

초저 NO_x 선단 예혼합 연소기의 화염 및 NO_x 배출 특성 연구

문민욱* · 김세원** · 신명철** · 김용모***

An Experimental Studies on Flame and NO_x Emission Characteristics of Rapid Mix Combustor

Min Uk Mun, Se-Won Kim and Myung-Chul Shin and Yong-Mo Kim

ABSTRACT

The objective of this research is to determine generally applicable design principles for the development of Rapid mix burner. Details operating RMB(Rapid mix burner) is designed that thermal NO_x and prompt NO_x formation be reduced through control of low peak flame temperature, and nearly uniform flame temperature by rapid mixing at the ignition point. Results from RMB(Rapid mix burner) achieving lower than 43 ppm NO_x emissions and nearly flame temperature uniform

Key Words : RMB, NO_x, Flame Temperature,

기 호 설 명

RMB : Rapid Mix Burner

X : 연소기출구로부터의 축방향 위치(mm)

λ : Excess Air ratio

D : 버너 출구직경(mm)

1. 서 론

선단 예혼합 연소기는 별도의 예혼합실 없이 선단에서 연료와 공기가 빠르게 혼합되어 예혼합 기체가 형성되도록 하는 원리의 연소기이다. 급속한 연료와 공기의 혼합은 점화지점에서 연료와 공기를 짧은 시간내에 균일하게 혼합시켜 실질적으로 Prompt NO_x의 생성을 억제한다. 급속 혼합을 이용하는 예혼합 연소기는 다음과 같은 특징을 가진다. 연료가 연소기 내부의 선단에 근접한 상류 부분에서 공급되기 때문에 매우 작은 영역에서만 예혼합 상태가 발생한다. 이것은 예혼

합 연소기에서 상존할 수밖에 없는 플래시백(Flashback)의 가능성을 없애는 효과를 가진다. 급속 혼합을 발생시키는 방법은 선회기의 형태, 연소기 내부의 연료 분사 형태 등이 밀접하게 연관되어 축 방향으로 흐르는 연소 공기와 연료 분사부에서부터 분사되는 연료를 빠르게 혼합되도록 한다.

많은 NO_x 저감기술 중 기체연료는 액체연료와는 달리 SO_x나 분진 등의 발생이 거의 없어, 대기오염방지대책에 있어서는 NO_x성분에 대해서만 고려하면 된다. 이와 같은 NO_x의 대책에 있어서도 기체연료에는 연료 중에 N성분이 함유되어 있지 않기 때문에 Thermal NO_x에 관련된 사항만 제어하면 된다.

저 NO_x 연소기의 구성을 위한 원리를 기술적으로 분류하면, 첫째 연소로 내에서 연소시 NO_x 생성을 억제하는 NO_x 억제 메커니즘, 둘째 생성

* 한양대학교

† E-mail : munminuk@kitech.re.kr

Tel : 041-589-8533 Fax : 041-589-8548

** 한국생산기술연구원

*** 한양대학교

된 NOx를 연료의 환원성을 이용하여 로 내에서 N2로 환원시키는 탈질 메커니즘 그리고 셋째 NOx 억제와 탈질이 조합된 형태의 메커니즘으로 나눌 수 있는데 이러한 메커니즘이 조합 구현된 방법으로는 현재 까지 주로 다단 연료/공기 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 NOx의 발생을 억제하게 된다. 그러나 초기의 연료 과잉 지역에서 생성되는 Prompt NOx는 여전히 남아있게 된다. 또한 일반적으로 다단 연소를 이용하는 저 NOx 연소기에서는 NOx가 줄어들게 되면 CO의 배출이 증가하는 경향이 나타난다.

그러나 초 저 NOx 연소기에서는 이런 모든 종류의 배출물질을 동시에 저감시킬 수 있는 장점이 있다. 급속 혼합과 완전 연소는 Prompt NOx를 억제함과 동시에 CO의 생성을 줄여 초 저 NOx 연소를 가능하게 한다.

일반적인 저 NOx 연소기 이론과는 반대로 초 저 NOx 연소기에서는 과잉 공기의 증가가 NOx 생성을 억제한다. 이것은 연소기가 예혼합과 거의 완벽한 혼합을 이용하여 연료가 점화 지점에서 연료가 이미 필요한 산소를 확보한 상태가 되기 때문이다. 과잉공기의 증가는 단지 최고 화염 온도를 낮추는 데만 작용한다. 이런 점은 FGR을 이용할 수 없는 연소시스템에서 매우 큰 장점을 갖게 된다.

더욱이 초 저 NOx 연소기에서는 낮은 배출가스 뿐 아니라 매우 안정적이고 짧은 화염을 얻을 수 있다는 장점이 있다.

Koji Hase⁽¹⁾ 등은 연료와 공기의 혼합율을 레이저 광흡수 기법(laser absorption method)을 통해 예혼합의 연료 농도에 따른 NOx의 배출량을 분석하여 연료 희박에서의 예혼합이 NOx 저감을 이룰 수 있다고 제시하였으며, T.-W. Lee⁽²⁾ 등은 부분 예혼합의 영향을 화염 온도, 속도, NOx/CO 농도를 분석하여 난류 화염에서 제시하였다. G.R. Altpfat⁽³⁾ 등은 선단 예혼합을 통해 국부적인 예혼합을 형성하고 FGR 효과를 더하여 10ppm 이하의 NOx 배출량 감소를 나타내었다.

이에 따라 본 연구에서는 선단 예혼합을 통해 국부적인 예혼합 영역을 형성하여 최적의 운전 조건 및 배기가스 배출량과 화염 온도 분포를 통

해 초 저 NOx 연소 특성을 실험적으로 규명하고자 한다.

2 실험장치 및 방법

2.1. 연소 시스템

연소 시스템은 Fig.1의 구성도에서 보는 바와 같이 크게 실험용 연소로, 연료 공급장치, 공기 공급장치로 구성된다.

연소로는 가로 세로 각각 800mm, 길이 1200mm의 사각로(Rectangular Furnace)가 사용되었으며, 화염 관찰을 위한 강화 유리 관측창과 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, 기화기를 통해 기화되어 공급되며, 연료 유량과 압력은 밸브와 압력 조정기로 조정된다. 또한 유량계에 의해 계측되며, 공기는 전자 유량계 및 밸브를 통해 유량변화에 따라 압력조정기와 센서에 의해 압력이 보정되어 정확한 유량이 공급되도록 하였다.

화염의 온도는 R-type(0~1450℃) 열전대를 사용해 계측하였으며, 2축 자동 이송장치를 사용해 축 방향 및 반경방향으로 계측하였다. 배기부에서의 배기가스 농도계측은 흡입 장치를 통해 NOx, CO, CO2, O2 농도와 배기가스 온도를 동시에 계측하였다.

2.2. 선단 예혼합 연소기

본 연구에 사용된 선단 예혼합 연소기는 열용량 40,000 kcal/h로 설계되었으며 Fig.2와 같이 연료 공급부, 공기 공급부, 연료 헤드부, 선회기로 구성되어 있다. 연료 노즐은 연료 헤드부에서 반경방향으로 지름 0.9mm로 한열에 10공 노즐이며 4열로 구성되었다. 각각의 연료 유속은 21m/s이며, 연소기 출구에서의 혼합된 공기와 연료의 유속은 15m/s로 설계하였다. 이는 단위면적당 연료 유량을 적게 유지하면서 높은 유속과 압력을 형성하고 연료 헤드부에서 반경방향으로 분사되어 연소공기와 선회기 이전에서 급속하게 예혼합

상태를 형성하도록 하기 위함이다. 또한 선회기는 선회각 30°로 화염 보염기로써의 역할을 하도록 설계하였다.

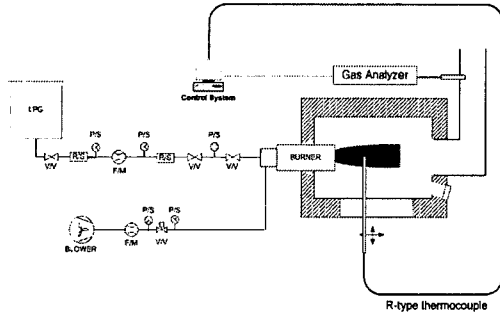


Fig.1 연소 시스템 구성도

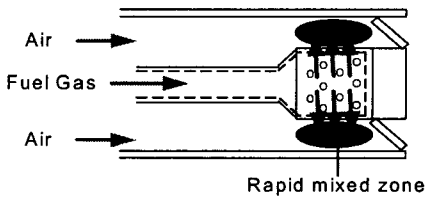


Fig.2 선단 예혼합 연소기 개략도

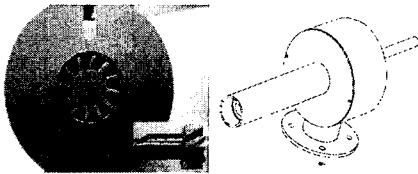


Fig.3 선단 예혼합 연소기 실제 사진

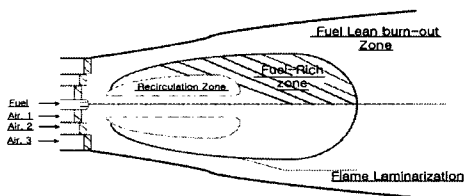


Fig.4 다단 연소기 개략도

Table. 1 선단 예혼합 연소기 운전 조건

열부하	30,000 40,000 50,000(Kcal/h)
과잉 공기비	0.8~1.3
선회기	30°
화염 온도 측정 위치	X/D : 0~4 반경방향 : 0~32(mm)

Table. 2 다단 연소기 운전 조건

각각의 공기 유량비 조건	32.5 : 30 : 37.5%
열부하	40,000(kcal/h)
과잉 공기비	1.0~1.2
화염 온도 측정 위치	X/D : 0.8 반경방향 : 0~45(mm)

3. 결과 및 고찰

3.1. 실험방법

본 실험에서 선단 예혼합 연소기의 운전 조건은 Table.1에 표시한 바와 같다. 열부하 30,000~50,000Kcal/h에서 화염 온도 분포 및 각 운전조건별 배기가스를 농도를 계측하였다. 또한, 선단 예혼합 화염과 저 NOx 연소기 기술인 공기 다단 화염의 특성을 분석하기 위해 Table.2의 운전조건(4)으로 다단 연소기를 실험 계측하여 비교하였다. Fig.4는 다단 연소기의 개략도로 공기 공급부를 다단으로 구성하여 화염을 연료 농후 영역과 연료 희박 영역으로 형성하게 하는 다단 연소 원리이다.

3.2. 부하변화에 따른 화염 온도 분포와 배기가스 농도 분석

Fig.5는 열부하 40,000Kcal/h X/D:0~4, 반경방향(0~32mm)의 온도 분포를 나타내며, Fig.6은 열부하 30,000~50,000Kcal/h에서 X/D:4 반경방향(0~32mm)의 온도 분포를 나타낸다. Fig.5,6에서 보는 바와 같이 화염내의 최대 온도 영역대가

X/D:4에서 형성되며, 전체적으로 1200°C 이하를 나타낸다. 또한 반경반향으로 화염 온도 분포가 균일하게 나타남을 확인하였다.

Fig.7,8은 열부하 30,000Kcal/h~50,000Kcal/h에서 과잉 공기비 0.8~1.3까지의 NO_x 및 배기가스 O₂의 변화량을 비교하였다. Fig.7에서 평균적으로 배기가스 O₂의 양이 상당히 낮게 분포함을 볼 수 있었다. Fig.8에서는 열부하 증가에 따른 NO_x의 최대값이 전체적으로 43ppm이하를 나타내며, 또한 열부하 30,000Kcal/h 과잉공기비 1.3에서 NO_x 15ppm으로 배출됨을 확인하였다.

따라서 Fig.5~8에서 보는 바와 같이 주 연소 반응 영역대의 화염온도가 낮은 상태에서 균일하게 형성하여 Thermal NO_x의 생성이 억제 된다고 판단되며, 또한 배기가스 O₂가 상대적으로 낮아 높은 연소 효율임에도 NO_x의 양이 낮게 생성되는 것을 통해 선단 예혼합 연소기의 높은 열효율과 저 NO_x 배출 특성을 파악 할 수 있었다.

3.3. 다단 연소기와의 배기가스 농도 및 화염 온도 비교

본 연구에서의 다단 연소기와의 배기가스 농도 및 화염 온도 비교를 위하여 선단 예혼합 연소기는 열부하 40,000Kcal/h, 과잉 공기비 1.0~1.2 사이의 배기가스 농도를 측정하였으며, 화염 온도 분포는 열부하 40,000Kcal/h, 과잉 공기비 1.2에서 축방향 X/D:4 반경반향(0~32mm)을 측정하였다.

Fig.9에서 다단 연소기의 화염 온도 분포는 주 연소 영역으로 판단되는 반경 방향 30~35mm에서 최고 온도가 국부적으로 나타나며, 선단 예혼합 연소기는 전체적으로 다단 연소기 보다 최고 화염 온도가 낮고, 균일하게 분포함을 확인하였다.

Fig.10,11에서는 과잉 공기비가 증가할수록 전체적으로 NO_x 발생량이 감소하며, 또한 배기가스 O₂ 발생량이 다단 연소기 보다 선단 예혼합 연소기가 낮게 나타남에도 NO_x발생량이 낮게 나타남을 확인하였다.

Fig.12에서는 다단 연소기는 축 방향으로 적염

을, 선단 예혼합 연소기 화염은 전 영역대 청염이 형성되는 것을 알 수 있었다.

따라서 다단 연소기는 Fig.9의 화염 온도 분포와 Fig.12의 적염 형성으로 미루어 볼 때 배기가스 재순환에 의해 화염 내 복사로 인한 열 방출로 화염 내 최대온도 영역을 반경반향 30~35mm에서 국부적으로 형성함으로써 Thermal NO_x의 생성이 현저히 줄어드는 결과를 가져오지만, 배기가스 재순환에 의한 Prompt NO_x가 생성되며, 선단 예혼합 연소기는 Fig.12에서 화염 전 영역대 청염 형성과 Fig.9의 다단 연소기 보다 낮은 수준에서의 균일한 온도 분포를 통해 Thermal NO_x 및 연료 농후 영역 생성 억제에 의한 Prompt NO_x의 발생량을 동시에 낮은 수준에서 생성하여 Fig.11에서 보는 바와 같이 선단 예혼합 연소기가 다단 연소기 보다 NO_x 발생량이 낮게 나타나는 것으로 판단된다.

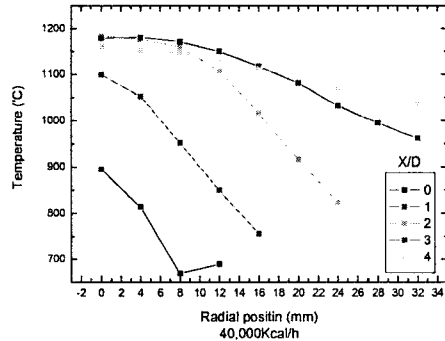


Fig.5 열부하 40,000Kcal/h에서의 화염 온도 분포

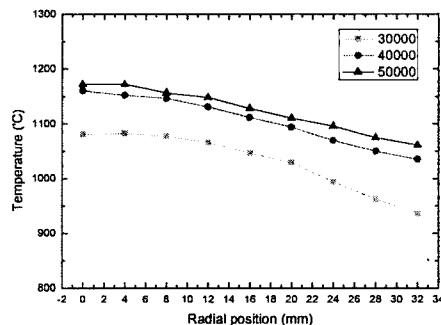


Fig.6 열부하별 반경반향에 따른 화염 온도 분포

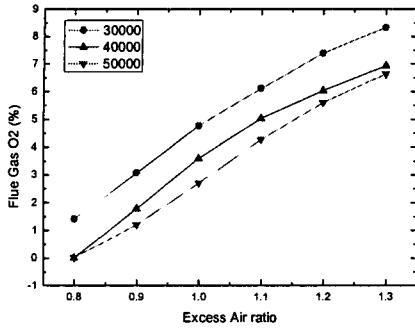


Fig.7 부하별 과잉공기비에 따른 배기가스 O₂ 농도

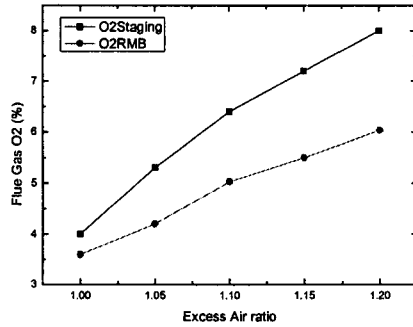


Fig.10 다단 및 선단 예혼합 연소기의 배기가스 O₂ 농도

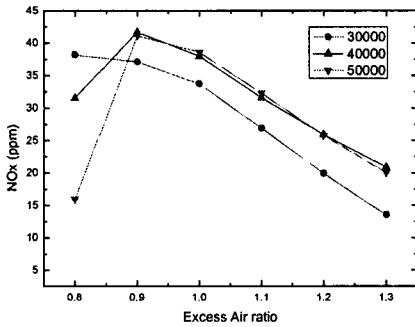


Fig.8 부하별 과잉공기비에 따른 배기가스 NO_x 농도

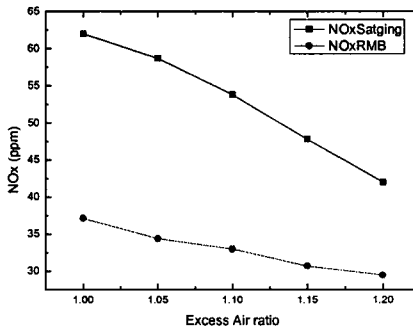


Fig.11 다단 및 선단 예혼합 연소기의 배기가스 NO_x 농도

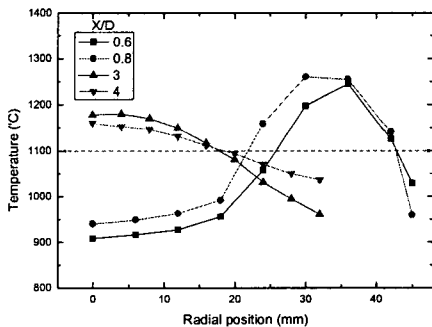


Fig.9 X/D 0.6,0.8-다단 연소기 화염 온도분포 X/D 3.4-선단 예혼합 연소기 화염 온도 분포



(1)



(2)

Fig.12 (1) 다단 연소기 화염 사진 (2) 선단 예혼합 연소기 화염 사진

4. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 선단 예혼합 연소기 열부하

40,000kcal/h의 저 NO_x 연소기를 설계, 제작하여 화염 온도 및 배기가스 농도를 분석하였으며, 다단 연소기와 화염 특성을 비교 분석 하였다.

1) 선단 예혼합 연소시 각각의 열부하 조건에서의 화염 최고 온도가 낮은 상태에서 균일한 온도 분포를 형성하여 Thermal NO_x 생성을 억제하고 배기가스 O₂가 낮아 높은 연소 효율에도 NO_x의 배출량이 낮게 나타난다.

2) 선단 예혼합 연소시 다단 연소기와의 배기가스 농도 및 화염 온도 분포 비교를 통해 선단 예혼합 연소기의 균일한 온도 분포 특성에 의하여 다단 연소기의 연료 농후 영역에 의한 Prompt NO_x 생성을 억제하여 초 저 NO_x 연소기로써 성립된다.

3) 선단 예혼합 연소시 Thermal NO_x 및 Prompt NO_x 동시 저감을 통해 초 저 NO_x 연소기로 열부하 30,000Kcal/h 과잉 공기비 1.2에서 NO_x의 발생량은 15ppm 이하로 배출됨을 확인하였다.

4) 향후 선회기 및 연료 헤드부 형상 변화에 따른 혼합특성과 여러 가지 변수들에 대한 상관관계를 규명할 예정이다.

후기

본 연구는 산업자원부 에너지관리공단의 에너지/자원기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Koji Hase and Yasumichi Kori, 1996, "Effect of premixing of fuel gas and air on NO_x formatio" Fuel 1996 Volume 75 Number 13, pp. 1509-1514.
- [2] T.-W. Lee, 2000, "Temperature, Velocity, and NO_x/CO Emission Measurements in Turbulent Flames: Effects of Partial Premixing with Central Fuel Injection" COMBUSTION AND FLAME 121 pp. 378-385.
- [3] G.R. Altpfart, 1996, "Operating Experience of Sub-10ppm Low NO_x Rapid Mix Burner"

1996 Joint Power Generation Conference Volume 1 ASME 1996, pp. 185-194.

[4] Myung-Chul Shin, 2003, "An Experimental Study on Combustion Characteristics of Air Staging Low NO_x Combustor applied to FGR and FIR According to Swirl flow Variation" The degree of master of mechanical engineering, Department of Mechanical Engineering college of Yonsei University.

[5] Craig T. Bowman, 1992, "Control of Combustion-Generated nitrogen oxide emissions; Technology driven by regulation" Twenty-Fourth Symposium, pp. 859-878.

[6] Steven J and Bortz, 1994, "Apparatus and Method for reducing NO_x, CO and Hydrocarbon emissins when burning Gaseous fuels" Radian Corporation Austin Tex.

[7] 한국생산기술연구원, 2005, "강제내부재순환 기술을 적용한 차세대 보일러용 연소기 상용화 개발" 에너지·자원기술개발사업 보고서.