

연소실 압력변동과 2차 연료분사가 화염안정화와 NO_x 배출에 미치는 영향

김종률* · 최경민† · 김덕줄**

Influence of changing combustor pressure and secondary fuel injection on flame stabilization and NO_x emission

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

ABSTRACT

Influence of changing combustor pressure on flame stabilization and nitrogen oxide (NO_x) emission in the swirl-stabilized flame with secondary fuel injection was investigated. The combustor pressure was controlled by suction at combustor exit. Pressure index ($P^*=P_{abs}/P_{atm}$), where P_{abs} and P_{atm} indicated the absolute pressure and atmosphere pressure, was controlled in the range of 0.7~1.3 for each equivalence ratio conditions. The flammable limits of swirl flames were largely influenced by changing combustor pressure and they showed different tendency compared with laminar flames. Emission index showed maximum value near atmospheric condition and decreased with decreasing pressure index for overall equivalence ratio conditions. R.m.s of pressure fluctuations also showed similar tendency with nitric oxide emission. By injecting secondary fuel into flame zone, the flammable limits were extended significantly. Emission index of nitric oxide and r.m.s. of pressure fluctuations were also controlled by injecting secondary fuel. The swirl flames were somewhat lifted by secondary fuel with high momentum, hence low nitric oxide emission. This NO_x reduction technology is applicable to industrial furnaces and air conditioning system by adopting secondary fuel injection.

Key Words : Changing combustor pressure, Secondary fuel injection, Swirl-stabilized flame, Flame stabilization, Pressure fluctuation

1. 서 론

저 NO_x 연소 현상을 제어하는 방법은 다양하게 연구되어 왔다. 대표적인 방법으로 연료의 화학적 성질을 변화시켜 저NO_x 연소를 실현하는 촉매연소법이 있고, 연소반응 영역의 분포를 변화하여 저 NO_x 연소를 하는 희박연소(lean

combustion)[1, 2], 연료 및 공기를 단계적으로 나누어 공급하여 완전 연소 시킴으로써 연소효율의 저하 없이 NO_x 배출을 저감시키는 방법(multi-stage combustion)[3, 4, 5], 음향가진(acoustic excitation)을 이용하여 확산화염의 유동과 NO_x에 대한 제어 연구 방법[6]등이 알려져 있다. 최근에는, 연소실 압력의 변동을 이용한 NO_x저감 기술에 관한 보고가 저자들에 의해 이루어 졌다[7].

저자들은 선행 연구를 통하여 연소실 압력을 대기압이상으로 가한 경우에 좁은 고온 영역이 형성되어 NO_x배출량이 증대하나, 연소실 압력을

* 부산대학교 대학원 기계공학과

† 부산대학교 기계공학부

부산대학교 기계기술연구소

** 부산대학교 기계공학부

대기압 이하로 감압한 경우에는 화염대가 연소실에 넓고 균일하게 분포하며, 국소 고온 영역이 제거되어 NOx 저감 효과가 뛰어난 것을 보고하였다. 그러나 선행 연구에서는 층류화염을 대상으로 함에도 불구하고 연소실 압력을 감압할 경우, 화염의 진동이 관찰되었고, 이러한 진동 주파수는 압력 변동 크기에 관계없이 일정함을 알 수 있었다[8]. 그러나 이러한 압력 변동을 이용한 저 NOx 연소기법이 난류화염에도 적용 가능할지는 조사되고 있지 않은 실정이다. 한편, 선행 연구에서는 화염 진동에 의하여 주위의 공기가 유입되고, 결과적으로 화염신장이 일어났다. 일반적으로 화염 진동은 화염 불안정을 일으키고 진동이 심한 경우, 시스템 파손을 초래하기도 한다. 따라서 압력변동을 이용한 저NOx 연소기법이 실제 연소시스템에 적용될 경우, NOx배출량은 증가시키지 않으면서 화염을 안정화시킬 새로운 연소기법 또는 액츄에이터의 개발이 요구된다.

따라서 본 연구에서 연소실 압력변동이 스윙 연소기에서 형성된 화염의 안정화 및 NOx배출에 미치는 영향을 조사하여 실제 연소 시스템에 적용 가능성을 평가하였다. 한편, 압력 변동에 따른 연소진동으로 불안정해진 화염을 안정화시키기 위하여 2차 연료 분사 기법을 도입하고, 그 영향을 자세히 조사하였다.

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 형

성할 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 질량유량계(KOFLOC HFC-300)를 통하여 계측되어지고, 게이트 밸브로 제어하여 연소실 압력을 조절하였다.

혼합기를 공급하는 부분은 공기와 연료를 제어하는 부분으로 구성된다. 공기와 연료는 질량 유량계(KOFLOC HFC-3660)를 거쳐 혼합실로 공급되어 다양한 당량비의 혼합기를 생성한다. 혼합실내에는 세라믹 볼과 허니콤을 설치하여 혼합기의 유동을 정류하였고, 역화를 방지하는 기능으로도 사용되었다. 다양한 압력 변화에 대해 높은 난류와 안정적인 화염 형성을 위해 스윙 인젝터와 2차 연료 분사 노즐이 설치되었다.

Fig. 2는 실험에서 사용한 연소기와 혼합실을 상세히 나타낸 것이다. 연소기는 가로 110mm 세로 110mm 높이 1100mm인 사각 파이프 형태이며, 연소기 측면에는 연소실 압력 측정용 센서가 설치 되어있다. 혼합실은 혼합가스의 분사압력과 분사속도를 균일하게 유지하고 다양한 연소실 압력 조건에서 화염의 안정 영역을 넓히기 위해 사용하였다. 스윙러의 외경은 30mm 이고 내경은 10mm이며, 스윙 베인은 6개, 각은 45°인 스윙을 사용하였다. 압력 변동에 대하여 화염의 안정화를 위해 중심 출구를 중심으로 반경 3.5mm 지점에 지름 0.5mm인 2차 연료 인젝터를 45°로 6개 설치하였다.

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

2.2. 실험조건

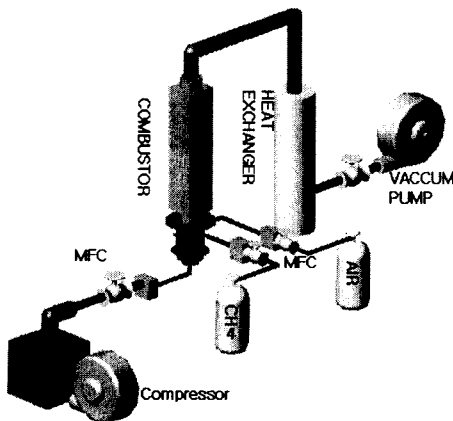


Fig.1 Experimental setup of combustion system

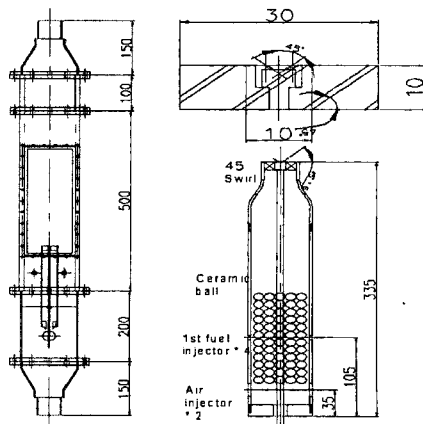


Fig. 2 Detail diagrams of combustor, swirler and mixing chamber

실험에서 배출특성과 그 원인을 규명하기 위하여 당량비, 압력지수를 조절하였다. 당량비는 연료와 공기량을 조절하여 0.9~1.2까지 변화시켰다. 압력지수는 각 당량비 조건에서 0.7~1.3까지 조절하였다. 압력은 연소실 입출구부 100mm 지점에 압력센서를 설치하여 측정하였고, 본 연소 시스템에서는 P*가 0.7이하, 1.3이상의 조건에서 연소실 내부압력이 약하게 진동하여 정압조건을 유지하기 힘든 조건이 존재하였으므로, 본 연구에서는 P*가 0.7 이상, 1.3이하의 조건에서 실험을 수행하였다. 실험 조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Experimental conditions of mixture

Equivalence ratio, ϕ	Mixture flow rate	Air condition	Pressure index(P*)
0.9 ~ 1.2	15 ~ 90 (lpm)	Suction	0.7 ~ 0.9
		Suction + Blow	1
		Blow	1.1 ~ 1.3

2.3. 실험방법

실험은 스웰유동의 난류버너에서 연소실 압력 변동, 당량비 변화와 2차 연료 분사에 따른 화염 안정과 배출특성을 조사하기 위하여 가연한계, 연소실내부 압력변동, 질소산화물(NOx) 농도 계측을 수행하였다.

연소기 내에 압력 변화에 따른 화염의 블로우 오프(blow-off) 한계를 측정하기 위하여 각각의

압력에 대한 혼합물 공급유량을 조절하였다. 화염이 부상하여 화염이 소화될 때까지의 최대 혼합기량을 화염 안정 범위라 하였고, 공기량을 고정 한 후 연료량을 증가시켜 가면서 가연 한계를 조사하였다.

연소실 내부의 압력변동은 압력센서(Kistler 7507)를 이용하여 계측하였다. 고온의 연소실 내부 압력을 연속으로 계측하기 위하여 센서를 소랭하였다. 센서의 압력변동은 증폭기(Kistler 5011)에서 신호변조된 후, AD-Converter에 의해 저장되었다. 이 때, 센서의 시간분해능은 5kHz이고, 조건별 계측 시간은 10초간 이루어졌다.

배기가스 중의 질소산화물(NOx)의 농도를 측정하기 위해서 화학 발광식 가스 분석기(SHIMADZU, NOA-7000)를 사용하였다. 질소산화물(NOx)의 측정을 위하여 스테인리스 샘플링 프로브를 사용하였으며 프로브의 과열을 방지하기 위해 수냉식 2중관을 설치하였다. 프로브의 샘플링 홀의 크기는 1mm 로 하였고, 연소가스의 포집은 연소기 출구부에서 이루어졌다. 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[9,10] 측정된 값은 EINOx (Emission Index NOx)로 표시하였다.[11]

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 연소실 압력변동에 따른 화염안정화와 질소산화물(NOx) 배출특성

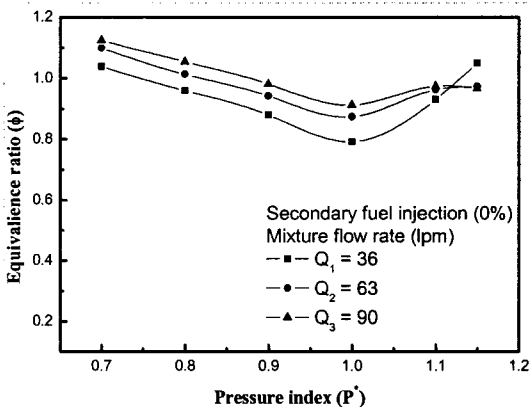


Fig. 3 Flammable limits as functions of mixture flow rate and pressure index

Fig. 3은 스웰 화염에서 혼합기의 유량, 연소실 압력 변화에 따른 화염의 가연한계를 나타낸 것이다. 각각의 혼합기 유량에 대하여 연료의 유량을 감소시켜 화염이 날아가는 당량비를 가연한계라 정의하였으며, 그래프에서 가연한계 점보다 과농한 영역은 화염 안정영역으로 하였다. 압력지수(P*) 1이하인 조건에서 압력지수가 증가할수록 가연한계가 증가하는 것을 관찰 할 수 있고, 압력지수(P*)가 1인 영역에서 가연한계가 가장 넓어지는 것을 관찰 할 수 있다. 반면에, 압력지수가 1이상인 압력조건에서는 압력지수가 증가할수록 가연한계가 좁아지는 것을 관찰 할 수 있다. 스웰 화염에서 연소실 분위기 압력이 대기압보다 높게 형성 될 경우 화염의 역화가 발생하여 가연한계가 좁게 나타났다. 대기압 이상의 조건에서 가연한계가 좁아지는 현상은 층류화염의 결

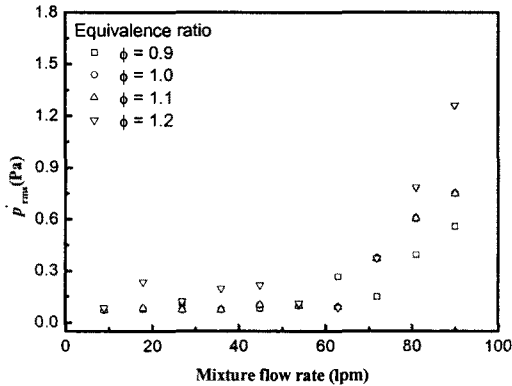


Fig. 4 R. m. s. of pressure fluctuations as functions of mixture flow rate and equivalence ratio

과와 상반되는 경향으로, 이는 보염 기구의 차이에 기인한다고 생각된다.

전반적으로 혼합기의 유량이 증가함과 함께 가연한계가 감소되는 현상을 관찰할 수 있다.

미연혼합기의 유량과 공급 당량비의 변화에 따른 연소실 내부 압력변동의 r.m.s값을 Fig. 4에 나타내었다. 전반적으로 당량비가 증가할수록 압력변동치가 증가하는 경향을 나타내나, 그 차이는 그다지 크지 않다. 미연혼합기의 유량이 60lpm까지는 압력변동에 큰 차이를 나타내지 않고, 60lpm이후로 유량의 증가와 함께 압력변동치가 급격하게 증가함을 관찰 할 수 있다. 이는 발열량의 증가에 따른 진동연소 현상이라 사료된다. Fig. 5에 압력변동치가 큰 미연혼합기의 유량 조건에 있어서 압력지수의 변화에 따른 압력 변동치 분포를 나타내었다. 미연 혼합기 유량에 관계없이 대기압 부근에서 압력 변동치가 크게 나타났다. 이와 같은 경향은 유량이 증가할수록 두

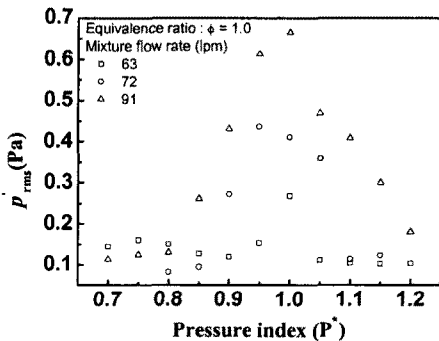


Fig. 5 R. m. s. of pressure fluctuations as functions of mixture flow rate and pressure

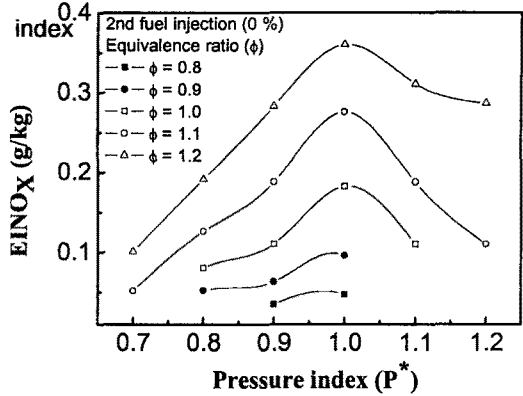


Fig. 6 Emission index as functions of pressure index and equivalence ratio(63 lpm)

드러진다. 이 같은 결과와 Fig. 3의 가연한계 분포와 종합해서 해석하면, 화염의 진동 현상이 가연한계를 좁히는 것은 아니라는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 공급 당량비와 압력지수의 변화에 따른 NOx배출 농도를 나타낸 것이다. NOx배출 농도는 당량비가 증가할수록 크게 나타났다. 압력 변동치의 분포와 유사하게 대기압 부근에서 NOx배출 농도가 가장 높게 나타났고, 연소실 압력이 감소할수록 NOx배출 농도는 단순 감소하고 있다. 한편, 층류화염에서는 연소실 압력이 증가할수록 NOx배출 농도가 단순히 증가하였으나, 스윙 난류화염에서는 대기압이상의 조건에서 압력상승과 함께 NOx 배출 농도가 감소하고 있다. 이와 같은 결과는 화염 불안정에 의한 불완전 연소에 기인한다고 사료된다.

3.2 2차 연료 분사가 화염안정화와 NOx배출 특성에 미치는 영향

Fig. 7은 2차 연료의 분사가 가연한계에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 2차 연료가 없는 경우에는 하한 가연 한계가 당량비 0.8이상이었으나, 2차 연료를 5%만 공급하여도 2차 연료가 없는 경우에 비해 크게 확대되었다. 특히, 2차 연료가 없는 경우에 관찰되었던 대기압 부근에서의 최저점은 나타내지 않았으며, 대기압 이상의 조건에서 더욱 크게 확대되는 것을 관찰할 수 있다. 2차 연료가 10% 공급되면, 하한 가연 한계는 더욱 확대된다. 이와 같은 하한 가연한계의 확장은 스윙 인젝터 중심으로부터 화염대에 분사되는 2차 연료가 파일럿 화염 역할을 하기 때문이다.

2차 연료가 없는 경우는 공급되는 연료가 100% 공기와 예혼합되어 연소실로 공급되

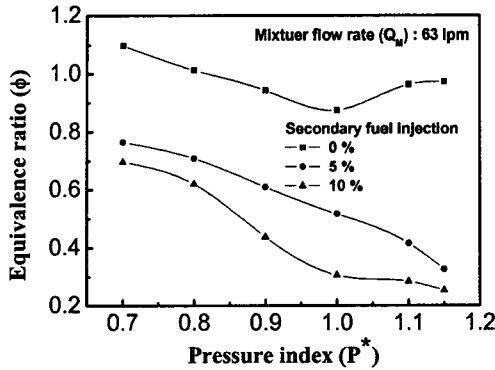


Fig. 7 Flammable limits with secondary fuel injection

기 때문에 완벽한 예혼합화염이 형성되나, 2차 연료가 분사될 경우, 공급되는 연료 유량은 변함이 없으나, 2차 연료 노즐로부터 분사되는 연료는 확산화염형태로 연소되기 때문에 NOx배출량이 증가할 가능성이 크다.

Fig. 8은 2차 연료 분사가 NOx 배출 농도에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 2차 연료 분사 유량의 증가와 함께 NOx 배출 농도가 감소하는 경향을 관찰할 수 있다. 이와 같은 NOx 저감 현상은 대기압 부근에서 두드러지며, 압력지수가 작아지거나 커짐에 따라 2차 연료 분사의 영향은 작아진다. 2차 연료로서 순수한 메탄 가스가 분사됨에도 불구하고 NOx 배출 농도가 낮아지는 것은 고속으로 분사되는 2차 연료에 의하여 스윙 화염이 다소 부상하고, 이러한 부상화염의 형성에 의하여 비교적 화염 반응대가 형성되었기 때문이라 분석된다.

Fig. 9는 2차 연료 분사가 연소실 내부 압력변동에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 2차 연료를 5% 분사함에 따라 확연히 압력변동치가 감소하는 현상을 관찰할 수 있다. 2차 연료를 10%분사하면, 압력지수에 관계없이 거의 유사한 압력 변동치 분포가 나타난다. 이와 같은 현상은 2차 연료 분사에 의하여 보염이 강화된 것에 기인한다고 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 연소실 압력변동에 따른 스윙(Swirl) 화염의 화염안정화와 NOx 배

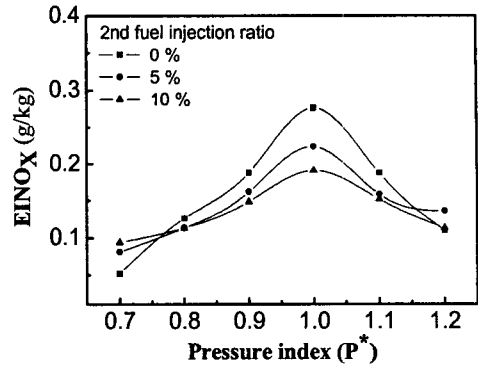


Fig. 8 Emission index with secondary fuel injection (63 lpm, φ=1.1)

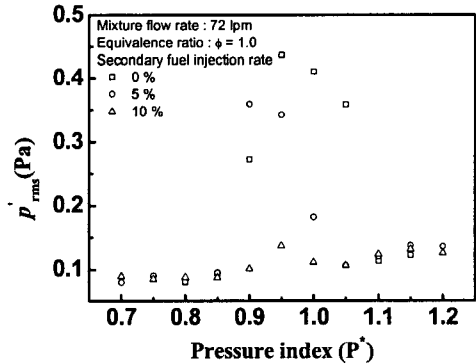


Fig.9 R.m.s. of pressure fluctuation with secondary fuel injection

출 특성을 조사하고, 2차 연료 분사를 이용한 가연한계 확장과 저NOx 연소의 가능성을 조사하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 연소실 압력지수는 난류 스윙 화염의 안정화에 큰 영향을 미쳤으나, 대기압 이상의 가연한계의 정성적 특성은 층류화염과 달랐다.
- (2) 연소실 내부의 압력 변동은 미연혼합기의 유량 증가와 함께 급격한 증가를 보였고, 대기압 부근에서 피크치를 나타내었다.
- (3) NOx배출 농도는 공급 당량비의 증가와 함께 증가하였고, 각 당량비 조건에 있어서 대기압 부근에서 가장 높은 농도를 보였었다.
- (4) 2차 연료를 분사함으로써 스윙 화염

의 가연한계는 크게 확장되었고, 가연한계 분포는 층류화염의 그것과 유사하였다.

(5) 2차 연료 분사를 이용하여 NO_x 배출량을 저감시킬 수 있었고, 이러한 저NO_x연소는 대기압 부근 조건에서 두드러졌다.

(6) 2차 연료 분사를 이용하여 연소실 압력을 제어하고 화염안정화를 이룰 수 있다.

후기

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

참고문헌

- [1] Toshio Shudo, Takashi Mizuide, 2002, NO_x 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-NO_x 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 NO_x 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 NO_x Emission Characteristics of the Air- Staged Burner, KSME, vol 13, pp.477-486.
- [6] C. POPPE, S. SIVASEGARAM, J. H. WHITELAW, 1998, Control of NO_x Emissions in Confined Flames by Oscillations. Combustion and Flame vol 113, pp.13-26
- [7] 김종률, 최경민, 김덕줄, 2005, 연소실 압력변동을 이용한 저 NO_x 연소의 새로운 접근. 대한기계학회논문집 B권 Vol. 29, 제10호, pp.1148-1155
- [8] 김종률, 최경민, 김덕줄, 2005, 연소실 압력변동에 따른 화염 진동현상의 관찰, 제31회 KOSCO SYMPOSIUM 논문집 pp.275-280
- [9] T.-W. LEE, T. WANG, 2000, Temperature, Velocity, and NO_x/CO Emission Measurements in Turbulent Flames: Effect of Partial Premixing with Central Fuel Injection, Combustion and Flames 121, pp. 378-385.
- [10] Koji Hase, Yasumichi Kori, 1996, Effect of premixing of fuel gas and air on NO_x formation, Fuel, vol 75, pp.1509-1514
- [11] 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
- [12] 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.
- [13] D. DOUGLAS THOMSEN, 1999, Modelling of NO Formation in Premixed, High-Pressure Methane Flame. Combustion and Flame, vol 119, pp.307-318.