

좁은 채널 내의 대향분류 메탄-공기 비예혼합 화염의 거동 특성

윤영민* · 이민정* · 조상문* · 김남일†

(2008년 12월 16일 접수, 2009년 2월 26일 수정, 2009년 3월 4일 심사완료)

Behavioral Characteristics of the Non-Premixed Methane-Air Flame Oppositely Injected in a Narrow Channel

Young Min Yun, Min Jung Lee, Sang Moon Cho and Nam Il Kim

Key Words : Counter Diffusion Flame(대향 확산 화염), Flame Structure(화염 구조), Channel Flow(채널유동), Numerical Simulation(수치해석)

Abstract

Characteristics of a counter flowing diffusion flame, which is formulated by an oppositely-injected methane-jet flow in a narrow channel of a uniform air flow. The location of the flame fronts and the flame lengths were compared by changing the flow rates of fuel. To distinguish the effects of the narrow channel on the diffusion flame, a numerical simulation for an ideal two-dimensional flame was conducted. Overall trends of the flame behavior were similar in both numerical and experimental results. With the increase of the ratio of jet velocity to air velocity flame front moved farther upstream. It is thought that the flow re-direction in the channel suppresses fuel momentum more significantly due to the higher temperature and increased viscosity of burned gas. Actual flames in a narrow channel suffer heat loss to the ambient and it has finite length of diffusion flame in contrast to the numerical results of infinite flame length. Thus a convective heat loss was additionally employed in numerical simulation and closer results were obtained. These results can be used as basic data in development of a small combustor of a nonpremixed flame.

기호설명

- V_f : 연료 평균 속도 [cm/s]
- V_a : 공기 평균 속도 [cm/s]
- l_f : 관 끝단에서 화염선단까지의 거리 [mm]
- T : 온도 [K]
- T_a : 활성화 온도 [K]
- Y_i : i 성분의 질량 분율 [-]
- ω_i : i 성분의 반응률

1. 서론

기계시스템의 소형화 추세에 따라 소형 에너지 시스템의 개발이 관심을 받고 있으며, 그와 연관하여 작은 공간에서의 연소 기술에 대한 관심 또한 증대되고 있다. 소형 연소기 개발에 있어 중요한 문제 중 하나는 소형화에 따른 표면적-부피 비의 증가와 이로 인한 열손실의 증대 및 소염 발생이다. 또한 연소기 표면이 가스연소에 관여하는 정도가 커지면서 연소기의 형상이 연소 현상에 영향을 주기도 한다. 이러한 특징으로 인해 소염 거리보다 작은 공간에서의 화염 생성을 위해서는 열적인 환경 및 연소기 표면에서의 반응 환경의 변화가 요구하며, 이를 적극적으로 활용한 마이크로

† 책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부

E-mail : nikim@cau.ac.kr

TEL : (02)820-5753 FAX : (02)825-5753

* 중앙대학교 대학원 기계공학부

연소기술이 연구되고 있다.^(1,2)

이러한 마이크로 연소기 기술에는 주로 예혼합 화염을 사용하는 예가 많지만 연소기의 안정적인 운전을 위해서 일부 확산화염을 이용한 연구도 이루어지고 있다.^(3,4) 일반적인 확산화염에 대한 연구들을 연료와 산화제의 유동 방향과 크기를 기준으로 구분하면 유동방향이 일정한 경계층 유동, 연료의 유속이 상대적으로 큰 연료분류, 그리고 연료와 산화제를 반대방향으로 분사하는 대향 분류가 되겠다. 좁은 공간에서의 확산화염에서도 마찬가지로 연료와 산화제의 혼합 특성이 각각의 투입 형태에 따라 변화할 것을 예상할 수 있으며 비슷한 방식으로 연료와 산화제의 유동 방향과 크기를 기준으로 구분이 가능할 것이다. 추가적으로 화염으로부터 발생한 열의 상당부분이 연소기 쪽으로 손실될 것이며, 좁은 공간에서의 특유의 증가된 압력손실도 화염 구조에 기여할 것으로 예상된다. 이러한 관점에서 좁은 공간 내 확산화염을 연구한 경우는 상대적으로 부족한 현실이다.

본 연구에서는 마이크로 연소기에 대한 본격적인 연구에 앞서 소염거리에 가까운 간격을 가지는 얇은 채널 내에 형성된 메탄-공기 확산화염을 연구한다. 채널형 마이크로 연소기 중에서 확산화염을 이용한 결과는 Miesse 등에 의한 Y-형 채널에서의 마이크로 삼지화염 구조 등에 대한 연구가 있다.⁽⁴⁾ 하지만 본 연구에서는 공기 유동 속에 대향 분사된 연료 분류에 의해 형성된 확산화염의 특성을 살펴보고자 한다. 이러한 유동 구조에서 형성된 화염은 물리적으로 Tsuji⁽⁵⁾ 등에 의해 구현된 대향류 확산화염의 특성을 가지게 될 것이다. 대향류 확산 화염은 화염의 안정적인 구조와 화염신장에 대한 수월한 접근을 제시함으로써 광범위한 연구가 진행되었다. 이러한 화염의 국부적 특성을 예측하는 모델들 또한 오랜 기간 연구가 진행되어 왔으며, 대표적인 화염 연구의 모델로 활용되고 있다. 그러나, 연소공간의 크기 감소에 따라 연료와 산화제의 혼합 특성은 연소공간의 형상에 민감하게 지배 받기 때문에 기존의 연구와는 별도로 논의될 필요가 있다.

선행 연구를 통해 다양한 종횡비의 채널 내에 형성된 예혼합화염의 거동 특성을 살펴본 바가 있다.⁽⁶⁾ 그 결과 미소 채널 내에 메탄/공기 예혼합화염은 단면 종횡비에 따라 다양한 영향을 받음을 보였으며, 채널 내부의 화염의 움직임은 채널간격이 작고 당량비가 높을수록 안정화된 구조를 가지게 됨을 보였다. 또한 채널의 폭이 크면 비대칭구조가 되며 일정 크기 이상에는 세포구조의 화염도

발생함을 보였다.

좁은 채널 내부의 화염 거동에 대한 해석은 벽면의 열전달과 벽면의 점성효과 등으로 인해 매우 복잡하다. 특히 화염이 좁은 채널 내부에 존재할 때 벽면근처에서의 국부적 소염에 의해 구조 변화를 야기할 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 실험적으로는 좁은 간격을 가지는 채널에서 진행되었으며, 해석적으로는 충분히 큰 채널 간격을 가지는 2 차원 공간에서의 화염 거동을 우선적으로 관찰하고자 한다. 두 결과 비교를 통해 좁은 공간에서 발생하는 화염의 거동 특성의 변화를 논의하고 추가적으로 열손실이 존재하는 조건에 대한 수치 해석을 통해 열손실의 효과를 검토한다. 이러한 방법을 통해 다양한 연료 공기 비에 따른 화염의 거동 특성을 예측해 보고자 한다.

2. 실험 및 해석 방법

2.1 실험방법

두께 3 mm 인 석영판을 이용하여 길이 200 mm, 폭 40 mm, 채널의 깊이 방향 간격 $b=4.4$ mm 의 채널을 형성하고 이를 연소공간으로 설정하였으며 그 개략적인 형태를 Fig. 1(a)에 나타내었다. 채널을 통해서 하부로부터 상부 방향으로 공기가 흐르게 되는데, 채널 폭 방향으로의 균일한 유량 투입을 위해 채널의 하단에 수축비가 큰 노즐을 장착하였다. 연료 투입을 위해 내경 $d_i=2.1$ mm, 외경 $d_o=3.2$ mm인 스테인리스 튜브를 채널의 상단으로부터 35 mm 위치까지 삽입하였다. 삽입된 관의 끝단을 기준으로 상부 방향을 x 축으로 우측 방향을 y 축으로 설정하였다.

실험에서는 순수 메탄(>99.99 %)을 연료로 사용하였으며, 공기는 압축공기를 사용하였다. 각각의 유량을 제어하기 위하여 두 개의 질량유량제어기(MFC, mass flow controller)를 사용하였다. 실험은 일정한 공기 유속에서 주로 이루어졌는데, 초기 점화는 채널 외부에서 이루어졌으며, 이후 관을 채널 내부로 삽입하고 실험을 실시하였다. 화염이 채널 내에 존재함에 따라 채널이 가열되므로 시간에 따라 화염에 약간의 변화가 발생한다. 따라서 충분한 시간이 경과하여 화염 위치와 형상의 변화가 일어나지 않는 정상상태에 이른 이후에 화염의 직접사진을 촬영하고 화염 선단 및 후단의 위치를 측정하였다.

2.2 해석방법

확산화염의 거동 특성을 해석하기 위해 운동량, 에너지, 화학종에 대한 지배방정식을 연소반응과

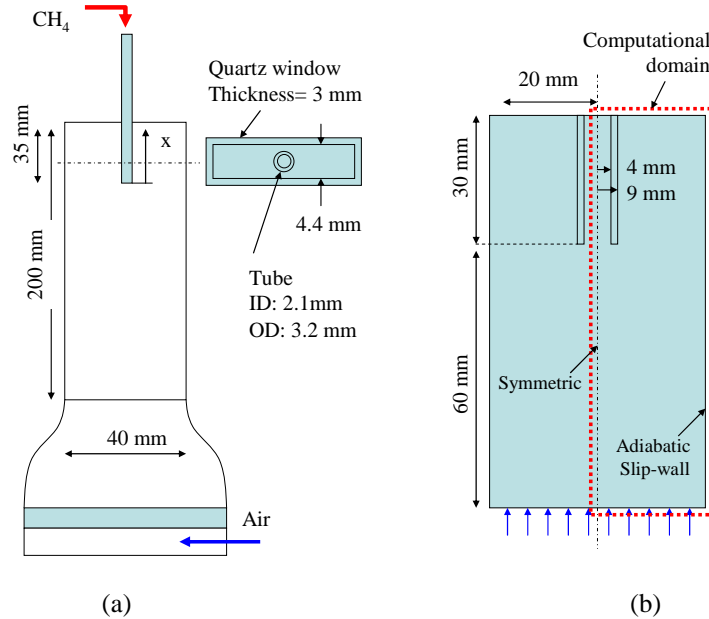
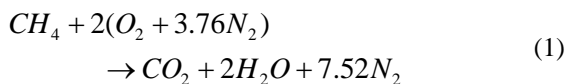


Fig. 1 Schematic diagram of the test burner (a) experimental test section, (b) computational domain

물성 변화를 고려하여 직교 2 차원 공간에 대해 수치해석하였다. 이를 위해서 유한체적법을 근간으로 하고 운동량 해석을 위해서는 SIMPLER 기법⁽⁷⁾을 이용하는 자체 개발 코드를 이용하였다. 본 연구에서는 화염의 거동 특성에 주된 관심을 가지고 있어서, 화학 반응은 아래와 같이 메탄, 산소, 질소, 이산화탄소, 수증기의 다섯 개의 화학종이 참여하는 비가역 1 단계 총괄반응을 가정하였으며, CHEMKIN⁽⁸⁾ 코드를 일부 수정하여 사용하였다.



밀도, 점도, 확산계수 등의 물성치는 혼합 가스의 조성과 해당 위치의 온도를 반영하여 TRANFIT⁽⁹⁾을 이용하여 구하였다. 총괄반응 속도식은 아래의 식 (2)와 같은 아레니우스 타입의 반응식을 사용하였다. 반응식에서 연료와 산화제 농도에 대한 지수 값은 기존의 Westbrook 등의 연구 결과⁽¹⁰⁾를 바탕으로 하여 $a=0.2$, $b=1.3$ 으로 두었으며, 지수항 내부의 활성화 온도 $T_a = E/R = 24,358$ K를 사용하였다.

$$\omega_f = A \exp(-T_a/T) [\text{CH}_4]^a [\text{O}_2]^b \quad (2)$$

다만 해석 과정에서 가스 물성을 구하는 방법 등에 따라 반응 상수의 값이 변할 수 있음이 알려져 있는데, 본 연구에서는 자체적으로 이론혼합비

의 메탄 공기 예혼합 화염의 전파속도가 40 cm/s 가 되도록 $A=2.3\text{E}13$ [(gmol/cm³)^{0.5}s⁻¹]로 두었다. 이에 대한 자세한 설명은 동일 프로그램을 활용하여 메탄 공기 이론혼합비의 화염전파속도 및 그리드의 존성을 검토한 기존의 연구⁽¹¹⁾를 참조하기 바란다.

해석에 사용된 프로그램은 화염대 주위에 밀집한 그리드를 형성할 수 있는 특징이 있어서 해석에 요구되는 시간을 줄일 수 있었는데, 반응대 근처에는 반응 정도에 따라 최소 0.125 mm 정도 크기의 그리드를 생성하였다. 기존 연구에 의하면, 이러한 스케일의 그리드는 예혼합화염의 경우에도 약 10 % 이하의 오차범위 내에서 전파속도 예측이 가능함을 알 수 있는데, 이는 농도구배에 의해 화염의 위치가 지배되는 확산화염의 특징을 미루어볼 때 충분히 작은 크기의 그리드로 판단된다. 해석 프로그램에 대한 보다 자세한 내용은 참고문헌⁽¹¹⁾을 통해 확인할 수 있다.

실험 결과를 직교 2 차원 공간에 대해 단순화하여 해석하고자 하였다. 해석의 단순화를 위해 몇 가지 가정이 요구된다. 우선, 실험에서 연료 투입관은 원형 단면을 가지는데 반해 해석에서는 Fig. 1(b)에 나타낸 바와 같이 2 차원 채널 내부의 유동을 해석하기 위해 채널과 동일한 간격을 가지면서 실험과 동일한 연료 유량과 동일한 속도로 분사할 수 있도록 수치해석에서의 연료관의 내부와 외부의 폭을 각각 $w_i = \pi d_i^2 / 4b \sim 0.8$ mm,

$w_o = \pi d_o^2 / 4b \sim 1.8$ mm로 설정하였다. 연료관 내부의 연료 속도 분포는 관의 길이가 충분히 길어서 완전발달에 가까운 속도 분포를 가정하였다.

채널에 공급되는 공기의 유속은 채널의 폭 방향으로 일정한 것으로 가정하였으며, 배출되는 유동은 유동방향으로 속도, 압력, 온도, 농도의 변화가 없음을 가정하였다. 채널 폭을 결정하는 좌우측 벽면에서는 슬립 벽면 조건을 부여하였으며, 부력에 의한 효과를 무시하였다. 또한 실제 실험에서는 채널의 좁은 간격 방향으로 점성력이 존재하지만, 본 수치해석에서는 채널 간격 방향으로의 점성력을 무시하였다. 수치해석에서 점성력을 고려하기 위해서는 3 차원 공간에 대한 해석을 하거나 간격 방향의 화염 구조와 벽면 근처에서의 소염에 대한 추가 모델이 요구되는데, 이러한 모델의 적용은 오히려 해석과 실험의 비교를 어렵게 하므로 본 연구에서는 다루지 않기로 한다.

또한 에너지 방정식의 경계조건으로는 화염으로부터 연료 투입관으로의 열전달과 채널을 이루

는 전후 벽면에 의한 고체 물질을 통한 열전달을 무시하였다. 다만 경우에 따라서 채널 벽면을 통한 간격 방향으로의 열손실을 고려하여 실험결과와 비교를 수행하였다. 다시 말해, 실제 실험에서는 제한된 공간에서 다양한 물리적 효과에 노출된 현상이 화염의 위치와 형상의 변화라는 결과를 보여주고 있다. 이에 반해 수치해석에서는 채널 간격 방향으로 충분한 길이를 가지는 이상적인 2 차원 거동을 해석하게 된다. 두 가지 방법에 따른 결과와 열손실에 대한 추가적인 해석을 통해 제한된 공간의 열적 효과와 기타 효과를 검토하게 된다.

3. 실험 및 해석 결과

실험에서는 균일유동의 속도를 31 cm/s 정도로 고정하고 연료관의 단면 평균 분사속도 V_f 를 변화시키면서 실험상의 화염선단의 위치를 검토하였다. 실험을 통해 관찰된 화염의 형상 변화를 Fig. 2 에 나타내었다. 유량의 증가에 따라 화염면의 위치가 노즐로부터 멀어지게 된다.

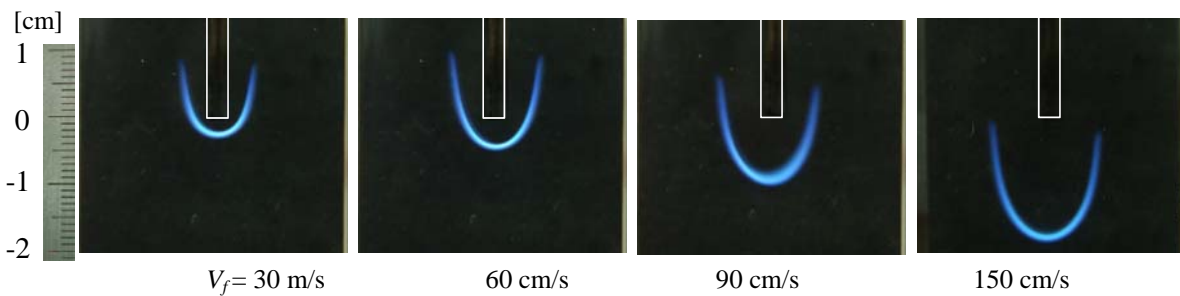


Fig. 2 Experimental results ($V_a = 30$ cm/s)

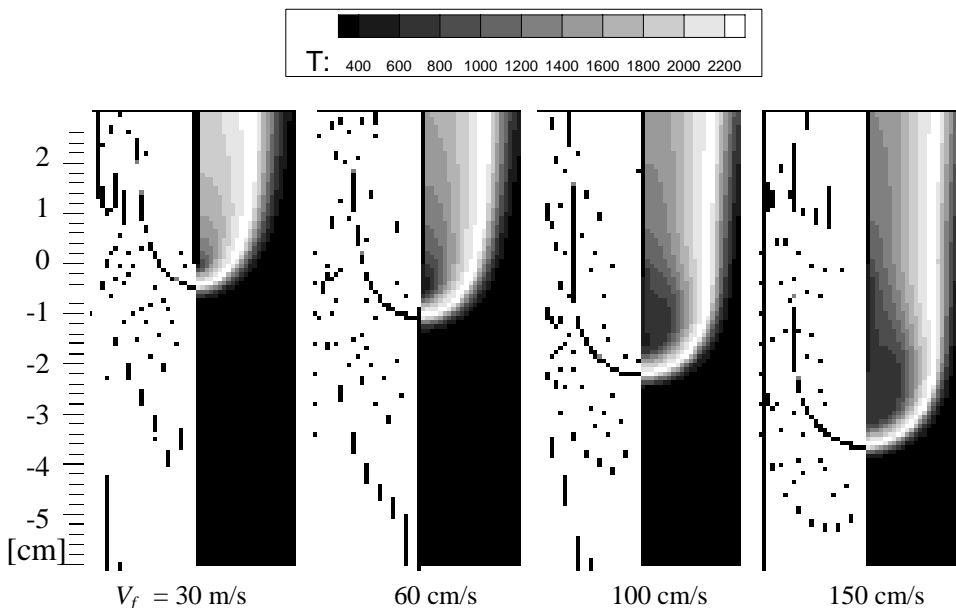


Fig. 3 Numerical results ($V_a = 30$ cm/s)

유량은 평균속도 60 cm/s 로부터 평균속도 168 cm/s 까지 2.8 배가 증가한 반면 화염면의 전체 면적은 크게 증가하지 않았음을 알 수 있다. 또한 유속의 증가에 따라 화염의 두께 감소를 사진을 통해 알 수 있다.

수치해석을 통해 유사한 조건인 공기의 평균유속 30 cm/s 조건에 대해 관찰하였으며, 그 결과를 Fig. 3 에 나타내었다. 그림에서 왼쪽은 반응대의 모양 변화와 유선의 형태를 나타내는데, 유선을 가로지르며 온도 곡선과 유사한 형상을 가진 굵은 선이 반응대의 위치이다. 수치해석 결과를 통해 화염의 위치는 유동 정체점보다 상류에 위치함을 알 수 있는데, 이는 메탄의 경우 이론 혼합 조건에서 메탄 량의 9 배 이상의 공기를 요구하기 때문에 유동 정체점을 기준으로 산화제 쪽에 화염이 존재하는 일반적인 특성이다. 화염 근처에서의 온도 변화를 Fig. 3 의 오른쪽에 나타내었다. 연료가 공급되는 관으로의 열전달을 고려하지 않았으므로 투입되는 연료는 항상 300 K 를 유지하고 있다. 연료 유량의 증가에 따라 연료 투입 관의 끝단에 저온 영역이 확대되고 있음을 알 수 있다. 반응대를 기준으로 실험 결과와 해석 결과를 비교할 때 전체적으로 유사한 경향을 가지는 것을 알 수 있다.

화염의 대표적 형상 특성인 화염의 선단과 후류 끝단의 위치에 대한 실험 및 수치해석의 결과를 나타낸 것이 Fig. 4 이다. 동일한 공기 유량에 대해 연료유량의 증가는 화염의 거리를 증가시키게 된다. 화염의 하류 끝단의 위치는 상류 위치의 변화와 거의 유사한 경향을 보이고 있다. 따라서 화염면의

증가는 화염의 폭 변화로 인해 주로 야기됨을 알 수 있으며, 화염의 폭/높이 비의 증가는 화염이 점차 작은 곡률을 가지게 됨을 의미한다.

그런데, 수치해석의 결과와 실험의 결과 비교를 통해 동일한 공기 유속에 대해 수치해석의 경우가 실험에 비해 화염이 연료 관 끝단으로부터 2 배 이상 멀리 존재하였다. 또한 실험의 경우 유동의 하류에서 화염이 더 이상 존재하지 않아서 화염의 길이가 정의되는 반면, 수치해석에서는 화염이 하류 쪽으로 계속 존재하였다. 이와 함께 화염의 폭 또한 수치해석의 경우가 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 실험의 경우 화염으로부터 벽면으로의 열손실과 화염으로부터 외부로의 복사 열손실이 존재하는 반면, 수치해석의 경우 단열 벽면 내에 화염이 존재한다고 가정하였으며, 복사 등에 의한 열손실을 고려하지 않았기 때문이다.

따라서, 수치해석에 있어 화염으로부터 열손실을 적용할 수 있도록 간단한 열전달 모델을 추가하였다. 좁은 채널 내에서의 열전달은 누셀수(Nusselt number)가 대략 4 정도임이 알려져 있다.⁽¹²⁾ 이를 이용하여 채널 내의 연소가스와 벽면 사이의 열전달을 채널과 외부 공기와의 대류 열전달 형태를 빌어 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\rho c_p u b \frac{dT}{dx} = -2h dx dy (T - T_\infty)$$

$$\rho u \frac{dc_p T}{dx} = -2 \frac{h}{b} (T - T_\infty) = -h^* (T - T_\infty) \tag{3}$$

여기서 b 는 채널의 간격으로 4.4 mm 이며,

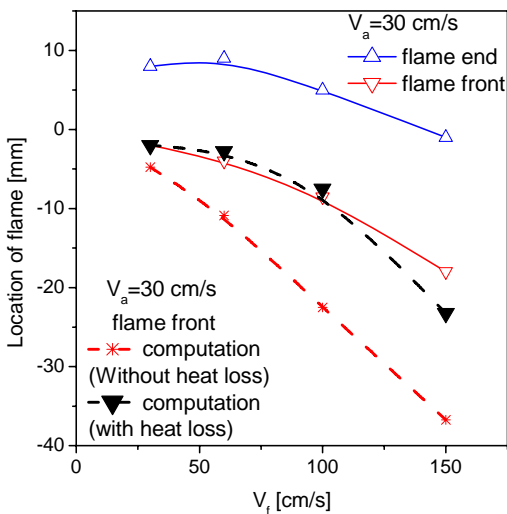


Fig. 4 Experimentally observed locations of the flame front and the end of the visible luminescence and their comparison with numerical results

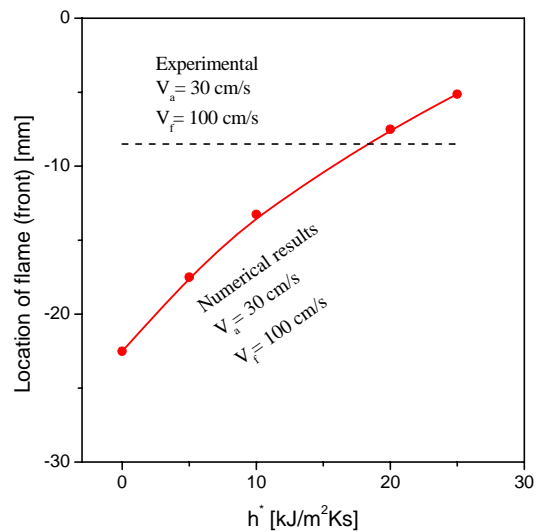


Fig. 5 Comparison and estimation of suitable coefficient of the convective heat loss from a flame to the channel

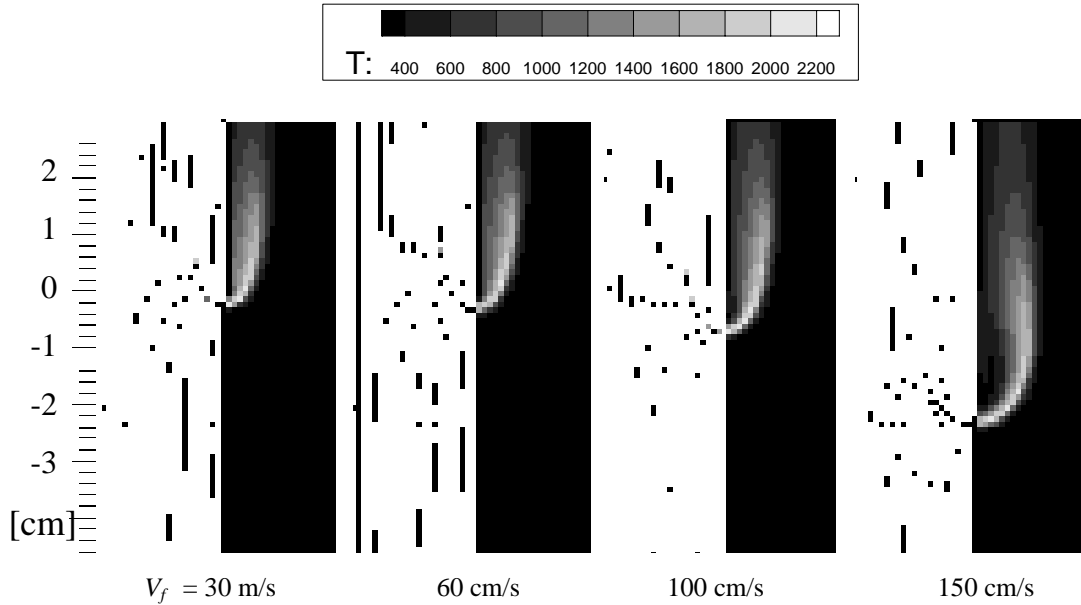


Fig. 6 Numerical results of the flames in a channel suffering heat loss ($V_a = 30 \text{ cm/s}$)

채널 내 유동에 대해 전후 두 면에서의 열손실이 있으므로 2 배를 취한 값이다. 단위 부피에 대해 전개된 수치해석 프로그램에서는 식 (3)과 같이 대류열전달 계수와 형상을 고려한 새로운 열전달 변수 $h^* = 2h/d \text{ [J/m}^3\text{Ks]}$ 를 사용하여 그 값 변화에 따른 화염의 거동 특성을 살펴보고자 한다.

실험과 유사한 조건인 공기유량 30 cm/s, 연료유량 100 cm/s 조건에 대해 다양한 $h^* = 2h/d$ 값을 부여하고 그 결과 화염 선단의 위치 변화를 Fig. 5 에 나타내었다. 열손실이 증가할수록 화염선단의 위치가 하류로 이동하였다. 해석 결과를 통해 $h^* = 18,000$ 정도의 값을 가질 때 실험 결과와 유사한 화염 위치를 가지는 것을 알 수 있다. 참고로, 누셀수를 약 4 로 가정하고 화염 근처 채널 내부의 평균온도를 약 900 K로 가정하였을 때의 h^* 값을 예측해 보면, 평균온도에서의 공기의 전도율을 이용할 때 $h = Nu \cdot k/d \sim 50 \text{ [J/m}^2\text{Ks]}$ 정도의 크기를 가지며, 이 경우 새로이 정의된 h^* 값은 대략 22,700 $\text{[J/m}^3\text{Ks]}$ 정도의 크기를 가지는 것을 알 수 있다. 이는 수치해석을 통해 판단된 값과 크기가 유사하며, 열손실이 화염의 위치 결정에 중요한 역할을 할 것을 짐작할 수 있다.

실험의 결과와 비교하기 위해 대략적으로 $h^* = 20,000$ 조건에 대해 연료 유량을 바꾸었을 때 화염 및 유동장의 변화 특성을 검토하였으며, 그 결과 반응대와 유동장 그리고 화염대 주위 온도

변화를 Fig. 6 에 나타내었다. 열손실이 없는 경우와 달리 수치해석의 결과에서도 하류에서의 소염이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 화염 선단의 위치 변화가 앞서 Fig. 2 에서 보인 실험 결과와 유사한 크기와 경향을 가짐을 알 수 있다.

열손실이 있는 경우의 수치해석 결과를 Fig. 4 에 추가로 나타내었다. 수치해석의 경우 반응 강도의 크기 기준에 따라 화염 후단의 위치가 민감하게 바뀌게 되므로 그 위치를 따로 비교하지는 않았다. 연료 유량이 작은 조건에서는 화염 선단의 위치변화 경향이 실험과 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 다만 연료의 유속이 증가함에 따라 화염의 위치가 상대적으로 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 일정한 열손실을 설정한 해석 모델에 비해 실제 화염에서는 연료 유속이 빨라짐에 따라 채널 내부에서의 열전달이 더욱 급격히 이루어지고 그 결과 외부로의 열손실이 증가할 수 있기 때문으로 판단된다. 또한 발생 열량의 증가에 따라 외부에서 발생하는 자연대류 역시 증가하고 이는 실험에서의 열손실 증가를 야기할 가능성이 있다. 이 밖에도 보다 큰 연료유속에서 채널 간격 방향의 유동 교란이 연료와 연소가스의 혼합을 증진하여 화염 위치에서의 연료조성을 이론에 비해 상대적으로 상당히 희석시킴으로써 연소강도를 낮출 가능성이 있다.

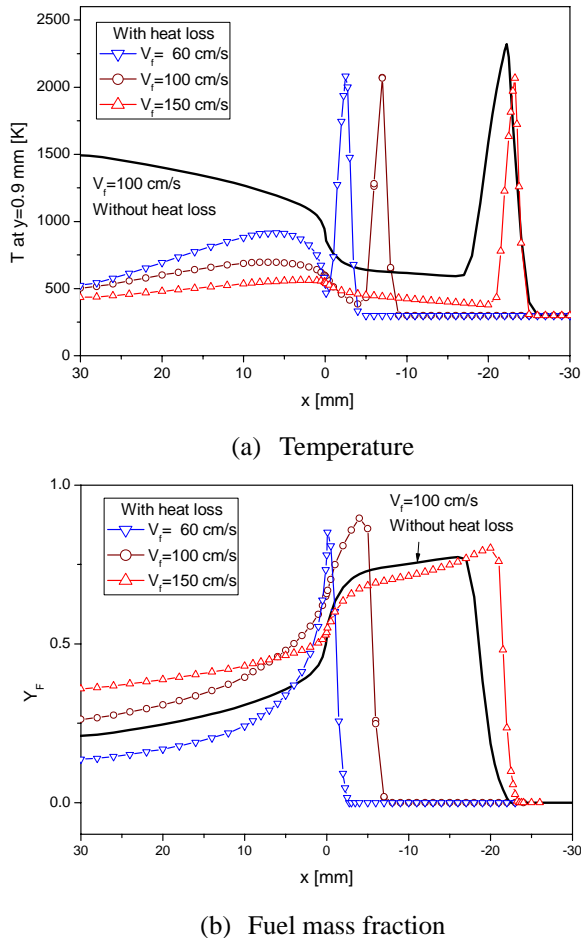


Fig. 7 Numerical results of temperature and fuel mass fraction along the $y=0.9$ mm constant line which flows on the outer surface of the fuel injection tube ($h^*=20,000$ [J/m^3Ks])

마지막으로 실제 연소기에서는 연료투입 노즐을 통해 열재생이 일부 이루어질 것으로 예상되는데 반해 수치해석에서는 이를 단열로 가정한 차이로 인해 화염 위치의 차이가 발생할 수도 있다. 이를 보다 자세히 고찰하기 위해 연료 투입 관의 표면을 따라 x 방향으로의 온도 변화를 살펴보기로 한다. 다양한 연료 속도에 대해 연료 튜브 표면을 지나는 $y=0.9$ mm 일정한 위치에서 x 방향 온도 변화를 나타낸 것이 Fig. 7(a) 이다. 채널을 통한 열손실이 있을 때와 열손실이 없는 경우에 대해 비교하였다. 비교를 위해 열손실이 없는 경우($V_a=30$ cm/s, $V_f=100$ cm/s)의 온도 분포를 실선으로 나타내었다. 열손실이 없는 경우에 $x = -20$ mm 근처에서 반응대로 인한 높은 온도 구간의 존재를 확인할 수 있다. 하지만 이는 유동 정체점에 가까운 위치여서 대부분의 연소가스는 반경방향으로 대류, 확산되기 때문에 $x=0\sim 15$ mm 사이에서 가스온도의 상승은 두드러지지

않는다. 이후 화염이 하류로 갈수록 관 표면에서의 온도가 증가하는 것을 알 수 있다. 반면에 동일 조건에서 채널 방향으로의 열손실이 존재할 경우 관의 끝단에 가까운 위치에서 가스온도가 최대를 가진 이후 지속적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 반응이 존재하는 구간이 제한되어서 이후에는 열 확산만 존재하기 때문이다. 만일 관을 통한 열 전달이 발생한다면 이러한 온도 감소는 더욱 빨리 일어날 것을 예상할 수 있다. 열손실이 존재하는 조건에서 연료 유량을 증가시키기에 따라 가스온도는 오히려 감소하는 것을 알 수 있다.

실용적인 측면에서 대향류 소형연소기를 개발하기 위해서는 열재생을 충분히 활용할 필요가 있는데 유량의 증가는 열재생의 측면에서는 오히려 불리한 결과를 유도함을 알 수 있다. 이러한 현상은 반응이 발생하는 부분이 점차 관 표면으로부터 멀리 위치하게 되어 상당수의 미연가스가 반응대와 관 표면 사이를 흐르기 때문으로 판단된다.

관 표면 근처에서의 연료 유출의 특성을 고찰하기 위해 동일한 방법으로 x 방향의 연료 질량분율의 변화를 나타낸 것이 Fig. 7(b)이다. 열손실이 없는 경우에 비해 동일 조건에서 열손실이 있는 경우는 화염의 위치가 관 끝단에 상당히 가깝게 위치하지만 미연가스의 배출은 더 큰 것을 알 수 있다. 연료 유량을 증가시키면 화염의 크기는 증가하지만 관 표면에서의 미연가스 농도도 역시 증가함을 알 수 있으며, 이는 미연가스의 배출이 증가함을 의미한다. 실제로는 미연가스의 일부는 고온의 열로 인해 해리되기도 하겠지만 수치해석을 통해 대략적인 유량비를 인지하는 것은 연소기를 설계하는 데 중요한 정보가 될 것이다.

4. 결 론

본 실험의 목적은 얇은 채널 내부에 형성된 대향류 확산 화염의 연료 유속과 공기 유속의 변화에 따라 화염의 거동을 살펴보는 것이다. 이를 위해 실험적으로 화염의 실제 거동이 관찰되었으며, 이를 수치해석 결과와 비교하였다.

연료/공기 유량비의 증가에 따라 화염 선단의 위치가 연료 투입관의 끝단으로부터 점차 멀리 위치하였다. 그러나 실험 결과에 비해 수치해석을 통해 구해진 이상적인 대향 확산화염의 위치는 상대적으로 큰 거리를 가지는 것을 알 수 있었으며, 실험 결과와 유사한 해석 결과 도출을 위해서는 화염으로부터 추가적인 열손실을 유도할 필요가

있었다. 실험 결과와 일치하는 결과를 위해 부과된 열손실은 이론적으로 예측되는 열손실 크기와 유사하였으므로 실제 화염의 거동이 열손실에 의해 크게 지배됨을 짐작할 수 있다.

추가적으로 연료투입관 표면에서의 온도분포 및 농도 분포를 채널 간격방향의 열손실 유무에 따라 비교하였다. 이를 통해 높은 유량에서의 실제 연소기의 열회수 특성이 낮아지고 미연가스의 배출이 커질 것을 예측할 수 있었다. 이러한 결과는 소형의 확산화염 마이크로 연소기를 설계하고 해석하는데 도움 될 것으로 판단한다.

후 기

본 연구는 2007 년도 중앙대학교 교내연구비의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

(1) Fernandez-Pello, A.C., 2002, "Micropower Generation Using Combustion: Issues and Approaches," *Proc. Combust. Inst.* 29, 883~899.
 (2) Vican, J., Gajdeczko, F.L., Dryer, F.L., Milius, F.L., Aksay, I.A., Yetter, R.A., 2002, "Development of a Microreactor as a Thermal Source for Microelectro-Mechanical Systems Power Generation," *Proc. Combust. Inst.* 29, 909~916.
 (3) Kim, N.I., Kato, S., Kataoka, T., Yokomory, T., Maruyama, S., Hujimori, T., and Maruta, K., 2005,

"Flame Stabilization of Small Swiss-Roll Combustors as Heaters," *Combust. Flame*, 141 229~240.
 (4) Miesse, C., Masel, R.I., Short, M., Shannon, M.A., 2005, "Diffusion Flame Instabilities in a 0.75 mm Non-Premixed Microburner," *Proc. combust. Inst.* 30, 2499~2507.
 (5) Tsuji, H., 1982, "Counterflow Diffusin Flames," *Progress in Energy and Combustion Science* 8, 93.
 (6) Cho, S.M., Kim, N.I., 2007, "Experimental Study on the Methane Premixed Flame Propagation Affected by the Aspect Ratio of the Cross-Sectional Area of a Conductive Small Channel," *J. of the IST (ISSN 1975-7174)* V. 37-1, 33~39.
 (7) Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 1995, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics," *Longman Sci. & Tech.*
 (8) Kee, R.J., Rupley, F.M., Miller, J.A., 1989, Technical Report SAND89-8009 (CHEMKIN-II), Sandia National Laboratories, Livermore, CA.
 (9) Kee, R.J., Dixon-Lewis, G., Warnats, J., Coltrin, M.E., Miller, J.A., 1986, Technical Report SAND86-8246 (TRANFIT), Sandia National Laboratories, Livermore, CA.
 (10) Westbrook, C.K. and Dryer, F.L., 1981, *Combust. Sci. Technol.* 27, 31~43.
 (11) Kim, N.I., and Maruta, K., 2006, "A Numerical Study on Propagation of Premixed Flame in Small Tubes," *Combust. Flame* 146, 283~301.
 (12) Incropera, F.P, De Witt, D.P., 2002, "Heat and Mass Transfer," 5th Ed. John Wiley & Sons, Inc.