

액체 연료용 버너에서 NOx 저감을 위한 연료 2 단 분사 Y-jet 노즐에 관한 기초연구

송시홍[†] · 이기풍* · 김혁제* · 박석호**
(2001년 4월 16일 접수, 2001년 9월 25일 심사완료)

A Basic Study of Fuel 2-staging Y-jet Atomizer to Reduce NOx in Liquid Fuel Burner

Si Hong Song, Gi-Pung Lee, Hyuk-Je Kim and Seok-Ho Park

Key Words : Atomizer(분무노즐), Fuel 2-staging Combustion(연료 2 단 연소), NOx(질소산화물), Low NOx Burner(저 질소산화물 버너)

Abstract

A basic experimental study has been carried out to find out the design parameters of fuel 2-staging atomizers in order to reduce nitrogen oxides(NOx) rate emitted from the steam boilers used the liquid fuel. The heavy fuel oil(B-C oil) and fuel 2-staging Y-jet twin-fluid atomizers were adopted in this study. The results of this paper were obtained from the real as well as the model scale atomizers. In the case of model atomizers test, NOx reduction rate was strongly dependent on the staged fuel rate, but it was weakly dependent on the injection hole arrangement and air swirl conditions. The real scale atomizers was designed and manufactured on the base of these test results, and those was mounted and operated in the real boiler generates 185 ton steam per an hour. The reduction rate of the model and real plant was reached 10~30% of base NOx by atomizers, but dust was sharply increased in the low O₂ combustion region of the real plant.

기호설명

- d : 직경(m)
- l : 길이(m)
- N : 분사구 갯수
- OV : 베인각(outer vane angle)
- T : 온도(°C)
- x : 좌표계
- α : 분사각(°)
- β : 주분사구와 보조 분사구 사이각(°)

1. 서론

화석연료는 연소과정을 통해 유용한 열에너지

를 공급한 후 가스상태로 대기중에 방출하게 된다. 이 때 방출되는 가스의 성분은 탄산가스가 대부분이나, 대기방출 후 인체 및 자연환경에 여러 가지 유해요소로 작용하는 공해물질인 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx), 일산화탄소(CO) 및 분진(dust) 등이 함유되어 있다. 이 중 질소산화물은 대기중에서 호흡기질환, 광화학 스모그 및 산성비의 원인이 되는 물질로 그 배출에 대한 규제가 따르고 있다.

화석연료의 연소에 의해 대기중으로 방출되는 NOx 중의 상당량은 화력 발전용 보일러의 노내 연소에 의한 것이다. 따라서 보일러 화로내에서 생성 및 배출되는 NOx 를 저감하고자 하는 기술 개발이 활발하게 진행되어 많은 기술이 개발되었다. 지금까지 개발된 보일러 관련 NOx 저감기술은 연소개선을 통하여 화염공간에서 생성량을 줄이는 방법과 이미 생성된 NOx 가 대기중으로 방출되기 전에 제거하는 방법 등이 있다.

연소개선에 의한 기술 중 액체 연료와 관련된 NOx 저감 방법으로는 일반적으로 저 NOx 버너(low NOx burner), 배가스 재순환(flue gas

[†] 책임저자, 회원, 두산중공업 생산)기술연구원
E-mail : song1711@doosanheavy.com
TEL : (055)278-8139, FAX : (055)278-8569

* 두산중공업 생산)기술연구원

** 부산대학교 공과대학 기계공학부

recirculation), 공기 2 단 연소(over firing air), 연료 2 단 연소에 의한 재연소(reburning) 등이 있다.

이들 기술 중 본 연구의 대상이 되는 연료 2 단 연소에 의한 NOx 저감방법은 연소로에 적용되는 것과 버너자체에 적용되는 것이 있다. 연소로에서의 연료 2 단 연소는 주연소(primary combustion)용 버너와 재연소(reburn)용 버너를 따로 설치하여, 주연소영역에서 생성된 NOx 가 연료과잉상태인 재연소영역에서 생성된 탄화수소(CHx)와의 반응에 의해 N₂로 전환되도록 하는 기술이다. 반면, 단일 버너에서의 연료 2 단 연소기술은 재연소용 연료를 주연료와 같이 공급하여 동일 화염 공간상에서 NOx 저감하고자 하는 것으로 이와 관련 된 연구는 주로 IFRF(International Flame Research Foundation)에 의해 이루어 졌다.¹²⁾ IFRF의 버너 자체 연료 2 단 연소에서의 NOx 저감과는 개념적으로 차이가 있지만 실제 보일러에 적용된 버너로는 일본의 미쯔비시 중공업에서 공급되는 PM(Pollutant Minimum)버너가 있다.⁶⁾

본 연구는 버너 자체에서의 연료 2 단 연소 기술개발과 관련된 기초연구로서, 연구의 목적은 기존에 사용되고 있던 Y-jet 노즐(atomizer)의 형상을 연료 2 단 연소(분사)에 적합하도록 개선하여 NOx 저감 가능성을 확인하고 아울러 저감기구에 대한 이해 및 각 분무형식(압력분무, 2 유체 분무식) 별 액체 연료 분사용 노즐 개발하기 위한 기초자료를 획득하는 것이다.

이와 같은 목적을 달성하기 위해 진행된 연료 2 단 분사 Y-jet 노즐에 대한 성능실험은 시험 연소로에서의 모델 실험과 실제 보일러 화로에서의 적용실험을 통하여 이루어졌다. 비교적 소용량의 모델 실험에서는 연료의 단별 분배량, Y-jet 노즐에서 분사구 배치형태와 연소용 공기의 선회도가 NOx 배출량에 미치는 영향을 조사하였다. 그리고 실제 적용시험은 모델 실험을 통하여 얻은 분사노즐을 실제에 적용하기에 앞서 개선되어야 할 사항을 확인하기 위하여 실제 보일러 화로에서 진행 되었다.

본 연구 결과 연료 2 단 분사용 Y-jet 노즐에 대한 시험 연소로 및 실제 보일러 연소로에서의 연소시험을 통하여 10 ~ 30% 정도의 NOx 저감이 가능함을 확인하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 연소시험설비 및 버너

본 모델버너 실험에 사용한 연소실험 설비에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 이 시험설비에서의 공기 및 연소가스의 흐름에 대하여 간략하

게 설명하면 다음과 같다. 우선 공기 예열기(gas-air heater)에서 예열된 공기와 저장조 및 가열기(oil tank & heating unit)를 거쳐 공급된 연료는 버너를 통하여 노통 형상의 시험 연소로(water cooled furnace)에서 연소에 의해 화염을 형성하게 된다. 이 때 발생한 연소가스는 연소로 벽면으로의 열전달에 의해 1 차 냉각되고 폐열회수 보일러(waste heat boiler) 및 공기예열기를 차례로 거치면서 더욱 냉각된 후 집진용 백필터(bag filter)를 거쳐 굴뚝(stack)을 통해 대기로 방출된다. 연소로 및 폐열회수 보일러에서는 공급된 냉수가 증기로 변하는 과정에서 연소가스가 냉각된다.

본 실험에 사용한 시험연소로는 화염공간의 재원이 직경 2m, 길이가 6m 인 원통형상을 갖고 있으며, 화염공간의 온도 및 가스 농도 등의 정보를 획득하기 위하여 노의 측벽을 따라 0.5m 간격으로 측정구가 설치되어 있다.

연료 2 단 분사 노즐의 모델실험에서는 화로출구에서의 가스농도(O₂, CO, CO₂, NOx)를 측정하여 노즐별로 NOx 저감특성을 살펴 보았다. 그리고, 연료 2 단 분사에 의한 연소시 화염내의 NOx 생성/저감 기구를 이해하기 위한 실험에서는 화염내부의 가스농도와 온도를 측정하였다. 여기서 온도는 외부 노출형 R 열전대를 사용하여 측정하였으며, 측정된 온도는 화염들간의 차이점을 비교하기 위한 것으로 열전대에 대한 별도의 교정은 하지 않았다.

그리고, 본 실험에서는 연소설비와 더불어 증유 연소시 약 4.5MW 정도의 연소부하를 갖도록 설계된 버너를 사용하였으며, 그 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 이 버너는 유로 분배기(flow divider)에 의해 2 차 연소용 공기(2ndary air)를 내측과 외측의 2 단(air 2-staged burner)으로 나누어 공급할 수 있

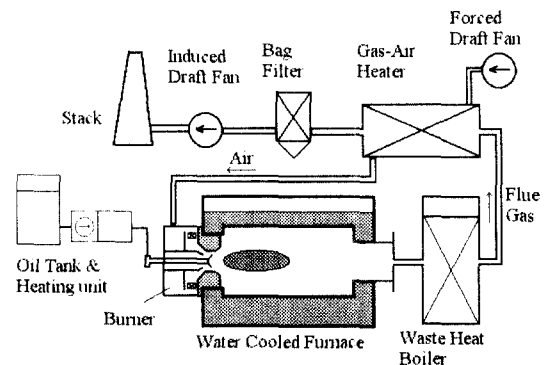


Fig. 1 Schematic diagram of experimental facility

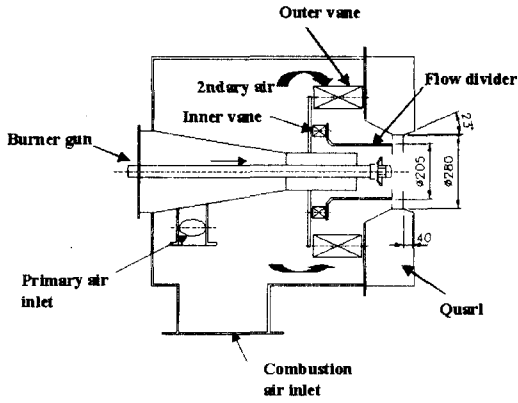


Fig. 2 Burner configuration

특 구성되어 있는 저 NOx 버너이며, 각 단에는 가변 조정형 래디얼 선회기(radial swirl)인 내,외부 베인(inner and outer vane)이 설치되어 있어서 원하는 선회도를 조정할 수 있다. 이 버너를 통해서 화염으로 공급되는 2 차공기의 대부분(90% 이상)은 외부베인만을 거친 후 화로로 분사되기 때문에 2 차공기의 선회도는 외부 선회기 베인각(OV)에 의해서 결정된다. 여기서 외부 베인각(OV)은 구동축 중심원의 접선과 베인사이의 각으로 베인각이 작으면 강한 선회도를 갖게 됨을 의미한다. 본 연구의 실험영역인 베인각 20 과 50 에서 선회도를 선회수로 나타내면 각각 약 0.8 과 0.27 에 해당한다.

2.2 실험 Y-jet 노즐의 형상 및 주요 치수

본 실험연구 대상노즐인 Y-jet 노즐은 액체의 점성에 대하여 압력-유량관계나 분무각이 거의 변하지 않는 특성을 갖고 있기 때문에 점도가 비교적 높은 연료의 미립화에 많이 사용된다.^[4] 일반적인 Y-jet 노즐은 연료(fuel)와 분무증기(steam)가 액체(d_f) 및 기체 공급관(d_g)을 통하여 혼합관(d_m)으로 공급되어 외부로 분사되는 내부혼합형 2-유체 노즐이다.

본 연구에 사용한 연료 2 단 분사 Y-jet 노즐은 Fig. 3 에서 보는 것과 같이 노즐 중심으로부터 가까운 원주상에 조연연료(reburn fuel)가 분사되는 5 개의 보조 분사구(assist injector), 그 바깥쪽 원주상에 주연료(primary fuel)가 분사되는 5 개의 주분사구(main injector)가 배치되어 있는 구조로 되어 있다. 이 2 단 노즐에서 연료는 동일한 배관으로 액체 공급관 입구까지 이송되어 오기 때문에 각 분사구로 배출되는 연료량은 개별 분사구의 재원에 의해 결정된다. 즉, 분사구 공급관 및 혼합관의 직경이 클수록 동일한 분사압력 조건에서 연료 및

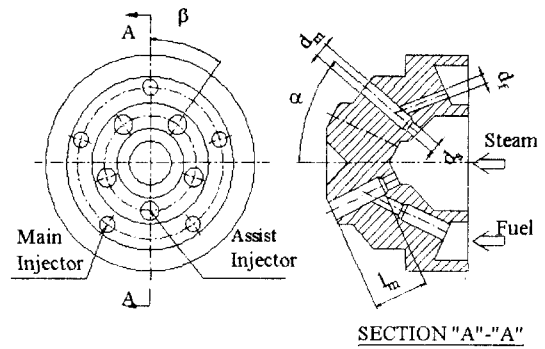


Fig. 3 Configuration of Y-jet atomizers

Table 1 Configuration of Y-jet atomizers used in experiments

구분	#1	#2	#3	#4	#5	
주분사구	d _f (mm)	0.98	0.87	0.74	0.62	0.60
	d _g (mm)	1.57	1.31	1.11	0.93	0.90
	d _m (mm)	2.36	1.97	1.67	1.40	1.35
	l _m (mm)	5.90	6.49	6.30	6.00	6.04
	α (°)	40	40	40	40	40
N(-)	5	5	5	5	5	
보조분사구	d _f (mm)	-	0.41	0.60	0.62	0.74
	d _g (mm)	-	0.62	0.90	0.93	1.11
	d _m (mm)	-	0.93	1.35	1.40	1.67
	l _m (mm)	-	3.48	4.46	5.00	5.66
	α (°)	-	25	25	25	25
N(-)	-	5	5	5	5	

증기유량이 큼을 의미한다. 본 실험에서 사용한 노즐은 주연료와 조연연료가 동일한 관을 통하여 액체 공급관(d_f) 입구까지 공급되는 구조로 개별 유량 측정이 불가능하게 되어 있다. 따라서, 각 단 별로 분배되는 연료량에 대한 NOx 배출특성을 조사한 실험연구에서는 각 분사구에서 배출되는 유량을 변화시키는 방법으로 각 노즐들의 공급관 재원을 서로 다르게 하였다.

Table 1 은 본 실험연구에서 사용한 Y-jet 노즐의 주요 재원을 나타낸 것이다. 기존 노즐(#1)은 5 개의 주분사구로만 구성되어 있다. 2 단 노즐의 경우 #2 노즐에서 #5 노즐로 갈수록 조연연료의 유량이 상대적으로 큰 노즐이다. 그리고, #5 노즐의 경우는 노즐 전면에서 볼 때 주분사구와 보조 분사구의 사이각(β)이 각각 0°와 36°인 2 개의 노즐을 준비하여 분사구 배치에 대한 영향, 즉 연료분사 후 주연료와 보조연료의 중첩에 의한 영향을 살펴 보고자 하였다. 이들 노즐의 명칭은 편의상 #5-P(0°)와 #5(36°)로 구분하기로 한다.

2.3 연료 2 단 연소에 의한 NOx 저감 기구

본 연구에서 적용하고자 하는 NOx 저감 기술은 버너 화염 자체에 연료 2 단 연소과정 혹은 재연소과정을 재현하는 것이다. 다시 말해 단일 버너 화염내에서 연료의 2 단 분사만으로 다단 연소과정을 실현하고 이를 통하여 thermal NOx 및 Fuel NOx 를 저감하고자 하는 것이다.⁽⁶⁾ 이의 실현은 앞서 언급한 연료 2 단 Y-jet 노즐과 버너 선화기를 통하여 공급되는 연소용 공기의 유동형태, 즉 버너 출구 중심축에 형성되는 내부순환유동영역(internal recirculation zone, IRZ)의 조합에 의해 가능할 것으로 추측된다. 2 단 Y-jet 노즐의 주분사구를 통하여 분사된 주연료는 연소용 공기의 주흐름과 IRZ 사이에서 연소되어 주화염(primary flame)을 형성하고, 보조 분사구를 통하여 분사된 조연연료는 상대적으로 주연료 분사각보다 작은 분사각(α)으로 분사되기 때문에 자연스럽게 화염중심부에 형성되는 저 O_2 영역인 IRZ 내부로 침투되어 연료과잉상태에서 연소되면서 NOx 저감과 관련된 중간생성물을 만들어 낼 것이다. 이 때 주화염에서 발생된 NOx 는 조연연료의 연소과정에서 생성된 중간생성물과 화염 후류에서 혼합되어 N_2 로 전환된다. 이와 같은 개념은 IFRF 의 내부연료 2 단버너(internally fuel staged burner, IFSB)의 개념과 아주 유사하다.^(1,2)

따라서, 버너자체에서의 연료 2 단 연소에 의한 NOx 저감의 정도는 다음과 같은 변수들에 의해 영향을 받을 것으로 사료된다.

- 1) 주연료와 조연연료의 유량비
- 2) 주연료 및 조연연료의 분사각(방향)
- 3) 보조 분사구 및 주 분사구의 배치에 따른 연료 분사 후 상호 간섭 효과
- 4) 버너 선화 공기공급에 의한 유동형태
- 5) 연료분사 노즐의 미립화 특성에 따른 입경 및 분포^(6,7)

본 실험연구는 NOx 저감 가능성에 대한 기초연구이므로 이들 변수 중 유량비, 분사구의 배치형태 및 연소용 공기 선화에 한정하여 진행하였다.

2.4 실험조건

2 단 연료 분사용 Y-jet 노즐을 사용하여 NOx 배출 특성에 대한 모델실험은 다음 Table 2 와 같은 실험 조건에서 수행되었다.

실험데이터의 측정은 일정량의 연료를 연소시켜 연소용 공기의 온도가 일정한 값에 도달한 후에 나머지 실험조건을 맞추고 나서 이루어 졌다.

Table 2 Experimental conditions

구분	실험조건	비고	
연소공기	유량(kg/h)	5450.0±50	
	온도(°C)	110.0±5	
	압력(mmAq)	400	
분부중기	유량(kg/h)	17.5	연료량의 5%
	압력(kg/cm ²)	7.0	포화중기
연료	유량(kg/h)	350.0±5	
	온도(°C)	100.0±3	
	압력(kg/cm ²)	14.0	
	C(%wt)	86.46	
	H(%wt)	12.28	
	O(%wt)	0.05	
	N(%wt)	0.26	
S(%wt)	0.95		
LHV(kcal/kg)	9749.0		

그리고, 모델 실험을 통하여 얻은 분사노즐을 실기에 적용하기 위해 앞서 개선되어야 할 사항을 확인하기 위하여 진행된 실제 보일러 화로에서의 적용 시험은 압력 및 온도가 각각 106 kg/cm², 535 °C 인 증기를 시간 당 185ton 생성하는 보일러에서 이루어 졌다. 이 보일러에 설치된 버너는 총 6 대(3 단 2 열)로서 버너 당 연료 분사량은 2400 kg/h 이다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 연소공기 선화도 및 노즐에 따른 화염 형상
연소공기의 선화도와 화염형상과의 관계를 살펴보기 위해 베인각을 조정하면서 화염을 촬영하였고, 기존노즐(#1)에 대한 대표적인 결과로 베인각(OV) 20, 50 에서 얻은 사진을 Fig. 4 에 나타내었다. 이 사진들은 화로 뒷편에서 버너를 향하여 촬영한 것들이다. 이 사진들로부터 기존 노즐(#1)의 5 개 분사구로부터 분출된 연료가 5 개의 개별화염을 형성하면서 연소되고 있음을 알 수 있다. 아울러, 실험조건에서 상대적으로 강선화(OV 20)인 경우(Fig. 4(a)) 화염 후류까지 반경방향으로 확장된 화염 형상을 보이는 것으로부터 버너 출구의 화염

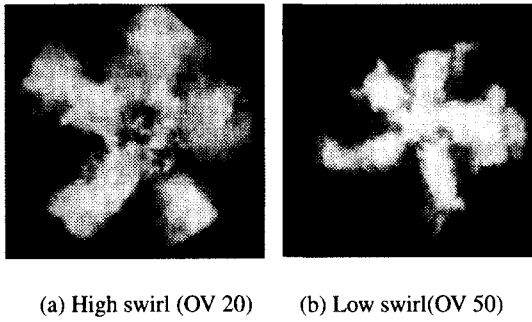


Fig. 4 Typical Flame shape of conventional Y-jet atomizer(#1)

공간에 강한 내부순환영역(IRZ)이 형성되고 있음을 확인할 수 있다. 반면, 상대적으로 약선회(OV 50)인 경우(Fig. 4(b)) 화염은 화로 중심축에 반경방향의 폭이 좁은 형상으로 집중화되어 있음을 알 수 있다. 이는 공기 선회도가 약화되어 버너출구 화로 중심부에 협소한 IRZ가 형성되고, 그에 따라 화염 선단에서 공기와 연료와의 상호간섭이 증가하여 5 개의 개별화염이 화로 중심축 근처에서 서로 중첩되기 때문이다.

Fig. 5는 기존 노즐과 동일한 연소조건에서 OV20인 경우에 연료 2 단분사 노즐의 전형적인 화염형상을 나타낸 사진이다. 이 노즐은 주분사구(5개)와 보조 분사구(5개)가 서로 엇갈린 형태로 배치되어 있는 것으로 촬영된 사진으로부터 10개의 개별 화염들을 뚜렷하게 구분할 수 없다. 그러나, 화염형상이 원주방향으로 확대되어 있는 것으로부터 연소공기와의 혼합과 화염공간의 연소가스 유동형태는 기존 노즐(Fig. 4(a))의 경우와 유사할 것으로 추측된다. Fig. 4와 5의 결과로부터 노즐의 형상에 의해 생성되는 개별화염의 수는 달라지지만 버너 선회도에 따른 내부순환영역의 변화 등 화염공간의 형상은 기본적으로 유사함을 알 수 있다.

3.2 연료분배에 따른 NOx 배출 특성

Fig. 6은 각 노즐별로 버너 선회도(베인각)에 따라 배출되는 NOx를 측정된 결과이다. 기존 노즐(#1)의 경우 강선회에서 약선회로 진행됨에 따라 배출되는 NOx가 점차 증가함을 알 수 있다. 이는 강선회의 경우 내부순환영역이 넓기 때문에 연료가 저 O₂ 영역인 내부순환영역으로 분사되고, 따라서 연료과잉 조건에서 액적이 증발함에 따라 NOx가 감소하는 것으로 추측된다. 이와 반대로 약선회인 경우는 분사된 연료와 연소공기와의 직접 접

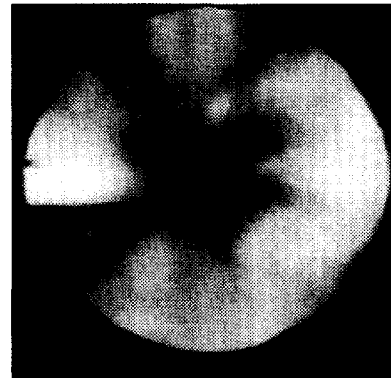


Fig. 5 Typical Flame shape of 2-staged Y-jet atomizer (OV 20)

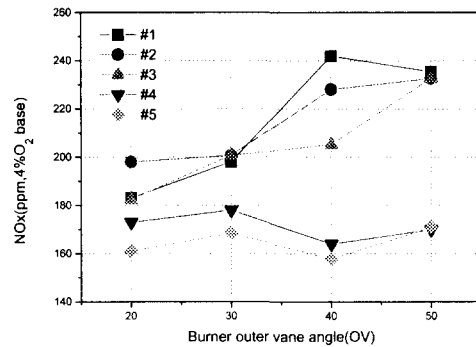


Fig. 6 NOx emission rate with variation of Y-jet atomizer configurations

촉함에 따라 고농도의 O₂ 영역에서 액적이 증발함으로 NOx가 증가하는 것이다.^(8,9)

연료 2 단 분사 노즐의 NOx 배출량은 보조 분사구에서 분출되는 연료량이 상대적으로 많은 노즐에서 작은 값을 갖으나, 조연 연료량이 일정량 이상으로 증가하지 않으면 기존 노즐(#1)과 비교해서 NOx 저감 효과는 거의 없음을 알 수 있다.

아울러 NOx 저감량은 강선회 영역(OV20)보다는 상대적으로 약선회 영역(OV 40~50)에서 더욱 커지는데 이는 앞서 언급한 기존 노즐에서의 NOx 배출특성으로부터 유추할 수 있다. 즉, 강선회 영역에서는 기존노즐 뿐만아니라 2 단노즐에서도 주연료 및 조연료 모두가 확대된 내부순환영역으로 분사되기 때문에 NOx 저감효과가 미미한 것이고, 반면 기존노즐에서 대부분의 연료가 공기과잉상태에서 연소되던 약선회의 경우는 조연료가 상대적으로 협소한 내부순환영역에서 연소되므로서 NOx 저감 효과가 상승한 것이다. 이런 요인에 의해 조연 연료량이 어느 이상으로 큰 연료 2 단분

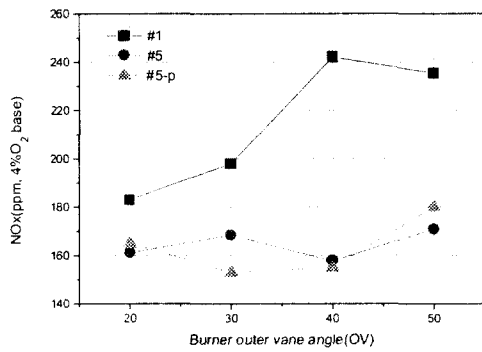


Fig. 7 NOx emission rate with injection hole arrangement of 2-staging Y-jet atomizers

사용 노즐(#4, 5)에서 NOx 배출량은 연소용 공기의 선회도와 무관하게 거의 일정한 값을 갖게 되는 것이다.

3.3 Y-jet 분사구 배치에 따른 NOx 배출 특성

분사된 주연료와 조연료 사이의 중첩에 의한 효과, 즉 주분사구와 보조 분사구 배치(β)에 대한 효과를 살펴 보기 위한 실험을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. 본 연구에서 사용한 노즐의 있어서는 분사구 배치에 대한 NOx 배출량의 차이는 거의 없었다. 따라서 노즐 분사구의 배치는 제작이 용이한 것을 선택하면 된다.

3.4 화염내부의 가스농도 및 온도분포

직경 0.61m, 길이 3.2m 인 수직 원통형 화로에서 입경 및 분무각(spray cone angle)이 서로 다른 연료분사노즐에 대한 연소실험을 수행한 J. M. Ballester 등⁷⁾의 결과에 의하면, 버너 출구에서 연소가스 성분 중 다량의 CO, UHC (hydrocarbons)가 검출되는 영역과 내부순환영역으로 분사된 연료가 증발하는 영역이 서로 일치한다고 하였다. 아울러 환형으로 분사된 연소용 공기층과 연료증발영역의 접촉면 사이에서는 격렬한 연소가 일어나서 온도가 높고 CO₂ 성분이 최대가 되는 영역이 존재한다고 하였다. 이와 같은 관점에서 화염내부의 연소가스 성분 및 온도를 나타낸 Fig. 8 을 살펴 볼 필요가 있다. Fig. 8 은 화로반경 0 를 기준으로 -축은 기존노즐(#1)에 대한 결과를 나타낸 것이고, +축은 2 단 노즐 중 #5 의 실험결과를 나타낸 것이다.

먼저 #1 노즐의 실험결과를 살펴 보면, CO 가스 농도가 상대적으로 높은 영역은 화로길이(x 축)가 증가함에 따라 화로 벽면으로 이동하고

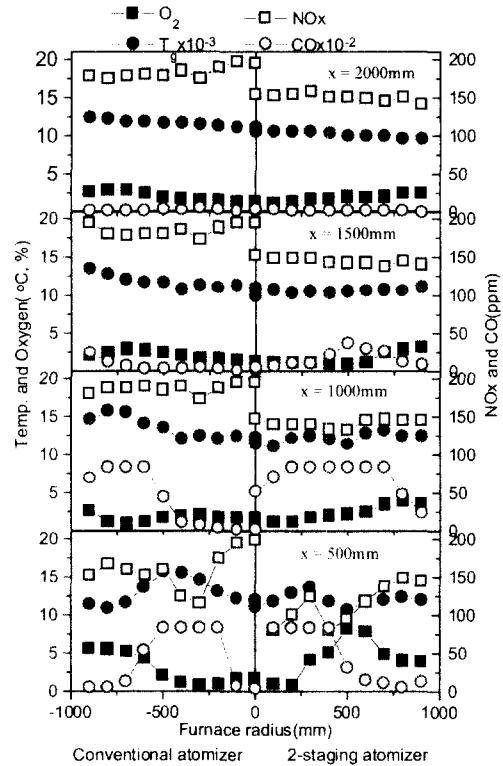


Fig. 8 Gas temperature and species distributions of conventional and 2-staging Y-jet atomizers

$x=1500\text{mm}$ 에서 균일한 분포를 보이는 것을 살펴 볼 수 있다. 더불어 반경상에서 최대 연소가스 온도를 갖는 위치도 CO 가스 성분의 변화와 유사함을 알 수 있다. 반면, $x=500\text{mm}$ 의 결과에서 보면 NOx 성분은 화로 중심부에서 최대값을 갖고 있음을 알 수 있는데, 이로부터 버너 출구에서 이미 격렬한 연소가 진행된 것으로 추정된다.

#5 노즐의 실험결과를 살펴보면, $x=500\text{mm}$ 에서 화염온도가 2 개의 정점(peak point)를 갖고 있는 것으로부터 주연료와 조연료의 분사 후 증발 및 연소구간이 구분되어 있음을 알 수 있다. 또한, #5 노즐의 CO 성분은 #1 노즐과는 달리 상대적으로 화로 중심축 근처에서 높은 값을 갖고 보다 길게 분포 하고 있음을 $x=1500\text{mm}$, 반경 500mm 에서 정점을 갖는 것으로부터 알 수 있다. 따라서 #1 노즐과 #5 노즐의 연소상태를 비교해 보면 #5 노즐의 화염은 그 길이가 상대적으로 긴 지연연소 상태임을 간접적으로 확인할 수 있다.

#5 노즐과 #1 노즐에서 배출되는 NOx 량을 살펴 보면 전체적으로 연료 2 단 노즐(#5)에서 배출되는 량이 작음을 알 수 있다. 이는 온도 및 가스농도

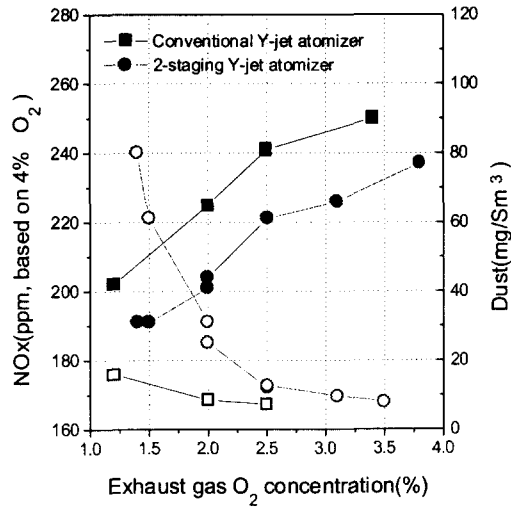


Fig. 9 Variation of NOx and dust emission rate with exhaust flue gas O₂ concentration in practical boiler (closed : NOx, open symbol : Dust)

분포에 대한 실험결과로부터 그 원인을 찾아 볼 수 있는데, 우선 2 단 연소 노즐(#5)의 화염은 앞서 CO 분포에서 본 것처럼 지연 혼합 연소에 의해 연료과잉영역이 상대적으로 넓게 되어 J. M. Ballester 등⁽⁷⁾이 언급한 것과 같이 연료 중 N 분이 NOx 보다는 N₂로 전환되어 fuel NOx 배출량이 감소했기 때문이라고 생각된다. 아울러 화염온도도 #1 노즐의 화염온도보다 상대적으로 약간 낮기 때문에 thermal NOx도 작아져서 전체적으로 #5 노즐 화염에서의 NOx 배출량이 작아진 것으로 추정된다.

3.5 실기 적용 실험 결과

앞서 2.4 절에 언급한 것과 같이 실제 보일러에 본 연료 2 단 Y-jet 노즐을 적용하여 NOx 저감량을 측정하고 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 출구 가스 성분 중 O₂량을 변화시키면서 NOx 및 분진을 측정된 결과 전 운전영역에서 2 단 노즐의 NOx 배출량은 기존 노즐의 비해 약 10% 정도 적게 배출되었다. 반면, 2 단 노즐의 분진 배출량은 저 O₂ 영역에서 기존노즐에 비해 급격하게 증가하는 경향을 보였다. 따라서 2 단 노즐을 실기에 적용하기 위해서는 보일러 배가스 중에 분진량이 증가한다는 것을 염두에 두어야 할 것이다. 아울러 노즐구조의 개선 및 운전 조건의 변경 등을 통하여 기존 노즐과 동일 수준의 분진 발생량을 낼 수 있도록 개선해야 할 것이다.

4. 결론

상기 결과로부터 2 단 Y-jet 노즐에 대한 모델 실험 및 실기 적용 실험을 통하여 NOx 저감과 관련된 기본 변수 조사 및 실기 적용 가능성에 대한 기초 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 2 단 연료 분사에 의한 NOx 저감은 각 단에서 분사되는 연료량에 의해 영향을 받는다.
- (2) 본 실험 연구에 사용한 노즐에 있어서 주화염과 보조화염의 위치와 관련된 보조연료 분사구 배치형상이 NOx 배출량에 미치는 영향은 미미하다.
- (3) 연료 2 단 분사 노즐의 경우 NOx 배출량은 버너 선회도와 무관하게 거의 일정한 값을 갖는다.
- (4) 실기 적용 실험을 통하여 NOx 배출측면에서 약 10% 정도의 저감 효과를 얻었으나, 저 O₂ 연소조건에서 분진 배출량이 상대적으로 급격하게 증가하는 경향을 보였다.

이상의 결론으로부터 실제 보일러 화로에 NOx 저감 방법으로 연료 2 단 분사용 Y-jet 노즐을 적용할 수 있음을 확인하였으나, 이를 위해서는 저 O₂ 연소영역에서 분진 배출량을 최소화하기 위한 연구가 진행되어야 함을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Knill, K. J., Nakamura, T. and Morgan, M. E., 1990, "The Effect of Mixing on NOx reduction by Coal Fuel Staging," *International Flame Research Foundation*, IFRF Doc. NO. F37/y/21.
- (2) Morgan, D. J., Breussin F. and van de Kamp, W., 1997, "Advances made in the Development and Optimisation of the Internally Fuel Staged Burner(IFSB)," *International Flame Research Foundation*, IFRF Doc. NO. F37/y/39.
- (3) 吉田邦夫 監修, 1992, "유연소의 이론과 실제," *스에너지센터*.
- (4) 송시홍, 이상용, 1996, "액체 점도에 따른 Y-jet 노즐 내부유동 및 분무특성의 변화," *대한기계학회논문집 B*, 제 20 권, 제 12 호, pp. 4053~4061.
- (5) 채재우, 전영남, 이운영, 1993, "단계적 연소의 NOx 저감에 대한 연구," *대한기계학회논문집*, 제 17 권, 제 6 호, pp. 1556~1571.
- (6) Ahn, K. Y., Kim, H. S., Cho, E. S., Ahn J. H. and Kim, Y. M., 1999, "An Experimental Study on Combustion Processes and NOx Emission

- Characteristics of the Air-Staged Burner," *KSME International J.*, Vol. 13, No. 6, pp. 477~486.
- (7) Ballester, J. M., and Dopazo, C., 1994, "Experimental Study of the influence of Atomization Characteristics on the Combustion of Heavy Oil," *Combust. Sci. and tech.*, Vol. 103, pp. 235~263.
- (8) Costa, M. M. G., 1992, "On Combustion of Heavy Fuel oil and pulverized Coal in a Large-Scale Laboratory Furnace," PhD Thesis, University of London.
- (9) Barreiros, A., Carvalho, M. G., Costa, M. and Lockwood, F. C., 1993, "Predictions of the Near Burner Region and Measurements of NO_x and particulate Emissions in Heavy Fuel Oil Spray Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 92, pp. 231~240.