

## Partial premixed combustion modeling of diffusion flame burner for SiO<sub>2</sub> deposition as optical fiber cladding

Hyung-Bin Park and Yoonsoo Han<sup>\*,†</sup>

*Innovation for Creative Device, Anseong 17542, Korea*

*\*Engineering Ceramic Center, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Icheon 17303, Korea*

(Received November 11, 2019)

(Revised December 10, 2019)

(Accepted December 16, 2019)

**Abstract** In this study, the flame temperature distribution of the diffusion flame burner for SiO<sub>2</sub> deposition was analyzed by the computational fluid analysis. This corresponds to the previous step for simulating the SiO<sub>2</sub> preform deposition process for manufacturing optical fibers using environmentally friendly raw materials. In order to model premixed combustion, heat flow, convection, and chemical reactions were considered, and Reynolds-averaged Navier-Stokes equations and k- $\omega$  models were used. As a result, the temperature distribution of the flame showed a tendency to increase the distance from the nozzle surface to the maximum temperature when the flow rate of the auxiliary oxygen increased. In addition, it was confirmed that the temperature distribution due to incomplete combustion was large in the combustion reaction with a large equivalence ratio of the mixed gas.

**Key words** SiO<sub>2</sub>, Deposition, Burner, Simulation, Combustion

## 광섬유 클래딩용 SiO<sub>2</sub> 증착을 위한 확산 화염 버너의 부분 예혼합 연소 모델링

박형빈, 한윤수<sup>\*,†</sup>

(주)아이씨디, 안성, 17542

\*한국세라믹기술원 엔지니어링세라믹센터, 이천, 17303

(2019년 11월 11일 접수)

(2019년 12월 10일 심사완료)

(2019년 12월 16일 게재확정)

**요약** 본 연구에서 SiO<sub>2</sub> 증착용 확산 화염 버너의 연료와 산소의 비율 변화에 따른 화염의 온도 분포를 전산 유체 해석을 수행하였다. 이는 친환경 원료물질을 이용한 광섬유 제조용 SiO<sub>2</sub> 프리폼 증착 공정을 시뮬레이션하기 위한 전단계에 해당한다. 예혼합 연소를 모델링하기 위해서 열 유동, 대류 및 화학 반응을 고려하였고 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식과 k- $\omega$  모델을 사용하였으며, 실제 화염의 온도 분포와 형상을 비교하여 연소 모델링의 적절성을 확인하였다. 결과적으로 화염의 온도 분포는 보조 산소의 유량이 증가하면 노즐 표면으로부터 최고 온도까지의 거리가 증가하는 경향성을 보였다. 또한 혼합 가스의 당량비가 큰 연소 반응에서 불완전 연소로 인한 온도 분포의 폭이 크게 나타나는 것을 확인하였다.

### 1. 서론

광섬유는 빛 신호를 전달하는 섬유로써, 내부의 코어와 이를 균일하게 감싼 형태의 클래딩으로 구성되어 있으며 클래딩의 굴절률을 코어보다 작게 하여 입사된 빛이 코어와 클래딩의 경계면에서 전반사를 반복하여 빛을 전파하는 방식이다. 현재에는 광통신 시스템에서 활발하

게 사용되고 있으며, 최근에는 반도체나 의료용으로도 사용되고 있다. 광섬유 제조 공정은 고순도의 긴 유리 막대를 합성하는 프리폼(preform) 제조 및 이를 가열하여 가느다란 섬유를 뽑아내는 방사(drawing) 공정의 2단계로 구성된다. 프리폼 제조 방법은 CVD 법(Chemical Vapor Deposition), OVD(Outside Vapor Deposition), VAD(Vapor-phase Axial Deposition), PCVD(Plasma activated Chemical Vapor Deposition), MCVD(Modified Chemical Vapor Deposition) 등이 있다[1-5]. 고순도 광섬유 제조에 주로 사용되는 OVD은, 사염화규소(SiCl<sub>4</sub>)

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: corunudm69@kicet.re.kr

를 운반가스(carrier gas)와 함께 증기로 흘려보내 산·수소 또는 메탄·산소 불꽃과 반응하여 산화물 미분체(SiO<sub>2</sub> soot)를 생성한 후, 이를 유리 코어(core)에 증착시키는 공정이다. OVD 공정에서 사용되는 원료기체인 SiCl<sub>4</sub>는 화염가스분해 반응(Flame Hydrolysis Deposition)에 의해 산화물 미분체를 생성한다. SiCl<sub>4</sub>는 산화력이 매우 강한 독성 물질로 대기 중인 수분 또는 불순물과 쉽게 반응하여 공정 중 유독가스인 HCl과 Cl<sub>2</sub>를 발생시킨다. 최근들어, SiCl<sub>4</sub>를 대체할 수 있는 친환경 실리카 합성 원료로 주목받고 있는 D<sub>4</sub>(OMCTS: Octamethylcyclotrisiloxane, C<sub>8</sub>H<sub>24</sub>O<sub>4</sub>Si<sub>4</sub>)는 Cl<sub>2</sub> 가스의 배출이 없고 실리콘(Si)의 당량비가 SiCl<sub>4</sub>에 비해 2배 이상 높아 생산 효율이 높은 것으로 알려져 있다[6]. D<sub>4</sub>는 SiCl<sub>4</sub>와 달리 원료가 연료가 되는 연소 반응을 유발하므로 안정된 화염 형성을 위한 공정 조건과 화염 노즐 설계가 필요함에도 불구하고 OVD용 확산 연소 버너 구조와 공정 조건에 대한 해석이 부족하다. 따라서 상대적으로 복잡한 D<sub>4</sub> 원료가스의 화학 반응을 고려한 전사모사를 시작하기 전에, 연료가스 및 화염버너의 특성에 따른 예혼합 연소 모델링이 선행되어야 한다.

본 연구에서는 D<sub>4</sub>를 사용한 연소 반응 모델링에 앞서 확산 연소 버너에 대한 연소 시뮬레이션을 수행하였다. 버너 내 투입구에 주입되는 가스의 유량 변화에 따른 메탄과 산소 연소 반응을 CFD(Computational fluid dynamics)를 통한 기체 유동, 물질 전달 및 화학 반응과 열 유동 해석을 수행하였고 이로부터 속도 및 화염의 온도 분포를 해석하였다. 또한 실제 화염의 온도 분포와 이론적인 온도와 비교를 통해 연소 모델링의 적절성을 확인하였다.

## 2. 수치해석 방법

본 연구에서 이용한 CFD 코드는 상용 소프트웨어인 COMSOL ver. 5.2a를 기반으로 기체의 유동을 해석하였다. 연소해석에 사용된 모델에는 난류 유동을 해석하기 위해 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식과 k- $\omega$  모델을 적용하였다. 물질 전달 모델은 Kays-Crawford와 확산모델로 Fick's law를 적용하였다. 대류 및 화학

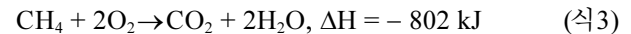
반응에 의한 열전달을 고려하기 위해 Reacting Flow와 열 유동 해석을 위해 유체의 열이동을 이용하였다. 그리고 Reacting Flow에서 난류 모델을 사용할 때 반응 속도는 mean-value-closure rate와 eddy-dissipation model을 사용하였다.

$$R_{ij} = v_{ij}M_i \cdot \min[r_{MVC,j}, r_{ED,j}] \quad (\text{식 1})$$

Mean-value-closure rate는 평균 질량 분율(mean mass fractions)을 이용한 kinetic reaction rate이다. 이는 난류 혼합에 비해 느린 반응에 대한 특징적인 반응 속도 또는 무시할 수 있는 난류 수준을 갖는 영역에서의 반응속도를 나타낸다. 해석에 사용된 eddy-dissipation model의 지배 방정식은 다음과 같다[7].

$$r_{ED,j} = \frac{\alpha_j}{\tau_T} \rho \cdot \min \left[ \min \left( \frac{\omega_r}{v_{ij}M_i} \right), \beta \sum_p \frac{\omega_p}{v_{pj}M_p} \right] \quad (\text{식 2})$$

이 식에서  $i$ 는 생성 종,  $j$ 는 반응 종,  $\tau_T$ 는 난류의 혼합 시간(mixing time scale),  $\rho$ 는 혼합기체의 밀도,  $\omega$ 는 질량 분율,  $v$ 는 화학양론적 계수,  $M$ 는 물질량,  $r$ 는 반응물의 특성,  $p$ 는 생성물의 특성을 나타낸다. 연소 반응의 분자 반응 속도는 무한히 빠르게 가정을 하여, 난류 혼합 시간에 지배적이도록 설정하였다. 또한, 메탄의 화학 반응은 다음과 같다.



여기서  $\Delta H$ 는 각 반응에 대한 엔탈피 차이이다. 열 방출은 유체의 열이동에서 열원(Heat Source) 특성을 추가하여 모델링하였다. 열원의 방정식은 다음과 같다.

$$q = r_{ED,1} \cdot \Delta H_{r1} + r_{ED,2} \cdot \Delta H_{r2} \quad (\text{식 4})$$

그리고 화염 온도를 예측하기 위해 일정한 압력에서의 열 용량( $C_{p,mix}$ )을 사용하였다. 방정식은 다음과 같다.

$$C_{p,mix} = \sum_i \frac{\omega_i C_{p,i}}{M_i} \quad (\text{식 5})$$

이 식에서  $\omega$ 는 질량 분율,  $M$ 은 몰 질량,  $C_p$ 는 열 용량을 나타내고, 엔탈피와 온도에 따른 열 용량 값을 Table 1의 값과 같이 입력하였다[8-16].

Table 1  
Standard Enthalpy formation and heat capacity of CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O

SPECIES	$\Delta H_f$ (cal/mol) T = 298 K	$C_p$ (cal/(mol·K)) T = 300 K	$C_p$ (cal/(mol·K)) T = 1000 K	$C_p$ (cal/(mol·K)) T = 2000 K
CH <sub>4</sub>	17.9	8.53	17.16	23.5
O <sub>2</sub>	0	7.01	8.35	9.03
CO <sub>2</sub>	-94.06	54.14	8.91	12.99
H <sub>2</sub> O	-57.8	7.99	9.87	12.22
$(\Delta H_f \text{ CO}_2 + 2 \cdot \Delta H_f \text{ H}_2\text{O}) - (\Delta H_f \text{ CH}_4 + 2 \cdot \Delta H_f \text{ O}_2)$				

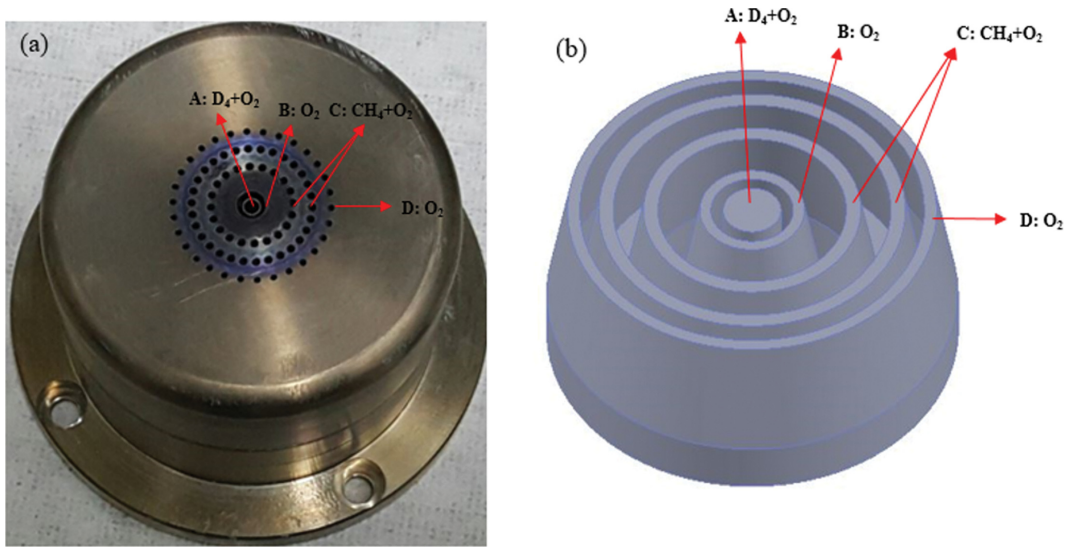


Fig. 1. (a) Diffusion flame burner and (b) 3-dimensional geometry for premixed combustion model.

Figure 1(a)는 실제 확산 화염 버너의 이미지이다. 확산 화염 버너로서 중앙의 A 노즐에서는 전구체 물질인 D<sub>4</sub>와 산소가 공급된다. B는 Inner shield gas인 O<sub>2</sub>가 투입된다. C 노즐에 투입되는 혼합 가스에 의해 화염이 생성되며 SiO<sub>2</sub> 합성에 필요한 에너지를 공급하는 역할을 하도록 하였다. D는 outer shield gas 투입구로 O<sub>2</sub>가 공급된다. 각각의 노즐 구경은 5.4 mm, 1.1 mm, 1.3 mm, 1 mm이다. 보조 산소(shield gas) 역할은 혼합 가스로 투입되는 산소를 보충하기 위함이다. Figure 1(b)에서는 CFD 해석에서 계산 시간의 단축을 위해 2D-symmetry를 사용하여 geometry를 나타내었다. 해석 조건은 C의 메탄/산소의 혼합 가스 당량비 및 B와 D로부터 나오는 보조 산소의 유량 변화에 따른 속도 및 화염의 온도를 해석하

Table 2  
Equivalence ratio of premixed fuel gas and flow rate of oxygen in shields

Premixed gas (CH <sub>4</sub> + O <sub>2</sub> ) Equivalence ratio (Φ)	Inner shield gas & Outer shield gas (O <sub>2</sub> )
Φ = 3 (15 slpm + 10 slpm)	10 slpm
Φ = 6 (30 slpm + 10 slpm)	20 slpm

였다. 수치해석 조건은 Table 2에 나타내었다. 운반 가스와 혼합 가스의 산소량은 10 slpm(standard liter per min)으로 고정시키고 메탄/산소의 당량비는 혼합가스에서 생성된 화염이 실제 역화가 일어나지 않는 범위인 3과 6으로 설정하였다. 그리고 보조 산소의 양을 10~20 slpm으로 변화하였을 때 화염의 온도 분포를 해석하였다. 사용자 조

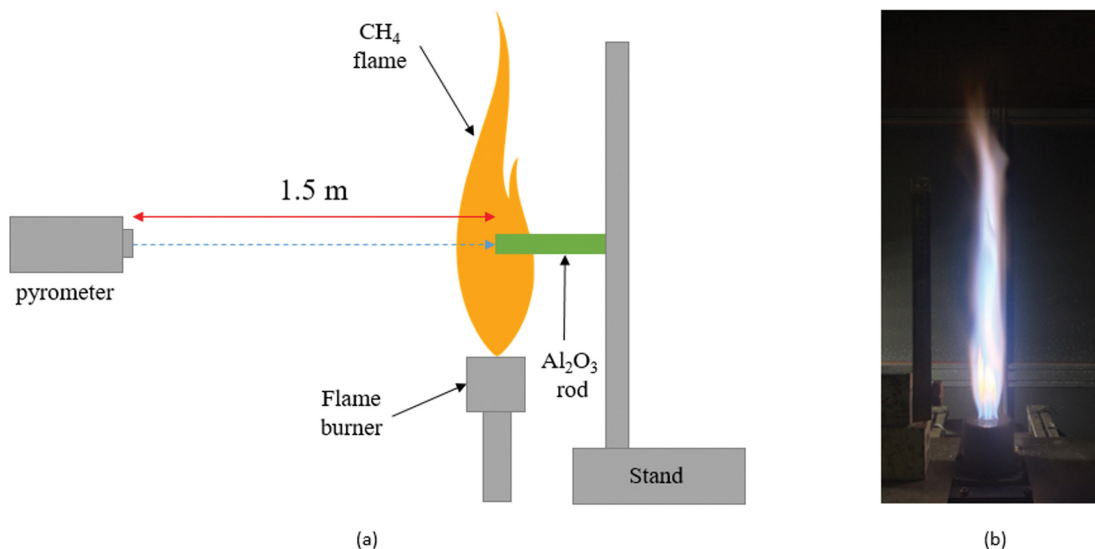


Fig. 2. (a) A schematic diagram of measurement of flame temperature and (b) image of combustion flame.

정 격자를 사용하여 약 5만개의 삼면체(Triangular) 격자를 생성하여 minimum element quality를 0.7 내외가 되도록 하였다. 정상 상태(steady state)에서의 결과를 PARDISO solver를 사용하여 도출하였고 pivoting perturbation은  $10^{-8}$ 으로 설정하였다. 해석에 사용된 워크스테이션은 DELL사의 PRECISION T7810(Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2630 v3 2.40 GHz, RAM 64 GB)이었으며 유속에 따라 최대 3시간 정도의 시간이 소요되었다.

Figure 2(a)는 화염의 실제 온도를 측정하기 위해 설치된 장비를 모식도로 나타내었다. 그리고 Fig. 2(b)는 측정된 화염의 실제 이미지를 나타내었다. Pyrometer(Raytek, 3i Plus)를 이용하여 알루미늄을 피사체로 사용하여 온도 측정을 진행하였다. 알루미늄의 방사율( $\epsilon$ )은 0.4를 사용하였고, pyrometer와 피사체와의 거리는 1.5 m로 고정하였다. 그리고 화염의 온도는 다음과 같은 식으로 정규화(normalized)하였다.

$$T = \frac{T_l}{T_m} \quad (\text{식 } 6)$$

$T$ 는 정규화된 화염의 온도,  $T_l$ 은 버너 표면으로부터의 거리에 따른 화염의 온도,  $T_m$ 은 화염의 최고온도를 나타낸 것이다.

### 3. 결과 및 고찰

Figure 3은 혼합가스 당량비에 따른 화염의 온도를 보조 산소의 유량 변화에 따라 측정한 그래프이다. 간접적으로 측정된 화염 온도는 수치해석의 결과와 비교시 낮게 측정되는데, 이는 pyrometer를 사용해 측정된 화염 내부의 피사체 온도는 실제 화염의 온도가 아니며, 이런

방법을 통해서서는 화염의 절대 온도를 정확히 측정할 수 없기 때문이다. 이를 보정하기 위해서 식 6에 따라 화염의 최고온도를 기준으로 정규화된 온도로 화염의 온도 분포를 나타내었다. Figure 3(a)는 메탄과 산소 혼합가스의 유량이 각각 15와 10 slpm이어서 당량이 3인 경우의 화염 온도 분포를 나타낸 것이다. 쉴드 가스로 투입된 보조 산소의 유량이 10 slpm일 때, 버너 표면에서 화염의 최고 온도까지 거리는 80 mm로 관찰되었다. 이 때의 연소시스템의 총 당량비는 1이므로 이론 연소비일 때의 화염의 상태이다. 쉴드 가스로 투입된 보조 산소의 유량이 20 slpm으로 증가되면 연소시스템의 총 당량비가 0.6으로 낮아져, 산소의 양이 과잉이 되므로 최고 온도까지의 거리는 140 mm로 관찰되었다. 이처럼 혼합가스의 당량이 3인 경우는 쉴드 가스로 투입된 보조 산소의 유량이 증가하면 화염의 최고 온도 거리도 증가하는 것을 알 수 있다. Figure 3(b)는 메탄과 산소 혼합가스의 유량이 각각 30과 10 slpm이어서 당량이 6인 경우의 화염 온도 분포를 나타낸 것이다. 쉴드 가스로 투입된 보조 산소의 유량이 10 slpm일 때 총 당량비는 2이며 최고 온도까지의 거리는 90 mm이며 불완전 연소로 인한 강한 난류의 화염이 관찰되었다. 하지만, 쉴드 가스로 투입된 보조 산소의 유량이 20 slpm으로 증가되더라도, 총 당량비는 1.2로써 이론 연소비보다 높다. 또한 버너 표면에서 화염의 최대 온도까지 거리는 거의 일치하여, 혼합가스의 당량이 3일 때와 차이를 보였다. 반면, 혼합가스의 당량비가 6인 경우는 쉴드 보조 가스의 유량이 변하더라도 화염의 전체적인 온도는 보조 산소가 20 slpm인 경우 높았다. 한편, 모든 측정 조건에서 노즐 표면으로부터의 거리가 180 mm 이상인 경우는 난류에 의한 화염의 온도 변동이 심하여, 정확한 측정이 불가능하였다.

Figure 4는 수치해석을 통해 혼합가스 당량비에 따른

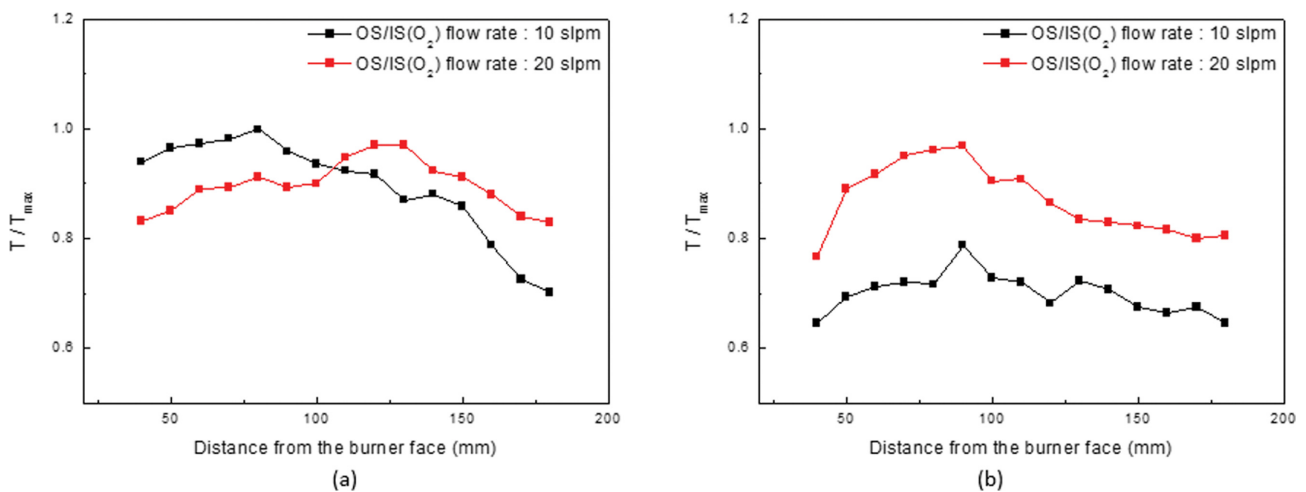


Fig. 3. Measured flame temperature distribution depending on auxiliary  $O_2$  gas flow rates in which (a) the equivalence ratio of mixture gas is 3 and (b) the equivalence ratio of mixture gas is 6.

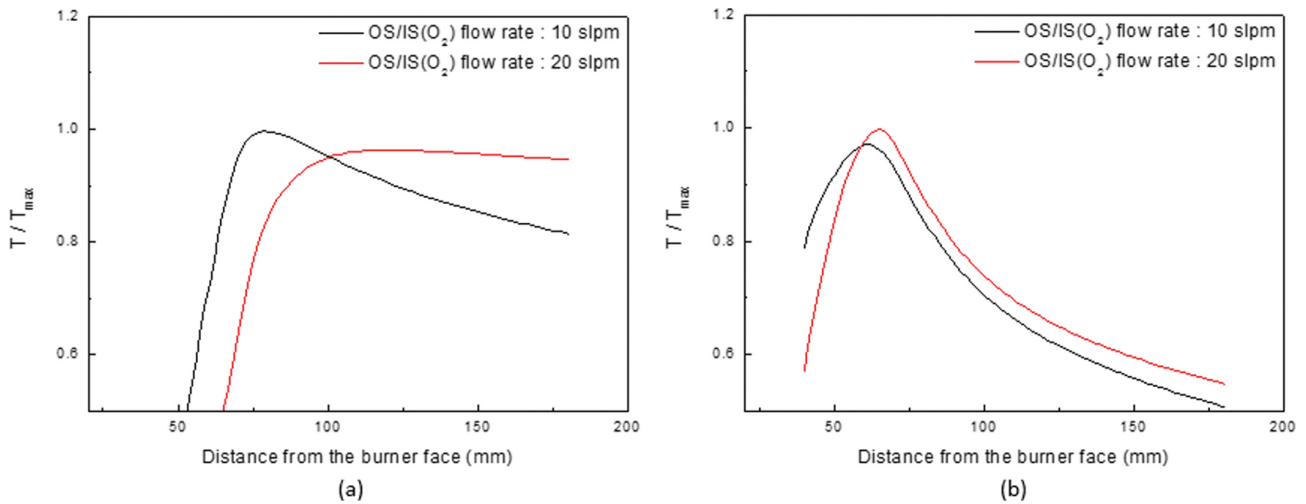


Fig. 4. Calculated flame temperature distribution depending on auxiliary O<sub>2</sub> gas flow rates in which (a) the equivalence ratio of mixture gas is 3 and (b) the equivalence ratio of mixture gas is 6.

화염의 온도를 보조 산소의 유량 변화에 따라 계산한 그래프이다. 측정온도와 계산온도와의 비교를 위해 Fig. 3 처럼 식 6에 따라 정규화된 온도를 사용하였다. Figure 4(a)에서 보듯 메탄과 산소 혼합 가스의 당량비가 3일 경우, 쉘드 가스로 투입된 보조 산소의 유량이 10 slpm 일 때 버너 표면으로부터 화염의 최고 온도까지의 거리는 80 mm로, Fig. 3(a)에 보여준 측정치와 일치하였다. 쉘드 역할을 하는 보조 산소의 유량이 20 slpm인 경우, 보조 산소의 유량이 10 slpm의 경우에 비해 화염의 최고 온도는 감소하나, 버너 표면에서 화염의 최고 온도까지의 거리가 증가하는 경향을 보여, 실험 적으로 측정된 결과와 일치하는 경향을 보였다. Figure 4(b)에서는 메탄과 산소의 혼합 가스 당량비 6인 경우, 쉘드 가스로 투입된 보조 산소의 유량이 10 slpm일 때 버너 표면으로부터 화염의 최고 온도까지의 거리는 약 65 mm로, 혼합 가스의 당량비가 3일 때보다 화염의 최고 온도까지의 거리가 감소하는 것으로 나타났다. 보조 산소의 유량이 20 slpm으로 증가하면, 노즐 표면에서 화염의 최고 온도까지의 거리는 약간 증가하였는데, 그 증가량은 혼합 가스의 당량비가 3인 경우에 비해 미미했으며, Fig. 3(b)에서 측정된 결과와 일치한다. 반면, 혼합 가스의 당량비가 6인 경우는 쉘드 보조 가스 투입량이 증가함에 따라 화염 전체 온도 증가는 실험에서 측정된 값에 비해 상승폭이 미미하였다.

Figure 5(a)는 혼합 가스 내 산소의 유량을 고정하고, 혼합 가스 당량비와 보조 산소의 투입량을 변화시키는 조건에서 계산된 화염의 형상이다. 보조 산소의 유량이 증가하면 화염은 길이와 더불어 폭도 증가하였으며, 혼합 가스의 당량비가 커질수록 화염의 폭이 커지는데, 이는 산소와 반응하는 메탄의 유량이 증가하여 발열량이 증가하기 때문으로 예상된다. Figure 5(b)에서 처럼 메탄

의 mass fraction은 혼합 가스의 당량비와 무관하게 보조 산소의 유량이 증가하면 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 보조 산소 증가는 총 당량비가 감소하고 여분의 산소와 반응하는 메탄의 양이 증가하였기 때문이다. Figure 3(c)는 산소의 mass fraction을 나타내었다. 산소가 혼합 가스 투입구에서는 희박하며 버너 표면에서 거리가 증가할수록 내부 보조 산소가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 내부 보조 산소는 혼합 가스의 당량비가 6일 때 3일 때보다 빠르게 소모되었다. 이는 혼합 가스에서 메탄이 증가함으로써 유속이 증가하게 되고 그에 따른 난류 혼합 시간이 줄었음을 의미한다. 혼합 가스의 당량비가 3과 6일 때 보조 산소의 유량이 10 slpm이면 산소가 부족한 영역이 나타났으며 보조 산소의 유량이 20 slpm으로 증가하면 산소 부족을 해소해주는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 OVD용 확산 화염 버너의 CH<sub>4</sub>와 O<sub>2</sub>의 공급비에 따른 화염의 형상과 온도 분포에 대한 관계를 해석하였고, 실제 화염의 온도 분포와의 경향성을 비교하였다. 수치해석의 결과 CH<sub>4</sub>와 O<sub>2</sub>의 총 당량비가 1보다 작을 때 화염의 온도 분포가 안정된 온도 분포를 나타내는 것으로 예측된다. 즉, 확산 화염 버너의 경우 CH<sub>4</sub>가 역화되지 않는 범위에서 안정적인 화염을 형성시키기 위해서는 보조 산소의 공급량을 다소 많이 조절할 필요가 있다는 것을 의미한다. 또한 실제 화염에서 화염의 최고 온도 거리 및 온도 분포에서 수치 해석 결과와 적절하게 일치하며 OVD용 확산 버너의 기초 데이터로 활용 가능할 것으로 생각된다.

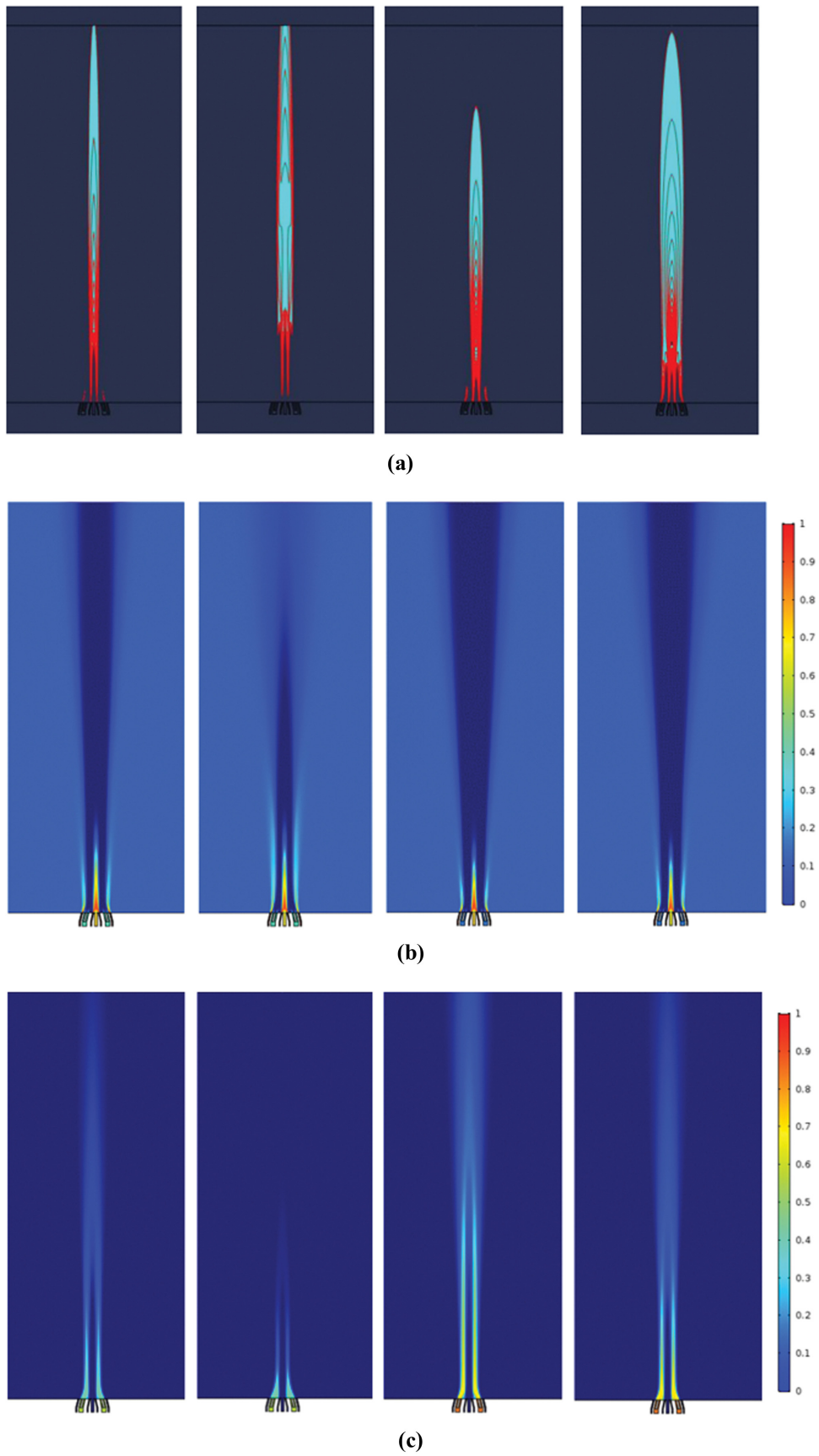


Fig. 5. (a) Temperature (b) CH<sub>4</sub> mass fraction and (c) O<sub>2</sub> mass fraction field in premixed flame at different auxiliary O<sub>2</sub> gas flow rates and the equivalence ratio.

## References

- [ 1 ] A. Ghatak and K. Thyagarajan, "Introduction to Fiber Optics", 1st Ed. (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1998) p. 9.
- [ 2 ] S.R. Nagel, J.B. MacChesney and K.L. Walker, "An overview of the modified chemical vapor deposition (MCVD) process and performance", IEEE J. Quantum Electron. 30 (1982) 459.
- [ 3 ] M.G. Blankenship and C.W. Deneka, "The outside vapor deposition method of fabricating optical waveguide fibers", IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 30 (1982) 1406.
- [ 4 ] T. Izawa and N. Inagaki, "Materials and processes for fiber preform fabrication-vapor-phase axial deposition", Proc. IEEE 68 (1980) 1184.
- [ 5 ] L. Tong, R.R. Gattass, J.B. Ashcom, S. He, J. Lou, M. Shen, I. Maxwell and E. Mazur, "Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding", Nature 426 (2003) 816.
- [ 6 ] H.K. Kammler and S.E. Pratsinis, "Scaling-up the production of nanosized SiO<sub>2</sub>-particles in a double diffusion flame aerosol reactor", J. Nanoparticle Res. 1 (1999) 467.
- [ 7 ] B.F. Magnussen and B.H. Hjertager, "On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion", Int. Sympo. Combust. 16 (1977) 719.
- [ 8 ] F.M. El-Mahallawy and S. EL-Din Habik, "Fundamentals and technology of combustion", 1st Ed. (Elsevier science, Oxford, 2002) p. 1.
- [ 9 ] K.N. Marsh, "Mutual diffusion in octamethylcyclotetrasiloxane mixtures", Trans. Faraday Soc. 64 (1968) 894.
- [10] G. Alfonsi, "Renolds-averaged navier-stokes equations for turbulence modeling", Appl. Mech. Rev. 62 (2009) 1.
- [11] S.A. Ahmed and A.S. Nejad, "Premixed, turbulent combustion of axisymmetric sudden expansion flows", Int. J. Heat Fluid Fl. 13 (1992) 15.
- [12] D.G. Norton and D.G. Vlachos, "Combustion characteristics and flame stability at the microscale: a CFD study of premixed methane/air mixtures", Chem. Eng. 58 (2003) 4871.
- [13] A. Schild, A. Gutsch, H. Muhlenweg and S.E. Pratsinis, "Simulation of nanoparticle production in premixed aerosol flow reactors by interfacing fluid mechanics and particle dynamics", J. Nanoparticle Res. 1 (1999) 305.
- [14] D.C. Wilcox, "Turbulence Modeling for CFD", 3rd Ed. (DCW Industries Inc, California, 1993) p. 73.
- [15] W.J. Stark and S.E. Pratsinis, "Aerosol flame reactors for manufacture of nanoparticles", Powder Technol. 126 (2002) 103.
- [16] S. Subramaniam and S.B. Pope, "Comparison of mixing model performance for nonpremixed turbulent reactive flow", Combust. Flame 117 (1999) 732.