

연소실 압력변동에 따른 화염 진동현상의 관찰

김종률* · 최경민† · 김덕줄**

Observation of flame oscillation with changing combustor pressure

Jong-Ryul Kim, Gyung-Min Choi, Duck-Jool Kim

ABSTRACT

At previous study, nitrogen oxide emission was decreased with decreasing pressure index. This tendency was explained by the flame oscillation with changing combustor pressure. In this study, the characteristics of flame oscillation with changing combustor pressure were investigated. It can be found that flame length is extended and flame width is narrowed by decreasing combustor pressure. It can be observed that pilot flame and the surrounding air converge on the inner flame in the $P^* \geq 1$ conditions and that surrounding air and flow pattern was widely dispersed in the $P^* < 1$ conditions. In the respect of average flame length, low fluctuation was shown in the $P^* \geq 1$ conditions. On the other hands, large fluctuation was shown in the $P^* < 1$ conditions. Flame oscillation are observed from $P^* = 0.98$ in the condition of $P^* < 1$ and the amplitude of flame oscillation becomes larger when P^* is lowered. These results demonstrate that low NOx phenomenon was caused by flame oscillation with changing combustor pressure.

Key Words : Changing combustor pressure, Flame oscillation, Partially premixed flame

기 호 설 명

ϕ : Equivalence ratio (당량비)
 P^* : Pressure index (압력지수)

P_{abs} : Absolute pressure (절대압력)
 P_{atm} : Atmospheric pressure (대기압)

1. 서 론

최근 연소기의 연구 동향은 다른 배출물의 양은 적게 유지시키면서 질소산화물 배출을 저감시키는 방향으로 진행되고 있다. 에너지 생성 시 배출되는 유해물질은 많은 환경문제를 야기시키고 있다. 환경문제는 직접적으로 인간의 인체에 위해를 가하므로 큰 비중을 가지고 연구되어야 한다. 특히 질소산화물은 산성비, 스모그 현상의 주요 원인이기 때문에 저 NOx 화를 위한 연소

방법의 연구가 필요하다. 저 NOx 연소를 위해서는 연소현상을 적절히 제어하는 방법이 필요하다. 저 NOx 연소 현상을 제어하는 방법은 다양하게 연구되어 왔다. 대표적인 방법으로 연료의 화학적 성질을 변화시키는 방법과 연소반응 영역의 분포를 변화시키는 방법이 있다. 연료의 화학적 성질을 변화하여 저NOx 연소를 하는 경우는 촉매연소가 있고, 연소반응 영역의 분포를 변화하여 저 NOx 연소를 하는 경우는 희박연소(lean combustion)[1, 2], 연료 및 공기를 단계적으로 나누어 공급하여 완전 연소 시킴으로써 연소효율의 저하 없이 NOx 배출을 저감시키는 방법(multi-stage combustion)[3, 4, 5], 음향가진(acoustic excitation)을 이용하여 확산화염의 유동과 NOx에 대한 제어 연구 방법[6]등이 알려져

* 부산대학교 대학원 기계공학과
 † 부산대학교 기계공학부
 부산대학교 기계기술연구소
 ** 부산대학교 기계공학부

있다.

그리고 연소실 압력변화도 연소현상과 배출 특성에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 선행연구를 살펴보면, 고압 연소 조건에서 연소실 압력이 증가함에 따라 연소 반응율과 온도가 증가하는 관계를 규명한 연구[7]가 수행되었고, 모델링을 통하여 고압의 연소 조건에서 질소산화물(nitric oxides)의 생성 기구를 관찰[8]한 연구도 수행되었다. 그리고 연소실 내부의 압력을 변동함으로써 대기압 이하의 압력 조건에서 저 NOx 현상을 관찰한 연구[9]도 수행되었다.

그러나 선행 연구에서 대기압 이하의 연소실 압력변동 형성 시 저 NOx 현상이 나타나는 원인이 명확히 규명 되지 않았다.

따라서 본 연구에서 연소실 압력변동이 부분 예혼합 화염의 배출특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 압력지수, 당량비의 변화에 따른 연소실내의 유동형태와 화염의 길이 변화 그리고 연소실 압력변동에 따른 화염의 진동현상에 대하여 조사해 보았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용된 실험 장치를 Fig.1 에 나타내었다. 장치는 크게 연소실 압력을 조절하는 부분과 혼합기를 공급하는 부분으로 나눌 수 있다.

연소실 압력을 형성할 때 두 가지 상반된 유동형태를 가진다. 연소실내 대기압 이상의 압력을 형성할 경우, 연소실 입구에서 공기를 공급하고 출구밸브를 조절하여 압력을 형성하고, 대기압 이하의 압력을 형성할 경우, 출구부에서 연소실의 공기를 외부로 배출하고 입구밸브를 조절하여 압력을 형성하게 된다. 연소실에 공급되는 공기는 충류유량계(SOKKEN LFE-50B)를 통하여 계측되어지고, 게이트 밸브로 제어하여 연소실

압력을 조절하였다.

혼합기를 공급하는 부분은 공기와 연료를 제어하는 부분으로 구성된다. 공기와 연료는 질량 유량계를 거쳐 혼합실로 공급되어 다양한 당량비의 혼합기를 생성한다. 혼합실내에는 steel ball과 허니콤을 설치하여 혼합기의 유동을 정류하였고, 역화를 방지하는 기능으로도 사용되었다. 다양한 압력 변화에 대해 안정적인 화염 형성을 위해 디퓨저와 파일릿 화염용 인젝터가 부착된 보염기를 사용하였다.

Fig. 2는 실험에서 사용한 연소기와 디퓨저를 상세히 나타낸 것이다. 연소기는 가로 55mm 세로 55mm 높이 550mm인 사각 파이프 형태이며, 연소기 측면에는 연소실 압력 측정용 센서가 설치 되어있다. 디퓨저는 혼합가스의 분사압력과 분사속도를 낮추고 대기압이하의 조건에서 화염의 안정 영역을 넓히기 위해 사용하였다. 보염기는 압력 변동에 대하여 화염의 안정화를 위해 중심 출구(d=8mm)를 중심으로 반경 1.5mm인 보조 인젝터를 8개 설치하여 파일릿 화염을 형성하였다.

실험에서 연료는 순도 99.99%의 메탄(CH4)을 사용하였으며 연소용 공기로는 습기가 제거된 압축 공기를 사용하였다.

2.2. 실험조건

실험에서 배출특성과 그 원인을 규명하기 위하여 당량비, 압력지수를 조절하였다. 절하였다. 당량비는 연료와 공기량을 조절하여 0.9~1.2까지 다양하게 형성하였다. 압력지수는 각 당량비 조건에서 0.7~1.3까지 조절하였다. 압력은 연소실 입출구부 100mm 지점에 압력센서를 설치하여 측정하였고, 본 연소시스템에서는 P*가 0.7이하, 1.3이상의 조건에서 연소실 내부압력이 약하게 진동하여 정압조건을 유지하기 힘든 조건이 존재하였으므로, 본 연구에서는 P*가 0.7 이상, 1.3이

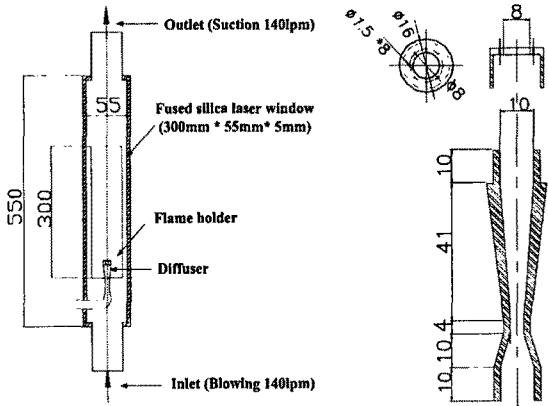
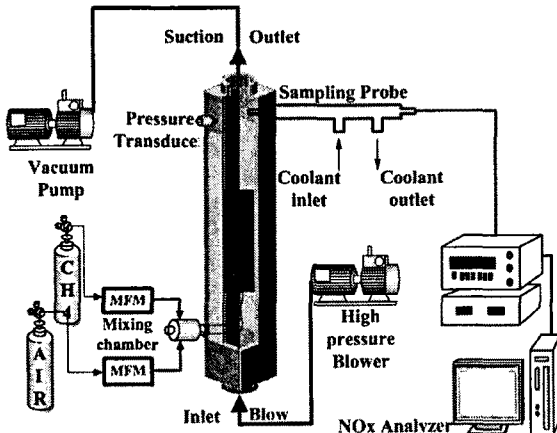


Fig.1 Experimental setup of combustion system Fig. 2 Combustor, diffuser and flame holder

Table 1. Experimental conditions of mixture

Equivalence ratio, ϕ	Air condition	Pressure index(P^*)
0.9 ~ 1.2	Suction	0.7
		0.8
		0.9
	Suction + Blow	1
		1.1
	Blow	1.2
1.3		

하의 조건에서 실험을 수행하였습니다. 압력지수는 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$P^* = \frac{P_{abs}}{P_{atm}} \quad (1)$$

실험 조건은 Table 1 에 나타내었다.

2.3. 실험방법

실험은 연소실 압력변동과 당량비 변화에 따른 배출특성을 규명하기위하여 화염진동 현상을 조사 하였다.

2.3.1 배기가스 분석

배기가스 중의 질소산화물(NOx)의 농도를 측정하기 위해서 화학 발광식 가스 분석기(TELEDYNE INSTRUMENTS : M200AH)를 사용하였다. 질소산화물(NOx)의 측정을 위하여 스테인리스 샘플링 프로브를 사용하였으며 프로브의 과열을 막기 위해 수냉식 2중관을 설치하였

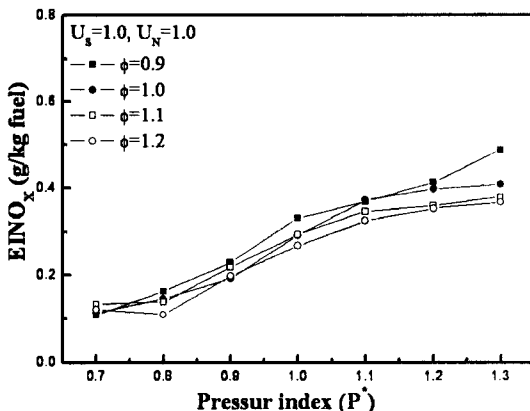


Fig. 5 Distribution of NOx Concentration with the variation of pressure index

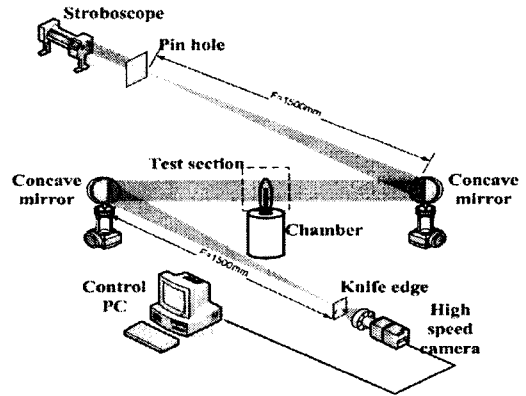


Fig. 3 Optical system for schlieren photograph

다. 프로브의 샘플링 홀의 크기는 1mm 로 하였고, 연소가스의 포집은 내부 화염길이의 2배되는 지점에서 이루어졌다. 슈리렌 촬영을 통하여 내부화염과 주위공기류의 혼합은 연소가스 포집위치보다 하류에서 이루어짐을 확인하였다. 포집된 연소 가스는 soot와 수분을 1차적으로 실리카겔과 거즈를 통하여 여과하여 가스 분석기로 공급하였다. 이때 연소실 압력이 가변하기 때문에 진공펌프와 유량계를 이용하여 500cc/min의 연소가스를 가스 분석기에 일정하게 공급하였다.[10,11] 측정된 값은 EINOx (Emission Index NOx)로 표시하였다.[12]

2.3.2 화염의 가시화

화염장의 진동 스케일과 형태를 파악하기 위해 슈리렌사진을 촬영하였으며, Fig. 3은 촬영을 위한 광학계이다. 2개의 오목거울은 초점거리 1500mm, 유효 경 200mm이며, 광원은 스트로브 스크프를 사용하였고, 핀 홀의 직경은 2mm로 촬영하였다. 슈리렌 사진은 고속카메라(Vosskuhler INSTRUMENTS : HCC-1000)를 이용하여 2000 frames/s 촬영하여 화염의 유동 형태를 관찰 하였다.[13] 상의 명암은 나이프에지를 이용하여 초점위치 후방의 상을 적절히 자름으로서 조절하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 연소실 압력변동에 따른 질소산화물(NOx) 배출특성

Fig. 5는 각 실험조건에 따른 NOx의 농도분포를 나타낸 것이다. NOx의 배출량은 전체적으로 압력지수가 감소함에 따라 약 30% 정도 감소하였다. P*가 0.9~1.0 구간에서 NOx 배출량이 다

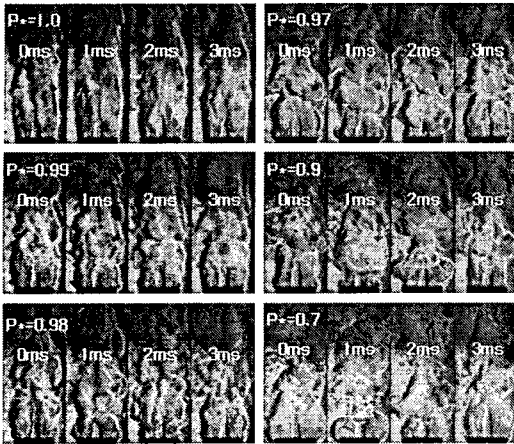


Fig. 6 Variation of schlieren photograph as function of pressure index & time series

른 압력 구간 보다 감소정도가 크게 나타난다. 이는 연소실 압력변동을 대기압 이하로 조금만 변화시켜도 NOx 제어에 큰 효과를 기대할 수 있다는 것을 알았다.

실험에서 압력지수가 낮아짐에 따라 NOx 배출량이 감소하는 현상을 보이고 있다. 이것은 대기압 이하의 압력변동 조건에서는 연소실 압력이 연소반응 영역의 분포를 변화하여 저 NOx 연소가 일어난다고 생각된다. 연소실 압력변동과 NOx 배출 특성과의 관계를 규명하기 위해 연소실 압력변동에 따른 화염의 진동현상에 대하여 조사하였다.

3.2 연소실 압력변동이 화염형상에 미치는 영향

Fig. 6은 압력지수에 따른 슈리렌 사진(schlieren photograph)을 나타낸 것이다. 보염기에서 분사된 미연혼합기는 내염영역에서 1차 연소반응을 일으키고, 일부 미연성분은 외염영역에

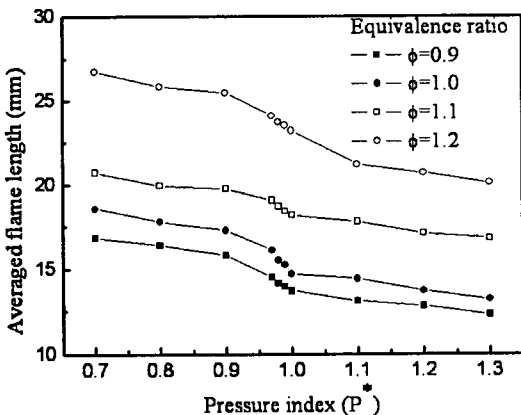


Fig. 7 Flame length with the variation of pressure index

서 주위 공기류와 2차 연소반응을 일으켜, 전체적으로 2중 화염구조가 나타나게 된다.

$P^* < 1$ 조건에서 보염기 선단부분에서 진동이 발생하는 것을 관찰 할 수 있고, $P^* = 0.98$ 부터 서서히 진동이 나타나기 시작하여 압력지수가 낮아질수록 보염기 주변의 진동 강도와 크기가 강해지는 것을 관찰 할 수 있다. 이때 내염은 진동 강도와 크기에 따라 폭이 좁고 긴 화염에서 끝이 깨진 화염으로 주기적으로 반복하는 것을 관찰 할 수 있다. $P^* \geq 1$ 조건에서는 파일릿 화염과 주위 공기류의 유동이 화염 중심부로 모이는 현상을 관찰 할 수 있고, $P^* < 1$ 조건에서는 주위 공기류의 유동형태가 넓게 퍼지는 것을 관찰 할 수 있다.

3.3. 연소실 압력변동에 따른 평균 화염 길이

Fig. 7은 당량비와 압력지수 변화에 따른 슈리렌 사진의 평균 화염길이를 나타낸 것이다. 전체적으로 당량비가 증가함에 따라 화염길이가 증가하는 경향이 나타난다. $P^* \geq 1$ 조건에서는 화염길이에 큰 변화가 관찰 되지 않으나, $P^* < 1$ 경우 상대적으로 화염길이의 변화가 크게 나타나고 있다. 동일한 당량비에서 압력지수 변화에 대한 평균 화염길이는 최대 30~40% 정도 차이가 난다. P^* 가 0.9~1.0 구간에서 화염길이의 변화가 크게 나타나는 것을 관찰 할 수 있다. 이는 앞의 NOx 그래프에서 P^* 가 0.9~1.0 구간에서 NOx 배출량이 급감하는 현상과 밀접한 것으로 보인다. 이는 $P^* = 0.98$ 부터 화염의 주기적인 진동으로 인하여 주위 공기의 유입을 촉진시켜 화염면의 온도를 저하하여 저 NOx 현상을 촉진 시킨 것으로 보인다. 이와 같은 현상은 Whitelaw[6]등의 진동에 의한 저 NOx 연소현상과 유사한 결과로 사료된다.

Fig. 8은 연소실 압력변동에 따른 평균 화염길이의 변동치를 나타낸 것이다. $P^* \geq 1$ 조건에서는 화염길이의 변화가 나타나지 않지만 $P^* < 1$ 조건에서는 화염길이의 변동치가 증가하는 현상을 관찰 할 수 있다. 대기압 이하의 압력변동 조건에서 압력지수가 낮아질 수 록 화염길이 변화가 증가하는 것을 볼 수 있고, 앞의 슈리렌 사진에서와 같이 $P^* = 0.98$ 부터 변화가 급격히 증가하는 것을 관찰 할 수 있다. 그리고 당량비가 낮은 화염의 길이보다 당량비가 높은 화염의 길이 변화량이 더 크게 나타나고 있음을 관찰 할 수 있다.

Fig. 9는 압력지수에 대한 R.M.S. 값을 나타낸 것이다. 앞의 화염길이의 변화량과 유사하게 평균진동폭도 압력지수가 낮아질수록 증가하는 경향이 나타난다. P^* 가 0.9~1.0 구간에서 R.M.S. 값이 급격히 증가하는 것을 관찰 할 수 있다. 이

는 화염길이가 작은 압력변동에도 민감하다는 것을 나타내는 것이다. 즉 화염형태의 변화가 연소실 압력에 대하여 뚜렷이 나타나는 것을 알 수 있고, 화염의 형태변화는 주위공기와 접촉면적을 증가시켜 화염면의 온도를 저하시켜 저 NOx 현상을 나타내는 주요한 인자가 되는 것으로 사료된다. R.M.S. 값은 연소실 압력이 낮아짐에 따라 당량비에 대하여 차이가 증가하다가 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 10에 압력변동에 따른 화염길이의 변동을 실시간으로 측정하여 주파수 분석한 결과를 나타내었다. 화염의 진동주기는 $P^*=1.0$ 을 제외한 모든 연소실 압력조건에서 530Hz와 720Hz에서 탁월주파수를 나타내는 것을 관찰할 수 있다. 한편, $P^*=0.8$ 또는 0.7의 낮은 압력조건에서는 195Hz에서도 피크가 관찰된다. 이러한 탁월주파수의 에너지는 앞서 조사한 화염길이의 변동치에 비례함을 알 수 있다. 연소실내부의 평균온도를 900-1200K으로 가정할 때, 앞서 관찰된 탁월주파수는 연소기 고유 진동수에 가까움을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 연소실 압력변동에 따른 부분예혼합 화염의 저 NOx 형상을 규명하기 위하여 화염의 주기적인 진동현상을 슐리렌사진과 평균 화염길이, 화염길이의 변화에 대하여 조사하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) $P^* < 1$ 조건에서 $P^* \geq 1$ 조건보다 화염반응면의 신장현상이 뚜렷이 나타났으며, 이는 화염반응대가 주위공기와 접촉면적을 증가시켜 화염반응대의 고온영역이 감소하여 Thermal NOx 배출량이 감소시켜 저 NOx 연소의 중요 원인이라 생각된다.
- (2) 슐리렌 사진에서 압력지수가 낮을 수록 내부 화염이 신장되고, 화염형태의 변화가 크게 나타나는 것을 관찰 할 수 있었고 화염진동은 $P^*=0.98$ 부터 나타나기 시작하며 압력지수가 감소함에 따라 보염기 선단부의 화염진동이 커지는 것을 관찰 할 수 있다.
- (3) 평균 화염길이 변동은 연소실 압력변동이 대기압 이하일 때 크게 나타나는 것을 관찰 할 수 있고, 진폭은 압력 지수가 낮아짐에 따라 커지는 것이 관찰된다.
- (4) 낮은 연소실 압력조건에서 530Hz와 720Hz의 탁월주파수의에 195Hz의 낮은 주파수도 관찰되었으며, 이는 연소기 고유진동수와 관련이 있다.

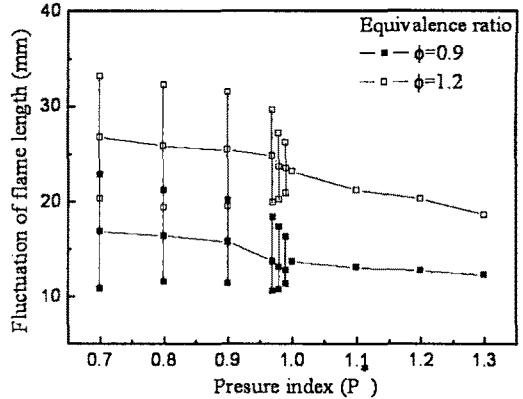


Fig. 8 Fluctuation of flame length with the variation of pressure index

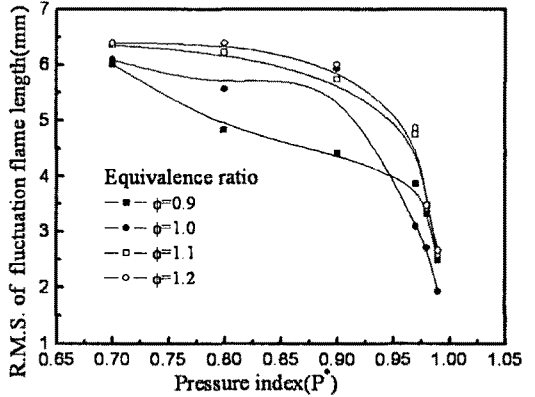


Fig.9 R.M.S. of fluctuation flame length with pressure index

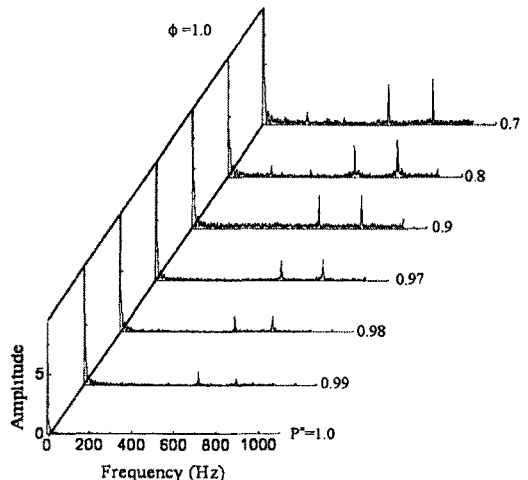


Fig. 10 Amplitude of fluctuation flame length with pressure index ($\phi=1.0$)

후기

이 논문은 에너지관리공단 학술진흥사업의 지원에 의하여 연구되었습니다.(2004-E-ID03-P-02-0-000)

참고문헌

- [1] Toshio Shudo, Takashi Mizuide, 2002, NOx emission characteristics in rich-lean combustion of hydrogen. JSAE Review 23, pp.9-14
- [2] D. BRADLEY, P. H. GASKELL, X. J. GU, M. LAWES, AND M. J. SCOTT, 1998, Premixed Turbulent Flame Instability and NO Formation in a Lean-Burn Swirl Burner. COMBUSTION AND FLAME 115, pp.515-538
- [3] J. M. Ballester, C. Dopazo, N. Fueyo, M. Hernabdez and P. J. Vidal, 1997, Investigation of low-NOx strategies for natural gas combustion, Elsevier Science Ltd. Fuel Vol.76 No.5, pp.435-446.
- [4] J. P. Smart, R. Webber, 1989, Reduction of NOx and optimisation of burnout with an aerodynamically air-staged burner and air-staged precombustor burner, Journal of the Institute of Energy, pp.237-245.
- [5] Ahn K. Y., Kim H. S., Cho E. S., Ahn J. H. and Kim Y. M., 1999, An Experimental Study on Combustion Processes and NOx Emission Characteristics of the Air- Staged Burner, KSME, vol 13, pp.477-486.
- [6] C. POPPE, S. SIVASEGARAM, J. H. WHITE LAW, 1998, Control of NOx Emissions in Confined Flames by Oscillations. Combustion and Flame vol 113, pp.13-26
- [7] H.H. Liakos, M.A. Founti, N.C. Markatos, 1999, The relative importance of combustion mechanisms in industrial premixed flames under high pressure. Applied Thermal Engineering, vol 20, pp.925-940.
- [8] D. DOUGLAS THOMSEN, 1999, Modelling of NO Formation in Premixed, High-Pressure Methane Flame. Combustion and Flame, vol 119, pp.307-318.
- [9] 김종률, 최경민, 김덕줄, 2005, 연소실 압력변동을 이용한 저 NOx 연소의 새로운 접근. 대한기계학회논문집 B권 10월 게재예정
- [10] T.-W. LEE, T. WANG, 2000, Temperature, Velocity, and NOx/CO Emission Measurements in Turbulent Flames: Effect of Partial Premixing with Central Fuel Injection, Combustion and Flames 121, pp. 378-385.
- [11] Koji Hase, Yasumichi Kori, 1996, Effect of premixing of fuel gas and air on NOx formation, Fuel, vol 75, pp.1509-1514
- [12] STEPHEN R. TURNS & FRANKLIN H. MYHR, 1991, "Oxides of Nitrogen Emission from Turbulent Jet Flames: Part I - Fuel Effects and Flames Radiation Combustion and Flames 87 pp. 319-335
- [13] 최병륜, 최경민, 장인갑, 1996, 미연혼합기의 난류특성과 화염 스케일에 관한 실험적 연구. 대한기계학회논문집 B권 제20권 제3호, pp.1040-1049.