

Suction과 blow fan을 이용한 연소기내의 부분 예혼합화염 연소 특성에 관한 실험적 연구

강기발* · 김동일** · 오상현***

Experimental Investigation on Premixed Combustion Characteristics with Suction & Blow Fans

Ki Bal Kang*, Dong Il Kim**, Sang Heun Oh***

Abstract

We measured emission indices for NO_x , CO, temperature and radical characteristics for partially premixed flames formed by suction & blow fans air condition. At sufficiently high levels of partial premixing a double flame structure consisting of a rich premixed inner flame and outer diffusion flame was established similar to that previously observed in premixed flames. NO_x , Temperature, CO concentration were experimented with approximately constant air flow rate and decreasing equivalence ratios. The reduction in NO_x and temperature at suction condition as compared with that for blow condition was approximately 20%, but on the contrary, CO emission was increased. In addition, We measured temperature distributions and found that temperature increased continuously with increasing partial premixing. We also estimated CH, C_2 radical intensity. CH and C_2 radicals provide evidence that, for the present measurement, CH and C_2 radicals intensity was associated with their premixed component. And we observed stronger C_2 , CH radicals intensity at suction conditions than blow conditions.

Key Words: Premixed flame, Pressure, Turbulent diffusion flame, Radical

1. 서론

최근 에너지 소비의 급격한 증대와 이에 따른 공해문제는 이미 심각한 사회 문제로 대두되고

있다. 대부분의 공업용버너가 아직 수입에 의존하고 있어 국산화를 위한 개발과 연소특성의 규명이 시급히 이루어져야 한다. 일반적인 연소기에서의 화염 형태는 연소부하를 향상시키기 위해서 난류화염이 널리 이용되어 왔다. 그러나 이 화염은 시간 평균적으로는 정지된 형상이나 연소반응이 난류 유동장에서 진행되므로 높은

* 부산대학교 기계공학과 대학원

** 부산대학교 기계공학과

*** 부산대학교 기계기술연구소

시간 분해능을 가진 장치를 이용하여 관찰하면 매우 불규칙한 형상이 반복되는 복잡한 형태를 가진다. 여기서 연소의 고부하화를 실현하기 위해서는 연료와 공기의 혼합을 제어해서 고속난류중에 화염을 안정화 시키는 것이 필요하다. 이를 위해서 연소 연구자들은 연료의 종류와 공급 방법을 적절히 조화함과 동시에 화염의 안정성을 기하기 위해서 스텝, Bluff-body 등의 후류에서 형성된 순환류, 파이롯트 화염 등을 이용하였다. 그러나 연소시의 화학적 과정과 물리적 과정은 비정상적이기 때문에 공업적으로 실용가능한 연소기의 연구 개발은 현재까지도 경험에 의존하고 있다.

고효율 저공해 연소기의 개발을 위해 여러 가지 많은 연구들이 수행되었지만, 연소기내의 석션 & 블로우 패턴에 따른 연소특성에 관한 연구는 흔치 않다. 본 연구에서는 연소실내의 동일 유량에 대한 석션 & 블로우팬을 이용하여 상반 되는 공기의 흐름을 형성후, 석션 & 블로우 정도에 따른 연소실내의 \pm 압력 조건에서의 부분 예혼합 화염의 연소특성을 관찰하였다. 실험에서는 연료량에 따라 연소실내의 동일 유량에 대한 흡입 및 주입 조건을 변화하여 화염의 길이 측정, 직접 사진을 통한 화염의 가시화, 평균 온도분포를 측정 및 연소배출가스의 측정을

통해 연소실내의 조건이 부분 예혼합 화염의 연소특성에 어떤 영향을 미치는지 관찰하였다.

본 실험에서는 석션 & 블로우 팬에 의해 형성되어진 유동 패턴이 연소기 설계시의 화염의 연소 특성 및 유동특성에 어떤 영향을 미치며 배출가스의 변화에 대한 결과를 도출하여 최적의 연소조건을 찾아내고, 또 이를 발전시켜 고효율 저공해 연소기의 개발에 기여하는데 그 목적이 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

본 실험에 사용된 실험 장치도는 Fig.1, 2에 나타내었다. 블로어를 통하여 발생된 공기는 저장소를 거쳐 연소실내의 압력 조건을 형성하기 위한 2차공기와 화염 형성을 위한 부분 예혼합 공기 두 가지에 공급된다. 연소실로 공급되어지게 되는 2차공기는 충류유량계(LFE-50B)를 통과하여 챔버내에 공급된다. 연소실 내에서 연소가 완료되어진 연소 가스는 쿨러를 통하여 냉각되어진후 석션팬을 거친 뒤 밖으로 배출되어진다. Fig. 2의 예혼합 공기는 오리피스를 거쳐 챔버내의 예혼합 관으로 들어가게 되는데 연소실내의 상하단부 양측에 설치된 공급 관을 통하여 예혼합 관으로 들어가게 된다. 예혼합 공기는 오리피스를 통하여 공기량을 측정하게 되며, 예혼합 공기 유량 측정에 사용된 오리피스는 충류유량계를 이용하여 유량검증을 실시하였다.

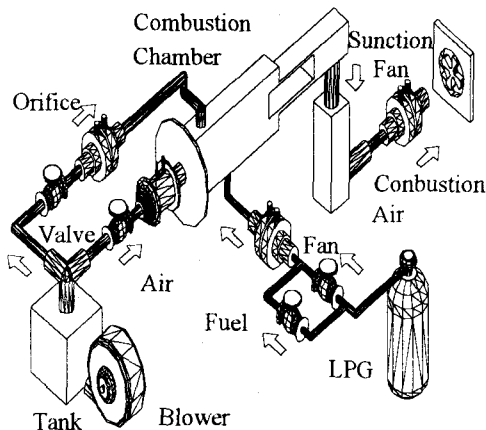


Fig. 1 Experimental apparatus

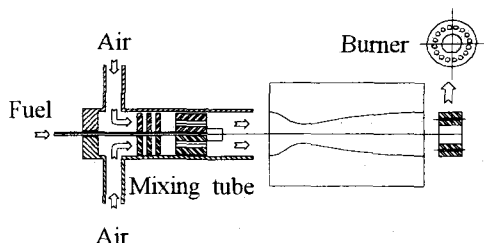


Fig. 2 Mixing tube and burner shape

본 실험에서의 연료는 LPG를 사용하였으며 부분 예혼합관내에서 예혼합공기와 혼합 되게 된다. 부분 예혼합관내에는 하니콤폴을 설치하여 예혼합 연료+공기를 안정한 상태를 유지하도록 하였다.

2.2. 실험 방법

노즐 주위로의 공기 유입에 따른 화염의 블로우 오프 한계를 측정하기 위하여 각각의 연료량에 대한 예혼합 공기량을 조절하였다. 당량비 감소시 희박연소에서 부상하여 화염이 소멸될 때까지의 최대 공기량을 측정하여 예혼합 화염에 있어서의 화염 안정 범위와 최대 희박 당량비 값을 조사 하였다. 화염 내부의 온도를 측정하기 위하여 삽입되는 열전대는 세라믹으로 제작되어 단열처리되어진 튜브를 통과하여 화염내의 온도를 측정하게 되며 실험시의 열전대는 Pt/Pt-Rh 13%의 R형 열전대를 사용하였다. 가스 분석시 사용되어진 프로브는 화염내의 가스 성분 농도를 측정하기 위해 사용되어진 수냉식 스테인레스 샘플링 프로브를 사용하였으며 프로브의 과열을 막기 위해 샘플링 튜브 외측에 수냉식 2중관을 설치하였다. 샘플링되어진 가스중에는 Soot, 수분이 함께 존재하고 있다.

따라서 이러한 것들을 와이어거즈, 솜유리를 통하여 일차적으로 제거하고 필터를 통하여 순차적으로 제거후 가스분석기로 보내어 지도록 하였다. 본 실험에서 국소 측정된 NO는 화학발광법으로 분석하는 Nova Model 312B를 사용하였으며 연소가스중의 CO와 CO₂ 및 NO_x는 COSA 6000에 의하여 측정되었다. 화염 유동장의 가시화를 위하여 슈리렌 및 ICCD 카메라, 직접 사진을 촬영하였으며 직접 사진의 경우, NIKON 카메라를 이용하였다. 고감도 SUPER HG 400 필름을 사용하였고, 카메라의 셔터속도는 1/125sec로 촬영하였으며 슈리렌 촬영시에는 노출 시간을 1/4000sec로 하였다. 화염 길

이 측정은 캠코더를 이용하여 컴퓨터로 이미지 시킨 30장의 정지화면에 대해 평균값을 취하였다. 실험 장치의 개략적인 모습은 Fig.1 과 같으며 실험 조건은 Table 1 의 조건에서 실험하였다.

Table 1. Experimental conditions

Equivalence ratio, Φ	Air condition	Gage pressure (KPa)	Air flow rate(lpm)
1.1~ ∞	Blow	4.5	140
	Blow + Suction	2.0	
		0	
	Suction	-2.0	
	Suction	-4.5	

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 가연 한계 측정

Fig. 3은 부분 예혼합 공기량의 증가에 따른 화염의 블로우 오프 한계 및 안정 영역을 나타낸 것이다. 고정된 각각의 연료 유량(1.5, 1.7, 1.9 lpm)에 대하여 부분 예혼합 공기량의 증가시에 화염이 소실되는 시점의 최대 공급 예혼합 공기량을 블로우 오프 한계라 하며, 그 이전의 영역을 화염 안정영역으로 하였다. 부분 예혼합 화염에서 연료량이 증가함에 따라서 점차적으로 화염 안정 영역이 늘어나고 있음을 볼 수 있으며, 석션조건으로 이동함에 따라서 블로우 오프되는 부분예혼합 공기량이 줄어들며 점차적으로 화염 안정화 영역이 축소되는 것을 볼 수 있다.

3.2. 화염의 가시화

Fig. 4는 연료량 1.5lpm 부분 예혼합화염의 각각의 조건에 따른 동일한 당량비(Φ :1.1)에서의 직접 사진(수평화염을 90° 회전하여 나타내었음)을 나타낸다. 사진에서의 화염은 이중 구조 예혼합화염을 형성하고 있다. 화염 내측의 예열대에서 화염은 밝은 색상의 청색화염 영역을 나타내며 외측의 비예혼합대에서는 어두운

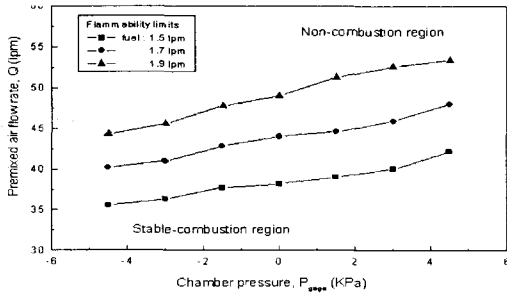


Fig. 3 Distribution of lean flammability limits

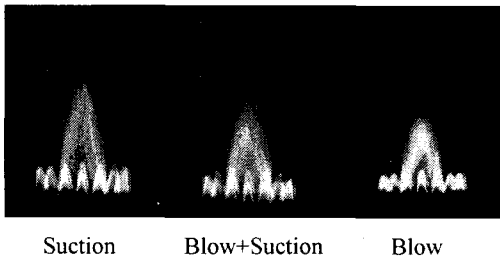


Fig. 4 Direct photographs of 1.5lpm fuel flow rate at $\phi = 1.1$

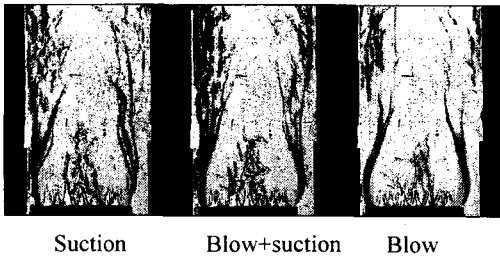


Fig. 5 Schlieren photographs of 1.5lpm fuel flow rate at $\phi = 1.1$

빛의 청염 영역을 나타낸다. 노즐 보염기에서 분사되어진 미연 예혼합 가스는 화염대로 확산하게 되고 그 결과 전체적인 2중화염 구조를 나타나게 되었다. 사진에서 화염의 크기는 석션 조건에서 블로우 조건에 비해 상대적으로 화염 크기가 신장되어진 것을 볼 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 연소 조건에서의 슈리렌 촬영사진을 나타낸다. 예혼합화염의 직접 사진과 동일한 이중 화염 구조가 나타나는

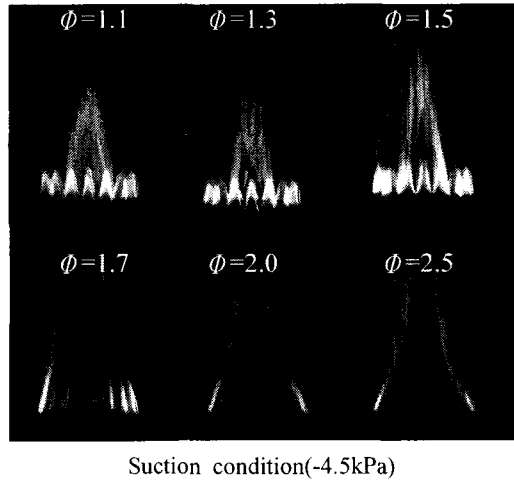


Fig. 6 Direct Photographs of 1.5lpm fuel flow rate

것을 확인할 수 있으며 중앙부에서 예혼합 화염과 외측의 확산화염이 나타나는 것이 뚜렷이 나타난다. 슈리렌 사진에서 석션 조건의 경우 전체적인 화염장이 블로우 조건에 비해 연소 덕트 내에서 폭넓게 확장되어 있는 것을 확인할 수 있으며, 내측의 예혼합 화염 또한 축방향 신장이 일어났음을 볼 수 있다.

Fig. 6은 석션 조건에서의 당량비 변화에 대한 화염의 직접사진을 나타낸다. 당량비가 증가함에 따라 예혼합 화염은 상단 부에서부터 열리기 시작하여 과농상태에서는 화염형상이 양측면에만 존재하는, 확산 화염과 유사한 형태를 나타낸다. 당량비 변화에 대한 화염의 형상의 변화는 블로우 & 석션에서 동일하며 석션에서 블로우에 비해 전체적인 화염의 길이방향 신장이 일어났음을 볼 수 있다.

Fig. 7은 당량비 변화에 따른 화염길이를 나타낸다. 당량비 증가에 따라 화염 길이는 증가되는 경향이 나타나고 있으며, 과농상태에서의 화염길이차가 희박 연소 조건에서의 화염 길이차에 비해 크게 나타나고 있으며 동일한 당량비에 대해 석션과 블로우 조건의 화염 길이는 최대 30% 정도 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

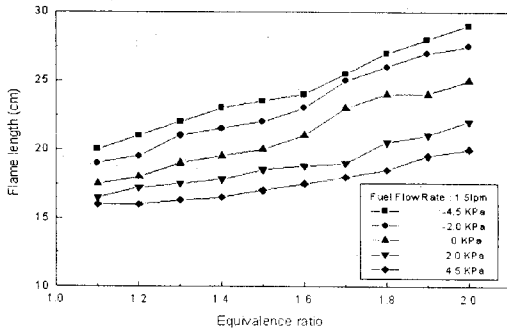


Fig. 7 Flame Length at fuel 1.5lpm

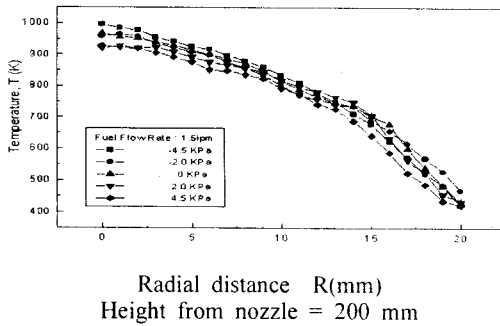
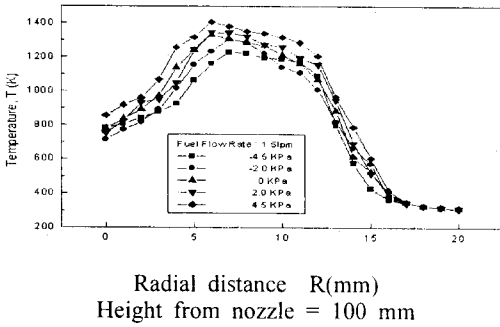
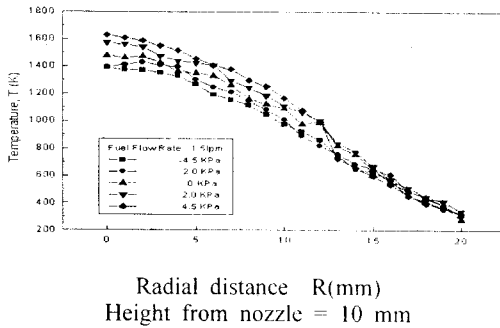


Fig. 8 Distributions of Temperature

3.2. 온도 및 배기가스 측정

Fig. 8은 각 압력 조건에서 동일한 당량비 ($\phi = 1.5$)에서의 온도 분포를 나타낸다. 노즐 선단 부위에서의 온도 분포는 노즐 중앙부위에서 증가 후 반경거리 7mm에서 최고 온도를 나타낸 후 감소하는 경향을 나타내며, 화염 후류부에서는 반경거리가 0mm인 중앙지점에서부터 거리가 멀어짐에 따라 감소되는 경향이 나타낸다. 블로우 조건으로 이동시 노즐 선단 부위에서는 전체적인 화염 온도는 석선에 비해 증가한다. 반면 화염 후류부에서의 화염 온도는 석선에 비해 감소하게되는 상반되는 온도 분포 경향이 나타난다.

블로우의 경우 좁은 화염폭의 결과로 고온 영역이 좁게 나타나며 저압일 경우, 화염 신장으로 인해 노즐 선단부에서의 온도 감소 및 화염 후류부의 화염 확장현상으로 전체적인 온도장이 균일하게 나타난다.

Fig. 9는 수냉식 가스 샘플링 프로브를 이용하여 NO_x 의 95%를 차지하는 NO를 NO_x 분석기(Nova Model 312B)로 측정된 결과이다. 노즐 선단 부위에서는 온도의 최고점이 나타나는 위치와 비슷한 위치에서 최대 NO 지점을 나타내고 있으며 화염 후류부에서 또한 온도측정의 결과와 유사한 경향을 나타내고 있다. NO의 실험 결과에서 블로우 조건으로 이동시 노즐 선단에서는 NO 값이 증가하고 있는 것을 관찰할 수 있으며 증가와 감소의 경향 또한 온도 측정의 결과와 동일하다. 화염 후류부에서는 노즐 선단 부위와는 상반되게, 블로우 조건으로 이동시 NO값이 줄어드는 것을 볼 수 있는데, 화염 장의 확장으로 인해 석선에서의 온도가 화염 후류부에서 블로우에 비해 높았기 때문이다. 위의 실험 결과로 볼 때 본 실험에서의 전체적인 NO의 생성은 온도와 강한 상관 관계가 있을 것으로 생각된다.

Fig. 10, 11은 부분 예혼합관으로 유입되는

예혼합 공기량의 조절을 통해 당량비를 2.5에서 화염의 blow-off량인 1.0까지의 변화를 주어서 연소 배기가스 CO, NO_x의 농도를 측정된 결과이다.

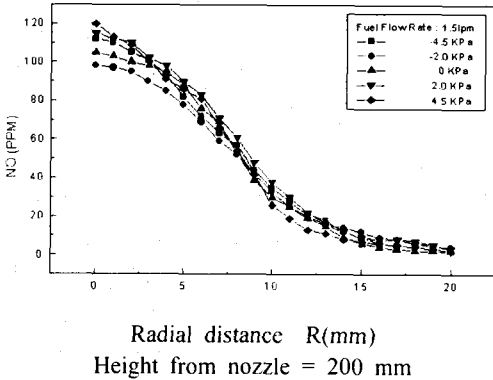
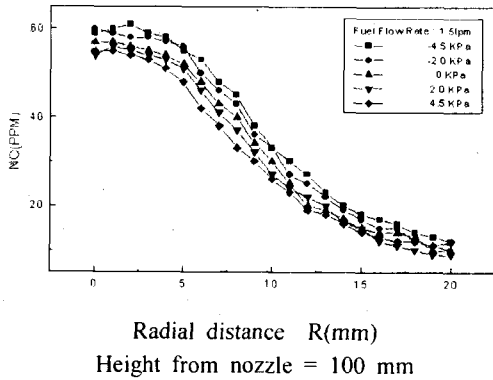
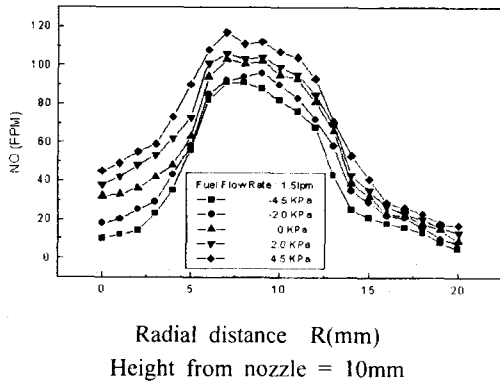


Fig. 9 Distributions of NO Concentration

Fig. 10은 4.5, 0, -4.5 KPa 석션, 블로우 각각의 조건에서 당량비 변화에 대한 CO의 농도분포 그래프이다. CO의 경우 당량비가 감소함에 따라 배출량이 감소되는 것을 볼 수 있는데 이는 당량비 감소시 예혼합 공기량의 증가로 인해 연료와 공기의 혼합 증가가 발생하였기 때문이다. 블로우 조건으로 이동시 CO의 생성이 줄어드는 것을 확인할 수 있는데 이는 블로우 조건에서 화염 길이가 축소함으로써 전체적인 화염장의 크기가 감소하였기 때문이다.

Fig. 11은 블로우, 석션 조건에서 각각의 연료량 및 당량비 변화에 대한 NO_x의 농도분포 그래프이다. 블로우 조건으로 이동시 NO_x의 전체적인 배출 가스 양은 증가하는 경향을 나타낸다.

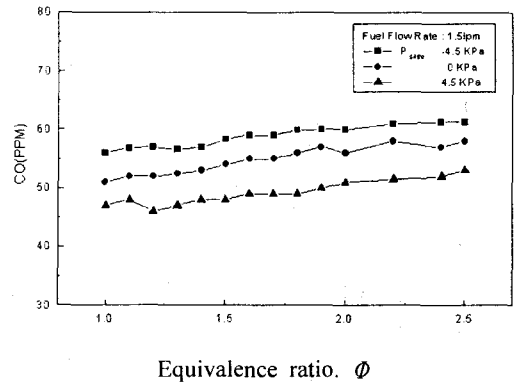


Fig. 10 Distributions of CO emission

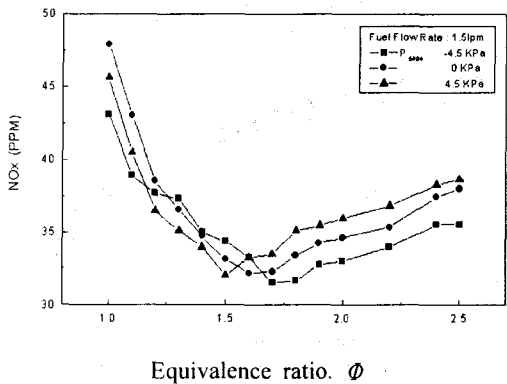


Fig. 11 Distributions of NO_x emission

국소 NO의 측정 데이터에서 블로우 조건에서 석션 조건에 비해 화염 선단부위에서의 NO의 생성량이 많았던 것이 전체적인 NOx의 배출 가스 량에 큰 영향을 미친 것으로 생각된다. NOx의 경우 특정 당량비(1.5~1.7) 값에서 최저 NOx가 나타나는 것을 볼 수 있다. 블로우 & 석션 조건에 따른 최저 NOx의 지점이 다르게 나타나는 것을 볼 수 있는데 블로우와 석션의 경우 두가지 조건에서의 압력차 및 화염장의 변화로 인해 NOx의 최저지점이 희박연소 조건으로 이동하는데, 이는 압력 변화에 따른 CH 계열 연료에서의 반응성의 차이에 인한 것으로 생각되어진다.

3.3. 라디칼 자발광의 가시화

Fig. 12, 13은 ICCD 카메라를 이용하여 화염의 녹색 발광원인 C₂, 청색 발광원인 CH라디칼 자발광을 나타낸 것이다. 탄화수소화염은 파장 470, 510, 560nm 부근에서 밴드 스펙트럼을 내는 C₂ 라디칼과 파장 390nm와 430nm 부근에 밴드 스펙트럼을 내는 CH라디칼 때문에 화염색이 청색또는 청록색을 띤다고 보고 되었으며, 본 실험에서도 동일한 청염형태의 화염이 나타난다. 일반적인 C₂ 및 CH 라디칼의 자발광 형태는 가시적으로 보이는 화염 직접 사진과 유사하며, 라디칼 자발광 이미지에서도 희박 연소 조건으로 갈수록 이중 화염 구조의 부분 예혼합 화염 형상이 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

희박상태에서 과농상태로 이동시 화염의 상단부위에서부터 차례대로 열려 과농상태에서는 라디칼 자발광이 화염의 양 측면에서 강하게 나타나고 있는 것을 확인 할 수 있다. CH 라디칼의 경우 연료 희박 조건에서 C₂ 라디칼에 비해 상대적으로 강한 라디칼 반응을 나타내며 과농 조건으로 이동시 C₂ 라디칼은 화염선단부위에서 강하게 나타나던 자발광 강도가 점차적으로 화염면 전체에서 강해지는 것을 볼 수 있다. 석

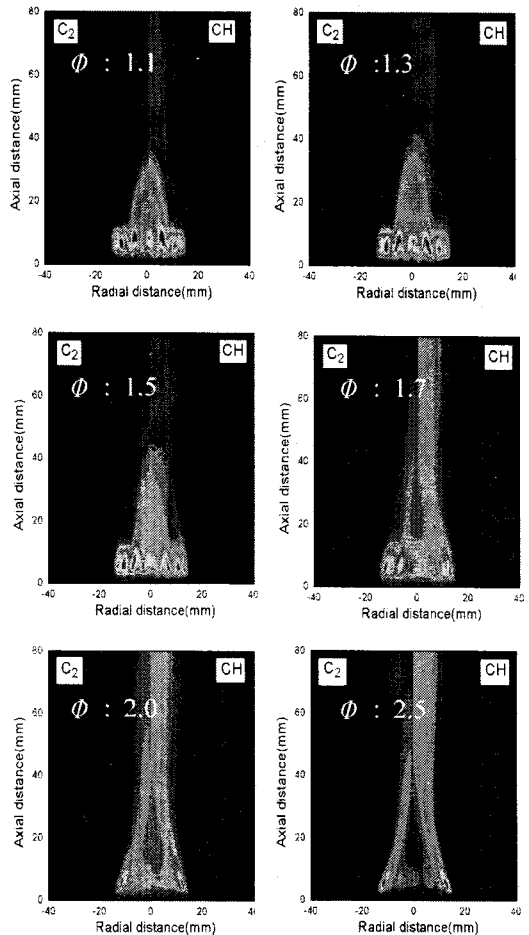


Fig. 12 Image of C₂, CH radical luminous intensity at blow & suction conditions (P_{gage} : 0 kpa)

션조건에서 나타나는 C₂, CH 라디칼의 자발광 강도가 블로우 조건일 때보다 강하게 나타나고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 챔버내의 블로우 & 석션의 상반되는 유동 특성에서 부분 예혼합 화염의 연소 특성에 관하여 비교 연구 하였다. 이를 위하여 화염에서의 화염 길이 측정, 화염의 평균 온도 측정 및 화염의 가시화, NO_x분석기로 NO성분

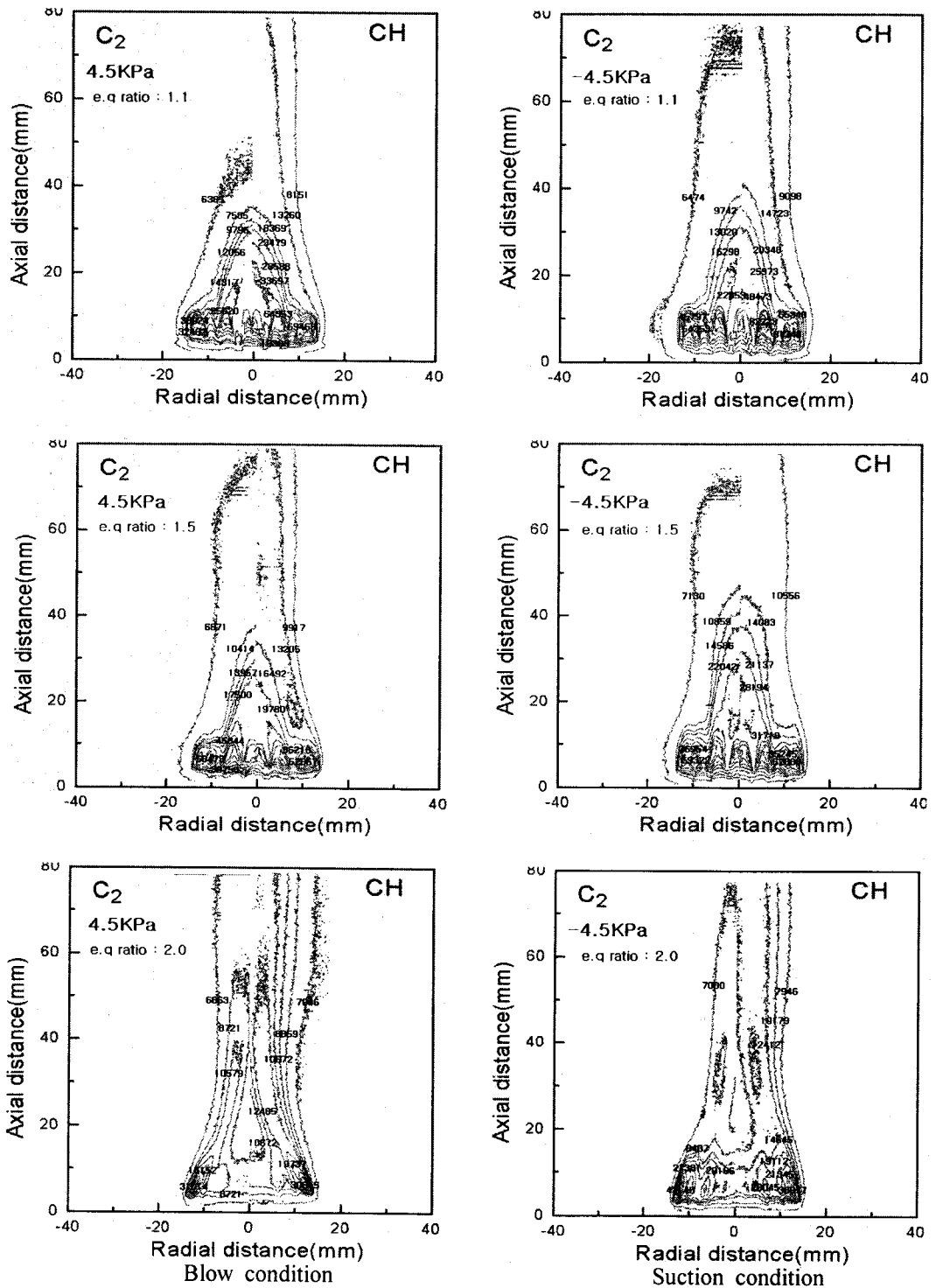


Fig. 13 C₂, CH radical luminous intensity at blow & suction conditions

측정 등을 이용하여 화염의 연소 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 블로우 & 석션 조건에서 석션 조건으로 이동시 화염 확장 현상이 나타났으며, 블로우 조건에서 전체적인 화염 온도 및 국소 NO는 상승하였고, 온도 실험치와 국소 NO 실험치는 동일한 경향을 나타낸 것으로 보아 본 실험에서의 NO생성은 온도와 강한 상관관계가 있다고 생각된다.

배기 연소 가스 측정에서 블로우 조건으로 이동시 최저 NO_x지점은 희박 연소 조건으로 이동되고 있다. CO의 경우 희박 연소조건으로 이동시 연료 공기간 혼합 증가로 인해 배출량이 줄어드는 경향이 나타난다. 라디칼 자발광 특성은 C₂의 경우 저당량비에서 고당량비로 이동시 노즐 선단부위에서 화염장 전체로의 자발광 확장 현상을 볼 수 있었으며, 석션 상태에서 C₂, CH의 강한 라디칼 자발광 강도가 나타나고 있다.

참 고 문 헌

1. Blevins, L. G., and Renfro, M. W., "Experimental Study of Temperature and CH Radical Location in Partially Premixed CH₄/Air Coflow Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 118, pp. 684-696.
2. Thomsen, D. D., Kuligowski, F. F., and Laurendeau, N. M., "Modeling of NO Formation in Premixed, High Pressure Methane Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 119, pp. 307-318.
3. Liakos, H. H., Founti, M. A., Markatos, N. C., "The Relative Importance of Combustion Mechanisms in Industrial Premixed Flames under High Pressure," *Thermal Engineering*, Vol. 20, pp. 925-940.
4. Peters, N., "Laminar Flamelet Concepts in Turbulent Combustion," *Twenty First Symposium(International) on Combustion*, pp. 1231.
5. Lee, T. W., Mitrovic, A., and Wang, T., "Temperature, Velocity, and NO_x / CO Emission Measurements in Turbulent Flames: Effects of Partial Premixing with Central Fuel Injection," *Combustion and Flame*, Vol. 121, pp. 378-385.
6. Reisel, J. R., and Laurendeau, N. M., "Quantitative LIF Measurements and Modeling of Nitric Oxide in High Pressure C₂H₄/O₂/N₂ Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 101, pp. 141-152.