

난류분무제트연소에서의 화염구조와 조건평균 통계에 대한 수치적 연구

서재엽* · 허강열***

Numerical Study of Flame Structures and Conditional Statistics in Turbulent Spray Jet Combustion

Jaeyeob Seo and Kang Y. Huh

ABSTRACT

3D DNS is performed for n-heptane spray turbulent jet combustion. Diesel-like conditions are considered including single and multiple injections. Conditional statistics are obtained for multiple Lagrangian flame groups of sequentially evaporating fuel. Each fuel group represents the conditional statistics of an independent Lagrangian flame group. Sequentially evaporating fuel goes through different histories and residence times over the ignition delay period. Multiple flame groups are required for accurate description of combustion of a spray jet that goes through a long injection duration or multiple injections.

Key Words : Turbulent spray combustion, Multiple flame structure, Conditional statistics, DNS, CMC

기 호 설 명

Alphabets

\dot{d}_e : evaporation energy source
 \dot{d}_m : evaporation mass source
 F_j : mass fraction of j-th flame group
 h_s : sensible enthalpy
 N : scalar dissipation rate
 N_F : total number of flame structures
 $P(\eta)$: PDF for mixture fraction
 \dot{s}_ξ : evaporation mixture fraction source

Greek letters

ξ : mixture fraction
 η : sampling variable for ξ

ξ_{MR} : most reactive mixture fraction

Superscript

g : gas state
 k : related to k-th droplet
 s : liquid state

Subscript

j : related to j-th flame group

Overbar symbols

\sim : Favre averaging
 $-$: Conventional averaging

Other special symbols

$\langle | \rangle$: conditional averaging

1. 서론

난류분무연소는 디젤엔진이나 터빈과 같은 실용연소기에서 흔히 볼 수 있는 연소 방식이다. 실용연소기에서 분무의 증발, 혼합, 연소와 같은 특성들은 연소기 성능에 큰 영향을 주는 요소이다. 난류분무연소에 대한 연구는 실험적, 수치적으로 널리 수행되어

왔으며 CFD를 이용한 실용연소기 연구를 위해 분무연소 모델의 개발 및 연구가 필수적이다[1-5].

직접수치해법(DNS)을 이용한 난류분무연소 모사는 실험을 통해서 얻기 어려운 통계수치들을 비롯해서 분무, 화염구조 등의 상세한 정보를 얻을 수 있는 장점이 있다. Réveillon과 Vervisch[2]는 조건평균된 증발률과 혼합분율 분산식의 closure를 위해 SDM(Single droplet model)을 제안하였다. Wang과 Rutland는 2차원 등방성 난류장[3]과 분무제트[4]의 자발화에 대한 연구에서 상세화학반응식을 적용하였다. 한편 Sreedhara와 Huh[5]는 1단계 화학반응식을 이용하여 2차원

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

** 포항공과대학교 기계공학과

† 연락저자, huh@postech.ac.kr

등방성 난류장에서의 분무 입자들의 증발, 연소 모사를 수행하였다. 이 연구를 통해 선형 모델을 이용한 조건증발률, β -PDF를 이용한 혼합분율 분포, AMC 모델[6]을 이용한 조건스칼라소산율 예측의 적합성을 검증하였다. Mastorakos 연구그룹은 통계적으로 1차원 분포된 비에혼합 기체연료의 자발화[7]와 분무의 증발, 자발화에 대한 연구[8]를 수행하였고, 이 연구들을 통해 most reactive mixture fraction 개념을 도입하였다. Seo와 Huh는 디젤엔진과 유사한 조건에서 통계적으로 1차원 분포된 분무[9]와 분무제트[10]에서 분무의 증발, 자발화 모사를 통해 분무연소 영역과 CMC 모델링을 위한 조건평균 통계에 대한 연구를 수행하였다.

CMC(Conditional Moment Closure)[11] 모델은 조건평균에 기초한 난류분무연소 모델로서 분사/증발된 연료를 Lagrangian 방식으로 추적하는 형태로 CFD에 적용되어 무차원[12], 3차원[13] 디젤 엔진 연소 모사에서 좋은 결과를 보여주었다. 복수화염구조를 이용한 Lagrangian CMC 모델은 Eulerian CMC 모델보다 계산부담은 적으면서 효과적으로 연소 현상을 모사할 수 있는 장점이 있다. 디젤 엔진의 연소 방식이 에혼합압축착화, 저온연소, 조기/지연연소 등으로 다양해지면서 연료 분사 전략도 다중분사, 장기간 분사 등으로 다양화되고 있다. CMC 모델에서는 다양화되는 분사 및 연소 전략에 대응해 모사 성능을 향상시키기 위해 복수화염구조를 도입하였다[13]. 복수화염구조는 분사된 연료를 N개의 그룹으로 나누고 각 화염그룹에서 독립적인 지배방정식을 이용해 각각의 화염구조를 계산하는 방식이다. 복수화염구조 이용은 단일화염구조 이용에 비해 계산 부담이 증가하는 단점이 있다. 계산 부담을 최소화하면서 모든 연소 조건에 대해 적용될 수 있는 일반적인 복수화염구조 이용 전략은 아직 확립되지 않았지만, 연료 분사 및 연소 특성에 따른 복수화염구조 이용전략 수립은 가능하다.

본 연구에서는 CMC 모델을 이용한 난류분무연소 모사에서 이용되는 복수화염구조의 필요성을 확인하기 위해 3차원 DNS를 이용해 난류분무제트 연소를 모사하였다. 모사조건으로 디젤엔진 연소 조건을 기초로 한 이전의 연구[10]와 같은 조건을 이용하였다. 복수화염구조를 이용한 디젤 엔진 연소 모사에서 화염구조 수에 따라 결과에 차이를 보였으므로[13,14] DNS 결과를 바탕으로 화염구조 개수와 분류방법에 대한 분석을 수행하였다.

2. 수학적 보존식

본 연구에서 이용된 DNS에서는 압축성 유동에 대

한 질량, 운동량, 에너지, 스칼라에 대한 보존식을 통해 기체상태의 난류, 연소를 모사한다. 이 중 질량, 에너지, 질량분율의 보존식은 다음과 같다[15].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = \dot{d}_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot (\rho v h_s) = \nabla \cdot (\lambda \nabla h_s) + \rho \dot{w}_c + \dot{d}_e \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \xi) + \nabla \cdot (\rho v \xi) = \nabla \cdot (\rho D \nabla \xi) + \rho \dot{s}_\xi \quad (3)$$

위 식에서 ρ , h_s , ξ 는 각각 기체의 밀도, 엔탈피, 질량분율을 나타내고, v 는 기체의 속도를 나타낸다. λ 와 D 는 각각 열전도율과 확산율을 나타낸다. D 는 모든 화학종에 대해 같은 값을 가진다고 가정된다. \dot{d}_m , \dot{d}_e , \dot{s}_ξ 는 분무의 증발로 인한 생성항으로서 다음과 같이 계산되어진다[9].

$$\dot{d}_m = \rho_d \dot{s}_\xi = -\rho_d \frac{\pi}{4V} \sum_k \theta^k \frac{t_v^k}{t_T^k} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{d}_e = & -\rho_d \frac{\pi}{4V} \sum_k \theta^k \\ & \times \left[\frac{2}{3} c_p^s \left(\frac{T(X_d^k, t) - T_d^k - B^k L_v / c_p^g}{t_T^k} \right) - \left(\frac{c_p^s T_d^k - L_v}{t_v^k} \right) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

ρ_d 는 액체 연료분무의 밀도, L_v 는 증발잠열을 나타낸다. c_p^s 와 c_p^g 는 각각 액체와 기체의 정압비열을 나타낸다. θ^k , T_d^k 는 각각 k번째 분무의 지름과 온도를 의미한다. V 와 $T(X_d^k, t)$ 는 k번째 분무가 속한 계산격자의 부피와 온도를 의미한다. t_v^k 와 t_T^k 는 분무 질량과 열전달에 대한 특성 시간, B^k 는 mass transfer number를 의미한다[9].

난류로 인한 영향을 나타내는 스칼라소산율은 $N = D(\nabla \xi)^2$ 로 계산된다. 혼합분율에 대해 조건평균된 스칼라소산율에 대한 AMC 모델[6]은 혼합분율의 최대값으로 scaling되어 다음과 같이 계산된다.

$$\langle N | \eta \rangle = \frac{\bar{N} \exp \left[-2 \left(\text{erf}^{-1} \left(2\eta / \widetilde{\xi}_{\max} - 1 \right) \right)^2 \right]}{\int_0^1 \exp \left[-2 \left(\text{erf}^{-1} \left(2\eta / \widetilde{\xi}_{\max} - 1 \right) \right)^2 \right] \tilde{P}(\eta) d\eta} \quad (6)$$

$\widetilde{\xi}_{\max}$ 는 계산 도메인 내 혼합분율의 최대값, \bar{N} 은 밀

도가중평균된 스칼라소산율을 의미한다. $\tilde{F}(\eta)$ 는 밀도가중평균된 혼합분율의 확률분포함수를 나타낸다.

본 연구에서는 연료가 증발되는 순서에 따라 복수 화염구조를 정의하였다. j번째 화염그룹에 대한 전달식은 다음과 같으며, 각 화염구조는 서로 독립적이다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{F}_j) + \nabla \cdot (\rho v\tilde{F}_j) = \nabla \cdot (\rho D\nabla\tilde{F}_j) + \rho s_{F_j} \quad (7)$$

\tilde{F}_j 와 s_{F_j} 는 각각 j번째 화염그룹의 질량분율과 분무 증발로 인한 생성율을 의미한다. 특정 위치에서 j번째 화염그룹이 존재할 확률은 각 화염그룹의 질량의 비로서 $I_j = \tilde{F}_j / \sum_j \tilde{F}_j$ 와 같이 정의한다. N_F 는 화염그룹의 총개수를 의미한다.

j번째 화염그룹에 대한 AMC 모델은 식 (6)으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\langle N|\eta \rangle_j = \frac{\tilde{N}_j \exp[-2(\text{erf}^{-1}(2\eta/\xi_{\max} - 1))^2]}{\int_0^1 \exp[-2(\text{erf}^{-1}(2\eta/\xi_{\max} - 1))^2] \tilde{P}_j(\eta) d\eta} \quad (8)$$

\tilde{N}_j 와 $\tilde{P}_j(\eta)$ 는 각각 j번째 화염그룹의 스칼라소산율과 혼합분율의 확률분포함수를 나타낸다.

3. 모사 조건

디젤 엔진의 조건을 참고하여 Table 1에 나온 것과 같이 분사횟수가 다른 두 가지 케이스에 대해 유한 차분 코드를 통한 DNS를 이용해 3차원 해석을 수행하였다.

해석 도메인과 경계조건은 Fig. 1에 간단히 나타나 있다. 두 케이스 모두 길이(L) 5 mm인 정육면체 도메인에서 각 방향으로 128개의 격자가 이용되었다. 도메인의 x방향 벽면에는 단열벽 경계조건, 나머지 방향 벽면에는 유출 경계조건이 이용되었다. 액체 상태의 연료 분무는 벽과의 불필요한 간섭을 줄이기 위해 왼쪽 벽면에서 L/10만큼 떨어진 y-z 평면의 중앙에서 분사된다. 연료 분사 속력은 20 m/s, 최대 분

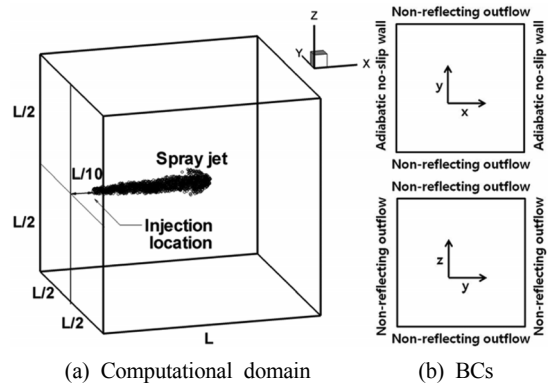


Fig. 1. Schematic diagram of computational domain and boundary conditions.

사각은 9°로 설정되었다. 분사되는 분무 액적들은 구형으로 가정되고 지름은 14 μm , 온도는 313 K로 일정하다. 본 해석에서 분무 액적은 점소스로 취급되어 계산되었다.

초기 해석 도메인은 두 케이스에서 동일한 등방성 난류장이 적용되었으며, 온도 1500 K, 압력 4 MPa인 공기로 구성되었다. 해당 조건은 실제 디젤 엔진의 분사, 점화시기에서의 조건을 참고하였으나 연소영역 종류를 결정하는 chemical time scale과 transport time scale의 비를 적절하게 구성하기 위해 실제보다 다소 높은 온도가 설정되었다. Chemical time scale과 transport time scale의 비에 의한 연소영역 정의에 의하면 두 케이스는 모두 그룹 연소 영역에 속한다[9].

초기 등방성 난류장에서 turbulent Reynolds number는 약 42, turbulent intensity는 약 1.1 m/s의 값을 가진다. Eddy turnover time은 약 0.053 ms이다. 본 해석에서는 직접수치해법에서의 해석상 제약으로 인해 디젤엔진에서의 난류[14]보다 훨씬 낮은 강도의 난류가 적용되었다. 도메인 길이(L)는 integral length scale (L_{11})에 비해 약 8.35배 크고, Kolmogorav length scale (η_K)은 격자 크기에 비해 약 1.08배 크게 설정되었다.

Table 1에 나타난 것과 같이 케이스1은 전통적 디젤엔진의 단일분사 조건이고, 케이스2는 다중분사 조건이 이용되었다. 두 케이스에서 연료의 총 분사량은 같지만 케이스2에서는 0.132 ms 동안 전체 연료의 10%를 분사한 뒤 0.232 ms가 지나고 다시 1.188 ms 동안 남은 90%의 연료를 분사한다. 케이스2의 첫 번째 분사는 디젤엔진의 파일럿 분사로 생각할 수 있다.

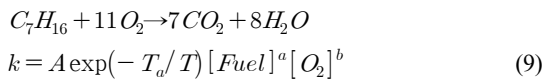
Table 1. Specifications of test cases

Case No.	초기온도[K]	초기압력[MPa]	분무지름[μm]	분무분사속력[m/s]	분사횟수	분사기간[ms]	총분무 개수
1	1500	4	14	20	1	1.32	7896
2	1500	4	14	20	2	1차-0.132 2차-1.188	1차- 718 2차-7178

모든 기체 화학종은 이상기체로 가정되며, 정압, 정적 비열의 비는 1.4이다. 점도는 온도에 대한 지수법칙에 의해 계산된다. Lewis수(Le)는 1.0, Prandtl수(Pr)는 0.7로 가정되었다.

연료 액적의 증발은 연료 액적과 주변 공기 간의 경계면을 상평형상태로 가정하여 Clausius-Clapeyron 관계식에 의해 모사된다[15].

본 연구에서는 연료인 n-heptane의 연소반응을 모사하기 위해 1단계 화학반응식을 이용하였다. N-heptane의 1단계 화학반응식과 Arrhenius 형태의 반응률(k)은 다음과 같다.



A는 pre-exponential factor로서 $5.1 \times 10^{11} \text{ cm}^3/\text{mol}\cdot\text{sec}$, T_a 는 활성화온도로 15,100 K이다. 연료와 산소 몰농도에 대한 계수 a, b는 모두 1로 설정되었다[16]. 해석 온도, 압력 조건에서 n-heptane 1단계 화학반응식에 의한 most reactive mixture fraction(ξ_{MR})[7]은 두 케이스 모두 0.09로 stoichiometric 혼합분을 0.062보다 큰 값을 가진다.

본 연구에 이용된 유한 차분 코드는 시간 및 공간 적분을 위해 각각 low storage 4차 Runge-Kutta 방식 [17]과 6차 compact finite difference scheme[18]을 이용하였다. 경계조건으로 단일벽 경계조건과 유출 경계조건을 이용하기 위해 향상된 NSCBC[19]와 edge, corner 처리기법[20]이 적용되었다.

본 논문에서 사용된 케이스에 대한 추가적인 정보나 연소 영역에 대한 내용은 이전 연구[10]에서 찾아볼 수 있다.

본 연구에서는 난류분무연소에서 조건평균된 통계를 연료의 증발순서에 따라 분류하여 처리하기 위

해 복수화염구조를 이용하였다. 화염구조는 각 화염 그룹별로 포함될 질량을 결정한 뒤, 연료분무가 증발되는 순서에 따라 순차적으로 화염그룹에 포함되도록 정의하였다. 화염그룹의 개수에 따른 차이를 알아보기 위해, 케이스1에서는 화염그룹으로 1개, 3개, 10개, 케이스2의 화염그룹으로는 1개, 4개가 이용되었다. 화염그룹이 1개일 때는 하나의 화염구조가 모든 연료를 대표하고, 10개일 때는 각 화염그룹이 증발되는 순서대로 총연료의 10%씩을 대표한다. 케이스1이 3개의 화염그룹으로 구성될 때 화염그룹별 질량비는 3:3:4이고, 케이스2가 4개의 화염그룹으로 구성될 때는 화염그룹별 질량비로 1:3:3:3와 2:2:3:3 두 종류가 이용되었다. 즉, 케이스1에서 화염그룹이 3개이면 증발되는 연료 중 총연료 질량의 초기 30%까지는 첫 번째, 30~60%까지는 두 번째, 60% 이후부터는 세 번째 화염그룹에 포함된다. 본 연구에서 화염 그룹의 개수와 그룹별 질량비는 해당 조건에 따른 결과 차이를 보기 위해 임의로 결정되었다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 2는 x-z평면의 $y=L/2$ 인 영역에서 각 케이스의 분무 및 온도분포를 통해 화염발달과정을 시간에 따라 나타낸다. 단일분사 조건인 케이스1은 분무의 증발잠열로 인해 분무 제트 영역의 온도가 감소한다. 분무 제트 영역에서의 낮은 온도와 높은 스칼라소산율에 의해 Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯이 제트 영역의 경계로부터 연소가 시작된다. 시간이 지나면 연료분사가 종료되고, 제트 반대편 벽에 부딪힌 연료-공기 혼합기는 벽면을 따라 확산되며 연소된다.

다중분사 조건인 케이스2의 파일럿 분사되는 연료는 케이스1의 주분사량의 10% 정도이므로 파일럿 분사에 의한 분무 제트 영역의 온도 감소량과 스칼라소

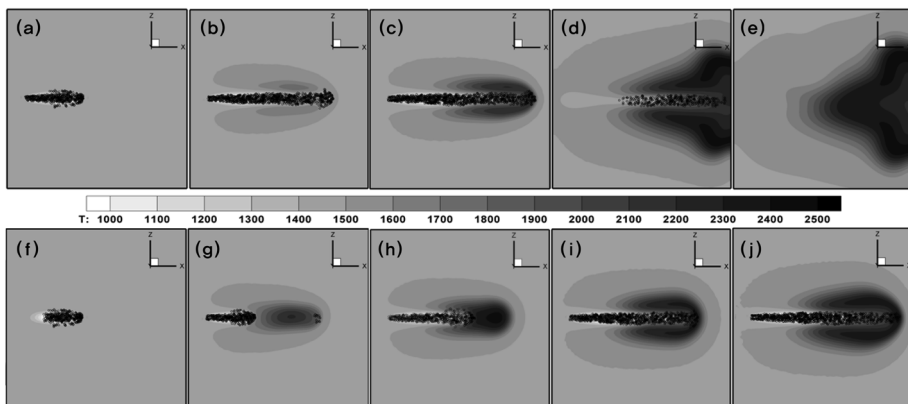


Fig. 2. Distributions of temperature and spray droplets: (a ~ e) for Case1 at 0.17 ms, 0.50 ms, 0.66 ms, 1.52 ms, 1.79 ms; (f ~ j) for Case2 at 0.17 ms, 0.50 ms, 0.64 ms, 0.86 ms, 1.05 ms.

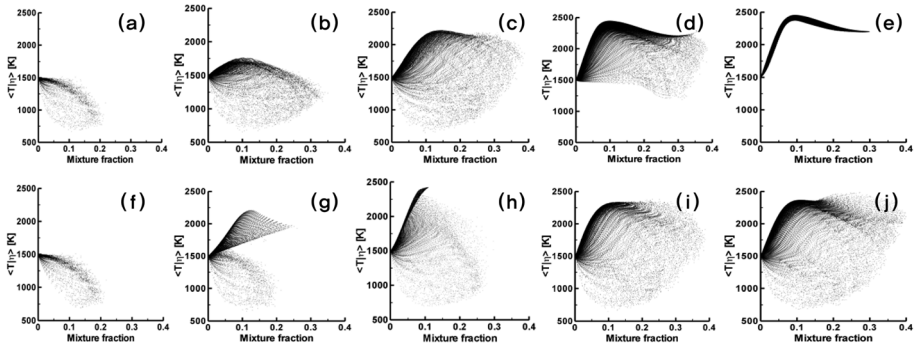


Fig. 3. Scatter plots of conditional temperature: (a ~ e) for Case1 at 0.17 ms, 0.66 ms, 1.52 ms, 1.79 ms; (f ~ j) for Case2 at 0.17 ms, 0.50 ms, 0.64 ms, 0.86 ms, 1.05 ms.

산율이 케이스1에 비해 작다. 이로 인해 Fig. 2(g)에서 볼 수 있듯이 1차 분사된 연료는 ξ_{MR} 에 가까운 제트 중심 영역에서 연소된다. 파일럿 분사된 연료가 연소되는 동안 두 번째 연료분사가 시작된다. Fig. 2(h)와 같이 주분사된 분무 입자는 파일럿 분사된 연료의 연소영역에 도달하여 증발 및 연소가 촉진된다. 연소가 충분히 진행되면 두 케이스에서의 화염 최종발달 형태는 유사해지지만, 화염발달과정은 분사전략에 따른 차이를 보인다.

Fig. 3은 케이스 별로 Fig. 2와 동일한 시점에서 도메인 전체의 혼합분율에 대한 국소 온도 분포를 나타낸다. Fig. 3(a), (f)에서 볼 수 있듯이 분사 초기에는 증발잠열로 인해 혼합분율이 커질수록 온도가 낮아지지만 연소가 시작되면 ξ_{MR} 근처에서 온도가 증가한다. 연료 증발과 연소의 발생 위치가 일치하지 않기 때문에 동일한 혼합분율에서도 국소 온도분포의 분산이 큰 편이다. 연료 분사가 끝나고 분무 증발량이 감소하면 Fig. 3(d), (e)와 같이 혼합분율에 대한 온도분포가 점차 최종 연소온도로 수렴하는 경향을 나타낸다.

케이스2는 분사 초기에는 Fig. 3(g), (h)에서 확인할 수 있듯이 분사별 증발, 점화 시기의 차이로 인해 케이스1과 온도분포 경향에서 차이를 보인다. 파일럿 연소영역으로 주분사된 연료가 진입한 후에는 해당 연료의 증발 및 연소가 촉진되어 Fig. 3(i), (j)와 같이 케이스1과 유사한 형태의 온도분포를 보이며 연소가 진행된다.

Fig. 4는 케이스1의 화염그룹별로 혼합분율에 대한 조건평균온도를 나타낸다. Fig. 4(a), (b)는 총 화염그룹이 3개일 때, Fig. 4(c), (d)는 총 화염그룹이 10개일 때이고, 화염그룹이 1개일 때의 도메인 전체 조건평균온도는 모든 그림에서 실선으로 나타내었다. 화염그룹을 나누는 기준에 의하면 Fig. 4(c)의 1~3번째 화염구조($\langle T_{\eta_1} \rangle, \langle T_{\eta_2} \rangle, \langle T_{\eta_3} \rangle$)는 Fig. 4(a)의 첫 번째 화염구조($\langle T_{\eta_1} \rangle$)와 같은 연료를 대상으로 화염그룹

을 세분화한 것임에도 불구하고 각각의 화염구조는 다른 값을 가진다. 예를 들어 ξ_{MR} 에서 Fig. 4(a)의 첫 번째 화염구조는 1908 K, Fig. 4(c)의 1~3번째 화염구조는 각각 1965 K, 1959 K, 1788 K의 값을 가진다. 화염그룹 개수에 따라 같은 연료에 대해 각 화염그룹 간의 온도편차가 57~120 K만큼 발생하고 있는데, 이는 Fig. 3(c)에서 볼 수 있듯이 증발/연소에 의해 편차가 큰 국소온도 분포가 충분하지 못한 수의 화염그룹으로 묶이고 평균되어 먼저 증발, 점화되는 연료의 온도는 실제보다 낮게, 나중에 점화되는 연료의 온도는 실제보다 높게 예측한 것이다. 즉, 화염그룹을 충분히 세분화하지 않으면 연소과정을 제대로 모사, 재현하는데 한계가 있다. 이러한 이유로 CMC 모델을 이용한 디젤엔진 연소 모사에서 화염그룹 개수에 따라 압력 결과의 차이를 보였다[13,14]. Fig. 4(b), (d)에서도 마찬가지로 경향을 확인할 수 있다.

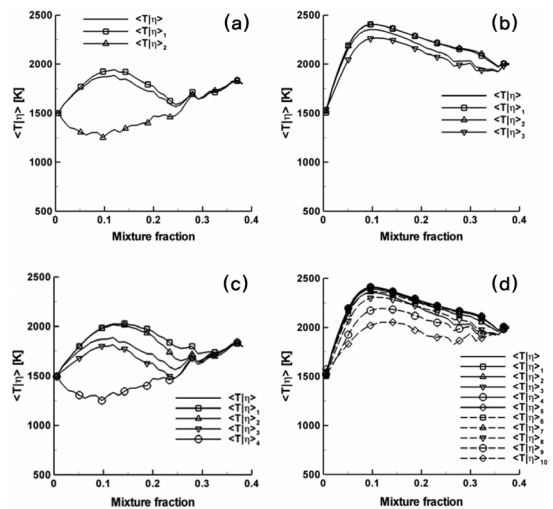


Fig. 4. Mean conditional temperature for Case1: (a) for $N_F = 3$ at 0.66 ms; (b) for $N_F = 3$ at 1.52 ms; (c) for $N_F = 10$ at 0.66 ms; (d) for $N_F = 10$ at 1.52 ms.

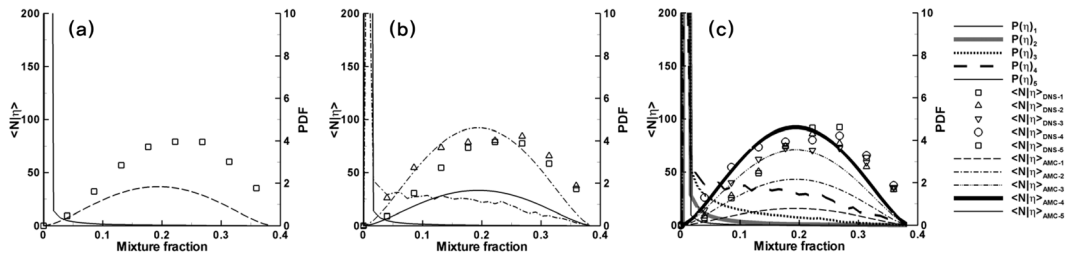


Fig. 5. PDFs and conditional scalar dissipation rates from DNS and AMC model for Case1 at 0.66 ms; (a) for $N_F = 1$; (b) for $N_F = 3$; (c) for $N_F = 10$.

Fig. 5는 케이스1의 화염그룹 개수에 따른 조건평균된 스칼라 소산율을 보여준다. 난류가 화염구조에 영향을 주는 정도를 나타내는 스칼라소산율의 정확한 예측은 보다 나은 연소 해석결과를 위해서는 필수적이다. Fig. 5의 시점은 Fig. 2(c), Fig. 3(c)과 동일한 시점으로 증발/연소가 동시에 활발히 진행되는 시기이다. Fig. 5에서 의미 있는 확률을 갖는 혼합분율 구간에서는 DNS 결과와 AMC 모델이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 앞서 조건 온도와 마찬가지로 Fig. 5를 통해 화염그룹 개수를 증가시키면 증발되는 순서에 따른 연료들의 화염구조를 보다 더 정확히 재현할 수 있음을 알 수 있다. 화염그룹이 충분하지 못하면 먼저 증발된 연료의 스칼라소산율은 상대적으로 크게, 나중에 증발된 연료의 값은 작게 계산되어, 결과적으로는 연소 예측의 정확도에 부정적 영향을 끼친다.

Fig. 5에서 혼합분율의 확률분포함수는 나중에 생성된 화염그룹일수록 농후한 영역에서 큰 값을 가지는 경향을 보인다. 이는 나중에 생성된 화염그룹은 이전에 생성된 화염그룹이 이미 존재하는 위치에서 생성, 분포할 확률이 높으므로 아주 희박한 영역에서의 존재확률은 상대적으로 감소하고 농후한 영역에서의 존재확률은 상대적으로 증가하기 때문이다.

앞에서 살펴본 바와 같이 연소 과정을 보다 정확히 모사하기 위해서는 충분한 수의 화염그룹이 필요한데, 화염그룹을 분류하는 방법 또한 중요한 요인이 된다. Fig. 6은 다중분사 조건인 케이스2의 화염그룹 별 조건평균온도 분포로서 Fig. 3(i)와 동일한 시점이다. 모사 조건에서 언급한 바와 같이 연료가 증발되는 순서에 따라 Fig. 6(a)는 화염그룹 간 연료질량비를 1 : 3 : 3 : 3, Fig. 6(b)는 2 : 2 : 3 : 3으로 설정하였다. 실선은 화염그룹이 하나일 때의 조건평균온도를 나타내므로, Fig. 6(a), (b)에서 모두 같다.

케이스2에서는 파일럿 분사되는 연료량이 전체의 10%이므로 연료질량비가 1 : 3 : 3 : 3인 경우의 첫 번째 화염그룹은 주로 파일럿 분사된 연료를 포함한다. 반면 연료질량비가 2 : 2 : 3 : 3인 경우에는 첫 번째 화염그룹이 파일럿 연료와 초기에 증발되는 주연료를 비슷한 비율로 포함한다. Fig. 6에 나타난 것과 같

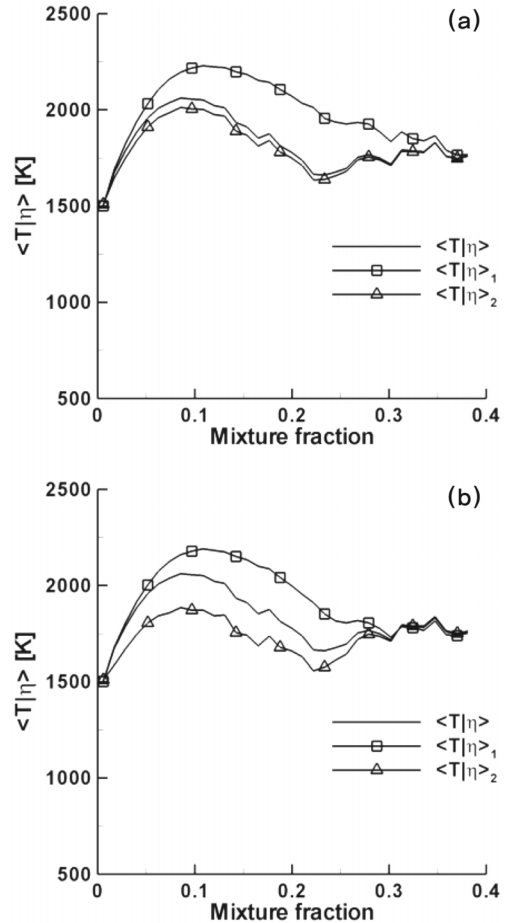


Fig. 6. Mean conditional temperatures for Case2 with $N_F = 4$ at 0.86 ms; (a) mass ratio between flame groups is 1 : 3 : 3 : 3; (b) mass ratio between flame groups is 2 : 2 : 3 : 3.

이 화염그룹 간 질량비가 다르면 화염구조가 다르게 나타난다. 파일럿 분사된 연료의 비중이 높은 Fig. 6(a)의 첫 번째 화염그룹이 주분사된 연료의 비중이 상대적으로 더 높은 Fig. 6(b)의 첫 번째 화염그룹에 비해 높은 온도를 갖는다. 이는 Fig. 6보다 이른 시점인 Fig. 3(h)에서 확인할 수 있듯이 파일럿 분사된 연료의

대부분은 이미 최종 연소 온도로 수렴한 단계이고, 주분사된 연료는 초기단계 연소가 진행 중으로 조건온도의 편차가 큰 편이기 때문이다. 즉, 파일럿 분사된 연료와 주분사된 연료의 특성이 다른 상황이다. 따라서 케이스2에서는 화염그룹 간 연료질량비를 2 : 2 : 3 : 3으로 설정하는 것보다는 1 : 3 : 3 : 3으로 하여 파일럿 분사되는 연료를 독립적인 화염그룹으로 설정하는 편이 특성이 유사한 연료들을 각각의 화염구조로 대표할 수 있다. 마찬가지로 Fig. 6의 다른 화염구조들도 같은 경향을 보인다. 정의되는 화염구조의 개수만이 아니라 화염그룹을 분류하는 정의방식에 따라서도 화염구조가 달라지기 때문에 분사, 연소 상황에 따라 화염그룹을 적절히 정의, 분류하는 것이 필요하다.

5. 결론

난류분무연소 CMC 모델에서 복수화염구조의 필요성을 확인하기 위해 난류분무제트 연소 3차원 DNS 연구가 수행되었다. N-heptane 분무제트를 포함한 모사 조건은 일반 디젤엔진 조건을 고려하여 설정되었고, 단일분사와 다중분사 케이스를 포함하였다. Chemical time scale과 transport time scale의 비에 의해 그룹 연소 영역으로 분류된다. DNS 결과로부터 연료 증발 순서에 따라 Lagrangian 화염그룹 별로 조건평균된 통계수치를 도출하였다.

복수화염구조는 증발 시점이 다른 연료들의 증발, 혼합, 점화, 연소 등의 현상 모사에 도움을 준다. 특히 연료 분사시간이 길거나 다중분사의 경우, 연료의 분사, 증발이 끝나기 전에 점화/연소가 발생하는 조건에서 복수화염구조가 필요하다.

AMC 모델을 이용한 조건 스칼라소산율 예측은 의미있는 확률을 가지는 혼합분율 영역에서 DNS 결과와 잘 일치하는 경향을 보였다. 화염그룹 수를 증가시켜 각 그룹 내의 화염구조 편차가 줄어들면 증발순서에 따른 연료의 스칼라소산율을 보다 더 정확히 예측할 수 있다.

일반적으로 화염그룹 개수가 증가할수록 각 화염그룹에 포함되는 연료의 증발시기 차이가 감소하여 화염그룹 별로 유사한 성격의 연료를 포함하므로 연소 모사에서 더 나은 결과를 얻을 수 있다. 화염그룹 개수만이 아니라 화염그룹을 분류하는 방법도 모사 결과나 결과 분석에 영향을 준다. 화염그룹 수가 같더라도 화염그룹의 정의방식에 따라 각 그룹의 특성이 달라질 수 있기 때문에 분사, 증발, 연소 상황에 따라 적절한 방식으로 화염그룹을 구분해야 한다.

CMC 모델을 이용한 디젤엔진연소 모사에서 복수

화염구조가 이미 적용되고 있지만 모사 결과의 개선과 다양한 분사/연소 전략에 대해 신뢰도 높은 결과를 얻기 위해서는 적절한 화염구조의 개수와 정의 방식에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] A.R. Masri, J.D. Gounder, Springer Netherlands, 2011, 41-68.
- [2] J. Réveillon, L. Vervisch, *Combust. Flame* 121, 2000, pp. 75-90.
- [3] Y. Wang, C.J. Rutland, *Proc. Combust. Inst.* 30, 2005, pp. 893-900.
- [4] Y. Wang, C.J. Rutland, *Combust. Flame* 149, 2007, pp. 353-365.
- [5] S. Sreedhara, K.Y. Huh, *Proc. Combust. Inst.* 31, 2007, pp. 2335-2342.
- [6] E.E. O'Brien, T.-L. Jiang, *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 3, 1991, pp. 3121-3123.
- [7] E. Mastorakos, T.A. Baritaud, T.J. Poinso, *Combust. Flame* 109, 1997, pp. 198-223.
- [8] P. Schroll, A.P. Wandel, R.S. Cant, E. Mastorakos, *Proc. Combust. Inst.* 32, 2009, pp. 2275-2282.
- [9] J. Seo, K.Y. Huh, *Proc. Combust. Inst.* 33, 2011, pp. 2127-2134.
- [10] J. Seo, K.Y. Huh, *Proc. Combust. Inst.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2012.05.057>.
- [11] A.Y. Klimenko, R.W. Bilger, *Prog. Energy Combust. Sci.* 25, 1999, pp. 595-687.
- [12] J. Kwon, J. Seo, D. Lee, K.Y. Huh, *SAE 2011 World Congress & Exhibition*, 2011, pp. 964-975.
- [13] I.S. Han, K.Y. Huh, *Int. J. Automot. Tech.* 6, 2005, pp. 571-577.
- [14] Y.J. Lee, K.Y. Huh, *Combust. Theory Model.* 16, 2012, pp. 13-30.
- [15] J. Réveillon, *Multiphase React. Flows: Model. Simul.* 492, 2007, pp. 229-269.
- [16] C.K. Westbrook, F.L. Dryer, *Combust. Sci. Technol.* 27 (1981), pp. 31-43.
- [17] C.A. Kennedy, M.H. Carpenter, R.M. Lewis, *Appl. Numer. Math.* 35, 2000, pp. 177-219.
- [18] S.K. Lele, *J. Comput. Phys.* 103, 1992, pp. 16-42.
- [19] C.S. Yoo, H.G. Im, *Combust. Theory Model.* 11, 2007, pp. 259-286.
- [20] G. Lodato, P. Domingo, L. Vervisch, *J. Comput. Phys.* 227, 2008, pp. 5105-5143.