

부력 영향을 받는 제트 확산화염의 화염편 구조에 관한 수치계산 연구

오창보[†] · 이의주

부경대학교 안전공학부

(2008. 9. 19. 접수 / 2009. 1. 7. 채택)

Numerical Investigation of the Flamelet Structure of Buoyant Jet Diffusion Flames

Chang Bo Oh[†] · Eui Ju Lee

Division of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received September 19, 2008 / Accepted January 7, 2009)

Abstract : Direct numerical simulations(DNS) were performed for the prediction of transient buoyant jet diffusion flames where the Froude numbers(Fr) are 5 and 160, respectively. The thermodynamic and transport properties were evaluated using CHEMKIN package to enhance the prediction performance of the DNS code. The simulated buoyant jet diffusion flame of $Fr=5$ and 160 showed the transient, dynamic motion well. It was identified that the buoyant jet flames were flickered periodically, and the simulated flickering frequency of the jet diffusion flame of $Fr=5$ was 12.5Hz, which was in good agreement with the experimental results. The flamelet structures of the buoyant jet diffusion flames could be well understood by comparing the scalar dissipation rates(SDR) and the heat release rates(HRR) of the flames. It was found that the SDR was strongly coupled with the HRR in the buoyant jet diffusion flames.

Key Words : jet diffusion flame, buoyancy, flamelet structure, numerical simulation

1. 서론

화재는 제어되지 않은 연소현상으로서 연소와 관련된 가장 복잡한 현상 중의 하나로 알려져 있다¹⁾. 화재에서는 유체유동, 열전달 및 화학반응과 같은 복잡한 물리, 화학적 과정이 서로 상호작용을 하며, 일반적으로 공간 스케일은 매우 크며 화염내부의 화학반응 시간 스케일은 매우 짧은 특성을 가지고 있다. 이러한 화재의 복잡한 물리, 화학적 특성으로 인해 화재에 대한 수치계산 작업은 통상의 비반응 유동장에 대한 것보다 매우 어렵고 아직까지는 예측의 정확성이 매우 낮은 문제점이 있는 등 개선의 여지가 많은 것으로 알려져 있다¹⁾.

화재현상 예측에 수치계산을 적용하는 연구는 최근에 많은 관심이 집중되고 있다. 이전에는 유동이나 연소현상 해석에 주로 이용되어 왔던 상용코드가 화재해석에 활용되는 경우가 많았지만, 2000년에 미국 NIST에서 개발한 화재 전용 해석코드인 Fire Dynamic Simulator(FDS)²⁾가 배포된 이후로는 이 FDS

를 활용한 화재 수치계산 연구가 매우 활발히 진행되고 있다. FDS는 대와동모사법(Large Eddy Simulation; LES) 기법을 채택하고 있어 화재의 전파나 화원에서 전파되는 연기의 비정상적인 거동의 예측이 가능하다. 그러나 LES 기법에서 일반적으로 채택하는 격자의 크기는 화염면의 두께에 비해 크며, 특히 화재 수치계산에 사용하는 격자 크기는 화염면의 두께에 비해 매우 크기 때문에 화염구조를 정확하게 모사하는데 한계가 있다. 결국 화염 또는 화재에 대한 LES에서는 화염구조 및 연소반응에 대해서는 전적으로 연소모델링에 의존하게 된다.

현재 확산화염에 대한 수치계산에서 충분히 정확도 높은 결과를 얻을 수 있는 연소모델로 몇 가지가 알려져 있지만 대표적인 모델로 층류화염편모델(Laminar Flamelet Model; LFM)과 최근에 많은 연구가 진행되고 있는 CMC(Conditional Moment Closure) 모델을 들 수 있다¹⁾. 이들 연소모델에서도 국부 스칼라 소산율(Scalar Dissipation Rate; SDR)과 같은 화염을 지배하는 중요한 인자들은 직접 계산을 통해 얻어야 하기 때문에 일정 수준 이상의 작은 격자계를 이용하여야만 의미있는 결과를 얻을 수 있

[†] To whom correspondence should be addressed.
cboh@pknu.ac.kr

다. 그러나 이 경우에는 계산시간이 급증하게 되는 어려운 점을 가지고 있다. 이러한 어려움으로 인해 FDS에서는 정확도가 높은 고급 연소모델은 사용하지 않고 매우 간단한 혼합분을 연소모델(Mixture-fraction combustion model)²⁾을 적용하고 있다. 이 혼합분을 연소모델은 계산절차가 간단하여 계산시간이 적게 소요되는 장점은 있지만 화염소화와 같은 국부적인 현상에 대해서는 예측성능은 매우 낮기 때문에 신뢰하기 힘든 결과를 얻는 경우도 많아 향후 개선의 여지가 많다.

화재에 대한 예측성능을 향상시키기 위해서는 궁극적으로는 LFM이나 CMC와 같은 고급 연소모델을 화재 수치계산에 적용하는 것이 바람직한 것으로 알려져 있다¹⁾. 그러나 아직은 이 고급 연소모델들이 화재에 대해서도 우수한 예측성능을 보일 수 있을 지 충분히 검토되어 있지 못하다.

기존 연구들 중에서 이러한 관점에서 화재와 유사한 조건의 화염에 대해 화염면 구조를 검토한 연구가 일부 있다. Mahalingam 등³⁾은 부력영향을 크게 받는 제트 확산화염에 대해서 화염면 구조를 검토하여 SDR과 열발생률(Heat release rate; HRR)이 화염면모델의 기본개념처럼 잘 상관되지 않는다고 보고한 바 있다. 그러나 Zhong이 수행한 DNS 연구⁴⁾에 따르면 부력영향을 받는 난류 확산화염에서 SDR과 HRR의 상관관계 경향은 화염면모델의 기본개념과 잘 일치한다. 이 연구에서는 등방성 균질난류(Isotropic, homogeneous turbulence) 조건을 이용하였는데 실제 화재의 난류조건과 얼마나 상응하는지는 명확하지 않고 아직까지는 화재에 대해서도 기존의 고급 연소모델들이 충분히 예측성능을 보일 수 있을지 또한 명확하지 않다. 따라서 화재와 같이 부력의 영향을 많이 받는 확산화염에 대해 고급 연소모델의 중요한 개념을 고찰해 보는 것은 향후 화재 수치계산에서 이들 연소모델의 성능을 미리 예측해 볼 수 있는 것으로 매우 의미 있는 일이라고 할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 이러한 관점에서 매우 정교한 수치 계산도구인 직접수치모사(Direct Numerical Simulation; DNS)를 적용하여 화재와 같이 부력의 영향으로 펠러거리는(Flickering) 확산화염에 대해서 LFM이나 CMC 모델의 기본이 되는 화염면(Flamelet) 구조를 검토하고자 한다.

2. 수치계산 방법

2.1. 지배방정식

본 연구의 수치계산 대상은 부력 영향을 받는 비정상 2차원 축대칭 제트 확산화염이다. 계산에 이용된 지배방정식은 낮은 마하수 근사법을 적용하여 아래의 (1)~(5)로 표현되는 연속, 운동량, 화학종, 에너지 및 상태방정식이다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = & -\nabla p_1 + (\rho - \rho_0) \mathbf{g} \\ & + \nabla \cdot \mu \left[(\nabla \mathbf{u}) + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} Y_i) = & \nabla \cdot (\rho D_{i,m} \nabla Y_i) \\ & + W_i \dot{\omega}_i, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, N) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = & \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \\ & + \sum_{i=1}^N W_i h_i^0 \dot{\omega}_i + \rho \sum_{i=1}^N (c_{pi} D_{i,m} \nabla Y_i \cdot \nabla T) \end{aligned} \quad (4)$$

$$p_0 = \rho R_0 T \sum_{i=1}^N \left(\frac{Y_i}{W_i} \right) \quad (5)$$

정밀한 수치계산을 위해서 지배방정식 중 열역학적 물성치와 전달물성치는 미국 Sandia 국립연구소에서 개발한 CHEMKIN-II⁵⁾ 및 TRANFIT Package⁶⁾를 이용하여 각각 계산하였다.

본 연구의 계산에는 저자들이 직접 개발한 DNS 코드를 이용하여 수행하였다. 이 코드는 제트 확산화염⁷⁾, 대향류화염⁸⁾ 등에 대해서 수치계산결과가 검증된 바 있으며, 상세화학반응기구의 적용이 가능하고 매우 정확한 열역학적 물성치와 전달물성치 값을 이용할 수 있도록 개발되었다.

2.2. 수치해법 및 계산조건

지배방정식의 수치해법은 특별한 모델에 의존하지 않고 해석하는 DNS를 적용하였다. 계산에 이용된 코드는 본 저자가 개발한 REFLOWS 2D⁷⁾이다. 이 코드에서는 밀도변동이 동반되는 화염대에 대해 안정된 해를 얻기 위해서 Najm 등⁹⁾이 제안한 2차 정확도를 갖는 예측교정자법(Predictor-corrector method)을 일부 수정하여 시간적분을 수행하였다. 또한 속도도와 압력의 교정은 밀도변동을 고려하도록 HSMAC (Highly Simplified Marker And Cell Method)법¹⁰⁾을

일부 수정하여 적용하였다. 계산방법에 관한 자세한 내용은 오 등⁷⁾의 논문을 참고하기 바란다.

화염을 형성하기 위해서 연료로는 수치적으로 다루기 쉬운 메탄(CH₄)을 사용하였으며 연료-공기의 화학반응을 계산하기 위한 반응기구로는 현 단계에서는 아래의 식 (6)~(9)과 같은 2단계 총괄 반응기구¹¹⁾를 이용하였다. 이 반응기구에 포함된 화학종수는 6개로서 CH₄, CO₂, CO, H₂O, O₂가 화학반응에 참여하며 N₂는 반응에는 참여하지 않는 화학종이다.



$$RR_1 = 10^{10.0} \exp\left(\frac{-12,019}{T}\right) [CH_4]^{1.0} [O_2]^{1.0} \quad (8)$$

$$RR_2 = 10^{10.0} \exp\left(\frac{-12,019}{T}\right) [CO]^{1.0} [O_2]^{1.0} \quad (9)$$

계산에 다루고 있는 계산영역과 노즐형상은 Fig. 1에 보이는 바와 같다. 계산영역(L_x × L_r)은 225mm × 90mm이고, 이 영역에 대해 290 × 130의 격자로 구성된 비균일 격자계를 이용하였다. 최소 격자의 크기는 화염면 근처에서 축방향과 반경방향으로 각각 0.15 mm이다. 본 연구에서 식 (10)과 같이 정의된 Fr 수가 5인 조건에서는 연료노즐에서는 순수 CH₄가 노즐 중심부에서 속도가 0.7m/s이면서 Top-hat 분포를 갖도록 하였으며, 주위 공기유속은 0.15 m/s이다. Fr 수가 160인 조건은 기존의 연구에서

계산했던 조건과 동일한 연료유속과 주위 공기유속이 각각 4m/s와 0.3m/s이다. Fr 수가 5와 160인 조건은 Re 수가 각각 400과 2,290에 해당된다. 본 연구에서 Fr 수를 5와 160으로 한 이유는 기존에 수행된 실험¹²⁾과 비교하기 위해서이다. 본 연구에 이용된 연료노즐의 내경 D는 10mm이며 초기 분출되는 연료와 공기의 온도는 300K으로 일정하게 하였다.

$$Fr = \frac{v^2}{gD} \quad (10)$$

여기서 v는 노즐에서 분출되는 연료의 유속, g는 중력가속도, D는 노즐의 내경이다.

경계조건으로 노즐벽면에서의 유속은 No-slip 조건, 반경방향 외부경계에서는 Slip 조건을 만족하도록 하였다. 축방향 하류경계(x = L_x)에서 유속은 내삽법(Interpolation)을 이용하여 결정하였다. 그 외 모든 물리량은 각 경계에서 Neuman 조건을 만족하도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 제트 확산화염의 주기적 거동

Fig. 2는 Fr 수가 5인 제트 확산화염의 순간적인 온도분포를 연속적으로 도시한 것이다. 그림에서 (a)~(e)는 임의의 순간을 0ms로 정하고 19.5ms의 간격으로 샘플링된 결과로서 좌측은 열발생률을 나타내며 우측은 화염온도를 의미한다. Re 수를 기준으로 볼 때 이 조건은 층류화염 영역이지만 부력의 영향이 크기 때문에 그림에서 보는 바와 같이 주기적으로 펄럭거리는(Flickering) 비정상 거동을 보이고 있다. Fig. 2(a)~(e)의 계산으로 얻어진 화염온도 분포를 통해서 부력을 받는 제트 확산화염의 주기적인 거동을 잘 확인할 수 있다. 또한 화염이 주기적인 거동을 보임과 동시에 화염면이 외부로 말리면서 생기는 와동형태도 확인할 수 있는데 이는 Fig. 2(f)에 도시한 기존실험¹²⁾에서 가시화된 화염형상과 유사한 형태를 보이고 있어 부력영향이 큰(Fr = 5)의 조건에서도 화염거동을 수치계산이 정성적으로 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 2의 결과를 통해 화염구조를 살펴보면, 축방향 거리 x = 40~50mm 근처에서 화염면이 외부로 나오면서 와동이 말리기 시작하여 하류로 대류되고 있는 것을 알 수 있다. 각 그림의 좌측에 도시된 열발생률을 확인해 보면 노즐근처의 상류에

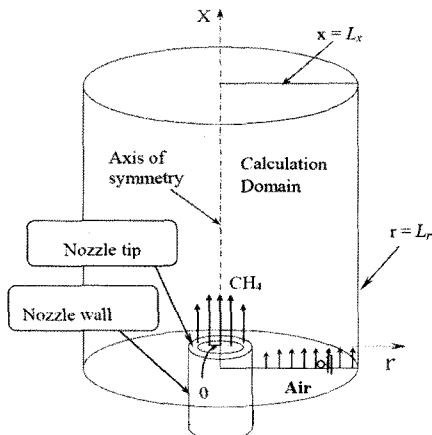


Fig. 1. Schematic of computation domain and geometry.

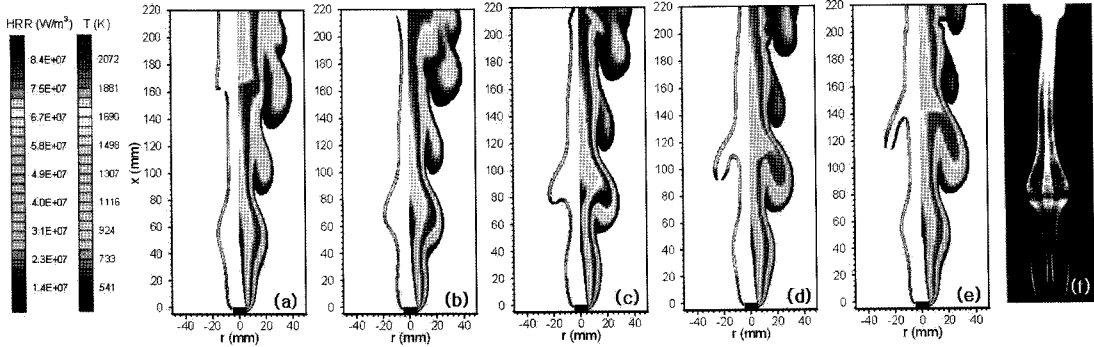


Fig. 2. Computed heat release rate contours (LHS) and flame temperature (RHS) of buoyant jet diffusion flame ($Fr=5$) at instants of (a) 0ms, (b) 19.5ms, (c) 39.0ms, (d) 58.5ms, (e) 78.0ms and (f) experimentally visualized flame shape¹²⁾.

서 매우 높고(밝은 흰색부분) 하류로 갈수록 대체로 낮아지고 있다. 그러나 하류에서도 외부 외동이 말리는 위치에 따라서 즉, 화염신장(Flame stretch)의 정도에 따라서 열발생률은 국부적으로 높아지거나 낮아지고 있음을 알 수 있다. 열발생률이 높은 영역은 화염신장률이 큰 곳으로서 화염온도는 낮아지고 열발생률이 낮은 영역은 화염신장률이 작은 곳으로서 화염온도가 높아지는(밝은 흰색부분) 것이 일반적인 화염면 구조인데 그림의 결과는 일반적인 화염면 구조와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 3에는 수치계산 결과와 실험결과와의 정량적인 비교를 위해 $Fr=5$ 인 조건에 대해 펄럭거리는 제트 확산화염의 특징을 가장 단적으로 보여줄 수 있는 화염온도의 시간변화를 도시하였다. 이 화염온도의 변화기동을 통해 펄럭거림 주파수(Flickering frequency)를 얻을 수 있다. 그림의 결과는 축방향 60mm, 반경방향 15mm인 위치에서 시간이 경과함에 따른 화염온도를 도시한 것이다. 그림에서 각 온도값 봉우리는 화염면이 외부로 말리는 순간을 의미하는 것으로서 이들 봉우리 사이의 주기를 통해 얻어진 펄럭거림 주파수는 12.8Hz이다. 기존에 Chen

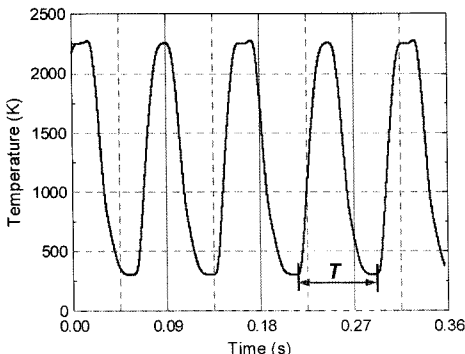


Fig. 3. Flickering period of buoyant jet diffusion flame of $Fr=5$.

등¹²⁾이 동일한 조건에 대한 실험을 통해서 얻은 펄럭거림 주파수는 약 12.5Hz이다. 부력 영향을 받는 화염의 중요 변수인 펄럭거림 주파수가 매우 잘 일치하고 있으며, Fig. 2에서 화염면 형상이 정성적으로 양호하게 일치하는 것으로 보아 수치계산이 실험을 매우 잘 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 본 계산결과를 이용하여 층류 화염면의 국소구조를 검토하는 것은 충분히 의미 있는 작업이 될 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 4에는 $Fr=5$ 인 조건에서의 제트 확산화염의 연료(CH_4) 및 산화제(O_2) 분포의 시간변화를 도시하였다. 그림에서 검정색 화염대를 경계로 내부는 연료가 분포하고 외부는 산화제가 분포하게 된다. 즉, 내부의 흰색 부분은 연료농도가 높은 영역이고 외부의 흰색 부분은 산화제의 농도가 높은 영역이다. 산화제의 농도분포는 Fig. 2의 온도분포와 유사한 형태를 보인다. 화염대 내부의 연료분포는 Fig. 2(a)에서 보이는 바와 같이 화염의 펄럭거림으로 인해 연료성분도 하류로 펄럭거리면서 전달되다가 뜯겨져 나가는 형태를 보이고 있음을 알 수 있다. 이상의 계산결과에 대한 고찰로부터 부력을 받는 제트 확산화염의 펄럭거리는 특성과 이로 인한 연료, 산화제의 분포를 잘 확인할 수 있었다.

3.2. 제트 확산화염의 화염면 구조

최근의 대표적인 고급 연소모델 중의 하나인 LFM이나 CMC 모델의 특징은 화염신장율은 식 (11)로 표현되는 스칼라 소산율(SDR; χ)을 이용하여 정의되며 화염면 구조는 이 스칼라 소산율과 상관된다.

$$\chi = 2D(\nabla Z)^2 \quad (11)$$

여기서, D 는 확산계수, Z 는 혼합분율을 의미한다.

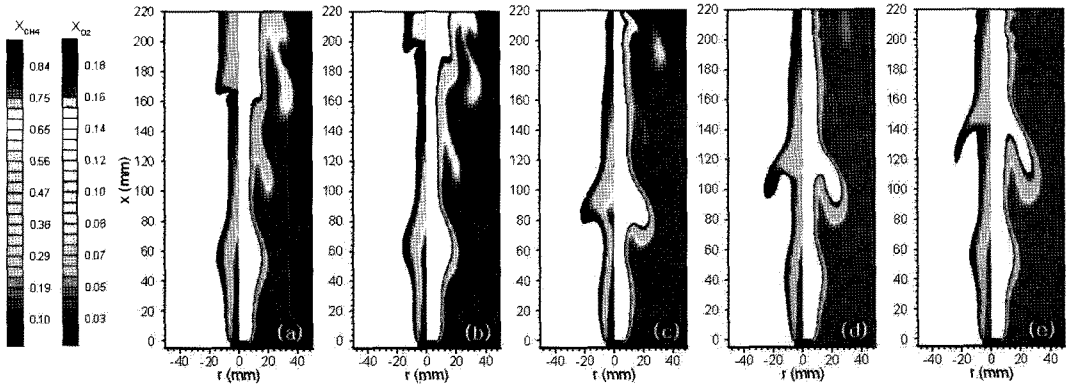


Fig. 4. Computed fuel(CH₄ : LHS) and oxidizer(O₂ : RHS) concentration contours of buoyant jet diffusion flame($Fr=5$) at instants of (a) 0ms, (b) 19.5ms, (c) 39.0ms, (d) 58.5ms, (e) 78.0ms.

국소 화염면에서는 SDR이 증가하게 되면 열발생률은 증가하지만 화염온도는 점차 감소하게 되며, SDR 값이 임계치를 넘게 되면 화염은 소멸되는 것이 일반적인 화염면 구조이다. 이러한 화염면 구조가 부력효과가 강한 화염에서도 계속 유지가 된다면 부력의 영향이 강한 화재에서도 고급 연소모델인 LFM이나 CMC 모델을 유효하게 적용할 수 있게 된다.

이하의 Figs. 5~8에서는 부력을 받는 제트 확산 화염에서도 일반적으로 알려진 화염면 구조를 유지하고 있는지 검토하기 위해 SDR과 화염면의 중요한 인자인 열발생률의 상관관계를 검토하였다.

우선 Fig. 5에는 $Fr=160$ 인 부력효과가 비교적 작지만 여전히 필러거리는 제트 확산화염을 대상으로 특정 순간의 SDR과 열발생률(HRR)의 공간분포를 도시하였다. 좌측 그림의 굵은 점선은 양분혼합비

(Stoichiometric)의 위치로 정의된 화염면을 의미한다. 전체적으로 보면 노즐출구 근처의 상류에서 SDR 값이 높고 하류로 갈수록 점차 낮아지는 특성을 보인다. 노즐근처의 상류에서는 고속 연료류와 주위 공기류의 유속차에 의한 Kelvin-Helmholtz 형의 불안정성에 기인한 와동이 발생하게 되는데 이 와동의 영향으로 화염면이 신장되어 SDR 값이 높아지게 된다. 또한, 하류의 $x=90\sim 140\text{mm}$ 의 위치에서 다시 SDR 값이 미소하게 증가하는 것은 부력 영향으로 화염면이 말리면서 화염면 신장에 영향을 주기 때문으로 판단된다. 우측 그림의 HRR은 전반적으로 SDR 값이 높은 상류에서 높고 하류에서 낮은 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6에는 Fig. 5에서 살펴본 화염을 대상으로 SDR과 HRR의 상관성을 정량적으로 살펴보기 위해서 Fig. 5의 결과에서 화염면상의 SDR과 HRR 및 온도만을 추출하여 다시 도시하였다. 노즐출구($x=0\text{ mm}$)에서 하류로 진행하면서 SDR값은 급격히 낮아지다가 화염 말림의 영향으로 다시 약간 높아지는 영역들이 존재하고 있다. 일반적인 화염면 구조와 잘 일치하는 지 검토하기 위하여 대표적인 SDR 값이 0.014 s^{-1} 인 위치를 선택하여 HRR값을 비교해본 결과 HRR값은 대략 80 J/cm^3 근처의 유사한 값을 갖는 것을 알 수 있다. 그러나 화염온도는 SDR 값이 같으면 대체적으로 비슷하지만 다소 상이한 영역도 존재하는 것을 알 수 있었다. 이 결과로부터 부력효과가 비교적 적은 제트 확산화염($Fr=160$)에서는 화염면 모델을 적용하는데 있어서 가장 중요한 SDR과 HRR 사이에는 매우 강한 상관관계가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 다만 SDR과 화염온도 사이에는 상관관계가 충분히 성립하지 않는 면

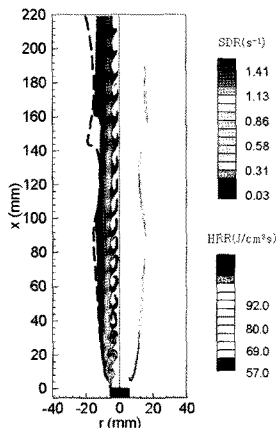


Fig. 5. Computed scalar dissipation rate(SDR : LHS) and heat release rate(HRR : RHS) contours of buoyant jet diffusion flame($Fr=160$) at selected instant.

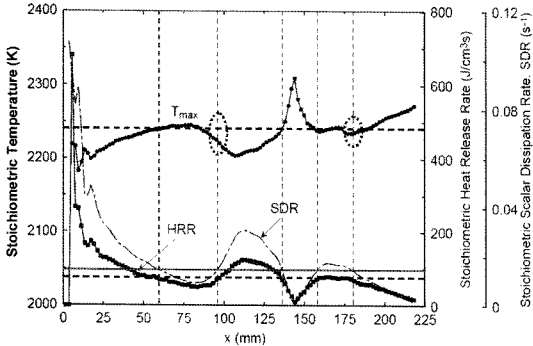


Fig. 6. Scalar dissipation rate(SDR) and heat release rate (HRR) plot of buoyant jet diffusion flame($Fr=160$) at flame surface(replotted using data of Fig. 5).

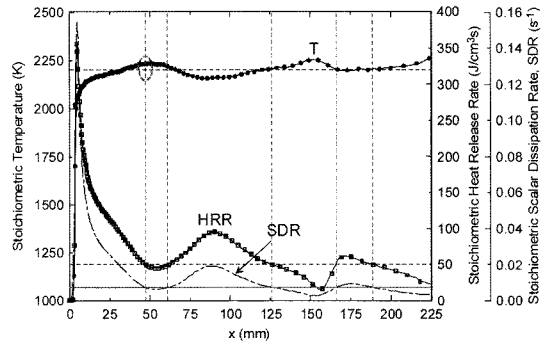


Fig. 8. Scalar dissipation rate(SDR) and heat release rate (HRR) plot of buoyant jet diffusion flame($Fr=5$) at flame surface(replotted using data of Fig. 7).

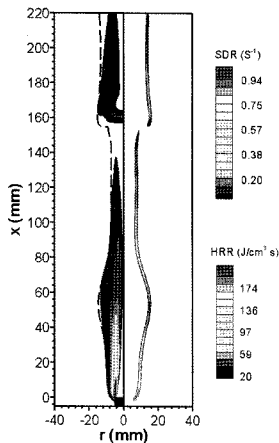


Fig. 7. Computed scalar dissipation rate(SDR : LHS) and heat release rate(HRR : RHS) contours of buoyant jet diffusion flame($Fr=5$) at selected instant.

도 있는데 이는 부력에 의한 화염면의 외부말림에 의한 영향으로 판단된다. 여기에 대한 구체적인 이유는 향후 추가적인 연구를 통해서 검토할 예정이다.

부력효과가 큰 화염에 대한 화염면 구조를 검토하기 위해서 $Fr=5$ 인 제트 확산화염을 대상으로 특정 순간의 SDR과 열발생률(HRR)의 공간분포를 Fig. 7에, 화염면에서의 SDR, HRR 및 화염온도를 추출하여 Fig. 8에 도시하였다. 그림의 표시형식은 Figs. 5, 6과 동일하다. $Fr=5$ 인 화염에서도 전체적으로 보면 노즐출구 근처의 상류에서 SDR 값이 높고 하류로 갈수록 점차 낮아지는 특성을 보이고 있다. 다만 연료류의 유속이 낮기 때문에 Kelvin-Helmholtz 형의 불안정성에 기인한 와동이 발생하지 않게 되어 노즐출구 근처에서 SDR값이 심하게 변동하는 것은 관찰되지 않는다. 그러나 부력에 의해 화염면이 말리고 이로 인한 화염면 신장률이 영향을 받게

되어 $Fr=160$ 인 경우와 마찬가지로 SDR값이 미소하게 다시 증가하는 하류 영역이 존재하게 된다.

$Fr=5$ 인 화염의 화염면 구조를 검토하기 위하여 Fig. 8에서 대표적으로 SDR값이 $0.008s^{-1}$ 인 위치를 선택하여 HRR값을 비교해 본 결과 HRR값은 대략 $50J/cm^3$ 근처의 유사한 값을 갖는 것을 알 수 있다. 여기서 보여주는 SDR과 HRR의 관계는 대표적인 값에 대해서만 구체적인 수치를 보여주고 있지만 다른 SDR값에 대해서도 비슷한 수준으로 HRR값이 좋은 상관관계에 있음을 알 수 있었다. SDR값이 동일한 위치에서 화염온도는 $Fr=160$ 인 화염과 마찬가지로 대략 비슷하지만 미소하게 차이를 보이는 영역이 존재하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과를 통해서 화염면 모델을 수치계산에 적용할 때 중요한 특성인 SDR값과 HRR값이 매우 강한 상관관계에 있음을 확인하였다. 이는 부력 영향이 강한 화염에 대해 화염면 구조를 검토한 Zhong의 결과와 정성적으로 일치하는 결과로서, 강한 부력효과를 받는 화염의 국소구조도 일반적인 화염면 구조와 잘 일치하는 것을 보여주고 있다. 따라서 이러한 결과를 바탕으로 추론해 본다면 LFM이나 CMC 모델과 같은 고급 연소모델도 부력영향을 크게 받는 화염에 대한 수치계산에 충분히 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 부력을 받는 제트 확산화염의 화염면 구조를 정량적으로 검토하기 위해 DNS를 수행하였다.

수치계산 결과를 통해 수치계산은 부력을 받아 필러거리는 제트 확산화염의 주기적인 형상과 주파

수를 매우 잘 예측하는 것을 확인하였다. 또한 부력 효과가 비교적 약한 $Fr = 160$ 인 조건과 비교적 부력 효과가 강한 $Fr = 5$ 인 조건의 화염의 화염편 구조를 검토한 결과 두 조건 모두에서 스칼라 소산율과 열발생률이 매우 강한 상관관계에 있음을 확인하였다. 이를 통해 고급 연소모델의 일종인 층류화염 편모델(LFM)과 CMC 모델이 화재의 계산에 충분히 활용될 가능성이 있음을 확인하였다.

참고문헌

- 1) V. Novozhilov, "Computational Fluid Dynamics Modeling of Compartment Fires", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 27, pp. 611 ~ 666, 2001.
- 2) K. McGrattan, B. Klein, S. Hstikka, and J. Floyd, "Fire Dynamic Simulator(Version 5) User's Guide", NIST Special Publication 1019-5, 2008.
- 3) S. Mahalingam, B. J. Cantwell and J. H. Ferziger, "Full Numerical Simulation of Coflowing, Axisymmetric Jet Diffusion Flames", Physics of Fluids A, Vol. 2, No. 5, pp. 720 ~ 728, 1990.
- 4) R. Zhong, "Direct Numerical Simulation of Turbulent Nonpremixed Reacting Flows with Buoyancy Effects", Ph.D. Dissertation of University of California at Irvine, 1999.
- 5) R. J. Kee, F. M. Rupley and J. A. Miller, "Chemkin-II : A Fortran Chemical Kinetic Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics", Sandia Report, SAND89-8009B, 1989.
- 6) R. J. Kee, G. Dixon-Lewis, J. Warnatz, M. E. Coltrin and J. A. Miller, "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Multicomponent Transport Properties", Sandia Report, SAND86-8246, 1986.
- 7) 오창보, 이창언, "비정상 CH_4 /공기 제트 확산화염에 관한 수치모사", 대한기계학회논문집 B권, 제 25권, 제8호, pp. 1087 ~ 1096, 2001.
- 8) C. B. Oh, A. Hamins, M. Bundy and J. Park, "The Two-dimensional Structure of Low Strain Rate Counterflow Nonpremixed Methane Flames in Normal and Microgravity", Combustion Theory and Modelling, Vol. 12, No. 2, pp. 283 ~ 302, 2008.
- 9) H. N. Najm, P. S. Wyckoff and O. M. Knio, "A Semi-implicit Numerical Scheme for Reacting Flow. I. Stiff Chemistry", Journal of Computational Physics, Vol. 143, pp. 381 ~ 402, 1998.
- 10) C. W. Hirt and J. L. Cook, "Calculating Three-dimensional Flows around Structures and over Rough Terrain", Journal of Computational Physics, Vol. 10, pp. 324 ~ 340, 1972.
- 11) V. Dupont, M. Pourkashanian and A. Williams, "Modelling of Process Heaters Fired by Natural Gas", Journal of the Institute of Energy, Vol. 66, pp. 20 ~ 28, 1993.
- 12) L.-D. Chen, J. P. Seaba, W. M. Roquemore and L. P. Goss, "Buoyant Diffusion Flames", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 22, pp. 677 ~ 684, 1988.