

## 저 NO<sub>x</sub> 선단 예혼합 연소기의 화염 및 NO<sub>x</sub> 배출 특성 연구

신명철\* · 김세원\* · 문민욱\*\*

### An Experimental Study on Flame and NO<sub>x</sub> Emission Characteristics of Front Mixing Premix Combustor

Myung-Chul Shin\*, Se-Won Kim\* and Min Uk Mun\*\*

#### ABSTRACT

This experimental study has been mainly motivated to obtain generally applicable design correlation for the front mixing premix combustor. The design concept of the front mixing premix combustor is to minimize thermal NO<sub>x</sub> and prompt NO<sub>x</sub> formation by maintaining low peak flame temperature, and nearly uniform flame temperature through rapid mixing process near the ignition point. The present experimental results clearly indicate that the front mixing premix combustor yields the NO<sub>x</sub> level lower than 43 ppm NO<sub>x</sub> emissions and the nearly uniform temperature distribution

**Key Words** : Front mixing premix combustor(선단 예혼합 연소기), Thermal NO<sub>x</sub>, Prompt NO<sub>x</sub>, Flame Temperature(화염온도)

#### 1. 서 론

많은 NO<sub>x</sub> 저감기술 중 기체연료는 액체연료와는 달리 SO<sub>x</sub>나 분진 등의 발생이 거의 없어, 대기오염방지대책에 있어서는 NO<sub>x</sub>성분에 대해서만 고려하면 된다. 이와 같은 NO<sub>x</sub> 저감 대책에 있어서도 기체연료에는 연료 중에 질소성분이 함유되어 있지 않기 때문에 Fuel NO<sub>x</sub>를 제외한 Thermal NO<sub>x</sub> 및 Prompt NO<sub>x</sub>에 관련된 사항만 제어하면 된다.

저 NO<sub>x</sub> 연소기의 구성을 위한 원리를 기술적으로 분류하면, 첫째 연소로 내에서 연소 시 NO<sub>x</sub> 생성을 억제하는 NO<sub>x</sub> 억제 메커니즘, 둘째 생성된 NO<sub>x</sub>를 연료의 환원성을 이용하여 연소로 내에서 N<sub>2</sub>로 환원시키는 탈질 메커니즘 그리고 셋째 NO<sub>x</sub> 억제와 탈질이 조합된 형태의 메커니즘으로 나눌 수 있는데 이러한 메커니즘이 조합 구현된 방법으로는 현재 까지 주로 다단 연료/공

기 공급 연소기술이 적용되어 왔다. 연소기 자체의 다단 연료/공기 공급에 의한 연소기술은 화염의 유동을 유체역학적으로 제어하여 연료 농후와 연료 희박영역으로 구성함에 따라 화염 내 최대 온도 영역을 최소화 하여 Thermal NO<sub>x</sub>의 발생을 억제하게 된다. 그러나 초기의 연료 과잉 영역에서 생성되는 Prompt NO<sub>x</sub>는 여전히 남아있게 되며, 연료 농후 영역과 연료 희박 영역 사이에서 국부적인 고온 화염 영역의 형성을 피할 수 없다.

따라서, 초 저 NO<sub>x</sub> 연소를 위해서는 Thermal NO<sub>x</sub> 및 Prompt NO<sub>x</sub>를 동시에 억제할 수 있는 연소 기술이 필요하다. 이러한 목적을 구현하기 위한 선단 예혼합 연소기 구조는 연료와 공기의 혼합을 위한 별도의 혼합장치 없이 버너 출구 선단에서 연료와 공기가 빠르게 혼합되도록 하여 부분적인 예혼합 화염을 형성 하도록 하는 원리의 연소기이다. 또한 연료가 연소기 내부의 선단에 근접한 상류 부분에서 공급되기 때문에 매우 작은 영역에서만 예혼합 상태가 발생한다. 이는 예혼합 연소기에서 상존할 수밖에 없는 플래시백(Flashback)의 가능성을 없애는 효과를 가진다. 선단 예혼합 연소기는 연료와 연소 공기의 급속

\* 한국생산기술연구원

\*\* 한양대학교 기계공학과 대학원

† 연락처자, mcshin@kitech.re.kr

한 혼합을 발생시키는 방법으로 선화기의 형태, 연소기 내부의 연료 분사 노즐의 형태 등이 밀접하게 연관되어 있다. 따라서 본 연구에서는 축방향으로 공급되는 연소 공기와 연료 분사부에서부터 반경방향으로 분사되는 연료를 선화기 이전에서 빠르게 혼합되도록 하여 국부적으로 예혼합을 형성하도록 하는 원리를 적용하였다.

Koji Hase[1]등은 연료와 공기의 혼합율을 레이저 광흡수 기법(laser absorption method)을 통해 예혼합의 연료 농도에 따른 NO<sub>x</sub>의 배출량을 분석하여 연료 희박에서의 예혼합이 NO<sub>x</sub> 저감을 이룰 수 있다고 제시하였으며, T.-W. Lee[2]등은 부분 예혼합의 영향을 화염 온도, 속도, NO<sub>x</sub>/CO 농도를 분석하여 난류 화염에서 제시하였다. G.R. Altpfat[3]등은 선단 예혼합을 통해 국부적인 예혼합을 형성하고 FGR (배기재순환, Flue Gas Recirculation) 효과를 더하여 10ppm 이하의 NO<sub>x</sub> 배출량 감소를 나타내었다. 이에 따라 본 연구에서는 선단 예혼합을 통해 국부적인 예혼합 영역을 형성하는 원리를 적용한 연소기의 배기가스 배출량과 화염 온도 분포 계측을 통해 초저 NO<sub>x</sub> 연소 특성을 실험적으로 규명하고자 한다.

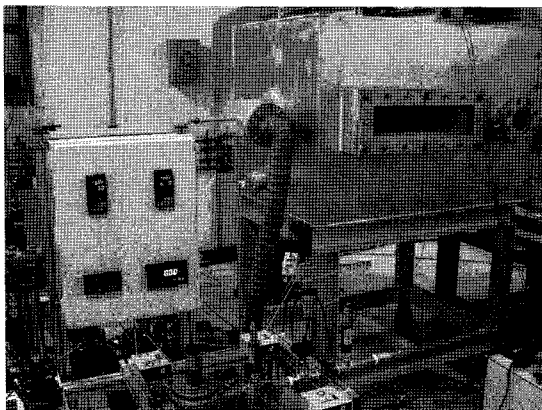
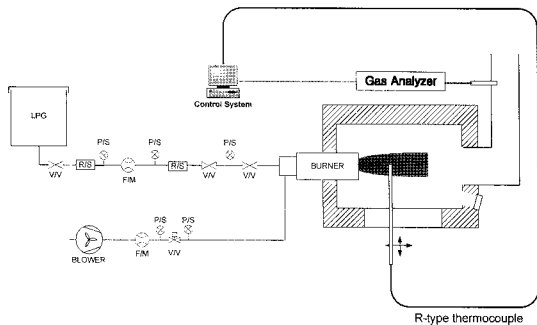


Fig.1 연소시스템 구성도 및 실물사진

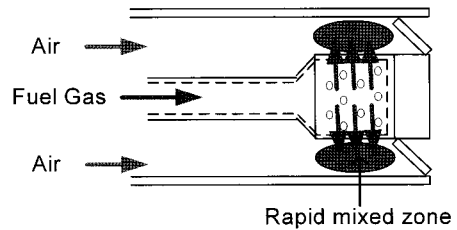


Fig.2 선단 예혼합 연소기 개념도

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 연소 시스템

연소 시스템은 Fig.1의 구성 개념도에서 보는 바와 같이 크게 실험용 연소로, 연료 공급 장치, 공기 공급 장치로 구성된다.

연소로는 가로 세로 각각 800 mm, 길이 1200 mm의 사각로(Rectangular Furnace)가 사용되었으며, 화염 관찰을 위한 강화 유리 관측창과 로 측면에 온도 계측을 위한 계측 포트(Port)가 확보되어 있으며, 배기가스 계측을 위해 배기부에 계측 포트(Port)가 설치되어 있다.

실험에 사용된 연료는 상용 액화 프로판이며, 연료 유량은 압력계를 통해 보정되어 정확한 공급이 되도록 하였다. 또한 공기는 송풍기를 통해 공급되며, 전자 유량계 및 전자 밸브를 통해 원하는 유량 값으로 제어하였다. 또한, 공급되는 공기의 양은 배기가스중의 산소의 양을 계측하여 보정하였다.

화염의 온도는 R-type(0~1450℃) 열전대를 사용해 계측하였으며, 2축 자동 이송장치를 사용해 축 방향 및 반경방향으로 계측하였다. 배기부에서의 배기가스 온도계측은 흡입 장치를 통해 NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> 농도와 배기가스 온도를 동시에 계측하였다.

### 2.2. 선단 예혼합 연소기

본 연구에 사용된 선단 예혼합 연소기는 열 부하 40,000 kcal/h로 설계되었으며 Fig.2, 3과 같이 연료 공급부, 공기 공급부, 연료 헤드부, 선화기로 구성되어있다. 연료 노즐은 연료 헤드부에서 반경방향으로 지름 0.9 mm로 한열에 10공 노즐이며 4열로 구성되었다. 연료 유속은 21 m/s이며, 연소기 출구에서의 혼합된 공기와 연료의 유속은 15 m/s로 설계하였다. 연료의 분사속도와 압력조건 및 공기 유속은 선화기 이전에서의 연료/공기혼합 상태와 이에 따른 화염 특성에 주요

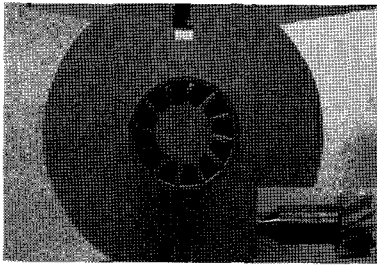


Fig.3 선단 예혼합 연소기

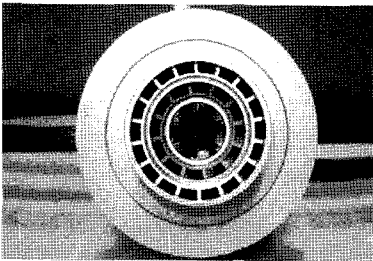


Fig.4 공기 다단 연소기

한 변수가 될 것으로 판단된다. 선회기는 선회각을 30°로 하여 화염을 보임 하도록 설계하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 실험 조건 및 방법

본 실험에서 선단 예혼합 연소기의 실험 운전 조건은 Table.1에 표시한 바와 같다. 화염의 온도는 버너출구에서 축 방향 위치(x)와 버너 직경(D)의비 (x/D)를 변화시켜 가며 반경방향의 위치(r)별로 측정하였다. 열 부하 30,000~50,000 kcal/h에서 화염 온도 분포 및 각 운전조건별 배기가스를 농도를 측정하였다. 또한, 선단 예혼합 화염과 공기 다단 화염의 연소특성을 비교 분석으로 부터 선단 예혼합 화염의 정성적인 특성 고찰을 위해 Table.2의 운전조건으로 공기 다단 연소기를 실험 측정하여 비교하였다. Fig.4는 다단 연소기의 형상으로 공기 출구를 다단으로 구성하여 화염을 연료 농후 영역과 연료 희박 영역으로 형성하게 하는 공기 다단 연소 화염을 구현하는 연소기이다.

Figure 5는 열 부하 40,000 kcal/h에서 x/D=0~4위치의 반경방향(0~32 mm) 온도 분포를 나타내며, Fig.6은 열 부하 30,000~50,000 Kcal/h 각각에 대해 최고화염 온도가 나타나는 x/D=4위치의 반경방향(0~32 mm) 온도 분포 비교를 나타낸다.

Table. 1 선단 예혼합 연소기 운전 조건

열 부하	30,000 40,000 50,000(Kcal/h)
과잉 공기비	0.9~1.4
선회기	30°
선회도	0.47
화염 온도 측정	
과잉 공기비	1.2
과잉 공기비 측정 위치	x/D = 0~4 r = 0~32(mm)

Table. 2 공기 다단 연소기 운전 조건

열 부하	40,000(kcal/h)
과잉 공기비	1.0~1.2
화염 온도 측정 위치	x/D = 0.8 r = 0~45(mm)

#### 3.2. 선단예혼합 연소기의 화염 온도 분포 및 배기가스 농도 분석

Figure 5, 6에서 보는 바와 같이 화염내의 최대 온도 영역대가 x/D=4 위치에서 형성되며, 전체적으로 1200℃ 이하를 나타낸다. 또한 반경방향으로 화염 온도 분포의 구배가 비교적 균일하게 나타남을 볼 수 있다.

x : 연소기출구로부터의 축 방향 위치(mm)

D : 버너 출구직경(mm)

r : 중심에서 반경 방향 위치(mm)

Figure 8, 9는 열 부하 30,000 kcal/h~50,000 kcal/h각각에 대해 과잉 공기비 0.8~1.3까지의 변화에 따른 NO<sub>x</sub> 및 CO의 변화량을 비교하였다. Fig.8에서 보는 바와 같이 전체 열 부하 조건에 대해 NO<sub>x</sub>의 최대값이 과잉공기비 이하의 조건에서 43 ppm이하를 나타내며, 공기량이 증가함에 따라 화염 온도 저하에 의해 NO<sub>x</sub> 배출 농도가 감소하는 일반적인 경향을 나타낸다. Fig.9에서 보는 바와 같이 CO 배출 농도는 과잉 공기비

0.9이상에서 5 ppm 이하로 배출됨을 확인하였다.

Figure 8, 9에서 보는 바와 같이 전반적으로 NO<sub>x</sub> 배출량의 최고값이 이론 공연비 조건인 과잉 공기비 1 조건에서 나타남을 볼 수 있다. 이는 일반적으로 가스연료 확산화염의 경우 이론 공연비 근처 혹은 이론 공연비 보다 약간 높은 과잉 공기비 조건에서 NO<sub>x</sub> 농도가 가장 높은 전형적인 결과를 나타내고 있다. 적용된 선단 예혼합 구조에 의해 화염이 부분적인 예혼합 화염을 형성하며 공기 유량계에서의 유량 오차에 의한 영향은 배기가스 O<sub>2</sub>의 농도를 계측함으로써 보정하였다. 배기가스 O<sub>2</sub>의 배출량의 경우 열 부하 증가에 따라 전체적으로 같은 과잉 공기비에 대하여 감소하는 경향을 나타내었다.

따라서 Fig.5~9에서 보는 바와 같이 주 연소 반응 영역대의 화염온도가 낮은 상태에서 균일하게 형성되어 Thermal NO<sub>x</sub>의 생성이 억제 된다고 판단되며, 또한 비교적 낮은 배기가스 O<sub>2</sub>에서 저 NO<sub>x</sub> 특성을 보임에 따라 선단 예혼합 연소기의 높은 연소 효율과 저 NO<sub>x</sub> 및 CO 배출 특성을 확인 할 수 있다.

### 3.3. 공기 다단 연소기와 의 배기가스 농도 및 화염 온도 비교

Figure 10에서 보는 바와 같이 공기 다단 연소기의 화염 온도 분포에 있어 Fig.12의 화염 사진에서 보는 바와 같이 화염 중심부의 연료 농후 영역과 연료희박영역 사이의 위치인 반경 방향으로 30~35 mm 정도의 위치에서 국부적인 최고 화염 온도 영역대가 나타나며 선단 예혼합 연소기는 전체적으로 청염을 나타내고 공기다단 연소기 보다 최고 화염 온도가 낮고 균일한 온도 분포를 나타내고 있다.

Figure 11에서 보는 바와 같이 과잉 공기비가 증가할수록 전체적으로 NO<sub>x</sub> 발생량이 감소하며 또한 배기가스 O<sub>2</sub> 발생량이 다단 연소기 보다 선단 예혼합 연소기가 낮게 나타남에도 NO<sub>x</sub> 발생량이 낮게 나타남을 확인하였다.

이에 따라 본 연구에 적용된 선단 예혼합을 통한 화염 구조는 공기다단 연소 구조와 달리 화염 전 영역에 걸쳐 전반적으로 낮은 수준의 과잉공기 상태를 비교적 균일하게 형성하여 화염 내 주 연소 영역에서의 반경방향 온도구배가 상당히 균일하게 유지될 수 있는 화염 구조 형성이 가능하다고 판단된다.

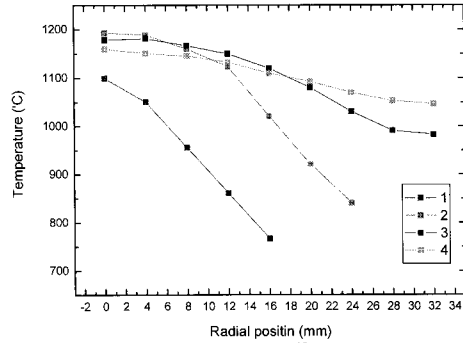


Fig.5 열 부하 40,000kcal/h에서의 화염 온도 분포

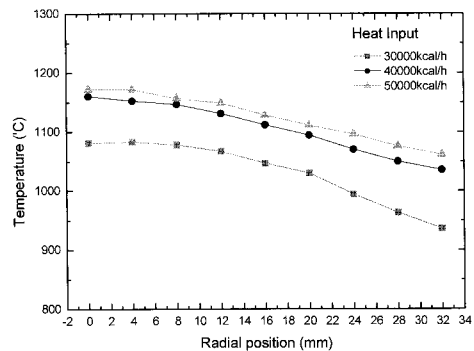


Fig.6 열 부하에 따른 반경방향 화염 온도 분포

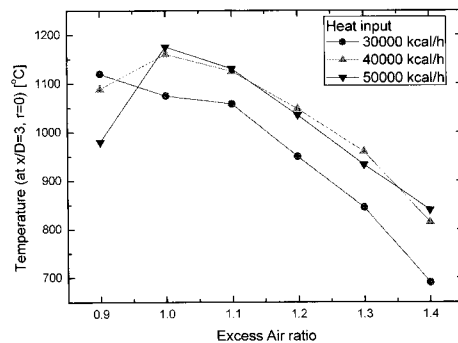


Fig.7 x/D=3, r=0인 지점에서의 열 부하별 과잉 공기비에 따른 화염 온도

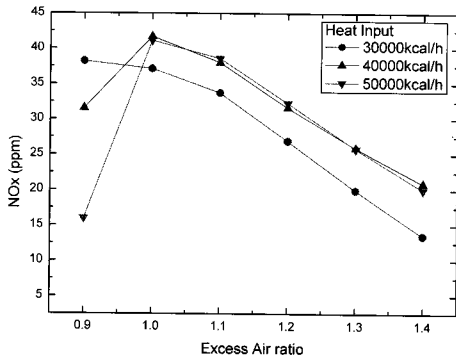


Fig.8 부하별 과잉공기비에 따른 배기가스 NO<sub>x</sub> 농도

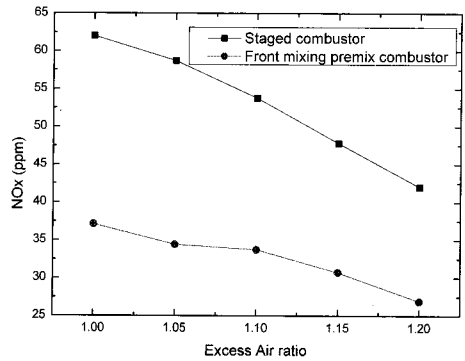


Fig.11 다단 및 선단 예혼합 연소기의 배기가스 NO<sub>x</sub> 농도

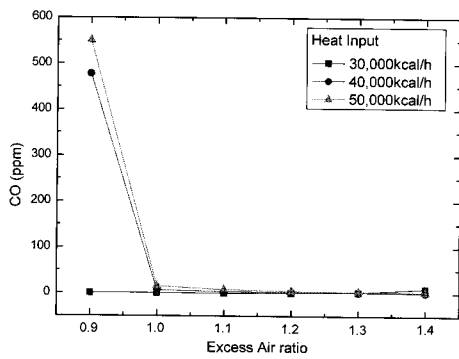
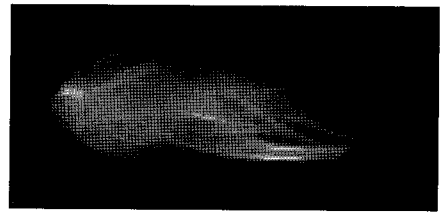
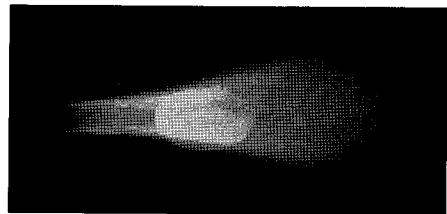


Fig.9 부하별 과잉공기비에 따른 배기가스 CO 농도



(1) 다단 연소기 화염 사진



(2) 선단 예혼합연소기 화염 사진

Fig.12 화염 가시화 결과

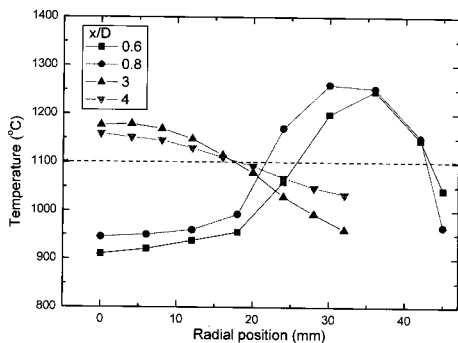


Fig.10 x/D=0.6,0.8-다단 연소기 화염 온도분포  
x/D=3,4-선단 예혼합 연소기 화염 온도분포

따라서 기존의 저 NO<sub>x</sub> 연소기에서와 같이 연료 농후 영역과 연료 희박 영역 사이에서 발생하는 국부적인 고온 영역의 형성을 피할 수 있어 Thermal NO<sub>x</sub>의 생성이 억제되는 것으로 사료된다. 또한, 연소기내의 선단 예혼합특성에 의해 확산화염에 비해 상대적으로 전반적인 균일한 연료와공기의 혼합기가 형성되어 낮은 수준의 연료희박화염을 형성한다. 따라서 상대적으로 공기다단 연소기와 달리 연료 농후 영역에서 CH라디칼에 의한 Prompt NO<sub>x</sub> 발생을 피할 수 있을 것으로 판단된다.

## 4. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 선단 예혼합 연소기 열 부하 40,000 kcal/h의 저 NO<sub>x</sub> 연소기를 설계, 제작하여 화염 온도 및 배기가스 농도를 분석하였으며, 공기 다단 연소기와 화염 특성을 비교 분석 하였다.

1) 선단 예혼합 연소 시 각각의 열 부하 조건에서의 1200℃이하의 최고 화염 온도를 나타냈으며 전반적으로 낮고 균일한 온도 분포를 형성하였고 비교적 낮은 배기가스 O<sub>2</sub> 조건에서 저 NO<sub>x</sub> 특성을 보였다.

2) 선단 예혼합 구조에 의해 화염 내 주 연소 영역에서의 반경방향 온도 분포 및 구배가 상당히 낮고 균일하게 유지되어 Thermal NO<sub>x</sub>의 생성이 억제되고 운전 조건 공기비 수준의 연료회박화염을 형성하여 상대적으로 공기 다단 연소기와 달리 연료 농후 영역에서 CH라디칼에 의한 Prompt NO<sub>x</sub> 발생을 피할 수 있을 것으로 판단 된다.

3) 선단 예혼합 연소 시 전체 열 부하 조건에 대해 NO<sub>x</sub>의 최대값이 배기가스 O<sub>2</sub> 3 %이하의 조건에서 43 ppm이하를 나타내며, 과잉 공기비 0.9 이상에서 CO의 발생량은 5 ppm 이하로 배출됨을 확인하였다.

4) 향후 선회도 및 연료 헤드부 형상 변화에 따른 선단혼합특성과 이에 따른 연소특성에 관한 영향을 파악하고 화염 내 라디칼 계측을 통한 Prompt NO<sub>x</sub> 생성 억제에 관한 메커니즘을 좀 더 명확히 규명할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 에너지관리공단의 에너지/자원기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] Hase Koji and Kori Yasumichi, "Effect of premixing of fuel gas and air on NO<sub>x</sub> formation," *Fuel*, Volume 75 Number 13, 1996, pp. 1509-1514.
- [2] Lee, T.-W., "Temperature, Velocity, and NO<sub>x</sub>/CO Emission Measurements in Turbulent Flames: Effects of Partial Premixing with Central Fuel Injection," *COMBUSTION AND FLAME* 121, 2000, pp. 378-385.
- [3] Altpfart, G. R., "Operating Experience of Sub-10ppm Low NO<sub>x</sub> Rapid Mix Burner" *Joint Power Generation Conference*, Volume 1 ASME 1996, pp. 185-194.
- [4] Bowman, Craig T., "Control of Combustion-Generated nitrogen oxide emissions: Technology driven by regulation," *Twenty-Fourth Symposium*, pp. 859-878.
- [5] Steven J and Bortz, "Apparatus and Method for reducing NO<sub>x</sub>, CO and Hydrocarbon emissions when burning Gaseous fuels," Radian Corporation Austin Tex, 1994.
- [6] 신명철, "다단 공기 공급 저 NO<sub>x</sub> 버너의 선회유동 및 연소특성에 관한 실험적 연구," *한국연소학회지*, Vol.8, No.1, 2003, pp.25-35.