

관 내부 메탄-공기 분류 비예혼합 화염의 부상 특성 기초 연구

김 고 태* · 김 남 일**

* 중앙대학교 기계공학부

Basic Study on Lift-off Characteristics of Non-Premixed Flames of Methane-Air Jet in a Tube

Go Tae Kim* and Nam Il Kim**

* School of Mechanical Engineering, Chung-Ang Univ.

(Received December 22, 2010 ; Revised January 19, 2011 ; Accepted January 19, 2011)

Key Words : Flame Stabilization(화염안정화), Lifted Flame(부상화염), Coaxial Jet(동축분류), Methane-Air Flame(메탄-공기화염), Flame in a Tube(관내화염)

초록: 비예혼합 화염의 부상 조건은 연소기의 운전 조건을 한정하는 매우 중요한 변수이다. 동축류 층류 비예혼합 화염의 경우 점성계수와 물질 확산 계수의 비로 정의되는 슈미트 수가 1 보다 큰 조건에서 안정적인 부상화염이 존재하고 그 반대의 경우 부상이 불가능한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 동축 관내에서의 화염의 부상 특성에 대해 슈미트 수가 1 보다 큰 프로판과 슈미트 수가 1 보다 작은 메탄 비예혼합 화염의 부상 안정화를 실험적으로 비교하였다. 그 결과, 제한된 공간에서는 슈미트 수가 1 보다 작은 조건에서도 안정적인 부상화염이 존재할 수 있음을 확인하였다. 그 원인 규명을 위해 간단한 비반응 유동장에 대한 수치해석을 수행하였다. 결론적으로 개방 공간에서와는 달리 관내 조건에서는 유한한 크기의 화염 공간으로 인해 인접한 상류에서 유동 재편이 물질확산에 비해 선택적으로 재편됨으로써 새로운 안정화 기구가 형성될 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 제한된 공간내에 화염이 형성되는 일반적인 연소기의 화염안정화 설명에 중요한 단서를 제공한다.

Abstract: Flame lift-off conditions determine the operating conditions of burners. It is known that a flame can be lifted when the Schmidt number (Sc), which is the ratio of the dynamic viscosity to the mass diffusivity, is greater than unity. In this study, the flame lift-off characteristics of non-premixed flames of propane ($Sc > 1$) and methane ($Sc < 1$) in a coaxial outer air tube were experimentally compared. The experimental results indicated that stable lifted flames could be obtained even when $Sc < 1$ in a confined air tube. On the basis of the results of a simple numerical analysis, it was confirmed that a new flame stabilization mechanism exists in the tube. A velocity field is preferentially developed upstream of the flame, and it results in a new stabilization condition. This result can be very useful in explaining the stabilization of the flames of ordinary burners in which a flame is produced in a confined space.

- 기호설명 -

- h : 화염의 부상 높이
- H : 외관 출구부터 노즐까지 거리
- V_a : 동축류 평균 속도
- V_f : 연료 분출 속도
- Sc : 슈미트(Schmidt) 수
- ν : 동점성 계수
- μ : 점성 계수

- \mathcal{D} : 물질확산 계수
- γ : 다공성 상수(porosity number)
- d_a : 공기 외관 내경
- d_f : 연료 노즐 내경

1. 서 론

비예혼합 화염의 부상은 화염의 대표적인 거동 특성 중 하나로 연소기의 안정적인 운전을 위한 중요한 특성이다. 이와 관련하여 층류 부상화염의 거동 특성은 난류 부상화염 구조의 기초 연구의

† Corresponding Author, nikim@cau.ac.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

대상으로 오랫동안 연구되어 왔다. 특히, Chung 등⁽¹⁻³⁾은 층류 비예혼합 부상화염의 선단 부분을 삼지화염(tribrachial flame) 혹은 에지화염(edge flame)의 구조로 설명하고, 그 부상 메커니즘을 규명하였다. 삼지화염은 연료와 산화제의 확산 경계층에 형성된 화염이 과농 및 희박 예혼합 화염과 그 후류의 잉여 산화제 및 연료의 확산에 의해 형성된 확산 화염을 함께 가지는 구조를 의미한다. 미소 노즐을 통한 연료의 층류 분류에 의해 형성된 부상화염의 경우 농도 및 유속에는 발달 상사성을 가지므로 이를 동점성계수와 물질확산 계수의 비로 정의되는 슈미트(Schmidt) 수 $Sc \equiv \nu/D$ 와 연계하여 설명하였다.

유동 상사성에 근거해 $Sc > 1$ 조건에서는 화염이 안정적으로 부상이 가능하며 $Sc < 1$ 조건에서는 안정적인 부상이 불가능함을 설명하였다. 다시 말해, 메탄 화염의 경우 $Sc < 1$ 의 조건에 해당하므로 안정적인 부상화염을 획득할 수 없다. 하지만, 일부 연구를 통해 메탄 화염의 안정적인 부상이 보고되고 있는데, 이는 주로 연료의 분사관 직경이 상대적으로 큰 경우로 연료 혹은 산화제에 희석제를 첨가한 조건이나 부분 예혼합 조건일 때에 해당한다.^(4,5) 이러한 경우에는 더 이상 유동장과 농도장 사이의 상사성이 만족될 수 없는 조건으로 화염의 부상 메커니즘 설명을 위해 별도의 접근이 요구된다. 이러한 결과는 연소기의 형상과 경계조건에 따라 보다 다양한 화염의 안정화 메커니즘의 형성이 가능함을 의미하며, 이는 일반적인 연소기의 화염 안정화 특성을 위해 기존 이론의 적용이 제한 받음을 의미한다.

일반적인 산업용 연소기의 경우 두 가지 관점에서 기존의 상사성 해석 조건과 차이를 가지고 있다. 첫째, 화염은 개방되어 있는 공간에 존재하지 않고 화염의 크기와 비교 가능한 스케일의 공간 내부에 존재하는 경우가 많아서 연소공간의 크기 효과를 고려해야 한다. 둘째, 연료 노즐 주위에 공급되는 공기 역시 좁은 노즐을 통해 유입되고 있으며, 완전연소를 위해 요구되는 공연비를 고려할 때 무시할 수 없는 속도를 가지고 연소공간으로 유입된다. 그러나 지금까지의 부상 화염 연구는 이러한 두 가지 효과에 대한 직접적인 연구가 충분히 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 제한된 공간에서 비예혼합 연소가 이루어지고 공급되는 공기의 유속이 상대적으로 큰 조건에서의 화염의 안정화 특성의 변화 가능성을

연구하고자 한다. 이를 위해 비교적 해석이 용이한 동축관 구조의 연소기를 이용하여 부상이 불가능한 것으로 알려진 메탄 비예혼합 화염의 관 내부에서의 부상 특성을 실험적으로 관찰하고 이를 설명하기 위한 기초 모델을 제안하고자 한다. 이러한 연구는 학술적으로는 기존의 층류 비예혼합 화염의 안정화 메커니즘의 한계를 제시할 수 있으며, 실용적인 면에서는 메탄 및 천연가스를 주 연료로 사용하는 연소기의 운전조건과 설계의 기초 자료가 될 수 있을 것이다.

2. 실험

2.1 실험 방법

관 내부의 메탄 부상화염을 관찰하기 위한 실험 장치를 Fig. 1 에 나타내었다. 동축관을 형성하는 외관의 재질은 석영이고 내경(d_a) 30 mm 이다. 기존의 연구를 통해 한쪽이 개방되어 있는 반밀폐 관 내의 화염 부상은 화염이 출구 경계 근처에 위치할 때 출구로부터의 거리에 의해 상당부분 영향을 받음을 보였다.⁽⁶⁾ 따라서 본 연구에서는 화염이 출구경계에서 충분히 상류에 위치할 수 있도록 500 mm 길이의 외관을 사용하였으며, 연료 노즐의 끝단은 외관 출구로부터 200 mm 이상의 거리를 확보하였다. 내부의 노즐은 상하 이동과 중심 조정이 가능하도록 외경이 6 mm 인 스테인리스 관에 연결되어 있으며, 그 끝에 연료가 분사되는 두 가지의 미소 직경 노즐을 장착하였다. 사용한 연료 노즐은 각각 내경 0.58 mm, 길이 140 mm 와 내경

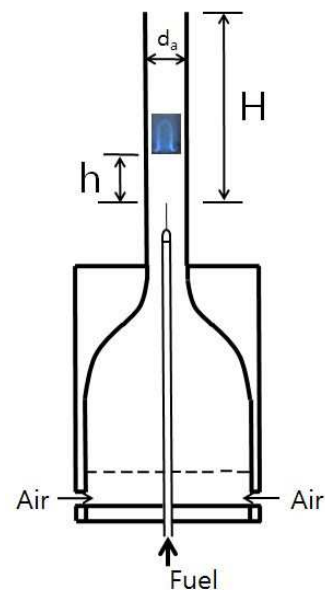


Fig. 1 Schematic of the burner used in experiment

0.194 mm, 길이 30 mm 의 두 가지이다. 외관의 상류에는 균일한 공기 유량 공급을 위해 단면 수축비 1:13 의 수축부를 두었다.

연료와 공기는 MFC(mass flow controller)를 이용하여 2% 오차범위로 공급되었으며, 건식가스미터기를 이용하여 유량을 보정하였다. 연료는 주로 고순도 메탄(99.999%)을 사용하였으며, 고순도 프로판(99.99%)의 실험 결과와 비교되었다. 공기는 수분필터(90% 이상 수분제거)를 통과한 압축공기를 이용하였다. 부상된 화염의 높이는 연료노즐 끝단으로부터 화염의 기저까지의 거리를 하이트게이지(height gauge)를 이용하여 측정하였다. 화염 사진은 Nikon D80 을 이용하여 촬영하였다.

2.2 실험 결과

메탄 화염의 부상 특성을 논하기에 앞서 기존연구를

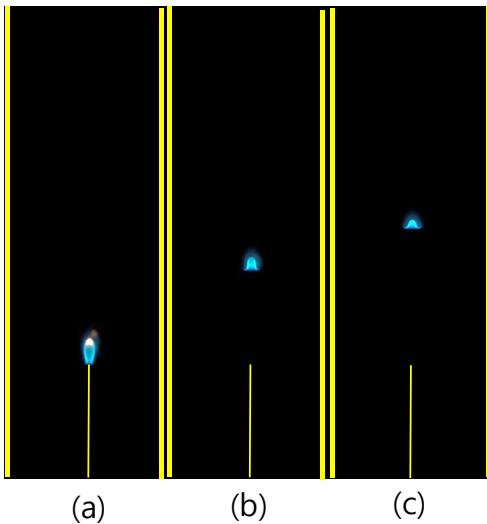


Fig. 2 Direct images of propane lifted flames. $d_f=0.194$ mm, $V_a=24$ cm/s (a) $V_f=6.8$ m/s, (b) $V_f=7.7$ m/s, (c) $V_f=8.9$ m/s

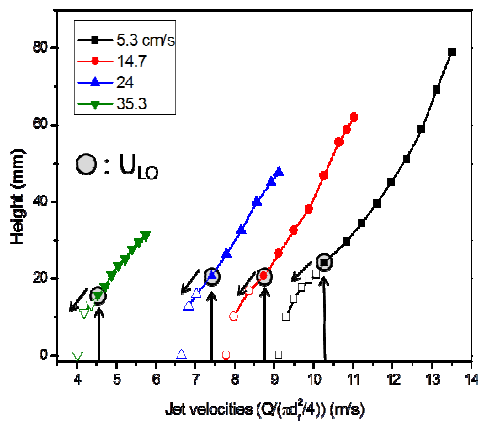


Fig. 3 Effect of fuel jet velocity on lift-off height of propane flames for various coflow velocities

통해 부상 가능한 것으로 알려진 프로판 화염의 동축관 내 부상 특성을 선행 실험하고 그 결과를 기존의 연구와 비교하고자 한다. Fig. 2 는 연료 노즐지름 $d_f=0.194$ mm, 공기 주위류 속도 $V_a=24$ cm/s 에서 연료 유량 증가에 따른 프로판 화염의 사진이다. 연료 유량의 증가에 따라 일정한 연료 유속 이상에서 안정적인 부상화염의 존재를 확인할 수 있다.

프로판 연료의 분사 속도 및 주위 공기의 속도 조건에 대해 프로판 화염의 부상 높이를 측정된 결과가 Fig. 3 이다. 위쪽 방향의 화살표는 연료 증가에 따라 화염의 부상이 발생하는 조건이며, 아래쪽 방향의 화살표는 부상된 화염이 연료 노즐에 다시 부착되는 과정을 의미한다. 부상 높이를 나타낸 기호 중 속이 비어 있는 기호는 부상된 조건에서 제트의 속도를 줄였을 때에 해당한다. 그 중에서 부상 높이가 0 인 조건은 제트의 속도가 낮아져서 화염이 노즐에 재부착된 경우이다. 프로판의 부상화염은 동축류의 속도가 증가할수록 화염의 부상이 시작되는 연료 분사 속도가 감소함을 알 수 있다. 이러한 결과는 기존에 동축류 프로판 부상화염에 대해 연구한 결과와 매우 유사한 결과를 보이고 있다.⁽⁷⁾ 그러므로 동축관 내부의 실험조건은 열린 공간에 대한 기존의 부상 이론⁽¹⁾을 적절히 추종함을 알 수 있다.

그런데 기존의 부상 이론에 의하면 $Sc < 1$ 인 메탄 화염의 경우 부상이 발생할 수 없다는 것이 알려져 있다. 하지만 결과적으로 본 연구를 통해 동축관 내에서는 메탄 화염 역시 안정적으로 부상할 수 있음을 확인하였다. 메탄 화염의 안정적인 부상 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 실험에 사용된 노즐의 지름은 $d_n=0.58$ mm 로 프로판 화염 부상 실험에 사용된 연료 노즐에 비해서는 상대적으로 크지만 여전히 1 mm 이하의 매우 작은 관을 사용하고 있으며, 개방된 조건에서 주위 공기류의 속도가 매우 작은 조건에서는 부상이 발생하지 않는 경우에 해당한다. (a)는 동축류 속도 $V_a=18$ cm/s, $V_f=8.7$ m/s (b)는 $V_a=23$ cm/s, $V_f=7.9$ m/s, (c) $V_a=27$ cm/s, $V_f=5.7$ m/s 일 때의 화염이다. 동축류의 속도가 작을 때에는 부상하는 현상이 발견되지 않았고, 동축류의 속도를 증가시키게 되면 메탄 또한 안정된 부상화염이 나타나게 됨을 관찰하였다.

메탄 부상화염의 부상 높이를 측정된 결과를 Fig. 5 에 나타내었다. 메탄의 부상화염 또한 동축류의 속도가 증가하면 부상이 시작되는 제트의 속도는 더 낮아지게 되고 제트의 속도가

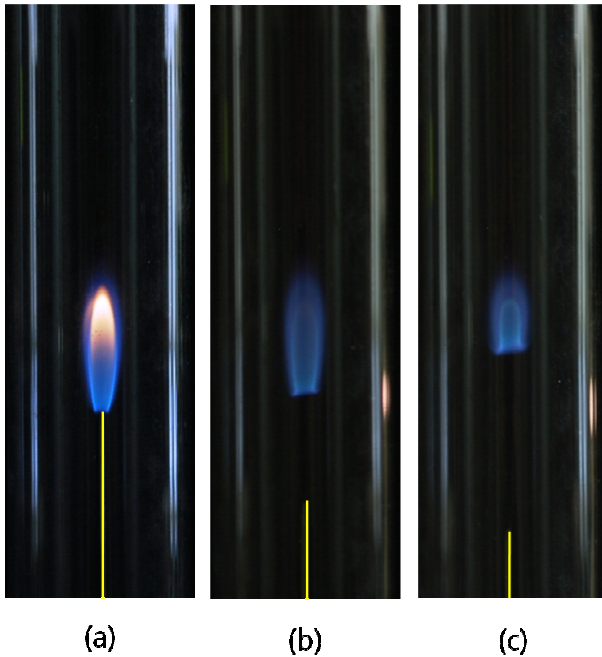


Fig. 4 Direct images of methane lifted flames. $d_f=0.58$ mm (a) $V_a=18$ cm/s, $V_f=8.7$ m/s, (b) $V_a=23$ cm/s, $V_f=7.9$ m/s, (c) $V_a=27$ cm/s, $V_f=5.7$ m/s

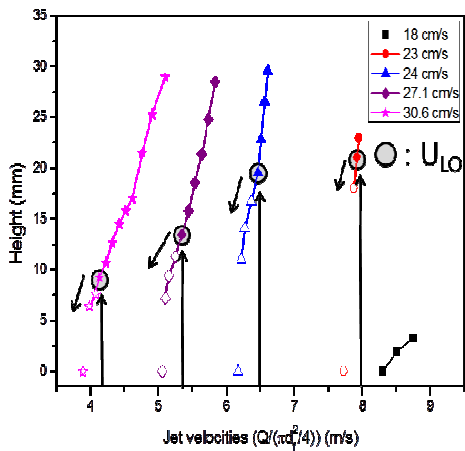


Fig. 5 Effect of fuel jet velocity on lift-off height of methane flames for various coflow velocities

증가하면 부상화염의 높이는 증가함을 볼 수 있으며, 부상된 화염의 연료노즐 재부착 특성 역시 프로판의 부상화염과 유사한 현상을 보이고 있다. $V_a=18$ cm/s 조건은 화염이 삼지화염의 형상을 명확히 보이지는 않지만 노즐에서 조금 떨어져 있는 경우이다. 그리고, $V_a=23$ cm/s 조건에서는 부상조건이 지극히 좁은 지역에서 발생하기 하기 때문에 화염의 불안정한 거동을 관찰할 수 있었다. 메탄의 부상화염은 프로판에 비해 충분히 큰 공기 동축류의 속도 조건에서

부상할 수 있는 것으로 보아서 동축류의 속도에 따른 새로운 부상메커니즘의 존재 가능성을 알 수 있다.

이러한 관내 메탄 화염의 부상의 새로운 메커니즘 중 하나로 관 내부에 화염이 존재할 때 화염 상류에서 발생하는 유동 재편의 효과에 주목하였다. 기존의 관 내 예혼합 화염에 대한 연구⁽⁸⁾에 의하면 관 내에 화염이 존재할 때에는 화염에서의 기체 온도 상승에 따른 체적 팽창 혹은 속도의 증가와 화염 후류에서의 고온 기체의 점성력의 증가로 인한 압력 재편이 급격히 발생하게 된다. 이러한 압력 재편은 개방된 공간에서의 화염과 달리 관 내 화염의 경우 상대적으로 큰 상류의 유동 재편을 직접 유발하게 된다. 비록 본 연구에서의 화염이 확산화염이어서 기존의 예혼합 화염과 직접 비교될 수는 없지만 관 내 확산화염의 존재 역시 부분적인 체적 팽창 및 하류 기체 점성의 증가를 유발한다는 점에서 예혼합 화염에 대한 이해를 부분적으로 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 부상 확산화염의 선단이 희박 및 과농 예혼합 화염의 구조를 가진다는 발상이 삼지화염의 근본적인 이해의 출발임을 상기할 때 그 연관성을 무시할 수 없다.

본 연구에서는 관내에 부분적으로 존재하는 화염이 화염 상류의 유동에 미치는 영향을 비교적 간단하게 해석할 수 있는 방법으로 다공성 물질에 대한 이론을 도입하였다. 다공성 물질에 관한 모델은 비록 화염하류에서의 온도 및 체적 변화를 직접 모사할 수는 없지만 다공성 물질을 통과할 때 기공률의 감소에 따라 유효 속도의 증가가 발생하며, 다공성 물질의 유효 표면적의 증가에 따라 기체의 유효 점성력이 증가한다는 점에서 화염 후류에서의 압력 변화 특성을 모사할 수 있을 것으로 기대되었기 때문이다. 이러한 가설을 바탕으로 비반응 유동에 대한 간단한 수치해석을 수행하였으며 이에 대해 다음 장에서 설명하기로 한다.

3. 수치 해석

3.1 수치 해석 방법

상용프로그램인 Fluent⁽⁹⁾를 이용하여 비압축성 정상상태의 층류 유동 및 연료와 산화제 농도의 공간 분포를 해석하였다. 해석된 지배방정식은 연속방정식, 운동량 방정식에 대한 유한체적 차분화 식과 메탄, 산소, 질소의 비반응 수송 방정식이며, 각각의 물리적 표현은 아래와 같다.

Continuity equation:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

Momentum equation:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}_i) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{v}_i) \quad (2)$$

Species equation:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = \nabla \cdot (\rho D_{i,m} \nabla Y_i), (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

여기서 \vec{v} 는 유체의 속도, ρ , μ , p , $D_{i,m}$, Y_i 는 각각 밀도, 점성계수, 압력, 물질 확산계수, i 성분 질량분율을 나타낸다.

해석에 사용된 경계조건과 해석영역은 Fig. 6 에 나타내었다. 두 개의 입구조건을 가지고 있으며, 초기 온도 조건은 300 K 이고, 벽면조건은 no-slip 조건으로 하였다. 전체 해석 영역은 15 mm × 300 mm 이고, 연료 노즐의 반지름은 0.29 mm, 두께는 0.1 mm, 길이는 100 mm 이다. 다공성 물질의 위치는 화염의 부상 조건과 유사하게 노즐 출구에서 20 mm 지점에 위치 시켰으며, 실험에서 관찰된 화염의 크기와 유사하게 반경 2.5 mm, 길이 8 mm 로 두었다. 관심 대상 영역인 노즐출구부터 다공성 물질 전면까지 충분한 격자를 두고 해석하였다.

3.2 다공성 물질 모델

상용 코드인 Fluent 에서 제공하는 다공성 물질에 대한 유동장 해석은 다공성 물질을 통한 압력강하 모델은 점성 효과를 고려한 Darcy 모델에 속도증가에 따른 압력 저항의 증가를 추가한 Forchheimer 모델을 사용하였다.

$$\nabla p = -\frac{\mu}{a} \vec{v} - \sum_{j=1}^3 C_{2i,j} \left(\frac{1}{2} \rho v_j |v| \right) \quad (4)$$

여기서 a 는 다공성 물질의 투과도를 나타내며, C_2 는 유속의 증가에 따른 관성저항에 대한 상수 값이다. 다공성 물질 내부의 속도 처리 방식은 표면속도방식(Superficial velocity formulation, SVF)과 물리속도방식(Physical velocity formulation, PVF)이 있다. SVF 의 경우는 위의 두 가지의 압력강하의 모델만을 고려하기 때문에 기공률의 값에 따른 다공성 물질 내부의 속도 변화가 없게 된다. 이에 반해 PVF 는 화염으로 가정된 다공성 물질 내부의 속도 변화를 반영할 수 있는 모델이며 각각의 모델에서 사용하는 속도는 기공률 γ 을 고려하여 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\vec{v}_{SVF} = \gamma \vec{v}_{PVF} \quad (5)$$

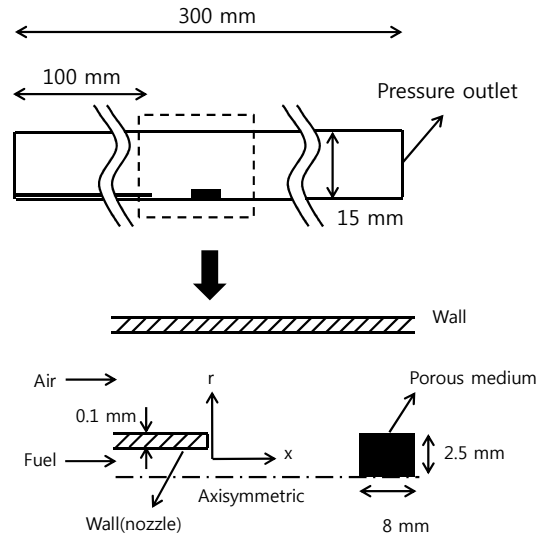


Fig. 6 Boundary conditions and computational domain

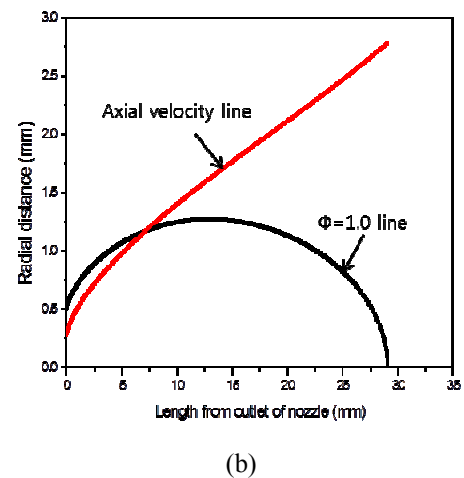
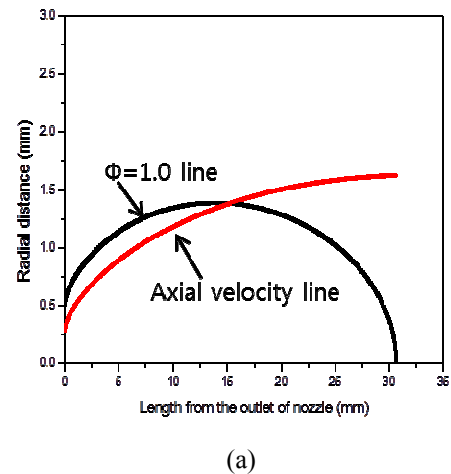


Fig. 7 Spatial location of a stoichiometric contour and a constant velocity contour (38.2 cm/s) of cold flow without a porous medium. $V_f = 6.0$ m/s (a) $V_a = 15$ cm/s, (b) $V_a = 25$ cm/s

이러한 모델을 적용할 때 다공성 물질에서의 질량과 모멘텀 보존 방정식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial(\gamma\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma\rho\vec{v}) = 0 \tag{6}$$

$$\frac{\partial(\gamma\rho\vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma\rho\vec{v}\vec{v}) = -\gamma\nabla p + \nabla \cdot (\gamma\vec{\tau}) + \gamma\vec{B}_f - \left(\frac{\mu}{a} + \frac{C_2\rho}{2}|\vec{v}|\right)\vec{v} \tag{7}$$

다공성 물질 모델의 설정을 위해서는 화염에서 나타나는 물리적인 특성을 고려해야 한다. 메탄 확산화염의 온도를 2000 K 로 가정하면, 이상기체 방정식에서 연소가스의 밀도는 상온상태의 미연가스 밀도의 15 %로 낮아지며, 부피팽창으로 인해 가스의 속도는 급격하게 증가하게 된다. 이러한 현상을 다공성 물질 모델을 이용하여 묘사하기 위해 기공률을 0.15 로 설정하였다. 그리고 온도의 상승으로 인하여 공기의 점성은 4 배정도 증가하므로 식(7)에서 α 값을 0.25 로 설정하였다.

3.3 수치해석 결과

동축류의 속도에 따른 메탄의 부상화염의 현상

을 연구하기 위해서 수치해석을 수행하였다. 다공성 물질을 이용한 해석에 앞서 화염이 없는 조건에서의 관 내부의 비반응 유동에 대해서 해석하였다. 연료 분사 속도 6.0 m/s 로 일정한 조건에서 동축류 공기 속도를 15 cm/s, 25 cm/s 에 대한 해석 결과가 각각 Fig. 7(a)와 7(b)이다. 실험에서 (a)는 부상화염이 없는 조건이며, (b)는 부상화염이 존재하는 조건이다. 이론혼합비에 해당하는 농도조건의 공간 분포와 축 방향 유속이 메탄 화염의 층류 연소속도 38.2 cm/s⁽¹⁰⁾에 해당하는 등속도선의 공간 분포를 비교하였다. 두 선의 교차점에 위치한 화염이 이론 혼합비 선을 따라 하류로 움직일 때 두 조건 모두에서 유속이 증가함을 알 수 있다. 분사 속도가 주위 공기 속도에 비해 큰 조건이므로 축 중심으로 이동함에 따라 속도가 증가하기 때문이다. 이러한 조건에서는 화염은 더욱 하류로 이동하게 되므로 두 조건 모두 안정적인 부상화염을 가질 수 없음을 알 수 있다.

동일한 조건에 대해 다공성 물질 모델을 적용하였을 때 해석 결과를 Fig. 8 에 나타내었다. 노즐 출구에서 20 mm 떨어진 지점에 다공성 물질이 위

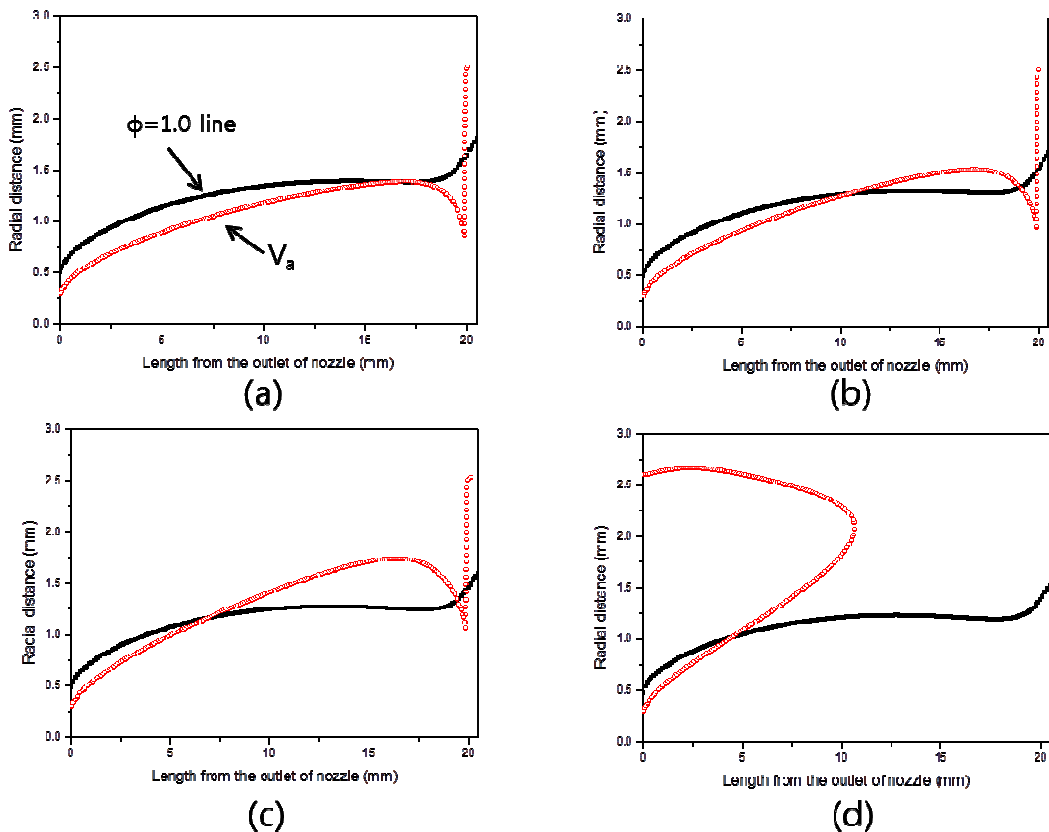


Fig. 8 Spatial location of a stoichiometric contour and a constant velocity contour (38.2 cm/s) of cold flow with a porous medium. Porosity= 0.15, $V_f = 6.0$ m/s (a) $V_a = 15$ cm/s, (b) $V_a = 20$ cm/s, (c) $V_a = 25$ cm/s (d) $V_a = 30$ cm/s

치하며 제트 속도 6.0 m/s 에서 다양한 동축류의 속도에 대한 이론혼합비 선과 연소속도에 해당하는 등속도(38.2 cm/s) 선의 공간분포를 보여준다. 다공성 물질 전면부에서 유동재편으로 인하여 유속이 감소하고 메탄의 체류 시간 증가로 인해 이론 혼합비 선은 반경 방향으로 이동하게 됨을 알 수 있다. 공기 유속의 증가에 따라 중심축에 가까이 있던 속도 일정 선은 이론혼합비 선과 가까워지고 서로 교차하게 됨을 볼 수 있다. 이러한 조건에서 Fig. 8(b)와 8(c)의 결과는 세 개의 교차점이 발생하는 것을 보여준다. 그 중 최 우측의 교차점은 다공성 물질 내부에 해당하므로 논의에서 제외하기로 하고 다공성 물질 직전에서의 교차점에 주목하기로 한다. 이러한 교차점에서는 이론 당량비 선을 따라 화염이 하류로 이동할 때 속도 일정 선의 외곽으로 화염이 이동함을 의미하므로 화염 선단이 낮은 유체 속도에 노출됨을 알 수 있다. 따라서 상대적으로 높은 전과속도를 가지는 화염은 상류로 이동하게 되고 결과적으로 안정적인 부상화염이 존재할 수 있게 된다.

이와 같이 다공성 물질 선단에서 나타나는 새로운 교차점의 발생은 기존의 부상화염의 안정화 기구를 만족시키는 조건이 된다. 또한, 이 조건은 실험에서도 부상이 가능한 범위에 해당한다. 동축류의 속도를 더욱 증가시키게 되면 연소속도에 해당하는 등속도선은 이론 혼합비 선에서 벗어나게 되며 다공성 물질 직전에서의 속도는 층류 연소속도까지 감소할 수 없게 된다. 이러한 조건에서는 속도와 당량비 선의 추가적인 교차점이 발생하지 않게 되고 화염 날림이 발생하게 된다.

해석의 결과로부터 메탄의 부상화염은 관 내부에 형성된 화염으로 인한 화염 전후의 압력장의 변화와 화염 선단의 유동재편 특성이 상류의 유속 및 농도 분포에 영향을 주게 되고, 이로 인해 동축류 속도에 따른 유속의 변화가 추가적인 부상조건을 발생시킬 가능성이 있음을 알 수 있다.

4. 결론

동축류 속도의 변화에 따른 관 내부의 메탄의 부상화염의 특성에 대해서 실험과 수치해석을 통하여 연구하였다. Sc 수가 1 보다 작은 메탄의 경우 일반적인 이론에 의하면 안정적으로 부상할 수 없는 조건이지만, 관 내부에 형성된 화염의 경우 안정적인 부상조건이 존재함을 실험적으로 확인하였다.

관내 메탄 비예혼합 화염의 안정적 부상은 화염

근처에서의 유동 재편 특성에 의해 농도장과 속도장의 차별적인 발달로 인해 새로운 안정화 메커니즘이 생겼기 때문으로 판단되었다. 이러한 새로운 화염 안정화 메커니즘의 가능성을 평가하기 위해 비반응 유동장에 대한 수치해석을 수행하였다.

화염 근처의 유동 재편 특성을 간단히 모사할 수 있는 모델로 화염을 다공성 물질로 모사하는 방법을 통해 실험에서의 부상 조건에 해당하는 해석 결과를 도출하였다. 그 결과 다공성 물질 모델이 화염 주위 상류에서의 유동 재편 특성을 적절히 모사할 수 있음을 확인하였으며, 이를 이용하여 화염 근처에서의 새로운 안정화 메커니즘의 발생 가능성을 해석적으로 제시하였다.

이러한 결과는 제한된 공간 내에서 화염이 형성되고 공기의 공급 속도가 상대적으로 큰 일반적인 연소기의 메탄 화염의 안정화 특성에 대한 기존 이론의 적용 한계를 확대하는 새로운 결과로서 추가적인 연구를 통해 응용 가능성을 확대할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2010 년 에너지 인력양성 사업 “기후 변화 대응성 및 신뢰성 증대를 위한 화력발전 설비관리 기술”의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Chung, S.H. and Lee, B.J., 1991, “On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed Jet,” *Combustion and Flame*, Vol. 86, pp. 62~72.
- (2) Lee, J. and Chung, S.H., 2001, “Characteristics of Reattachment and Blowout of Laminar Lifted Flames in Partially Premixed Propane Jets,” *Combustion and Flame*, Vol. 127, pp. 2194~2204.
- (3) Chung, S.H., 2007, “Stabilization, Propagation and Instability of Tribrachial Triple Flames,” *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, pp. 877~892.
- (4) Won, S.H., Kim, J., Hong, K.J., Cha, M.S. and Chung, S.H., 2005, “Stabilization Mechanism of Lifted Flame Edge in the Near Field of Coflow Jets for Diluted Methane,” *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, pp. 339~347.
- (5) Qin, X., Puri, I. K. and Aggarwal, S. K., 2002, “Characteristics of Lifted Triple Flames Stabilized in the Near Field of a Partially Premixed Axisymmetric Jet,” *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.

- 29, pp. 1565~1572.
- (6) Kim, G.T. and Kim, N.I., 2009, "Stabilization Characteristics of DME-Air Diffusion Flames Depending on the Configuration of the Fuel-Air Tubes in Half Closed Combustion Spaces," *Trans. Of the KSME (B)*, Vol. 33, No. 11, pp. 916~923.
- (7) Lee, J., Won, S.H., Jin, S.H. and Chung, S.H., 2003, "Lifted Flames in Laminar Jets of Propane in Coflow Air," *Combustion and Flame*, Vol. 135, pp. 62~72.
- (8) Kim, N.I. and Maruta, K., 2005, "A Numerical Study on Propagation of Premixed Flames in Small Tube," *Combustion and Flame*, Vol. 146, pp. 283~301.
- (9) ANSYS Inc. Ansys Fluent 12.0, 2009, "User's Guide," USA.
- (10) Bosschaart, K.J. and de Goey, L.P.H., 2004, "The Laminar Burning Velocity of Flames Propagating in Mixtures of Hydrocarbons and Air Measured with the Heat Flux Method," *Combustion and Flame*, Vol. 136, pp. 261~269.