

파일럿 안정화 제트버너의 예혼합 화염이 미연가스 영역 난류특성에 미치는 영향

이 대 훈* · 권 세 진**

(1999년 3월 22일 접수)

Effects of Premixed Flame on Turbulence Properties in a Pilot Flame Stabilized Jet Burner

Dae Hoon Lee and Sejin Kwon

Key Words : Laser Velocimeter(레이저 유속계), Turbulent Premixed Flame(난류 예혼합 화염), Turbulence Property(난류 특성), Effects of Flame(화염의 효과)

Abstract

Comparisons of measured turbulence properties in the unburned gas region of turbulent premixed flame stabilized by pilot flame, in cases of combusting and non-combusting flow conditions, are presented. Methane-air premixed jet at fuel equivalence ratio of 0.6 and 1.0 and Reynolds number of 7,000 was diagnosed using two-color laser velocimeter to obtain turbulence statistics. Same set of measurements was repeated at 21 locations within the unburned gas region of both combusting and non-combusting conditions. Velocity data were analyzed to evaluate the spatial distribution of turbulence properties including Reynolds stress, probability densities, joint probability densities and auto correlations. Contrary to assumptions of current theoretical models, significant influence of flame was observed in every property that was studied in the present investigation. The effective viscosity increased ten-fold when flame was on from cold flow values. The effect of mixing on joint probability as well as in turbulence intensity was suppressed by the flame. The measurements suggest that common assumptions of premixed flame model may result in sizable error in prediction of flame length and temperature distribution in near-field.

기호설명

- x : 제트 출구에서부터의 축방향 거리
- y : 제트 출구에서부터의 횡방향 거리
- D : 버너 출구 직경
- ϕ : 연료 당량비
- L : 버너에 연결된 직선 도관의 길이

1. 서론

난류 예혼합 화염은 폭넓은 응용에도 불구하고 이론적인 이해가 아직 초보적인 수준에 머물러 있다. 그 것은 현상을 지배하는 두 요소, 즉 난류 유동과 화학 반응이 각각 비선형, 비정상 과정임에

기인한다. 따라서 난류 예혼합 화염을 이용하는 연소기의 설계는 이론 모델보다 prototype 에서의 실험 및 측정 데이터로부터 산출된 semi-empirical 모델에 의존하고 있다.

이제까지 고안된 계산 모델중 널리 이용되고 있는 것은 Spalding⁽¹⁾의 에디 소산 모델(eddy brake up model) 과 Bray et al⁽²⁾의 BML 모델을 들 수 있다. 에디 소산 모델은 현재 가장 널리 이용되고 있으나 화학 반응이 에디의 소산과 같은 과정을 통하여 완료된다는 가정의 타당성이 약하고, 이 모델과 연계되어 사용되는 k- ϵ 모델의 상관계수가 화염의 존재 여부에 영향을 받지 않는다는 가정도 입증된바 없다. 이러한 근본적인 이유로 인하여 계산 결과가 일부 예외적인 문제들 이외에는 실험 결과와 일치하지 않는 것으로 판단되며, 실제 문제에의 적용에는 반드시 실험데이터에 의한 보정

* 한국과학기술원 대학원

** 회원, 한국과학기술원

을 필요로 한다.

BML 모델에서 Bray 등⁽²⁾은 난류 화염의 가상적인 반응영역을 층류 화염면이 통계적으로 위치할 확률로 표시하고 전달 방정식을 유도하였다. BML 모델은 에디 소산 모델보다 현상에 충실한 것으로 보이나 확률 밀도 함수의 전달 방정식은 에디 소산 모델의 진행도 함수(reactedness)의 전달 방정식과 유사하며, 반응 난류 유동장의 k-ε 모델로 인한 문제는 동일하다.⁽³⁾

Chung and Kwon⁽⁴⁾의 층류 화염 모사에 의하면 화염면 전후의 유선의 굽곡이 연소 가스의 체적 팽창에 의한 것으로 밝혀졌다. 체적 팽창이 유동장에 미치는 영향은 비선형적인 것이므로, 그 영향이 난류 유동장의 특성에 나타날 것으로 예상할 수 있다. 이러한 영향의 측정은 기존 난류 연소 모델의 가정들에 대한 타당성을 검증하는데 필수적인 것으로 판단된다.

본 연구에서는 난류 예혼합 화염의 미연가스 영역 난류 특성과 동일한 조건에서 비반응 유동장의 난류 특성을 측정, 비교하여 화염의 존재로 인한 난류 특성의 변화를 정량적으로 표시하고자 한다. 본 연구의 결과는 기존의 k-ε 모델을 사용하는 난류화염 모델의 개발에 필요한 실험적 토대로서 중요한 역할을 할 것으로 기대한다.

2. 실험방법

2.1 버너와 유로계

실험에 사용된 버너는 Lee and Kwon⁽⁵⁾의 실험에 사용되었던 것과 동일한 완전 발달 유동을 얻기에 충분한 ($D/L > 20$) 직선 도관에 연결된 내경 15 mm의 오픈 제트 형상이다. 화염의 안정화를 위해 20 mm 직경의 동심선에 직경 20μ 수소 분출구를 90개 설치하였다. 메탄/공기의 예혼합 화염은 수소 확산 화염을 이용해 안정화된다. 화염이 존재할 경우 미연 영역에 해당하는 위치에 대해 유동장 측정을 수행하고, 이와 동일한 위치에 대해 비연소 유동 난류 특성 값들을 비교하였다. 동일한 위치에서 측정된 데이터의 일대일 대응을 통하여 미연영역의 난류 특성 값들이 난류 예혼합 화염에 의해 어떠한 영향을 받는지 분석하였다. 비연소 유동 측정의 경우 파일럿 화염을 형성하기 위한 수소 연료는 사용하지 않았다. 화염이 존재할 경우에도 파일럿 화염은 메탄/공기 화염에 의해 미연영역의 유동장에 영향을 미치지 않는다.

2.1.1 레이저 유속계

유동장의 측정은 3색 레이저 유속계를 이용해

수행되었다. 사용된 시스템은 Lee and Kwon⁽⁵⁾에 의해 사용되었던 것과 동일한 TSI사의 시스템이다. 정확성과 화염에 미치는 영향 등을 고려하여 올리브 오일을 시딩 물질로 선정하였다. 올리브 오일은 가열부를 통해 레이저 유속계 측정부에 맞는 크기의 스모크 형태로 바뀌어져서 도관으로 삽입된다. 화염이 존재할 경우 올리브 오일 스모크는 화염면을 통과하면서 연소되어 버리기 때문에 화염면 부근에서 미연영역의 속도장 정보만을 표현한다는 이점이 있다.

3. 결과

실험은 레이놀즈수 7,000, 당량비 0.6 과 1.0의 경우에 대해서 화염이 있을 때와 없을 경우에 측방향과 횡방향 거리를 변화 시켜 가면서 버너중심축에서 화염면 직전까지의 미연가스 영역에 대해 수행되었다. 측방향 거리는 당량비 0.6의 경우 대략 $0.53 < x/D < 5.87$, 당량비 1.0의 경우 $0.53 < x/D < 2.53$ 의 범위에 해당한다. 횡방향 거리는 버너 중심 축에서 화염콘(flame cone)에 접하는 지점에 해당되는 영역에 대해 수행되었다.

Cheng⁽⁶⁾의 조건부 샘플링 방법을 통해 구해진 유동장 정보는 화염이 있는 유동에서 미연영역에 대해 레이저 유속계를 이용해 수행된 직접 측정값과 다른 물리적 의미를 지니고 있음이 Lee⁽⁷⁾에 의해 지적된 바 있다. 본 연구에서는 화염이 유동의 난류 특성에 미치는 영향을 알아내고 이로부터 비연소 유동에서의 유동 난류 특성과 연소 유동에서의 난류 특성을 비교해서 기존의 모델에서 미연영역에 대해 비연소 유동에서 얻어진 상관계수를 사용하는 것의 물리적 타당성을 검증하였다.

3.1 속도장

측방향과 횡방향에 대해 평균 유동장, 난류 성분은 측정되었다. Fig. 1에서 제시된 바와 같이 측

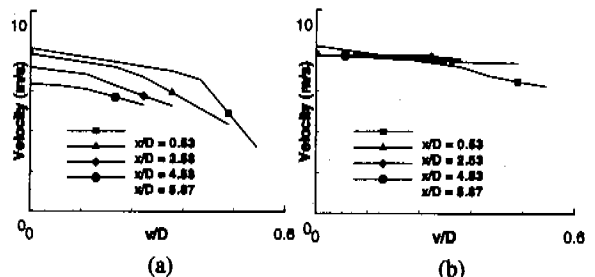


Fig. 1 Axial mean velocity $\phi = 0.6$ (a) Non combusting (b) Combusting.

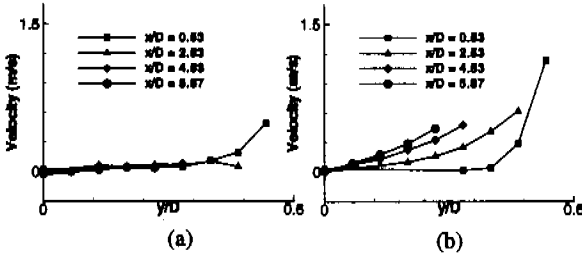


Fig. 2 Radial mean velocity $\phi = 0.6$ (a) Noncombusting (b) Combusting.

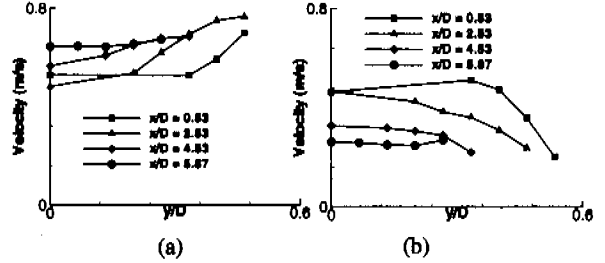


Fig. 4 Radial rms velocity $\phi = 0.6$ (a) Noncombusting (b) Combusting.

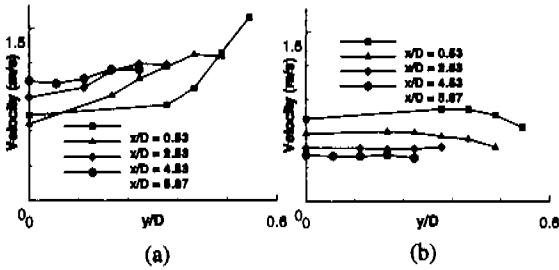


Fig. 3 Axial rms velocity $\phi = 0.6$ (a) Noncombusting (b) Combusting.

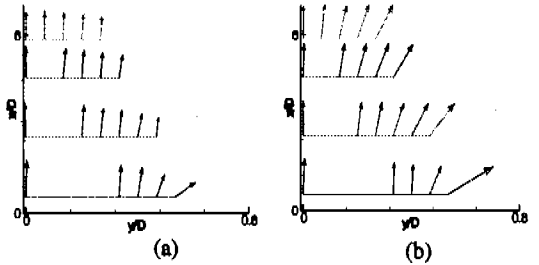


Fig. 5 Velocity vector plot $\phi = 0.6$ (a) Noncombusting (b) Combusting.

방향 평균 속도분포는 일반적인 완전 발달된 제트 유동의 모습을 보여주지만 화염이 존재할 경우 최대 속도가 감소되지 않고 속도 분포도 횡방향에 따라 완만한 것을 확인할 수 있다. 이것은 화염에 의해 유동의 에너지 소산 구조가 변화되고 혼합층(mixing layer)의 발달이 지연되어 전체적으로 에너지 소산이 늦어지기 때문이다.

Fig. 2는 Yoshida⁽⁸⁾의 결과와 같이 횡방향 평균 속도 분포에서 화염의 존재에 의한 가속을 보여준다. 가속되는 양은 횡방향과 축방향 거리가 증가할수록 증가한다. 화염이 존재하지 않을 경우 혼합층의 존재를 보여주는 버너 벽 부근을 제외하고는 횡방향 유동이 없는 축방향 유동의 특성을 보여준다.

난류 성분은 화염에 의한 변화를 명확하게 보여준다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 화염이 존재하는 경우 축방향 난류 성분은 버너 중심에서 화염에 근접할수록 난류 성분이 증가하다가 감소하는 변화를 가지게 되는 것을 확인할 수 있다. 축방향 거리의 증가와 함께 비연소 유동에서는 난류 성분 외 크기가 증가하지만 화염이 존재하는 유동에서는 난류 성분이 화염에 근접할수록 감소해 가며 축방향 거리가 증가할수록 점점 균일해 지는 경향을 보여준다. 횡방향 난류 성분도 Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 축방향 난류 성분과 유사한 경향을 보여준다. 횡방향의 경우 화염에 의한 난류

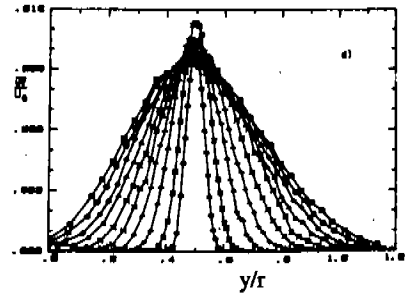


Fig. 6 Open jet Reynolds stress data of Hussain and Husain.

성분의 감소가 축방향 보다 더 크게 나타난다.

Fig. 5에서는 화염에 의한 유동의 굴곡과 가속을 알아볼 수 있도록 속도 벡터를 나타내었다.

3.2 레이놀즈 스트레스

레이놀즈 스트레스는 난류의 전달현상을 특징 짓는 중요한 항이다. 본 연구의 속도장 측정 결과와 Chung and Kwon⁽⁹⁾에 의해 밝혀진 것처럼 유동장이 화염의 열팽창 효과로 변화되었다면 난류 특성 또한 변화될 것이 예상된다. 이러한 변화는 레이놀즈 스트레스의 변화로 나타날 것이다. 본 연구에서는 미연영역에서의 화염의 유무와 레이놀즈 스트레스 분포의 관계를 실험을 통해 관찰하였다. 측정 결과는 당량비 0.6의 경우 Fig. 7에 제시된 바와 같다. 비연소 유동에서의 측정결과는 Fig. 6에 제시된 Hussain and Husain⁽⁹⁾의 오픈 제트 유동

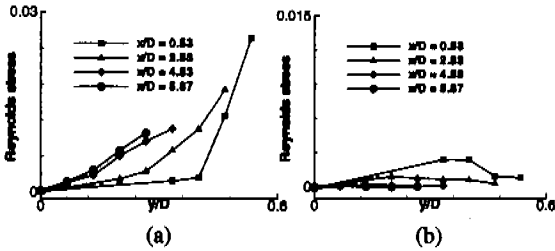


Fig. 7 Reynolds stress $\phi = 0.6$ (a) Noncombusting (b) Combusting.

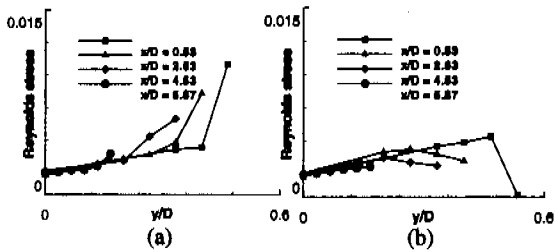


Fig. 8 Reynolds stress $\phi = 1.0$ (a) Noncombusting (b) Combusting.

측정결과와 같은 경향과 크기를 나타내었다. 그러나 화염이 존재할 경우 레이놀즈 스트레스가 횡방향 거리의 증가에 따라 증가하다가 감소하게 되는 굴곡점을 가지게 되는 것으로 관찰되었다. 뿐만 아니라 당량비 0.6 의 경우에는 전체적인 레이놀즈 스트레스의 크기가 급격히 감소되는 결과를 보여주었다. Fig. 8 에서는 당량비 1.0 의 경우 화염면의 존재로 인한 굴곡점이 화염과 함께 버너 중심으로 진행 되어가는 경향이 관찰되기도 한다.

측정 결과를 이용해 화염에 의한 미연가스 영역 유동의 난류 특성변화를 무시한 기존외 모델링의 정확성을 검증하였다. 검증을 위해 평균 수송 모델(Mean transport model)에서 효과점성(effective viscosity)값을 구하여 비연소 유동 값과 화염이 있는 유동장 각각에 대해 비교하였다. 기존의 모델에서는 미연가스 영역의 난류 특성을 비연소 유동과 동일시 하였다. 이 가정을 검증하기 위해 비연소 유동에서의 속도 구배와 화염이 존재할 경우의 속도 구배를 동일한 위치에서 측정하여 이 값으로부터 효과 점성을 구하여 비교하였다. 화염이 존재할 경우의 평균 수송 모델에서 효과 점성은 식 (1)에서와 같이 정의 된다.

$$-\overline{uv} = \epsilon \left(\frac{\delta \overline{U}}{\delta y} + \frac{\delta \overline{V}}{\delta x} \right) \quad (1)$$

측정 결과로부터 효과 점성을 계산한 결과가 Table 1 에 제시되었다. 기존의 모델에서는 당량비

Table 1 Effective viscosity calculated.

	Noncombusting ϵ_c	Combusting ϵ_f
$\phi = 0.6$	5.9×10^{-5}	4.5×10^{-4}
$\phi = 1.0$	1.3×10^{-4}	6.3×10^{-4}

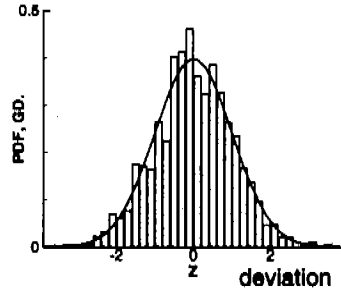


Fig. 9 Velocity PDF $\phi = 0.6$ Combusting, $y/D = 0.5333$, $x/D = 0$.

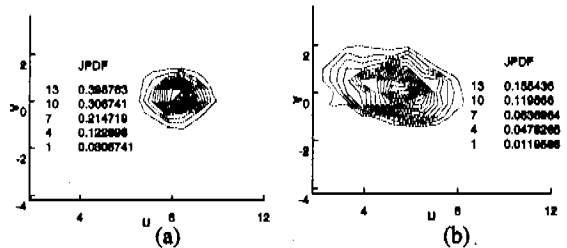


Fig. 10 U-V JPDF $\phi = 0.6$ Noncombusting $y/D = 2.5333$ (a) $x/D = 0$ (b) $x/D = 0.4$.

에 따라 5 배에서 8 배 정도 과소평가 되고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 통해 볼 때 기존의 계산 모델에서 화염 특성을 모사함에 있어 정확도가 높지 않았던 이유가 미연 영역에서 화염면의 열팽창 효과로 인한 유동장의 변화와 난류 특성 변화를 무시함으로 인한 결과인 것으로 판단 된다.

3.3 확률밀도 함수와 동시 확률밀도함수

측정된 속도장을 이용해서 속도분포의 확률밀도 함수와 축-횡방향 동시 확률밀도 함수를 구하였다. Fig. 9 에서 제시된 바와 같이 확률밀도함수는 전반적으로 난류 유동의 특성대로 정규 분포에 근사하는 형태로 관찰되었다.

동시 확률밀도를 통해 레이놀즈 스트레스 분포 경향과 동방성(isotropy) 등 유동의 특성을 관찰 할 수 있다.

화염이 존재하지 않을 때의 결과인 Fig. 10 과 화염이 존재할 때의 결과인 Fig. 11 을 비교해 볼 때 화염의 존재로 인해 난류 성분이 감소하고 화

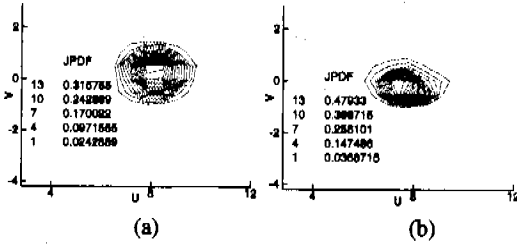


Fig. 11 U-V JPDF $\phi = 0.6$ combusting $y/D = 2.5333$
(a) $x/D = 0$ (b) $x/D = 0.4$.

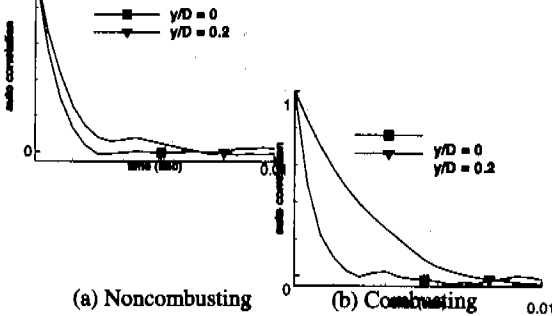


Fig. 12 Auto-correlation $\phi = 0.6$ $x/D = 2.5333$.

염에 의한 열팽창의 효과로 동시확률밀도의 크기가 화염면에 근접해 갈수록 증가하고 동밀도선의 범위가 감소하게 되는 것이 관찰된다. 이것은 비연소 유동의 경우와는 반대가 되는 현상이다. 비연소 유동의 경우 버너 중심에서 횡방향 거리가 증가할수록 밀도가 낮아지는 경향을 보여준다. 비연소 유동에서 동밀도선의 분포는 축방향에서 상대적으로 넓게 분포하는 경향이 있다. 그러나 화염이 존재할 경우 화염에 의해 방향성을 상실하게 되어 동밀도선이 원형에 가까운 등방성 유동에 근접하는 경향이 관찰된다. 화염이 존재할 경우 버너 중심에서 (x/D) 축방향 거리가 증가할 때 동밀도선의 범위가 축소되고 밀도 값이 증가하여 횡방향 거리가 증가하는 것과 같은 결과를 보여주었다.

3.4 자체 상관계수와 적분길이 스케일

측정된 속도 데이터로부터 자체 상관계수를 구하였다. 정상상태의 속도 요동 값에 대해서 자체 상관계수는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\frac{\overline{u(t)u(\tau)}}{\overline{u(t)^2}} = \rho(\tau) \quad (2)$$

본 연구에 사용된 유동은 축방향 유동이므로 축방향 속도 값에 대해 상관계수를 구하였다. 측정된 자체 상관계수의 결과가 Fig. 12에 나와 있다. 비연소 유동의 경우 횡방향 거리의 증가와 자체 상관계수의 감쇄율은 거의 무관한 것으로 관찰되

Table 2 Integral length scale.

y/D	2.5333			5.8667		
x/D	0	0.4	0.467	0	0.4	0.467
Flame off	6.0	5.4	4.5	6.2	6.5	6.8
Flame on	5.4	14.4	49.9	13.2	15.5	28.1

어진다. 하지만 화염이 존재할 경우 횡방향 거리가 증가할수록 즉 화염에 근접해 갈수록 감쇄율이 급격히 작아지는 것을 확인할 수 있다.

축방향의 경우 Taylor의 가설을 이용해서 자체 상관계수로부터 적분 길이 스케일을 구해낼 수 있다. 화염에 근접해 갈수록 에디의 크기가 증가하고 축방향 거리의 증가에 따라서도 에디의 크기가 커지는 것을 관찰할 수 있다.

4. 결론

오픈 제트 버너에 형성된 메탄/공기 예혼합 화염을 이용해서 화염이 미연가스 영역의 난류 특성에 미치는 영향을 알아보았다. 미연영역에 해당하는 동일한 위치들에 대해 화염이 존재할 때와 존재하지 않을 때 각각의 경우에 난류 유동장의 특성을 2차원 레이저 유속계로 측정하였다. 측정 결과로부터 화염이 미연 영역 평균 유동장을 포함하는 난류 특성에 상당한 크기의 변화를 가져오는 것으로 판단된다.

화염에 의해 전체적인 유동의 에너지 소산이 화염이 존재하지 않을 때 보다 지연되어짐을 확인하였고 축방향 성분의 횡방향 평균 속도 구배 값이 감소됨을 확인하였다. 횡방향 평균 속도에서는 화염에 의한 가속이 명확히 관찰되었다. 난류 성분은 비연소 유동의 경우 일반적인 제트 유동과 같이 횡방향 거리의 증가와 함께 난류 성분이 증가하는 반면 화염이 존재할 경우 화염에 근접하면서 감소되는 것이 관찰되었다.

비연소 유동의 레이놀즈 스트레스 측정값은 일반적인 제트 유동 측정값과 같이 버너 축에서 횡방향으로 거리가 증가할수록 값이 증가하는 경향을 보여 주었고 이러한 경향이 화염에 의해 역전되어 감소되게 되는 굴곡점이 존재함이 확인되었다. 이 굴곡점은 축방향 거리가 증가할수록 버너 축을 향해 진행 하는 것으로 관찰되었다. 측정된 속도 데이터를 이용해서 평균 수송모델에서의 효과 점성 값을 환산한 결과 비연소 유동에서의 상관계수가 실제 화염이 존재할 경우의 값에 비해 당당비에 따라 5-8 배 정도 축소평가 되고 있음을 확인하였다. 이 결과는 기존의 모델에 대한 검증

에서 중요한 의미를 가질 것으로 생각 된다.

속도의 확률밀도 함수는 화염이 존재할 때와 존재하지 않을 때 두 경우에 대해 정규분포를 따라가는 형상을 보여주었고 축-횡방향 동시 확률밀도함수로부터 화염이 존재할 경우 화염이 존재하지 않을 때에 비해 난류 성분이 감소하는 경향과 화염에 의해 유동이 등방성 유동에 가까워지는 특성이 관찰되었다. 자체 상관계수로부터 화염이 존재하지 않을 경우 횡방향 거리의 증가에 크게 의존하지 않던 감쇄율이 화염에 근접하면서 급격히 감소하는 것을 관찰할 수 있었다.

자체 상관계수로부터 구한 축방향 적분길이 스케일은 화염이 존재하지 않을 경우 횡방향 위치에 큰 영향을 받지 않던 것이 화염에 의해 변화되어 크게 증가하는 것으로 나타났다.

이러한 변화는 화염에 의한 미연 영역의 가열로 밀도가 저하되어 발생하는 국소적인 층류화의 영향과 화염에 의한 열팽창 효과로 인한 유동 압축의 결과동에 기인하는 것으로 판단된다.

본 연구의 결과에 따라 비연소 유동 값을 사용하지 않는 계산 모델의 개발을 통해 기존의 모델에서의 결함들을 수정 할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Spalding, D. B., 1976, "Development of the Eddy-Break-Up Model of Turbulent Combustion," *16th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Inst., Pittsburgh, pp.1657~1663.
- (2) Bray, K. N. C. and Libby, P. A., 1994, "Recent Developments in the BML Model of Premixed Turbulent Combustion," *Turbulent Reacting Flows*, Chap.3, Academic Press.
- (3) Jones, W. P. and Launder, B. E., 1972, "The Prediction of Laminarisation of a Two-equation Turbulence Model," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 15:301.
- (4) Chung, E. H. and Kwon, S., "The Effect of Volume Expansion on the Propagation of Wrinkled Laminar Premixed Flame," *Combust. Sci. and Tech.* submitted.
- (5) 이대훈, 권세진, 1998, "난류 예혼합 화염의 미연가스 영역 난류 특성," 항공우주학회 춘계 학술 발표회.
- (6) Cheng, R. K., 1984, "Conditional Sampling of Turbulence Intensities and Reynolds Stress in Premixed Turbulent Flames," *Combust. Sci. and Tech.* Vol.41, pp.109-142.
- (7) 이대훈, 1999, "난류 예혼합 화염이 미연가스 영역의 난류 특성에 미치는 영향," 석사학위 논문, KAIST.
- (8) Yoshida, A., 1981, "An Experimental Study of Wrinkled Laminar Flame," *18th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Inst., Pittsburgh, pp. 931~939.
- (9) Hussain, A. K. M. F. and Husain, Z. D., 1980, "Turbulence Structure in the Axisymmetric Free Mixing Layer," *AIAA Journal*, Vol.18, No. 12.

(1) Spalding, D. B., 1976, "Development of the Eddy-Break-Up Model of Turbulent Combustion," *16th*