

다단 공기 공급 저 NO_x 버너의 선회유동 및 연소특성에 관한 실험적 연구 -다단공기공급에 의한 연소특성(I)-

신명철* · 안재현** · 김세원***

A Study on Swirl Flow and Combustion Characteristics of Air Staged Low NO_x Burner

Myung Chul Shin, Je Hyun Ahn and Se Won Kim

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, the detailed combustion characteristics 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 of NO_x emission.

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 the peak flame temperatures are suppressed when the second air is introduced. It is experimentally found out that the total NO_x emission level in this type of burner is below 50ppm(3% Ref. O₂) at optimum operating conditions.

Key Words : NO_x(질소산화물), Swirl(선회), Air-staging(다단공기), Low NO_x burner (저NO_x버너), Internal staging combustion(화염 내 단계적 연소)

기 호 설 명

S	Swirl 수	$V(v')$	반경방향 속도(반경방향 rms 속도)
G_{ϕ}	접선방향 운동량	ρ	가스 밀도
G_x	축 방향 운동량	p	유동 정압
R	버너 직경	T	화염 온도
$U(u')$	축 방향 속도(축 방향 rms 속도)	k	난류 운동 에너지
$W(w')$	접선방향 속도(접선방향 rms 속도)	r	반경방향 위치
		z	축 방향 위치

1. 서 론

저 NO_x 연소기술의 기초가 되는 개념들은 다양한 질소 산화물들의 생성에 관한 반응 경로

(reaction mechanism)에 대한 이해로부터 비롯된다.

NO(nitric oxide)는 연소 과정 중 발생하는 NO_x(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 NO_x 반응 경로 및 prompt NO_x 반응 경로를 통해 생성된다.

일반적으로 이러한 반응 경로에 의해 연소 과

* 연세대학교 기계공학과

† 연락처자 mcshin@yonsei.ac.kr

** 한양대학교 기계공학과

*** 한국생산기술연구원

정 중 발생하는 NO_x에 대한 제어 기술은 크게 연소 후 처리 방법(post-combustion method)과 연소개선 방법(combustion modification method)으로 나누어지는데, 일반적으로 중대형 급 이상 규모의 보일러 및 기타 연소 시스템의 경우 선택적 촉매 환원법(Selective Catalytic Reduction, SCR) 및 비 선택적 촉매 환원법(Selective Non-Catalytic Reduction, SNCR)과 같은 연소 후 처리 방법에 의한 배기가스 배출 제어 연구가 많이 시도되고 있으나, 연소 개선에 의한 배기 가스 농도 제어가 충분히 이루어 질 경우 이러한 후처리 장치에 관한 비용 절감을 이룰 수 있다는 경제성 측면에서 연소 개선에 의한 방법은 연소 배기 가스 제어에 있어서 보다 근본적이고 효과적인 방법이 될 수 있다.

이러한 연소 개선에 의한 NO_x제어 기술들 중 저 NO_x 버너(low NO_x burners)기술은 가장 널리 사용되는 NO_x 제어 기술들 중의 하나이다.

이는 일반적으로 NO_x 배출량에 있어서 약 30~50% 정도의 감소 효과를 가져올 수 있으며, 배가스 재순환(FGR), FIR(Fuel Injection Recirculation) 등과 같은 다른 NO_x제어 기술들과 병용해 적은 비용으로 비교적 큰 배출량 감소를 얻을 수 있는 장점이 있다. 저 NO_x버너는 크게 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[1]등은 연료의 단계적 공급에 의한 연소 방식을 적용하여 중소형 규모의 버너와 prototype 버너의 연소 특성에 관한 비교 분석을 통해 NO_x배출량 감소를 위한 최적의 운전 조건을 제시하였다. Schmittell[2]등은 천연 가스(natural gas)를 연료로 사용하고 과잉 공기비가 1.2정도로 연료 희박 조건인 버너의 같은 선회 강도 조건에서 연료의 축방향 운동량이 감소할 수록 NO_x배출량이 감소함을 보였다. 또한, 연료와 공기의 유속비가 일정할 경우 선회류의 강도가 클수록 버너 근처의 재순환 영역에서 재순환 유량 및 유속의 증가로 인해 화염내 국부적인 고온 영역대에서의 체류시간이 감소함에 따라 NO_x 배출량이 감소하는 것을 증명하였다.

이에 따라 본 연구에서는 연소 공기의 단계적 공급을 적용한 20kw급 3단 연소 방식의 저 NO_x 버너에서 NO_x 배출량 저감을 위해 각 연소용 공기 주입구 별 공기 공급 유량과 버너 출구 각각에서의 선회각 변화에 의한 선회류의 운동량 조절을 통해 효율적인 선회류의 구성이 화염온도와 이에 따른 thermal NO_x 생성에 미치는 영향 및 최적의 배가스 배출 특성을 나타내는 운전 조건을 제시하고자 한다.

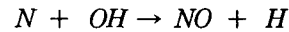
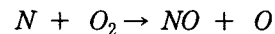
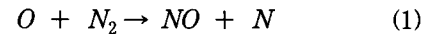
2. 이론적 배경

2.1 NO_x 생성 Mechanism

연료에 질소 성분이 함유되지 않은 가스 연료의 연소시 발생하는 NO_x 생성 경로를 정리하면 다음과 같다.

2.1.1 Thermal NO_x mechanism

공기 중 질소의 직접적인 산화에 의한 NO_x 생성은 Zeldovich(1946)에 의해 최초로 제안되고 Lavoie(1970) 등에 의해 보완된 다음과 같은 4가지의 기체상 화학 반응 경로로 구성되어 진다.[3]



여기서 N-atom에 관한 steady-state와 평형 상태로부터 계산된 O-atom 농도를 가정하면 이론적인 최대 NO 생성률은 식 (2)로 주어진다.[4]

$$\frac{d[NO]}{dt} = \frac{1.45 \times 10^{17}}{\sqrt{T}} \exp \frac{-69460}{T(k)} [O_2]_{eq}^{1/2} [N_2]_{eq} \text{ mol/cc s} \quad (2)$$

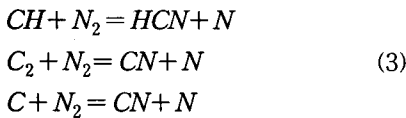
식 (2)에서 보는 바와 같이 NO생성률은 화염 온도와 산소의 농도에 주로 의존하고, 일반적으로 thermal NO_x가 발생하기 시작하는 최저 온도는 1500K 정도이며[5], 특히 Sarofim(1976) 등에 의해 제시된 바에 따르면 1800K이상의 화염 온도에서 21K정도의 화염 온도 상승시 NO생성률은 2배이상 증가하게 되므로 화염 온도의 변화에 매우 민감하다[6].

2.1.2 Prompt NO_x 반응 경로

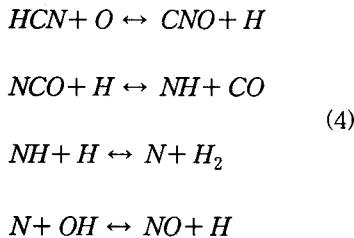
Zeldovich에 의해 제시된 thermal NO_x 반응 경로는 연료가 농후한 화염 상태에서의 NO_x 생성을 설명할 수 없다. 따라서, 연소용 공기중 질소 분자가 미연 탄화수소기(unburned hydrocarbon fragment)에 의해 중간 생성물을 형성하고 이 중간 생성물들이 다시 차례로 NO_x로 산화되는 반응 경로가 제시되었는데 이것이 바로 prompt

NOx 반응 경로이다. Prompt NOx 반응경로는 당량비가 연료 농후 상태인 화염에서의 NOx 생성률을 나타내는데 thermal NOx 반응 경로에 의한 NOx 생성률과 prompt NOx 반응 경로에 의한 NOx 생성률을 비교하면, 산소 원자의 농도가 분자 상태의 산소 농도와 평형상태에 있다고 가정할 때 당량비 1.2정도의 연료 농후 화염에서 superequilibrium 상태의 산소 원자 농도에 의해 NOx 생성률이 높아지게 된다.

이러한 화염의 연료 농후 영역에서 연료 중 탄화 수소기와 질소 분자의 반응 경로는 다음과 같다[3].



위와 같은 반응 경로를 통해 생성된 HCN과 CN 등 중간 생성물은 아래와 같은 반응 경로를 통해 연소용 공기 중의 질소 분자가 결합하게 되고 연속적인 기체상 반응을 통해 질소가 산화되어 질소 산화물(NOx)을 생성하게 되거나 생성된 NOx가 다시 질소 분자로 환원되는 과정을 거쳐 된다.



위와 같은 NOx 생성 반응 경로의 고찰로부터 얻을 수 있는 화염 내에서의 NOx 생성 제어에 관한 결론은 다음과 같다.[6]

- 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 저 NOx 버너에서의 다단 공기 연소

2.2.1 화염 내에서의 단계적 연소(internal staging)

본 연구에서 적용된 저 NOx 버너는 연소용 공기의 입출구를 다단으로 구성하고 버너 출구에서

연료 노즐의 가장 근처에 있는 선회기의 선회각을 크게 하고 이후 2단과 3단 출구에서 점차적으로 선회각이 감소하는 선회기를 적용해 각 단으로 공급되는 공기의 유량에 따라 화염을 연료 농후 영역과 연료 희박 영역으로 좀 더 효과적으로 형성되게 하는 화염내 단계적 연소(internal staging)의 방법을 사용해 화염의 내부 재순환 영역(Internal Recirculation Zone)의 발달을 촉진시키게 하는 원리로 고안되었다.

화염 내부의 재순환 영역 형성을 위한 선회 유동의 개념은 선회수 S로 나타내어지고 본 연구에서 적용된 선회수와 그 정의는 다음과 같다[7-8].

Table 1 Swirl angle and Swirl number

	선회각	선회수
1st	60°	0.9
2nd	45°	0.66
3rd	30°	0.42

$$\begin{aligned}
 S &= (\text{Angular Momentum}) \\
 & / R(\text{Axial Momentum}) \\
 & = \frac{G_\phi}{G_x R}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

(R = exit radius of the burner nozzle)
where,

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

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

여기서, U와 W는 각각 유동의 축 방향과 반경 방향의 속도 성분이며 p는 유동의 정압이다.

일반적으로 swirl 유동에서의 내부 재순환 영역은 화염 안정화의 근원으로 사용된다. 연료와 산화제가 서로 섞이면서 반응할 때 열과 함께 화학적으로 반응하는 화학종들이 생성되고 이들이 고온 상태에서 역압력 구배에 의한 재순환 유동에 의해 버너 출구 근처로 중심축을 따라 끌려 내려오면서(trapped) 화염 전파를 위한 착화 근원(ignition source)을 형성하게 된다. 이때 유동의 전단층(shear layer) 즉, 재순환 영역의 경계면에서 반경 방향 및 접선 방향의 난류도가 축방향의 난류도에 비해 상대적으로 증가하면서 난류

운동 에너지(turbulent kinetic energy)의 증가로 인해 이 부분에서 연료와 산화제의 혼합이 활발히 일어나면서 화염내 국부적인 최고 온도 영역을 형성하게 된다.

Fig. 1에서 보이는 바와 같이 다단으로 나뉘어진 연소용 공기 출구(multiple annuli air port) 조건에 따른 화염 내 단계적 연소는 다음과 같은 유동의 물리적인 효과를 나타낸다[6].

① 높은 primary air swirl이 강한 내부 재순환 영역을 형성해 연료 농후 영역에서 효과적인 fuel entrapment를 유도한다.

② 2단과 3단에서의 연소용 공기가 화염면과 후류의 fuel lean 영역을 형성해 미연 탄화수소의 완전 연소를 유도한다.

위와 같은 유동의 물리적인 현상으로 인해 화염내 연료 농후 영역에서 sooty flame의 형성으로 벽으로의 복사로 인한 충분한 열방출이 일어나 전체적인 화염 영역의 온도를 저하시켜 thermal NO 반응 경로에 의한 NOx생성을 억제하게 된다. 또한, 유기 질소 화합물을 함유한 연료를 사용할 경우 연료 농후 영역에서 연료의 체류 시간 증가로 인해 Fuel NOx가 N₂로 환원될 수 있는 원인을 제공하게 된다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 연소 시스템

연소 시스템은 Fig. 2의 개념도에서 보는 바와 같이 크게 실험실 규모의 연소로, 연료 공급장치, 공기 공급장치의 3부분으로 구성된다. 연소로는 가로와 세로 각각 550mm, 높이 1000mm의 사각로(rectangular furnace)가 사용되었으며, 화염 관찰을 위한 석영 유리 관측창과 로상부 및 측면에 온도 계측을 위한 계측부가 확보되어 있으며, 배가스 계측을 위해 stack부에 배기가스 계측 port가 설치되어 있다.

실험에 사용된 연료는 상용 프로판이 사용되었으며, 연료 유량과 압력은 밸브와 regulator로 조정되어, rotameter에 의해 계측된다. 연소 공기의 공급은 송풍기를 사용해 버너의 1,2,3단 공기 공급부로 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 이송 장치를 사용해 측 방향으로 10mm, 반경방향으로 3mm씩 구동하면서, data 획득 장치에 의해 data가 취득된다. Stack부에서의 배가스 농도 계측은 sampling probe를 통해 가스 분석기에서 NOx, CO, CO₂, O₂ 농도와 배가스 온도가 동시에 계측된다.

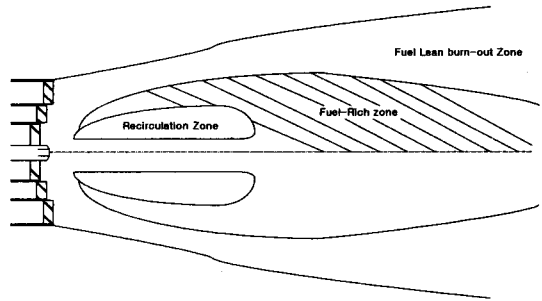


Fig. 1 Schematic diagram of air staged combustion

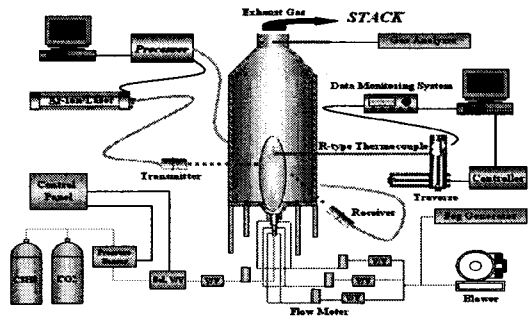


Fig. 2 Schematic diagram of experimental set up

3.2 버너

버너는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 3단으로 나누어진 공기 공급부를 가진 구조로서 버너 출구에서 연료 노즐은 8공의 다공 hole 노즐이고 분사각은 60°이며, 각 공기의 출구단에는 선회류를 주기 위한 선회기가 설치되어 있으며, 각 단의 선회기의 Vane 각도는 1단 60°, 2단 45°, 3단 30°이다.

3.3 유동 계측 시스템

버너의 선회기에 의한 유동의 축방향, 반경 방향 및 접선 방향의 평균 유속과 RMS 속도의 계측은 비 연소장에서 PDA 시스템을 사용하여 계측되었다.

공급 광원은 5W 아르곤-이온(Argon-Ion) 레이저로서 40MHz 주파수 변환(frequency shift) bragg cell에서 514.5nm의 녹색광(green beam)과 488nm의 청색광(blue beam)으로 나누어지며, 광 fiber를 통해 발광부(transmitter)에서 초점거리 400mm의 렌즈를 통해 조사되어 fringe를 형성한다. 입자 발생기를 사용한 seeding 입자는 평균 직경 1 μ m로서 버너의 공기 공급부에 seeding되었으며, fringe에서의 입자에 의한 광 산란신호는

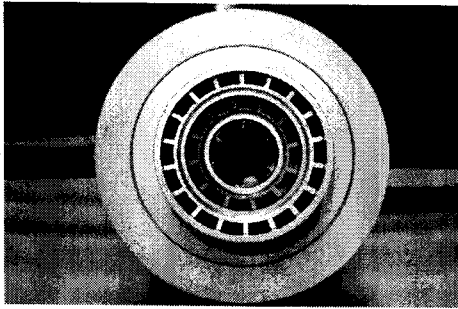


Fig. 3 Picture of Burner

수광부(receiving optic)에서 발광부와 마찬가지로 초점거리 400mm의 렌즈를 통해 받아들여진다. 발광부와 수광부는 3축 자동 이송장치에 의해 축방향으로 15mm, 반경방향으로 3mm간격으로 이송되었으며, 산란(scattering) 각은 전방 산란(forward scattering)으로 60°가 적용되었다.

seeding 입자는 송풍기의 upstream manifold를 통해 입자 발생기에서 발생하는 입자의 양을 균일한 농도를 유지한 상태로 하여 공급되었으며, 선회류와 같은 난류 유동장에서 난류도가 비교적 큰 폭으로 변화되고 유동장 내에서 입자의 농도가 특정한 계측 지점에서 심하게 변할 경우 data rate과 validation rate가 변하면서 각 실험 조건별 정량적인 계측에 있어 오차율이 증가하나 입자 발생 농도와 광원의 강도, 그리고, 적절한 유속 범위의 설정으로 오차율을 줄일 수 있으며, 본 연구에서의 data rate과 validation rate은 각각 평균 10khz와 99.5%정도를 유지하였다.

유동의 좌표 설정은 Fig. 4와 같고, 비 연소장에서의 유동계측을 위한 연료 공급은 상용 프로판(propane)을 대체하여 분자량이 같은 CO₂ 가스를 사용하였다.

3.4 실험 조건 및 실험 방법

본 연구에서 적용된 3단 저 NOx 버너의 저 NOx 연소 특성의 고찰을 위해 선회류의 비 연소장에서의 유속과 연소장에서의 화염 온도 및 배가스 농도 계측이 이루어 졌으며, 앞서 언급한 바와 같이 1단 공급 공기의 강한 선회 강도를 통한 재순환 영역의 형성과 화염 후류에서의 미연 탄화수소의 산화를 위해 각 단의 swirl vane 각도는 1단 60°, 2단 45°, 3단 30°를 적용하였으며, 고정된 출구 면적에서 각 단의 공기 공급 유량을 변화시키기에 따라 축방향 및 접선 방향의 유속 변화에 따른 운동량이 달라지면서 선회 강도가 변하게 되고 재순환 영역에서의 당량비 및 체류시간이 달라지게 된다. 이에 따라 표 1.에서 보는 바와 같이 2단 공급공기의 유량과 열부하 및 전체 당량비를 고정하고 재순환 영역의 형성과 화

염 후류에서 미연 탄화수소의 산화에 크게 작용할 것으로 판단되는 1단과 3단 공기의 공급 유량을 변화시키며 비 연소장에서의 유속과 연소장에서의 화염 온도를 축방향 및 반경방향에 따라 계측하였으며, 각 유량 조건별 배가스 농도 계측을 수행하였다.

또한, 1단과 2단의 선회 각도를 45°로 고정하고 3단 공기 공급부에 연소용 공기를 주입하지 않고 1, 2단의 유량을 조절해 출구 유속을 일정하게 한 후 1, 2단 만으로 일반적인 high swirl flame을 구성하였다. 따라서, 이 경우 다단 연소의 경우와 같은 열부하 및 당량비 조건에 대해 일반적인 높은 선회 강도를 가지는 화염의 배가스 농도를 계측하여 이를 다단 연소 시 최적 조건을 나타내는 경우와 비교 분석할 수 있는 근거를 제시하였다.

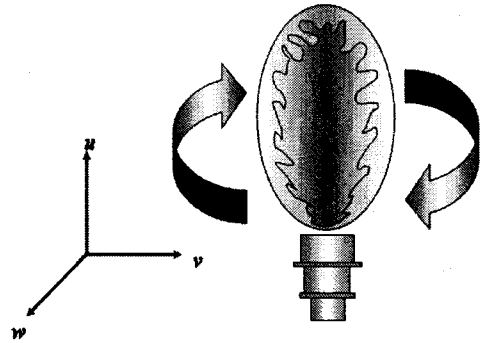


Fig. 4 Coordinate system of swirl flow

Table 2 Experimental conditions

실험 조건			
열부하	20kW		
당량비	0.9		
	전체 공기량 중 공급 분배 비율(%)		
선회각	1단 60°	2단 45°	3단 30°
case1	25	30	45
case2	30	30	40
case3	35	30	35
case4	40	30	30
case5	45	30	25

실험 조건			
열부하	20kW		
당량비	0.9		
	전체 공기량 중 공급 분배 비율(%)		
선회각	1단 45°	2단 45°	3단 30°
case-1	40	60	0

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 공기 유량 조절에 따른 선회류의 유동 특성

본 연구에 적용된 3단 저 NO_x 연소기의 유동 특성을 고찰하기 위하여 비연소시 앞에서 언급한 바와 같이 각각의 공기 공급부에서의 공기 공급 비율을 변화시켜가며 각 방향의 유속 및 난류 운동에너지를 상세 계측하였다.

Fig. 5에서 Fig. 10은 선회 유동의 축방향 높이에 따라 각 유량 조건별 속도 분포가 나타나 있다. 축방향 속도 분포에 있어서 1단 공기의 공급 유량이 증가할수록 접선 방향의 운동량이 증가하고 축방향 운동량이 상대적으로 감소함에 따라 선회도가 증가하고 이에 따라 재순환 영역에서의 압력 구배가 증가하면서 보다 급격한 속도 구배가 형성된다.

접선 방향 속도 분포의 경우 Fig. 7에서 8과 같이 반경 방향에 있어서 1단 공기 공급 유량이 증가할수록 중심축선 방향으로 접선 방향 속도의 증가가 나타나며, 이에 따라 반경 방향으로의 압력 구배가 증가하여 재순환 영역이 확대되고, 축방향 유속 분포에서 나타나는 바와 같이 보다 높은 축방향 압력 구배의 영향으로 화염의 upstream 방향으로 향하는 속도가 증가하여 재 순환 유량이 증가하게 된다.

Fig. 11에서 14는 선회류의 rms 속도 계측에 따라 식(6)으로 정의되는 무차원화 된 난류 운동 에너지(이하 난류 운동 에너지를 나타내고 있다. 여기서 U_{ref} 는 $4Q/\pi R^2$ 으로 정의되며 공급되는 연료와 공기의 총 체적유량(Q)을 연소기 출구 면적으로 나눈 평균 출구 유속이다.

$$k = \frac{\sqrt{u'^2 + v'^2 + w'^2}}{U_{ref}} \quad (6)$$

일반적으로 난류 운동 에너지는 선회 유동의 재 순환 영역 경계면인 유동의 전단층을 따라 급격히 증가하며, 이 영역에서의 난류운동에너지가 증가함에 따라 연료와 산화제의 활발한 혼합이 이루어져 화염내 국부적인 고온 영역대를 형성하게 된다.

Fig. 11에서 14에 보는 바와 같이 선회류의 upstream 근처 높이에서는 반경 방향으로 선회류의 전단층을 따라 급격히 증가하는 난류 운동 에너지의 일반적인 경향을 볼 수 있고 후류쪽으로 갈수록 증가율이 점차 완만하게 감소한다. 또한, 1단 공기의 공급유량이 증가할수록 난류 운동 에너지가 증가하며, 1단 공기의 선회도가 증가하면서 반경 방향 및 접선 방향의 rms 속도 증가가 축방향의 rms 속도 증가보다 상대적으로 커짐에

따라 내부 재순환 영역 경계면 주위에서 난류 운동 에너지가 전반적으로 상승하여 이 영역에서 보다 활발한 연료와 산화제의 혼합이 이루어지는 것으로 판단된다. 따라서, case 1에서 5로 갈수록 화염의 전체 온도 분포가 상승하고 화염 내 고온의 영역대가 상대적으로 크게 분포함에 따라 연소장에서 thermal NO_x의 생성 조건에 유리하게 작용될 것으로 판단된다.

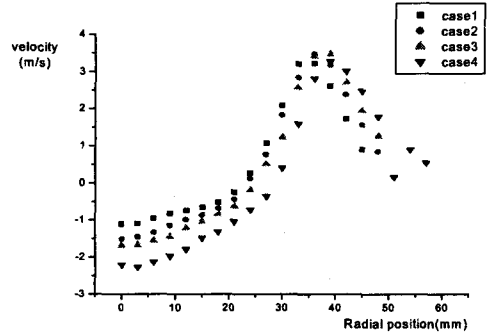


Fig. 5 Radial profiles of axial velocity at z=30mm

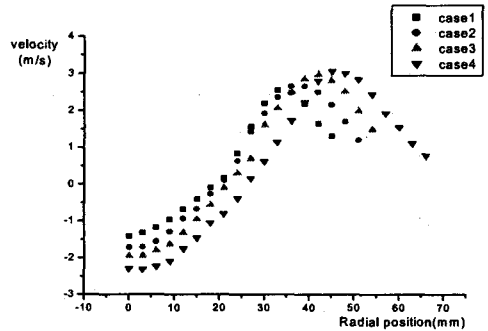


Fig. 6 Radial profiles of axial velocity at z=45mm

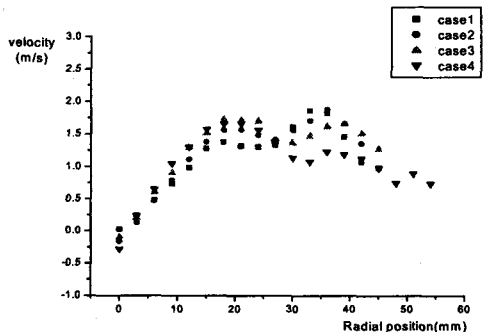


Fig. 7 Radial profiles of tangential velocity at z=30mm

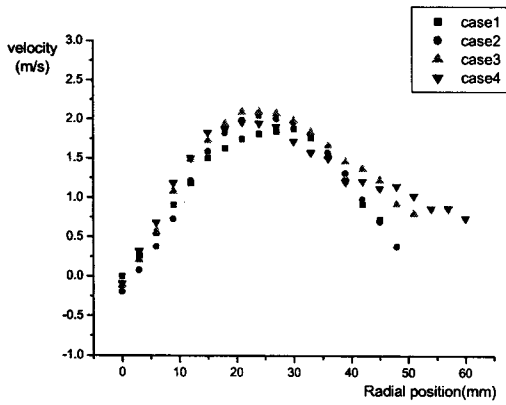


Fig. 8 Radial profiles of tangential velocity at z=45mm

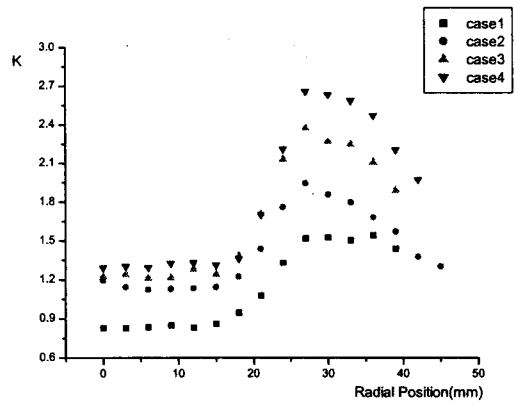


Fig. 11 Radial profiles of turbulent kinetic energy at z=15mm

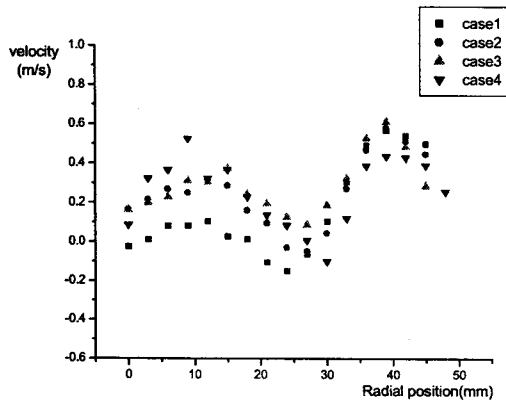


Fig. 9 Radial profiles of radial velocity at z=30mm

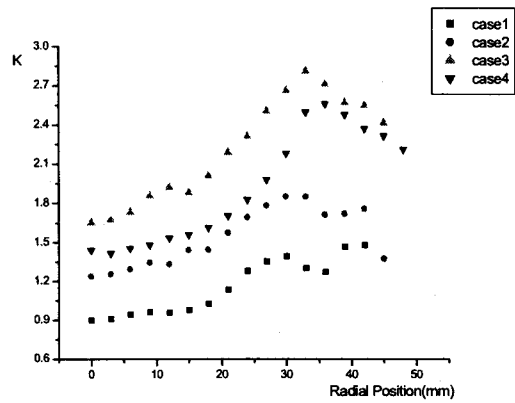


Fig. 12 Radial profiles of turbulent kinetic energy at z=30mm

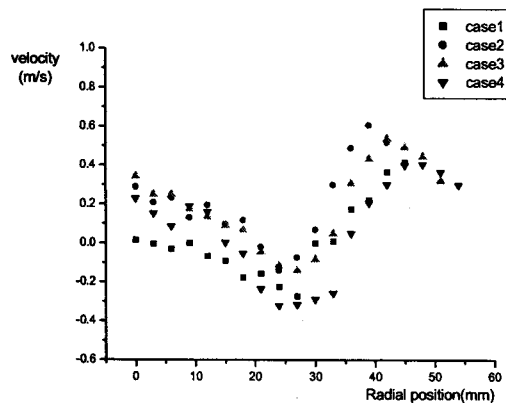


Fig. 10 Radial profiles of radial velocity at z=45mm

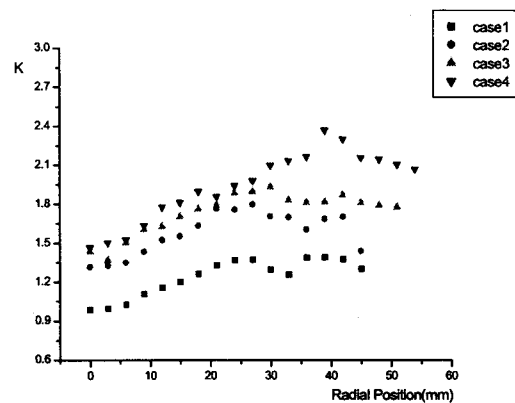


Fig. 13 Radial profiles of turbulent kinetic energy at z=45mm

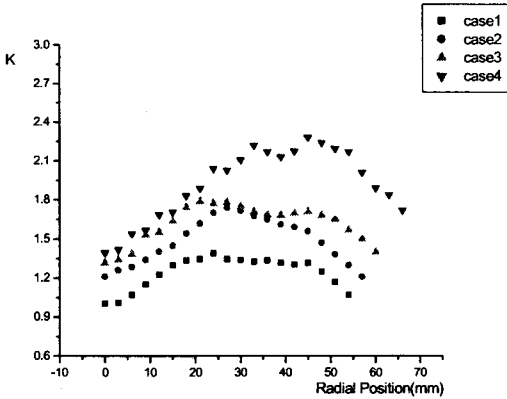


Fig. 14 Radial profiles of turbulent kinetic energy at $z=60\text{mm}$

4.2 공기 유량 조절에 따른 화염온도 및 배기 가스 농도

본 절에서는 연소시 3단의 공기 분배비를 case 별로 변화시켰을 때의 화염 내 상세 온도 분포 및 배기가스의 분포를 상세 계측하였다. 이때 공급되는 연료와 공기의 온도는 약 20°C 로서 상온을 유지한 상태로 공급하였다.

4.2.1 화염 온도

Fig. 15에서 18은 각 유량 조건별 화염 내 축방향의 높이에 따른 반경방향의 화염 온도 분포를 나타내고 있다. 전체적으로 case 1,2의 화염 온도와 case 3,4,5의 화염 온도가 최고 온도를 나타내는 주 연소 영역대 높이의 반경 방향 온도 분포에 있어서 case 1,2의 경우 화염 내부의 재순환 영역에서의 온도 증가가 상당히 억제되어 있는 반면 case 3,4,5의 경우 이 부분에서 온도 증가가 억제되지 않아 상당히 높게 나타나는 큰 대조를 보이고 있고, 1단 공기의 공급 유량이 증가할수록 전반적인 온도 분포가 상승하며, 반경 방향으로 고온의 영역대가 넓게 나타난다.

1단 공기의 공급 유량이 증가함에 따른 화염 온도 분포의 상승과 내부 재순환 영역 경계면에서의 국부적인 온도 증가는 각 단의 공급 공기 유량 변화에 따른 선회류의 전반적인 난류 운동 에너지 분포의 증가와 반경 방향에 따라 유동의 전단층에서 급격히 증가하는 난류 운동에너지의 증가와 같은 경향을 보이고 있으며, 이는 난류 운동에너지가 증가함에 따른 연료와 공기 혼합율이 증가하기 때문이다.

1단 공기의 공급유량이 작을 경우 앞서 언급한 바와 같이 재순환 영역의 내부로 유입되는 유량의 감소로 인해 화염 내부에서의 당량비 조건이

연료가 상당히 농후한 상태가 되어 화염 내부에서 soot생성이 활발히 일어나 이로 인한 로 벽으로의 복사 열 방출이 충분히 일어남으로 인해 그림에서 보는 바와 같이 이 부분에서의 온도 상승이 거의 일어나지 않고 상당히 억제되어 있으며 이러한 영역대를 지나면서 유동의 전단층에서 난류 운동 에너지의 증가에 따라 급격한 온도의 상승이 일어난다. 반면에 1단 공기 공급 유량이 전체 공기유량의 30%를 넘어 증가할 경우 반경 방향 및 접선 방향의 운동량 증가가 축 방향 운동량의 증가보다 상대적으로 커지면서 내부 재순환 영역의 형성이 활발해 지고, 재순환되는 연소용 공기의 유량 증가로 인해 화염 내부 영역의 당량비 조건이 이론 공연비 조건으로 도달해 감에 따라 화염 내부 영역에서 온도가 점차 상승하고 화염 내 최고 온도가 나타나는 유동의 전단층에 이르기까지 고온의 영역대가 형성된다.

따라서, 1단 공기의 공급 유량이 증가할수록 각 case별 최고 화염의 온도는 최고 화염 온도가 가장 작게 나타난 case 1에서 1230°C , 가장 높게 나타난 case 5에서 1300°C 의 사이로서 최고 70°C 정도의 차이를 나타내 비교적 각 case 별로 큰 차이를 나타내지 않지만 화염의 전반적인 온도 분포가 상승할 뿐만 아니라 1단 공기의 공급 유량이 작을 경우 보다 화염 내 고온의 영역대가 상대적으로 크게 분포함에 따라 연소장에서 화염 내 연소 생성물들의 고온 영역대에서 체류 시간이 증가하게 되어 thermal NOx의 생성 조건에 매우 유리하게 작용하게 된다.

4.3.2 배기 가스 농도

Fig. 19와 20은 연소용 공기의 공급 유량 변화에 따른 각 case별 배출가스의 농도변화를 나타내고 있다. 앞 절에서 공기 공급 유량 변화에 따른 온도 변화에 대한 고찰에서 나타난 바와 같이 1단 공기의 공급 유량이 증가할수록 전반적인 난류 운동 에너지 분포의 증가에 따른 화염 온도 상승과 화염 내부로 재순환되는 유량의 증가로 인해 화염 내부의 온도가 상승하며, 이에 따라 고온 영역대에서 연소 생성물들의 체류시간이 증가하여 화염 전체에서 생성되는 NOx의 발생량이 증가하게 되고 이는 곧 화염 온도에 크게 의존하는 thermal NOx 생성의 반응 경로에 의한 영향이 지배적이라 할 수 있다.

한편, 1단 공기의 공급 유량이 작을 경우 앞서 언급한 바와 같이 전반적인 화염 내 온도 분포가 낮아 상대적으로 NO 발생량이 줄어드나 화염 내부로 재순환되는 유량이 상대적으로 작기 때문에 연료가 상당히 농후한 당량비 조건이 형성되어 CO의 발생이 증가하게 된다.

본 연구에서 적용된 3단 공기 공급 저 NOx 연소기의 경우 운전 조건별 최저 NOx값은 case

1에서 42ppm(3% O₂)을 보였으나, 이 조건에서 상대적으로 높은 CO값이 계속되었으며, 1단 공기의 양이 증가할수록 CO농도가 큰 폭으로 저감되었다. 또한, 다단 연소가 아닌 선회 화염(case1-1)의 경우 NOx농도는 약 60ppm 정도이며, 이는 최저 NOx값을 기준으로 약 33%정도의 저감효과를 나타낸다. 따라서, CO농도를 고려한 조건별 NOx농도의 변화에서 본 연구에 적용된 연소기의 최적 운전 조건은 case 2근처로 판단되며, 이때의 NOx농도는 약 50ppm정도이다.

1단 공기의 공급 유량이 작은 case 1, 2의 경우 화염의 전반적인 온도 분포가 열전대에서 복사열에 의한 열 손실로 인해 온도가 어느 정도 낮게 나타나고 있다 할지라도 thermal NOx 발생의 최저 한계 온도인 1230℃(≒1500K)를 초과하는 최고 화염 온도의 영역대가 case 3, 4, 5 경우의 화염처럼 넓게 분포하지 않아 이 영역대에서 연소 생성물들의 체류시간이 매우 작게 되어 NOx생성에 있어서 thermal NOx 생성의 반응 경로에 의한 영향은 상당히 작다고 할 수 있다. 따라서, 이 경우 발생하는 NOx는 case 1, 2의 화염에서 화염 내부의 당량비가 연료가 매우 농후한 조건으로 형성됨에 따라 이 영역과 화염 후류 부분에서 hydrocarbon fragment에 의한 연소 공기 중 질소의 fixation 즉, prompt NOx 반응 경로에 의한 NOx의 발생이 어느 정도 영향을 미칠 것으로 판단되며, 이는 배기 가스 농도 측정 실험 결과에서 나타나는 것처럼 case 3, 4, 5 경우의 화염에서 화염 온도에 크게 의존하는 thermal NOx 발생보다 작은 것으로 판단된다.

4.5 일반 선회 화염과 다단 공기 공급에 의한 선회 화염의 비교

일반적으로 다단 공기 공급이 아닌 선회 화염에 있어서 선회도가 높을 경우의 NOx저감 원리는 전체 화염의 당량비가 이론 공연비 근처일 경우 내부 재순환 영역에서의 당량비가 연료 농후가 됨에 따라 화염 내부에서의 열방출로 인해 전체 화염 온도가 감소하여 NOx 농도가 줄어들고 전체 화염의 당량비가 연료 희박 영역으로 갈 경우 선회도가 높을수록 내부 재순환 영역에서 축방향으로의 압력 구배가 커짐에 따른 유속의 증가로 인해 재순환되는 연소 생성물들의 체류시간이 감소하여 전체적인 NOx 농도가 감소하게 된다. 그러나, 선회도가 커짐에 따른 반경 방향 및 접선 방향의 운동량 증가로 인해 재순환 영역이 반경 방향으로 확대되어 유동의 전단층 영역 즉, 최고 화염 온도를 나타내는 영역이 커짐에 따라 NOx 저감율에 어느 정도의 한계가 있다. 따라서, 각기 다른 선회각과 공급 공기의 유량이 조절된 경우 1단 공급 공기의 반경 방향 및 접선 방향 운동량을 증가시켜 내부 재순환 영역에서의

효과적인 열 방출을 이루고 3단 공급 공기의 축방향 운동량을 증가시켜 재순환 영역의 확장에 따른 화염 내 고온 영역의 확대를 최소화 할 수 있어 좀 더 효율적인 NOx 생성 억제 가능성이 가능하다.

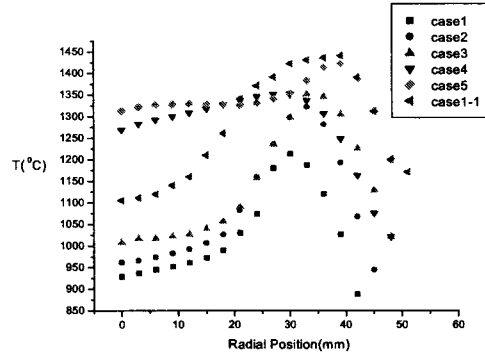


Fig. 15 Radial profile of flame temperature at Z=35mm

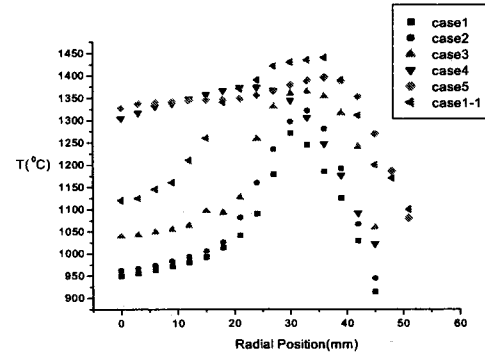


Fig. 16 Radial profile of flame temperature at Z=45mm

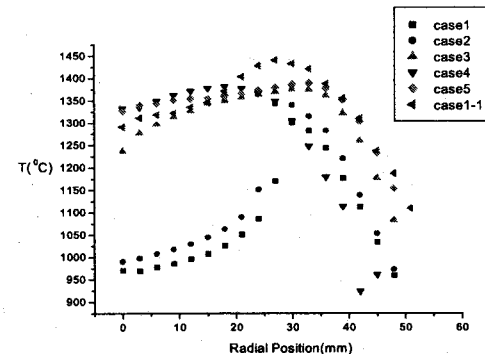


Fig. 17 Radial profile of flame temperature at Z=55mm

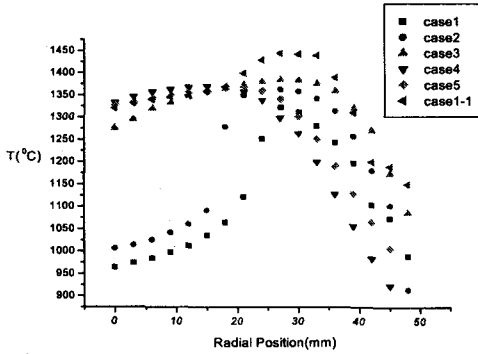


Fig. 18 Radial profile of flame temperature at Z=65mm

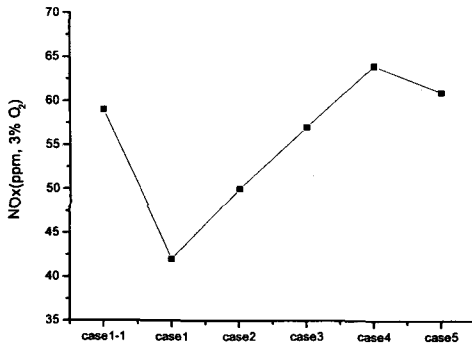


Fig. 19 NO concentrations between air staging and General swirl flame

5. 결론

본 연구는 화염 내 단계적 연소 방식을 적용한 저 NOx 연소기의 선회 유동 변화에 따른 NOx 저감의 원리를 규명하고, 이에 따른 NOx 배출량 저감을 위해 각 연소용 공기 주입구 별 공기 공급 유량과 버너 출구 각각에서의 선회각 변화에 의한 선회류의 운동량 조절을 통해 최적의 배기 가스 배출 특성을 나타내는 운전 조건을 제시하기 위해 연소기의 연소용 공기 공급 및 출구를 3 단으로 구성하고 각 단의 선회각 및 공기 유량을 달리하는 선회 화염을 구성하여 비 연소장에서 선회류의 유속 및 난류도, 그리고, 연소장에서 화염 온도와 배기 가스의 농도 계측을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 1단 공기의 공급 유량이 커질수록 보다 높은 축 방향 압력 구배와 반경 방향 압력 구배가

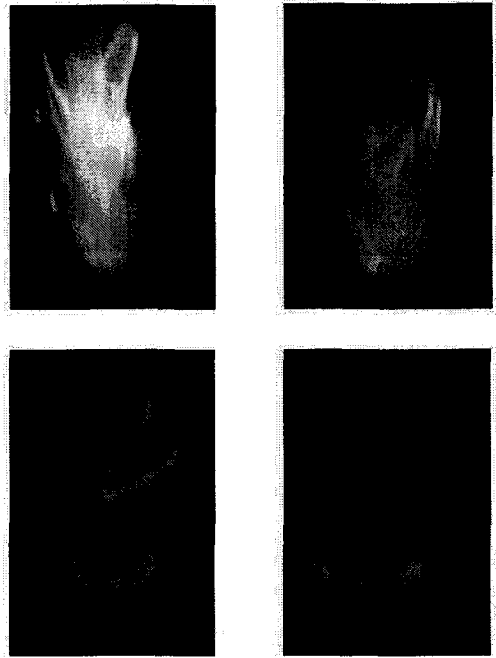


Fig. 20 Pictures of air staged flames

형성됨에 따라 실제 연소장에서 화염의 upstream 방향으로 향하는 속도가 증가하여 재 순환되는 유량이 상대적으로 증가하게 되고 이 영역에서의 체류 시간이 줄어들게 된다.

2. 1단 공기의 공급유량이 작을 경우 화염 내부에서의 당량비가 증가하면서 복사로 인한 열방출이 충분히 일어날 것으로 사료되며 이에 따라 전반적인 화염 온도가 감소할 것으로 판단된다.

3. 1단 공기 공급 유량이 전체 공기유량의 30%를 넘어 증가할 경우 재 순환되는 연소용 공기의 유량 증가로 인해 화염 내부 영역의 당량비 조건이 이론 공연비 조건으로 도달해 감에 따라 화염 내부 영역에서 온도가 점차 상승하고 화염 내 최고 온도가 나타나는 유동의 전단층에 이르기까지 고온의 영역대가 형성된다.

4. 1단 공기의 공급 유량이 증가할수록 난류 운동 에너지의 증가에 따른 화염 온도 상승과 화염 내부로 재 순환되는 유량의 증가로 인해 화염 내부의 온도가 상승하며, 이에 따라 고온 영역대에서 연소 생성물들의 체류시간이 증가하여 화염 전체에서 생성되는 NOx의 발생량이 증가하게 된다.

5. 다단 공기 공급에 의한 선회가 아닌 일반적인 선회 화염을 구성하였을 경우 다단 공기 공급에 의한 연소 시 최적 유량비 조건에서 보다 NO 농도에 있어서 10ppm가량 높은 농도 값을 나타내 각기 다른 선회각과 공급 공기의 유량이 조절

된 경우가 화염 내 고온 영역대의 최소화를 통해 일반적인 강한 선회 화염의 경우보다 좀 더 효율적인 NOx 생성 억제가 가능함을 입증하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 에너지 자원기술개발 사업의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- [1] Ballester, J. M., Dopazo, C., Fueyo, N., Hernandez, M. and Vidal, P. J., "Investigation of Low NOx Strategies for Natural Gas Combustion," *Fuel*, Vol. 76, No. 5, 1997, pp. 435-446.
- [2] Schmittl, P., Gunther, B., Lenze, B. and Bockhorn, H., "Turbulent Swirling Flames : Experimental Investigation of the Flow Field and Formation of Nitrogen Oxide," Engler-bunte-institute, Combustion Technology University of Karlsruhe(TH), Germany.
- [3] Farmayan, W. F., "The Control of Nitrogen Oxides Emission by Staged Combustion," MS Thesis, Department of mechanical engineering, The Massachusetts Institute of Technology, 1980.
- [4] Bowman, C. T., "Control of Combustion-generated Nitrogen Oxide Emissions : Technology Driven by Regulation," *Twenty-fourth Symposium(Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, 1992, pp. 859-878.
- [5] Feese, J. J. and Turns, S. R., "Nitric Oxide Emissions from Laminar Diffusion Flames : Effect of Air-side versus Fuel-side Diluent Addition," *Combustion and Flame*, Vol. 113, 1998, pp. 66-78.
- [6] Berg, L. D., "Low NOx Burner, Experimental Study and Numerical Modelling," MS Thesis, Department of mechanical engineering, The Massachusetts Institute of Technology, 1991.
- [7] Beer, J. M., "Combustion Aerodynamics," pp. 100-144.
- [8] Syred, N. and Beer, J. M., "Combustion in Swirling Flow : A Review," *Combustion and Flame*, Vol. 23, 1974, pp. 143-201.
- [9] Syred, N., Chiger, N. A. and Beer, J. M., "Flame Stabilization in Recirculation Zones of Jets with Swirl," *Thirteenth Symposium(Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, 1971, pp. 617.
- [10] Claypole, T. C. and Syred, N., "The Effect of Swirl Burner Aerodynamics on NOx Formation," *Eighteenth Symposium(Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, 1981, pp. 81-89.
- [11] Fujii, S., Eguchi, K. and Gomi, M., "Swirling Jets with and without Combustion," *AIAA Journal*, 1981, pp. 1438-1442.
- [12] Chen, R. H. and Driscoll, J. F., "The Role of the Recirculation Vortex in Improving Fuel-air Mixing within Swirling Flames," *Twenty-second Symposium(Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, 1988, pp. 531-540.
- [13] 신명철, 김세원, 차학주, "FGR 및 FIR을 적용한 3단 저 NOx 버너의 Swirl 유동 및 연소 특성에 관한 실험적 연구," *25회 KOSCO Symposium 논문집*, 2002, pp.105-112.