

Damköhler 수가 비예혼합 CO/H₂/N₂ 난류 화염장에서의 초과평형농도 및 화염구조에 미치는 영향

Effect of Damköhler Number on Superequilibrium Concentration and Flame Structure in Turbulent Nonpremixed Jet Flames

김 군 홍*, 김 용 모**, 윤 명 원***
Gunhong Kim, Yongmo Kim, Myoungwon Yoon

ABSTRACT

The RPV(Reaction Progress Variable) combustion model has been applied to numerically investigate the effects of Damköhler number on the superequilibrium concentration and flame structure in the nonpremixed turbulent flames. Computations are performed for the two turbulent jet flames of CO/H₂/N₂(40/30/30 volume percent) having the same jet Reynolds number of 16,700 but different nozzle diameters(4.58mm and 7.72mm). The detailed discussions have been made for the interaction between fluid dynamics and chemistry in the flame field.

주요기술용어 : RPV(Reaction Progress Variable) model, PDF model, Damköhler number, 초과평형 (Superequilibrium)

1. 서 론

난류 연소 연구에 있어서 가장 큰 어려움은 난류 혼합과정과 넓은 범위의 화학 반응율을 가지는 화학 반응간의 복잡한 상호작용에서 기인한다. 실제 대부분의 연소기기 내의 비예혼합 난류 화염은 주 화학종들과 온도에 대하여 화학평형 과정과 유사하게 고려되어 이러한 난류화염들에 대하여 fast chemistry model이 적용되어왔다. 그러나 연소유동장내의 모든 화학종들에 대하여 화학평형 가정이 적용되는 것이 아니다. 예

를 들어, 층류 예혼합 화염내에서나 비예혼합 난류화염에서 OH나 O 라디칼들이 평형상태 가정에서보다 몇 배 높게 가지는 초과평형 상태가 존재한다는 사실들이 실험적으로 계측되었다. 라디칼의 초과평형 현상은 화염구조와 특히 NO 형성에 많은 영향을 미치기 때문에 난류 연소 모델링 과정에 있어서 난류유동장과 화학반응율의 상호관계들이 반드시 고려되어야 한다.

본 연구에서는 finite chemistry를 고려하기 위하여 RPV(Reaction Progress Variable) 연소 모델을 적용하였다. 초기 RPV 난류연소 모델은 난류 수소화염에 대하여 Janicka와 Kollmann에 의하여 개발되었다.¹⁾ 그들은 연소 화학반응을 빠른

* 회원, 한양대학교 대학원

** 회원, 한양대학교 기계공학부

*** 회원, 국방과학연구소

라디칼 형성반응과 상대적으로 느린 3-body 재결합반응들에 반응진행변수를 적용하여 중간 생성 라디칼들의 초과평형 농도를 예측하였다. 본 논문에서는 엔탈피 변수를 이용한 복사열손실을 고려하였으며, 라디칼의 초과평형 현상에 대한 수치 정확도를 높이기 위하여 HO₂와 H₂O₂ 화학반응을 추가로 고려하였다.

본 논문에서는 유동 특성에 따른 Damköhler 수의 난류 화염구조에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 같은 레이놀즈 수를 갖는 난류 비예혼합 CO/H₂/N₂ 제트 화염에 대하여 연구를 수행하였다.²⁾ 두 화염장은 속도, 온도와 주 화학종들에 대한 상사 관계가 존재하고 있으나, 중간 생성물인 라디칼들에 대해서는 두 유동특성으로 인하여 다른 초과평형 현상을 보여준다. 이러한 다른 화염구조를 설명하기 위하여 예측된 수치결과를 이용하여 대표적인 유동 시간 스케일을 예측하고 빠른 화학반응과 느린 3-body 화학반응에 대한 화학반응 시간에 대한 단순 가정을 통해 화염장내의 Damköhler 수를 고려함으로써 두 화염장에 대한 라디칼들의 초과평형 현상과 NO 분포에 대한 화염구조의 차이를 설명할 수 있음을 확인하였다.

2. 수치모델

현 연구에 적용된 화학모델은 Warnatz의 H₂/CO-air 연소 메카니즘³⁾을 이용하였으며, RPV 모델을 적용하기 위하여 O, H와 OH 라디칼들의 빠른 생성반응(CO+OH=CO₂+H 포함), 3-body 재결합 반응, 그리고 HO₂/H₂O₂ 화학반응으로 구분하였다. 빠른 라디칼 생성반응은 연소장내에서 라디칼들이 이미 화학평형상태에 도달하였다고 가정하고, 형성된 라디칼들은 느린 3-body 재결합 화학반응에 의해 소멸되어간다고 가정하였다. HO₂/H₂O₂ 화학반응은 부분 평형 상태에 도달한 라디칼들의 농도를 3-body 재결합 반응이외의 다른 중간 라디칼 소멸 경로를 제공한다. HO₂/H₂O₂ 화학반응을 고려하지 않았을 때 과도한 초과평형 현상이 예측되었으며, 이에 본 연구의

RPV 모델에서는 H₂/CO 화학반응에 대하여 새로운 결합변수 Y^{*}_{H2}에 HO₂/H₂O₂ 화학종을 포함하여 다음 식 (1)과 같이 적용되었다.

$$Y^*_{H_2} = Y_{H_2} + \frac{M_{H_2}}{M_O} Y_O + \frac{3}{2} \frac{M_{H_2}}{M_H} Y_H + \frac{1}{2} \frac{M_{H_2}}{M_{OH}} Y_{OH} - \frac{1}{2} \frac{M_{H_2}}{M_{HO_2}} Y_{HO_2} - \frac{M_{H_2}}{M_{H_2O_2}} Y_{H_2O_2} \quad (1)$$

식 (1)로 정의된 새로운 스칼라량(Y^{*}_{H2})의 생성율은 부분 화학평형가정으로 인하여 빠른 생성반응과 독립적이며 오직 3-body 재결합 화학반응율들에 의해 결정되게 된다.

RPV 모델에서는 모든 스칼라량들이 혼합분율(f)과 반응진행변수(r)로 계산되어지며 현재 연구에서는 복사 열전달을 고려하기 위하여 엔탈피 변수(e)를 추가로 고려하였다. 보존 스칼라량인 혼합분율(f)은 단일 Lewis 수 가정으로 식 (2)로 정의되어지며, 여기에서 ϕ_i는 현 H₂/CO 화학반응에 참여하는 임의의 원자 i의 질량분율이다.

$$f = \frac{\phi_i - \phi_i^a}{\phi_i^f - \phi_i^a} \quad (2)$$

반응진행변수는 새로운 결합변수 Y^{*}_{H2}를 화학평형상태의(Y^{*}_{H2})^{eq}와 비연소장의 (Y^{*}_{H2})^{ub}로 평준화 시킴으로써 식 (3)과 같이 정의되어진다. 여기에서 첨자 eq와 ub는 각각 화학평형상태와 연소반응전 혼합물을 나타낸다.

$$r = \frac{Y^*_{H_2} - Y^*_{H_2}^{ub}}{Y^*_{H_2}^{eq} - Y^*_{H_2}^{ub}} = \frac{Y^*_{H_2} - Y^*_{H_2}^{ub}}{W(f, e)} \quad (3)$$

본 연구에서는 복사 열손실을 고려하기 위하여 식 (4)로 정의된 평준화된 엔탈피 변수가 사용되었다.

$$e = \frac{h - h_{min}}{h_{ad} - h_{min}} \quad (4)$$

복사 열손실율은 광학적 두께가 얇다는 가정하여 TNF workshop에서 제안하고 있는 모델을 사용하였다.(<http://www.ca.sandia.gov/tdf/Worksh>

op.html)

난류 비예혼합 화염장에서는 혼합분율(f)과 반응진행변수(r)들의 변동성분이 존재하기 때문에 열역학적 상태량들을 구하기 위하여 통계적 접근법이 요구되어진다. 현 연구에서는 presumed PDF model을 이용하여 식 (5)로 연소장내의 상태량을 고려하였다.⁴⁾

$$\phi = \int_0^1 \int_0^1 \int_0^1 \phi(f, r, e) \tilde{P}(f) \tilde{P}(r) \tilde{P}(e) df dr de \quad (5)$$

위 식에서 혼합분율(f), 반응진행변수(r)와 엔탈피 변수(e)는 서로 통계학적으로 독립되어 있다고 가정하였다. 혼합분율의 확률밀도함수(P(f))는 β -pdf 분포, 반응진행변수와 엔탈피 변수들의 pdf 분포는 변동성분이 계산결과에 큰 영향을 미치지 않으므로 δ -pdf 분포를 가정하였다. 본 논문에 적용된 RPV 연소 모델에 대한 내용은 최근 논문에 자세히 설명되어있다.⁵⁾

3. 수치결과

본 수치연구에 사용된 실험결과³⁾는 다른 노즐 직경(4.58mm and 7.72mm), 동일 레이놀즈 수($\approx 16,700$)를 가지는 CO/H₂/N₂(40/30/30%)난류 제트 화염이다. 자세한 정보는 TNF 홈페이지를 통해 확인할 수 있다. 두 난류화염 A와 B에 대한 실험 조건들은 Table 1에 나타내었다.

일반적으로 k- ϵ 난류유동 모델은 축대칭 제트 유동에서 속도의 spreading rate의 과대 예측결과를 보정하기 위하여 Pope's correction을 사용하여 본 수치해석을 수행하였다.⁶⁾ Fig. 1에 두 난류화염장내의 축방향 속도분포를 나타내었으며, Fig. 2에는 축방향 위치에 따른 반경방향에 대하여 최대속도에 따른 평균화된 수치값들을 나타내었다. 무차원 속도장 해석 결과들로부터 일반적인 자유 전단 유동에서의 상사가 존재함을 확인할

Table 1 Nozzle dimensions and flow conditions

Flame	ID(mm)	OD(mm)	UJet(m/s)	ReJet
A	4.58	6.34	76.0 \pm 1.5	16,700
B	7.72	9.46	45.0 \pm 0.9	16,700

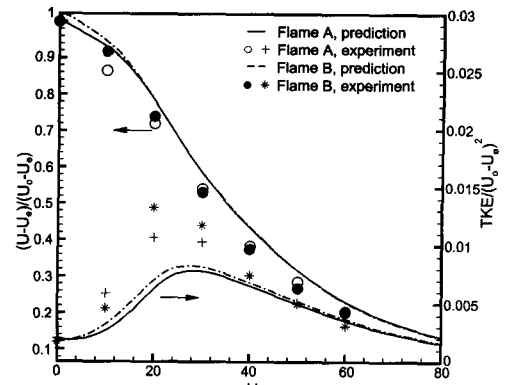


Fig. 1 Centerline profiles of axial velocity and turbulent kinetic energy

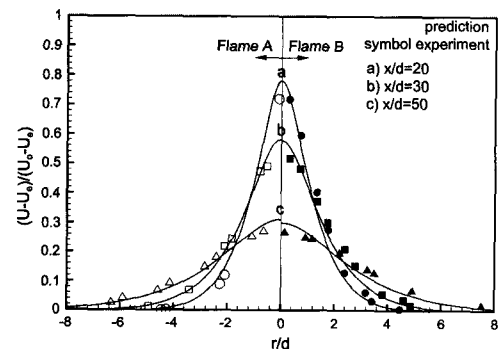


Fig. 2 Radial profiles of normalized axial velocity(U_o : maximum jet velocity, U_c : coflow air velocity)

수 있다. 그러나, Fig. 1에서의 실제 난류 에너지에 있어서 더 큰 변형율로 인하여 화염 B 경우보다 화염 A에서 3배 가량 더 큰 난류 변동 레벨이 존재하고, 이로 인해 두 화염장은 각각 다른 난류 연소특성을 나타내게 된다.

3.1 초과평형에 대한 Damköhler수의 영향

난류 화염장에 있어서 유체의 거동과 화학반응간의 상호작용들은 화학반응들의 특성 시간과 유동의 특성 시간들의 비인 Damköhler 수 ($Da = \tau_{flow} / \tau_{chem}$)로서 특징지어질 수 있다. $Da \gg 1$ 인 경우에는 화학반응들은 난류혼합에 비하여 급격하게 일어나게 되어 화염장은 난류혼합에 의해 지배되고 화학평형으로 접근해가게 된다. 반대로 $Da \ll 1$ 이 되게 되면 혼합율들이 반응율들

에 비해 급격하게 증가하게 되므로 화염장은 비평형 화학반응에 의해 지배된다. 또한 Da 수가 1.0 근방에서는 난류 혼합율들과 화학 반응율들이 경쟁적인 상호작용들로 인하여 화염장은 두 시간변수 τ_{flow} 와 τ_{chem} 에 대해 민감하게 반응하게 된다. 따라서 열역학적 스칼라량은 두 화염장내의 Damköhler 수 분포에 직접적인 영향을 받게 된다. 난류 화염장내의 Damköhler 수의 영향을 정성적, 정량적으로 살펴보는 것은 난류와 화학반응간의 상호작용들에 대한 RPV 난류모델의 적용 타당성을 검증하는데 중요한 기준점이 된다.

Table 2에는 각 축방향 위치에 따른 중심축 최고속도(U_c), 주위 공기 속도(U_e), half-width of the velocity profile($\delta_{1/2}$), 그리고 유동 특성시간(τ_{flow})과 빠른 라디칼 생성반응과 상대적으로 느린 재결합 화학반응 시간에 대한 단순 가정을 통해 얻어진 Damköhler 수를 나타내었다. 여기에서 난류 혼합에 대한 특성 시간 스케일은 식 (6)로 정의되는 large-eddy turnover time을 사용하였으며 변수들에 대한 값들은 모두 수치해석 결과를 이용하였다.⁷⁾

$$\tau_{flow} = \frac{\delta_{1/2}}{U_c - U_e} \quad (6)$$

난류 연소장내의 H_2/CO -air 화학반응에 대한 특성시간(τ_{chem})은 RPV 연소모델의 특성으로 인하여 빠른 라디칼 생성반응과 느린 3-body 재결

합반응만을 고려하였다. 본 연구에서는 두 화염장에 대하여 동일하게 라디칼들이 급격하게 생성되는 빠른 화학반응들에 대해서는 20 μ s의 시간 스케일을, 라디칼들의 환원반응인 3-body 반응에서는 3ms 정도의 시간 스케일의 특성을 보인다고 단순 가정하였다.⁷⁾ Table 2에 얻어진 유동 특성시간과 단순 가정된 화학반응 특성시간에 대한 Damköhler 수는 정확한 수치 값은 아니지만 현 연구대상인 두 화염장에 대해 상대적 결과분석에 있어서는 충분한 적용 가능성을 가지고 있다고 할 수 있다. Table 2에서 빠른 반응의 Damköhler 수(Da_{fast})와 3-body 반응에 대한 Damköhler 수(Da_{3-body})의 결과를 살펴보면 화염 A의 경우가 빠른 노즐 속도로 인하여 대체로 작은 Damköhler 수 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그리고 두 화염장내의 Da_{fast} 수의 10.0이상의 높은 결과 값들은 RPV 모델의 빠른 라디칼 생성반응에 대한 부분 화학평형(partial equilibrium) 가정의 타당성을 말해주고 있다. 화염 A의 Da_{3-body} 수가 $x/d=60$ 지점까지 1.0를 넘지 않는 것에 비해 화염 B의 경우는 하류측 $x/d=50$ 이전에 Da_{3-body} 수가 1.0를 넘음을 알 수 있다. 이는 앞서 설명되었듯이 두 화염장에 대하여 화학평형으로부터의 다른 이탈정도도 그 결과 화염구조의 차이가 존재하게 됨을 Da_{3-body} 수를 통해 설명할 수 있음을 보여준다.

Table 2 Characteristic flow times and Damköhler numbers versus axial distance(x/d)

Axial location	x/d	00	10	20	30	40	50	60
Flame A	U_c (m/s)	104.884	97.527	82.052	61.4176	45.7144	33.7536	24.5366
	U_e (m/s)	0.75	0.745	0.733	0.718	0.701	0.680	0.655
	$\delta_{1/2}$ (mm)	-	15.30	24.73	31.19	40.11	45.25	51.71
	τ_{flow} (ms)	-	0.16	0.30	0.51	0.89	1.37	2.17
	Da_{fast}	-	8.0	15.0	25.5	44.5	68.5	108.5
	Da_{3-body}	-	0.05	0.1	0.17	0.30	0.46	0.72
Flame B	U_c (m/s)	59.351	56.077	46.3741	34.4951	25.5024	18.439	13.2364
	U_e (m/s)	0.75	0.747	0.745	0.741	0.736	0.728	0.718
	$\delta_{1/2}$ (mm)	-	24.70	38.60	49.33	60.29	68.86	87.08
	τ_{flow} (ms)	-	0.45	0.85	1.46	2.43	3.89	6.93
	Da_{fast}	-	22.5	42.5	73.0	121.5	194.5	346.5
	Da_{3-body}	-	0.15	0.28	0.49	0.81	1.30	2.31

Fig. 3에는 중심축에 따른 RPV 모델과 화학 평형 모델의 수치결과와 실험결과를 동시에 나타내었다. 혼합분을 분포와 온도분포에 대하여 수치 결과가 실험결과에 대해 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 화염 B의 온도결과로부터 화학 평형모델이 최고온도와 하류로 갈수록 온도분포를 과도 예측하고 있다. Fig. 1과 Fig. 2 결과들과 같이 온도와 혼합분율 분포, 그리고 주 화학종들에 대하여도 상사가 존재함을 확인할 수 있다. 화학평형 모델을 이용한 수치결과는 OH 라디칼에 대해서도 두 화염장에 대하여 동일한 결과를 보여주고 있다. 그러나 실제 실험결과와 비평형 과정을 고려한 RPV 난류연소모델 결과는 두 화염장에 대하여 상이한 OH 라디칼의 초과평형 현상을 보여주고 있다. OH 라디칼의 초과평형 현상

은 Table 2의 Da_{3-body} 로 설명되어질 수 있다. 화염 A의 경우 전체적으로 Da_{3-body} 가 1.0보다 작은 값들을 갖음으로 인해 비평형 화학반응 특성이 뚜렷하게 나타난다. 화염 B의 경우 $x/d=50$ 이전부터 Da_{3-body} 가 1.0보다 큰 값이 존재하고 있음으로 OH 라디칼 분포가 화염 A보다 하류로 갈수록 적게 분포하게 된다. 이러한 사실은 화염 B에 대한 OH 라디칼의 경우 화학평형 모델 수치값의 2배 이상 차이가 나지 않음을 통해 확인할 수 있다.

Fig. 3에서 CO₂ 화학종의 수치결과가 상류측에서 실험결과에 비해 과도 예측하는 경향을 보이는 이유는 본 RPV 연소모델에서 CO 화학종에 대하여 $CO+OH=CO_2+H$ 반응이 다른 화학반응들과 같이 빠르게 화학 평형상태에 도달한다고 가정하였기 때문에 나타난 현상이다. 타 연구자

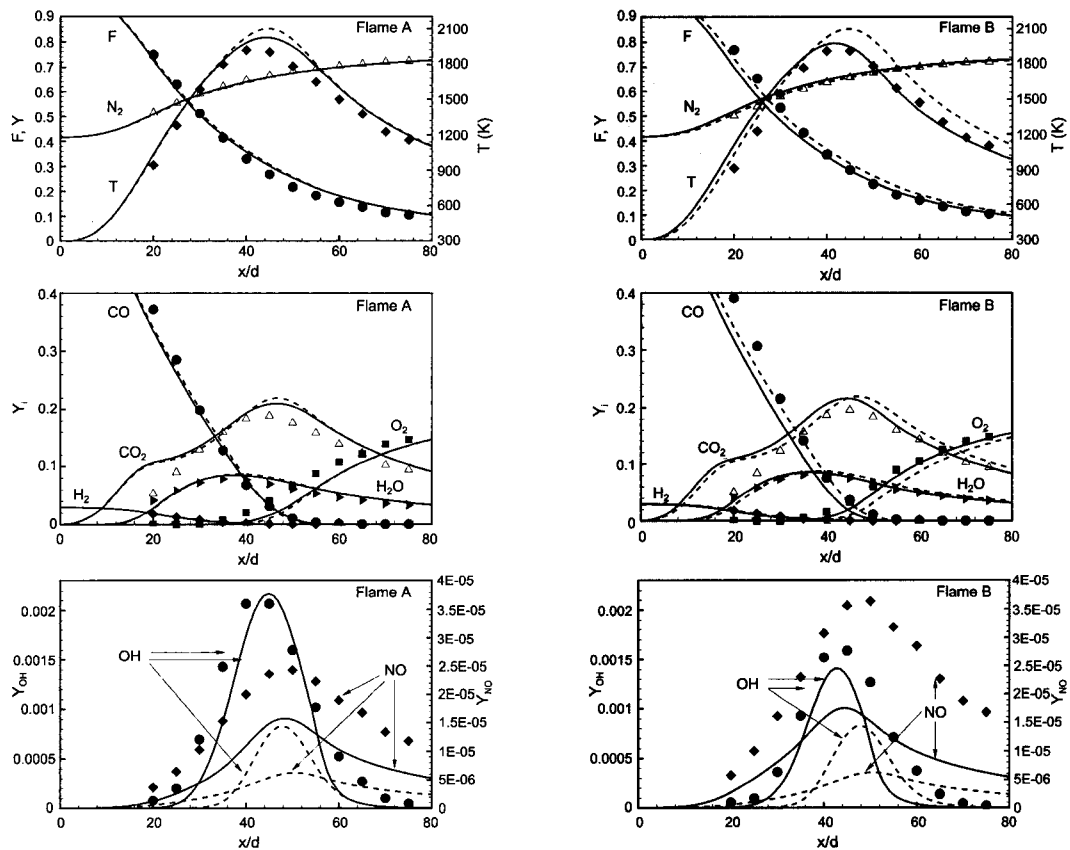


Fig. 3 Centerline profiles of temperature, mixture fraction, radical and major species mass fractions (solid line: RPV model, dotted line: chemical equilibrium model, symbol: experiment)

들의 연구결과에 따르면 1800K 이상인 고온에서만 타당한 가정으로 본 난류 화염장에 적용함에 있어서 추후 검증이 필요하며 CO 화학반응에 대한 추가 반응진행변수를 정의할 필요가 있음을 확인할 수 있다.⁸⁾

3.2 화염구조와 NO 형성에 대한 라디칼 초과평형농도

일반 대기압하의 수소화염에 대한 thermal NO 생성과정은 일반적인 Zeldovich 메카니즘에 의해 설명되어질 수 있다. N원자에 대한 정상상태 가정과 $[NO]/[NO]_{equilibrium} \ll 1$ 가정을 통해 thermal NO 생성율은 식 (7)로 나타내어질 수 있다.

$$W_{NO} = M_{NO}(2K_{f9}[N_2][O]) \quad (7)$$

여기에서, $K_{f9} = 1.841014 \exp(-38370/T) \text{cm}^3/\text{mol}\cdot\text{s}$.

식 (7)에서 화염장내의 N_2 의 농도는 불활성 화학종으로 간주할 수 있기에 농도변화가 거의 없다고 가정하였을 경우에, NO의 생성율은 K_{f9} 값과 O원자의 농도로 결정되어지게 된다. 따라서 NO 생성반응은 두 화염장내의 Damköhler 수 분포에 직접적인 영향을 받게 됨을 알 수 있다.

두 화염장내의 라디칼들의 초과평형 현상은 화학평형으로부터의 이탈의 결과이며, 이에 대한 연소 반응물들에 대한 영향을 보기 위하여 Fig. 4에 H_2 와 O_2 의 질량분율 간의 관계를 나타내었다. 화학 비평형 반응을 고려한 본 RPV 모델은 화학평형 결과보다 높은 H_2 와 O_2 농도분포를 보여주고 있다. 이 결과는 라디칼의 초과평형으로

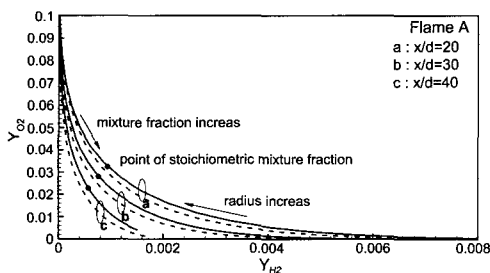


Fig. 4 Oxygen mass fraction versus Hydrogen mass fraction (solid line: RPV model, dotted line: chemical equilibrium model)

인해 화학평형 화염온도보다 낮은 화염온도를 가지게 됨을 설명해준다. Fig. 4에서 화학량론적 혼합율(stoichiometric mixture fraction) 지점을 기준으로 희박영역과 농후영역으로 나뉘어 지며 혼합분율(f)는 각 곡선들을 따라 변하게 된다. Fig. 3에서 비평형 화학반응을 고려했을 때 두 화염에 대하여 축방향 최고온도가 약 100K 정도의 화염온도가 감소함을 알 수 있으며 이러한 결과는 식 (7)에서 나타나듯이 thermal NO 화학평형 상(K_{f9})가 온도에 따라 큰 차이를 가지므로 NO농도 계산에 큰 영향을 미침을 확인할 수 있다.

Fig. 5에서 보면 두 화염장에 대하여 반경방향 온도 분포에 큰 차가 존재하는데, 이는 본 연구의 수치모델이 Fig. 2의 속도분포는 거의 정확히 예측하고 있으나 혼합과정에 대한 난류모델의 예측능력 한계로 인하여 혼합율에 대한 spreading rate를 과대 예측함으로써 나타난 결과로 판단된다.

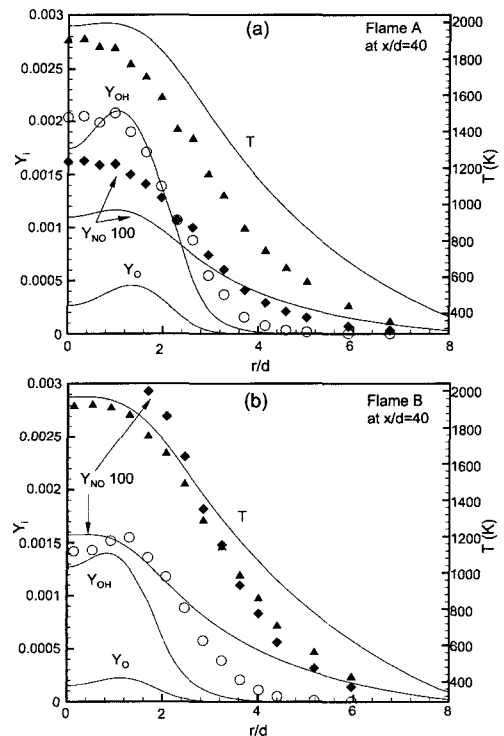


Fig. 5 Radial profiles of temperature and radicals (solid line: prediction, symbol: experiment)

실제 화염장내에서 O 라디칼의 실험적 측정 한계로 인해 중간 생성 라디칼인 OH와 O 라디칼들의 생성특성을 살펴보는 것은 실제 실험결과를 해석하는데 많은 유용한 정보를 제공해 줄 수 있다. Fig. 5의 결과에서 두 화염장에 대한 OH와 O 라디칼 분포에 대하여 초과평형 현상의 정도의 차이는 존재하나 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 앞서 논의되었듯이 두 라디칼의 화학반응 시간이 유동시간에 비해 상대적으로 빠른 생성특성으로 인한 결과이다. 이러한 결과로부터 난류 화염장내에서 실험측정이 불가능한 O 라디칼에 대하여 OH 라디칼의 초과평형 현상을 통해 thermal NO 형성과정에 대한 연구의 가능성이 있음을 확인할 수 있다. Fig. 5에서 화염 A에서 최고 O 라디칼 농도가 존재하는 위치에서 수치결과와 실험결과에서 모두 온도는 거의 유사하게 나타나며 O 라디칼은 화염 B에 대하여 화염 A인 경우가 2배 가량 높게 나타나는 결과를 보인다. 그러나 NO의 경우 화염 B 경우가 수치, 실험결과에 대하여 각각 1.2와 2배의 높은 결과를 보여주고 있다. 본 연구에서 NO 생성은 식 (2)을 통한 thermal NO 만을 고려하였는데, 이와 같은 결과들은 앞서 설명된 유동 시간 스케일인 노즐과 특정 지점과의 거리에 따른 convective residence time($\propto x/U_{jet}$)로 부터 해석되어 질 수 있다. 즉, 화염 B인 경우가 느린 노즐 출구 속도와 상대적으로 긴 화염길이에 의하여 입자들이 고온의 영역에 체류하는 시간이 상대적으로 길게 되어 thermal NO 형성에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 이와 동일한 결과가 Fig. 3에서 축방향에 대한 OH와 NO 라디칼들의 분포를 보면 더욱 명확해 짐을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서 같은 레이놀즈 수를 갖는 비예혼합 CO/H₂/N₂ 난류 화염장에 대하여 RPV 난류연소 모델을 적용하였고, 실험결과와 비교해 보았을 때 신뢰성 있는 수치해석 결과를 얻을 수 있었다.

실제 실험결과와 수치해석결과를 통해 속도, 온도, 혼합분율과 주 화학종들 간에 상사가 존재를 확인하였다. 그러나 두 난류화염장내의 난류 유동 시간특성으로 인하여 라디칼의 초과평형 특성이 다름을 확인하였으며, 이에 단순 가정을 통한 Damköhler 수 분포를 구함으로써 다른 화염 구조에 대한 설명이 가능함을 확인하였다.

또한 본 RPV 난류연소 모델내의 CO 화학종의 화학반응을 고려할 때 빠른 화학반응과정을 갖는 다고 가정하였으나, 이에 대한 검증이 추가로 필요함을 수치결과로부터 확인할 수 있었으며 이에 대해 또 다른 반응 진행변수의 설정이 필요함을 확인하였다.

위와 같이 난류 제트 화염장내에서 느린 화학 반응 시간 스케일을 갖는 연소 생성물인 NO의 생성특성을 연구하기 위해서는 난류화염장내에서의 체류시간에 따른 NO 생성과정을 해석할 수 있는 개선된 난류연소 모델의 개발이 요망된다.

참 고 문 헌

- 1) J. Janicka, W. Kollmann, "A Two-Variables Formalism for the Treatment of Chemical Reactions in Turbulent H₂-Air Diffusion Flames," Proc. 19th Symp.(Int.) Comb., Combustion Institute, Pittsburgh, pp.421-430, 1979.
- 2) R. S. Barlow, G. J. Fiechtner, C. D. Carter, J.-Y. Chen, "Experiments on the Scalar Structure of Turbulent CO/H₂/N₂ Jet Flames," Combustion and Flame, Vol.120, pp.549-569, 2000.
- 3) J. Warnatz, U. Maas, R. W. Dibble, "Combustion, Springer-Verlag, Berlin, Germany," 1996.
- 4) S. M. Correa, M. C. Drake, R. W. Pitz, W. Shyy, "Prediction and Measurement of a Non-equilibrium Turbulent Diffusion Flame," Proc. 20th Symp.(Int.) Comb., Combustion Institute, Pittsburgh, pp.337-343, 1984.
- 5) S.-K. Kim, Y.-M. Kim, "Prediction of Detailed Structure and NO_x Formation Characteristics in Turbulent Nonpremixed Hydrogen Jet Flames," Combust. Sci. and Tech., Vol.156, pp. 107-137,

- 2000.
- 6) S. B. Pope, "An Explanation of the Turbulent Round Jet/ Plane Jet Anomaly," AIAA Journal, Vol.16, No.3, pp.279-281, 1978.
- 7) R. S. Barlow, R. W. Dibble, J.-Y. Chen, R. P. Lucht, "Effect of Damköhler Number on Super-equilibrium OH Concentration in Turbulent Nonpremixed Jet Flames," Combustion and Flame, Vol.82, pp.235-251, 1990.
- 8) S. B. Pope, S. M. Correa, "Joint Pdf Calculation of a Non-equilibrium Turbulent Diffusion Flame," Proc. 21th Symp.(Int.) Comb., Combustion Institute, Pittsburgh, pp.1341-1348, 1986.