

가열된 원통형보염기에 의한 희박 예혼합화염의 보염 : 열유속의 역할

서동규*·이원남†

Stabilization of Lean Premixed Flames by a Heated Cylindrical Rod: The Role of Heat Flux

Dong-Kyu Seo, Wonnam Lee

Key Words: flame stabilization(보염), laminar flame speed(층류 화염전파속도), lean premixed flame(희박 예혼합화염), V-flame(V 화염)

Abstract

The stabilization of propane/air lean premixed flames by a heated cylindrical rod is investigated experimentally. The flame stability limits, heat flux, surface temperatures, equivalence ratios, and mixture velocities are measured in order to understand the role of heat flux or surface temperature on the flame stabilization of lean premixed flames. The flame stability limits are lowered by a heated cylindrical rod and extended even below the flammability limit of propane/air mixture when sufficient heat flux is provided. The flame stability limit decreases with the increase of heat flux or surface temperature and decreases with the higher mixture velocity. The diameter of cylindrical rod, however, does not significantly affect the flame stability limit. The laminar flame speed has been measured for ultra lean propane/air premixed flames. The flame stabilization by a heated cylindrical rod provides the useful tool for the measurement of flame speed under very fuel-lean conditions.

기호설명

OD	열선을 감은 실린더의 외경 (mm)
sl/m	standard litter per minute (273 K, 1 atm)
u	노즐 출구의 평균 속도 (cm/s)
Φ	당량비
Tc	실린더 표면의 온도 (K)
S _L	층류 화염 전파속도 (cm/s)
α	화염면과 유동장 방향사이의 각도

1. 서론

최근 환경에 대한 관심의 증가와 고효율 연소기를 추구하는 흐름에 따라서 희박연소에 대한 관심이 증가하고 있다. 그러나 희박화염은 대부분의 조건에서 안정화시키기가 쉽지 않으며 이에 대한 많은 연구가 수행되고 있다.

화염을 안정화시키는 수단으로 보염기(bluff body)를 이용하는 방법이 오래 전부터 연구되었다. 보염기를 사용하면 유동장 내부에 실린더형 또는 다른 여러 가지 형상의 물체를 놓고 이 물체를 지나면서 생기는 Karman vortex로 인해서 국부적으로 생긴 저속 영역에서 화염이 고정되며 주로 난류 확산화염에서 연구되었다. 이와 같은 보염장치는 화염과 Karman vortex의 상호 작용을 규명하기 위한 연구^(1,2) 등에서의 같이 실험장치의 구성에도 자주 사용되고 있다.

* 단국대학교 대학원 기계공학과

† 단국대학교 기계공학과

E-mail : wlee@dku.edu

TEL : (02)709-2659 FAX : (02)793-1867

니크롬선과 같은 열 공급이 가능한 물체에 고정된 예혼합화염을 V-flame 이라고 하는데 화염의 밑단이 고정되어 화염의 모양이 V 형태로 나타나기 때문이다. 이 경우 니크롬선은 bluff body 와 열원의 역할을 동시에 하게 된다. 이 때 이 현상을 이해하고 연소과정을 해석하기 위해서는 두 가지, 유동장과 열유속, 각각의 역할에 대한 이해가 필요하며 이에 대한 정량적인 연구결과는 많지 않다.

이와 관련된 연구로써, 반복된 슬롯형상의 노즐구조를 갖는 버너를 이용하여 내부에는 희박화염을 형성하고 외부에는 과농화염을 형성하고 과농화염을 이용하여 희박화염을 안정화시키는 연구가 있었다.⁽³⁾ 이 연구에서는 희박화염의 연료가 완전 연소되는 조건에 대하여 알아보았기 때문에 보염한계에 대한 정보는 알 수 없었다. 슬롯버너를 이용한 실험에서는, 또한 과농화염의 역할 중에서 열적(thermal) 역할만을 분리해서 알아보기 위하여, 과농화염을 제거하고 그 자리에 가열된 실린더를 놓는 실험을 수행하여 열유속에 따른 희박화염의 연소특성을 알아보았다. 그러나 이 경우에도 희박 혼합기가 모두 연소되는 조건에 대해서 수행되었으며 보염한계를 알 수 없었다.

본 연구는 가열된 실린더가 층류 희박 예혼합화염을 안정화시키는 특성을 관찰하여 와류에 의한 보염과 열 공급에 의한 보염의 상관관계를 알아보고, 희박화염의 연소 및 보염 특성에 대한 실험적 자료를 획득하기 위하여 수행되었다. 실험은 프로판/공기 예혼합기의 가연한계 부근 초희박 영역에서 수행되었으며, 이때 층류 화염전파속도를 측정하여 초희박 연소 모델링 자료로 활용 가능하도록 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 Fig.1에 나타내었다. 실험에는 사각형 예혼합버너가 사용되었다. 연료와 산화제는 1차적으로 버너 외부에서 내경 8 mm의 튜브를 이용하여 혼합하였으며, FLUENT 코드를 이용하여 99 % 이상 충분히 혼합되는 것을 확인하였다.

버너로 유입된 혼합기는 일차적으로 스크린 버퍼를 거치면서 제트방향의 속도 성분이 완화된

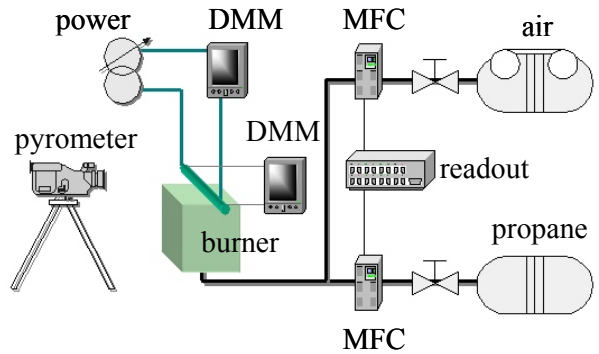


Fig. 1 Experimental setup.

다. 혼합기는 다시 스크린, 유리구슬(지름 1.5 mm)로 되어있는 층 및 하니콕을 지나면서 균일한 유속을 갖는 층류 흐름이 된다. 따라서 버너의 출구에서 혼합기는 균일한 속도성분을 갖게 되며 플러그 유동으로 간주할 수 있다. 프로판과 공기는 질량유량기(BROOKS, 10sl/m 과 300 sl/m)와 리드아웃(LOKAS, G-mate2000)으로 제어하였다.

버너 출구에 위치한 원통형 보염기(cylindrical rod)는 Fig. 2에 자세하게 나타내었다. 원통형 보염기는 외경이 각각 1.60 mm와 3.00 mm인 세라믹 튜브에 열선을 감아서 제작하였다. 열선으로는 직경 0.32 mm 철크롬선(Kanthal LT wire, 14.8 Ω/m)을 사용하였으며, 세라믹 튜브에 감아서 총 외경을 2.3 mm, 4.0 mm로 만들어서 버너 노즐로부터 10 mm 높이에 설치하였다. 철크롬선은 니크롬선과 달리 실린더에 코일로 감았을 때 서로 단락되지 않고 절연시킬 수 있는 특성이 있으며, 따라서 열선을 감은 후에도 표면이 매끈한 원통형 보염기를 제작 할 수 있었다.

철크롬선에 일정한 열유속을 공급하기 위하여 전압조절기(slidacs)를 사용하였다. 정확한 열유속의 측정에는 두 개의 DMM(digital multimeter,

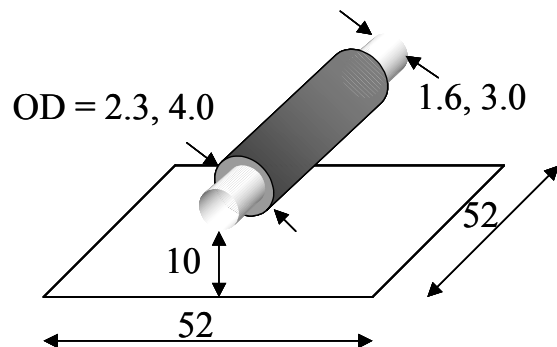


Fig. 2 Heated cylindrical rod.(in mm).

YOKOGAWA 7541, HP 34970a)을 사용하였다. 실험이 정상상태에서 수행되었기 때문에 온도 변화에 따른 저항 값의 변화와 같은 외적 요인에 의하여 열유속이 변화하는 일이 없이 전류와 전압을 일정한 상태로 유지할 수 있었다.

열유속 외에도 실린더 표면의 온도가 측정되었다. 보염기 표면 온도의 측정에는 열전대(Omega, R type, 지름 0.0762 mm)와 열전대로 보정된 파이로미터(MINOLTA, IR-308)가 사용되었다. 세라믹 튜브에 삽입된 열전대는 튜브내의 온도를 반영하게 되는데 실린더 외부에 화염이 형성될 경우 튜브 중심의 온도는 표면 온도와 같게 된다. 이 방법으로 튜브의 외부에 화염을 형성시키고 튜브 내의 열전대 온도를 측정하여 파이로미터의 방사율을 보정하였다.

가열된 보염기를 이용할 경우 초회박 조건에서도 화염의 형태를 비교적 양호하게 유지시킬 수 있다는 것에 착안하여, 화염전과 속도를 측정해 보았다. V 화염의 경우 유동장이 화염면 근처에서 심하게 왜곡되므로 전통적인 콘 앵글 방법(cone-angle method)을 적용할 수 없다.⁽⁵⁾ 따라서 본 연구에서는 보염기를 2개 장착하여 2D의 삼각형 모양 화염(tent-shaped flame)을 만들어서 콘 앵글 방법과 같은 방법으로 화염전과 속도를 측정하였다.

2.2 실험방법

실험에서 변수 조건은 실린더의 외경, 실린더에 공급된 열량 그리고 공기의 유량이다. 각 조건에 대하여 가연한계인 프로판 유량을 측정하였고 그때의 실린더 표면 온도를 측정하였다.

실험은 외경 2.3 mm와 4.0 mm의 원통형 보염기를 사용하여, 공급열량을 실린더에 열을 가하지 않았을 경우, 2.5 W/cm, 5.0 W/cm, 7.5 W/cm의 열량을 각각 공급한 경우에 대하여 수행되었으며, 공기의 유량은 각각 50, 60, 70, 80, 90, 100 sl/m 으로 변화 시켰다.

각 조건에 대해서 회박조건인 연료유량을 흘러 보내면서 화염을 형성시키면 V 형태의 화염이

Table 1 Experimental conditions.

Air flow rate (sl/m)	Heat flux (W/cm)	Cylinder OD (mm)
50 ~ 100	0 ~ 7.5	2.3, 4.0

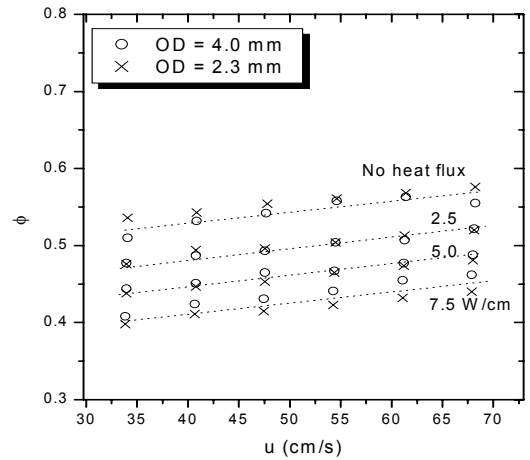


Fig. 3 Flame stability limit decreases with the increase of the heat flux and increases with the mixture velocity.

형성된다. 여기에 연료유량을 점점 감소시키면 화염면의 강도가 약해지면서 실린더 표면의 온도도 감소한다. 연료유량을 계속 줄이면 화염이 작아지고 불안정하게 떨리게 되며 마침내 화염이 꺼지게 된다. 이때 화염이 꺼지기 직전의 연료유량과 온도를 측정하였다. 연료유량의 항상 정상상태가 되도록 충분한 시간을 두며 조절하였다. Table 1은 모든 실험의 조건을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열유속변화와 보염한계의 변화

Figure 3은 실험결과를 출구속도와 당량비로 나타낸 것이다. 이때 유량은 0 °C, 1 atm의 기준으로 제어했기 때문에 상온에서 실험한 본 실험에서 유속으로 환산하기 위해서는 온도와 압력을 보정해야 하지만 불확실성이 비교적 큰 실험이기 때문에 온도만 22 °C로 보정하고 압력은 무시하여 속도로 환산하였다. 공기 유량을 10 sl/m 씩 증가 시키면서 실험하였는데 출구 속도를 6 개의 그룹으로 분류하였다.

열유속이 없는 경우에는 보염기가 있더라도 보염한계는 표준상태에서 프로판/공기 혼합기의 가연한계인 당량비 0.51 이하로⁽⁴⁾ 유지되지 못했으며, 유동속도가 빨라지면 보염한계가 증가하는 경향으로 나타났다. 열유속이 없는 경우에 비하여 열유속이 주어지면 보염한계는 당량비 0.4 근

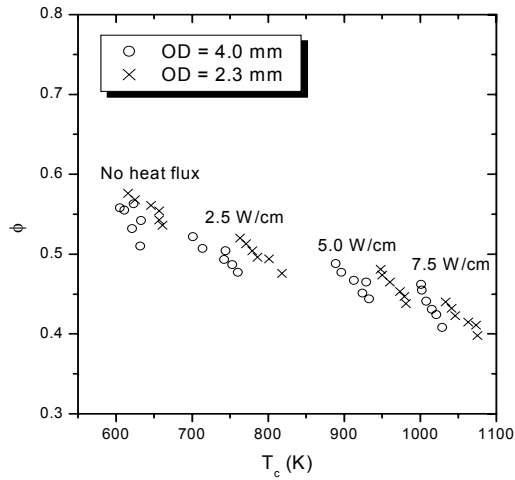
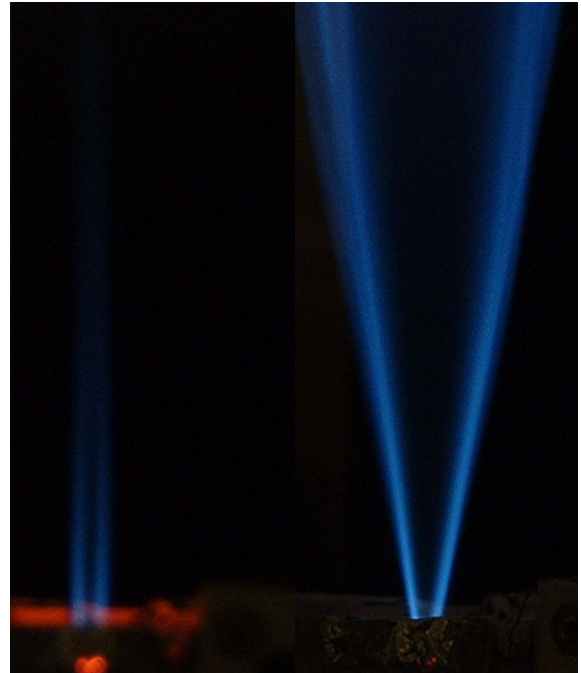


Fig. 4 Measured surface temperature of heated cylindrical rods under the flame stability limit conditions.

처까지 낮춰줄 수 있었으며 실린더의 지름에는 크게 영향을 받지 않았다. 단지 외경이 더 작은 실린더의 경우에 열유속에 더 민감한 경향을 보였는데, 이는 본 실험에서 열유속을 단위길이 당 열 방출율로 정의하였기 때문에 같은 열유속 조건이라면 표면적이 작은 실린더에서 표면 온도가 더 높기 때문이라고 생각된다. Fig. 4는 실린더 표면 온도와 보염한계의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 외경이 작은 실린더에서 더 높은 온도를 나타내는 것을 알 수 있다. 열유속이 없는 경우에도 실린더의 표면 온도는 상온보다 300 K 정도 높게 나타났는데 이것은 화염으로부터의 열 전달에 의한 것으로 이 경우 열전대로 측정된 온도는 복사온도계로 측정된 값보다 훨씬 작은 값을 보여주었다.

대부분의 실험 영역에서 화염은 실린더에 고정된 V 형태로 존재하다가 당량비가 낮아지면 날아가지만 특별한 몇몇 경우에 대해서는 화염이 실린더 주위에 아주 작게 형성되어 혼합기의 일부만이 반응하는 경우가 있다. Fig. 5에서 (a)는 특이한 경우의 모습이고, (b)의 화염은 일반적인 V-flame이다. Fig. 5 (a)의 경우는 가연한계보다 낮은 조건으로서 고온의 실린더 주위에만 화염이 형성되었는데, 이것은 고온의 실린더로부터 열 공급을 받는 국부적인 위치에서만 화염이 형성되고 그 이외의 지역에서는 화염이 형성되지 못하는 것으로 이해할 수 있다. Fig. 5 (b)의 경우는



(a) (b)

Fig. 5 Typical flame structures under the flame stability limit conditions for (a) high surface temperature and (b) low surface temperature.

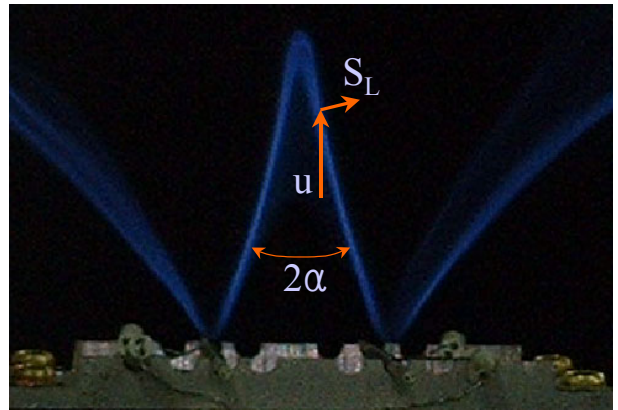


Fig. 6 Measurement of laminar flame speed from a tent-shaped flame.

가연한계 근처에서 실린더에 의한 약간의 보염 효과로도 화염이 잘 형성되었다.

3.2 희박혼합기의 화염 전파속도

초희박 조건에서는 화염전파 속도는 두 개의 보염기가 평행하게 장착된 상태에서 측정되었다. Fig. 6은 두 개의 보염기에 형성된 2D의 삼각형

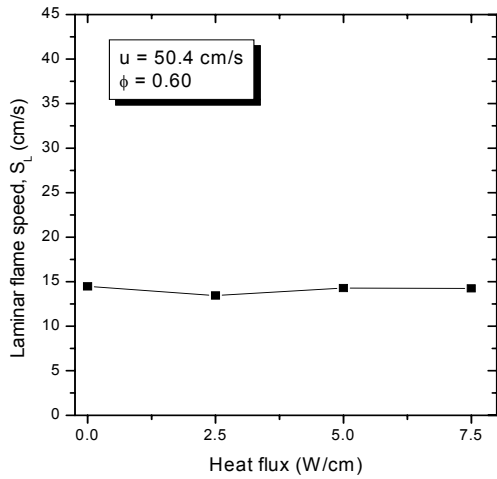


Fig. 7 Change of laminar flame speed with the increase heat flux.(for 1 rod)

모양 화염(tent-shaped flame)과 화염전파 속도를 측정할 큰 앵글 방법을 보여주고 있다.

화염전파속도는 혼합기의 초기 온도에 영향을 받으므로 우선 보염기의 온도에 의해서 화염전파속도가 영향을 받는지에 대해서 알아보았다. Fig. 7은 보염기를 통하여 공급된 열량과 측정된 화염전파속도의 관계를 나타내는데 공급된 열 에너지는 화염전파속도에 영향을 주지 못한 것으로 나타났다. 이것은 공급된 열량이 혼합기 전체에

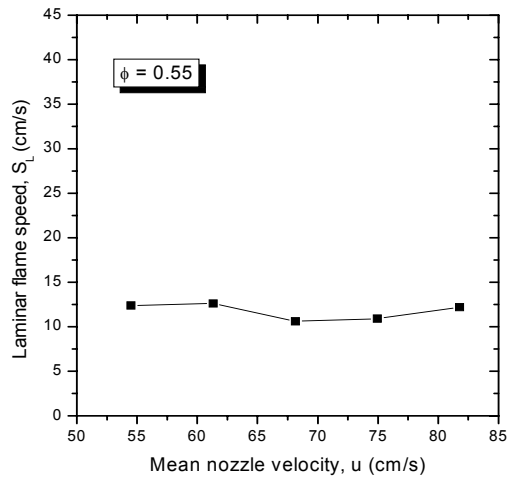


Fig. 8 Measured laminar flame speed for various nozzle velocities.

영향을 주지 못하고, 국부적으로만 화염을 고정시키는 역할을 하기 때문에 전체 화염의 모양에는 변화를 주지 못하는 것으로 생각된다.

유속의 변화가 보염기 주위의 유동장 특성을 크게 변화시켜서 큰 앵글 방법을 적용할 수 없는 정도로 속도성분에 변화를 미친다면 화염전파속도의 측정은 의미가 없게 된다. Fig. 8은 일정한 조건에서 유속을 변화시키면서 화염전파속도를 측정할 결과인데 유속의 변화는 화염 전파속

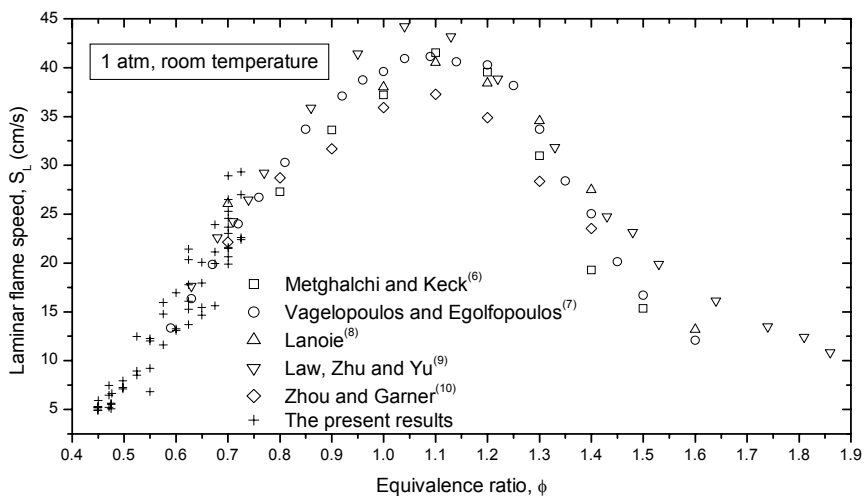


Fig. 9 Comparison of laminar flame speed measured by different methods.

도에 민감한 인자가 아닌 것으로 나타났다.

Figure 9는 측정된 프로판/공기 예혼합화염의 화염전파속도를 다른 방법으로 측정된 기존의 결과와 함께 보여주고 있다.⁽⁶⁻¹⁰⁾ 기존의 데이터는 대부분 당량비 0.7 이상의 조건에서 측정되었으며, 본 실험 결과와 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 특히 본 연구에서 사용된 방법으로는 당량비 0.45 까지 화염전파속도를 측정할 수 있었으며 측정결과는 초회박 연소현상을 이해하고 예측하는 데 도움이 되리라 기대된다.

4. 결 론

가열된 실린더를 이용하여 희박화염을 안정화시키는 보염한계를 측정하였다. 이때 보염한계는 실린더의 크기나 열 방출량보다 표면 온도에 더 민감하였다. 그러나 실린더의 표면 온도는 열유속에 의해서 유지될 수 있으므로 실질적으로는 열유속의 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

보염한계 조건에서 고정된 화염의 모양은 실린더 표면온도 1000 K 부근에서 크게 달라지는데, 1000 K 이상의 범위에서는 실린더 주위에 국부적으로 화염이 형성되더라도 당량비가 너무 낮으면 인접지역으로 화염이 전파되지 못해서 전체적으로 화염이 형성되지 못하고 실린더 주위의 와류 발생 지역에만 화염이 형성된다. 그러나 1000 K 미만 지역에서는 전체적으로 화염이 형성되어 V 모양이 유지되거나 당량비가 너무 낮으면 화염이 꺼졌고 국부적으로 형성되지는 않았다.

가열된 실린더를 사용할 경우 매우 낮은 당량비의 조건에서도 화염면의 모양이 양호하게 유지되었다. 두 개의 가열된 실린더를 이용하여 초회박 영역에서 화염전파속도를 측정할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Lee, J. G., Lee, T.-W., Nye, D. A. and Santavicca, D. A., 1995, "Lewis Number Effects on Premixed Flames Interacting with Turbulent Karman Vortex Streets," *Comubst. Flame*, 100, pp. 161-168.
- (2) Samaniego, J.-M. and Mantel, T. 1999, "Fundamental Mechanisms in Premixed Turbulent Flame Propagation via Flame-Vortex Interactions

Part I: experiment," *Comubst. Flame*, 108, pp. 537-556.

- (3) Seo Dong-Kyu, 2003, "The Structure and stability of Methane Rich-Lean Premixed Flames on a Slot Burner," *MS Thesis, Dankook University*
- (4) Turns, S. R., 2000, "An Introduction to Combustion: Concepts and Applications," 2nd ed., *McGraw-Hill*, p.281.
- (5) Gaydon, A. G. and Wolfhard, H. G., 1979, "Flames-Their structure, radiation and temperature," 4th Ed., *Chapman and Hall*, London, p.58-91.
- (6) Metghalchi, M. and Keck, J. C., 1980, "Laminar Burning Velocity of Propane-Air Mixture at High Temperature and Pressure," *Comubst. Flame*, 38, pp. 143-154.
- (7) Vagelopoulos, C. M. and Egolfopoulos, F. N. 1994, "Further Considerations on the Determination of Laminar Flame Speeds with the Counterflow Twin-Flame Technique," *Twenty-Fifth Symposium (International) on Combustion*, pp. 1341-1347.
- (8) Lanoie, G. A., February 1978, Paper 780229, presented at SAE Congress, Detroit
- (9) Law, C. K., Zhu, D. L. and Yu, G., 1986, "Propagation and Extinction of Stretched Premixed Flames," *Twenty-First Symposium (International) on Combustion*, pp. 1419-1426.
- (10) Zhou, M. and Garner, C. P., 1996, "Direct Measurements of Burning Velocity of Propane-Air Using Particle Image Velocimetry," *Comubst. Flame*, 106, pp. 363-367.