농도는 상층부에서의 EBU 모델에 비해 다소 하향예측하고 있으나 전체적인 오차범위는 5% 이내를 보여주고 있다.

Fig. 7은 두 가지 모델에 의해 예측된 온도장과 이산화탄소 농도장을 보여준다. 일반적으로 출입구를 가진 화재실의 화재거동은 화원에서 발생된 고온의 연소가스가 천정제트를 형성한 후, 출입구의 상부를 통해 외부로 빠져나가고 저온의 외부공기가 화재실로 유입되게 된다. 이때 화원에서 발생된 연소생성물의 양은 상대적으로 매우 작은 양이기 때문에 결국 화재실로 유입되는 공기의 양과 화재실에서 유출되는 연기의 양은 같다고 가정할 수 있다. 이러한 많은 양의 외부공기 유입은 화염거동에 큰 영향을 미치게 되며 일반적으로 화염이 출입구의 반대방향으로 기울어진다. EBU 모델의 경우, 공간에 대하여 운동량, 에너지 및 난류방정식을 해석한 후 종의 방정식과 반응을 등을 계산하기 때문에 화염부가 유동에 직접적인 영향을 받게 된다. 그러나 MVHS 모델의 경우는 화원영역으로 가정된 부분에 대하여 질량 및 열원이 항상 주어져 있기 때문에 열원에서는 유동의 직접적인 영향보다는 내부 생성항의 영향이 지배적으로 작용하게 된다. 따라서 MVHS 모델의 경우 EBU 모델에 비해 부력 플럼이 상대적으로 직립되는 경향을 보이게 된다.⁽⁸⁾ 특히 이러한 VHS 모델과 EBU 모델의 유동특성 차이는 화원이 벽의 영향을 받는 경우나 유동조건에 의

해 화원이 직접 영향을 받는 경우 화원에 인접한 영역에서 다소 차이를 보이지만 화원 영역에서 떨어짐에 따라 이러한 오차는 감소하게 된다.

4. 결 론

본 연구는 수정된 VHS 모델을 이용하여 화재실 내의 열 및 연기유동을 해석하였으며 실험 및 다른 연소모델과 비교하여 VHS 모델의 적용범위를 확장하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 체적열원만을 고려한 기존의 VHS 모델과 확장된 MVHS 모델에 의해 계산된 열유동장은 거의 동일하였으며 이것은 연기에 함유된 연소생성물의 농도가 매우 작아 연기의 물성에 큰 변화가 없기 때문인 것으로 사료된다.

(2) EBU과 VHS 수치해석 결과는 고온 연층부와 저온 하층부의 경계구간에서 가장 큰 오차를 보이고 있는데 이것은 수치해석에서 속도구배 및 밀도 차에 의해 발생하는 난류혼합이 실제 현상에 비해 과도하게 예측하기 때문인 것으로 판단된다.

(3) MVHS 모델에 의해 계산된 산소 및 이산화탄소의 농도분포는 EBU 연소모델과 비교할 때 약 5% 이내의 오차를 보이고 있으나 전체적으로 유사한 경향을 보여주었다.

(4) VHS 모델은 체적열원부에서 외부유동의 직접적인 영향을 적게 받기 때문에 부력 플럼이 EBU 모델에 비해 상대적으로 직립되며 화원 부근에서의 유동장이 다소 차이를 보이게 된다. 그러나 이러한 화원의 영향은 화원에서의 거리가 증가함에 따라 감소하게 된다.

VHS 모델은 화원부에서의 외부유동의 영향을 직접적으로 고려하지 못하는 단점이 있지만 간단한 개념과 에너지 균형을 정확하게 맞추고 있기

때문에 여전히 화재해석 분야에 널리 이용되고 있다. 본 연구에서 제시된 MVHS 모델을 통하여 연소생성물에 대한 생성정보가 주어진 경우 공간 내 농도해석이 가능할 뿐만 아니라 물분무나 가스계 소화제와 같이 질식작용에 의한 화재제어 수치해석이 VHS 모델을 통해 가능하기 때문에 화재설계 분야에 수치해석의 적용범위를 확장할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2005년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2005-214-M01-2005-000-10129-0).

참고문헌

1. McGrattan, K. B., 2004, Fire Dynamics Simulator (Version 4): Technical Reference Guide, NIST SP 1018.
2. McGrattan, K. B., Baum, H. R. and Rehm, R. G., 1998, Large eddy simulation of smoke movement, Fire Safety Journal, Vol. 30, No. 2, pp. 161-178.
3. McGrattan, K. B., Rehm, R. G. and Baum, H. R., 1994, Fire-driven flows in enclosures, Journal of Computational Physics, Vol. 110, No. 2, pp. 285-291.
4. Xue, H., Ho, J. C. and Cheng, Y. M., 2001, Comparison of different combustion models in enclosure fire simulation, Fire Safety Journal, Vol. 36, No. 1, pp. 37-54.
5. Magnussen, B. F. and Hjertager, B. H., 1976, On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion, 16th Symposium on Combustion, Cambridge, MA, pp. 719-729.
6. Spalding, D. B., 1970, Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames, 13th Symposium on Combustion.
7. Steckler, K. D., Quintere, J. G. and Rinkinen, W. J., 1982, Flow induced by fire in a compartment, National Bureau of Standards, Center for Fire Research, NBSIR 82-2520.
8. Grandison, A. J., Galea, E. R. and Patel, M. K., 2001, Fire Modeling Standard/Benchmark - Report on Phase 1 Simulations, Fire Safety Engineering Group, University of Greenwich, London SE10 9LS.