

층류 예혼합화염의 화염면 형상 제어에 관한 연구

이원남* · 서동규**

A Study on the Control of Flame Shapes in Laminar Pre-Mixed Flames

Wonnam Lee, Dong Kyu Seo

ABSTRACT

The control of flame shapes in a laminar pre-mixed flame has been experimentally investigated for propane/air pre-mixed laminar flames. Flames of different size and shapes are observed with heated wires or by controlling the equivalence ratio and flow rate of a mixture. The characteristics of the partitioning of a flame or the merge of flames are analyzed and explained by considering the balance between laminar flame speed and upstream mixture velocity. A combustor might be sized down while maintaining its heat production rate the same by partitioning a flame established in it. When the equivalence ratio of mixture is decreased, individual flames are merged together and the upstream mixture velocity can be practically decreased on a nozzle having opening ratio less than unity. As a result, the flame shape is to be adjusted until the newly established balanced condition is satisfied, and then, the stable combustion can be achieved again.

Key Words : Laminar premixed flame, Flame shape control, Laminar flame speed.

1. 서 론

층류 예혼합 화염을 이용하는 연소기는 사용되는 화염의 형상에 따라 구조가 달라지게 된다. 따라서 연소기 내에 생성되는 화염의 크기와 화염면의 형상을 제어할 수 있다면 연소 특성을 개선할 수 있으며, 또한 연소기의 소형화를 통한 최적화 설계가 가능하게 된다. 일반적으로 부하가 증가하면 혼합기의 유속이 증가하고 화염의 크기가 커지며, 궁극적으로 화염의 날림이 발생한다. 따라서 층류화염을 이용하는 연소기는 대체적으로 연소부하에 비하여 그 크기가 매우 크고 또한 화염의 안정화 영역이 비교적 좁다고 알

려져 있다.

최근에 활발히 연구되고 있는 희박 예혼합 연소 기술은 실제 연소기에 적용할 때 낮은 emission의 효과와 높은 연소효율을 얻을 수 있으며 또한 방출열을 효율적으로 사용할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 그러나 희박연소는 특유의 불안정성 문제를 갖고 있으므로, 이를 극복하기 위한 다양한 기술이 연구되고 있다.

가열된 보염기를 이용한 희박 예혼합 화염의 안정화 특성에 관한 연구[1]는 보염기를 가열하면 화염의 안정화 영역이 확장되고, 이 때 가열된 보염기의 역할은 희박 화염을 안정화 시키는 유동장 효과와 열유속 효과로 구분될 수 있음을 보여주었다. 또한 이 연구 과정에서는 보염기를 2 개 사용하여 보염기 사이에 tent-shaped 화염을 형성하고 conc-angle method와 유사한 방법으로 초 희박 영역에서 화염전파 속도를 측정하

* 단국대학교 기계공학과

† 연락저자, wlee@dku.edu

** 단국대학교 대학원

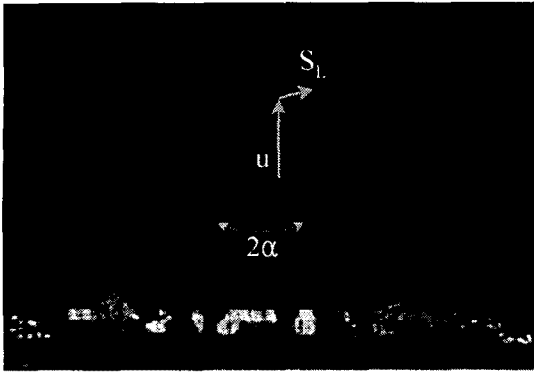


Fig. 1 Laminar flame speed measurement in a tent-shaped flame

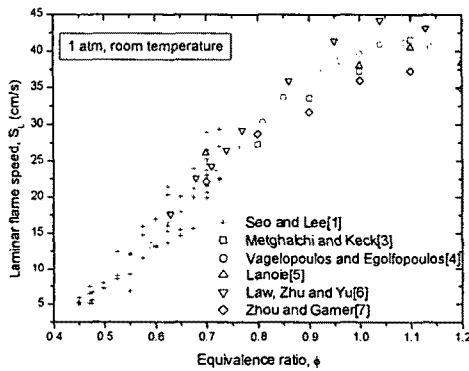


Fig. 2 Laminar flame speed of propane/air ultra lean premixed flames

였다. 이와 같은 화염전파속도 측정 실험을 통하여 보염기에 의해 안정화된 화염의 형상도 화염전파속도를 반영한다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 1은 가열된 보염기 2 개를 사용하여 안정화된 화염의 형상과 화염전파 속도 측정 방법을 보여주고 있다. 이 방법으로 측정된 희박 예혼합 화염의 화염 전파 속도는 Fig. 2에서 보여주는 것과 같이 기존의 측정 결과와 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 화염전파속도와 화염면의 상호 관계를 연구하여 알려진 화염전파속도 범위에서 화염의 형상을 예측하거나 화염면의 형상의 제어 가능성을 실험적으로 확인하고, 화염면 형상 제어 메커니즘을 알아보았다.

2. 실험장치 및 방법

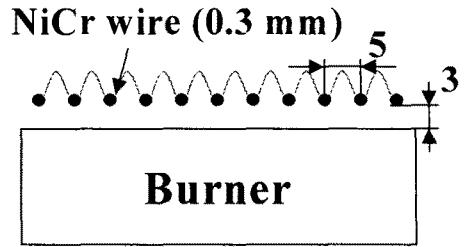


Fig. 3 Schematic of heating wires

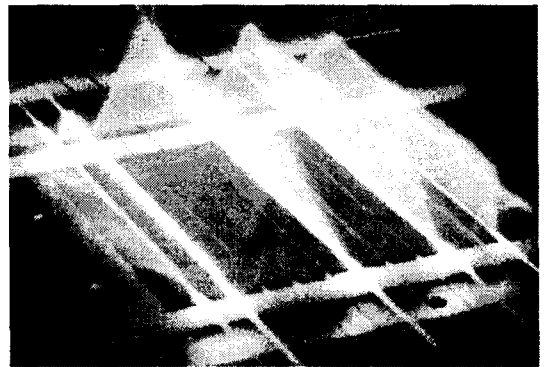


Fig. 4 2D flame on a premixed burner with heating wire

2.1 실험장치

실험은 화염전파속도 측정, 열선을 이용한 화염면 제어 실험, 그리고 유동장을 이용한 화염면 제어 실험으로 수행되었다. 화염전파속도 측정과 열선을 이용한 화염면 제어 실험에는 출구 면적이 52 mm × 52 mm 인 사각형 예혼합 버너가 사용되었다. 이 버너에 대한 설명과 화염전파속도 측정에 관한 것은 참고문헌[1]에서 자세하게 언급하였다.

열선을 이용한 화염면 제어 실험은 노즐 출구에 Fig. 3과 같이 열선(니크롬선, 직경 0.30 mm)을 5 mm 간격으로 11 개 배치하였다. 각 각의 열선은 따로 전류를 공급할 수 있도록 하였으며 열팽창에 대해서 열선의 처짐이 발생하지 않도록 열선의 끝단에는 스프링을 이용한 장력부분을 장착하였다. Fig. 4는 실제로 열선에 화염이 형성된 모습이다.

Figure 5는 유동장을 이용하여 화염 형상을 제어하는 실험에 사용된 슬롯버너[2]의 개념이다. 7 개의 플레이트 사이에 플레이트와 두께가 같은 6 개의 노즐이 있고 여기에 형성된 화염은 혼합기 조건에 따라서 병합되기도 하고 분리되기도 한다. 연료로 사용한 프로판과 공기는 질량유량기

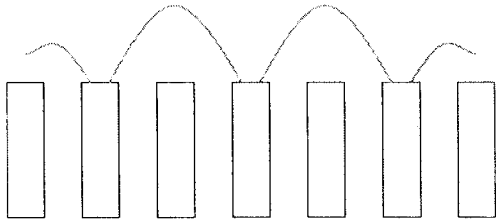


Fig. 5 Concept of slot nozzle

(BROOKS, 10sl/m 과 300 sl/m)와 리드아웃 (LOKAS, G-mate2000)으로 제어하였다.

2.2 실험방법

실린더 형상을 갖는 열선은 전류의 흐름이 없을 때 보다 전류를 공급할 경우 열에너지의 공급에 의하여 더욱 보염 효과를 높일 수 있다. 이때 공급한 열량이 높을수록 보염 효과는 커지게 되어 가연한계까지 화염을 안정화 시킬 수 있다. 가열된 보염기에 의해서 화염이 안정화 되는 경우에는 형성된 화염면으로부터 측정된 화염 전파속도는 공급된 열량이나 혼합기의 유속과는 상관없이 당량비에 의해서만 결정되는 것으로 나타났다[1]. 그러므로 본 연구에서는 열선에 공급되는 열량은 화염이 부착되기에 충분한 열을 공급하도록 전류를 공급하였으며 대부분의 경우 약 0.85 W/cm의 열을 공급하였다. 실험에서 화염의 연소 조건은 당량비 0.65, 출구 평균 혼합기 속도 54.6 cm/s 인데 이것은 수차례의 예비 실험을 통하여 가장 화염의 모양을 다양하게 제어할 수 있는 조건이다. 이 조건에서 열선에 전류를 공급하여 화염을 열선에 안정화시키고, 전류를 공급하는 열선에 변화를 주어서 다양한 모양의 화염이 형성되도록 하였고 각 각의 경우에 대하여 화염 전파속도를 측정하여 화염의 모양과 화염전파속도와의 관계를 알아보았다.

열 공급이 없는 상태에서 화염의 형상을 관찰하고 제어하기 위해서는 슬롯버너를 사용하였다. 혼합기의 공기유량을 고정하고 연료유량을 변화시키는 방법으로 조건을 바꿔가면서 화염을 형성시켰으며, 이 때 화염면의 형상으로부터 화염전파속도를 계산하는 방법으로 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열선을 이용한 화염면 제어

Figure 6은 다양하게 열선으로 제어된 화염의 모양을 나타낸다. 1 번 그림은 한 개의 슬릿에 (열선과 열선의 간격 5 mm를 여기서는 슬릿이라 칭함.) 한 개의 화염이 형성된 경우이고 마찬가지로 8 번 그림은 8 개의 슬릿에 한 개의 화염

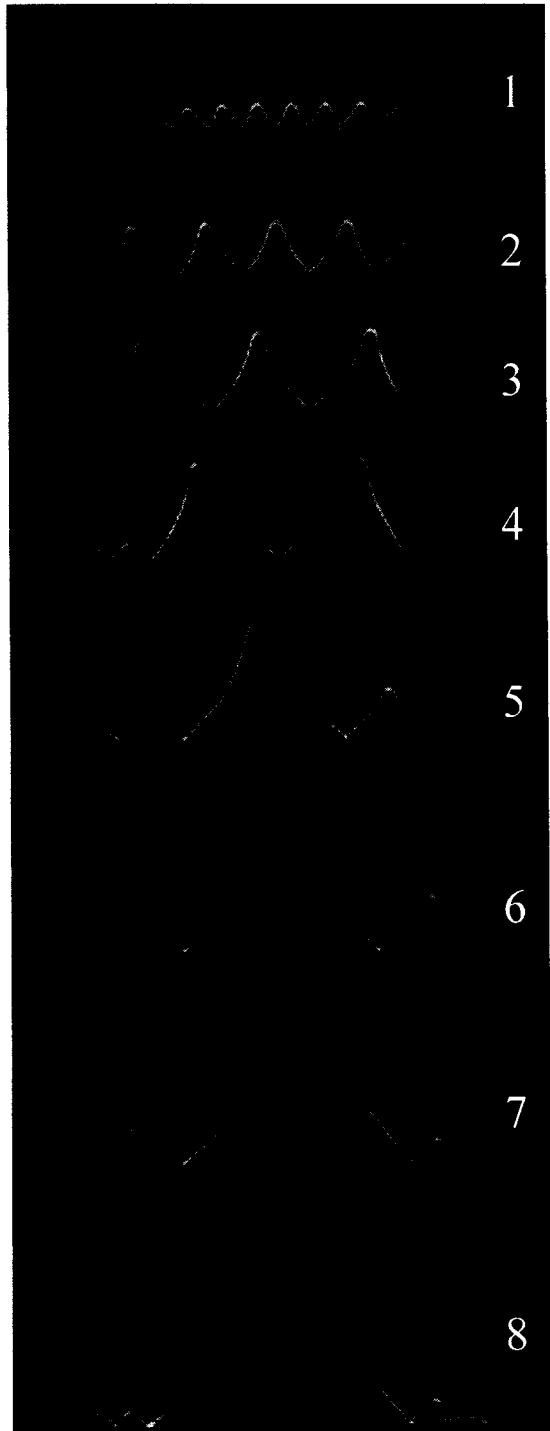


Fig. 6 Various 2D flame shapes can be obtained by controlling heating wires

이 형성된 경우이다. 공급된 혼합기의 조건은 모두 같은 조건(당량비 0.65, 출구평균속도 54.6

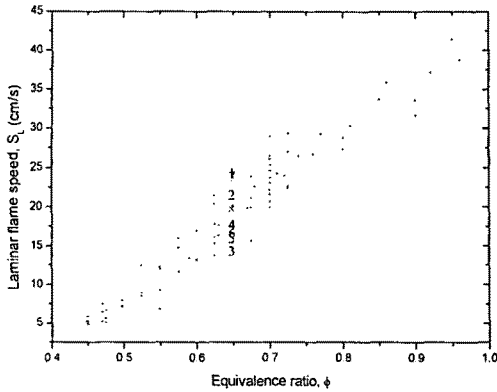


Fig. 7 Laminar flame speed of controlled flames

cm/s)이며 이것은 열 공급이 없을 경우에는 화염이 날아가는(blow off) 조건이다. 그러나 열선에 에너지를 공급하여 열을 방출 시키면 그 열선의 위치에서는 화염이 열선에 부착되면서 화염이 안정화 되었고 각 각 다른 위치의 열선에 에너지를 공급할 경우 다양한 모양의 화염이 형성되었다.

화염의 분할과 병합 특성을 이해하기 위하여 각 각의 경우에 대해서 화염 전파속도를 측정하여 화염모양의 변화와 화염전파속도와의 관계를 알아보았다. Fig. 7은 기존 여러 연구자들에 의해서 측정된, 표준조건에서 프로판/공기 예혼합화염의 당량비에 따른 화염전파속도[1,3-7]에 이번 실험의 결과를 Fig. 6의 번호로 겹쳐서 나타낸 것이다. 이 결과로부터, 동일한 당량비 조건에서 측정된 화염전파속도는 화염이 분할되는 숫자, 즉 화염면의 형상과 크게 관계없이 기본적으로 같다는 것을 알 수 있다. 따라서 동일한 당량비를 갖는 증류 예혼합 화염은 화염의 분할이 이루어지면 화염의 크기가 작아지고, 이 때 실제 연소기에서 1번과 같은 형태로 화염이 형성될 수 있으며 연소기의 소형화 설계가 가능하리라 기대된다.

3.2 유동장을 이용한 화염면 제어

추가적인 열량 공급 없이 화염면 형상 제어 실험을 하기 위하여 슬롯버너를 이용한 실험을 수행하였다. Fig. 8은 슬롯버너에서 일정한 공기유량에 대하여 연료유량을 조절하여 당량비와 유속을 바꾸면서 화염의 형상을 제어한 모습이다. 이 때 당량비와 유속이 낮으면 화염이 각각의 슬롯에 형성이 되지만 당량비가 낮아지고 유속이 빨라지면 점차로 두개의 슬롯이 합쳐지면서 화염이 형성되었다. 당량비가 더 낮아지면 4 개의 슬롯

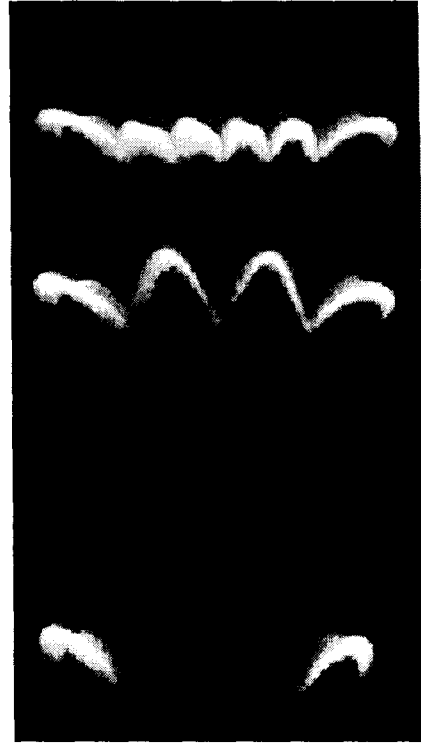


Fig. 8 Individual and merged flames on a slot burner.

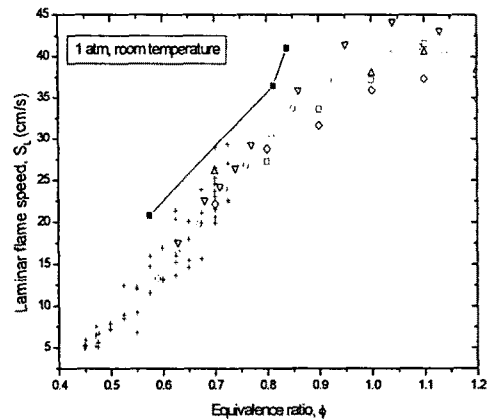


Fig. 9 Laminar flame speed of various shaped flame on a slot burner

이 병합되며 화염이 형성되고 화염의 크기가 길어졌다. 이 결과는 열선을 이용한 화염의 분할과 병합 원리와 동일하게 이해될 수 있다.

Figure 9는 각 각의 경우에 대하여 화염전파속도를 측정된 결과를 보여준다. 비록 화염의 크기가 작기 때문에 측정된 값의 오차가 큰 것으로 생각되나 화염의 모양이 화염전파속도를 반영한다는 것에 대해서는 열선 실험의 경우와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

3.3 화염면 제어와 화염 안정성

예혼합연소는 전파되는 화염의 특성상 혼합기의 유동속도와 화염전파속도의 영향을 크게 받으며 연소기내에서 원하는 형태의 화염을 유지하는 범위가 경우에 따라서는 매우 좁은 범위를 갖게 된다. 가장 이상적인 연소형태는 화염의 크기가 작아서 좁은 공간의 연소기에서도 큰 열량을 얻어낼 수 있는 경우인데, 일반적으로 화염의 크기를 작게 만들기 위해서는 당량비를 증가시켜야 하며 이 때 화염전파속도가 빨라지기 때문에 유동장 속도를 적절하게 맞춰주지 않으면 역화나 연소기 표면의 과열현상이 발생할 수 있다.

Figure 9의 슬롯버너를 이용한 실험 결과도 화염전파속도와 유동 속도에 균형에 따른 안정된 화염의 형성으로 이해될 수 있다. 당량비가 1에 가까워서 화염전파속도가 빠를 때면 화염이 분리되어 형성되지만 당량비가 점점 낮아지면 화염전파속도가 느려지고 화염면은 후류로 이동한다. 이 과정에서 인접한 노즐의 혼합기와 섞이는 부분이 발생하고 결국 화염은 인접한 노즐과 병합된다. Fig. 10은 이러한 개념을 그림으로 보여주고 있다. 화염이 분리된 경우에 각 화염에서 혼합기의 유동속도를 1이라 할 때 병합된 화염의 경우 화염이 형성되는 총 면적에는 닫혀있어서 유량이 없는 면적이 포함되어 혼합기 공급 속도는 0.6이 된다. 이 개념으로 추정하면, Fig. 10의 합병된 화염은 분리된 화염과 공급 속도가 같을 때, 화염전파속도가 분리된 화염의 60% 정도 되는 당량비를 갖고 있을 것이라고 추정할 수 있다.

화염의 크기를 작게 만들기 위해서 Fig. 6의 1

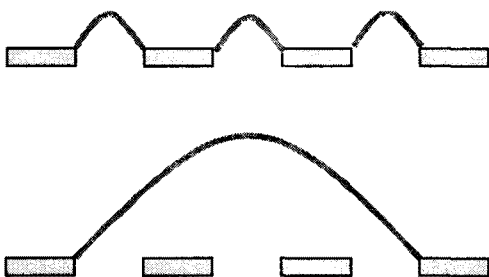


Fig. 10 Concept of individual flames and a merged flame

과 같이 화염을 여러 개로 분할 할 수 있다. 이 방법은 열선에 추가적인 에너지 공급이 있어야 하는 방법이지만 이 분할된 화염의 개수를 극단적으로 증가시키면 화염면이 열선 주위에 두껍게 생길 것이고 결국 혼합기는 화염면에서 모두 반응할 것이므로 상당히 넓은 연소범위(당량비, 유동속도)를 갖을 수 있다. 추가적인 에너지 공급이 적용하기 힘든 경우에는 유동장 특성만을 이용하여 연소기 운전범위를 넓힐 수 있다. 이것의 개념은 화염이 유지되기 힘든 조건에서는 인근 노즐의 화염과 병합된다는 매커니즘이므로 이것을 고려하여 노즐 플레이트 개도부의 형상과 배치를 설계한다면 안정된 운전범위가 넓은 연소기를 설계할 수 있을 것이다.

Figure 11은 다공 플레이트형 노즐을 사용하는 버너에서 형성된 희박 예혼합 화염의 직접사진을 보여주고 있다. 당량비가 낮으면 화염이 노즐마다 생기지 못하고 몇 개씩 합병된 상태로 나타나다가(a), 당량비를 증가시키면 2 개 씩 규칙적으로 배치되고(b), 더욱 당량비를 증가시키면 각 노즐마다 화염이 형성되는 것을 관찰 할 수 있었다. 이와 같은 현상은 Fig. 10으로 설명된 화염의 병합과 이에 따른 유동속도의 변화의 결과임을 알 수 있다. 화염의 병합이 발생하면 평균 유동속도가 낮아지게 되고 따라서 화염전파속도가 느려지는 낮은 당량비 조건에서도 화염이 노즐판에 부착이 되어 안정적인 연소가 가능하게 된다. 결과적으로 화염의 날림이 억제되는 효과로 화염의 안정화 범위가 증가되는 것을 알 수 있다.

안정된 운전범위를 갖기 위해서 화염면을 제어하는 방법에는 열과 유동장을 모두 이용한 방법도 생각 할 수 있다. 추가적인 열 공급을 하게되

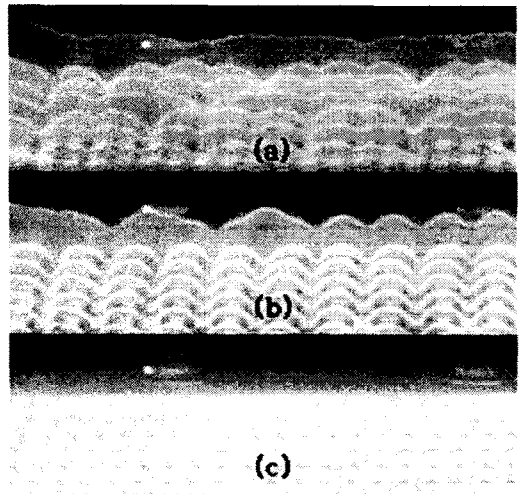


Fig. 11 Individual and merged flames on a nozzle plate

면 연소기의 구조가 복잡해 질 수 있으므로 화염 자체 열의 일부를 보염에 사용한다면 추가적인 에너지 공급 없이도 넓은 범위의 운전영역을 확보 할 수 있다. 실제로 다공 세라믹 버너[8]의 표면 형상은 크기가 다른 구멍이 혼재되어 있고 표면의 높이도 다른 것이 여러 개 배치되어 점화 초기에는 유동장 특성으로 화염을 안정화 시키고 평형상태에서는 세라믹 표면이 고온이 되므로 이 온도를 이용하여 화염이 안정되는 것이라고 생각 된다.

4. 결 론

1. 층류 예혼합 화염의 화염면 형상은 항상 화염전파속도를 반영한다. 즉 화염은 스스로 반응이 유지될 수 있는 형상을 유지한다. 따라서 화염 전파속도를 알고 있다면 화염 형상을 추정 할 수 있고, 또는 그 반대도 가능하다.

2. 열선을 이용하여 화염의 형상을 제어하였다. 같은 혼합기 조건에서 화염의 형상은 다양하게 조절이 가능했고 화염을 여러 개로 분할 할 수 있었다. 따라서 화염을 분할하여 동일한 열량을 얻으면서 연소기의 크기를 작게 만들 수 있는 가능성을 제시하였다.

3. 유동장 특성을 이용하여 화염의 형상을 제어하였다. 다공 플레이트형 구조의 버너는 화염 전파속도가 빠를 때는 화염이 각 노즐 위치에 분리되어 형성되지만, 화염전파속도가 느릴 경우에는 인접한 노즐의 혼합기와 병합되어 화염이 형성된다. 이와 같은 화염 병합 특성은 안정된 운전영역이 넓은 연소기의 설계에 이용될 수 있다.

참고문헌

- [1] 서동규, 이원남, "가열된 원통형 보염기에 의한 희박 예혼합화염의 보염: 열유속의 역할," *대한 기계학회 2003년 춘계 학술대회*, 2003.
- [2] 서동규, "슬롯버너를 이용한 메탄 과농-희박 예혼합화염의 구조와 안정성에 관한 연구," *단국대학교 석사학위 논문*, 2003
- [3] Metghalchi, M. and Keck, J. C., "Laminar Burning Velocity of Propane-Air Mixture at High Temperature and Pressure," *Comubst. Flame*, 38, 1980, pp. 143-154.
- [4] Vagelopoulos, C. M. and Egolfopoulos, F. N., "Further Considerations on the Determination of Laminar Flame Speeds with the Counterflow Twin-Flame Technique," *Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion*, 1994, pp. 1341-1347.

[5] Lanoie, G. A., February , Paper 780229, presented at SAE Congress, Detroit, 1978

[6] Law, C. K., Zhu, D. L. and Yu, G., "Propagation and Extinction of Stretched Premixed Flames," *Twenty-First Symposium (International) on Combustion*, 1986, pp. 1419-1426.

[7] Zhou, M. and Garner, C. P., "Direct Measurements of Burning Velocity of Propane-Air Using Particle Image Velocimetry," *Comubst. Flame*, 106, 1996, pp. 363-367.

[8] 황상순, "다공세라믹 버너를 이용한 표면화염의 연소 및 배기특성", *한국연소학회지*, Vol. 6, No. 1, 2001, pp. 29-35.