

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2011.35.6.625

ISSN 1226-4881

화염제어 연속계산법을 이용한 CH₄-고온공기 확산화염의 점화특성 연구

송금미* · 오창보*†

* 부경대학교 안전공학과

Study of Ignition Characteristics of CH₄/Hot Air Diffusion Flame Using a Flame-Controlling Continuation Method

Keum Mi Song* and Chang Bo Oh*†

* Dept. of Safety Engineering, Pukyong Nat'l Univ.,

(Received January 10, 2011 ; Revised March 23, 2011 ; Accepted March 25, 2011)

Key Words: Ignition(점화), Flame-Controlling Continuation Method(화염제어 연속계산법), S-Curve(S-곡선)

초록: CH₄-고온공기 대향류 확산화염의 점화특성을 화염제어 연속계산법을 이용하여 수치해석적으로 검토하였다. 화학반응의 계산에는 GRI-v1.2 반응기구를 이용하였으며, 화염 최고온도를 총괄 스트레인의 역수에 대해 나타내어 점화 및 소화특성에 관한 화염 최고온도의 S-곡선을 얻을 수 있었다. 총괄 스트레인을 변화에 따른 화염구조를 고찰하기 위해 S-곡선에서 Upper Branch와 Middle Branch의 화염 온도 분포와 속도구배를 비교하였다. 총괄 스트레인을 값은 화염면과 혼합층의 연료과 공기측 경계에서 정의 되는 국소 스트레인을 값과도 비교하였다. 연료측과 공기측의 국소 스트레인은 총괄 스트레인과 좋은 상관관계에 있음을 알 수 있었다. 화염제어 연속계산법이 확산화염의 점화, 소화특성을 검토하는데 매우 유용한 방법임을 확인하였다.

Abstract: The ignition characteristics of a CH₄/hot air counterflow diffusion flame were investigated numerically using a flame-controlling continuation method. For the chemical reactions, the GRI-v1.2 reaction mechanism was used in the simulation. The maximum flame temperature was presented in the space of the inverse global strain rate, and showed S-curve-type behavior. The flame temperatures and velocities of the upper and middle branches were compared for different global strain rates. In addition, the global strain rate was compared with the local strain rates defined at the flame surface and the boundaries of the fuel and oxidizer sides of the fuel/air mixing layer. These local strain rates correlated well with the global strain rate.

1. 서론

산업체의 열설비나 동력장치의 대부분은 화석 연료의 화학에너지를 연소과정을 통해 열에너지로 변환하여 사용하는 구조로 되어 있다. 현재 사용 중인 대부분의 화석연료는 연소과정 중에 필연적으로 온실가스인 CO₂나 SO_x, NO_x, 매연(soot)과 같은 오염물질을 배출하게 된다. 이러한 화석연료의 연소과정 중에서 후처리없이 온실가스를 줄이기 위한 방법은 연소효율을 높임으로써 연료소모량을 줄이는 방법이 유일하다. 최근 연

소효율을 높이는 연소방법으로 마일드연소(Mild combustion)에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.^(1~7) 이 마일드 연소는 연소효율을 높이기 위해서 버려지는 배기가스의 열을 유입되는 공기쪽으로 재순환시킴으로써 폐열을 활용하게 되어 열효율을 높임과 동시에 유입되는 공기류의 온도를 높임으로써 공기류 중의 산소농도를 낮추어도 연소가 가능하도록 하는 연소방법이다. 이러한 연소과정에서는 별도의 점화원이 필요없고 유입되는 고온공기류에 의해 연료가 저절로 점화되는 특성을 갖는다. 따라서 연소실 내부에서는 통상 화염면과 같이 국부적으로 온도가 높아지는 영역이 거의 나타나지 않고 통상의 화염대보다는 온도가 낮은 반응대가 연소실에 넓게 분포하는 특

† Corresponding Author, cboh@pknu.ac.kr

정을 갖는다. 이러한 연소실 내부의 온도분포 특성은 NO_x의 생성에 영향을 주게 되어 배출량이 저감되는 장점이 있다.⁽¹⁻⁷⁾

통상적인 마일드 연소장은 연료와 배기가스에 포함된 고온 공기가 만나 자연적으로 점화되어 연소가 지속되는 특징을 보인다. 이러한 마일드 연소장의 국소구조는 연료와 고온 공기류가 반대측에서 만나 저절로 점화 및 반응대를 형성하는 1차원 대향류 연소장으로 모델링 될 수가 있다. 따라서 마일드 연소장의 특징을 검토하기 위해서 통상의 확산화염처럼 대향류화염을 이용할 수 있으며, 다양한 조건에 대한 기초적인 마일드 연소 특성을 수치해석적으로도 매우 용이하게 구현할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 CH₄을 연료로 하는 고온 공기류에 의한 연소특성을 고찰하기 위해 대향류 연소장에서 점화특성을 검토하였다. 우선 기초단계의 연구임을 고려하여 별도의 점화원이 필요없고 연료가 저절로 점화될 수 있는 고온 공기류에 의한 CH₄ 연료의 점화특성을 검토하였다.

2. 수치계산 방법

2.1 지배방정식

통상적으로 대향류 연소장의 수치계산에는 정상상태 수치계산 코드인 OPPDIF⁽⁸⁻¹⁰⁾가 많이 이용되고 있다. 이 코드는 물리적으로 비정상상태(Unsteady)인 점화현상을 고찰하는데 한계가 있기 때문에 본 연구에서는 대향류 연소장의 점화조건을 검토하는데 적합한 것으로 알려진 화염제어 연속계산법(Flame-controlling continuation method; FCCM)⁽¹¹⁾을 적용한 수치계산을 수행하였다. 계산을 통해서 얻어진 결과 중에서 총괄 스트레인을 변화에 따른 화염 최고온도를 구해 확산화염의 ‘S-곡선’ 거동을 얻었으며 이를 통해 확산화염의 점화 및 소화특성을 검토하였다.

본 연구에서는 FCCM을 수치계산에 적용하기 위해서 Nishioka 등이 개발한 코드⁽¹¹⁾를 사용하였다. 이 코드는 기존에 정상상태의 대향류 계산에 많이 사용되는 OPPDIF 코드와 수치해석적으로 매우 유사하다. 계산에 이용된 지배방정식은 정상상태의 연속방정식, 반경방향 운동량보존식, 화학종보존식, 에너지보존식과 상태방정식이다. 지배방정식과 경계조건에 대해서는 참고문헌⁽²⁾을

참조하기 바란다.

2.2 계산조건

수치계산은 수정된 Newton법을 이용하여 초기의 화염구조에 대한 가정값을 이용하여 반복계산을 통해 해를 얻게 된다. 이때 필요한 경계조건은 연료와 공기노즐 출구에서의 화학조성, 유속 및 온도이다.

본 연구에서는 대기압조건으로 복사 열손실을 고려하지 않았으며, 화학반응기구가 비교적 간단한 탄화수소인 CH₄을 연료로 사용하였다. 계산에 이용된 화학반응기구는 32개의 화학종과 177개의 소반응으로 구성된 GRI-v1.2를 이용하였다.

대향류화염을 형성시키기 위한 연료와 공기노즐간의 간격(L)은 1.5cm로 고정하였으며 연료류는 순수한 CH₄, 공기류는 O₂와 N₂가 부피비로 각각 21% 및 79% 비율로 혼합된 공기비를 이용하였다. 수치계산은 두 개의 조건에 대해 수행되었다. 첫 번째 조건에서는 연료와 공기류의 공급온도를 300K으로 하였고 두 번째 조건에서는 연료는 300K, 공기류는 1100K의 고온상태로 공급하여 두 조건에 대한 결과를 비교하였다. FCCM을 시작할 때 필요한 초기 대향류 확산화염구조 데이터는 OPPDIF 코드를 통하여 얻어진 결과를 이용하였다. 계산 시 열역학적 물성치와 전달 물성치는 CHEMKIN-II⁽¹²⁾와 TRANFIT Package⁽¹³⁾로 각각 계산하였다.

확산화염의 중요한 변수인 스트레인율은 다음 식 (1)과 같이 정의되는 총괄 스트레인율(Global strain rate; a_g)⁽¹⁴⁾을 사용하였다.

$$a_g = \frac{2V_a}{L} \left(1 + \frac{V_f \sqrt{\rho_f}}{V_a \sqrt{\rho_a}} \right) \quad (1)$$

여기서, V_f 와 V_a 는 각각 연료류와 공기류의 속도이며, ρ_f 와 ρ_a 는 각각 연료류와 공기류의 밀도이다.

2.3 화염제어 연속계산법

본 연구에서 사용한 FCCM은 스트레인율 변화에 대한 화염 최고온도 변화를 S-곡선 형태로 얻을 수 있는 유용한 방법이다. S-곡선 혹은 소염과 관련된 C-곡선을 얻는 수치계산법은 이 외에도 몇가지 방법이 있지만⁽¹⁵⁾ FCCM은 다른 수치계산

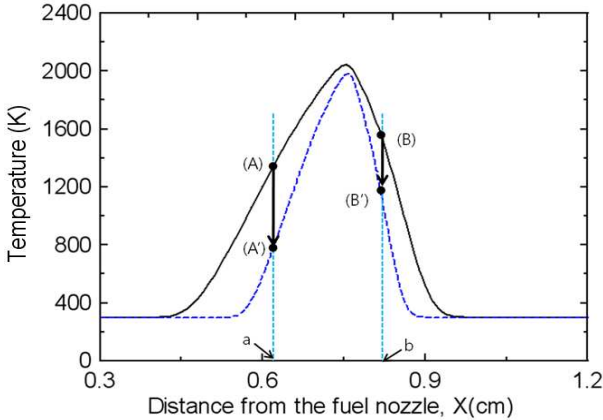


Fig. 1 Schematic of 1PM and 2PM for diffusion flame

법에 비해 비교적 사용이 간단하고 확산화염 뿐만 아니라 예혼합화염의 소화 및 점화특성 검토에 많이 이용되어 방법론적으로 검증이 된 상태이다.

FCCM은 1점 화염온도 제어법(1-point flame controlling method; 1PM)과 2점 화염온도 제어법(2-point flame controlling method; 2PM)의 두가지 방법으로 나누어진다.⁽¹¹⁾ FCCM에 대해 예를 들어 간단히 설명하겠다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 우선 실선으로 표시된 낮은 스트레인율의 화염을 얻는다. 이후 화염대의 온도구배가 큰 적당한 위치($x=a$)를 선택하여 그곳의 온도를 (A)에서 (A')으로 낮추어 지정한 후 공기류의 유속만을 경계조건으로 주게 되면 점선으로 표시된 화염을 찾아내게 된다. 이 점선의 화염은 실선으로 표시된 화염보다 얇기 때문에 스트레인율은 증가한 조건이 된다. FCCM은 연료와 공기의 조성, 유속 및 온도를 경계조건으로 하여 Newton Method를 이용하여 방정식에 대한 해를 얻을 수 있다. 또한 FCCM을 적용할 경우에는 특정 위치에서의 화염 온도를 지정하는 것은 하나의 경계조건이 되기 때문에 기존의 연료류(혹은 공기류) 유속에 대한 경계조건을 1개 생략하여 해를 얻을 수 있다. 이러한 방법을 1점 화염온도 제어법이라고 하며, 화염온도 최고점을 기준으로 양측의 적당한 위치($x=a, b$)와 그 곳에서의 온도를 지정하여 그 조건에 부합한 화염구조를 얻는 경우를 2점 화염온도 제어법이라고 한다. 두 번째 경우는 두 지점에서의 화염온도를 지정하였으므로 연료와 공기류 유속에 대한 2개의 경계조건을 생략하여 계산을 수

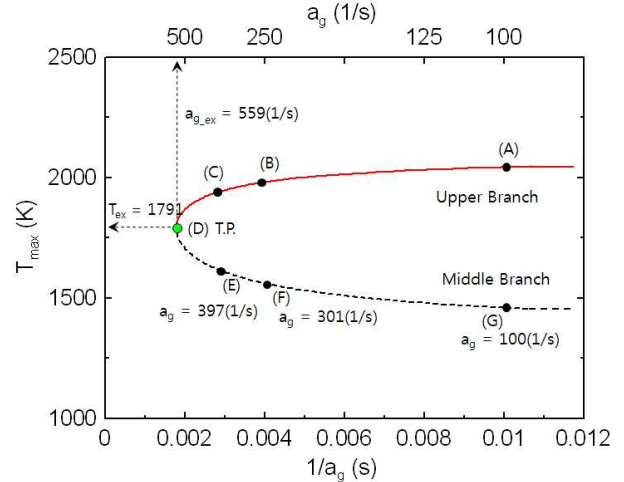


Fig. 2 Response of the maximum temperature to the inverse global strain rate

행하게 되며 주어진 위치의 온도에 상응하는 연료와 공기류의 유속이 해로서 새롭게 얻어지게 된다. 소염점 근처에서는 1PM으로 해를 얻기 힘든 경우가 생기기 때문에 본 연구에서는 소염점 근처에서는 2PM을 사용하였고 그 이후의 조건에서는 1PM을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 S-곡선 및 화염구조

Fig. 2는 상온 CH₄-공기 확산화염에서 최고 화염온도를 총괄 스트레인율 변화에 대해서 표현했을 때 보일 수 있는 S-곡선 중의 일부를 나타낸다. 그림에 나타나 있지는 않지만 연료와 공기의 유입온도는 300K으로서 상온이기 때문에 Lower Branch(L.B.)는 그림보다 훨씬 아래에 위치하며 대향류화염에서 낮출 수 있는 총괄 스트레인율의 한계로 인해 Middle Branch(M.B.)는 $1/a_g$ 값이 매우 작은 영역에서 Upper Branch(U.B.)와 L.B.를 이어주지는 못하게 되어 정확한 S-곡선 거동은 보이지는 않는다. 초기에 $a_g=100$ (1/s)의 화염에서 총괄 스트레인율(a_g)을 점차 증가시키면 $a_g=559$ (1/s)에서 소염이 발생하게 되며, 이때 화염 최고 온도는 1791K이다. 통상적으로 이러한 소화점을 S-곡선의 높은 스트레인율 조건에서의 전환점(Turning Point)이라고 칭한다. 그림의 결과에 따르면 a_g 가 559 (1/s)보다 큰 조건에서는 CH₄-공기 확산화염이 형성될 수 없고 항상 소화됨을 알 수 있다.

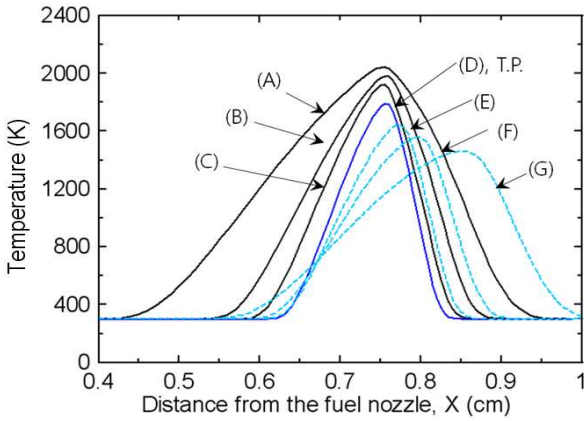


Fig. 3 Response of the temperature distribution of diffusion flame to the inverse global strain rate

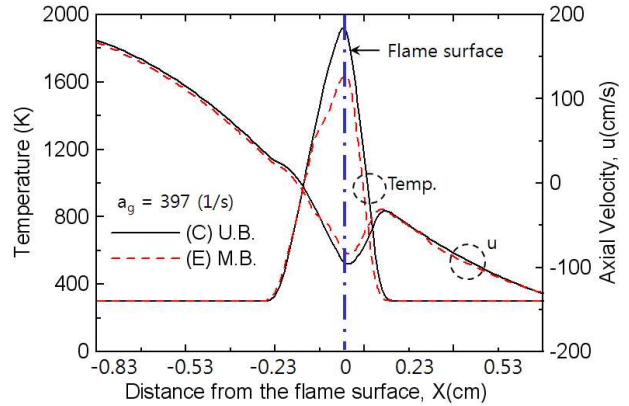


Fig. 5 Comparison of temperature and axial velocity distributions at $a_g=397$ (1/s) on the upper and middle branches

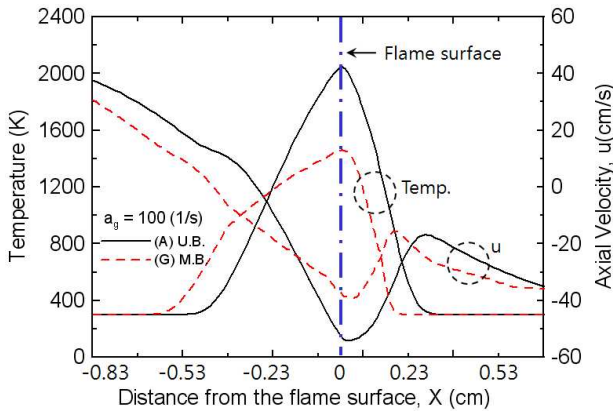


Fig. 4 Comparison of temperature and axial velocity distributions at $a_g=100$ (1/s) on the upper and middle branches

Fig. 3에는 Fig. 2에서 얻어진 U.B.와 M.B.상의 화염구조를 검토하기 위해 Fig. 2에 표시된 점들에 대한 화염온도 분포를 도시하였다. (A)와 (G), (B)와 (F) 및 (C)와 (E)점들은 총괄 스트레인율은 서로 비슷하면서도 U.B. 선상에 있는 실제 존재하는 화염과 M.B. 선상에 위치하는 가상의 화염을 보여주는 위치이다. (A)점의 화염에서 점차 스트레인율이 증가하게 되면 화염온도는 줄어들고 화염두께는 점차 얇아지게 되어 소염점인 (D)에 이르러진다. 이후 M.B.를 따라 총괄 스트레인율이 다시 점차 작아지게 되면 화염두께는 증가하지만 화염온도는 여전히 감소하는 특이한 거동을 보이게 된다.

Fig. 4에서는 $a_g=100$ (1/s)로 동일하지만 U.B.에 있는 실제 존재하는 화염과 M.B.에 있는 가상의 화염구조를 비교 도시하였다. 그림에서 화염온도

분포와 축방향 유속(u)는 화염면의 위치를 일치시킨 결과이다. 본 연구에서는 화염 최고온도와 공급된 온도와의 차이에 대한 5%값을 갖는 두 개의 위치를 이용하여 화염두께를 정의하였다. 공급된 온도가 300K인 경우의 U.B.의 화염두께는 0.45cm가 되며, M.B.의 화염두께는 0.40cm가 되어 a_g 가 같더라도 M.B.의 화염두께가 U.B.의 화염두께보다 얇게 나타남을 알 수 있다. 또한, 전체적인 유속분포도 크게 차이가 나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5에는 $a_g=397$ (1/s)인 U.B.의 화염과 M.B.의 화염구조를 비교 도시하였다. Fig. 4와 비교하면 상대적으로 낮은 총괄 스트레인율의 화염과는 달리 높은 총괄 스트레인율 조건에서는 U.B.와 M.B.의 화염면에서 얻어진 국소 스트레인율 값이 많이 유사함을 알 수 있다. 화염온도 분포를 통해 U.B.의 화염두께는 0.23cm이며 M.B.의 화염두께는 0.22cm임을 알 수 있었으며, U.B.에 비해 M.B.가 약간은 얇지만 낮은 스트레인율 조건보다는 좀 더 비슷함을 알 수 있다.

Fig. 6은 연료류 공급온도는 300K으로 앞의 결과와 동일하지만 공기류의 공급온도를 1100K로 가열하여 공급한 조건에 대한 S-곡선 거동을 도시하였다. S-곡선에서 M.B.는 실제로는 연기 힘든 가상의 화염을 나타내는 선으로서 M.B.보다 조금이라도 온도가 높으면 U.B.로 도약하여 안정된 화염이 형성되며 M.B.보다 조금이라도 온도가 낮으면 L.B.로 떨어지게 되어 소염이 된다. 따라서 M.B.는 주어진 총괄 스트레인율 조건에 대한 점화온도를 나타내는 지시선으로 이해될 수 있다.

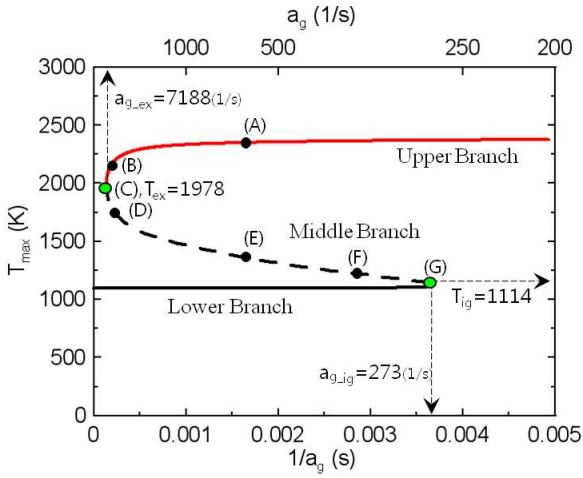


Fig. 6 Response of the maximum temperature to the inverse of the global strain rate

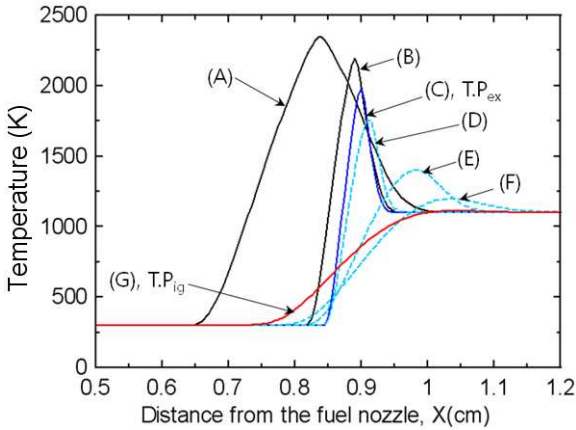


Fig. 7 Response of the temperature distribution of diffusion flame to the inverse of the global strain rate

고려된 총괄 스트레인을 범위에서 반응물을 점화시킬 수 있을 정도의 충분한 온도로 공급될 경우에는 정확한 S-곡선 거동을 보임을 알 수 있다. Fig. 6의 (G)지점은 $a_g=273$ (1/s)인 조건으로서, 1114K의 온도가 주어진다 면 점화되어 U.B.로 도약되면서 화염이 생성된다. 반면에 이미 화염이 형성된 후 계속적으로 총괄 스트레인을 증가시키면 $a_g=7188$ (1/s)인 (C)점에서 소멸이 발생하며, 이때 소멸직전의 화염 최고온도는 1978K이었다.

Fig. 7에는 Fig. 6의 (A)와 (E), (B)와 (D)와 같이 동일한 총괄 스트레인을 갖는 U.B.와 M.B.의 화염온도와, 소멸점 (C)에서의 화염온도 분포를 도시하였다. 화염 최고온도 변화와 화염두께의 변화에 대한 전반적인 거동은 첫 번째 조건인 공기측의 공급온도가 300K인 조건과 유사하다.

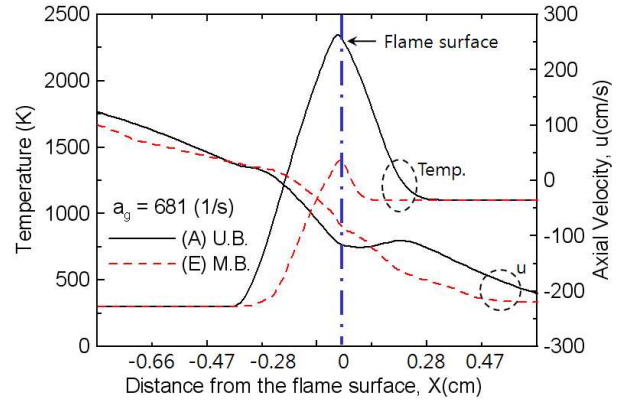


Fig. 8 Comparison of temperature and axial velocity distributions at $a_g=681$ (1/s) on the upper and middle branches

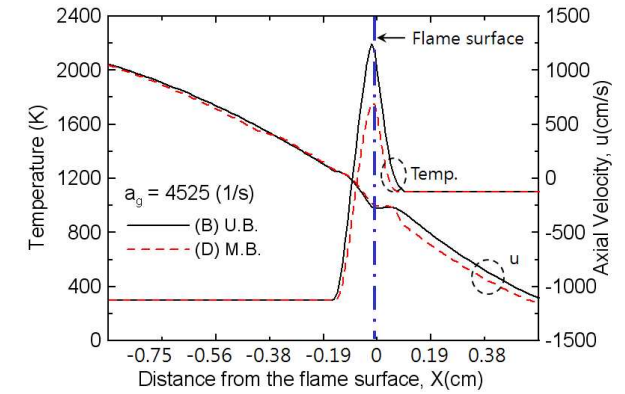


Fig. 9 Comparison of temperature and axial velocity distributions at $a_g=4525$ (1/s) on the upper and middle branches

이 조건에서도 (A)에서 점차 총괄 스트레인이 증가하게 되면 화염온도는 줄어들고 화염두께는 점차 얇아지게 되어 (C)지점에서 소멸된다. 통상적인 정상상태 계산에서는 소멸점의 화염구조를 얻을 수는 없지만 FCCM에서는 소멸점을 포함하여 소멸점 근처의 화염구조를 예측하는데에 매우 유의함을 알 수 있다. 또한 M.B.에 위치한 점들은 앞의 조건과 마찬가지로 총괄 스트레인이 감소함에 따라 화염두께는 증가하지만 최대온도는 감소하는 특이한 거동을 보인다.

Fig. 8과 9에는 상대적으로 총괄 스트레인이 작은 $a_g=681$ (1/s)과 비교적 높은 $a_g=4525$ (1/s)인 조건에 대해 U.B.와 M.B.상에 존재하는 화염의 구조를 도시하였다. 상온으로 공급되는 조건과는 달리 공기온도가 1100K으로 공급될 경우에는 M.B.의 화염의 온도도 낮지만 화염두께도 U.B.보다 매우 얇은 특징을 보이고 있다. 전체적인 유

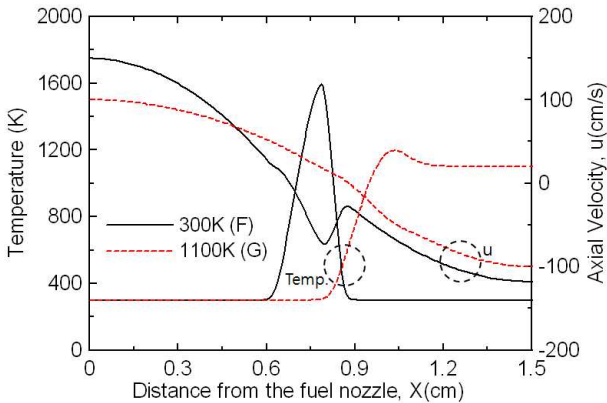


Fig. 10 Comparison of temperature and axial velocity distributions for an air temperature of 300K and 1100K

속분포는 공기측에서가 연료측에서보다 좀 더 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

3.2 통상화염과 고온화염 비교

고온 공기의 연소는 연소실 내부에서 통상화염면과 같이 국부적으로 온도가 높아지는 영역이 거의 나타나지 않고 통상의 화염대보다는 온도가 낮은 반응대가 연소실에 넓게 분포하는 특징을 갖는다고 서론에서 설명하였다. Fig. 10은 Fig. 2에 표기된 (F)점과 Fig. 6에 표기된 (G)점 부근으로 총괄 스트레인을 300(1/s)로 유사한 지점의 화염구조를 비교도시하였다. 유사한 총괄 스트레인을 조건에 대해서 상온의 공기와 1100K의 고온공기를 공급하였을 경우를 비교함으로써 마일드 연소의 특성을 잘 나타낼 수 있을 것이라 판단되어진다. 두 조건의 화염두께는 본 연구에서 앞서 정의된 방법으로 측정하였다. 상온으로 공급한 공기에서의 화염두께는 0.24cm이고, 고온의 조건에서는 화염두께가 0.36cm임을 알 수 있었다. Fig. 10에서 보여지듯이 화염의 최고온도는 통상의 공기가 1593K에 비해 고온공기를 공급한 조건이 1198K으로 낮은 반응대가 연소실에 넓게 분포함으로써 마일드 연소의 특성을 나타내고 있다.

3.3 스트레인을 상관관계

확산화염에서 중요한 스트레인은 화염면에서 정의되는 국소 스트레인이지만 일반적으로 혼합층의 공기측에서 정의되는 국소 스트레인을 대표 스트레인으로 많이 사용하기도 한다. Fig.

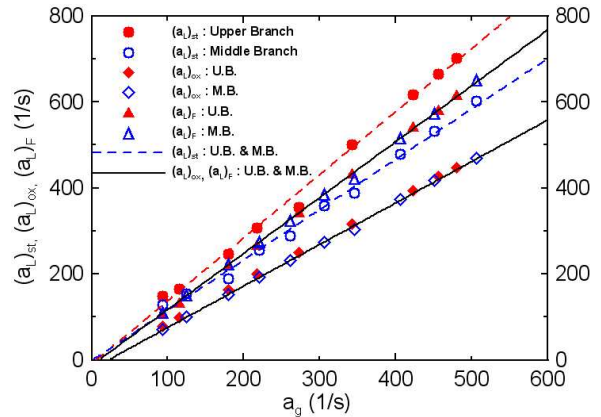


Fig. 11 Comparison of the local and global strain rates on the upper and middle branches for an air temperature of 300K

11에는 연료류와 공기류의 공급온도가 300K인 조건에서(Fig. 2) U.B.와 M.B.상의 점들의 화염면에서 정의된 국소 스트레인을 $(a_L)_{st}$ 와 공기측과 연료측 혼합층의 시작점에서 정의된 국소 스트레인을 $(a_L)_{ox}$ 과 $(a_L)_F$ 값을 비교 도시하였다. 그림에서 U.B.와 M.B. 상에 존재하는 대표조건들에 대한 공기측과 연료측에서 정의된 국소 스트레인은 총괄 스트레인에 대해 매우 선형적인 상관관계로 나타남을 알 수 있다. 화염면에서 정의된 국소 스트레인을 볼 때 U.B. 선상의 $(a_L)_{st}$ 값이 M.B. 선상의 $(a_L)_{st}$ 값보다 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 화염 최고온도가 높으므로 열팽창 효과에 의한 속도증가가 더욱 큰 U.B.에서의 $(a_L)_{st}$ 값이 높게 나타나는 것으로 판단된다.

Fig. 12에는 공기류의 공급온도가 1100K인 조건에 대한 S-곡선에서의 U.B.와 M.B.선상 점들에 대한 3종류의 국소 스트레인을 값을 도시하였다. 혼합층의 공기측과 연료측에서 정의된 국소 스트레인은 그 크기는 약간의 차이는 있지만 총괄 스트레인과는 매우 상관관계가 높음을 알 수 있다. Fig. 11의 결과와는 반대로 동일한 총괄 스트레인을 조건에 대해서 $(a_L)_F$ 값들이 $(a_L)_{ox}$ 값들보다 낮게 나타나고 있는데, 이는 공기측의 온도가 높아짐에 따라 열팽창 효과가 더 큰 공기측에서 유속 증가도 커지게 되어 공기측 속도구배가 훨씬 커졌기 때문으로 판단된다. 또한, Fig. 11에서와 마찬가지로 혼합층에서의 국소 스트레인은 U.B.와 M.B.간에 큰 차이가 없지만 화염면에서의 국소 스트레인은 U.B.와 M.B.간에 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 전체

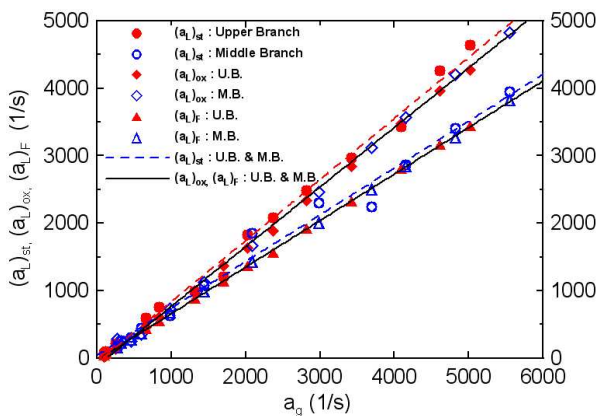


Fig. 12 Comparison of the local and global strain rates on the upper and middle branches for an air temperature of 1100K

적으로 공기류의 온도가 다른 두 조건에서 U.B.와 M.B.의 화염간의 총괄 스트레인을과 국소 스트레인의 간에는 선형적인 상관관계를 보임을 알 수 있다. 본 연구에서는 화염온도 최고점을 화염면으로 정의하였지만 추후 연구에서는 열방출율이 최고인 점에서 정의되는 국소 스트레인을 값과도 비교할 필요가 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 CH₄-공기 대향류확산화염을 대상으로 소화와 점화조건을 얻을 수 있는 화염제어 연속계산법을 적용한 수치계산을 수행하였다.

수치계산 결과를 통해 통상적으로 잘 알려진 확산화염의 총괄 스트레인을 조건에 대한 최고 화염온도로 표현되는 S-곡선의 거동을 확인하였다. 연료의 온도는 300K으로 고정하였고 공기의 온도만 300K과 1100K으로 한 경우의 확산화염 구조에 대한 비교를 통해 화염제어 연속계산법이 확산 혼합층의 소염 및 점화거동에 대한 고찰에 매우 유익하다는 것을 확인하였다.

통상화염과 고온공기를 공급하였을 때 화염의 최고 온도와 화염두께 측면에서 화염구조를 비교함으로써 국부적으로 온도가 높아지는 영역이 거의 나타나지 않고 낮은 반응대가 연소실에 넓게 분포하는 마일드 연소의 특성을 확인하였다.

S-곡선의 Upper Branch와 Middle Branch의 확산 화염에 대해 총괄 스트레인을과 화염면, 혼합층의 연료측과 공기측에서 각각 정의된 3개의 국소

스트레인을을 비교하여 혼합층의 연료측과 산화제측에서 정의된 국소 스트레인을은 총괄 스트레인과 매우 상관관계가 높음을 확인할 수 있었다. 화염면의 국소 스트레인을에 대해서는 화염면 위치의 정의에 대해서 추후 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2010T100100764)

참고문헌

- (1) Cavaliere, A., 2004, "Mild Combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 30, pp. 329~366.
- (2) Cavigiolo, A., Galbiati, M. A., Effuggi, A., Gelosa, D. and Rota, R., 2003, "Mild Combustion in a Laboratory-Scale Apparatus," *Combustion Science and Technology*, Vol. 175, pp. 1347~1367.
- (3) Weber, R., Smart, J. P. and Kamp, W. V., 2005, "On the (MILD) Combustion of Gaseous, Liquid, and Solid Fuels in High Temperature Preheated Air," *Proceedings of the combustion Institute*, Vol. 30, pp. 2623~2629.
- (4) Dally, B. B., Riesmeier, E. and Peters, N., 2004, "Effect of Fuel Mixture on Moderate and Intense Low Oxygen Dilution Combustion," *Combustion and Flame*, Vol. 137, pp. 418~413.
- (5) Galletti, C., Parente, A. and Tognotti, L., 2007, "Numerical and Experimental Investigation of a Mild Combustion Burner," *Combustion and Flame*, Vol. 151, pp. 649~664.
- (6) Szego, G. G., Dally, B. B. and Nathan, G. J., 2008, "Scaling of NOx Emissions from a Laboratory-Scale Mild Combustion Furnace," *Combustion and Flame*, Vol. 154, pp. 281~295.
- (7) Coelho, P. J. and Peters, N., 2001, "Numerical Simulation of a Mild Combustion Burner," *Combustion and Flame*, Vol. 124, pp. 503~518.
- (8) Jutz, A. E., Kee, R. J., Grcar, J. F. and Rupley, F. M., 1997, "OPPDIF : A Fortran Program for

- Computing Opposed-Flow Diffusion Flames," *Sandia Report*, SAND96-8243.
- (9) Blevins, L. G. and Gore, J. P., 1999, "Computed Structure of Low Strain Rate Partially Premixed CH₄/Air Counterflow Flames: Implications for NO Formation," *Combustion and Flame*, Vol. 116, pp. 546~566.
- (10) Ribert, G., Zong, N., Yang, V., Pons, L., Darabiha, N. and Candel, S., 2008, "Counterflow Diffusion Flames of General Fluids: Oxygen/Hydrogen Mixtures," *Combustion and Flame*, Vol. 154, pp. 319~330.
- (11) Nishioka, M., Law, C. K. and Takeno, T., 1996, "A Flame-Controlling Continuation Method for Generating S-Curve Responses with Detailed Chemistry," *Combustion and Flame*, Vol. 104, pp. 328~342.
- (12) Kee, R. J., Rupley, F. M. and Miller, J. A., 1989, "Chemkin-II : A Fortran Chemical Kinetic Package for the Analysis of Gas Phase Chemical Kinetics," *Sandia Report*, SAND89-8009B.
- (13) Kee, R. J., Lewis, D. G., Warnatz, J., Coltrin, M. E. and Miller, J. A., 1986, "A Fortran Computer Code Package for the Evaluation of Gas-Phase Multicomponent Transport Properties," *Sandia Report*, SAND86-8246.
- (14) Chelliah, H. K., Law, C. K., Ueda, T., Smooke, M. D. and Williams, F. A., 1990, "An Experimental and Theoretical Investigation of the Dilution, Pressure and Flow-Field Effects on the Extinction Condition of Methane-Air-Nitrogen Diffusion Flames," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 23, pp. 503~511.
- (15) Vlachos, D. G., Schmidt, L. D. and Aris, R., 1993, "Ignition and Extinction of Flame Near Surfaces: Combustion of H₂ in Air," *Combustion and Flame*, Vol. 95, pp. 313~335.