

소염상태 근방에서의 대향류 수소확산화염의 구조

김 후중 (한양대학교 대학원), 김 용모 (한양대 기계공학과)

Near-Extinction Structure of Counterflow Nonpremixed Hydrogen-Air Flames

H.J. Kim and Y.M. Kim (Hanyang Univ.)

ABSTRACT

The axisymmetric Navier-Stokes model together with detailed chemical kinetics and variable transport properties has been applied to analyze the effects of the multidimensional flow on the flame characteristics in the nitrogen-diluted hydrogen counterflow nonpremixed flame. Computations are performed for two nozzle exit area-averaged velocities. Effects of multidimensional flow and strain rate on the near-extinction structure of the highly diluted hydrogen flames are discussed in detail.

1. 서론

청정연료 및 고속추진기관의 연료로서 중요성이 부각되고 있는 수소의 예혼합 및 확산화염의 구조에 대한 연구에 상당한 관심이 집중되고 있다. 특히 고속기관에서는 혼합 및 화학반응에 제한적인 체류시간을 갖기때문에 수소화염의 점화 및 소염과정은 중요한 문제로 인식되고 있으며 대향류 확산화염의 화염구조와 소염한계에 대하여 실험 및 수치적 연구들이 진행되고 있다.

대향류 수소 확산화염의 구조 및 소염특성을 해석하기 위해 행해진 대부분의 연구들[1-3]은 상사변환에 기초한 1차원 모델을 이용하였다. 1차원 모델이 화염구조나 점화 및 소염특성 등을 해석하는데 있어 매우 유용하지만 단순화시켜 적용된 가정들로 인하여 대향류 화염장의 해석에 한계를 지니고 있다. 이러한 1차원 모델은 제트의 크기, 두 노즐사이의 거리, 제트의 속도분포, 중심 제트와 주위 제트 사이에 형성되는 혼합영역 등과 관련된 다차원적인 영향을 적절히 반영할 수 없다. 또한 1차원 모델은 노즐 출구에서 정확한 속도 경계조건을 다룰수 없기 때문에 실험치와 예측치를 비교하는데 어려움이 있다. 또한 이로 인하여 1차원 해에 기초한 flamelet library는 flamelet model[4-6]을 이용하여 난류 화염장을 해석하는데 있어서 어느정도의 불확실성을 가지게 된다.

본 연구는 상세화학반응과 가변 수송상태량을 고려한 Navier-Stokes 모델을 이용하여 층류 수소 확산화염의 구조 및 소염특성에 미치는 다차원적인 유동장의 영향을 해석하는데 기초를 두고 있다. 질소로 희석된 수소를 연료로 이용하여 소염조건 근방에서의 화염구조 및 소염특성을 해석하기 위하여 노즐 출구에서 균일한 분출속도분포를 가지며 평균속도가 1.2m/s와 1.5m/s인 경우에 계산을 수행하였다. 수치적 결과를 기초로 하여 다차원적인 유동과 변형률(strain rate)이 화염구조 및 소염특성에 미치는 영향에 대하여 자세하게 나타내었다.

2. 지배방정식

N_s 개의 화학종을 포함하는 축대칭 화학반응이 수반된 유동장의 비정상 상태의 지배방정식을

원통좌표계에서 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v r)}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho \Phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \Phi)}{\partial z} + \frac{\partial(\rho v \Phi)}{\partial r} \\ & = \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma^\circ \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma^\circ \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) - \frac{\rho v \Phi}{r} + \frac{\Gamma^\circ}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + S^\circ \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, ρ 는 밀도, u, v 는 각각 속도벡터의 축방향과 반경방향의 속도, p 는 압력을 나타낸다. 식 (2)는 Φ 의 위치에 들어가는 변수에 따라 운동량, 화학종, 에너지 방정식을 나타낸다. Table 1에는 식(2)에서 사용되는 수송확산계수, Γ° 와 생성항, S° 가 주어져 있으며 여기서 μ, λ 와 c_p 는 각각 혼합물의 점성계수, 열전도계수, 정압비열을 나타내며 Y_i 와 $\dot{\omega}_i$ 는 i 번째 화학종의 질량분율과 질량생성율을 나타내며 ρ_0 는 공기의 밀도를 g 는 중력가속도를 각각 나타낸다. 수송물성치, D_{i-N_2} 는 i 번째 화학종과 질소와의 혼합물에서 그 화학종의 질량확산계수를 나타낸다. 엔탈피 H 는 다음과 같이 정의된다.

$$H \equiv \int_{T_0}^T c_p dT \equiv \sum_1^{N_1} Y_i H_i \equiv \sum_1^{N_1} Y_i (h_i - h_{i,0}^\circ)$$

여기서, h 와 h_i° 는 전체엔탈피와 표준상태(온도 T_0)에서 생성엔탈피를 나타내고 Le_i 는 i 번째 화학종의 Lewis수를 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$Le_i \equiv \frac{\lambda}{\rho D_{i-N_2} c_p}$$

그리고 이상기체 상태방정식은 다음과 같다.

$$p = \rho T R_0 \sum_1^{N_1} \left(\frac{Y_i}{M_i} \right) \quad (3)$$

여기서, R_0 는 일반 기체상수, T 는 온도, M_i 는 i 번째 화학종의 분자량을 각각 나타낸다.

TABLE 1

Transport Coefficient and Source Terms Appearing in Governing Equations

Φ	Γ°	S°
u	μ	$-\frac{\partial p}{\partial z} + (\rho_0 - \rho)g + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\mu}{r} \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{2}{3} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{v}{r} \right) \right\}$
v	μ	$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\mu}{r} \frac{\partial v}{\partial r} - 2\mu \frac{v}{r^2} - \frac{2}{3} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu \frac{v}{r} \right) \right\}$
$(i=1-N_2-1)$	$\rho D_{i-N_2} \frac{Y_i}{(i=1-N_2-1)}$	$\dot{\omega}_i$
H	$\frac{\lambda}{c_p}$	$\nabla \left[\frac{\lambda}{c_p} \sum_{i=1}^{N_1} \{ (Le_i^{-1} - 1) H_i \nabla Y_i \} \right] - \sum_{i=1}^{N_1} (h_{i,0}^\circ \dot{\omega}_i)$

3. 화학반응식 및 가변 수송상태량

본 연구에서 사용되는 화학반응모델은 H₂, O₂, O, H, OH, HO₂, H₂O, H₂O₂, N₂와 같은 9개의 화학종을 포함하며 21개의 기본적인 반응에 대한 순반응상수는 Table 2에 나타내었다. 여기서, M은 분자간의 충돌과정에서 생성되는 과도한 에너지를 흡수하는 thirdbody를 나타낸다.

이러한 화학반응에서 단위체적당, 단위시간당 화학종 i의 생성률은 다음식에 의해 결정된다.

$$\omega_i = M_i \sum_{k=1}^M (\nu''_{i,k} - \nu'_{i,k}) \left[k_{f,k} \prod_{j=1}^N \left(\frac{\rho Y_j}{M_j} \right)^{\nu'_{j,k}} - k_{r,k} \prod_{j=1}^N \left(\frac{\rho Y_j}{M_j} \right)^{\nu''_{j,k}} \right] \quad i=1, \dots, N \quad (4)$$

여기서 M은 기본반응식의 갯수이며 N은 화학반응에 포함된 화학종의 갯수이며 $\nu'_{i,k}$ 와 $\nu''_{i,k}$ ($k=1, \dots, M$)는 k번째 반응의 반응물과 생성물의 화학당량계수를 나타낸다.

식 (4)에서 k번째 반응의 순반응상수는 다음과 같은 Arrhenius 형태를 갖는다.

$$k_{f,k} = A_k T^{\beta_k} \exp(-E_k/RT)$$

여기서, A_k 는 preexponential factor, β_k 는 온도지수, 그리고 E_k 는 활성화에너지를 나타낸다. 그리고 역반응상수는 순반응상수와 평형상수를 이용하여 계산한다.

TABLE 2

Specific Reaction-Rate Constants for the Hydrogen Oxygen System

No.	Reactions	A	n	E
1	H + O ₂ ⇌ OH + O	3.52 × 10 ¹⁶	-0.7	17070
2	H ₂ + O ⇌ OH + H	5.06 × 10 ⁴	2.67	6290
3	OH + OH ⇌ H ₂ O + O	k = 5.46 × 10 ¹¹ exp(0.00149T)		
4	H ₂ + OH ⇌ H ₂ O + H	1.17 × 10 ⁹	1.3	3626
5 ^a	H + O ₂ + M ⇌ HO ₂ + M	6.76 × 10 ¹⁹	-1.42	0
6	H + HO ₂ ⇌ OH + OH	1.70 × 10 ¹⁴	0.0	874
7	H + HO ₂ ⇌ H ₂ + O ₂	4.28 × 10 ¹³	0.0	1411
8	OH + HO ₂ ⇌ H ₂ O + O ₂	2.89 × 10 ¹³	0.0	-497
9 ^b	H + H + M ⇌ H ₂ + M	1.80 × 10 ¹⁸	-1.0	0
10 ^a	H + OH + M ⇌ H ₂ O + M	2.20 × 10 ²²	-2.0	0
11	HO ₂ + HO ₂ ⇌ H ₂ O ₂ + O ₂	3.02 × 10 ¹²	0.0	1390
12 ^c	H ₂ O ₂ + M ⇌ OH + OH + M	1.20 × 10 ¹⁷	0.0	45500
13	H ₂ O ₂ + OH ⇌ H ₂ O + HO ₂	7.08 × 10 ¹²	0.0	1430
14	O + HO ₂ ⇌ OH + O ₂	2.00 × 10 ¹³	0.0	0
15	H + HO ₂ ⇌ O + H ₂ O	3.10 × 10 ¹³	0.0	1720
16 ^a	H + O + M ⇌ OH + M	6.20 × 10 ¹⁶	-0.6	0
17 ^a	O + O + M ⇌ O ₂ + M	6.17 × 10 ¹⁵	-0.5	0
18	H ₂ O ₂ + H ⇌ H ₂ O + OH	1.00 × 10 ¹³	0.0	3590
19	H ₂ O ₂ + H ⇌ HO ₂ + H ₂	4.79 × 10 ¹³	0.0	7950
20	O + OH + M ⇌ HO ₂ + M	1.00 × 10 ¹⁶	0.0	0
21	H ₂ + O ₂ ⇌ OH + OH	1.70 × 10 ¹³	0.0	47780

Units : mol/cm³, s⁻¹, K, cal/mol

^a Chaperon Efficiencies : H₂:2.5, H₂O:12.0, O₂:1.0 and N₂:1.0

^b Chaperon Efficiencies : H₂:1.0, H₂O:6.5, O₂:0.4 and N₂:0.4

^c Chaperon Efficiencies : H₂:2.5, H₂O:15.0, O₂:1.0 and N₂:1.0

Application range : Temperature : 300K ~ 3000K

Pressure : 0.25 atm - 10 atm

지배방정식을 풀기 위해서는 Table 1에 나타나는 열역학적 상태량과 수송상태량에 대한 정보가 필요로 하게되며 이러한 상태량들은 온도나 화학종의 조성비에 따라 결정된다. 엔탈피와 정압비열은 JANAF 데이터[7]를 이용하여 구하며 개개의 화학종에 대하여 점성계수와 열 전도계수는 Chapman-Enskog의 충돌이론으로 혼합물에 대한 점성계수와 열전도계수는 Wilke의 공식으로 구한다. 또한 Chapman-Enskog의 이론과 Lennard-Jones potential을 이용하여 상호 확산계수(binary diffusion coefficient)를 계산한다.[8]

4. 수치모델링

Eulerian 좌표계에서 기상보존방정식들은 개선된 PISO알고리즘[9]과 유사한 유동해석법으로 다루어지나 본 연구에서 사용된 수치모델은 분리오차(splitting error)를 줄일수 있는 알고리즘을 사용하였다. 밀도, 온도, 그리고 질량분율에 있어서의 급격하고 큰 변화를 반영하기 위해 화학종 질량분율과 에너지에 대한 보존방정식은 속도-압력-밀도장의 결합을 다루기 위해 예측/복수교정 계산절차내에서 계산하였다. 수치확산의 영향을 최소화하기위해 대류항은 공간에 대한 2차 정확도를 가지는 TVD(Total Variation Diminishing) 풍상차분법[10]을 사용하였다. 수치안정성과 정확성에 큰 영향을 미치는 화학반응 생성항은 유체역학적 연산자와 화학반응 연산자가 동일한 예측 및 복수교정 수치절차내에서 처리되게하여 두 연산자간의 강한 수치적 결합을 갖게 하였다.

5. 결과 및 고찰

Fig.1(a)는 정체점 근방에서 형성되는 대향류 축대칭 층류 수소 확산화염의 계통도를 나타낸 것이다. 실험[11]에서 사용된 대향류 연소기는 직경이 20mm인 두 노즐로 구성되었으며 양 노즐사이의 거리는 20mm이다. 공기는 아래쪽 노즐에서 분출되며 질소로 희석된 수소는 위쪽 노즐에서 분출된다. 공기와 연료제트 주위에서 재순환과 2차 연소를 방지하기 위하여 질소를 낮은 속도로 분출된다. 본 연구에서 적용한 형상은 상대적으로 큰 지름을 가지므로 소염조건 근처에서 연소 유동장을 층류로 유지시키기 위하여 이전의 연구[12]에서 채택한 연료보다 훨씬 더 질소로 희석된 연료(14% H₂, 86% N₂)를 사용하였다. 소염조건 근처에서 연소유동장은 물성치의 급격한 변화를 가지므로 격자계에 매우 민감하다. 그러므로 본 연구에서는 주어진 지배방정식을 화염 영역과 중심축 근처에 밀집된 60×59 비균일 직교격자계를 이용하여 계산하였으며 계산영역은 Fig.1(b)에 나타나 있다. 소염조건 근처의 화염장을 해석하기 위하여 균일한 속도분포를 가지며 분출 평균속도가 각각 1.2m/s와 1.5m/s인 경우에 대하여 계산을 실시하였다. 각각의 경우 분출온도는 300K이다. 경계조건으로 대칭축에서 모든 변수의 구배가 0이 되도록 하였으며 출구에서는 외압조건을 이용하였다.

Fig.2는 두 분출속도에 대하여 등온선을 나타낸 것이다. 분출속도가 1.2m/s인 경우에 대하여 z=10mm 근방에서 6mm<r<8mm 지점에서의 온도가 r<6mm 또는 r>8mm인 지점에서의 온도보다 상대적으로 낮게 예측되었으며 이는 이 지점에서 상대적으로 큰 화염의 신장으로 인한 것으로 사료된다. 분출속도가 1.5m/s인 경우에는 r>5mm인 영역에서는 화염이 거의 존재하지 않으며 중심축 근방에서 큰 곡률과 다차원적인 형태를 가지는 작은 화염장이 존재함을 알 수 있다. 게다가 이러한 소염조건 근처에서의 화염은 1차원 모델에서 요구되어지는 평평한 화염을 더 이상 유지하지 않는다. 이러한 수치결과는 r>5mm인 지점에서 변형률(strain rate)의 증가로 인하여 국부적인 소염이 발생하였으며 소염조건 근처에서의 화염구조는 훨씬 더 다차원적인 형태를 가지게 되는 것을 나타내어 주고있다.

Fig.3은 두 분출속도에 대한 속도장을 나타내고 있다. 분출속도가 1.2m/s인 경우에는 넓은 영역에 걸쳐 화염이 존재하며 이 화염영역에서는 정체면을 기준으로 축방향으로 팽창하면서 반경 방향으로 유동이 진행된다. 분출속도가 1.5m/s인 경우 중심축 근처에 작은 화염영역을 가지므로

화염에 의한 팽창효과는 두드러지게 나타나지 않는다. 화염 끝 부분에서 국부적인 소염의 발생으로 말미암아 온도상승에 의한 팽창효과는 사라지게 되며 이로 인해 이 부분에서 상대적으로 큰 축방향 속도성분을 가지나 국부소염이 일어나는 flame tip의 외곽영역($r > 5\text{mm}$)에서는 소염으로 인한 고온의 연소생성물의 온도 감소 때문에 반경방향 속도는 다소 감소하는 경향을 나타내고 있다.

Fig.4(a)-(b)는 중심축을 따르는 축방향 속도와 축방향 속도구배를 나타내고 있다. 분출속도가 1.2m/s와 1.5m/s인 경우에 변형률은 각각 204s^{-1} 와 259s^{-1} 로 나타났다. 이 경우에 변형률은 화염영역의 공기쪽 상류에서 중심축을 따르는 최대 축방향 속도구배로 정의된다. 분출속도를 1.5m/s로 부터 약간만 증가시켜도 완전한 소염을 일으키므로 계산된 변형률, 259s^{-1} 를 소염변형률로 간주해도 타당하다. 86%의 질소로 희석된 수소를 연료로 사용하는 경우에 대하여 Papas등[13]은 LDV 속도 측정치로 부터 소염변형률을 구하였으며 이 값은 171s^{-1} 와 266s^{-1} 사이에 존재한다. 본 연구에서 예측한 소염변형률(259s^{-1})은 실험에서 구한 변형률 영역 내에 존재하며 상한값(266s^{-1})에 더 근접한 값을 가진다. 실험상에서 정의된 변형률은 노즐의 지름, 두 노즐사이의 거리, 정체면의 위치, 변형률을 정의하는 위치, 연료나 공기제트 주위의 질소 분류등과 같은 여러 요인에 영향을 받으므로 어느 정도 불확실성은 존재하게 된다. 그러므로 속도, 온도, 주요 화학종 및 라디칼에 대한 기준이 되는 실험값에 대하여 다차원 수치모델의 체계적인 검증이 필요하며 이러한 관점에서 대항류 수소 확산화염의 세부구조와 소염과정에 대한 상세한 실험적인 연구와 수치적인 연구가 필요하다고 사료된다.

Fig.4(c)-(d)는 화염위치를 따라 반경방향의 속도와 속도구배를 나타낸다. 상대적으로 낮은 변형률을 가지는 경우($V_{ex}=1.2\text{m/s}$), $r=0.016\text{m}$ 인 지점까지 화염영역으로 연속적인 반응물의 유입으로 인하여 반경방향의 속도가 증가한다. 그러나 높은 변형률을 가지는 경우에는 $r=0.0045\text{m}$ 인 지점까지 반경방향의 속도가 증가하다가 소염으로 인한 온도감소로 $r=0.007\text{m}$ 인 지점까지 지속적인 감소를 보인다. 이러한 영역에서 국부적인 소염으로 인한 속도의 감소는 주요 화학종 및 라디칼의 체류시간을 증가시켜 소염으로 진행되는 과정 및 소염변형률에 다소 영향을 미칠것으로 사료된다.

Fig.5는 중심축을 따라 온도 및 주요 화학종의 농도분포를 나타낸 것이다. 변형률이 증가함에 따라 화염의 두께와 최고온도는 약간 감소하며 주요 화학종(H_2 , O_2)이 화염영역에서 화학반응의 비평형과정으로 인해 완전 연소되지 않고 누설되는 정도가 증가됨을 알 수 있다. 또한 산소가 풍부한 화염영역은 상당한 차이를 보이는 반면 연료가 풍부한 영역에서의 화염구조는 약간 변화된 것을 볼 수 있다. Fig.6은 최고온도를 가지는 축방향 위치에서 라디칼의 농도, 라디칼의 생성률, 온도, 그리고 열발생률의 반경방향의 분포를 나타낸 것이다. 화염영역 근처($0.006\text{m} < r < 0.012\text{m}$)에서 분출속도가 1.2m/s인 경우 체류시간의 감소와 차가운 반응물의 유입의 증가로 인해 온도가 약간 감소한다. 분출속도가 1.2m/s에서 점점 더 증가시키면 이 영역에서 온도는 계속 감소하며 결국 소염이 발생하게 된다. 분출속도가 1.5m/s인 경우 $0.005\text{m} < r < 0.008\text{m}$ 인 영역에서 온도 및 주요 라디칼(O , H , OH)의 농도는 급격한 감소를 보이는 반면 HO_2 의 농도는 최대값을 갖는다. 또한 이 영역에서 반경방향의 속도와 속도구배의 감소로 인한 체류시간의 증가로 열발생률은 증가함을 알 수 있다. 국부적으로 속도가 감소하는 영역에서 혼합물의 체류시간의 증가로 인하여 화염 끝 부분에서 온도구배와 고온의 화염장에서 저온의 혼합물로의 열전달률은 감소하게 되며 이로 인해 소염으로 진행되는 과정을 다소 지연시키는데 기여하리라 사료된다.

Fig.7은 HO_2 의 농도분포를 나타낸 것이다. HO_2 의 질량분율의 최대값은 산소가 풍부한 화염영역 끝부분에서 나타난다. 분출속도가 1.5m/s인 경우에는 HO_2 의 농도가 최대값을 가지는 영역이 연료가 풍부한 화염영역까지 확장되어 나타남을 알 수 있다. 화염 끝 부분까지 수송된 O 와 OH 라디칼은 HO_2 를 형성하기 위하여 반응하며 이러한 반응으로 인한 라디칼의 감소는 $r > 5\text{mm}$ 인 영역에서 소염을 야기하는 것으로 사료된다.

변형률이 소염조건 근처에서의 화염구조에 미치는 영향을 좀 더 자세히 살펴보기 위하여 중심축을 따르는 ξ_{H} 와 ξ_{O} , 온도, 그리고 스칼라 소산율(scalar dissipation rate)의 분포를 Fig.8에 나타내었다. 화염영역에서 화학종의 확산속도의 차이로 발생하는 편중확산(preferential

diffusion)의 영향으로 수소원자에 대한 혼합분율(mixture fraction)의 구배는 단조롭지 않을 볼 수 있다. 예상한대로 이러한 편중확산의 영향은 넓은 화염의 두께를 가지는 낮은 변형률의 경우에 약간 더 크게 나타났다. 화염영역에서 단조로운 변화를 가지는 혼합물의 변수로서 Dixon-Lewis등[1]은 다음과 같은 평균 혼합분율을 적용하였다.

$$\xi_M = \frac{(\xi_O + \xi_N + 3\xi_H)}{5}$$

Fig.8(b)는 ξ_M 에 대한 온도분포와 다음식과 같이 정의되는 스칼라 소산율, χ_M 의 분포를 보여준다.

$$\chi_M = 2D \left(\frac{d\xi_M}{dx} \right)^2$$

여기서, D는 물 가중 평균 확산계수를 나타낸다. 본 연구에서 적용한 연료에 대한 평균 혼합분율의 화학양론적 값은 0.717이며 두 경우 모두 최고온도는 약간 연료가 희박한 영역에 위치한다. 두 경우 모두 χ_M 의 최대값은 화학양론적인 혼합물의 조건이나 최대온도를 가지는 위치보다 훨씬 더 연료가 희박한 영역($\xi_M=0.52$)에 존재한다. 변형률이 증가하면 연료가 희박한 영역에서 χ_M 는 크게 증가하는 반면 연료가 농후한 영역에서 χ_M 은 거의 같은 값을 갖는다. 이는 연료가 희박한 영역에서 화염두께의 감소를 반영한다. 본 연구에서 얻은 수치결과로써 화염의 소멸과정은 라디칼의 생성, 열발생, 라디칼과 열의 확산과 대류에 의한 손실 사이에 복잡한 상호작용에 의해 조절됨을 알 수 있다.

6. 결론

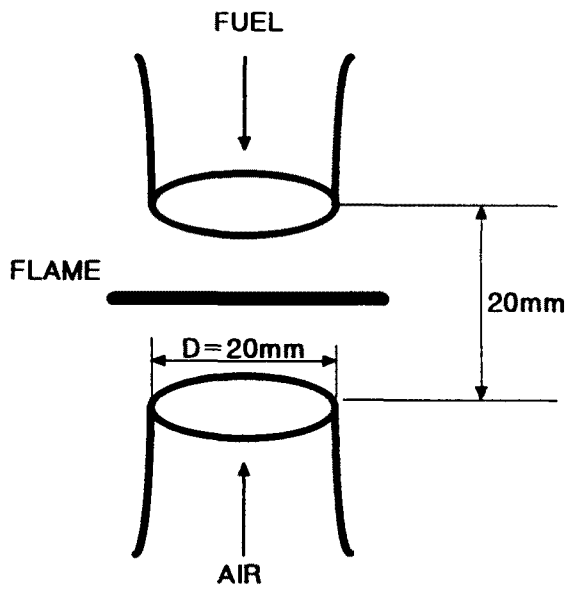
상세 화학반응과 가변 수송상태량을 고려한 축대칭 Navier-Stokes 모델을 이용하여 대향류 수소 확산화염의 구조와 소멸과정에 분출속도가 미치는 영향을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 본 연구에서 사용한 축대칭 모델은 화염의 특성, 소멸상태 근처에서의 다차원적인 구조, 그리고 소멸변형률 등을 잘 예측하였다.
- 2) 분출속도를 1.2m/s에서 1.5m/s로 증가시키에 따라 $r > 5\text{mm}$ 인 지점에서 변형률에 의한 국부적인 소멸이 발생하였으며 소멸조건 근방에서의 화염구조는 훨씬 더 다차원적인 구조를 가지게 된다. 국부적인 소멸으로 인한 속도 감소로 주요 화학종 및 라디칼의 체류시간은 증가하며 이는 소멸과정 및 소멸변형률에 다소 영향을 미칠것으로 사료된다.
- 3) 변형률의 증가로 인해 스칼라 소산율은 연료가 희박한 영역에서 크게 증가한 반면 연료가 농후한 영역에서는 거의 비슷한 값을 가졌으며 이로인해 연료가 희박한 영역에서 화염의 두께를 감소시키는 결과를 가져왔다. 또한 스칼라 소산율의 최대치는 혼합물의 화학양론적인 조건이나 최대온도를 가지는 위치보다 훨씬 더 희박한 영역에 위치하였다.
- 4) 본 연구에서 얻은 수치결과로써 화염의 소멸과정은 라디칼의 생성, 열발생, 라디칼과 열의 확산과 대류에 의한 손실 사이에 복잡한 상호작용에 의해 조절됨을 알 수 있었다.
- 5) 앞으로의 연구는 속도, 온도, 주요 화학종 및 라디칼에 대한 기준이 되는 실험값에 대하여 다차원 수치모델의 체계적인 검증이 필요하며 이러한 관점에서 대향류 수소 확산화염의 세부구조와 소멸과정에 대한 상세한 실험적인 연구와 수치적인 연구가 필요하다고 사료된다.

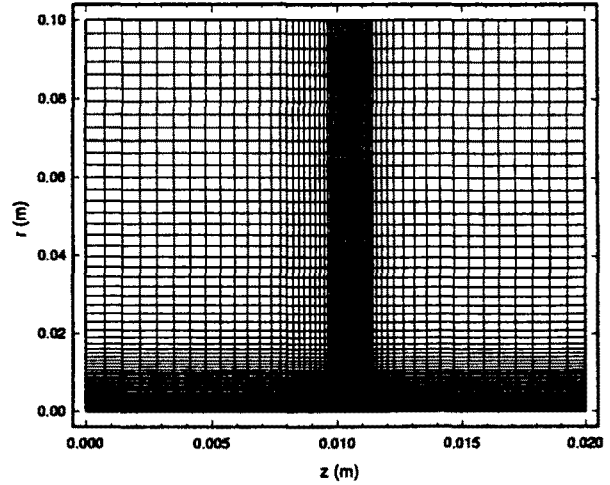
참고문헌

- 1) Dixon-Lewis, G. and Missaghi, M. "Structure and extinction limits of counterflow diffusion flames of hydrogen-nitrogen mixtures in air," *Twenty-Second Symposium*

- (*International*) on Combustion, The Combustion Institute, p1461, 1988.
- 2) Gutheil, E. and Williams, F.A. "A numerical and asymptotic investigation of structures and extinction of hydrogen-air diffusion flames at pressures and temperatures of high-speed combustion," *Twenty-Third Symposium on Combustion*, The Combustion Institute, p513, 1990.
 - 3) Darabiha, N., Candel, S. "The influence of the temperature on extinction and ignition limits of strained hydrogen-air diffusion flames," *Combust. Sci. and Tech.*, vol.86, p67, 1992.
 - 4) Peters, N. "Laminar diffusion flamelet models in non premixed turbulent combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol.16, p319, 1984.
 - 5) Veynante, D., Lacas, F., and Candel, S. "Numerical simulation of the transient post ignition regime of a turbulent diffusion flame," *AIAA Journal*, vol.29, p848, 1991.
 - 6) Candel, S., Veynante, D., Lacas, F., Darabiha, N., and Rolon, C. "Current progress and future trends in turbulent combustion," *Combust. Sci. and Tech.* vol.98, p245, 1994.
 - 7) Chase, M. JANAF Thermodynamic Tables, 3rd edition, American Chemical Society and American Institute of Physics for the National Bureau of Standards, 1986.
 - 8) Kee, R.J., Warnatz, J., and Miller, J.A. "A FORTRAN computer code package for the evaluation of gas-phase viscosities, conductivities, and diffusion coefficients," Sandia Report, SAND83-8920, 1983.
 - 9) Kim, Y.M., Chen, C.P., Ziebarth, J.P., and Chen, Y.S. "Prediction of fast transient spray-combustion flows," *Numerical Heat Transfer*, vol.25, p21, 1994.
 - 10) Chakravarthy, S.R., and Osher, S. "A new class of high accuracy TVD schemes for hypersonic conservation laws," AIAA-85-0363, 23rd Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV., 1985.
 - 11) Daguse, T., Croonenbroek, T., Rolon, J.C., Darabiha, N., and Soufiani, A. "Study of radiative effects on laminar counterflow $H_2/O_2/N_2$ diffusion flames," *Combustion and Flame*, vol.106, p271, 1996.
 - 12) 김 후중, 김 용모, "대향류 수소 확산화염의 축대칭 모델," 대한기계학회 추계학술대회논문집, p695, 1996.
 - 13) Papas, P., Glassman, I., and Law, C.K. "Effects of pressure and dilution on the extinction of counterflow nonpremixed hydrogen-air flames," *Twenty-Fifth Symposium on Combustion*, p1333, 1994.



(a) Schematic of burner geometry



(b) grid arrangement

Fig.1 Schematic of burner geometry and grid arrangement.

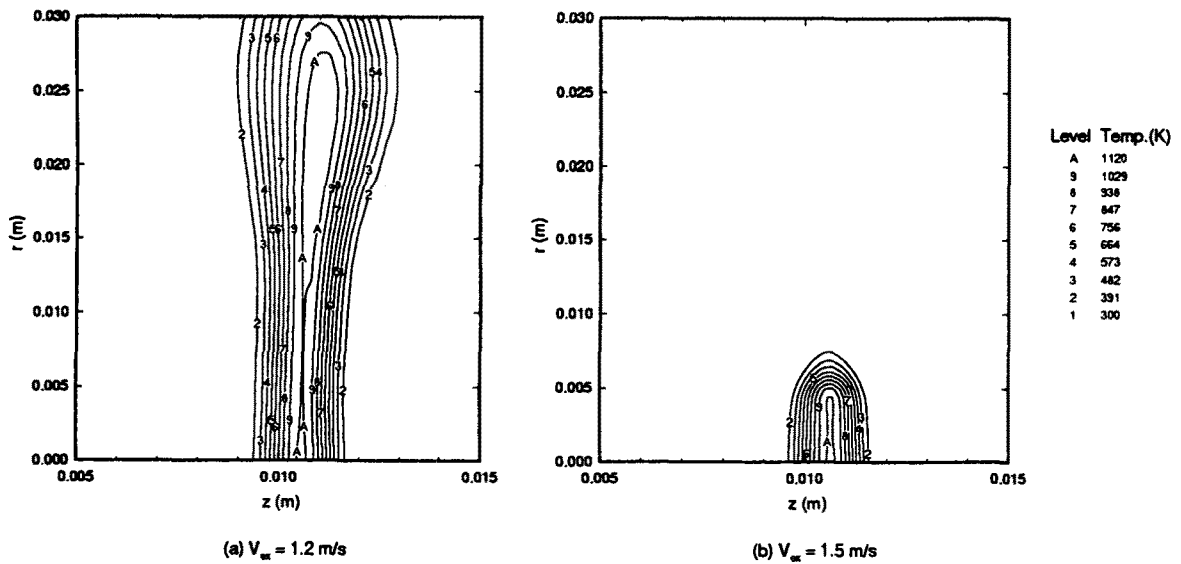


Fig.2 Temperature contours of counterflow hydrogen diffusion flames for $V_{ex}=1.2$ m/s and $V_{ex}=1.5$ m/s.

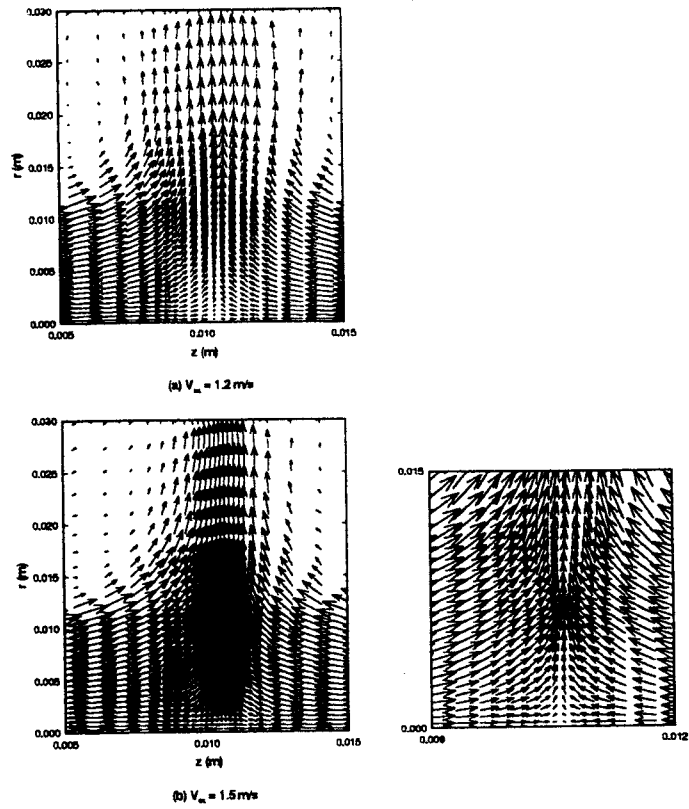


Fig.3 Velocity vectors of counterflow hydrogen diffusion flames for $V_{ex}=1.2\text{m/s}$ and $V_{ex}=1.5\text{m/s}$.

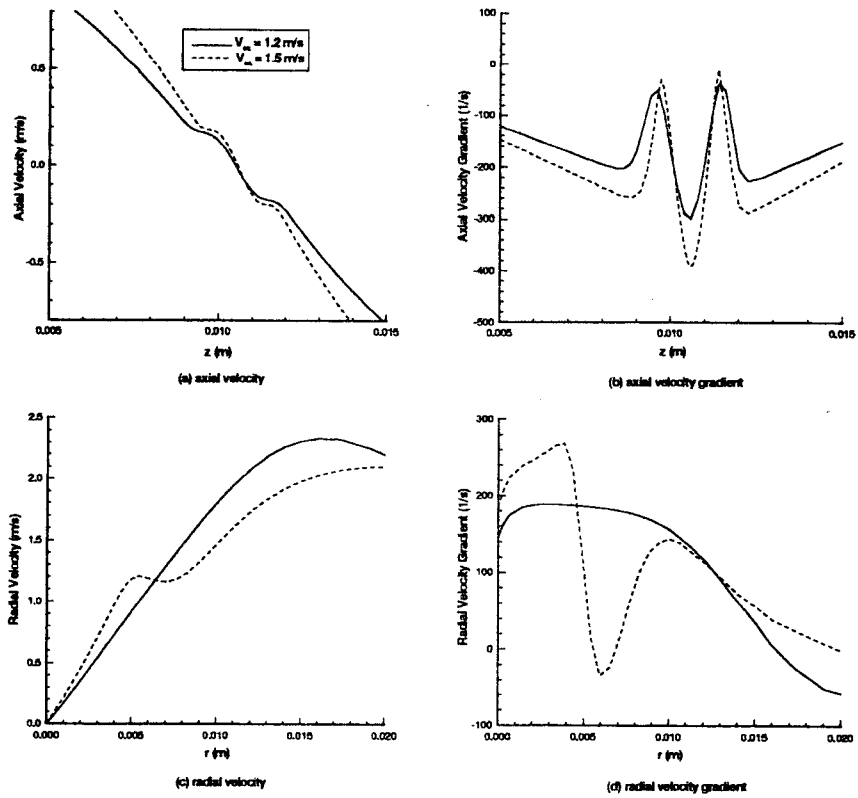


Fig.4 Axial and radial profiles of velocity and velocity gradient.

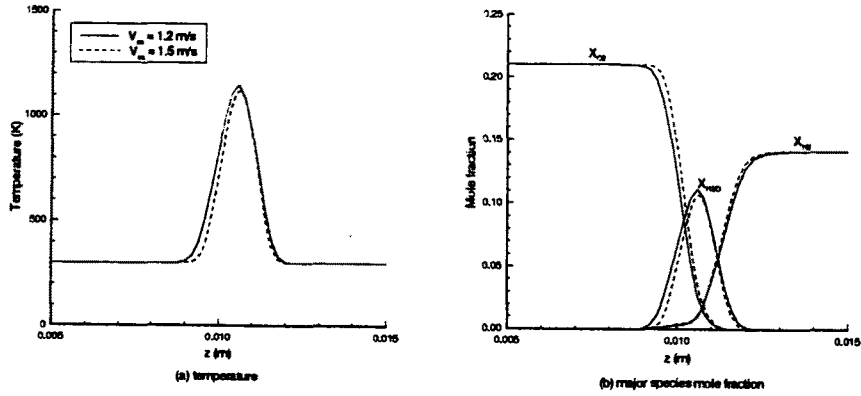


Fig.5 Centerline profiles of temperature and mole fraction of major species.

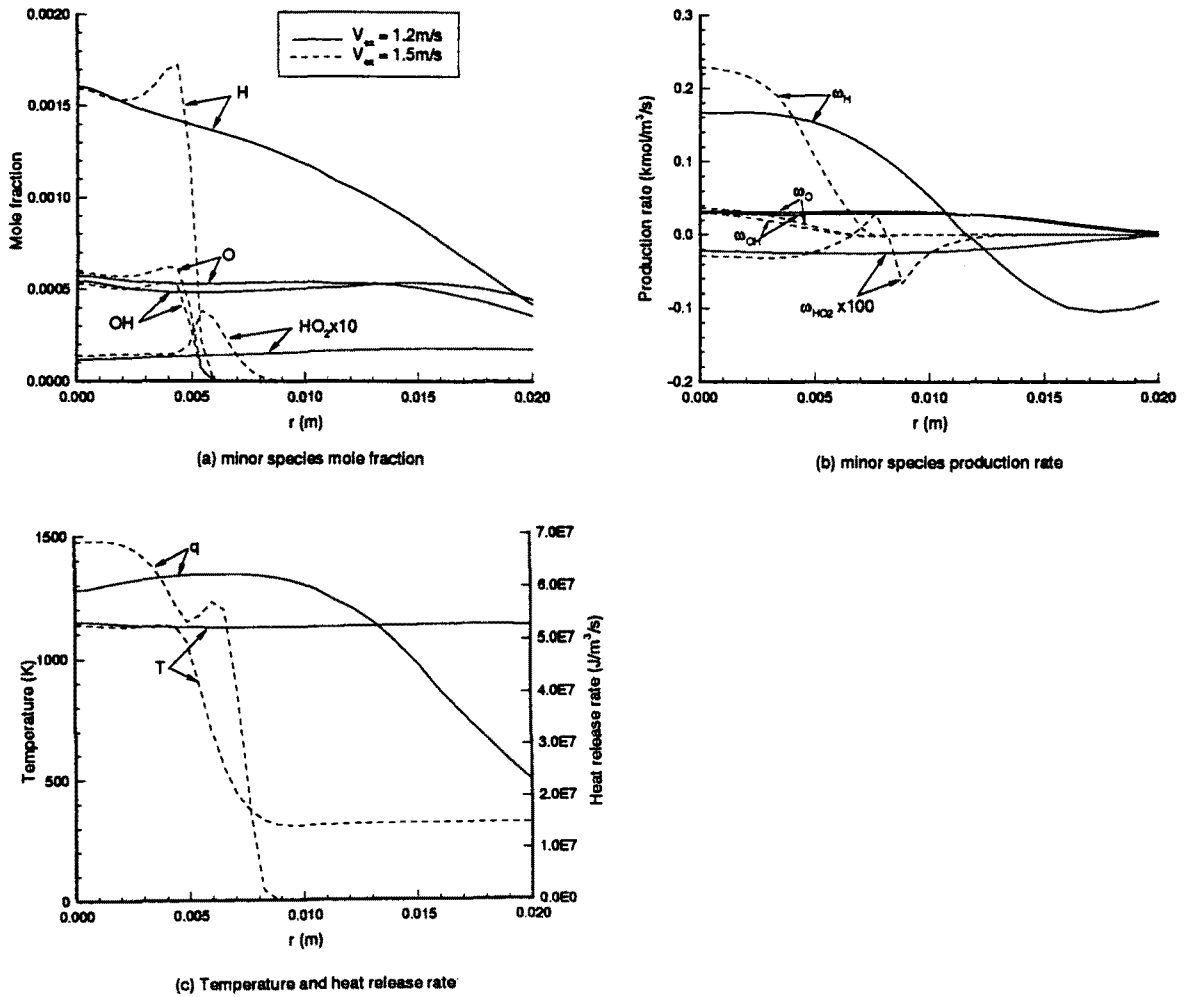


Fig.6 Radial profiles of mole fraction of radicals, production rate of radicals, temperature, and heat release rate.

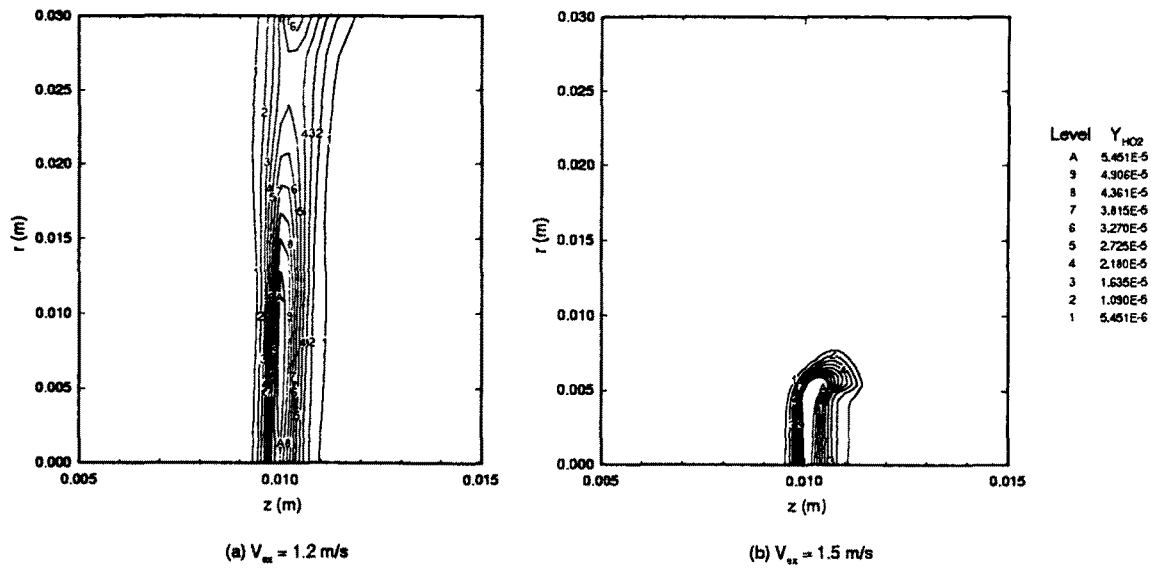


Fig.7 Contours of HO₂ mass fraction for the highly diluted hydrogen flames.

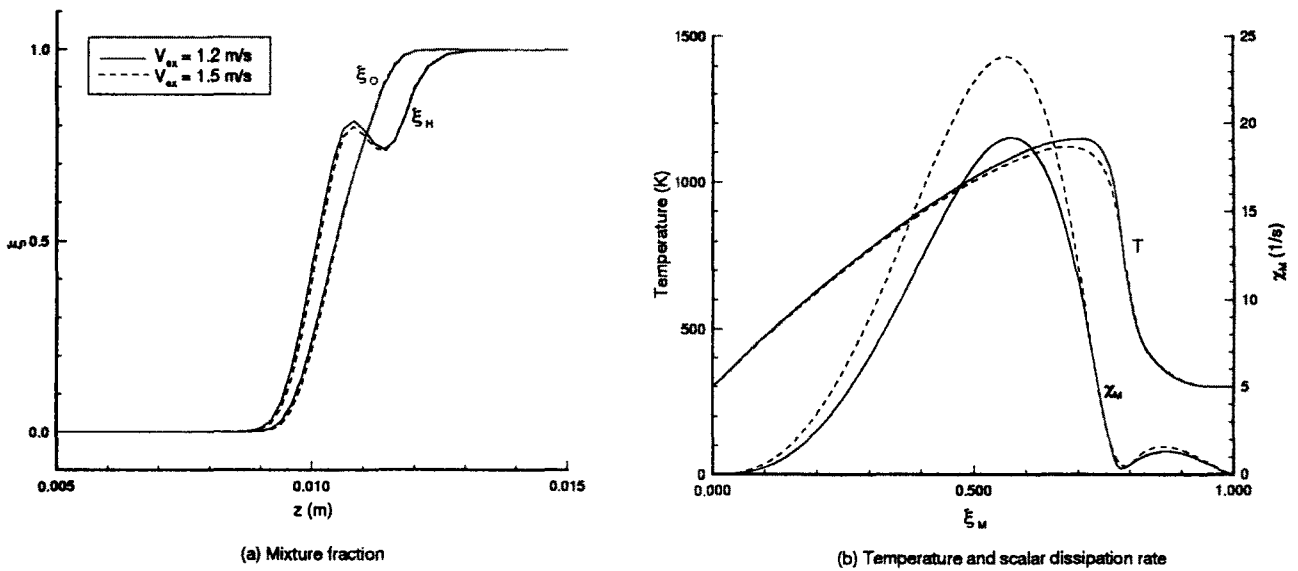


Fig.8 Centerline profiles of mixture fractions and distribution of temperature and scalar dissipation rate versus ξ_M .