

Multi-environment PDF 모델을 이용한 MILD 연소과정 해석

지형근* · 전상태* · 김용모**

한양대학교 기계공학과

Multi-environment PDF Modeling for MILD Combustion Processes

Hyunggeun Ji*, Sangtae Jeon* and Yongmo Kim**

*Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

(Received 1 October 2017, Received in revised form 22 November 2017, Accepted 28 November 2017)

ABSTRACT

In this study, the multi-environment probability density function(MEPDF) approach has been applied to numerically investigate Delft-Jet-in-Hot-Coflow(DJHC) turbulent flames under Moderate or Intense Low-oxygen Dilution (MILD) combustion condition. Computations are made for two different jet velocities(Re = 4100 and 8800). In terms of mean axial velocity, temperature, and turbulent kinetic energy, numerical results are in reasonably good agreements with experimental data even if there exist the noticeable deviations in downstream region. Based on numerical results, the detailed discussions are made for the essential features of the non-visible flame structure and MILD combustion processes.

Key Words : Non-visible flame, MILD combustion, Turbulence-chemistry interaction, Multi-environment PDF approach

기 호 설 명

$f_\phi(\psi;x,t)$: Joint composition	a_n : Source term of weights
ψ : Sample space of composition vector ϕ	$b_{\alpha n}$: Source term of weighted abscissas
C_ϕ : Mixing model constant	τ_{flow} : Flow time scale
Γ_t : Turbulent viscosity	τ_{chem} : Chemical time scale
σ_t : Turbulent Schmidt number	ν : Kinematic viscosity
$\tilde{\epsilon}$: Turbulent dissipation rate	c_r : Local parameter that is defined as the maximum of the chemical reaction rate constant among 279 elementary reactions of GRI 2.11 [20]
\tilde{k} : Turbulent kinetic energy	ϵ : Local dissipation rate of turbulent kinetic energy
N_e : Number of environments	ρ : Local density of mixture
N_s : Number of the composition vector ϕ	
p_n : Weights	
$\langle s \rangle_{\alpha n}$: Weighted abscissas(= $p_n \langle \phi_\alpha \rangle_n$)	

1. 서론

최근, Moderate or intense low-oxygen diluted(MILD) 연소기술은 높은 열효율과 동시에 NOx를 비롯한 적

은 매연입자 배출을 만족시키는 특징으로 기존의 연소기술을 대체할 새로운 연소기술로 많은 주목을 끌고 있다. MILD 연소 상황에서 연료, 산화제 및 연소 생성물은 적절한 혼합을 통해 희석되고 예열되며, 그 결과로 기존의 연소기술에 비하여 비교적 낮은 산소 농도와 연료의 자발화 온도보다 높은 온도에서 화염이 생성된다. 따라서 기존의 화염과는 달리, 넓은 반응영역에서 균일한 온도분포를 나타낸다. MILD 연소는 무염 화염, 온도 균일성, 낮은 NOx 배출량,

† Corresponding Author, ymkim@hanyang.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

부드러운 복사 플럭스, 고유 화염 안정성 및 낮은 연소 소음을 특징으로 가진다[1,2].

MILD 연소 과정은 일반적으로 기존의 연소조건보다 낮은 산화제의 산소 수준으로 인해 상대적으로 낮은 반응률, 낮은 열방출율, 그리고 낮은 Damköhler 수를 산출한다. 따라서 유한속도 화학반응 효과(Finite-rate chemistry effect)는 전통적인 방식의 비예혼합 연소보다 MILD 연소에서 더 중요하다. 또한, 연소 생성물과 반응물들 사이의 강한 난류 혼합의 과정을 거쳐 연소가 일어나게 된다. 이러한 이유로 MILD 연소 조건에서 난류-화학반응 상호 작용을 현실적으로 표현하는 것이 중요하다. 특히 자발화 과정을 모델링하기 위해서는 비평형 화학반응 및 난류 혼합 모두 중요하다. MILD 연소의 개념과 그에 대한 실험은 광범위하게 연구되었지만, 무염 연소 영역에 대한 물리적 모델링은 상대적으로 덜 연구되었다[3,4]. 이와 관련하여, 무염 연소 조건 하에서 난류 연소 모델의 예측 능력을 평가하기 위한 체계적인 연구가 필요하다.

이전의 연구들에서, MILD 연소 조건 하의 난류-화학반응 상호 작용은 대부분 Eddy Dissipation Concept (EDC) 모델을 통해 모델링 되었다. De와 Dongre[5,6]는 EDC 모델과 그리고 수송 확률 밀도 함수, transported Probability Density Function(transported PDF), 모델을 사용하여 Delft-Jet-in-Hot-Coflow(DJHC) 버너 [7, 8]의 난류 화염을 수치적으로 연구했다. 두 모델 모두 전반적으로 실험의 측정값과 비교적 잘 일치하는 결과를 나타내었으나, 실험결과와는 다르게 연료와 동축류 사이에서 불이 붙는 것으로 예측하였다. 이러한 경향은 Labahn et al. [9]이 Conditional Source-term Estimation (CSE) 모델을 이용하여 수행한 연구에서도 동일하게 보고되었다.

한편, EDC 모델의 경우, 종종 MILD 연소조건 하에서 화학 반응을 과도하게 예측하여 화염 부상 높이를 과소 예측하는 경향을 보인다. 이를 보완하기 위해 transported PDF 모델이 사용되었다[10,11].

최신 난류-화학반응 상호 작용 모델에서, 몬테 카를로 입자법을 기반으로 하는 transported PDF 기법은 복잡한 연소 조건 하에서 난류 반응 유동의 정확한 모델링[12,13]을 위한 가장 신뢰할 수 있는 접근 방법 중 하나이다. 그러나 대규모의 실제 연소기에 대한 난류 화염에 대한 수치해석을 진행할 경우, Stochastic Lagrangian PDF(SLPDF) 접근법은 과도한 계산량을 필요로 한다. 이를 해결하기 위한 방법으로 Eulerian Frame에 기반하여 transported PDF 방정식의 해를 얻는 두 가지 대안적 접근법이 있다. 각각 multi-environment PDF(MEPDF) 접근법[14,15]과 stochastic Eulerian PDF(SEPDF) 방법[16,17]이다. MEPDF 모델링에서, joint composition PDF 수송 방정식은 화

학종 및 열역학적 상태량에 대한 weight 및 weighted abscissa의 조합으로 근사할 수 있다. MEPDF 접근법은 기존 오일러 방식을 기반으로 하며, SLPDF 접근법과 SEPDF 모델과 비교하여 입자 기반 방식의 특성을 유지하면서 더 나은 연산 효율성을 유지한다. 최근 RANS 및 LES를 기반으로 한 multi-environment PDF 접근법은 MILD 연소 조건 하에서 난류 화염을 성공적으로 예측했다[18,19]. 그러나 DJHC 화염에 대한 수치해석적인 연구는 여전히 전반적으로 부족하다. 따라서 DJHC 화염에 대한 폭넓은 이해를 위하여 MEPDF를 이용하여 DJHC 화염에 대한 수치해석을 진행하였다.

2. 수치해석 모델

2.1. 해석조건

본 연구는 Oldenhof et al. [8]이 수행한 MILD 연소 조건 하에서 DJHC 버너에 대한 실험을 기반으로 하여 실험에 사용된 버너 형상과 수치를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 격자는 아래 Fig. 1과 같고 반경 방향과 축 방향으로 각각 111×152 개의 격자를 사용하여 2차원 축대칭으로 해석하였다. 실험용 버너는 절연 및 냉각된 중앙 연료 분사 노즐($d_i = 4.25$ mm)과 보조 버너와 연결된 환형 노즐($d_i = 82.8$ mm)로 구성되어 있다. 보조 버너는 환형 노즐로 공급될 뜨거운 연소 생성물을 만드는 역할을 한다. 연료 노즐에서 분사되는 연료는 Dutch natural gas를 사용한다. 이중 DJHC-I 4100과 DJHC-I 8800 두 화염에 대해 수치해석을 진행하였다. 두 실험은 각각 연료의 속도가 34 m/s, 56 m/s로 다른 것을 제외하고 동축류에 대한 조건은 동일하다. 연료와 동축류에 대한 입구조건은 Oldenhof et al.[8]이 수행한 실험에서 제공한 축 방향으로 3 mm 지점에서의 온도, 축 방향 속도, 그리고 산소분율의 실험 결과를 사용하였다. 난

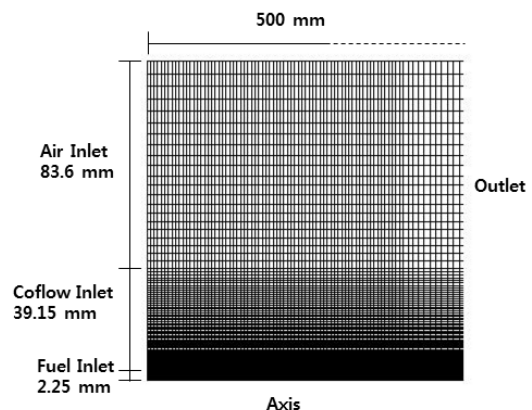


Fig. 1. Schematic of the mesh.

류 모델은 표준 $k-\varepsilon$ 모델을 사용하였고, 화학반응기구는 GRI 2.11[21]을 사용하였다.

2.2. Multi-environment PDF model

본 연구에서는 MILD 연소 조건 하에서 3개의 입구조조건을 가진 난류 비에혼합화염을 실제적으로 고려하기 위해 Fox[15]가 제안한 MEPDF 모델을 사용하였다. Interaction by Exchange with the Mean(IEM) mixing 모델을 적용한 joint composition PDF에 대한 수송방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다. 이때, mixing 상수(C_ϕ)는 2.0을 사용하였다.

$$\begin{aligned} \langle \rho \rangle \frac{\partial f_\phi}{\partial t} + \langle \rho \rangle U_i \frac{\partial f_\phi}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial \psi_\alpha} (\langle \rho \rangle S_\alpha(\psi) f_\phi) \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\Gamma_t}{\sigma_t} \frac{\partial f_\phi}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial \psi_\alpha} \left[\left(\frac{1}{2} C_\phi \frac{\tilde{\varepsilon}}{k} (\psi_\alpha - \langle \phi_\alpha \rangle) \right) f_\phi \right] \end{aligned} \quad (1)$$

MEPDF 모델에서 N_s 개의 차원에 대한 joint composition PDF는 composition 공간에서의 다차원 Dirac delta함수의 합으로 나타내어지며, 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$f_\phi(\psi; x, t) = \sum_{n=1}^{N_s} p_n \prod_{n=1}^{N_s} \delta(\psi_i - \langle \phi_i \rangle_n) \quad (2)$$

위의 식 (1)과 (2)를 이용하면 weight들과 weighted abscissa, $\langle s \rangle_{an} = p_n \langle \phi_\alpha \rangle_n$, 들에 대해 다음과 같은 형태의 수송방정식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} + \langle U_i \rangle \frac{\partial p_n}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_t \frac{\partial p_n}{\partial x_i} \right) = a_n \quad (3)$$

$$\frac{\partial \langle s \rangle_{an}}{\partial t} + \langle U_i \rangle \frac{\partial \langle s \rangle_{an}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_t \frac{\partial \langle s \rangle_{an}}{\partial x_i} \right) = b_{an} \quad (4)$$

여기서 a_n 과 b_{an} 을 결정해야 하는데, IEM mixing 모델을 사용하는 경우 weight의 생성 항인 a_n 은 0으로 가정한다. Environment가 2개인 경우, weighted abscissa의 생성 항 b_{an} 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} b_{\alpha 1} = \frac{1}{\langle \phi_\alpha \rangle_1 - \langle \phi_\alpha \rangle_2} \sum_{n=1}^2 p_n \Gamma_t \left(\frac{\partial \langle \phi_\alpha \rangle_n}{\partial x_i} \right)^2 \\ + \frac{1}{2} C_\phi \frac{\varepsilon}{k} p_1 (\tilde{\phi}_\alpha - \langle \phi_\alpha \rangle_1) + p_1 S_\alpha(\langle \phi \rangle_1) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} b_{\alpha 2} = \frac{1}{\langle \phi_\alpha \rangle_2 - \langle \phi_\alpha \rangle_1} \sum_{n=1}^2 p_n \Gamma_t \left(\frac{\partial \langle \phi_\alpha \rangle_n}{\partial x_i} \right)^2 \\ + \frac{1}{2} C_\phi \frac{\varepsilon}{k} p_2 (\tilde{\phi}_\alpha - \langle \phi_\alpha \rangle_2) + p_2 S_\alpha(\langle \phi \rangle_2) \end{aligned} \quad (6)$$

위의 두 식 (5), (6)에서 각각 첫 번째 항은 수정항이며, 두 번째 항은 micromixing 항으로 각각 abscissa가 composition 공간에서 평균으로부터 멀어지게, 가까워지게 하는 역할을 한다. 즉, 이 두 항이 composition 벡터의 분산에 직접적인 영향을 끼친다. 그런데, 식 (5), (6)의 수정항은 계산상의 수치적 문제를 야기할 수 있다. 이러한 수치적 특이점 문제를 피하기 위해 이전 연구 [18]에서 사용했던 접근법을 동일하게 사용하였다. 이 접근법은 Akroyd et al. [22], Koo et al. [23], 그리고 Tang et al. [15]이 사용한 수정항에 대한 접근법을 적절히 혼합한 방법이다.

또한, 연료조건에 따라 난류 유동과 화학반응의 상관관계에 대해 알아보기 위해 Damköhler 수를 사용하였다. Damköhler 수는 아래와 같이 flow time scale과 chemical time scale의 비로 정의한다[24].

$$Da \equiv \frac{\text{characteristic flow time}}{\text{characteristic chemical time}} = \frac{\tau_{flow}}{\tau_{chem}} \quad (7)$$

본 연구에서는 난류 Damköhler 수를 다음과 같이 정의하여 사용하였다.

$$\text{turbulence Damköhler number} \equiv Da_T \equiv \left(\frac{u'x_r^2}{\varepsilon} \right)^{1/2} \quad (8)$$

이와 관련하여 Issac et al. [25]이 상세한 연구를 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구는 MEPDF 모델을 이용하여 DJHC 버너에 대해 해석하였다. DJHC-I 4100 화염과 DJHC-I 8800 화염에 대해 속도, 난류 운동 에너지, 그리고 화염 온도의 반경 방향 프로파일을 실험 측정값과 비교하고, 온도 프로파일의 경우는 다른 그룹[5,9]의 수치해석 결과와도 비교하였다.

3.1. Velocity and turbulent kinetic energy

Fig. 2은 DJHC-I 4100, DJHC-I 8800 화염에 대한 축 방향 속도 프로파일을 반경 방향에 따라 각각 나타낸 것이다. 두 화염 모두 축 방향으로 4개의 위치 ($x = 30 \text{ mm}, 60 \text{ mm}, 90 \text{ mm}, 120 \text{ mm}$)에서 측정값과 비교하였다. 축 방향 속도의 경우 두 화염 모두에서 전반적으로 잘 일치하고 있으며, 후류로 갈수록 축근방에서의 속도를 조금씩 과소 예측하는 경향을 보인다. 이러한 현상은 RANS 모델의 한계로, 실제 유동에 비해 에너지 소산율을 높게 예측하여 실제보다

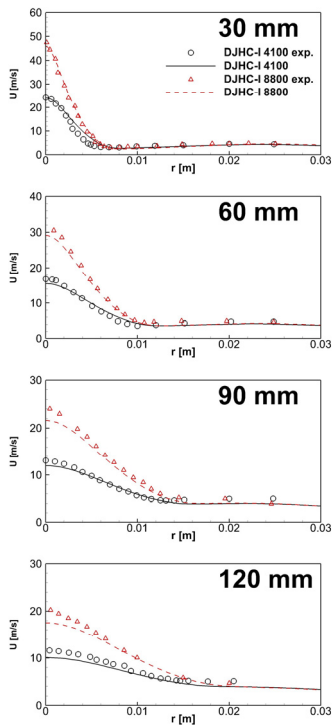


Fig. 2. Radial profiles of predicted and measured axial velocity profiles at four axial locations.

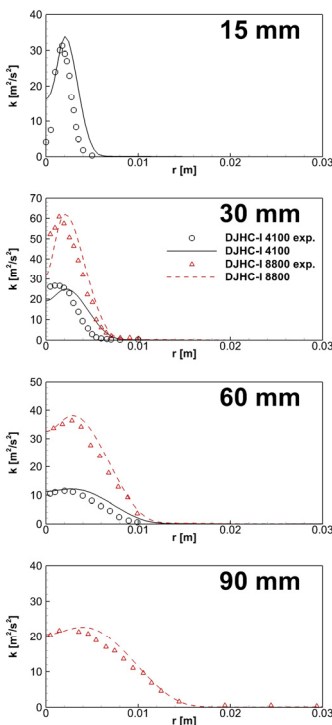


Fig. 3. Radial profiles of predicted and measured turbulent kinetic energy profiles at four axial locations.

빠르게 속도가 느려지는 결과를 나타낸다. 이러한 경향은 연료 제트의 속도가 빠른 DJHC-I 8800에서 더 두드러지게 나타난다.

Fig. 3는 각 화염의 난류 운동에너지를 반경 방향에 따라 나타낸 프로파일이다. DJHC-I 4100의 경우는 $x = 15 \text{ mm}$, 30 mm , 60 mm 위치에서의 값을, DJHC-I 8800의 경우는 $x = 30 \text{ mm}$, 60 mm , 90 mm 에서의 값을 비교하였다. 난류 운동 에너지의 경우도 전반적으로 실험값과 잘 일치하는 결과를 보여주고 있지만, $x = 30 \text{ mm}$ 위치에서 유동 중앙 부분의 난류 운동에너지를 다소 과소 예측하는 결과를 공통적으로 보여주고 있다. 특히, $x = 15 \text{ mm}$ 위치에서의 실험 측정값이 있는 DJHC-I 4100 화염의 경우, 이 위치의 축 근처에서 난류 운동에너지를 상당히 과대 예측하고 있는 것을 볼 수 있다. 즉, 노즐 근처에서는 실험 결과보다 높게 예측되던 난류 운동에너지가 $x = 30 \text{ mm}$ 위치에서는 실제보다 낮게 예측된 것이다. 이를 통해 RANS 모델이 실제 유동보다 에너지 소산을 과대 예측하고 있으며, 그 결과 난류 운동 에너지가 짧은 구간에서 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다.

3.2. Temperature

Fig. 4와 Fig. 5는 두 화염의 화염 온도를 반경 방향에 따라 나타낸 것이다. 두 화염 모두 축 방향으로 4개의 위치($x = 30 \text{ mm}$, 60 mm , 90 mm , 120 mm)에서 측정된 실험결과와 비교하였다. DJHC-I 4100 화염의 경우 상류($x = 30 \text{ mm}$) 부분에서는 실험값과 잘 일치하는 결과를 보였지만, $x = 60 \text{ mm}$ 이후에서는 연료와 동축류가 섞이는 부분에서 실험과는 달리 다소 이르게 비예혼합화염과 같이 좁은 영역에서 연소가 일어나는 현상이 나타났으며, 실험 결과와 비교하여 온도를 높게 예측하고 후류($x > 90 \text{ mm}$)로 갈수록 고온부를 좀 더 바깥쪽에서 예측하는 결과를 보였다. 이는 RANS 모델을 기반으로 한 다른 연구들[5,9]에서 동일하게 나타나는 현상으로, RANS 기반의 모델이 유동을 제대로 예측하지 못하여 나타난 결과로 사료된다. 특히 상류에서의 유동특성을 실제와 다르게 예측하는 것으로 보이며, 이는 연료 제트의 속도가 빠른 DJHC-I 8800 화염에서는 DJHC-I 4100에 비해 더 이르게 $x = 30 \text{ mm}$ 위치에서부터 연소가 일어나는 현상을 보였다. 이는 연료의 속도가 빨라지면서 상류에서 동축류와 바깥쪽의 공기가 연료 쪽으로 빨려 들어오는 것을 과다하게 예측한 것이 그 이유로 예상된다.

MEPDF 모델을 적용한 수치해석 결과의 신뢰성을 알아보기 위하여 두 화염 모두 $x = 30 \text{ mm}$ 에서 $x = 120 \text{ mm}$ 까지의 결과를 다른 그룹의 연구결과들과 비

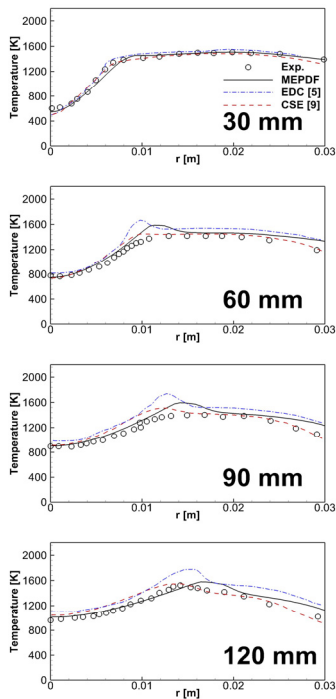


Fig. 4. Radial profiles of predicted and measured temperature for DJHC-I 4100 flame at four axial locations.

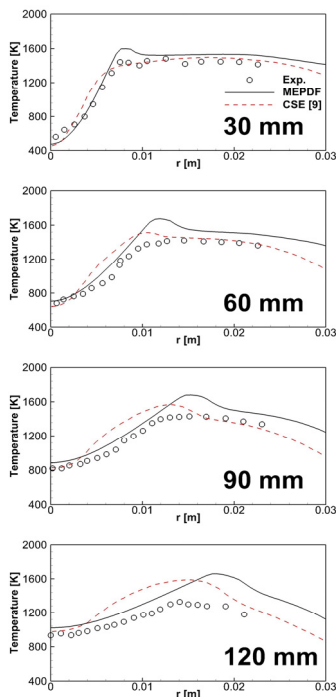


Fig. 5. Radial profiles of predicted and measured temperature for DJHC-I 8800 flame at four axial locations.

교해보았다. DJHC-I 4100 화염은 EDC[5], CSE[9] 모델을 이용한 결과와 비교하였고, DJHC-I 8800 화염의 경우 EDC 모델을 사용한 수치해석 결과가 없어 CSE 모델[9]을 사용한 결과와만 비교하였다. DJHC-I 4100 화염에서 EDC 모델[5]과 CSE 모델[9]을 사용한 결과는 $x = 30$ mm 위치에서 세 모델 모두 유사한 결과를 나타내었지만, 나머지 위치에서는 EDC 모델[5]이 화염 온도를 가장 과대 예측하였고, CSE 모델[9]이 가장 비슷하게 예측하였지만 화염 안쪽($r < \text{약 } 15$ mm)에서의 온도를 과대 예측하였다. 본 연구에서 사용한 MEPDF 모델의 경우 최고 화염 온도는 CSE 모델[9]에 비하여 다소 높게 예측했으나, 그 이외의 부분에서는 잘 일치하는 결과를 보였다. 한편, DJHC-I 8800 화염의 경우 CSE 모델[9]을 이용한 계산결과에서는 $x = 30$ mm에서 좁은 영역에서 연소반응이 일어나는 현상이 나타나지 않았다. 그러나 이 현상은 Fig. 3에서 나타나는 DJHC-I 4100 화염과 DJHC-I 8800 화염의 난류 운동에너지를 예측하는데 있어 발생하는 오차의 정도 차를 보아 연소모델의 차이보다는 유동 solver의 정확성 차이로 인한 결과로 유추된다. $x = 30$ mm 위치에서의 결과를 제외한 나머지 부분에서는 본 연구의 결과와 동일하게 좁은 영역에서 연소반응이 나타났다. 또한, 최고 화염 온도를 MEPDF 모델에 비해 정확하게 예측했지만, DJHC-I 4100 화염에서의 결과와 마찬가지로 화염 안쪽에서의 온도를 과대 예측하는 결과를 나타내었다.

Fig. 6은 위에서 언급한 DJHC-I 4100 화염과 DJHC-I 8800 화염의 차이를 좀 더 시각적으로 관찰하기 위해 온도장을 나타낸 것이다. 왼쪽이 DJHC-I 4100 화

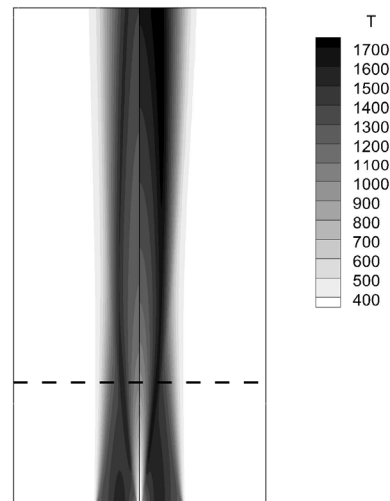


Fig. 6. Predicted contours of the temperature of DJHC-I 4100 (left) and DJHC-I 8800 (right) flames with black dotted line ($x = 120$ mm).

염, 오른쪽이 DJHC-I 8800 화염이다. 전반적으로 DJHC-I 8800 화염의 화염 온도가 DJHC-I 4100 화염에 비해 높은 것을 관찰할 수 있으며, 중심축 부근의 온도가 좀 더 상류에서 높아지는 것을 확인할 수 있다. 특히, 고온의 동축류가 중심축 부근의 고온영역으로 빨리 들어가는 현상이 온도장에서 확연히 드러난다. 이로 인해 DJHC-I 8800 화염에서는 유동의 영향으로 $x = 30$ mm에서부터 실험 결과에 비해 화염 온도를 과대 예측하는 현상이 나타나는 것임을 확인할 수 있다.

3.3. Turbulent Damköhler number

다음으로 연료의 입구 경계속도에 따라 난류 혼합과 화학반응기구의 상관관계에 대해 알아보기 위해 두 화염의 난류 Damköhler 수를 비교해보았다. Fig. 7은 두 화염의 난류 Damköhler 수에 대한 분포를 비교한 것이다. 연료의 속도가 빠른 DJHC-I 8800 화염이 DJHC-I 4100 화염에 비해 더 후류에서 난류 Damköhler 수가 증가하기 시작하며, 후류에서의 최대 난류 Damköhler 수가 더 높은 것을 볼 수 있다. 이를 통해 DJHC-I 8800 화염의 경우, 연료 제트의 속도가 빠른 상류에서 화학반응보다 난류 유동의 영향이 DJHC-I 4100에 비해 상대적으로 크지만 후류로 갈수록 화학반응의 영향이 빠르게 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 3.2에서 언급한 것과 같은 맥락에서 상류에서 과다하게 유입된 동축류와 공기의 영향으로 상류에서 난류 유동의 영향이 DJHC-I 4100 화염에 비해 크기 때문인 것으로 해석할 수 있다.

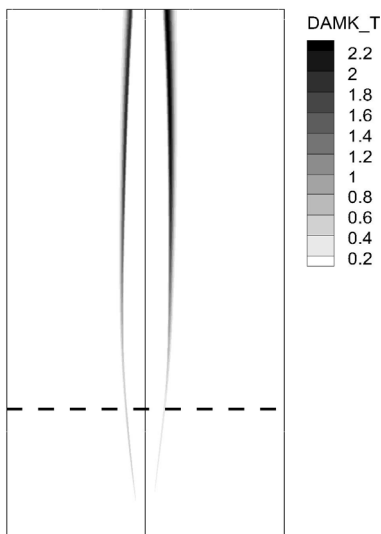


Fig. 7. Predicted contours of the turbulent Damköhler number of DJHC-I 4100 (left) and DJHC-I 8800 (right) flames with black dotted line ($x = 120$ mm).

4. 결론

본 연구는 2개의 environment를 사용한 MEPDF 모델을 이용하여 MILD 연소 환경에서의 난류 제트 화염인 DJHC 화염에 대한 수치해석을 진행하였다. 2D RANS 기반으로 난류 모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며, mixing 모델은 IEM mixing 모델을 사용하였다.

축 방향 속도와 난류 운동에너지의 반경 방향 프로파일의 경우 실험결과와 상당히 잘 일치하는 결과를 보였다. 축 방향 속도의 경우는 상류에서는 전 영역에 걸쳐 실험값과 잘 일치하는 결과를 보였지만, 후류에서는 중심축 근처에서 약간 과소 예측하는 결과를 보였고, 연료 제트의 속도가 더 높은 DJHC-I 8800 화염의 경우에는 그 정도가 더 커지는 결과를 보였다. 이와 반대로 난류 운동에너지의 경우, $x = 15$ mm 부근에서는 실험결과에 비해 과대 예측하다 $x = 30$ mm 부근에서는 과소 예측하는 경향을 보였고, 후류에서는 전반적으로 잘 일치하는 결과를 보였다. 이는 상류에서 난류 운동에너지가 빠르게 소산되는 경향을 보여주는 결과로 해석할 수 있다.

반경 방향 온도 프로파일의 경우 DJHC-I 4100 화염은 비교적 잘 예측하고 있지만 $x = 60$ mm 이후부터 연료와 동축류 사이의 좁은 영역에서의 온도를 과대 예측하는 결과를 보였다. DJHC-I 8800 화염의 경우는 이러한 경향이 좀 더 빠르게 일어나, $x = 30$ mm 부근에서부터 온도를 과대 예측하였다. 이러한 현상은 상류에서 동축류가 연료 측으로 빨려드는 현상을 실제보다 과다하게 예측했기 때문으로 예상된다. 이는 두 화염의 온도장에서도 시각적으로 확인할 수 있다.

DJHC-I 4100 화염과 DJHC-I 8800 화염의 난류 Damköhler 수를 비교해본 결과 DJHC-I 8800 화염의 난류 Damköhler 수가 DJHC-I 4100 화염에 비해 후류에서 증가하기 시작하는데 이는 상류에서 난류 유동의 영향이 크다는 의미로 상류로 유입된 고온의 동축류로 인해 난류 강도가 강해지기 때문으로 추측된다.

후 기

본 연구는 2017년 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KEPTEP)의 지원을 받아 수행한 한국형 300MW급 IGCC 실증플랜트기술개발사업 연구 과제입니다.

References

- [1] H. Tsuji, A. K. Gupta, T. Hasewaga, M. Katsuki,

- K. Kishimoto, and M. Morita, High temperature air combustion: from energy conservation to pollution reduction; CRC Press, 2002.
- [2] M. Mörtberg, W. Blasiak, and A. K. Gupta, Experimental investigation of flow phenomena of a single fuel jet in cross-flow during highly preheated air combustion conditions. *J. Eng. Gas Turbines Power*, 129(2) (2007) 556-564.
- [3] P. Sabia, M. Joannon, S. Fierro, A. Tregrossi, and A. Cavaliere, Hydrogen-enriched methane mild combustion in a well stirred reactor. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 31 (2007) 469-475.
- [4] P. H. Lee and S. S. Hwang, Experimental Study for Oxygen Methane MILD Combustion in a Laboratory Scale Furnace, *J. Korean Soc. Combust.*, 21(4) (2016) 6-15.
- [5] A. De, E. Oldenhof and P. Sathiah, Numerical Simulation of Delft-Jet-in-Hot-Coflow (DJHC) Flames Using the Eddy Dissipation Concept Model for Turbulence-Chemistry Interaction, *Flow Turbulence Combust.*, 87(4) (2011) 537-567.
- [6] A. Dongre, A. De, and R. Yadav, Numerical investigation of MILD combustion using multi-environment Eulerian probability density function modeling, *Int. J. of spray and combust. dynamics*, 6(4) (2014) 357-386.
- [7] E. Oldenhof, M. J. Tummers, E. H. van Veen, and D. J. E. M. Roekaerts, Ignition kernel formation and lift-off behaviour jet-in-hot-coflow flames, *Combust. Flame.*, 157 (2010) 1167-1178.
- [8] E. Oldenhof, M. J. Tummers, E. H. van Veen, and D. J. E. M. Roekaerts, Role of entrainment in the stabilisation of jet-in-hot-coflow flames, *Combust. Flame.*, 158 (2011) 1553-1563.
- [9] J. W. Labahn, D. Dovizio, and C. B. Devaud, Numerical simulation of the Delft-Jet-in-Hot-Coflow (DJHC) flame using Conditional Source-term Estimation, *Proc. Combust. Inst.*, 35 (2015) 3547-3555.
- [10] S. Zahirović, R. Scharler, P. Kilpinen, I. Oberberger, Validation of flow simulation and gas combustion sub-models for the CFD-based prediction of NO_x formation in biomass grate furnaces, *Combust. Theory Mod.*, 15 (2010) 61-87.
- [11] S. R. Shabanian, P. R. Medwell, M. Rahimi, A. Frassoldati, A. Cuoci, Kinetic and fluid dynamic modeling of ethylene jet flames in diluted and heated oxidant stream combustion conditions, *Appl. Therm. Eng.*, 52(2) (2013) 538-554.
- [12] S. B. Pope, PDF methods for turbulent reactive flows, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 11 (1985) 119-192.
- [13] H. Wang, and S. B. Pope, Large eddy simulation/probability density function modeling of a turbulent CH₄/H₂/N₂ jet flame, *Proc. Combust. Inst.*, 33 (2011) 1319-1330.
- [14] R. O. Fox, *Computational models for turbulent reacting flows*, Cambridge University Press, Cambridge, 2003.
- [15] Q. Tang, W. Zhao, M. Bockelie, and R.O. Fox, Multi-environment probability density function method for modelling turbulent combustion using realistic chemical kinetics, *Combust. Theory. Mod.*, 11 (2007) 889-907.
- [16] L. Valiño, A field Monte Carlo formulation for calculating the probability density function of a single scalar in a turbulent flow, *Flow Turbul. Combust.*, 60 (1998) 157-172.
- [17] W. P. Jones, and V. N. Prasad, Large Eddy simulation of the sandia flame series (D, E and F) using the Eulerian stochastic field method, *Combust. Flame.*, 157 (2010) 1621-1636.
- [18] S. T. Jeon, and Y. M. Kim, Numerical Investigations of turbulent CH₄/H₂ flames under MILD condition, The 51th KOSCO Symposium, Dec. 10th-11th 2015, 267-268.
- [19] J. W. Lee, and Y. M. Kim, DQMOM based PDF transport modeling for turbulent lifted nitrogen-diluted hydrogen jet flame with autoignition, *Int. J. Hydrogen Energy*, 37 (2012) 18498-18508.
- [20] A. De, and A. Dongre, Assessment of turbulence-chemistry interaction models in MILD combustion regime. *Flow Turbulence Combust.*, 94(2) (2015) 439-478.
- [21] C. T. Bowman, R. K. Hanson, D. F. Davidson, W. C. Gardiner, Jr., V. Lissianski, G. P. Smith, D. M. Golden, M. Frenklach, and M. Goldenberg, <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/new21/version21/text21.html>
- [22] Akroyd J., Smith A. J., McGlashan L. R., and Kraft M. (2010) "Numerical investigation of DQ MoM-IEM as a turbulent reaction closure," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 65, pp.1915-1924.
- [23] H. S. Koo, P. Donde, and V. Raman, A Quadrature-

- based LES/Transported Probability Density Function Approach for Modeling Supersonic Combustion, *Proc. Combust. Ins.* 33 (2011) 2203-2210.
- [24] A. Mardani, S. Tabejamaat, and M. Ghamari, Numerical study of influence of molecular diffusion in the mild combustion regime. *Combust. Theory Mod.*, 14 (2010) 747-774.
- [25] B. J. Isaac, A. Parente, C. Galletti, J. N. Thornock, P. J. Smith, and L. Tognotti, A novel methodology for chemical time scale evaluation with detailed chemical reaction kinetics. *Energy Fuels*, 27 (2013) 2255-2265.