

메탄 비예혼합 화염의 후퇴거리에 따른 연소특성

김준희* · 구건우* · 홍정구*† · 이충원* · 김인수** · 정인모**

* 경북대학교 기계공학부, ** 현대제철 기술연구소

Combustion Characteristics of CH₄ Nonpremixed Flame with Recession Distance

Jun Hee Kim*, Kun Woo Ku*, Jung Goo Hong*†, Choong Won Lee*,
In Su Kim** and In Mo Cheong**

* Dept. of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.,

** Technical Research Center Energy Technology Team, Hyundai Steel

(Received September 5, 2011; Revised November 28, 2011; Accepted January 16, 2012)

Key Words: Recession(후퇴거리), Flame Stability(화염안정성), Nonpremixed Flame(비예혼합 화염)

초록: 비예혼합 화염의 안정성에 관한 종래의 연구는 연료노즐이나 켈의 형상에 초점을 많은 맞추어 왔으나 화염안정화에 중요한 연료의 후퇴거리 및 공기노즐의 홀 형상에 대한 연구는 상대적으로 부족하여 이에 관한 연구가 절실한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 메탄 분류 후퇴거리 및 2 차 공기의 홀 형상에 따른 연소특성을 관찰하기 위해 동축 삼중관 형태의 버너를 설계하였다. 1 차 공기는 스월러를 통하여 분류하였고, 2 차 공기는 홀 형상 및 슬릿 형상의 각 노즐로부터 분류되었다. 본 연구에 사용된 실험실 스케일 버너로부터 2 차 공기의 유속은 화염의 형태에 영향을 끼치는 것을 알 수 있었다. 후퇴거리의 경우 공급관외경의 절반에 해당하는 거리로 설정했을 때 화염이 안정적으로 존재하고, 휘도는 더욱 높아짐을 알 수 있었다.

Abstract: A lot of research on the stability of nonpremixed flames has focused on the fuel-nozzle and quarl geometries. Of the work carried out, only a small amount has focused on the stability of the nonpremixed flame according to the recession distance and air-nozzle geometry. Therefore, in this study, a coaxial-diffusion-type gas burner with a swirler is designed for the systematic investigation of the combustion characteristics of a CH₄ flame depending on the recession distance and secondary air-nozzle geometry. 1st air is flowed through the swirler, and 2nd air is flowed through each nozzle. It is shown that the secondary air velocity greatly influences the flame length and shape. There is an optimum recession distance for each nozzle for the best combustion efficiency. In this study, it is shown that the optimized recession distance is nearly half the outer diameter of the air-supply nozzle.

- 기호설명 -

D_i : 난류 확산율
 $D_{i,m}$: 혼합물 중 화학종 i 의 질량확산계수
 \bar{F} : 체적력
 G_k : 속도구배에 의한 난류 운동에너지 생성
 G_b : 부력에 의한 난류 운동에너지 생성
 $j_{i,i}$: 화학종 i 의 확산 플럭스
 k : 열전도 계수

n : 상 개수
 S : 소스
 Sc_i : 슈미트 수
 u_i : 화학종 i 의 유속
 V_f : 연료유속
 V_{a1} : 1 차 공기유속
 V_{a2} : 2 차 공기유속
 $\bar{v}_{dr,k}$: 편차속도
 Y_M : 혼합물의 질량분율
 μ_m : 혼합물 점도
 μ_t : 난류 점도
 σ : 프란틀 수

† Corresponding Author, jghong70@knu.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

확산 화염은 예혼합 화염에 비해 안정적으로 연소하기 때문에 대부분의 실용연소기에 많이 채택되어 사용되고 있고, 이에 대한 연구 또한 활발히 진행되고 있는 실정이다. 한편, 환경보전적인 측면에서 세계 각국에서 환경규제치를 강화함에 따라 효율적인 연소기 설계 및 개발이 중요한 관심사로 대두되고 있다.

관련 선행연구로는 Nettleton 은 스윙강도(swirl intensity)에 따른 화염 부상거리와 블로우아웃(blowout) 되는 조건에 대해 연구를 하였고,⁽¹⁾ Iyogun 은 연료노즐의 형상(geometry)에 따른 연소 특성을 확인하여 원형노즐(contractd circular nozzle) 보다 사각형 노즐(rectangular nozzle)이 확산연소에 더 많은 장점을 보인다는 것을 보고하였다.⁽²⁾ Milosavljevic 은 연료노즐과 켈(quarl)형상에 따른 연소특성을 연구하였고, 스윙강도, 당량비, 유속조건에 따른 화염안정화 선도를 작성하였다.⁽³⁾ Durão 도 켈 형상에 따라 화염의 온도분포 차이점을 연구하였다.⁽⁴⁾ 이들의 연구가 다른 연구와 다른 점은 연료노즐과 1 차 공기를, 2 차 공기노즐 단면으로부터 떨어지도록 후퇴거리(recession)을 설정한 연소기를 사용했다는 점이다. 연료 및 공기노즐에 후퇴거리를 적용한 연소기를 사용한 연구는 다수 보고되고 있으나 목적 자체가 대부분 연료노즐의 형상, 그리고 켈 형상에 맞춰져 있다. 또한 공기노즐의 홀 타입이나 연료 및 공기공급관의 후퇴거리에 따른 연구가 상대적으로 부족하여 안정적인 연소 특성을 얻기 위한 체계적 연구가 절실한 실정이다.

이에 본 연구에서는 메탄의 연소특성 및 공기노즐의 홀 형상과 각 공급관의 후퇴거리에 따른 연소특성을 실험을 통해 알아보고, 수치해석을 수행하여 실험결과와 비교 및 검증하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1 은 본 연구에 사용된 버너의 형상을 나타낸

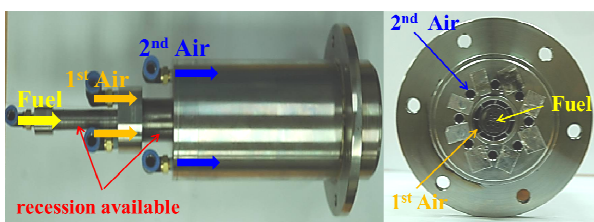


Fig. 1 Photographs of lab. scale test burner

것이다. 실험에 사용된 버너는 동축 삼중관 형태로 연료와 1 차 공기, 2 차 공기가 유입구를 통해 유입되며, 1 차 공기는 축 방향에 대한 반경방향의 운동량을 주는 스윙러(swirler)를 통해 유입된다. 또한, 연료 및 공기 노즐의 후퇴거리에 따른 연소 특성을 관찰하기 위해 연료 노즐 및 1 차 공기 노즐이 2 차 공기노즐로부터 후퇴거리(recession)의 이동이 가능하도록 제작하였다.

Fig. 2 는 본 연구에 사용된 실험 장치도를 나타낸 것이다. 실험에 사용된 연료는 메탄 (CH₄, 저위발열량: 9,406kcal/Nm³)이며, 부유식 유량계(dwyer, RATE-MASTER)를 이용하여 유량을 조절하였다. 연료는 연료 유입관과 연료노즐을 통해 분사된다. 본 연구에서는 공기압축기에 의해 가압된 공기가 각각의 유량계를 통해 1, 2 차 공기 유입관으로 유입되었으며, 1 차 공기의 경우 스윙러(스윙각도: 30°, 스윙수: 0.54)를 통해 버너 출구로 공급되게 하였다. 화염형태 및 거동을 파악하기 위해 화염이미지와 동영상을 디지털 카메라 및 휴대용 캠코더를 사용하여 획득하였다. 연소실(combustion chamber)는 외부공기에 의해 유입되는 공기의 영향을 없애기 위해 설치하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 1, 2 차 공기유속에 따른 화염의 안정성

Fig. 3 은 1 차 공기 유속과 2 차 공기 유속이 화염 형태에 미치는 영향을 알아보기 위해, 고정된 연료 유량에서 1, 2 차 공기 유속을 조절하여 획득한 화염의 평균이미지를 나타낸 화염 안정화 선도이다.

각 이미지는 촬영된 동영상에서 추출된 10 장의 사진을 평균하여 나타내었으며 1, 2 차 공기의 유속은 각각 3 ~ 6.42m/s, 3.7 ~ 12.4m/s 의 범위를 설정하였다. 각 유속의 범위를 벗어나는 경우에는 화염이

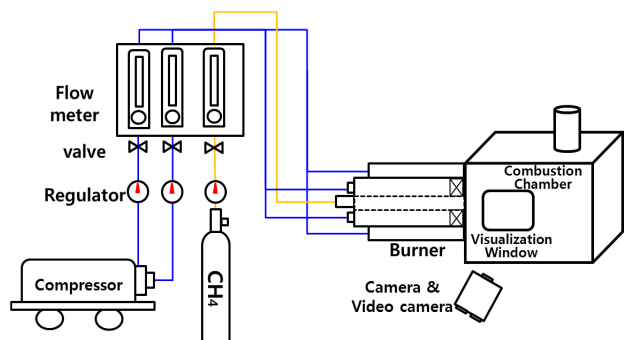


Fig. 2 Experimental setup

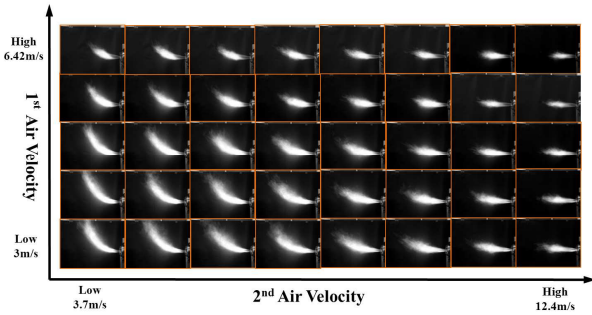


Fig. 3 Flame image with variation of 1st and 2nd air

부상(liftoff)되거나 블로우아웃(Blowout)되며 화염의 끝단이 가시화 영역 이상으로 상승하였다. 각 공기 유속은 화염의 형태에 영향을 미치며, 본 연구에 사용된 버너에서는 1 차 공기와 2 차 공기가 화염의 길이에 영향을 주는 것으로 관찰되었다. 2 차 공기 유속이 낮을 경우에는 온도 차이에 의한 부력효과로 인해 화염의 끝단이 상승하는 현상을 관찰할 수 있었다. 2 차 공기 유속이 증가하면서 화염 끝단이 상승하는 경향은 감소하며 길이는 짧아졌다. 1 차 공기 유속은 화염의 길이에 영향을 끼치지만 실험 범위 내에서 그 영향은 2 차 공기 유속에 비해 상대적으로 미미하며, 2 차 공기의 유속은 화염길이 및 화염형태에 영향을 끼치는 것으로 나타났다.

3.2 연료유속에 따른 화염형태

Fig. 4 는 연소용량 19,000kcal/hr 및 공기과잉률 1.3 에서 연료 유속에 따른 메탄의 화염형태를 나타낸 것이다. 평균이미지는 촬영된 동영상에서 추출된 10 장의 사진을 평균한 것이다.

Fig. 4(a)는 1 차 공기유속 3.0m/s, 2 차 공기의 유속은 13.7m/s 인 조건에서 메탄의 유속이 3.7m/s 이며 (b)의 경우는 9.3m/s 이다. 동일유량조건에서 연료 유속만을 변화시키기 위해 연료 노즐의 단면적을 변화시켰다. Fig. 4 에서 볼 수 있듯이 연료 유속이 증가하면, 화염이 버너출구에서 부착되지 못하고 부상되는 현상과 화염 길이가 짧아지는 현상이 관찰되었다. 일반적으로 제트(jet)의 속도가 버너출구에서 크게 되면 화염의 부상이 일어나고, 부상높이는 화염이 블로우아웃 될 때까지 속도의 증가에 따라 증가하게 된다.⁽⁵⁾ 이러한 측면에서 연료 유속이 낮을 경우 화염이 버너출구에서 부착되어 있지만, 연료 유속이 증가하는 경우 화염이 부상되는 결과가 나타났다고 생각된다. 연료 유속 증가에 의해 화염길이가 짧아지는 이유도 연료와 공기 혼합기의 화염 축 방향 운동량이 커짐으로 주위 공기와의 열전달량이 커지고, 이로 인해 반



(a) $V_f = 3.7m/s$ (b) $V_f = 9.3m/s$

Fig. 4 Flame images with fuel velocity, (a) $V_f = 3.7m/s$ (b) $V_f = 9.3m/s$ ($V_{a1} = 3.0m/s$, $V_{a2} = 13.7m/s$)

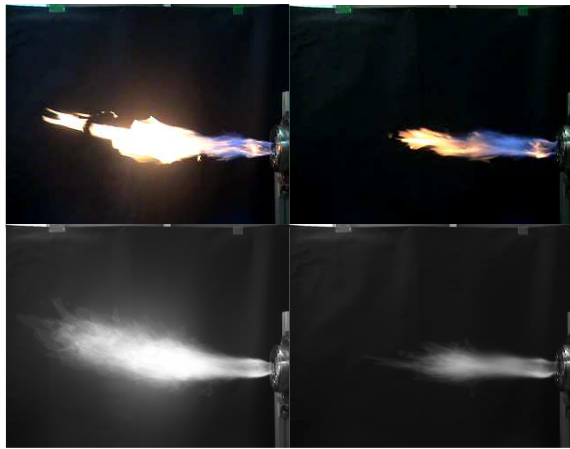
응 영역에서 상대적으로 온도가 감소하여 반응률 (reaction rate)이 감소함과 동시에 혼합기가 반응대 (reaction zone)에서 정체시간(residence time)이 상대적으로 짧아지기 때문에 나타난 결과라 생각된다. 따라서 연료 유속이 증가하면 상대적으로 온도가 낮은 청염 영역대가 길어지는 것으로 사료된다.

3.3 2 차 공기유속에 의한 화염형태

Fig. 5 는 2 차 공기 유속에 의한 메탄화염의 형태를 나타낸 것이다. 평균이미지는 촬영된 동영상으로부터 10 장의 사진을 추출하여 평균하여 나타내었다. 메탄유속은 3.7m/s, 1 차 공기유속을 3.0m/s 로 고정한 상태에서 2 차 공기의 흘 직경을 조절하여 유속변화에 따른 화염형태를 나타낸 결과이다. Fig. 5(a)는 2 차 공기의 유속이 13.7m/s 일 때의 화염을 나타낸 것이며, (b)는 29.0m/s 로 약 2 배 증가한 화염을 나타낸 결과이다. 각 조건에서 연소용량은 동일하며, 공기 과잉률은 1.3 이다. 2 차 공기의 유속을 약 2 배로 증가함에 따라 황염 영역대가 버너출구에서 짧게 되고, 청염이 길게 형성됨을 관찰하였다. 이는 버너출구에서는 1 차 공기와 연료의 혼합기가 반응하여 화염을 형성한 후 버너 하류에서는 혼합기가 2 차 공기와 재혼합을 시작함으로 2 차 공기의 화염 축방향 유속에 의해 혼합기가 주위 공기와의 열전달이 커지고 반응대에서 정체시간이 짧아져 나타난 결과라 판단된다.

3.4 2 차 공기노즐 형태에 의한 화염형태

2 차 공기 노즐의 흘 형상이 화염형태에 미치는 영향을 알아보기 위해 Fig. 6 과 같이 동일 면적



(a) $V_{a2} = 13.7\text{m/s}$ (b) $V_{a2} = 29.0\text{m/s}$

Fig. 5 Flame images with 2nd air; (a) $V_{a2} = 13.7\text{m/s}$, (b) $V_{a2} = 29.0\text{m/s}$ ($V_f = 3.7\text{m/s}$, $V_{a1} = 3.0\text{m/s}$)



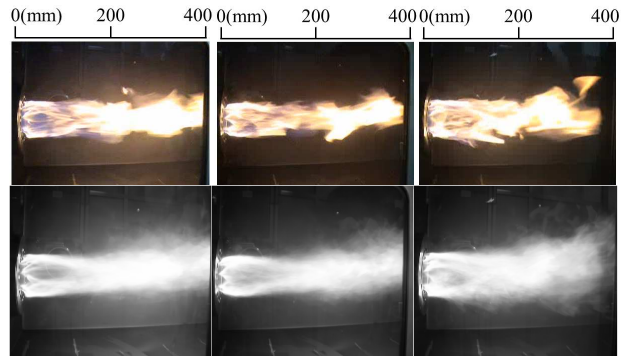
(a) $\text{Ø}7 \times 24$ (b) $\text{Ø}8.6 \times 16$ (c) slit type

Fig. 6 Photographs of 2nd air nozzles

을 가지는 노즐을 3 가지 형상으로 제작하였다. Fig. 6 의 (a), (b)는 원형 홀로 제작하였으며, (c)는 슬릿(slit) 형상으로 노즐을 제작하였다. Fig. 7 의 상단 사진은 2 차 공기 노즐의 형상에 따른 화염형태를 나타내며 하단의 사진은 촬영된 동영상으로부터 10 장의 사진을 추출하여 평균한 것이다. 본 연구의 실험 버너에서는 원형 노즐의 경우 노즐 직경에 상관없이 화염의 형태가 유사하게 나타났으나, 슬릿 타입의 경우 화염의 반경방향 두께가 상대적으로 커지며 화염형태가 일정하지 않고 펄터이는 현상이 나타났다. 이는 2 차 공기 노즐의 형상이 원형과는 달리 슬릿일 경우, 난류길이 스케일(turbulent length scale)이 커짐에 따라 연료와 공기의 확산에 필요한 정체시간이 길어지게 되어 에너지 방출 측면에서 화염의 맥동 현상을 초래한다고 판단된다.

3.5 후퇴거리에 의한 화염형태

연료 및 1, 2 차 공기의 유속조건을 동일하게 설정한 후 후퇴거리에 대한 조건만을 변화해가며 실험을 수행하였다. 각각의 유속은 연료의 경우 1.8m/s, 1 차 공기는 1.7m/s, 2 차 공기는 6.6m/s 로 고



(a) $\text{Ø}7 \times 24$ (b) $\text{Ø}8.6 \times 16$ (c) slit type

Fig. 7 Flame images with 2nd air nozzle type

정하였고 과잉 공기비는 1.3 이다. 후퇴거리에 대한 조건은 Fig. 8 의 (a) ~ (d)와 같이 4 가지의 경우로 버너형상을 결정하여 화염특성을 관찰하였다.

Fig. 8 (a) case 1 은 1 차 공기노즐이 2 차 공기노즐로부터 10mm 후퇴거리를 가지며 연료 노즐은 1 차 공기노즐로부터 10mm 의 후퇴거리를 가지는 버너형태이다. (b)~(d)의 경우는 Fig. 8 에서 나타냈듯이 (a)의 조건에 연료노즐과 1 차 공기노즐의 후퇴조건을 변경하여 설정하였다.

Fig. 9 는 Fig. 8 에서 설정한 4 가지의 형상에 따른 화염이미지이다. 평균이미지는 마찬가지로 촬영된 동영상에서 추출된 10 장의 사진을 평균한 것이다. Fig. 9 (a)는 Fig. 8 (a) case 1 에 해당하는 화염의 이미지이다.

Fig. 9 에서는 1 차 공기노즐이 2 차공기노즐로부터의 후퇴거리가 동일한 경우(case 1, 2 = 10mm, case 3, 4 = 20mm)와 연료노즐이 1 차 공기노즐로부터의 후퇴거리가 동일한 경우(case 1, 3 = 10mm, case 2, 4 = 20mm)를 구분하여 살펴 볼 수 있다. 먼저 연료노즐의 후퇴거리가 20mm 에서 10mm 로 감소함에 따라 화염의 휘도 및 길이는 차이가 크지 않은 것을 확인할 수 있었다. 반면, 연료노즐의 후퇴거리가 10mm 인 경우와 20mm 인 경우 모두 1 차공기노즐의 후퇴거리가 10mm 에서 20mm 로 증가함에 따라 화염의 길이가 길어지고 휘도는 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

case 1 에서 case 4 까지 연료와 1, 2 차 공기의 유속조건이 동일함에도 불구하고 화염의 형태가 뚜렷이 차이를 보이는 것을 확인하였다. 실험에 사용된 버너에서 1 차 공기노즐의 후퇴거리가 20mm 인 경우 화염의 길이가 길어지고 휘도가 증가하는 것은 연료와 1 차 공기가 부분예혼합된 혼합기의 축방향 운동량이 감소(decay)함에 따라 2 차 공기

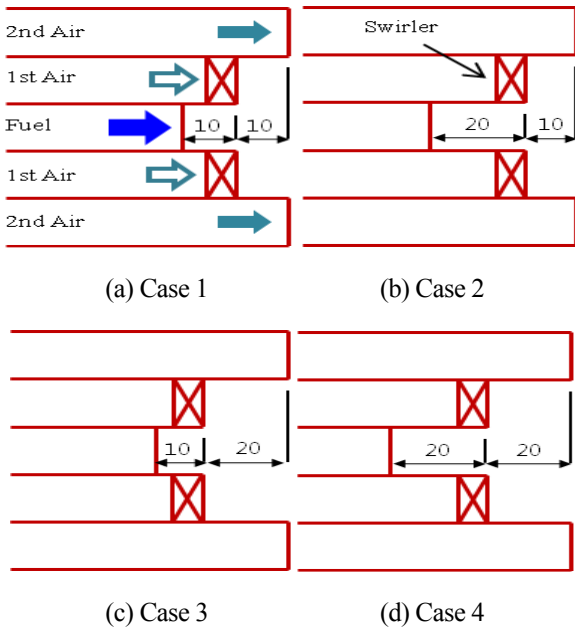


Fig. 8 Burner geometry with recession distance

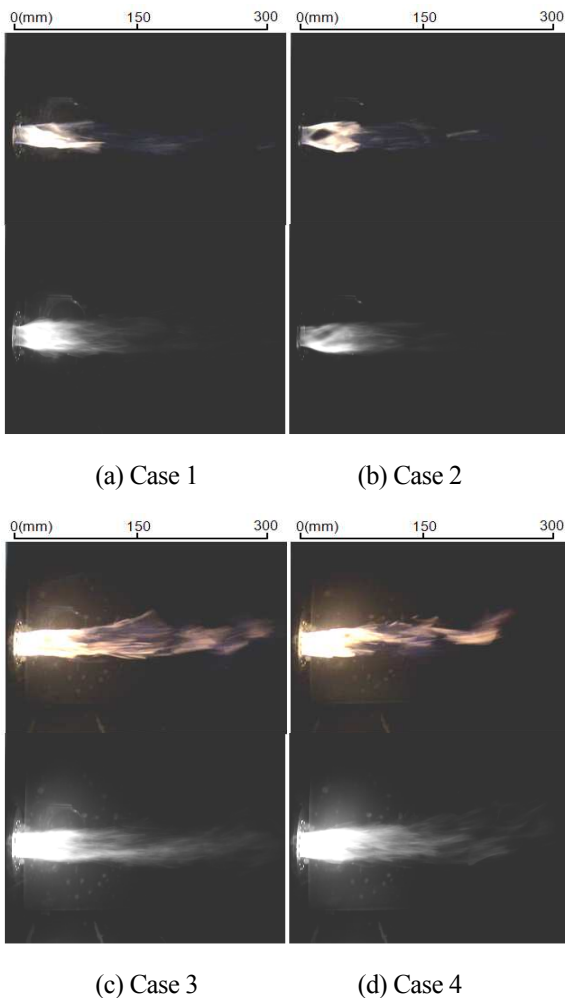


Fig. 9 Flame images with recession distance ($V_f = 1.8\text{m/s}$, $V_{a1} = 1.7\text{m/s}$, $V_{a2} = 6.6\text{m/s}$)

기와의 반응시간이 길어진 것이 원인으로 판단된다.

연료 노즐과 1 차 공기노즐 사이의 후퇴거리에 따른 화염길이 및 휘도의 차이는 크지 않으며, 1 차 공기노즐과 2 차 공기노즐 사이가 20mm 인 경우 화염의 길이가 증가하는 것으로 나타났다.

3.6 수치해석

3.6.1 계산 모델 및 지배방정식

수치계산을 수행하기 위해 상용 프로그램인 Fluent 6.3 을 사용하였다. 계산모델로는 k-ε 모델 (1) ~ (2)을 적용하였으며, 지배방정식은 (3) ~ (5)에 나타내었다. 실제 수치해석에서는 $R_{i,i}$ 항을 사용하지 않은 비반응 유동으로 실행하였다.

-Transport equations for standard k-ε model

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) \\ &- C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (2)$$

-Species transport equations

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i m_i) = - \frac{\partial}{\partial x_i} j_{i,i} + S_{i,i} \quad (3)$$

$$j_{i,i} = - \left(\rho D_{i,m} \frac{\partial m_i}{\partial x_i} + \frac{\mu_t}{Sc_i} \right) \frac{\partial m_i}{\partial x_i} \quad (4)$$

$$Sc_i = \frac{\mu_t}{\rho D_i} \quad (5)$$

3.6.2 격자생성

격자는 Gambit 2.2.30 을 통해 Fig. 10 과 같이 생성하였다. 버너의 격자 수는 후퇴거리를 적용하지 않은 Fig. 10(a)의 경우 424,950 개, 적용한 Fig. 10(b)의 경우는 451,326 개이다.

(a)의 경우는 후퇴거리를 적용하지 않은 일반적인 형태이며, (b)의 경우는 연료노즐과 1 차 공기노즐의 후퇴거리가 각 10mm 인 Fig. 8(a)로 적용하였다. 두 버너의 경우 연료 및 공기의

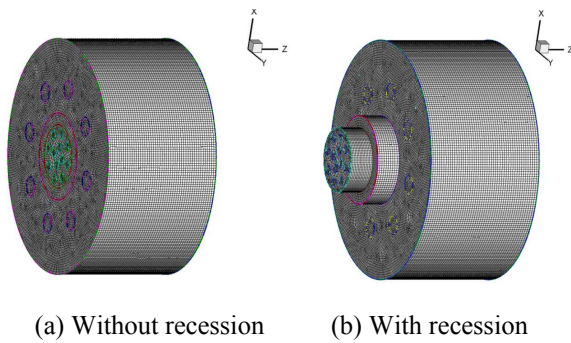


Fig. 10 Grid generation

유속을 3.5 절의 조건($V_f=1.8\text{m/s}$, $V_{a1}=1.7\text{m/s}$, $V_{a2}=6.6\text{m/s}$)과 함께 적용하여 수치해석을 통하여 비교하였다.

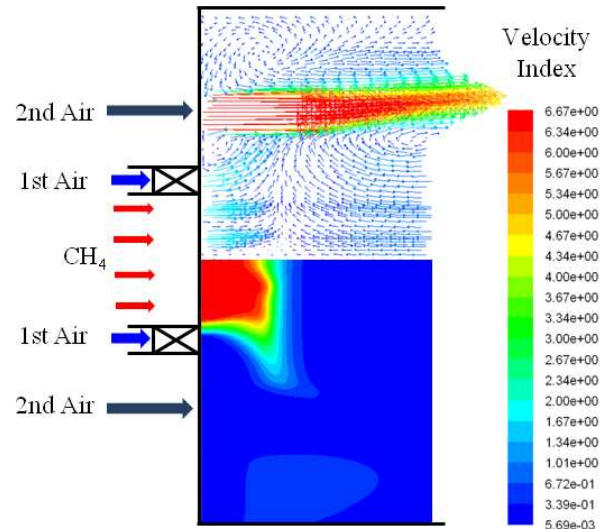
3.6.3 유선 분포와 메탄의 질량분율

Fig. 11 은 후퇴거리의 적용여부에 따른 수치해석의 결과를 나타낸 그림이다. Fig. 11 (a), (b)는 버너중심을 기준으로 상부는 유동의 속도벡터를 이용하여 유선을 표현하였고, 하부는 메탄의 질량분율(mass fraction)을 나타내었다.

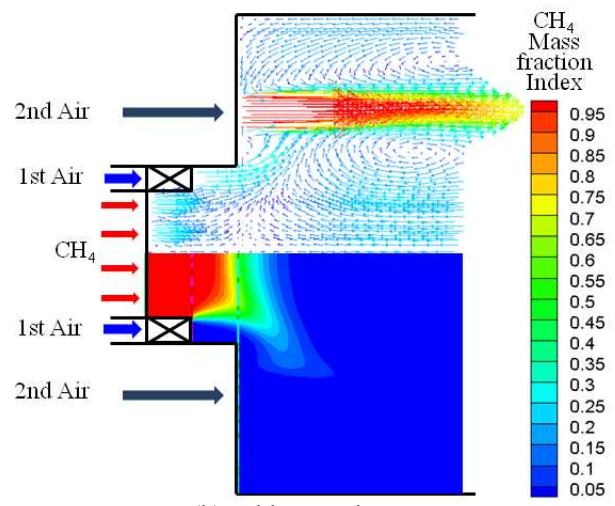
두 조건 모두 스윙효과로 기대할 수 있는 재순환영역이 나타나는데 이를 볼 수 있다. 후퇴거리를 적용하지 않은 Fig. 11(a)를 살펴보면 재순환영역이 시작된다고 판단되는 지점이 버너출구로부터 일정거리가 떨어져 있는 것을 볼 수 있고 메탄의 질량분율이 그 일정거리까지 0.9 이상을 유지하는 것을 볼 수 있다. 공기와의 혼합이 이루어져 안정된 화염이 존재할 수 있는 지점이 버너출구로부터 일정거리만큼 떨어져 있다고 판단된다. 이와는 다르게 후퇴거리를 적용한 Fig. 11(b)의 경우에는 버너출구에서의 유속벡터를 볼 때 이미 메탄의 운동량이 대부분 감소하였고 공기와의 혼합이 이루어지기 시작한다고 볼 수 있다. 즉, 화염이 존재할 수 있는 구간이 버너출구에 매우 가깝게 형성되는 것을 확인할 수 있다.

두 조건을 비교해 보면 버너출구로부터 재순환영역이 발생하는 지점까지의 거리가 (b)의 경우 (a)보다 짧게 나타났으며 와류가 생성되는 지점 역시 (b)의 경우가 (a)보다 더 가까이 발생하였다. 또한, 메탄의 질량분율을 확인했을 때 알 수 있었던 듯이 공기와의 혼합이 이루어져 있는 지점이 (b)의 경우 (a)보다 버너출구로부터 가까이 형성되어 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 12 는 버너출구로부터 축 방향으로 12mm

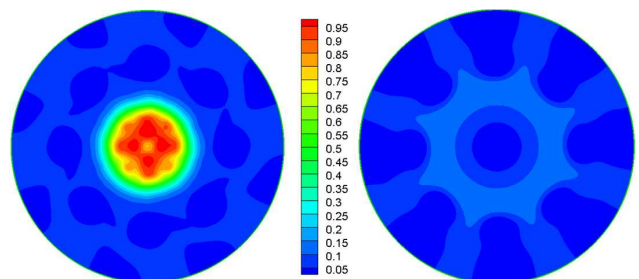


(a) Without recession



(b) With recession

Fig. 11 Streamline distributions and CH₄ mass fraction



(a) Without recession

(b) With recession

Fig. 12 Images of CH₄ mass fraction at an axial distance of 12mm from the burner exit

떨어진 지점의 메탄의 질량분율을 나타낸 계산결과이다. 후퇴거리를 적용하지 않은 Fig. 12(a)는 메

탄의 질량분율이 0.9 이상인 부분을 다수 확인할 수 있으며, 반대로 Fig. 12(b)에서는 대부분의 지점에서 질량분율이 0.3 이하로 존재하는 것을 볼 수 있다. 즉, 메탄과 공기의 혼합이 이미 잘 이루어져 있어 안정된 화염이 존재할 수 있다고 판단된다.

이를 통해 후퇴거리를 적용한다면 화염이 안정적으로 존재하는 반응영역이 버너출구로부터 좀더 가까이 형성되기 때문에 후퇴거리를 적용한 경우의 실험에서 관찰된 연소특성을 뒷받침하는 수치 해석 결과라고 사료된다.

4. 결 론

실험실 스케일버너를 대상으로 연료 및 공기유속, 2 차 공기공급 노즐 형상 및 후퇴거리에 대한 메탄 비예혼합 화염의 화염안정성에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에 사용된 버너에서 1 차 공기와 2 차공기가 화염에 미치는 영향을 관찰하였다. 1 차 공기의 유속은 화염길이에도 영향을 끼치지만, 그 영향은 2 차 공기의 유속에 비해 상대적으로 미미하며, 2 차 공기의 유속은 화염길이 및 화염형태에 영향을 끼침을 알 수 있었다.

(2) 2 차 공기의 노즐 형상에 따른 연소특성으로 홀 형상의 경우 동일면적기준으로 홀 개수에 관계없이 유사한 결과를 나타내었으며, 슬릿 형상의 경우에는 홀 형상과 비교해 상대적으로 펄럭이는 화염의 맥동 현상을 관찰할 수 있었다.

(3) 수치해석의 결과로 후퇴거리를 적용한 경우 부분예혼합 효과를 얻을 수 있으며 재순환영역이 버너출구에 가깝게 형성됨에 따라 안정적인 화염이 존재함을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2011 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업으로 수행된 연구임(2011-0018392) 또한, 현대제철

의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Nettleton, M.A., 2004, "The Influence of Swirl Angles on Flame Stability in Pilot-Scale Plant," *Fuel*, Vol. 83, pp. 253~256.
- (2) Iyogun, C.O., Birouk, M. and Kozinski, J.A., 2011, "Experimental Investigation of the Effect of Fuel Nozzle Geometry on the Stability of a Swirling Non-Premixed Methane Flame," *Fuel*, Vol. 90, pp. 1416~1423.
- (3) Milosavljevic, V.D., Taylor, A.M.K.P. and Whitelaw, J.H., 1990, "The Influence of Burner Geometry and Flow Rates on the Stability and Symmetry of Swirl-Stabilized Nonpremixed Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 80, pp. 196~208.
- (4) Durão, D.F.G., Heitor, M.V. and Moreira, A.L.N., 1992, "On the Stabilization of Flames on Multijet Industrial Burners," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 5, pp. 736~746.
- (5) Turns, S.R., 2000, *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*, WCB/McGraw-Hill, Boston, pp. 476~478.
- (6) Azuhata, S., Narato, K., Kobayashi, H., Arashi, N., Morita, S. and Masal, T., 1986, "A Study of Gas Composition Profiles for Low NOx Pulverized and Burner Scale-up," *Twenty-first International Symposium on Combustion*, pp. 1199~1206.
- (7) German, A.E. and Mahmud, T., 2005, "Modelling of Non-Premixed Swirl Burner Flows Using a Reynolds-Stress Turbulence Closure," *Fuel*, Vol. 81, pp.583~594.
- (8) Khelil, A., Naji, H., Loukarfi, L. and Mompean, G., 2009, "Prediction of a High Swirled Natural Gas Diffusion Flame Using a PDF Model," *Fuel*, Vol. 88, pp. 374~381.
- (9) Frassoldati, A., Frigerio, S., Colombo, E., Inzoli, F. and Faravelli, T., 2005, "Determination of NOx Emissions from Strong Swirling Confined Flames with an Integrated CFD-Based Procedure," *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, pp. 2851~2869.