

층류 대향류장에 형성된 분무화염의 2차원 비정상 모델링
-당량비 및 연료종에 관한 영향-

2-Dimensional Unsteady Modeling of Spray Flame Formed in a Laminar Counterflow Field
- Effects of Equivalence Ratio and Fuel -

황승민 † · 정진도* · 서병민* · 김영우**

Seung-Min Hwang † · Jin-Do Chung* · Byung-Min Seo* · Young-Woo Kim**

호서대학교 벤처전문대학원 보건환경학과 · *호서대학교 환경공학과 · **호서대학교 자동차공학과

Department of Health Environment, Graduate School of Venture, Hoseo University

*Department of Environmental Engineering, Hoseo University

**Department of Automotive Engineering, Hoseo University

(2008년 2월 5일 접수, 2009년 10월 5일 채택)

ABSTRACT : To evaluate characteristics in spray flame, laminar counterflow is investigated on the effects of equivalence ratio and fuel by a two-dimensional DNS (direct numerical simulation). For the gaseous phase, Eulerian mass, momentum, energy, and species conservation equations are solved. For the disperse phase, all individual droplets are calculated by the Lagrangian method without the parcel model. n-Decane (C₁₀H₂₂) and n-heptane (C₇H₁₆) is used as a liquid spray fuel, and a one-step global reaction is employed for the combustion reaction model. As equivalence ratio increases, the fuel ignites early and the high temperature region spreads wider. The peak value of temperature, however, tends to once increase and then decreases with increasing equivalence ratio. The decrease in the peak value of temperature for the higher equivalence ratio condition is caused by the cooling effect associated with droplet group combustion. Since the evaporation of n-heptane is early, the high temperature region spreads wider than n-decane, but the peak values of temperature for both n-heptane and n-decane is almost same.

Key words : Direct Numerical Simulation, Laminar Counterflow, Spray Flame, Mixture Fraction

요약 : 본 연구에서는 분무화염의 기초적인 물리현상을 해명하기 위하여 층류 대향류장에 형성된 분무 화염에 2차원 직접 수치계산(Direct numerical simulation, DNS)을 적용하여, 당량비 및 연료종이 분무화염 구조에 미치는 영향에 대하여 관찰하였다. 기상에 대해서는 질량 보존식, 운동량 보존식, 에너지 보존식을 오일러안(Eulerian) 법으로 계산하였으며, 액적에 대해서는 화염중의 모든 개개의 유적을 라그랑지안(Lagrangian) 법으로 추적하였다. 액체 연료로는 n-데칸(C₁₀H₂₂)과 n-헵탄(C₇H₁₆)을 이용하였으며, 연소반응 모델에는 총괄반응식을 이용하였다. 당량비가 증가함에 따라 착화속도가 빠르며, 고온영역도 넓게 분포하고 있다. 그러나, 최대 온도치는 당량비가 증가함에 따라 한번 증가한 후 감소하는 경향을 나타내고 있다. 당량비가 클수록 최대 온도가 감소하는 것은 분무화염 내부의 균연소 거동에 의한 냉각효과 때문이라고 생각된다. 또한, n-헵탄은 n-데칸과 비교하여 증발속도가 빠르기 때문에 넓은 고온 영역을 형성하지만 최대 온도는 거의 같은 값을 나타내었다.

주제어 : 직접 수치 계산, 층류 대향류, 분무 화염, 혼합 분율

1. 서론

액체연료의 한 연소형태로서 고부하 연소가 가능하며 연소 제어에 대한 응답성이 좋다는 이유로 공업적으로 분무 연소가 많이 이용되고 있으며, 그 용도로는 로켓트, 항공기, 선박, 자동차 등의 각종 엔진 및 가열로 등 다방면에 걸쳐있다. 따라서, 친환경적이며 고효율적인 연소를 실현하기 위해서는

연소 배기가스 중의 유해물질을 제거하는 후처리 기술의 개발뿐만 아니라, 연소과정 그 자체에 대한 제어가 필수불가결하며 앞으로도 보다 폭넓은 관점으로 이러한 문제를 인식하여야 한다.

분무연소는 액체연료를 무수히 많은 미세한 유적으로 미립화시켜 표면적을 크게함과 동시에 공기와의 혼합을 촉진시키는 연소방식이다. 그러나, 분무연소는 액체연료의 미립

† Corresponding author : E-mail : hwangsm@hoseo.edu Tel : 02-523-3015 Fax : 02-2055-1405

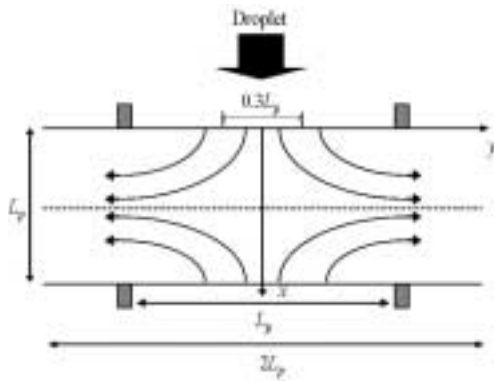


Fig. 1. Computational domain for the numerical simulation.

화, 액적의 기상에서의 분산, 증발 및 연료증기와 공기와의 혼합이라고 하는 많은 과정이 동시에 진행되면서 연소반응을 일으키기 때문에 그 화염구조는 매우 복잡하며, 이들 과정을 제어하는 기초적인 물리현상은 아직 불명확하다¹⁾. 또한, 효율적이고 친환경적인 연소기의 설계나 운전을 위해서는 분무연소 구조를 정확히 예측할 필요가 있다. 그동안 많은 연구자들¹⁻⁶⁾에 의해 분무화염은 단순히 단적연소의 집합체가 아닌, 분무의 불균일성에 의해 형성된 유적군의 시간적·공간적 변화에 크게 영향을 받으며 또한, 그 화염구조가 유입되어지는 유적량이나 분무특성에 크게 의존한다는 사실을 밝혔다. 그러나, 분무화염에 있어서 모든 물리량을 실험적으로 측정하는 것은 불가능하기 때문에 상세한 메커니즘은 아직 명백하게 밝혀지지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 분무화염의 기초적인 물리현상을 해명하기 위하여, 층류 2차원 대향류장에 형성된 분무화염의 비정상 거동에 관한 수치계산을 실시하였다.

저자들은 앞선 연구⁷⁾에서 층류 대향류장에 형성된 분무화염의 비정상 거동에 관하여 2차원 직접수치 계산(direct numerical simulation, DNS)을 실시하여 분무화염 내에는 확산화염과 예혼합 화염이 혼재하는 매우 복잡한 화염구조를 갖고 있으며 분무화염의 기상온도가 가스 확산화염의 온도보다 더 높은 이유는 이러한 예혼합 화염영역이 혼재하기 때문이라는 결과를 보고하였다. 본 연구에서는 당량비 및 연료종을 파라메타로 한 2차원 DNS를 실시하여 당량비 및 연료종이 분무화염 구조에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 기상에 대해서는 질량 보존식, 운동량 보존식, 에너지 보존식을 오일러안(Eulerian) 법으로 계산하였으며, 액적에 대해서는 화염종의 모든 유적을 라그랑지안(Lagrangian) 법으로 추적하는 Eulerian-Lagrangian 법을 이용하였다.

2. 계산 방법

Fig. 1에 본 연구에서 대상으로 한 유동장의 개략도를 나타내었다. 유동장은 평면 2차원으로 상측 포트출구의 중심을 x - y 좌표의 원점으로 하였다. x 좌표는 상측 포트로부터 연직하향, y 좌표는 x 축에 직교하는 방향으로 설정하였다.

연료는 n -데칸($C_{10}H_{22}$)을 기준으로 하였으며 연료종의 영향을 고찰하기 위하여 n -헵탄(C_7H_{16})의 계산을 실행하였다. 고려한 화학종은 O_2 , N_2 , CO_2 , H_2O , $C_{10}H_{22}$ 의 5가지이며, 기상화학종의 열역학 데이터와 유송계수는 CHEMKIN^{8,9)}에 의해 구하였다. 액상 n -데칸 및 n -헵탄의 물성치는 온도 의존성을 고려하여 밀도는 Gunn-Yamada식, 열전도율은 Sato-Riedel식, 정압비열은 Sterning-Brown식에 의한 추산치를 사용하였다¹⁰⁾.

고려한 지배 방정식은 (1)질량 보존식, (2)운동량 보존식, (3)에너지 보존식, (4)화학종 보존식 및 (5)혼합분율 보존식이다.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(p u_j) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial (p u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(p u_i u_j + P \delta_{ij} - \sigma_{ij}) - p g_i = S_{u_i} \quad (2a)$$

$$\sigma_{ij} = 2 \mu \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \quad (2b)$$

$$\frac{\partial (p h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(p u_j h - p \lambda \frac{\partial h}{\partial x_j} + \sum_{k=1}^n h_k (p \lambda - p D_k) \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \right) = S_h \quad (3)$$

$$\frac{\partial (p Y_k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (p u_j Y_k + p D_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_j}) = S_{combu,k} + S_{Y_k} \quad (4)$$

$$\frac{\partial (p Z)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (p u_j Z + p D_Z \frac{\partial Z}{\partial x_j}) = S_Z \quad (5)$$

여기서, S_m , S_u , S_h , $S_{combu,k}$ 및 S_{Y_k} 는 유적과 기상의 상호 작용에 의한 생성항이다. 혼합분율 Z 는 다음 식으로 정의된다¹¹⁾.

$$Z = \frac{\Phi Y_F - Y_{O_2} + Y_{O_2, air}}{\Phi Y_{F, fuel} + Y_{O_2, air}} \quad (6)$$

이때, 혼합분율의 생성항 S_Z 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

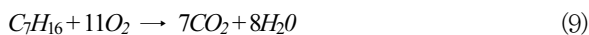
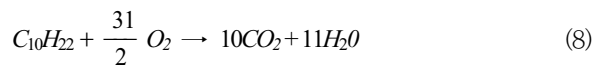
$$S_Z = \frac{\Phi}{\Phi + Y_{O_2, air}} \left(\frac{1}{\Delta V} \sum^N \frac{dm_d}{dt} \right) \quad (7)$$

여기서, $Y_{O_2, air}$ 는 공기 중 산소의 질량분율, ΔV 는 셀 체적, N 은 셀 중에 존재하는 유적의 수이다. 또, 혼합분율 Z 의 확산계수 D_Z 에는 혼합기의 확산계수를 이용하였다.

유적과 기상과의 열, 물질 및 운동량의 교환에는 PSI-Cell (Particle-Source-In Cell) 모델¹²⁾을 사용하였다. 단, 1타입 간격간의 유적과 기상과의 상호 간섭항은 유적이동 후의 위치로 고려하였다.

유적의 충돌, 분열은 없다고 가정하였으며, 기상 중의 유적의 거동은 입자의 질량, 속도 및 온도에 대한 방정식을 라그랑지안 법으로 해를 구하였다. 유적증발 모델에는 비평형 Langmuir-Knudsen 모델^{13,14)}을 이용하였다. 이상의 지배 방정식 및 계산 수법의 상세한 내용에 대해서는 Nakamura et al.의 문헌⁴⁾을 참고하길 바란다.

본 연구에서는 종류 대향류장에 형성된 분무화염의 구조를 2차원적으로 관찰하기 위하여, 연소반응에는 n-데칸과 n-헵탄의 총괄반응식¹⁵⁾을 이용하였다.



이 총괄반응의 반응 속도는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\frac{m_F}{W_F} = AT^n \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \left(\frac{pY_F}{W_F}\right)^a \left(\frac{pY_o}{W_o}\right)^b \quad (10)$$

여기서, \bar{m}_F 는 연료의 반응속도, W_F 와 W_o 는 연료 및 산화제의 분자량이다. 빈도인자 A, 활성화 에너지 E, 반응 차수 n, a, b 는 각각 $A=3.810^{11}$, $E=1.25610^5 J/mol$, $n=0$, $a=0.25$,

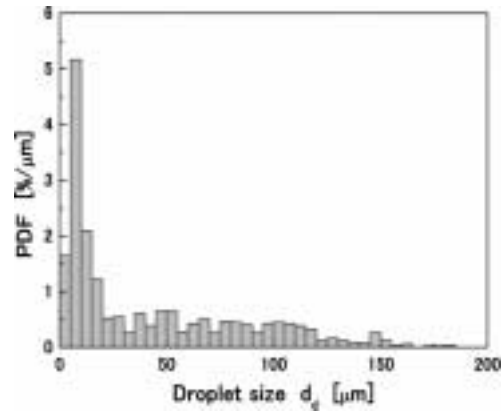


Fig. 2. Droplet size distribution.

$b=1.5$ 로 하였다¹⁴⁾.

상하 양측 포트의 $-0.5L_p \leq y \leq 0.5L_p$ 영역으로 부터는 상온 상압의 공기(300K, 0.1013MPa, 산소 질량분율=0.2375)를 유입하였으며, 분무는 상측 포트의 $-0.15L_p \leq y \leq 0.15L_p$ 영역으로부터 공급하였다. 분무의 입경은 PDA(phase Doppler anemometer) 계측에 의해 얻어진 SMD(Sauter mean diameter)=106.7 μm 를 갖는 입경분포를 이용하였으며 Fig. 2에 나타내었다. 신장율은 어느 조건에 있어서도 상하 양측 포트로부터 공급되는 기체 유속을 0.4 m/s(신장율 $a=0.4s^{-1}$)로 일정하게 하였다. 분무 공급 당량비 ϕ 는 상측포트로부터 공급되는 공기량과 분무 공급량에 의해 계산하였으며, 공급 당량비가 분무화염 구조에 미치는 영향에 대해 알아보기 위하여 분무 공급 당량비를 $\phi=0.42, 0.84, 1.26, 5.00$ 의 4조건으로 설정하였다. 또한, 연료종의 영향을 고찰하기 위하여 n-헵탄(C_7H_{16})에 대하여 신장율 $a=0.4s^{-1}$, 분무입경 SMD= 106.7 μm 및 공급 당량비 $\phi=1.26$ 의 조건에서 계산을 수행하여 n-데칸($C_{10}H_{22}$)의 분무화염 거동 결과와 비교하였다. 또한, 유적은 동일한 위치에서 공급하였으며, 그 속도는 기상의 유입속도와 같다고 가정하였다. 본 연구의 계산조건을

Table 1. Computational conditions.

	Case	Strain rate a [s ⁻¹]	Equivalence ratio ϕ [-]	Sauter mean diameter SMD [μm]
General feature	D1	40	1.26	106.7
Effect of equivalence ratio	DE1	40	0.42	106.7
	DE2		0.84	
	DE3		1.26	
	DE4		5.00	
Effect of fuel	H1	40	1.26	106.7

* Cases DE3 is the same case as case D1.

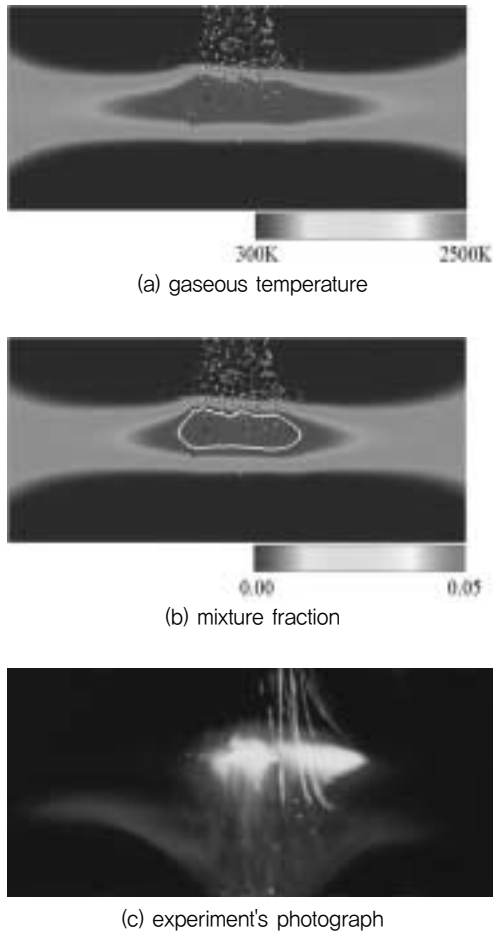


Fig. 3. Instantaneous distributions of (a) gaseous temperature, T , (b) mixture fraction, Z , and (c) experiment's photograph for case D1.

Table 1에 정리하였다.

계산영역은 세로20×가로40의 영역을 200×400의 등간격 격자 (검사체적의 실제크기 100 mm×100 mm)로 분할하였다. 지배 방정식의 해법에는 유한 체적법에 근거한 SIMPLE 법¹⁶⁾을 채용하였다. 이산법의 공간차분에는 4차 중심 차분을, 시간차분에는 완전 음해법을 이용하였다. 유적에 관한 시간차분은 2차 Adams-Bashforth법을 이용하여 계산하였다. 또한, 분무의 착화 후에 하측 포트로부터 공급되는 예혼합 가스의 공급을 정지시켜, 분무화염의 상태에서 300 ms (0.1 ms×3000 time step)까지 계산을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 일반적 특성

Fig. 3은 D1 ($a=0.4 \text{ s}^{-1}$, $\phi=1.26$, $SMD=106.7 \mu\text{m}$) 조건

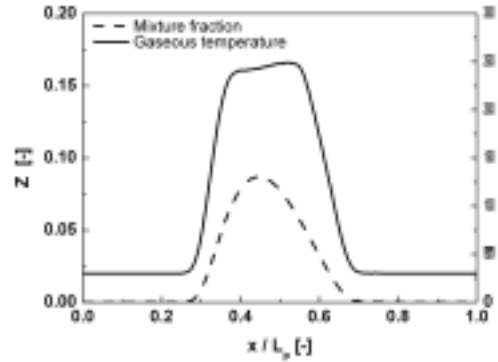


Fig. 4. Time-averaged distributions of gaseous temperature and mixture fraction for case D1.

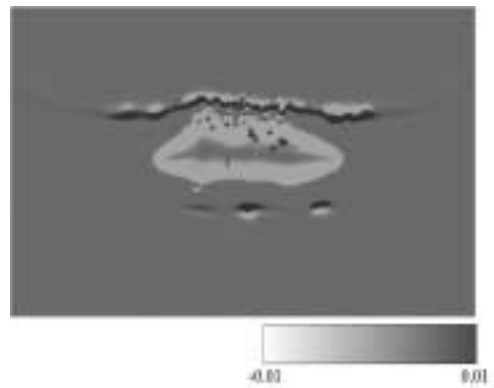


Fig. 5. Instantaneous distribution of flame index, F.I., for case D1.

에 있어서 분무화염의 기상온도 T 와 혼합분율 Z 의 계산결과 및 실험에서 촬영한 분무화염의 사진을 나타낸 것이다. 또한, 혼합분율 분포 내에는 양론 혼합분율 ($Z=0.062$)을 백선으로 나타내었다. 상측 포트로부터 유입된 유적입자는 온도의 상승과 함께 증발량이 증가하기 때문에 고온 영역 내에서는 유적의 수가 크게 감소한다. 또한, 유적 증발과 함께 혼합분율이 생성되기 때문에, 온도와 혼합분율은 유사한 분포 형상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한, 이러한 경향은 실험에서 관찰되어진 분무화염의 거동과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 D1의 분무화염 x 축상의 온도 T 및 혼합분율 Z 의 분포를 나타낸 것이다. 혼합분율은 유적의 증발에 의해 생성되기 때문에, $x/L_p=0.35\sim 0.55$ 부근에 존재하는 고온영역의 중심에서 최고치를 갖는다. 이 때문에, 온도는 혼합분율의 최고치의 양측 2곳에서 최고치를 갖게 되며, 이 범위 내에서의 온도는 약간 저하하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 Nakamura,⁴⁾와 Kurose,⁵⁾에 의해 상세히 밝혀진 분무화염의 균연소 거동 즉, 저산소 농도에 의한 완전한 연소와 증발

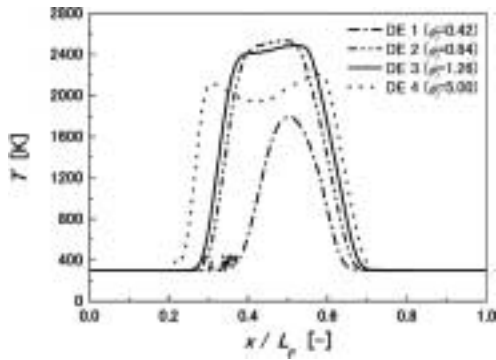


Fig. 6. Time-averaged distributions of gaseous temperature on x axis with various equivalence ratios.

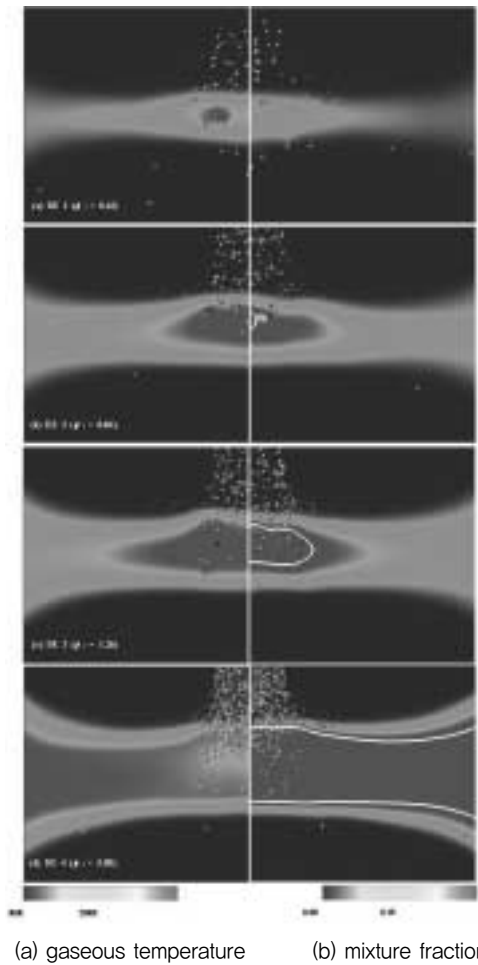


Fig. 7. Instantaneous distributions of (a) gaseous temperature, T , and (b) mixture fraction, Z , for various equivalence ratios.

잠열에 기인하는 냉각 효과(cooling effect) 때문이라고 생각된다.

이러한 분무화염 구조를 좀 더 상세히 알아보기 위하여 화염의 flame index(F.I.)에 대해 계산하였다. Fig. 5에 D1에

대한 flame index의 분포결과를 나타내었다. 여기서, flame index 는 다음 식으로 정의 된다¹⁷⁾.

$$F.I. = \nabla Y_{C_10H_2} \cdot \nabla Y_{O_2} \quad (11)$$

$F.I.$ 는 그 값이 정(+)이면 예혼합 화염, 부(-)이면 확산 화염을 의미한다. Fig. 5로부터 한눈에 알 수 있듯이 분무화염은 확산화염과 예혼합 화염이 혼재하는 구조를 갖고 있다. 유적은 상측 포트로부터 유입된 후 증발을 시작하지만, 이 증발에 의해 착화전에는 흐름 방향에 대하여 기상 데칸의 농도구배(+)와 산소의 농도구배(-)가 역전하기 때문에 먼저 확산적인 특징이 나타난다. 그 후, 착화와 함께 쌍방의 질량분을 구배는 부(-)로 바뀌며 예혼합적인 화염 구조를 나타낸다. 정체면 부근에는 냉각 효과가 발생하는 영역을 둘러싼 확산화염 대가 형성되며 확산화염 대의 내부에는 예혼합 화염이 점재하고 있다. 이처럼 분무화염은 확산화염과 예혼합 화염이 혼재하는 상당히 복잡한 화염 구조를 갖고 이 예혼합 화염의 존재가 분무화염의 기상온도를 상승시킨다고 생각된다.

3.2. 당량비의 영향

Fig. 6에 공급 당량비 ϕ_f 을 변화시켰을 때의 x축상의 분무화염 온도 T 의 분포를 나타내었다. 그림으로부터 ϕ_f 의 증가에 따라 연료의 착화위치는 상측 포트로 이동하며 고온영역도 넓어지고 있다. 화염온도의 최대치는 ϕ_f 가 가장 작은 DE1이 가장 낮고 DE2에서 가장 높은 값을 나타내고 있으며 DE3, DE4의 순으로 저하하고 있다. ϕ_f 가 큰 DE3과 DE4에서 최대온도가 저하하는 것은 증발잠열의 영향이며, 정체점 부근에서 T 가 극소치를 갖는 것은 Nakamura,⁴⁾와 Kurose,⁵⁾에 의해 밝혀진 분무화염 내부의 균연소 거동 즉, 저산소 농도에 의한 완전한 연소와 증발 잠열에 기인하는 냉각 효과라고 생각된다.

Fig. 7에 각 조건에 있어서 분무화염의 온도 T , 혼합분율 Z 및 유적 분포를 나타내었다. 또한, 혼합분율 분포 내에는 양론 혼합분율 ($Z=0.062$)을 백선으로 나타내었다. 연료 공급량이 적은 DE1에서는 고온영역이 좁기 때문에 하측 포트 근방까지 도달하는 유적이 많다. ϕ_f 가 증가함에 따라 증발량이 증가하여 고온영역이 넓어지며, ϕ_f 가 가장 큰 DE4에서는 상당히 넓은 범위에 고온영역이 분포하고 있지만 중심 부근에서는 온도가 저하하는 결과를 나타내고 있다. 이러한 결과는 앞서 고찰한 냉각효과에 의한 것이다. Z 의 분포를 보면 T 분포와 마찬가지로 ϕ_f 의 증가에 따라 Z 의 고온영역

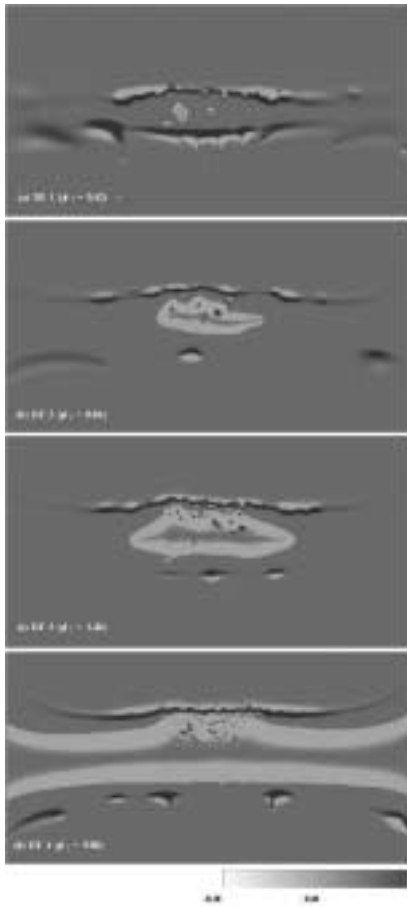


Fig. 8. Instantaneous distribution of flame index, F.I., for various equivalence ratios.

이 넓어지며 DE4에서는 Z_{st} 의 영역이 정체평면 전체를 덮고 있다.

Fig. 8에는 각 조건에 있어서 flame index의 분포를 나타내었다. DE1에서는 고온영역이 좁고 증발속도가 낮기 때문에 유적은 정체평면을 통과하여 하측 포트 근방에까지 도달한다. 이 때문에 정체평면 상측뿐만 아니라 하측에 있어서도 증발에 의한 기상 데칸의 농도증가와 산소농도의 감소에 따른 착화전의 확산적 특징과 착화후의 예혼합적 화염의 이층구조가 나타난다. ϕ_1 가 증가함에 따라 유적으로부터의 증발량이 증가하고 고온영역이 확대되기 때문에 정체평면 부근의 확산화염대가 성장한다.

3.3. 연료종의 영향

Fig. 9에 *n*-데칸(D1)과 *n*-헵탄(H1)의 *x*축상의 분무화염 온도 *T*의 분포를 나타내었다. *n*-헵탄이 *n*-데칸보다도 증발속도가 빠르기 때문에 H1은 D1보다도 상측 포트쪽에 착화위치가 존재한다. 그러나 최대온도는 양쪽 모두 거의 같은 값을 나타내고 있다.

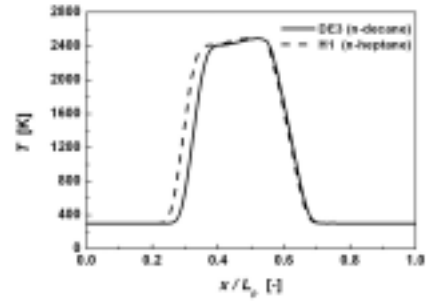


Fig. 9. Time-averaged distributions of gaseous temperature on *x* axis in decane and heptane spray flames.

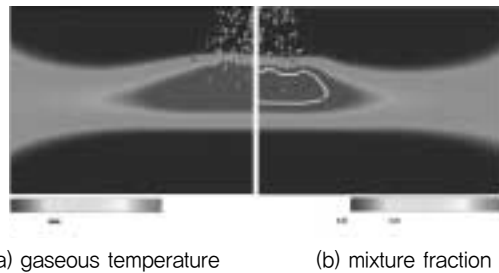


Fig. 10. Instantaneous distributions of (a) gaseous temperature, *T*, and (b) mixture fraction, *Z*, for case H1.

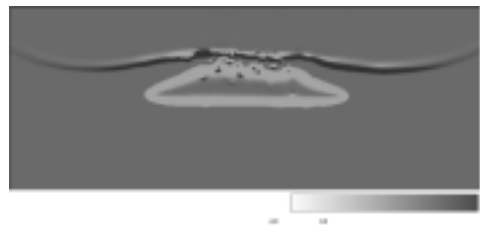


Fig. 11. Instantaneous distribution of flame index, F.I., for case H1.

Fig. 10에 H1의 온도 *T* 분포와 혼합분율 *Z* 분포 및 유적 분포를 나타내었다. 또한, 혼합분율 분포 내에는 *n*-데칸의 양론 혼합분율 ($Z=0.062$)을 백선으로 나타내었다. Fig. 3a의 D1결과와 비교해보면 Fig. 9에 나타난 것처럼 *n*-헵탄의 증발속도가 빠르기 때문에 H1이 더 넓은 고온영역을 형성한다. 또한, D1에서는 고온영역을 통과하는 입자가 존재하지만, H1에서는 거의 고온영역 내에 증발이 완료한다. *Z*의 분포도 *T*와 마찬가지로 높은 영역이 D1보다 넓게 분포하고 있다.

Fig. 11에 H1의 flame index 분포를 나타내었다. Fig. 5의 D1과 비교해보면 *n*-헵탄의 증발속도가 빠르기 때문에 연료 유적으로부터의 증발에 의한 기상연료 농도의 증가와 산소농도의 감소에 의한 확산적 특징을 나타내는 영역 및 착화후의 예혼합적 화염이 존재하는 영역이 넓은 범위에 존

재하고 있다. 또한, D1의 정체평면 부근의 확산화염대 하측에는 증발속도가 늦기 때문에 고온영역을 통과하는 입자의 증발에 따른 화염이 존재하지만, n-헵탄에는 존재하지 않는다.

4. 결론

분무화염의 기초적인 물리현상을 해명하기 위하여 충류 2차원 대향류장에 형성된 분무화염의 비정상 거동에 관한 모델링을 실시하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

1. 분무화염 내에는 확산화염과 예혼합 화염이 혼재하는 매우 복잡한 화염구조를 갖으며 이러한 예혼합 화염의 존재가 분무화염의 가스온도 상승과 배기가스 중의 유해물질 생성에 영향을 끼친다고 생각된다.
2. 당량비가 증가함에 따라 증발량이 증가하며 상당히 넓은 범위에 고온영역이 분포하고 있지만 중심부근에서는 온도가 저하한다. 이와 같은 온도저하는 분무화염 내부의 균연소 거동 즉, 저산소 농도에 의한 완만한 연소와 증발 잠열에 기인하는 냉각 효과 때문이라고 생각된다.
3. 휘발성이 높을수록 증발속도가 빠르기 때문에 연료 유적으로부터의 증발에 의한 기상연료 농도증가와 산소 농도의 감소에 의한 확산적 특징을 나타내는 영역 및 착화후의 예혼합적 화염이 존재하는 영역이 넓은 범위에 형성된다. 한편 휘발성이 낮을수록 증발속도가 느리기 때문에 정체면 부근 확산화염대의 하측에는 고온영역을 통과한 입자의 증발에 따른 화염이 존재하지만 휘발성이 높을수록 거의 고온영역 내에서 증발이 완료되는 것을 알 수 있다.

KSEE

감사의 글

이 논문은 2008년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임(20080145).

참고문헌

1. Hwang S.M., Akamatsu F., and Park H.S., "Evaluation of Combustion Mechanism of Droplet Cluster by Simultaneous Time-Series Measurement in Premixed Spray Flame", *J. Eng.*

- Chem.*, **13**(2), 209~213(2007).
2. Akamatsu F., Mizutani Y., Katsuki M., Tsushima S. and Cho Y. D., "Measurement of the local group combustion number of droplet clusters in a premixed spray stream", *Proc. Combust.* **26**, 1723~1729(1996).
3. Tsushima S., Saitoh H., Akamatsu F., and Katsuki M., "Observation of combustion characteristics of droplet clusters in a premixed-spray flame by simultaneous monitoring of planar spray images and local chemiluminescence" *Proc. Combust.* **27**, 1967~1974(1998).
4. Kurose R., Desjardins O., Nakamura M., Akamatsu F., and Pitsch H., Numerical simulations of spray flames, CTR Annual Research Briefs-2004, Center for Turbulence Research, NASA Ames/Stanford Univ, pp.269~280(2004).
5. Nakamura M, Akamatsu F, Kurose R., and Katsuki M., "Combustion mechanism of liquid fuel spray in a gaseous flame", *Phys. Fluids*, **17**, 123~301(2005).
6. Akamatsu F., Mizutani Y., Katsuki M., Tsushima S., Cho Y.D., and Nakabe K., "Group combustion behavior of droplets in a premixed-spray flame", *Atomization and Sprays*, **7**(2), 199~218(1997).
7. 황승민, 김장우, 정진도, "충류 대향류장에 형성된 분무화염의 2차원 비정상 모델링", *대한환경공학회*, **29**(11), 1223~1230(2007).
8. Kee R.J., Dixon-Lewis G., Warnatz J., Coltrin M.E., and Miller J.A., "A fortran computer code package for the evaluation of gas-phase multicomponent transport properties", SANDIA Report, SAND86~8246, (1986).
9. Kee R.J., Rupley F.M., and Miller J.A., "Chemkin-II: A fortran chemical kinetics package for the analysis of gas phase chemical kinetics", SANDIA Report, SAND89-8009B(1989).
10. Hirata M., and Reid R.C., The properties of gases and liquids, 3rd ed., McGraw-Hill, (1985).
11. Pitsch H., and Steiner H., "Large-eddy simulation of a turbulent piloted methane/air diffusion flame (Sandia flame D)", *Phys. Fluids*, **12**, 2541~2554(2000).
12. Crowe C.T., Sharma M.P., and Stock D.E., "The Particle-Source-In Cell (PSI- CELL) model for gas-droplet flows", *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, **99**, 325~332 (1977).
13. Miller R.S., Harstad K., and Bellan J., "Evaluation of equilibrium and non-equilibrium evaporation models for many-droplet gas-liquid flow simulations", *J. Multiphase Flow*, **24**, 1025~1055(1998).

14. Miller R.S., and Bellan J., "Direct numerical simulation of a confined three- dimensional gas mixing layer with one evaporating hydrocarbon-droplet-laden stream", *J. Fluid Mech.*, **384**, 293~338(1999).
15. Westbrook C.K., and Dryer F.L., "Chemical kinetic modeling of hydrocarbon combustion", *Prog. Eng. Combust. Sci.*, **10**, 1~57(1984).
16. Patankar S.V., Numerical heat transfer and fluid flow, McGraw-Hill, (1980).
17. Yamashita H., Shimada M., and Takeno T., "A numerical study on flame stability at transition point of jet diffusion flames", *Proc. Combust. Inst.*, **26**, 27~34(1996).