

# FGR 및 FIR을 적용한 3단 저 NOx 버너의 Swirl유동 및 연소특성에 관한 실험적 연구

신 명 철\* · 김 세 원\*\* · 차 학 주\*\*\*

## An Experimental study on swirl flow and combustion characteristics of 3 staged low NOx burner applied with FGR and FIR

Myung Chul Shin, Se Won Kim and Hak Ju Cha

### ABSTRACT

The objective of this research is to determine generally applicable design principles for the development of internally staged combustion devices. Utilizing a triple annulus combustor, air staged commercial propane flame configuration are studied. For this triple air staged combustor, the angular momentum weighted by it's swirl number and air distribution ratio was observed to be the critical criteria.

An internal recirculation zone which develops on the centerline of the flame immediately downstream of the burner entraps the fuel into a fuel rich eddy. Then sufficient heat must be transferred from the flame via radiation to the chamber heat transfer surfaces, such that when the second air is introduced, peak flame temperatures are suppressed. It is experimentally found out that the total NOx emission level in this type of burner is lower than 0.75g/kg.

**Key Words** : NOx(질소산화물), Swirl(선회), Air-staging(다단공기), Low NOx burner(저 NOx버너), FGR, FIR

### 기 호 설 명

$S$	Swirl 수	$\rho$	가스 밀도
$G_{\phi}$	접선방향 운동량	$\dot{p}$	유동 정압
$G_x$	축 방향 운동량	$Q_{1st}$	1차 공기 체적 유량
$R$	버너 직경	$Q_{2nd}$	2차 공기 체적 유량
$U$	축 방향 속도	$r$	반경방향 위치
$W$	접선방향 속도	$z$	축 방향 위치

\* 연세대학교 기계공학과

† 신 명 철 mcshin@yonsei.ac.kr

\*\* 한국생산기술연구원

\*\*\* 연세대학교 기계공학과

### 1. 서 론

많은 NOx저감 기술들의 기초가 되는 개념들은 다양한 질소 산화물들의 생성에 관한 반응 경로(Reaction mechanism)에 대한 이해로부터 비롯된다.

NO(Nitric Oxide)는 연소 과정 중 발생하는 NOx(Nitrogen Oxide)의 대부분을 차지하며, 프로판(C3H8), 메탄(CH4)등 기체 상태 탄화수소 연료(Hydrocarbon fuel)의 경우, 연소 공기 중 질소의 산화(Oxidation of atmospheric molecular nitrogen)에 의한 Thermal NOx mechanism 및 Prompt NOx mechanism을 통해 생성된다.

일반적으로 이러한 반응 경로에 의해 연소 과정 중 발생하는 NOx에 대한 제어 기술은 크게 연소 후 처리 방법(Post-combustion method)과 연소 개선 방법(1)(Combustion modification method)으로 나누어지는데, 선택적 촉매 환원법(Selective Catalytic Reduction, SCR), 비 선택적 촉매 환원법(Selective Non-Catalytic Reduction, SNCR)과 같은 연소 후 처리 방법에 의한 배출 제어 연구가 많이 시도되고 있으나, 경제적 측면에 대비한 어느정도의 효율면에서 연소 개선 방법이 보다 근본적이고 효과적인 방법이 될 수 있다.

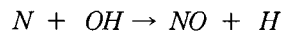
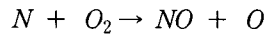
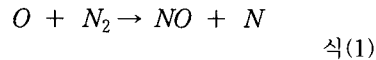
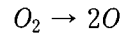
이러한 연소 개선에 의한 NOx제어 기술들 중 저 NOx 버너(Low NOx Burners)는 가장 널리 사용되는 NOx 제어 기술들 중의 하나이다. 이는 일반적으로 NOx 배출량에 있어서 약 30~50% 정도의 감소 효과를 가져올 수 있으며, 배가스 재순환(2) 등과 같은 다른 NOx제어 기술들과 병용해 적은 비용으로 비교적 큰 배출량 감소를 얻을 수 있는 장점이 있다. 저 NOx버너는 공기의 단계적 공급(Burner-induced air staging)에 의한 연소 방식과 연료의 단계적 공급(Burner-induced fuel staging)에 의한 연소 방식으로 나뉘어질 수 있다. Javier(2)등은 연료의 단계적 공급에 의한 연소 방식을 적용해 Semi-industrial scale의 버너와 prototype 버너의 연소 특성에 관한 비교 분석을 통해 NOx배출량 감소를 위한 최적의 운전 조건을 제시하였으며, Schmittl(3)등은 천연 가스(Natural gas)를 연료로 사용하는 버너의 NOx배출 특성이 연료 노즐의 형상과 연소 공기의 Swirl강도에 따른 화염의 유동장 형성에 크게 의존함을 보였다. 이에 따라 본 연구에서는 연소 공기의 단계적 공급을 적용한 Semi-industrial scale의 3단 연소 저 NOx버너에서 NOx배출량 저감을 위한 Parametric study를 통해 운전 조건 별 NOx 배출량에 따른 연소 특성을 규명하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 NOx 생성 Mechanism

#### 2.1.1 Thermal NOx mechanism

공기 중 질소의 직접적인 산화에 의한 NOx생성은 다음과 같은 4가지의 기체상 화학 반응 경로로 구성되어 있다.



여기서 N-atom에 관한 steady-state와 평형 상태로부터 계산된 O-atom 농도를 가정하면 이론적인 최대 NO 생성률은 식 (2)로 주어진다.

$$d[NO]/dt = 1.45 \times 10^{17} T^{-1/2} \exp[-69460/T(k)] \quad \text{식(2)}$$

$$[O_2]_{eq}^{1/2} [N_2]_{eq} \text{ mol/cc s}$$

식 (1)에서 보는 바와 같이 NO생성률은 화염 온도와 O2의 농도에 의존하며, 특히 21K정도의 화염 온도 상승시 생성률은 2배정도 증가하게 되므로 화염 온도의 변화에 매우 민감하다.

위와 같은 NOx생성 mechanism 고찰로부터 얻을 수 있는 NOx 생성 제어에 관한 결론은 다음과 같다.

- ① 최고 화염 온도 영역의 온도를 낮춤으로써 Thermal NO 생성을 최소화 할 수 있다.
- ② 최고 화염 온도가 국부적으로 fuel rich한 영역에서 발생하는 연소 조건을 만들어 이미 생성된 NOx를 N2로 환원시킬 수 있다.
- ③ 주 연소 영역 이후 hydrocarbon radical들이 존재할 수 있는 연소 조건을 만들어 화염 후류 영역에서 NOx를 N2로 환원시킬 수 있다.

### 2.2 Air staging in low NOx burner

#### 2.2.1 Internal Staging

본 연구에서 적용된 Low NOx Burner는 단계적 연소의 원리를 버너 자체에서 구현하는 개념으로써 Burner air port를 다단으로 구성함으로

써 화염을 Fuel Rich zone과 Fuel Lean zone으로 형성되게 하는 Internal Staging의 방법을 사용해 화염의 내부 재 순환 영역(Internal Recirculation Zone)의 발달을 촉진시킨다.

화염 내부의 재 순환 영역 형성을 위한 Swirl 유동의 개념은 Swirl number S로 나타내어지고 다음과 같이 정의된다.

$$S = \frac{(Angular\ Momentum)}{R(Axial\ Momentum)}$$

$$= \frac{G_{\phi}}{G_x R}$$

(R = exit radius of the burner nozzle) 식(3)

where,

$$G_{\phi} = \int_0^R (Wr)\rho U 2\pi r dr$$

$$G_x = \int_0^R U\rho U 2\pi r dr + \int_0^R p 2\pi r dr$$

여기서, U와 W는 각각 유동의 axial방향과 tangential방향의 속도 성분이며 p는 유동의 정압이다.

일반적으로 Swirl 유동에서의 내부 재 순환 영역은 화염 안정화의 근원으로 사용된다. 연료와 산화제가 서로 섞이면서 반응할 때 열과 함께 화학적으로 반응하는 species들이 생성되고 이들이 고온 상태에서 역압력 구배에 의한 reverse flow에 의해 버너 출구 근처로 center line을 따라 끌려 내려오면서(trapped) 화염 전파를 위한 ignition source를 구성하게 된다.

Fig.1에서 보이는 바와 같이 다단으로 나누어진 air port(multiple annuli air port)의 사용으로 인한 Internal staging은 다음과 같은 유동의 물리적인 효과를 나타낸다.

- ① 높은 primary air swirl이 강한 내부 재 순환 영역을 형성해 fuel rich 영역에서 효과적인 fuel entrapment를 유도한다.
- ② Secondary air 와 Tertiary air가 화염면과 후류의 fuel lean 영역을 형성해 미연 탄소분의 완전 연소를 유도한다.

위와 같은 유동의 물리적인 현상으로 인해 fuel rich 영역에서 sooty flame의 형성으로 로 벽으로의 복사로 인한 충분한 열방출이 일어나 화염의 국부적인 고온 영역대의 온도를 저하시켜 thermal NO mechanism에 의한 NOx생성을 억제하며, 유기 질소 화합물을 함유한 연료를 사용

할 경우 fuel rich영역에서 연료의 체류 시간 증가로 인해 Fuel NOx가 N2로 환원될 수 있는 원인을 제공하게 된다.

따라서, 버너 각 단의 air port별 swirl number와 공기 분배비 조절에 의한 Internal staging 효과의 최적화가 필수적이다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 연소 시스템

연소 시스템은 Fig.2의 개략도에서 보는 바와 같이 크게 실험용 연소로, 연료 공급장치, 공기 공급장치, 배가스 냉각 및 재 순환 장치의 4부분으로 구성된다.

연소로는 지름 1000mm, 길이 3000mm의 원형로(Cylindrical Furnace)가 사용되었으며, 화염 관찰을 위한 강화 유리 관측창과 로 상부 및 측면에 온도 계측을 위한 계측 port가 확보되어 있으며, 배가스 계측을 위해 stack부에 배가스 계측 port가 설치되어 있다.

실험에 사용된 연료는 상용 액화 propane이 사용되었으며, vaporizer를 통해 기화되어 공급되며, 연료 유량과 압력은 밸브와 regulator로 조정되어, rotameter에 의해 계측된다. 연소 공기의 공급은 blower를 사용해 버너의 1,2,3단 air port로 나누어져 공급되며, 공기 유량도 연료와 동일하게 rotameter에 의해 계측되며, 연료와 공기량 계측에 사용된 rotameter는 orifice에 의해 그 유량이 압력 조건에 맞게 보정되었다.

화염의 온도는 R-type 열전대를 사용해 계측하였으며, 2축 traverse를 사용해 축 방향 및 반경방향으로 구동된다. stack부에서의 배가스 농도 계측은 sampling probe를 통해 NOx, CO, CO2, O2 농도와 배가스 온도가 동시에 계측된다.

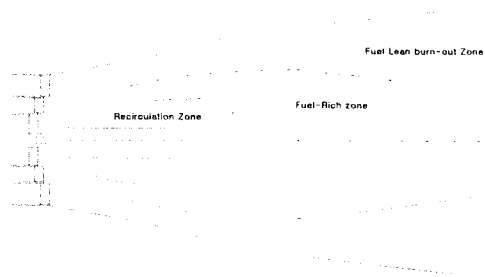
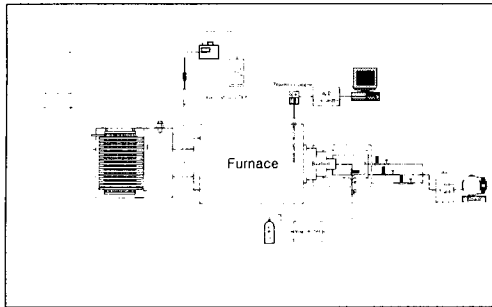


Fig.1 Schematic diagram of Air-Staging Low NOx Burner



**Fig.2** Schematic diagram of experimental apparatus

**3.2 버너**

버너는 Air Staging Low NOx Burner의 개념을 적용해 3단으로 나누어진 공기 공급 port를 가진 구조로서 연료 노즐은 지름 3.5mm의 8공 hole 노즐이며, 분사각은 60°이다. 각 공기 출구 단에는 swirl vane이 설치되어 있으며, 각 단의 swirl vane 각도는 1단 60°, 2단 45°, 3단 30°이다.

**3.3 Laser Sheet Scattering Image(LSI)**

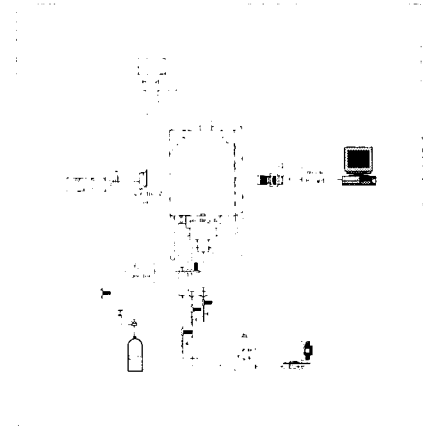
LSI장치는 본 연구에 적용된 연소기의 유동장을 가시화하여 연료와 공기의 정성적인 혼합 특성을 분석하기 위한 실험 장치이다.

공급 광원으로는 5W Argon-Ion Laser를 이용하였으며 Optic Fiber와 Cylindrical Lens를 이용하여 평면광을 생성하였다. 생성된 평면광은 버너의 측면에서 유동 진행 방향 단면에 평행하도록 조사하였다. 조사한 광은 연료와 섞여 공급된 자에 의해 산란되고 이 산란광을 ICCD(4Quik05A)를 이용하여 촬영하였으며 촬영된 이미지는 Image Board(DT3152, Data Translation)를 통하여 컴퓨터에 저장, 영상처리하였다. 공급 입자는 평균 입경 약 1 $\mu$ m의 TiO<sub>2</sub>를 이용하였으며 Fludized Bed type의 입자공급 장치를 통해 균일하게 공급하였다. 공급 가스는 Propane 대신 이와 분자량과 점성이 비슷한 CO<sub>2</sub> 가스를 사용하였다.

**4. 실험 결과 및 고찰**

**4.1 연료/공기 혼합기 유동 특성**

Fig. 4. 는 영상처리과정을 거치지 않은 raw image이다. ICCD에서 촬영된 640×480 pixels의



**Fig.3** Schematic diagram of Laser Sheet Scattering Image

흑백 이미지 Intensity는 Image Board를 통해 0에서 255의 값을 가지는 디지털 데이터로 변환되어 컴퓨터에 저장되고, 50장의 이미지를 취득하여 MATLAB을 이용하여 각 Pixel의 평균 상대 강도(Mean Relative Intensity)와 표준편차(Standard Deviation)를 구하였다. Fig. 5. 와 6은 각각 평균 상대 강도와 표준편차를 나타낸 것이다.

Fig. 5. 에서 강도가 높게 나오는 부분은 연료에 혼합되어 공급된 TiO<sub>2</sub> 입자에서 산란되는 산란광이 강하게 나오는 영역으로 입자의 수밀도(Number Density)가 높은 것을 나타내는 것으로 다시 말해 이는 연료 과농 영역을 의미한다. 반대로, 강도가 낮은 영역은 주위 공기와의 활발한 혼합으로 인해 상대적으로 연료가 희박한 영역을 나타낸다.

또한 Fig. 6. 에서 보는 바와 같이 표준 편차가 높은 부분은 난류 난동(Turbulent Fluctuation)이 강하게 일어나는 영역으로 연료와 공급 공기의 혼합이 활발히 일어나는 shear layer 부근을 의미한다. 이와 반대로, 표준 편차가 낮은 부분은 난동 성분이 미약한 영역을 의미하고 이 영역에서는 상대적으로 낮은 혼합율을 나타낸다.

Fig. 5. 에서 Fig. 8. 는 각각의 조건별 이미지 처리한 평균 상대 강도와 표준편차를 나타낸 결과이다. 평균 상대 강도의 경우 버너 출구 부분에서 가장 높은 수치를 나타내며 유동의 전단층(Shear layer)을 따라 비교적 높은 수치를 나타내는 영역이 위치한다. 이는 연료와 공기의 혼합기가 이 영역을 따라 위치함을 의미하며 실제 화염의 Stoichiometric line 또한 이 영역내에 존재하게 된다. 표준 편차의 경우, 유동의 전단층(Shear layer)을 따라 높은 수치를 나타내는 영

역이 발달하며 이는 서로 다른 상대속도를 지닌 각 단 공기의 전단력이 크게 발생하는 영역을 나타내고 2차 공기의 유동 영역에 포함된다.

동일한 2차 공기량의 결과를 비교해보면 Q1st/Q3rd비가 증가함에 따라 중앙재순환영역(Central Recirculation Zone)이 증대되는 것을 확인할 수 있다. 또한 연료 과농 영역의 폭이 증가함을 볼 수 있는데, 이는 버너 출구 속도의 증가로 인해 전회수가 증가하고 주위 공기와의 전단 응력(shear stress)이 증대되어 혼합특성(Mixing Characteristics)이 증가하여 발생한 것으로 사료된다. 또한 높은 수치를 나타내는 표준편차 영역의 폭이 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이 또한 출구 속도의 증가로 인해 전단층에서의 혼합이 활발히 진행되고 있음을 의미한다.

평면 레이저광을 이용한 유동 가시화를 통해 연료와 공기의 혼합특성을 살펴 볼 수 있었으며 이를 통해 공기 분배비에 따른 연료 혼합도를 정성적으로 살펴볼 수 있었다. 또한 이를 통해 최적의 혼합도를 나타내는 공기 분배비를 파악할 수 있었으며 내략 2nd 40% case, Q1st/Q3rd 0.33~0.77 부분에서 최적의 혼합특성을 나타냄을 확인할 수 있었다.

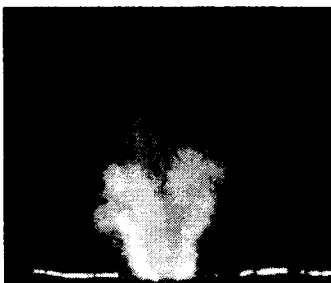


Fig. 4. Raw Image

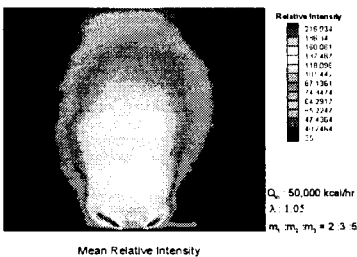


Fig. 5.

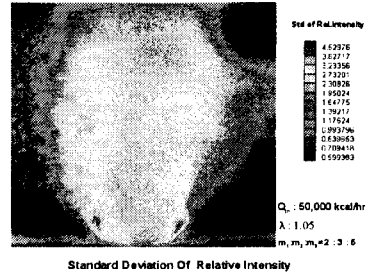


Fig. 6.

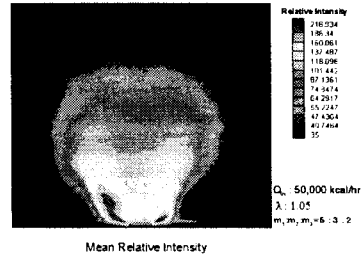


Fig. 7.

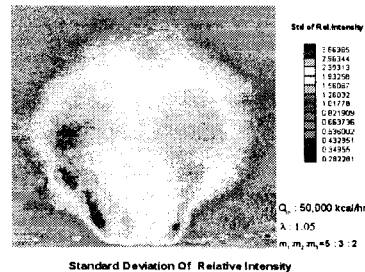


Fig. 8.

## 4.2 공기 유량 분배비에 따른 NO농도 및 화염온도

### 4.2.1 NO 농도

공기 유량 분배비에 따른 배가스 농도 및 화염온도는 열부하 200,000kcal/hr에서 과잉 공기비 1.05, 1.1, 1.15의 경우에 대해 2nd air 30%와 40%의 조건에서 각각 1단과 3단 공기 유량의 비

(Q1st/Q3rd)를 0.33에서 3까지 변화시켜가며 측정하였다.

Fig.9~Fig.11에서 보는 바와 같이 EINO값에 따른 최적의 유량비는 2nd air 30%와 40% 경우 모두 최저 유량비인 0.4와 0.33에서 형성되고 있다. 이는 1단 공기의 swirl number를 0.6이상의 high swirl을 적용해 비교적 적은 1단 공기량으로 효과적인 fuel entrapment를 이룰 수 있는 tangential momentum을 확보해 fuel rich한 영역을 형성하고, 2단, 3단으로 갈수록 0.6이하의 low swirl 적용해 tangential momentum보다 큰 axial momentum으로 화염면과 후류영역으로의 원활한 공기 공급을 이루어 Internal staging의 효과가 극대화되어 화염 내부의 국부적인 고온 영역대가 줄어들어 따른 전반적인 화염온도의 저하로 인해 Thermal NO생성을 억제하게 되는 현상이다.

2nd air 30%와 40% 경우에서 최저 유량비인 0.4와 0.33에서의 정상적인 EINO값을 과잉공기비 별로 분석해 볼 때 Fig.5에서 보는 바와 같이 과잉 공기비 1.1에서 2nd air 30%일 경우 0.75의 가장 낮은 EINO값을 보이고 있다.

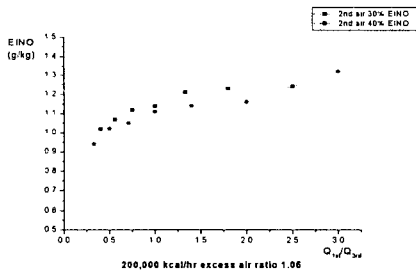


Fig.9 NO concentration for air distribution ratio

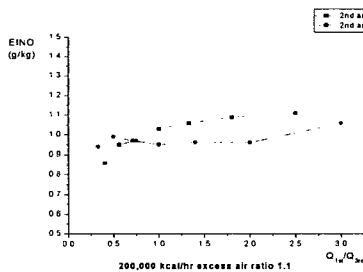


Fig.10 NO concentration for air distribution ratio

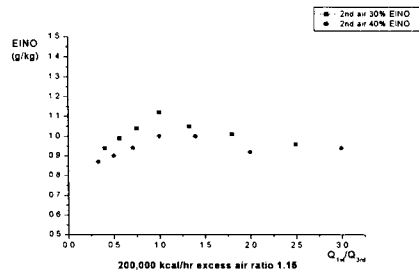


Fig.11 NO concentration for air distribution ratio

#### 4.2.2 화염온도

화염 온도는 과잉 공기비 1.1의 조건에서 최적 공기 유량비의 경우에 대해 버너 출구단으로부터 축방향으로 각각 6cm와 13cm의 위치에서 반경 방향의 온도 분포를 Fig.12에서 Fig.15에 나타내었다. 각 부하 별로 축 방향 위치에 따른 반경 방향의 온도 분포에서 fuel rich영역인 z=6에서의 온도 분포는 화염 내 복사로 인한 열 방출로 인해 주 연소 영역인 z=13에서의 온도보다 상당히 낮게 분포됨을 볼 수 있다. 또한, 주 연소 영역대의 최고 화염온도는 1300°C 정도로서 국부적인 화염의 온도 상승이 상당히 억제되어 있음을 볼 수 있다.

Fig.14와 Fig.15는 2nd air 30%와 40%에 대한 화염 온도의 비교를 나타내고 있다. z=13위치의 고온 영역대에서 2nd air 30%인 경우의 화염온도가 2nd air 40%인 경우의 화염온도 분포가 반경 방향의 대부분 위치 영역에서 낮게 나타나 앞 절에서 언급한 2nd 공기 량에 따른 정상적인 최저 EINO 데이터와 비교해 볼 때 Thermal NO 생성 mechanism 측면에서 온도에 크게 의존하는 경향을 잘 나타내 주고 있다.

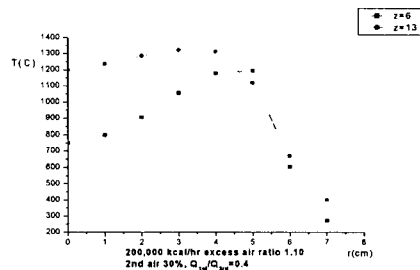


Fig.12 Flame temperature for air distribution ratio

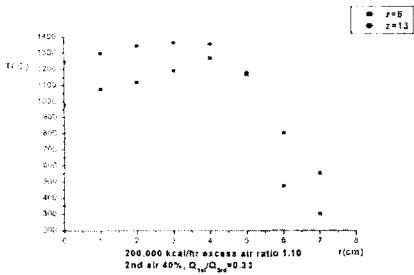


Fig.13 Flame temperature for air distribution ratio

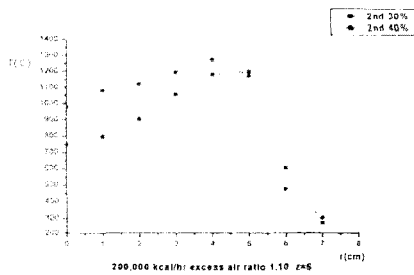


Fig.14 Flame temperature for air distribution ratio

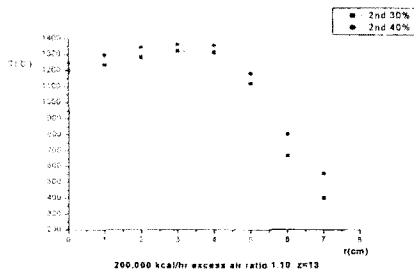


Fig.15 Flame temperature for air distribution ratio

### 4.3 FGR에 따른 배가스 배출특성

배가스 재순환 연소 기술은 연소장치내에 배기가스의 일부를 재순환시킴으로써 로내 유량 증가에 따른 열용량 증가에 의해 로내 온도를 낮추고 연소 영역에서 산소 농도를 희석시켜 NO<sub>x</sub>의 생성을 억제하는 기술로써, 재순환 양은 각 연소 조건별로 상세한 실험 및 결과 분석에 의해 최적의 양을 산출하여야 한다.

지금까지 배가스의 농도 분포와 화염 온도 측정

을 통한 parametric study에 의해 도출된 Air staging Low NO<sub>x</sub> Burner의 200,000kcal/hr에서 최적 운전 조건인 과잉 공기비 1.1, 2nd air 30%, 1단과 3단 공기 유량비 0.4의 조건에서 배가스 재순환을 수행하였다. 배가스 재순환률은 5%에서 35%까지 적용하였으며, 재순환 배가스는 버너의 2단 공기 공급 port에 공기와 함께 공급하였다.

그림 102.와 그림 103.에서 나타나는 바와 같이 2단 공기 공급 port에 재순환 배가스를 공급함으로써 화염내 fuel rich 영역과 fuel lean 영역사이의 국부적인 이론 공연비 영역대의 단위 부피당 열용량 증가에 의해 매우 효율적인 최고 화염 온도 영역대의 온도 저하를 이루어 배가스 재순환을 수행하였을 경우와 수행하지 않았을 경우를 비교해 보면 배가스 재 순환율 35%에서 EINO 값은 0.32g/kg으로 NO감소율에 있어서 약 37%의 감소율을 보인다. 그림 104.에서 그림 107. 은 FGR을 수행하기 전과 30% FGR rate에서의 실제 화염 사진이며, FGR rate가 증가함에 따라 화염 내부의 sooty flame영역이 전반적으로 청염으로 변해감을 볼 수 있다.

### 4.4 FIR(Fuel Injection Recirculation)

본 연구에서는 배기가스 중 일부를 연료와 혼합하여 연소기에 주입하는 FIR방식을 적용하여 실험을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

FIR(Fuel Injection Recirculation)은 현재까지 그 효과에 대한 물리적, 화학적 특성이 규명된 바가 없으나 통상 실험적인 연구 결과 NO<sub>x</sub> 감소율에 있어서 대략 5%의 FIR rate로 23%의 FGR 효과를 나타낼 수 있다고 알려져 있다. FIR rate에 관한 명확한 정의는 내려져 있지 않지만, 본 연구에서는 총 연료의 질량유량에 대한 재순환 배가스의 질량 유량의 비를 정의하여 적용하였다.

$$FIR\ rate = \frac{m_{re}}{m_F} \times 100 \quad \text{식 (4)}$$

그림 108.에서 보는 바와 같이 FGR에 비해 상대적으로 매우 적은 유량의 재순환 배가스를 사용해 EINO값을 0.6g/kg 정도까지 줄일 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 Pilot 규모(300,000 kcal/hr)의 저 NO<sub>x</sub> 연소기를 설계, 제작하여 실험적 연구를

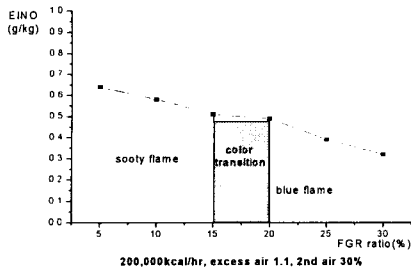


Fig 16. NO concentration for FGR

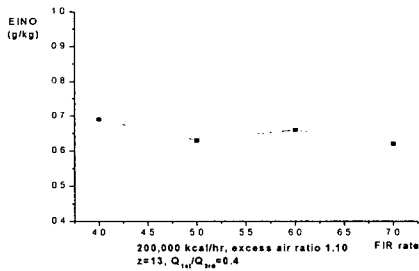


Fig 17. NO concentration for FGR.

수행하였다. 실험변수로는 과잉공기비, 3단 연소시의 공기분배비, 각단의 선회도의 저 NOx 파라미터를 200,000 kcal/hr의 열부하에서 상세한 NOx 분포 및 온도 분포를 측정하였다.

- (1) 3단 Air Staging시 선회도에 따른 NOx 발생 특성을 분석하였으며, 1단을 강선회, 2, 3단은 약선회시 최적임을 밝혔다.
- (2) 3단 연소시 각단의 공기 배분 비율 변화에 따른 NOx 특성을 분석하였으며 주어진 열용량에 대한 최적 공기 분배비는 1.5~2 : 3~4 : 4.5~5 범위임을 밝혔고, 본 연구에서의 정량적인 EINO값은 0.75정도로 나타났다.
- (3) 저 NOx를 위해 주어진 열용량에 대한 최적 공기량을 분석을 위해 공연비별 화염 특성 분석, 공연비 변화에 따른 연소 상태 파악을 통한 최적 공기 과잉률 도출하였으며, 화염 내 산소 농도와 화염온도에 따른 배가스 특성으로 볼 때 과잉공기비 1.05~1.1 사이에서 최적의 결과를 나타내었다.

### 후 기

본 연구는 산업자원부의 에너지 자원기술개발사업의 지원으로 수행되었다.

### 참고문헌

- [1] Craig T. Bowman, 1992, "Control of combustion-generated nitrogen oxide emissions: technology driven by regulation," Twenty-fourth symposium(Int.) on combustion/The combustion Institute, pp. 859-878.
- [2] J. M. Ballester, C. Dopazo, N. Fueyo, M. Hernandez, P. J. Vidal, 1997, "Investigation of low-NOx strategies for natural gas combustion," Fuel Vol. 76, No. 5, pp.435-446.
- [3] P. Schmittel, B. Gunther, B. Lenze, W. Leuckel, H. Bockhorn, "Turbulent swirling flames: Experimental investigation of the flow field and formation of nitrogen oxide," Engler-Bunte-Institute, Combustion technology University of Karlsruhe(TH), Germany.
- [4] J. M. Beer, "Combustion aerodynamics."
- [5] Adrian Hsieh, et al, 1998, "Scaling Laws for NOx Emission Performance of Burners and Furnaces from 30 kW to 12 kW," Combustion and Flame 114 : 54-80.
- [6] G. J. R. Newbold, and S. R. Turns, "Measurement and Prediction of NOx Emissions from Unconfined propane Flames from Turbulent-Jet, Bluff-Body, Swirl and Precessing Jet Burners."