

주유동에 수직으로 분사되는 난류 비예혼합 분류 화염의 특성

이 기 만* · 박 정†

(2001년 6월 25일 접수, 2001년 10월 19일 접수)

Characteristics of Turbulent Nonpremixed Jet Flame in Cross Air Flow

KeeMan Lee and Jeong Park

Key Words: Cross Flow(주유동), Velocity Ratio(속도비), Momentum Ratio(운동량비), Lifiable Flame(부상가능화염), Non-lifting Flame(부상불가능화염), Lift-off Flame(부상화염), Blowout(화염날림), Blowout Limit(화염날림한계), Blowout Distance(화염날림길이), Bound Vortex(부착볼텍스), Counter-rotating Vortices Pair(볼텍스쌍)

Abstract

An experimental study on the characteristics of stability of propane turbulent nonpremixed jet flames discharged normal to air free-streams with uniform velocity profile is conducted. Experimental observations are focused on the flame shape, the stability considering two kinds of flame, lift-off distance, and the flame length according to velocity ratio. In order to investigate the mixing structure of the flame base at the lower limit, we employ the RMS technique and measure the species concentration by a gas chromatography. In the results of the stability curve and lifted flame, it is found that the dependency of nozzle diameter is closely related to the large-scale vortical structure representing counter-rotating vortices pair. Also, the detailed discussion on the phenomenon of blowout due to this large vortical motion, is provided.

1. 서론

주유동에 수직으로 분사된 분류(횡분류)는 오래 전부터 공업적응용과 학문적으로 유체역학의 기초적인 관점에서 연구가 이루어져 왔다. 이러한 유동장의 공학적 응용의 예는 가스 터빈 엔진에서 연소실내의 화염을 안정화시키거나 연소 가스의 온도를 제어하기 위한 2차 공기의 분사, 터빈 브레이드를 고온의 가스로부터 보호하기 위하여 브레이드 냉각에 이용되는 막냉각 등으로

터보 기계 등이 있고 수직단거리 이착륙기의 이착륙시 비행기의 밑면에서 하방으로 분사되는 제트의 후류에 야기되는 저압부에 의해 비행기의 실속이 발생하는 문제 등과 비행기 날개 끝에서 분사되는 제트와 관련해서 본 유동장에 대해서 연구가 진행되었다. 그리고 대기중에 공장 굴뚝에서 분출되는 대기 오염물의 확산에 응용되고 있다. 그런데 분류가 반응성인 경우는 복잡한 3차원 유동구조와 연소반응 상호관계로 일반 분류 화염에 비하면 상대적으로 이 분야의 연구는 미진하다. 가장 오래된 연구는 Gollahalli⁽¹⁾ 등으로 이들은 유동의 주요변수가 비반응장과 마찬가지로 두 유체의 운동량(momentum)비임을 화염 형상을 통해 관찰하고 부상거리, 화염 단면적 및 화염길이 등에 관한 특성을 조사하였다. Brzustowski⁽²⁾는 매연감소를 위한 노즐 팁 연구에

* 회원, 전남도립담양대학 기계공학과
† 책임저자, 회원, 순천대학교 기계자동차공학부
E-mail : jeongpark@sunchon.ac.kr
TEL : (061)750-3533 FAX : (061)750-3530

서 화염의 길이와 형상 등을 조사하였으며 Broadwell⁽³⁾ 등은 혼합의 관점에서 볼텍스 쌍(counter-rotating vortices pair)의 생성기구를 주유동에 대한 분류의 임펄스(impulse)로 보고 궤적식과 화염길이를 예측하고 실험으로 확인하였다. 그러나 이들의 실험은 반응성 액체이므로 열을 수반하는 일반연료 연소와는 구분되어야 한다. Kalgatgi⁽⁴⁾는 부상가능화염(liftable flame)을 대상으로 연료와 노즐경에 무관한 반 타원형의 일반안정화선도를 구하였다. Huang⁽⁵⁾은 부상불가능화염(non-lifting flame)의 안정화 연구에서 상/하부 한계영역이 존재함을 알아냈고 특성 화염의 형태를 모드(mode)별로 나누어 표시하였으며, 화염의 궤적식을 $Z = 1.07 X^{0.21}$ 인 실험식을 제시하였다. Gollahalli⁽⁶⁾ 등은 여러 개의 분류를 분출시켜 화염안정성, 길이 및 연소가스의 농도를 측정하여 다수 분류화염이 단일 분류화염보다 더 넓은 범위에서 화염이 안정됨을 보였고, 분류사이가 $16d_0$ 이상일 때 단일 분류화염과 같은 안정범위에 접근함을 알아냈다. Birch⁽⁷⁾는 천연가스 공급 과정에서 가스누출시 안전성 파악을 위해 light back point를 이용한 점화특성을 정량화 하였다. Yoo⁽⁸⁾는 층류화염에서 부착볼텍스를 가시화하였으며 생성위치가 바뀌는 원인을 분류 전후 면의 압력구배와 와동의 강도로 보았다. 기술된 바와 같이 지금까지 진행된 대부분의 연구들이 실험을 통해 화염의 전체적인 구조를 파악하는데 주안점이 두어져 왔다.

한편 최근 들어 연소기의 고부하, 저공해성 추세에 따라 횡분류화염에 대한 기대감이 높아가면서 비예혼합 화염에서 부분예혼합 효과를 얻기 위해 부상화염을 구성하는 등 적극적인 시도가 이루어지고 있는 추세이다. 따라서 화염안정성에 관련된 연구는 필수적이나 이와 관련된 연구가 미비한 실정이다. 본 연구는 화염안정화와 관련한 연구로 화염형상, 안정화선도, 화염부상과 길이 그리고 혼합성능에서 나타난 난류 횡분류화염의 일반적인 특성을 파악하고자 한다. 이를 위해 비반응 정보를 통하여 반응시 안정성과 연소특성에 미치는 정보를 파악토록 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1에 보인 바와 같이 난류 횡분류 화염장은

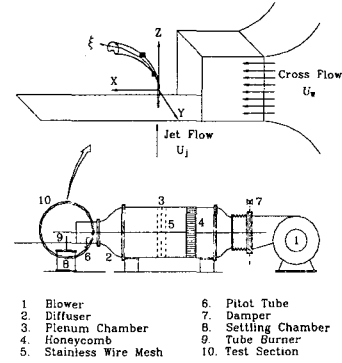


Fig. 1 Schematic diagram of this experimental apparatus

오픈형의 폭 300 mm, 높이 500 mm 시험부 단면적을 갖는 토출식 풍동에서 균일한 주유동이 공급되고 연료는 시험부 바닥에서 100 mm 되는 위치에서 주유동에 수직으로 분사되는 구조로 되어 있다. 좌표계는 분사노즐 출구를 원점으로 주유동 방향을 X 좌표로, 연료분사 방향을 Z 좌표 그리고 나머지 방향은 Y 좌표로 하였으며 주유동 방향으로 휘어진 횡분류 중심축은 ξ 좌표로 하였다. 실험에 사용된 주유동의 속도범위는 0에서 9 m/s 이고 노즐은 이음매가 없는 스테인리스스틸의 튜브형 노즐로 내경 기준 1.6, 2.2, 3.1, 5.3 mm의 네 가지 종류를, 연료는 순도 96 %의 상용프로판올 사용하였다.

안정화선도는 먼저 주유동 속도를 고정시키고, 연료분류의 유량을 서서히 증가시켜 화염이 날려져갈 때의 분류분출속도를 구하였다. 그런 후 고정된 주유동속도를 0 m/s 에서 9 m/s 까지 가변시켜 그때마다 앞의 방법으로 화염날림이 발생하는 분류의 분사속도를 구하여 안정화선도를 작성하였다. 선도에서 분리점(separation point) 이후의 주유동 속도에서는 연료유량이 어느 임계값 이상으로 증가되면 노즐출구에서 부상되자마자 화염이 날려서 꺼지게 되는데 이 경우를 부상불가능화염의 상부안정화 한계점으로 하였다. 이 한계값 이상으로 계속 연료유량을 증가시키면서 외부로부터 재착화를 시키면 공간에서 부상화염이 형성되는데 이때를 부상가능화염의 하부안정화한계값으로 정하였고 계속 증가시켜 부상화염이 유량증가에 의해 자발적으로 화염날림이 발생하게 되는 임계값을 부상가능화염의 상부안정화한계 값



(a) Non-lifting flame



(b) Lifing flame

Fig. 2 Photographs of a non-lifting and liftable flame shape according to the jet velocity; $V_w=3\text{m/s}$, $d_0= 3.1\text{mm}$

으로 정하였다.

속도비에 따른 화염길이와 부상거리 측정은 난류화염의 평균정보를 줄 수 있도록 장기 노출시간의 직접사진으로 구하였다. 특히 부상거리는 횡분류 계적이 곡선인 관계로 노즐출구로부터 부상된 화염밀면까지 분류경계를 정확히 구분해야 하므로 Mie 산란광 단면가시화로 구분시켰으며 산란입자인 등유증기입자(paraffin vapor particle)가 반응화염에 영향을 주질 않도록 주의하였다.

주유동과 분류 두 유체간의 혼합특성은 사염화 티타늄($TiCl_4$) 증기를 이용한 RMS (Reactive Mie

Scattering)의 단면가시화를 통하여 조사하였으며 광원은 4W 아르곤 이온 레이저이고 ASA 400 필름으로 1/4000초로 정지 카메라를 사용하여 촬영하였다. 가스크로마토그래피를 이용한 평균농도 측정으로도 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화염 형상

본 유동장 특성을 가장 잘 나타내는 중요한 대표 변수로는 다음과 같이 정의되는 속도비 혹은 운동량비이다.

$$R = (\rho_j/\rho_w)^{1/2}(U_j/U_w), M = (\rho_j/\rho_w)(U_j/U_w)^2$$

여기서 R 은 속도비고 M 은 운동량비, U_j 와 U_w 는 분류속도 및 주유동 속도이며 ρ_j, ρ_w 는 각각의 밀도이다.

Fig. 2는 일정한 주유동 속도에서 분류속도만을 증가시켜 위에서 정의한 속도비(운동량비) 증가에 따라 살펴본 화염형상이다. 속도비가 가장 적은 경우(이하 사진의 설명은 좌측 아래서부터 윗 방향으로 서술함) 화염은 분류 운동량에 비해 주유동 운동량이 훨씬 크므로 분출연료 대부분이 심하게 휘어져 노즐 뒷부분의 와류영역에서 화염이 형성된다. 와류영역에서는 연료과잉으로 휘염(luminous flame)이 형성되고 분류상류면(windward side)은 연료분류와 주유동과의 활발한 전단운동으로 청염이 형성된다. 이 상태에서 분류속도를 높여 연료유량을 증가시키면 화염은 신장되고 앞 화염형상과 유사하나 주변공기와의 혼합시간이 길어져 열분해 농도 등의 증가로 휘염부분의 면적이 증가된다. 계속해서 유량을 증가시키면 노즐에 부착된 분류배면(lee-side)의 하부화염과 이 화염으로 공간상에 존재하는 상부화염으로 두 개로 갈라진 이중화염 형태가 된다. 이는 분류 초기의 포텐셜영역이 bluff body 같은 역할을 함으로써 분류배면에 형성된 와류로 이중화염의 하부화염이 노즐에 부착되어 형성되나 상부화염은 공간상에서 별도로 하부화염에 부착된 화염으로 형성된다. 분류운동량이 증가되면 배면으로 더 많은 주변공기가 유입되므로 상/하부 화염이 청염으로 합쳐지게 되며 전단력 증가로 혼합성능이 향상되어 화염선단부의 청염영역이 증가하게 된다. 노즐에 부착된 화염은 분류속도가 증가하여

소위 임계 부상속도 값 이상이 되면 화염선단이 노즐로부터 떨어지자마자 화염날림이 발생하는데 이러한 화염을 부상불가능화염이라고 한다. 그런데 유량을 어느 임계값(부상가능화염의 하부안정화 값) 이상으로 증가시키고 재 점화시키면 공간 상에서 부상된 화염이 형성된다.(좌측상부사진) 부상된 화염은 연료가 노즐로부터 화염밀면에 도달하는 동안 연료가 주위 산화제와 분자적으로 혼합될 시간이 커지므로, 전파하는 예혼합 특성을 보인다. 이후부터 화염밀면은 부분에혼합 화염상태를 갖는 환상(annular)의 청염을 띠게 된다. 이 화염은 부상가능화염의 하부안정화 영역에 해당되는 화염으로 뒤에서 화염밀면을 관찰해보면 전형적인 블랙스 쌍을 하고있다. 이때가 가장 뚜렷한 블랙스 쌍의 화염 구조를 보이고 있다. 계속 분류속도를 증가시키면 청염으로 가득찬 환상의 화염밀면은 테이퍼형으로 경사지면서 중앙부가 연료과잉 상태로 화염이 없고 횡분류 경계측인 바깥쪽으로 화염이 형성된 도넛 형태의 장공(長孔)을 띠게 된다. 이런 형상은 증가되는 분류운동량으로 그 각도가 점점 분류분사 중심축(Z축)으로 기울어지게 되면서 전단력 증가로 청염영역이 커지게 된다. 계속해서 유량이 증가되면 횡분류 축(ξ)이 분류분사 축(Z축)으로 가까워지면서 화염밀면은 점점 노즐출구로부터 떨어져 결국 어느 임계 값(부상가능화염의 상부 안정화 값) 이상이 되면 화염은 날아가 꺼져 버린다.

3.2 화염의 종류 및 안정화 선도

Fig. 3은 노즐 2.2 mm에서 작성한 대표적인 선도며 Fig. 4는 본 실험에서 사용한 모든 노즐들에서 구한 화염안정화 선도이다. 횡분류화염은 앞 절에서도 언급하였듯이 분류가 노즐에서 부상되어 화염날림이 일어나기 전까지 안정된 화염을 유지하는 부상가능화염(liftable flame)과 노즐에서 화염이 부상되자마자 화염날림이 발생하여 부상화염을 형성할 수 없는 부상불가능화염(non-lifting flame)으로 나뉜다. Fig. 3은 두 종류 화염을 동시에 고려한 선도로, 분리점(separation point)에서 두 종류 화염이 구분된다.

먼저 부상불가능화염에서 나타난 특징은 화염날림이 노즐경과 무관하게 일정한 값에서 나타나며, 주유동 증가에 따라 분류속도도 조금씩 증가하는 경향을 보이고 있다. 일반적으로 화염날림

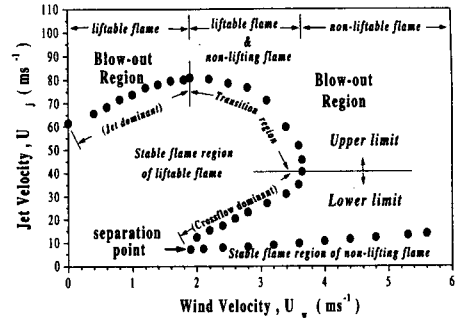


Fig. 3 Typical stability curve for $d_0=2.2\text{mm}$

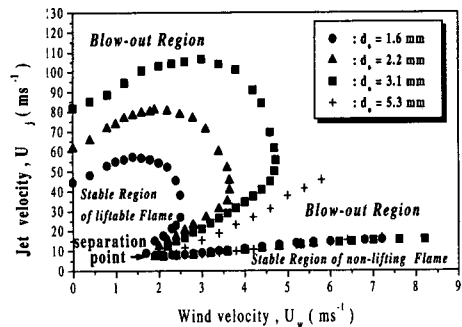


Fig. 4 Blowout stability limits with various nozzle diameters

이 일어나는 분류속도는 노즐경에 비례하는 것으로 알려져 있는데 이처럼 노즐 의존성이 없는 사실은 이 화염에서는 분류운동량에 비해 주유동운동량이 워낙 크기 때문이다.

어느 주유동 속도 이상(Fig. 3에서는 3.6 m/s)에서는 부상불가능화염만 존재하며 분리점에서 이 속도까지는 부상가능화염과 불가능화염이 같이 존재하는 것을 알 수 있다. 그런데 이 구간에서는 노즐에 부착된 화염이 꺼졌어도 연료유량이 어느 임계값(부상가능화염의 하부안정화영역에 해당되는 값) 이상으로 증가되어 점화원이 존재하면 재 점화로 화염이 형성되므로 본 유동장과 같은 횡분류 연소기 설계 시에는 반드시 고려해야 할 안전 데이터가 된다.

다음으로 부상가능화염으로 분리점을 기준으로 이 점의 주유동 이하에서는 자유분류화염과 유사하게 노즐에서 임계 부상속도를 거쳐도 화염날림 없이 부상되며 자발적인 분류유량 증가로 화염날림이 발생하게 된다. 이를 상부안정화한계영역만

존재하는 분류우세영역(jet dominant region)이라 정의하였다. 다음은 분리점의 주유동 이상부터 부상불가능화염만이 존재하는 주유동 사이에 존재하는 영역으로서 상/하부 두 군데서 안정화한계가 동시에 존재하는 영역이다. 이 영역의 상부 안정화한계영역은 횡분류와 주유동의 운동량이 서로 비슷하여 천이영역(transition region)이라 정의하였고, 주유동 운동량이 우세하여 화염이 거의 주유동 방향으로 심하게 휘어져있는 하부 안정화 한계 영역을 주유동 우세영역(cross-flow dominant region)이라 정의하였다. 그리고 이러한 한계영역 사이는 당연히 안정된 화염이 형성된다.

일반적으로 분류화염에서 화염날림이 발생하는 분류속도 ($U_{b,o}$, blowout velocity)는 분류 초기조건으로부터 결정된다. 즉, $U_{b,o}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$U_{b,o} = f(d_o, (S_b)_{max}, (\rho_j/\rho_o), \nu_j, \phi \text{ or } Y_s),$$

여기서 d_o 는 노즐경이며 $(S_b)_{max}$ 는 최대 층류 연소속도, ρ_j, ρ_o 는 연료 및 공기의 밀도, ν_j 는 연료의 동점성계수, ϕ 는 이론 당량비(stoichiometric ratio)고 Y_s 는 이론 당량비의 질량 분율(mass fraction)이다. 부상가능화염은 Fig. 4에서 노즐경에 비례해서 바깥쪽으로 넓게 분포함을 알 수 있다. 이는 일반 분류에서 알려진 바와 같이 화염날림 조건이 분류 초기 조건인 분출직경에 의존한다는 사실과 일치한다. 따라서 안정화 특성이 난류의 작은 크기(small scale)에 의해 지배받기보다는 후류의 국부 분류직경이 초기의 분류 직경에 비례하므로 분류 상사성과 관련한 거대와(渦)의 난류구조와 연관되어 있음을 시사하고 있다.

3.3 부상 화염 특성

난류 비예혼합 화염에서 화염이 부상되면 연료가 노즐로부터 화염밀면에 도달하는 동안 주위 산화제와 빠르게 유입과 혼합이 이루어져 자연적으로 부분 예혼합(partial premixed mixture) 성능을 얻게되므로 화염이 스스로 전파하는 예혼합 화염 특성이 나타나게 된다. 따라서 화염이 부상되어 안정적으로만 연소가 가능하다면 주어진 연소조건에서 보다 우수한 연소성능이 가능하게 된다. 여기서는 화염안정화에 기본인 부상특성과 관련

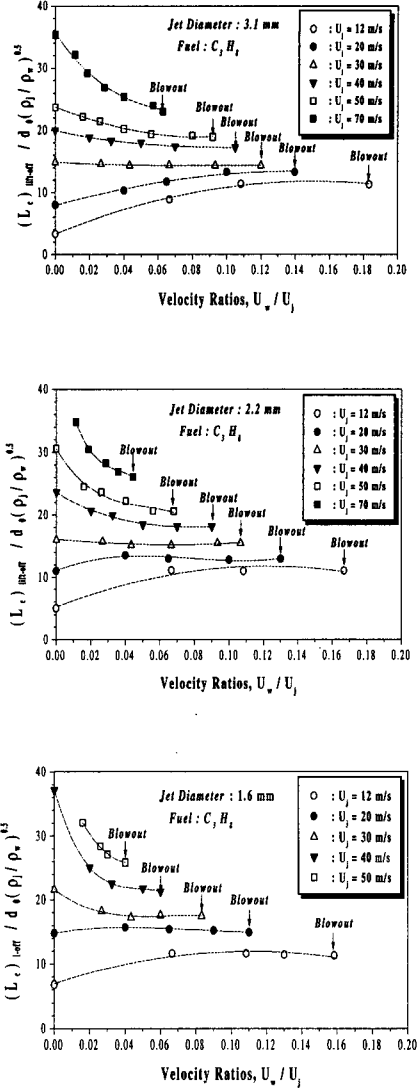


Fig. 5 the relation between dimensionless curvilinear lift-off distance and velocity ratios

하여 속도비에 따른 부상높이(거리) 상관관계를 조사하였다.

횡분류 화염은 3차원 구조로 다른 분류화염보다 부상화염거리를 정의하기가 까다롭다. 정의될 수 있는 물리량으로는 다음과 같은 방법들이 고려되었다.

- 1) 부상화염 밀면에 형성된 청염 면적 혹은 체적
- 2) 부상화염 밀면의 면적

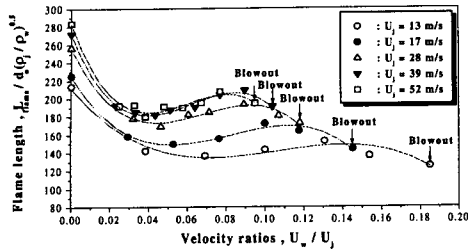


Fig. 6 Variation of flame length with velocity ratio

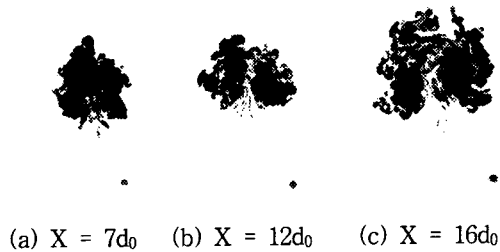


Fig. 7 Cross-sectional views of the non-reacting jet by RMS method in the lower blowout limit ($U_j = 21.04 \text{ m/s}$, $U_w = 3 \text{ m/s}$) for $\phi 3.1\text{mm}$

- 3) 부상화염 밑면까지 등온분류 체적
- 4) 부상화염 밑면까지 등온분류의 곡선 궤적거리

네 번째 방법 이외는 측정 상 어려움이 많고 물리적으로도 정량화하기가 곤란한 점이 많아 본 연구에서는 네 번째 방법으로 결정하였다. Fig. 5는 속도비 변화에 따른 부상거리를 측정 한 결과이다. 3가지 노즐경 모두에서 유사한 특성을 보여 속도비 0.05 이하에서는 속도비 증가에 따라 부상거리가 증가, 감소, 일정 등의 세 가지 현상으로 나타났으며 0.05 이상에서는 속도비와 무관하게 부상거리가 일정해 짐을 알았다. 부상거리 각 끝점은 화염날림 직전의 부상거리로 화염 날림거리(blowout distance)를 의미하게 되고 속도비가 0 인 경우는 주유동이 없는 자유분류와 같은 부상높이를 나타낸다. 여기서도 노즐경 증가에 따라 부상거리가 증가됨을 알 수 있는데, 이렇게 부상거리가 노즐경에 의존한다는 사실은 앞 절에서와 마찬가지로 부상특성이 작은 에디(eddy)에 의해서 지배받기보다는 노즐출구서부터 형성되어 성장한 거대구조의 와(渦)운동에 영향을 받는다는 사실을 뒷받침 해 준다.

3.4 화염길이 특성

화염길이는 연소기 설계시 가장 먼저 고려해야 될 중요한 설계인자 중의 하나이다. 확산화염인 경우 화염길이는 혼합정도를 나타내는 거시적인 정보를 제공하게되므로 화염길이 측정은 혼합성능을 이해하기 위한 기초적 연구의미를 갖는다. 횡분류 화염길이는 다른 일반 분류화염과는 분명 다를 것이다.

Fig. 6은 속도비 증가에 따른 화염길이 변화를 나타내고 있다. 주유동이 없는 자유분류화염에 주유동이 가해지면 주유동과 분사분류와의 전단력에 의해 혼합이 촉진되어 화염길이가 급격히 감소하게 된다. 감소된 화염길이는 속도비 0.04 ~ 0.06 에서 최소가 되었다가 다시 증가하다가 감소하였다. 이는 화염이 0.04 ~ 0.06 범위를 넘어 서게 되면 거의 동축류(co-flowing)처럼 주유동 방향으로 상당히 휘어지게 되므로 상대적으로 두 유체간의 전단성능이 감소되어 화염의 길이가 증가하게 된다. 이 속도비 범위는 앞 절 부상화염 특성에서 부상길이의 증가나 감소 없이 일정해지기 시작되는 지점으로 이 속도비 이상에서는 혼합향상에 포화를 보이는 것으로 사료된다. Fig. 7은 횡분류 화염의 단면화 및 혼합성능과 관련하여 유익한 설계 값을 제공한다. 이 상태에서 주유동 속도가 증가되면 상류에서 미처 반응하지 못한 미연 가스가 후류로 이어지면서 연소되지 못하고 그대로 방출되게되는데 이 같은 불안전연소로 화염은 전체적으로 짧아지게 되나 매우 불안정한 상태가 되어 결국 화염날림으로 꺼지게 된다.

3.5 비반응 횡분류의 혼합성능

화염날림 직전의 부상된 화염밑면은 등온의 비반응 횡분류며 안정화한계를 경계로 화염이 있고 (안정영역), 없는(화염날림영역) 현상이 분명히 구분된다. 비반응 상태에서 두 유체의 혼합구조와 관련정도를 부상가능화염의 하부안정화한계 전후 유동조건에서 RMS(Reactive Mie Scattering)에 의한 단면가시화와 가스크로마토그래피를 이용한 농도측정으로 분석하였다.

Fig. 7은 노즐경 3.1 mm의 하부안정화한계 유동조건에서 주유동 방향으로 X = 7, 12, 16d₀ 의 세 단면지점(Y-Z plane at X = 0)에서 비반응 분

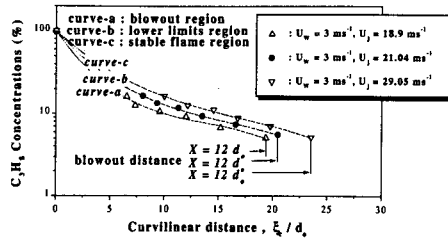


Fig. 8 Variation of average equivalence ratio with curvilinear distance for stable flame, lower limit, and blowout regions

류의 단면가시화 사진이다. Fig. 7의 (b)위치는 연소시 화염날림이 발생하는 화염밀면이 되며 (a)와 (c)는 화염밀면보다 각각 상류와 후류가 되나 (a) 지점은 부상된 화염밀면이라 연소시도 비반응 상태고 (c)지점은 화염밀면 이후인 화염영역이 된다. 사진에서도 알 수 있듯이 (a)지점에 비해 (b), (c) 영역에서 분명한 볼텍스 쌍의 구조가 관측되었다. 이 현상은 화염날림 직전의 부상된 화염밀면에서 볼텍스 쌍으로 대표되는 거대와동(渦動)이 두 유체의 혼합구조에 많은 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다.

안정화한계 근처의 혼합특성을 좀더 자세히 알아보고자 Fig. 7의 유동조건에서 비반응 분류의 농도분석을 하였다. Fig. 8은 각 단면에서 혼합된 횡분류의 평균당량비 분포도를 보여주고 있으며 화염날림거리에 해당하는 $X = 12d_0$ 인 위치까지 와(渦)구조가 발달하는 과정을 보여주고 있다. 농도 분포도에서도 알 수 있듯이 후류로 갈수록 횡분류 높이와 폭이 증가됨을 알 수 있다. 분류의 초기 위치인 $4d_0$ 에서는 연료가 과농한 상태로 혼합이 제대로 이루어지지 않아 분류 단면적 전체에 심한 농도 구배 현상을 보이고 있다.

본 유동장의 가장 큰 특징 중의 하나는 횡분류 배면(lee-side)에 생성되는 부착 볼텍스(bound vortex)이다. 이 볼텍스는 분사된 분류에 주유동이 마주치면서 마치 고체 실린더 뒤에서 형성되는 것과 유사하게 생성되는데, 이로 인해 유동의 급격한 변화가 초래되어 난류화가 촉진되고 주위의 유체 유입이 증가된다. $4d_0$ 에서 미약하나마 부착 볼텍스가 존재함을 알 수 있고 원형의 노즐에서 분사된 분류단면이 왜곡을 받아 긴 타원형으로 변형되어 있다. $7d_0$ 에서는 뚜렷한 콩팥형을 보이

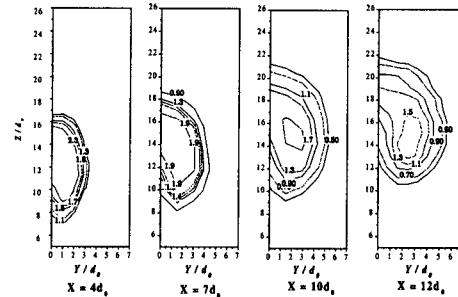


Fig. 9 Contours of equivalence ratios on the cross-section(Y-Z plane) with $U_j = 21.04$ m/s $U_w = 3$ m/s for $d_0 = 3.1$ mm

면서 분사초기보다는 혼합이 증가되어 농도구배도 이전의 위치보다는 많이 완만해 졌으나, 여전히 단면적 전역에 걸쳐서 과농한 당량비 상태를 보이고 있다. 이러한 분포는 $10d_0$ 에 가서 상당히 증가된 혼합상태를 보이면서 후류에서 나타나는 볼텍스 쌍의 구조가 나타나기 시작한다. 또한 주변의 공기가 횡분류 중심까지 유입되어 과농한 연료분류 중심 혼합기를 Y축으로 밀어내 단면에서 최고농도 위치가 분류중심에서 우측아래쪽으로 이동해져 있음을 알 수 있다. $12d_0$ 는 화염이 존재하는 경우 화염날림 직전의 부상화염 밀면에 해당되는 지점으로 이 지점에서는 더욱 더 뚜렷한 볼텍스 쌍 구조를 보였으며 분류 단면적 전역에 걸쳐서 농도 구배가 상당히 완만해져 있음을 알 수 있다. 이는 볼텍스 쌍의 거대와동이 주변 유체를 분류 중심축 깊숙히 끌고 들어와 혼합되는 것으로 Mie 산란 단면가시화를 통한 분류 단면적 가시화인 Fig. 7(b)에서도 관측할 수 있다.

Fig. 9는 주유동이 일정한 경우 화염날림이 발생하는 분류속도(안정화한계영역)를 기준으로 높은 속도(안정영역) 및 낮은 속도(화염날림영역) 등 세 유동조건에서 노즐원점으로부터 $X = 12d_0$ (화염날림거리해당) 거리까지 분류 중심축(ξ)의 중심면($Y = 0$)을 따라 연료의 최대농도가 어느 정도 빨리 감소하는가를 보여주는 농도 감소도이다. 이 지점까지 이루어지는 세 가지 유동조건에서 최대농도 감소를 살펴보면 각각 경우에서 혼합의 빠르기를 이해할 수 있을 것이다. 즉 분류의 발달에서 두 유체간의 혼합이 빨리 이루어지면 최대농도가 빨리 감소할 것이다. Fig. 9에서

알 수 있듯이 안정화 한계값을 기준으로 낮은 영역(화염날림영역)에서는 최대농도가 빨리 감소하였으며, 높은 분사속도(화염안정화영역)에서는 천천히 감소함을 알 수 있다. 이로써 화염날림이 발생하는 하부 안정화 한계값 아래 유동조건은 항상 화염이 꺼져 있는 영역임을 감안 할 때 너무 빨리 혼합이 이루어지면 오히려 화염이 안정적으로 유지되질 못함을 보여주고 있다.

4. 결 론

두 유체가 서로 상호작용을 하는 난류 횡분류 화염장에서 안정화 특성과 관련하여 실험적 조사로부터 다음과 같은 결론을 얻는다.

(1) 횡분류화염은 부상가능과 불가능 화염 두 종류로 나뉘며 두 종류의 화염을 동시에 고려한 안정화선도를 구하였다.

(2) 부상가능화염의 안정화특성이 노즐 직경에 비례함을 보여 후류에서 나타나는 화염부상과 날림 현상이 분류 초기에서부터 형성되어 성장된 거대구조의 와동 특성과 일치하나 불가능화염은 주유동 운동량으로만 지배된다.

(3) 본 유동장은 볼텍스 쌍이 유동과 연소를 지배하는 전형적인 난류 거대와동(巨大渦動)임을 육안관측, 직접사진촬영, RMS 의 단면가시화 및 농도분석을 통하여 확인할 수 있었다.

(4) 실험적으로 조사된 거대 와동이 화염안정화, 특히 화염날림에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 2001년도 두뇌한국21사업에 의해 지원을 받았고 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

- (1) Gollahalli, S.R., Brzustowski, T.A. and Sullivan, H.F., 1975, "Characteristics of a Turbulent Propane Diffusion Flame in a Cross-Wind," *Trans. C.S.M.E.*, Vol. 3, p. 205.
- (2) Brzustowski, T.A., 1976, "Flaring in the Energy Industry," *Prog. Energy Comb. Sci.* Vol. 2, p. 129.
- (3) Broadwell, J.E. and Breidenthal, R.E., 1984, "Structure and Mixing of a Transverse Jet in Incompressible Flow," *J.Fluid Mech.*, Vol. 148, p. 405.
- (4) Kalghatgi, G.T., 1981, "Blow-out Stability of Gaseous Jet Diffusion Flames. Part II : Effect of Cross Wind," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 26, p. 241.
- (5) Huang, R.F. and Chang, J.M., 1994, "The Stability and Visualized Flame and Flow Structure of a Combusting Jet in Cross Flow," *Combustion and Flame*, Vol. 98, p. 267.
- (6) Gollahalli, S.R. and Menon, R., 1988, "Combustion Characteristics in Interacting Multiple Jets in Cross-Flow," *Comb. Sci. and Tech.* Vol. 60, p. 375.
- (7) Birch, A.D. and Fairweather, M., 1989, "An Experimental Study of a Turbulent Natural Gas Jet in a Cross Flow," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 66, p. 217.
- (8) Yoo, Y.D., 1994, "A Study on the Jet Diffusion Flame in a Cross Air Flow," KAIST, Ph.D. Thesis.
- (9) Lozano A, Smith S. H., Mungal M. G., and Hanson R. K., 1994, "Concentration Measurements in a Transverse Jet by Planar Laser-Induced Fluorescence of Acetone," *J AIAA*, Vol. 32, No. 1, p. 218.
- (10) Fric, T.F., Roshko, A., 1994, "Vortical Structure in the Wake of a Transverse jet," *J Fluid Mech.*, Vol. 279, p. 1.
- (11) Mungal, M.G. and Lozano, A., 1996, "Some Observations of a Large, Burning Jet in Crossflow," *Experiments in Fluids*, Vol. 21, p. 264.
- (12) Lee, K.M. and Shin, H.D., 1997, "A Large-Scale Structural Mixing Model Applied to Blowout of Turbulent Non-Premixed Jet Flames in a Cross Air-Flow," *J of the Institute of Energy*, Vol. 70, p. 128.