

송풍기와 폐풍기를 이용한 연소기내의 부분 예혼합화염 연소 특성에 관한 실험적 연구

강기발* · 오상헌**

Experimental Investigation on premixed combustion Characteristics with suction & blow fans

B. K. Kang*, S. H. Oh**

Key Words: Premixed Flame(예혼합화염), Pressure(압력), Turbulent diffusion flame(난류확산화염). Radical(라디칼)

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 values 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, C₂ radical intensity. CH and C₂ radicals provide evidence that, for the present measurement, CH and C₂ radicals intensity was associated with their premixed component. And we observed stronger C₂, CH radicals intensity at suction conditions than blow conditions.

1. 서 론

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 난류화

염이 널리 이용되어 왔다. 그러나 이 화염은 시간 평균적으로는 정지된 형상이나 연소반응이 난류 유동장에서 진행되므로 높은 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 현재

* 부산대학교 대학원 기계공학과

** 부산대학교 기계공학과

까지도 경험에 의존하고 있다.

고효율 저공해 연소기의 개발을 위해 여러 가지 많은 연구들이 수행되었지만, 연소기내의 흡입과 주입 공기 조건에 따른 연소특성에 관한 연구는 흔치 않다. 본 연구에서는 연소실내의 동일 유량에 대한 흡입&주입을 통한 챔버내의 ± 압력 형성시, 이때의 예혼합 화염의 연소특성 규명이 목적이다. 이를 위해 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 연구는 실험을 통해 최적의 연소조건을 찾아내고, 또 이를 발전시켜 고효율 저공해 연소기의 개발에 기여하는데 그 목적이 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

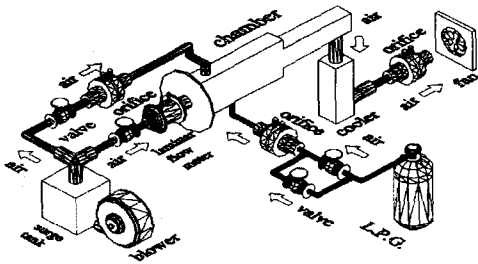


Fig.1 Experimental apparatus

본 실험에 사용된 실험장치도는 Fig.1에 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 층류유량계(LFE-50B)를 통과하여 챔버내에 공급된다. 연소실 내에서 연소가 완료되어진 연소가스는 쿨러를 통하여 흡입 펌프를 거친 뒤 밖으로 배출되어진다. 예혼합 공기는 오리피스를 거쳐 챔버내의 예혼합 관으로 들어가게 되는데 연소실

내의 상하단부 양측에 설치된 공급 관을 통하여 예혼합 관으로 들어가게 된다. 예혼합 공기는 오리피스를 통하여 공기량을 측정하게 되며 이때 유량 측정에 사용된 오리피스는 층류유량계를 이용하여 유량검증을 실시하였다. 본실험에서의 연료는 LPG를 사용하였으며 부분 예혼합관에서 예혼합공기와 혼합 되게 된다. 부분 예혼합관내에는 하나꼴을 설치하여 예혼합 연료+공기를 안정한 상태를 유지하도록 하였다.

2.2. 실험 방법

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 가스성분 농도를 측정하기 위해 사용되어진 수냉식 스테인레스 샘플링 프로브를 사용하였으며 프로브의 과열을 막기 위해 샘플링 튜브 외측에 수냉식 2중관을 설치하였다. 샘플링되어진 가스중에는 Soot, 수분, 그리고 다 타지 않은 액적들이 함께 존재하고 있다. 따라서 이러한 것들을 와이어거즈, 솜유리를 통하여 일차적으로 제거하고 휠터를 통하여 순차적으로 제거후 가스분석기로 보내어 지도록 하였다. 본 실험에서 국소 측정된 NO는 화학 발광법으로 분석하는 Nova Model 312B를 사용하였으며 연소가스중의 CO와 CO₂ 및 NO_x는 COSA 6000에 의하여 측정되었다. 화염 유동장의 가시화를 위하여 슈리렌 촬영 및 ICCD 카메라, 직접 사진을 이용하였으며 직접 사진의 경우 사용된 카메라는 NIKON 카메라를 이용하였다. 고감도 SUPER HG 400 필름을 사용하였고, 카메라의 셔터속도는 1sec에서 1/500sec에 걸쳐 다양하게 변화시켰을 때 가장 실제 시각과 일치하는 1/125sec로 촬영하였으며 슈리렌 촬영시에는 노출 시간을 1/4000로 하였다. 화염 길이 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 Experiment conditions

Equivalence ratio, Φ	air condition	gage pressure (KPa)	air flow rate(lpm)
1.1~ ∞	blow	4.5	140
	blow +	2.0	
		0	
	suction	-2.0	
		-4.5	

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 화염의 가시화

Fig.2는 연료량 1.5lpm 부분 예혼합 화염의 각각의 조건에 따른 동일한 당량비($\Phi : 1.1$)에서의 직접 사진을 나타낸다. 사진에서의 화염은 이중구조 예혼합 화염을 형성하고 있다. 화염 내측의 예열대에서 화염은 밝은 색상의 청색화염 영역을 나타내며 외측의 비예혼합대에서는 어두운 빛의 청염 영역을 나타낸다. 노즐 보임기에서 분사되어진 미연 예혼합 가스는 화염대로 확산하게 되고 그 결과 전체적인 2중화염 구조를 나타내게 되었다. 사진에서 화염의 크기는 석션 조건에서 블로우 조건에 비해 상대적으로 화염 크기가 신장되어진 것을 볼 수 있다. Fig.3는 Fig.2와 동일한 조건에서의 슈리렌 촬영사진을 나타낸다. 예혼합 화염의 직접 사진과 동일한 경향이 나타나는 것을 확인할 수 있으며 중앙부에서 예혼합 화염과 외측의 확산화염이 나타나는 것이 뚜렷이 나타난다. 석션 조건에서 전체적인 화염장이 블로우 조건에 비해 확산되어 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig.4는 순수 블로우 및 석션 조건에서의 당량비 변화에 대한 화염의 직접사진을 나타낸다. 당량비가 증가함에 따라 예혼합 화염은 상단 부에서부터 열리기 시작하여 과농상태에서는 화염형상이 양측 면에만 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.5는 당량비 변화에 따른 화염길이를 나타낸다. 당량비 증가에 따라 화염 길이는 증가 되는 경향이 나타나고 있으며, 과농 상태에서의 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.



suction blow+suction blow

Fig.2 Direct Photographs of 1.5lpm fuel flow rate at equivalence ratio 1.1



suction blow+suction blow

Fig.3 schlieren Photographs of 1.5lpm fuel flow rate at equivalence ratio 1.1

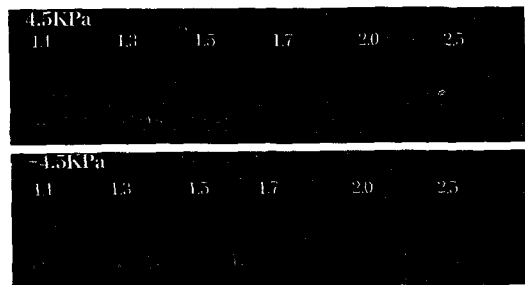


Fig.4 Direct Photographs of 1.5lpm fuel flow rate at blow & suction (pressure 4.5, -4.5KPa)

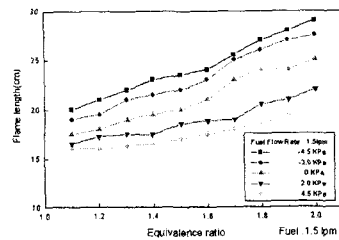


Fig.5 Flame Length for Various e.q. ratios

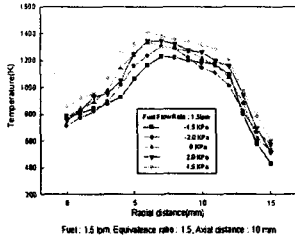


Fig.5(a)

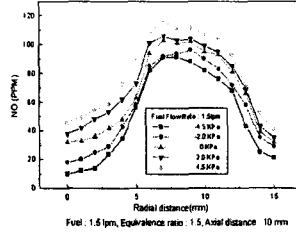


Fig.6(a)

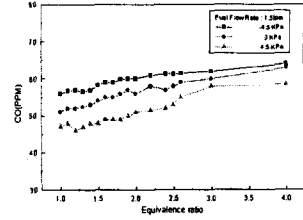


Fig.7(a)

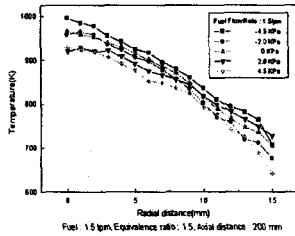


Fig.5(b)

Fig.5 Distributions of Temperature

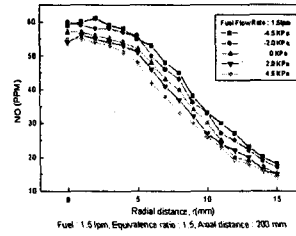


Fig.6(b)

Fig.6 Distributions of NO Concentration

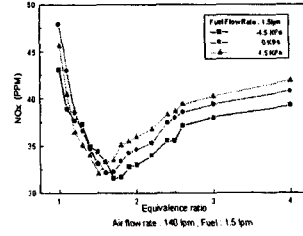


Fig.7(b)

Fig.7 Distributions of CO & NO_x emission

3.2 온도 및 배기가스 측정

Fig.5(a),(b)는 각 압력 조건에서 동일한 당량비(e.q. ratio. 1.5)에서의 온도 분포를 나타낸다. 노즐 선단 부위에서의 온도 분포는 노즐 중앙 부위에서 증가후 반경거리 7 mm에서 최고 온도를 나타낸후 감소하는 경향을 나타내며, 화염 후류부에서는 반경거리가 0 mm인 중앙지점에서부터 거리가 멀어짐에 따라 감소되는 경향이 나타낸다. 블로우 조건으로 이동시 노즐 선단 부위에서는 전체적인 화염 온도는 석선에 비해 증가하지만 화염 후류부에서는 화염 온도는 석선에 비해 감소하는 화염 선단부위와 후류부에서 상반되는 경향이 나타난다. 블로우의 경우 좁은 화염폭의 결과로 고온 영역이 좁게 나타나며 저압일 경우 화염 신장으로 인해 노즐 선단부에서의 온도 감소 및 화염 후류부의 화염 확산현상으로 전체적인 온도장이 균일하게 나타난다.

Fig.6(a),(b)는 수냉식 가스 샘플링 프로브를 이용하여 NO_x의 95%를 차지하는 NO를 NO_x분석기(Nova Model 312B)로 측정된 결과이다. 노즐 선단 부위에서는 온도의 최고점이 나타나는 위치와 비

슷한 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 증가 하고 있는 것을 관찰할수 있으며 증가와 감소의 경향 또한 온도 측정의 결과와 동일하다. 화염 후류부에서는 노즐 선단 부위와는 상반되는 블로우 조건으로 이동시 NO 값이 줄어드는 것을 볼 수 있는데, 화염 장의 확산으로 인해 석선에서의 온도가 화염 후류부에서 블로우에 비해 높았기 때문이다. 위의 실험 결과로 볼 때 본 실험에서의 전체적인 NO의 생성은 온도와 강한 상관 관계가 있을것으로 생각된다.

Fig.7(a),(b)는 부분 예혼합관으로 유입되는 예혼합 공기량의 조절을 통해 당량비를 4.0에서 화염의 blow-off량인 0.9까지의 변화를 주어서 연소 배기가스 CO, NO_x의 농도를 측정 하였다.

Fig.7(a)은 4.5, 0, -4.5 KPa 석선&블로우 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

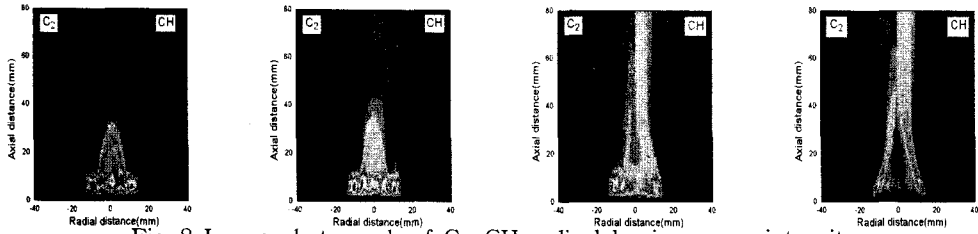


Fig-8 Image photograph of C₂, CH radical luminescence intensity

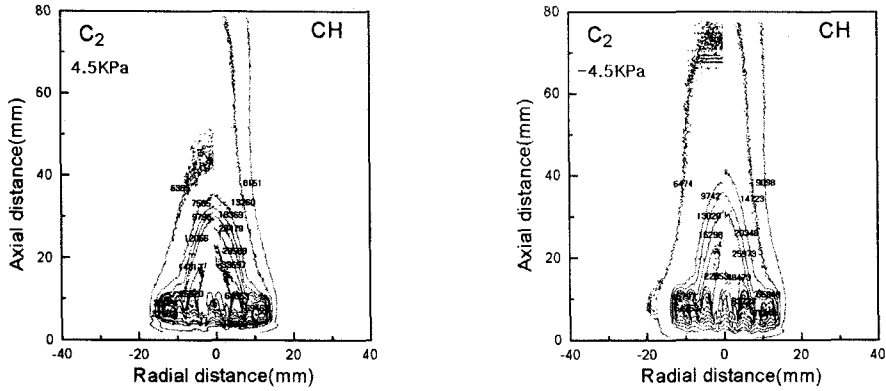


Fig.9(a) Distributions of C₂, CH radical luminescence intensity at e.q. ratio 1.1

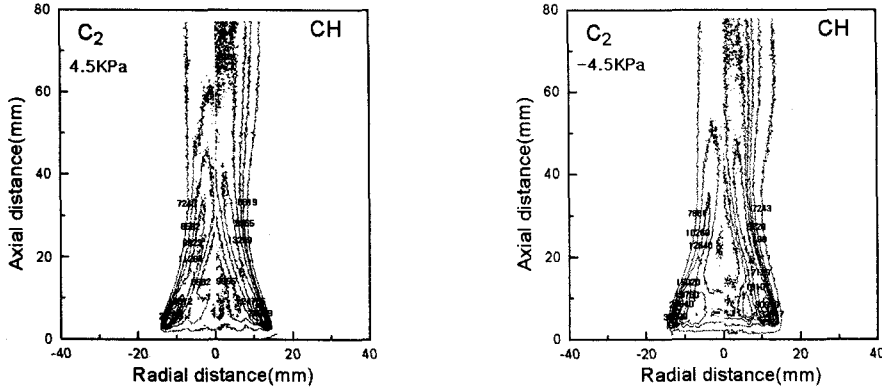


Fig.9(b) Distributions of C₂, CH radical luminescence intensity at e.q. ratio 2.5

증가가 발생하였기 때문이다. 블로우 조건으로 이
 동시 CO의 생성이 줄어들어 드는 것을 확인할 수 있는
 데 이는 블로우 조건에서 화염 길이가 축소함으로
 인해 전체적인 화염장의 크기가 감소하였기 때문
 이다. Fig.7(b)는 블로우&석선 조건에서 각각의
 연료량 및 당량비 변화에 대한 NO_x의 농도분포 그
 래프이다. 블로우 조건으로 이동시 NO_x의 전체적
 인 배출 가스 양은 증가하는 경향을 나타낸다.

국소 NO의 측정 데이터에서 블로우 조건에서 석
 선 조건에 비해 화염 선단부위에서의 NO의 생성량

이 많았던 것이 전체적인 NO_x의 배출 가스 량에 큰
 영향을 미친 것으로 생각된다. NO_x의 경우 특정 당
 량비(1.5~1.7) 값에서 최저 NO_x가 나타나는 것을
 볼 수 있다. 블로우&석선 조건에 따른 최저 NO_x의
 지점이 다르게 나타나는 것을 볼 수 있는데 블로
 우와 석선의 경우 두가지 조건에서의 압력차 및
 화염장의 변화로 인해 NO_x의 최저지점이 희박연소
 조건으로 이동하는데, 이는 압력 변화에 따른 CH
 계열 연료에서의 반응성의 차이에 인한 것으로 생
 각되어진다.

3.3 라디칼 자발광의 가시화

Fig.8,9(a),(b)은 ICCD 카메라를 이용하여 화염의 녹색 발광원인 C_2 , 청색 발광원인 CH라디칼 자발광을 나타낸 것이다. 탄화수소화염은 파장 470, 510, 560nm 부근에서 밴드 스펙트럼을 내는 C_2 라디칼과 파장 390nm와 430nm 부근에 밴드 스펙트럼을 내는 CH라디칼 때문에 화염색이 청색또는 청록색을 띤다고 보고 되었으며 본실험에서도 동일한 청염형태의 화염이 나타난다. 일반적인 C_2 및 CH라디칼의 자발광 형태는 가시적으로 보이는 화염 직접 사진과 유사하며, 라디칼 자발광 이미지에서도 희박 연소 조건으로 갈수록 예혼합 화염의 화염 형상이 나타나는 것을 확인 할 수 있으며 과농 상태로 이동시 화염의 상단부위에서부터 차례대로 깨지듯이 열려 과농상태에서는 라디칼 자발광이 화염의 양 측면에서 강하게 나타나고 있는 것을 확인 할 수 있다. CH라디칼의 경우 연료 희박 조건에서 C_2 라디칼에 비해 상대적으로 강한 라디칼 반응을 나타내며 과농 조건으로 이동시 C_2 라디칼은 화염 선단부위에서 강하게 나타나던 자발광 강도가 점차적으로 화염면 전체에서 라디칼 반응강도가 강해지는 것을 볼 수 있다. 석션조건에서 나타나는 C_2 , CH 라디칼의 자발광 강도가 블로우 조건에 강하게 나타나고 있는데 이는 석션조건에서 화염에서 반응성이 좋은 것으로 생각되며, NO_x 실험 데이터에서 보였던 탄화수소 계열의 압력에 대한 반응성과의 연관성이 있을 것으로도 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 산업과 가정에서 쓰이는 버너나 보일러 등에서 불완전 연소로 인해 생성되는 오염 물질을 줄이고 화염의 안정화를 높이기 위하여 NO_x 의 저감을 위한 블로우 및 석션의 상반되는 두 가지 유동특성을 가진 부분 예혼합 버너를 제작하였다. 또한 챔버내의 블로우&석션의 상반되는 유동 특성에서 부분 예혼합 화염의 연소특성에 관하여 비교 연구 하였다. 이를 위하여 화염에서의 화염 길이 측정, 화염의 평균 온도 측정 및 화염의 가시화 NO_x 분석기로 NO 성분 측정등을 이용하여 화염의 연소 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론

을 얻었다. 블로우&석션 조건에서 석션 조건으로 이동시 화염 확산 현상이 나타났으며, 블로우 조건에서 전체적인 화염 온도 및 국소 NO 는 상승하였고, 온도 실험치와 국소 NO 실험치는 동일한 경향을 나타낸 것으로 보아 본실험에서의 NO 생성은 온도와 강한 상관관계가 있다고 생각된다.

배기 연소 가스 측정에서 블로우 조건으로 이동시 최저 NO_x 지점은 희박 연소 조건으로 이동되고 있다. CO 의 경우 희박 연소조건으로 이동시 연료 공기간 혼합 증가로 인해 배출량이 줄어드는 경향이 나타난다. 라디칼 자발광 특성은 C_2 의 경우 저당량비에서 고당량비로이동시 노즐 선단부위에서 화염장 전체로의 자발광 확산 현상을 볼수 있었으며, 석션 상태에서 C_2 , CH의 강한 라디칼 자발광 강도 나타내고 있는 것을 볼 때 석션에서 화염 전체적인 반응이 잘 일어나는 것으로 생각된다.

참고문헌

- (1) Stephen R. Turns "An Introduction to Combustion" McGraw-Hill International Editions, pp. 240-284, 423-490 January, 1990.
- (2) D.Douglas Thomsen, F. Frank Kuligowski, and Normand M. Laurendeau "Modeling fo NO formation in premixed, high pressure methane flames", COMBUSTION AND FLAME 119:307-318
- (3) H.H. Liakos, M.A. Founti, N.C. Markatos "The relative importance of combustion mechanisms in industrial premixed flames under high pressure"
- (4) N. Peters, Laminar flamelet concepts in turbulent combustion, in : Twenty First Symposium(International)on Combustion Institute, Pittsburgh, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1231, p. 1231
- (5) T.-W. LEE, A.MITROVIC, and T.WANG "Temperature, Velocity, and NO_x / CO Emission Measurements in Turbulent Flames : Effects of Partial Premixing with Central Fuel Injection"
- (6) 하영순, "확대유동장 내의 난류 확산화염의 배출물특성 및 국소 당량비계측에 관한 실험적 연구" 1996년 부산대학교 공학 석사 학위논문