

저 NOx 2 단 선회 분무식 노즐 개발 및 실기적용 연구

송시홍[†], 김혁필^{*}, 안상택^{*}, 이익형^{*}
 (2001년 4월 16일 접수, 2001년 9월 6일 심사완료)

A Study for Development and Application of a Low NOx 2-staged Swirl Atomizer

Si Hong Song, Hyeuk Pill Kim, Sang Tack Ahn and Ick Hyung Lee

Key Words : Swirl Atomizer(선회 분무식 노즐), Fuel 2-Staging Combustion(연료 2 단 연소), NOx(질소산화물), Low NOx Burner(저 질소산화물 버너)

Abstract

A study of low NOx atomizer was carried out to reduce nitrogen oxides(NOx) in a liquid fuel burner flame. The basic concept of NOx reduction in this atomizer is the fuel 2-staging combustion which is generated by a single atomizer forming two different stoichiometric flames. Two orifices swirl atomizer was selected and modified to realize this concept, and it was tested to obtain the design process of low NOx atomizer. These experiments were achieved to find out the relationship between the injection pressures and the flow rate, spray angle and drop size of swirl atomizer as well as to confirm the NOx reduction concept in real plant(power boiler). In comparison between experimental and theoretical results, the correct discharge coefficient and spray angle were obtained. In real burning test, NOx reduction rate was reached to above 27% of the case using conventional swirl atomizer.

기호설명

A_F : 노즐 출구 실제 액체 유로 면적(m²)
 A_0 : 노즐 출구 오리피스 면적(m²)
 A_p : 선회 챔버 입구 단위 오리피스 면적(m²)
 C_c : 유량 계수 수정 계수
 C_d : 유량 계수
 D_{32} : Sauter mean 직경(μm)
 K : 형상 계수 $\left(= \frac{Rr_0}{nr_p^2} = \frac{\pi Rr_0}{nA_p} \right)$
 \dot{m}_f : 액체 질량 유량 (kg/s)
 n : 선회 챔버 입구 오리피스 수
 p : 압력(kg/cm²)

R : 선회 챔버 선회 중심 반경(m)
 r_a : 공기 코어 반경 (m)
 r_i : 외부 노즐에서 내관의 외측 반경 (m)
 r_0 : 노즐 출구 오리피스 반경 (m)
 r_p : 선회 챔버 입구 오리피스 반경(m)
 α : 분무각 (°)
 ρ_f : 액체 밀도 (kg/m³)

$$\epsilon : \text{충진 효율} \left[= \frac{A_F}{A_0} = 1 - \left(\frac{r_a}{r_0} \right)^2 \right]$$

1. 서론

연료의 연소시 배출되는 질소산화물(NOx)은 대기중에서 광화학 작용에 의해 스모그(Smog)현상 및 산성비의 원인을 제공하여 인체의 호흡기 계통 식물 성장에 직접적인 영향을 주는 오염물질로 알려져 있다. 이런 오염 물질인 NOx의 배출 근원으로 운송기, 산업용 설비 등을 말할 수 있으나, 그

[†] 책임저자, 두산중공업 생산)기술연구원

E-mail : song1711@doosanheavy.com

TEL : (055)278-8139 FAX : (055)278-8569

* 두산중공업 생산)기술연구원

중에 화력 발전소가 차지하는 비중이 상당히 높은 편이다. 그래서 산업용 및 발전용 보일러에서 배출되는 NOx 를 선진국 뿐만 아니라 국내에서도 법적으로 보다 강력하게 규제하고 있다.⁽¹⁾

이런 법적 규제를 만족시키기 위해 많은 연소 기술들이 개발되어 활용되고 있는데, 보일러에 적용되고 있는 대표적인 NOx 저감 연소기술로는 저 NOx 버너(low NOx burner), 배기가스 재순환법(flue gas recirculation), 화로 내 2 단 연소(over firing air port) 및 재연소 기술(reburning) 등이 있다.⁽¹⁻³⁾ 이들 기술 중 유류 연소용 저 NOx 버너는 연료공급, 연소용 공기의 공급⁽⁴⁾ 및 주위 연소가스의 재순환(self recirculation) 방법 등을 활용하여 NOx 를 저감시키는 기술이 주종을 이루고 있다. 버너의 연료공급 방식에 의한 저 NOx 기술 중 분사노즐과 관련된 대표적인 기술로는 화로 내 전열 효과를 상승 시키므로써 상대적으로 화염온도를 낮추어 NOx 를 저감하기 위한 분할화염방법과 화염 공간 상에 적당량의 연료를 2 단으로 분사하여 서로 다른 화학양론비(stoichiometric ratio) 조건에서 연소시키는 바이어스(bias) 연소(농담연소:濃淡燃燒) 방법 등이 있다.

실제 보일러에 적용하는 측면에서 이들 기술들의 특징을 살펴 보면, 배기가스 재순환법, 화로 내 2 단 연소 및 재연소 기술은 연소 시스템 전체와 관련된 기술로 NOx 저감 효과는 상당히 높으나, 설치공간과 비용면에서 경제적인 부담이 증가되는 단점이 있다. 반면, 저 NOx 버너는 상대적으로 NOx 저감량은 작지만, 별도의 설치공간이 필요 없고 아울러 비용이 저렴한 장점을 갖고 있다. 이들 기술의 특징에 의해 전자의 기술들은 주로 신규 보일러 공사에 적용되는 경우가 많고, 반면 후자의 저 NOx 버너는 신규공사 뿐만 아니라 기존 보일러 연소설비를 개보수하여 NOx 를 저감하고자 하는 경우에도 경제적인 측면에서 가장 많이 선호되고 있는 기술이다.

따라서, 본 연구에서는 적용기술의 경제성을 고려하여 가장 저렴한 가격으로 NOx 을 저감하는 방법인 저 NOx 버너에 국한하여 진행하고자 하며, 특히 연료 분사 노즐만 교체하는 방법으로 NOx 를 저감하는 기술을 실용화하고자 한다.

일반적으로 액체 연료 연소용 버너의 노즐은 회전식 노즐(rotary atomizer), 압력 분무식 노즐(pressure atomizer)과 2-유체노즐(2-fluid atomizer) 등으로 크게 분류된다. 회전식 노즐은 연료의 분사 압력이 낮고, 유량 조절 범위가 넓은 장점이 있다. 2-유체 분무식 노즐은 연료의 점도에 관계없이 일정한 분무특성을 갖고 있어서 최근에 가장 선호되

고 있는 분무노즐이나, 연료의 미립화를 위해 고온 고압의 증기를 사용함으로써 액체연료 분무 시 다량의 증기가 소모되고 압력 분무식 노즐에 비해 구조가 복잡한 단점을 가지고 있다. 반면, 2-유체 노즐과 더불어 발전 보일러의 연소기기에 가장 많이 사용되고 있는 압력 분무식 노즐은 높은 압력으로 승압된 연료를 분사시켜 미립화하는 것으로 승압하기 위한 펌프 동력소모가 다른 노즐들에 비해 높은 단점이 있으나 연료 이외의 분무매체가 필요 없는 장점이 있다. 이런 장단점을 비교 분석한 후에 본 연구에서 개발하고자 하는 저 NOx 노즐의 대상으로 압력 분무식 노즐을 선정하였고, 그 중에서도 가장 많이 사용되고 있는 선회 분무식 노즐(swirl atomizer)로 정했다.

본 연구에서는 선정된 기존의 선회 분무식 노즐을 연소에 적합한 분무특성(입경과 분무각)을 갖으면서 연료 2 단 연소방법에 의한 NOx 저감 기구에 적합한 구조로 개선하고, 개선된 노즐의 설계기술을 확보하기 위해 분사압력과 유량과의 관계를 규명하고자 하였다. 아울러 개선된 노즐을 실기 보일러 연소기기에 적용하여 NOx 저감 효과를 살펴보았으며, 그 결과 기존 노즐 사용시 NOx 배출량에 비해 약 27% 정도의 양호한 저감 효과를 나타낸 2 단 선회 분무식 노즐을 확보하였다.

2. 실험장치 및 분무노즐

2.1 실험 장치

선회 분무식 노즐의 분무구조를 파악하기 위해 Fig. 1 과 같이 작동유체(물) 공급장치, 압축공기 공급장치 및 분무실(spray chamber)로 구성되는 분무 시험 장치를 사용하였다.

공기는 실험실에 공급되어 있는 7kg/cm² 압력의 압축공기를 사용하였고, 공기유량계(air flowmeter)를 거쳐 노즐(atomizer)로 공급되어 저부하 운전시 미립화 촉진제(atomizing fluid)의 역할만을 하게 된다. 작동유체(물)는 약 3ton 용량의 저장조(water tank)로부터 고압펌프(piston pump)에 의해 실험에 적정한 압력(최대 50kg/cm²)으로 가압된 후 유량계를 거쳐 노즐로 공급된다.

이렇게 공급된 물과 공기는 노즐로부터 분무실로 분사되어 미립화 되고, 미립화된 물의 액적은 분무실 후단에 설치되어 있는 분리기(separator)에 의해 회수되어 분무실 하부에 고이게 된다.

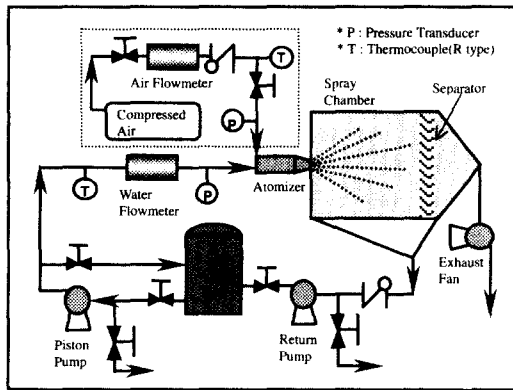


Fig. 1 Schematic diagram of atomizer test facility

이렇게 회수된 물은 다시 순환펌프(return pump)에 의해 저장조로 재공급 된다.

아울러 액적을 분무실 하류로 유동시키기 위해 배풍기(exhaust fan)를 설치하였는데, 이 배풍기는 회전속도를 임의의 조정하여 분무실로부터 외부로 유출되는 공기의 양을 조절할 수 있다. 본 실험에서는 배풍기에 의해 분무실 입구에서 유입되는 공기의 속도를 아주 낮게 유지하여 공기의 흐름이 분무에 미치는 영향을 최소화하고자 하였다.

2.2 실험방법 및 측정항목

선회 분무식 노즐의 유량 및 압력관계를 규명하기 위해 터빈유량계와 압력 변환기를 사용하여 노즐입구 압력을 변화 시키면서 유량을 측정하였다. 이 때 사용한 압력변환기는 스트레인 게이지 방식으로 그 정확도는 $\pm 0.25\%$ 범위 내에 있으며 최대 측정 압력은 50kg/cm^2 으로 측정결과는 디지털 지시계로 출력된다. 또한 터빈유량계는 $\pm 0.5\%$ 의 정확도를 갖는다.

연소에 적합한 분무특성을 파악하기 위해 분무각과 입경을 각각 유동가시화기법 및 PDPA (Particle Doppler Phase Analyzer) 시스템을 사용하여 측정하였다. 선회 분무식 노즐의 분무각을 파악하기 위해 Ar-Ion 레이저의 평면빔(flat beam)을 분무의 중심에 조사하고 CCD 카메라를 분무실 외부에 고정 설치하여 화상을 획득하였다. 분무 입경은 PDPA 시스템의 초점거리가 500mm 인 프로브를 사용하여 노즐 출구 중심으로부터 축 방향(분사 진행 방향) 거리가 50mm, 100mm, 200mm 에서 반경방향 5mm 간격으로 측정하였다.

NOx 저감 효과의 측정은 4 단 3 열의 버너가

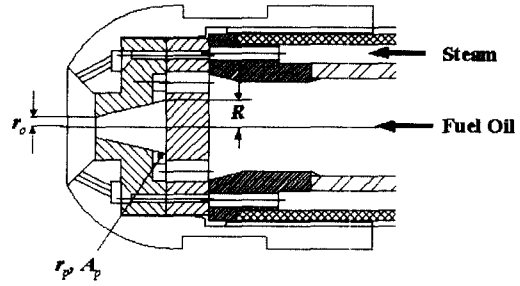


Fig. 2 Configuration of simplex swirl(SS1) atomizer

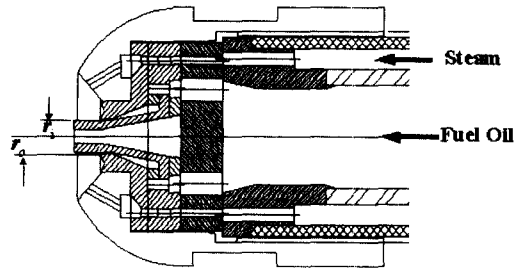


Fig. 3 Configuration of 2-staged swirl(DS) atomizer

설치되어 있는 200MW 의 정격출력을 내는 보일러에서 이루어 졌다. 이 때 사용한 노즐은 총 12 개로서 상기와 같은 기본실험을 거쳐 얻은 결과를 활용하여 기존 보일러에서 사용되고 있던 노즐과 동일 용량을 갖도록 설계된 것이다.

2.3 분무 노즐

본 연구의 비교대상인 기존의 압력 분무식 노즐은 Fig. 2 와 같은 형상을 갖는 것으로 전형적인 단순 선회 분무식 노즐(simplex swirl atomizer)이지만, 저 부하 운전시 연료 입경이 증가하는 단점을 극복하기 위하여 연료 액막의 외측에 일정 압력의 증기를 분사시켜 미립화 기능을 향상시킬 수 있는 구조를 가지고 있다.

Fig. 2 에 나타낸 선회 분무식 노즐과는 달리 본 연구의 대상인 2 단 선회 분무식 노즐(DS)은 Fig.3 과 같이 내부노즐(SS)과 외부노즐(AS)의 조합으로 만들어진 것으로 연료 분사에 의해 형성되는 화염을 내부화염과 외부화염으로 분리시켜 2 중의 화염구조를 갖도록 개선한 것이다. 이 노즐은 내부 선회실과 외부 선회실로 액체 연료가 각각 분리되어 유입될 수 있는 구조로 되어 있다.

Table 1 Design values of simplex & annular swirl atomizer.

제 원		r_0	r_a (r_i)	R	A_p	n
Simplex Swirl	SS1	3.0	-	6.80	9.60	8
	SS2	1.93	-	4.71	4.28	8
	SS3	1.95	-	3.87	4.63	8
	SS4	1.91	-	3.85	3.06	8
	SS5	1.90	-	3.86	4.65	8
Annular (Outer) Swirl	AS1	5.01	4.49	8.37	3.24	6
	AS2	4.91	4.43	8.48	3.57	6
	AS3	4.88	4.45	8.42	3.10	6
	AS4	4.91	4.44	8.45	3.48	6
Double (2-staged) Swirl	Inner (SS2)	1.93	-	4.71	4.28	8
	Outer (AS1)	5.01	4.49	8.37	3.24	6

이 노즐의 내부 및 외부 오리피스로부터 분사된 액막은 각각 다른 분무각 및 분사위치를 갖고 있어 분사 후 액막이 서로 중첩되지 않게 설계되어 있다. 이러한 분무구조는 외부 화염이 버너로부터 유입되는 연소용 공기와 내부로 분무되는 연료와의 빠른 혼합을 지연시킴과 동시에 재연소 효과를 효율적으로 이끌어 내어 결과적으로 NOx 발생량을 저감 시키고자 한 것이다.

Fig. 2 와 3 에서 나타낸 단순 및 2 단 선회 분무식 노즐의 설계 기술을 확보하기 위해 Table 1 에서 보는 것과 같은 여러 가지 노즐들을 준비하여 각각에 대한 분사압력, 유량, 분무각 및 입경을 측정하였다.

3. 이론적 배경

3.1 노즐의 이론적 설계

선회 분무식 노즐의 설계는 연소시스템의 운전 조건에 따라 요구되는 연료량 및 분무각을 결정하여 노즐의 세부적인 형상 변수를 결정한다.

선회 분무식 노즐의 유량과 압력관계를 나타내면,

$$\dot{m}_f = C_d A_o \sqrt{2\rho_f \Delta p} \quad (1)$$

이며, 식 (1)에서 유량 계수(C_d)는

$$C_d = \frac{1}{\sqrt{K^2/(1-\varepsilon)+1/\varepsilon^2}} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 이 때 유량을 계산하기 위해서는 노즐 내부의 선회실에서 형성되는 공기코어 (air core)와 관련된 노즐 출구 오리피스 충전효율 (ε)을 정확히 알 수 없으므로 최대 유량 유동 현상으로부터 ε 과 형상계수(K)와의 관계를 구하면

$$K = \sqrt{2} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^{3/2}} \quad (3)$$

과 같이 되고, 결국 유량계수는

$$C_d = \sqrt{\varepsilon^3/(2-\varepsilon)} \quad (4)$$

가 된다.

선회 분무식 노즐에서의 분무각은 노즐 출구에서의 선회 속도와 축방향 속도의 비로써 나타낼 수 있으므로

$$\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{2\sqrt{2}(1-\varepsilon)}{\sqrt{\varepsilon}(1+\sqrt{1-\varepsilon})} \quad (5)$$

와 같이 된다.

일반적인 선회 분무식 노즐 설계에서 분무각 (α), 유량(\dot{m}_f) 및 압력(Δp)은 설계조건이며, 식 (3)~(5)에 의해 ε , K 및 C_d 를 결정 할 수 있으므로 선회 분무식 노즐에 대한 설계가 가능하다.⁽⁵⁻⁷⁾

3.2 연료 2 단 분무에 의한 NOx 저감 원리

액체연료의 연소에서 질소산화물을 저감 시키기 위한 2 단 선회 분무식 노즐은 연료를 2 단으로 분리/분사하여 Fig. 4 에서 보는 것과 같이 버너로부터 공급된 연소용 공기와 화염장내부의 유동형상(internal recirculation zone, IRZ)에 의해 자연스럽게 연소공기 과잉영역(외부화염, Air rich)과 연료 과농영역(내부화염, Fuel rich)의 2 중 화염 구조를 형성한다.

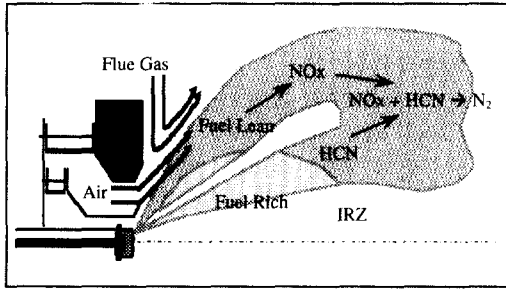


Fig. 4 NOx reduction mechanism

노즐의 1 차 연소 영역인 외부화염은 버너로부터 공급되는 연소용 공기의 주흐름에 걸쳐 형성되기 때문에 상대적으로 화염온도가 낮아져 열적 질소산화물(thermal NOx)의 발생량이 저감되는 효과를 기대할 수 있다. 반대로 2 차 연소 영역인 내부화염은 내부순환영역에서 형성되므로 연료 과농 연소 조건으로 화염 온도가 낮아져서 열적 NOx 생성이 억제될 뿐만아니라 저 산소영역 연소로 인해 연료 질소산화물(fuel NOx)의 생성도 저하된다. 또한, 저 산소 영역에서 연소되는 내부화염에서 발생하는 HCN 및 NHx 계열의 물질은 화염 후류로 이동하면서 외부화염으로부터 생성되어 흘러온 NOx 와 직접 반응하여 질소(N2)로 전환되므로 전체적으로 배출되는 NOx 를 감소시킨다.⁽⁸⁻¹⁰⁾

이러한 연료 2 단 분사에 의한 NOx 저감 효과에 미치는 중요한 변수로는 내부화염과 외부화염을 형성하는 연료량 비, 공기유동의 주흐름 위치 및 내부 순환 영역의 존재 위치에 따른 각 연료의 분무각이다. 아울러 2 중 분사에 의한 분무 입경의 분포 및 최대 입경은 액체 연료의 안정적인 화염 형성을 결정하는 변수가 된다.

따라서, 본 연구에서는 2 단 선회 분무식 노즐에서 각 단으로 분사되는 유량 및 분무각에 대한 설계 데이터를 확보하기 위한 실험을 수행하였다. 아울러 설계된 2 단 노즐의 분무 특성인 입경분포 및 크기가 기존의 단순 선회 분무식 노즐과 거의 같도록 설계하여 교체 연소 함으로써 노즐 교체에 의한 화염 조건의 변화가 보일리에 미치는 영향을 최소화하고자 하였다.

4. 실험 결과

4.1 선회 분무식 노즐의 유량계수

선회 분무식 노즐을 설계하기 위해서는 유량계수(C_d)에 대한 정보가 필요하다. 여기서는 3.1 절

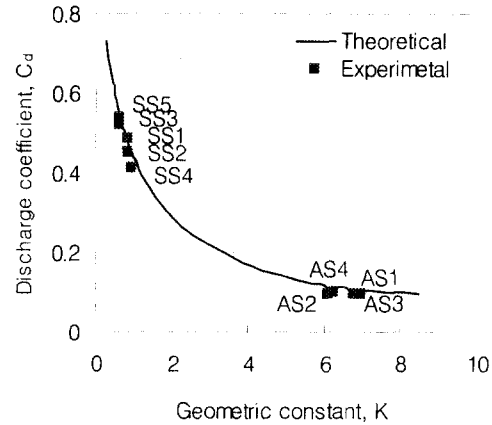


Fig. 5 Comparison between theoretical and experimental results of discharge coefficient(C_d)

에서 이론적으로 제시한 유량계수를 실 설계에 적용하기 위한 검증 실험을 수행하였다.

Fig. 5 는 Table 1 에서 제시한 바와 같이 상이한 형상계수(K)를 갖는 선회 분무식 노즐의 유량계수(C_d)를 식 (2)~(5)에 의해 예측한 결과와 실험결과를 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 외부노즐(Annular Swirl, AS)의 유량계수는 식 (2)의 최대 유량 법칙을 고려하여 내부노즐의 외측 반경을 공기 코어의 반경(r_o = r_i)과 동일하다고 생각하여 구한 기하학적 충전효율(ε_o)을 기준으로 계산하였다. 내부노즐(Simplex Swirl, SS)에 있어서는 이론적으로 계산된 유량계수와 측정 결과가 매우 작은 차이를 보이고 있으므로, 노즐 설계시 압력과 유량 관계를 비교적 작은 오차 범위 내에서 예측할 수 있다. 그러나 외부노즐의 경우 계산결과와 실험결과와 차이를 나타내는데 이를 보정하기 위해 식 (2)는 다음과 같이

$$C_d = \frac{C_c}{\sqrt{K^2 / (1 - \epsilon_o) + 1 / \epsilon_o^2}} \quad (6)$$

가 된다. C_c (Discharge correction factor)는 이론적 계산에서 고려 안된 내부 고체벽면의 마찰 압력강하를 고려한 것으로 외부노즐의 설계시 C_c 값을 고려함으로써 실제 운전 결과의 오차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

외부노즐의 내부벽면 및 형상에 대한 영향을 평가하여 설계에 적용할 수 있는 유량 계수의 보

정식을 정립하기 위해서는 향후 보다 구체적인 실험을 통해 C_c 값의 규명이 필요할 것이다.

따라서 연료의 다단 연소 원리에 의한 2 단 선회 분무식 노즐의 설계는 내부노즐의 경우 식 (1)~(5)로 설계하고, 외부노즐은 식 (2) 대신에 식 (6)에 의해 얻어진 유량계수를 사용함으로써 비교적 정확한 유량과 압력관계를 예측할 수 있다.

4.2 2 단 선회 분무식 노즐 설계결과

Fig. 6 은 식 (2)~(6)을 사용하여 설계한 2 단 선회 분무식 노즐의 유량과 압력 관계를 도시한 것이다.

DS 노즐은 실기에 적용하기 위한 것으로 200MW 실기 보일러에서 운전 중인 단순 선회 분무식 노즐(SS1)의 유량-압력관계와 가능한 한 유사하게 설계하고자 한 것이다. DS 노즐은 SS2 노즐을 내부노즐로 하고, AS1 노즐을 외부노즐로 설계되어진 2 단 선회 분무식 노즐로써 그림에서 보는 것과 같이 DS 노즐의 측정된 결과가 SS1 노즐과 일치함을 알 수 있다.

4.3 분무각의 변화 및 입경분포

단순 및 2 단 선회 분무식 노즐의 분무각을 측정하기 위해 유동가시화 방법을 사용하였으며, 각 노즐의 입경 분포는 PDPA 를 사용하여 측정하였다.

앞서 언급한 연료의 2 단 분무에 의한 NOx 저감 원리와 같이 2 단 선회 분무식 노즐의 경우 NOx 저감을 위해서는 외부화염은 공기과잉, 내부화염은 연료과농 연소조건이 선행되어야 하므로

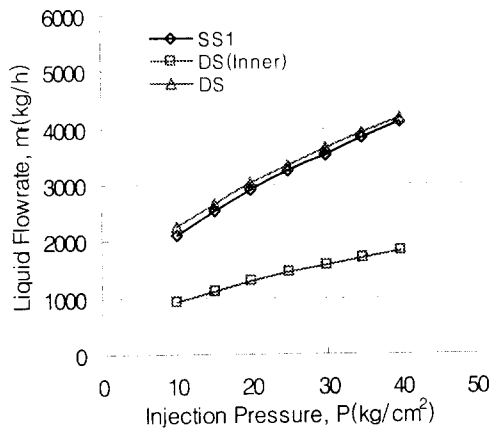


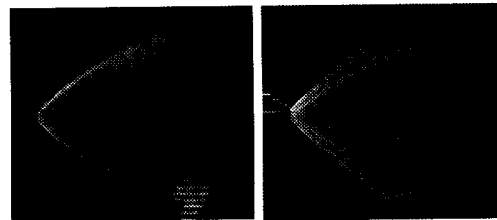
Fig. 6 Liquid flow rate of simplex(SS1) and 2-staged

swirl atomizer(DS)

내외부 노즐의 분무각 설정이 매우 중요한 변수가 된다. 내부노즐의 분무각을 더 작게 설계하거나 외부노즐의 분무각을 크게 설계하여 내외부 화염 간격을 늘려 NOx 배출을 더욱 작게 할 수 있으나, 이는 연소로의 재원, 즉 화염길이와 관계되는 보일러 화로 깊이 및 화염폭(직경)과 관계되는 인접 버너간 거리 등에 의해 제약을 받게 된다. 따라서, 노즐의 분무각 설정은 NOx 저감폭과 화로조건을 고려하여 설정해야 한다.

Fig. 7 은 물의 압력이 30kg/cm² 일 때 Ar-Ion 레이저의 평면 비임을 분무중심에 조사하여 가시화한 화상으로 단순 노즐 및 내외부의 2 중 분사 구조를 갖는 2 단 노즐의 분무 구조를 잘 보여주고 있다. Fig. 7에서 보는 것과 같이 2 단 노즐의 경우 내외부 노즐로부터 분사된 물은 서로 중첩되지 않고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8 은 각 노즐의 형상계수(K)에 따른 분무각을 Fig.7 과 같은 화상으로부터 측정된 결과를 이론식 (5)와 비교하여 도시한 것이다.



(a) SS1 atomizer (b) DS atomizer

Fig. 7 Typical images of swirl atomizer

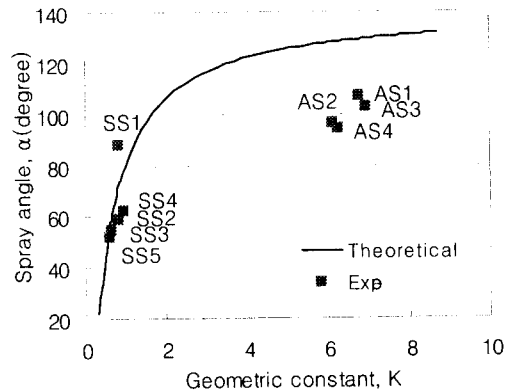


Fig. 8 Spray angle of swirl atomizers

단순 노즐인 SS1~SS5 노즐의 분무각은 식(5)에 의해 이론적으로 예측한 분무각의 결과와 아주 유사한 값을 갖는 것을 알 수 있다. 그러나, 외부노즐인 AS1~AS4 노즐의 분무각은 예측한 값보다 매우 작은 값을 갖는다. 이렇게 현저한 차이의 결과를 보이는 것은 내외부 노즐로부터 분사되는 연료의 중첩을 막기 위해 돌출시킨 내부노즐 형상의 영향으로 외부 노즐에서 분사되는 물의 유동이 분무 내부의 환형 구조물의 벽면을 따라 흐르고자 하는 관성력에 의해 연료의 선회속도가 감소하여 실제 분무되는 분무각이 작아지는 것으로 판단된다.

선회 분무식 노즐을 통해 분사되어 미립화된 연료 입경은 연소효율에 직접적인 영향을 미치는 것으로 연소 효율을 확보하기 위해서는 분무입경이 충분히 작아야 한다. 본 연구에 사용한 2 단 선회 분무식 노즐의 경우도 기존 노즐과 동등 이상의 연소효율을 갖고면서 NOx 를 저감하기 위한 것이기 때문에 입경에 대한 조사가 필요하다. 특히, 2 단 노즐의 경우는 내부노즐 및 외부노즐로부터 분사된 액막이 서로 중첩되어 과도한 크기의 액적을 생성할 소지가 있고, 아울러 액막의 미립화 과정에서 외부공기가 분무영역으로 유입되는 유동이 2 층으로 형성된 액막에 의해 방해 받게 되어 미립화 효율이 저하될 소지가 있으므로 이에 대한 조사가 필요했다.

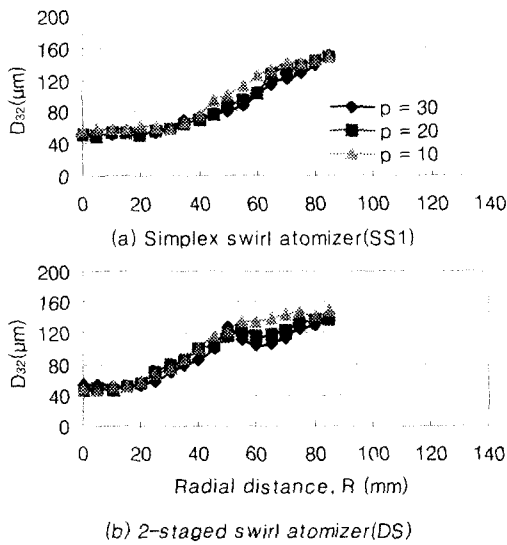


Fig. 9 Drop size distribution of swirl atomizers(SS1 & DS) at x=100mm

본 연구에서는 기존 실기에 사용하던 단순 선회 분무식 노즐(SS1)과 2 단 선회 분무식 노즐(DS)의 입경 분포를 위상/도플러 기법의 PDPA 시스템을 통해 측정, 비교하여 사전에 연소효율에 대한 검증을 실시하였다.

Fig. 9 (a), (b)는 SS1 노즐 및 DS 노즐에서의 입경을 분사압력을 변수로 측정한 결과이다. 측정 위치는 노즐 출구로부터 축 방향(분사진행 방향)으로 100mm 떨어진 곳이고, 측정은 반경방향으로 5mm 간격으로 수행하였다. 선회 분무식 노즐의 일반적인 특성인 압력이 높아짐에 따라 분무 입경이 작아지는 경향을 보이고 있으나 그 차이는 그리 크지 않음을 알 수 있다. 이는 입경변화가 분사압력 뿐만 아니라 분사유량 등에 의해서도 영향을 받고 있음을 간접적으로 보여 주는 것이다.

Fig. 10 은 분무압력이 30kg/cm² 일 때 축 방향 거리가 50mm, 100mm, 200mm 에서 SS1 노즐과 DS 노즐의 분무입경 분포를 측정하여 나타낸 것이다.

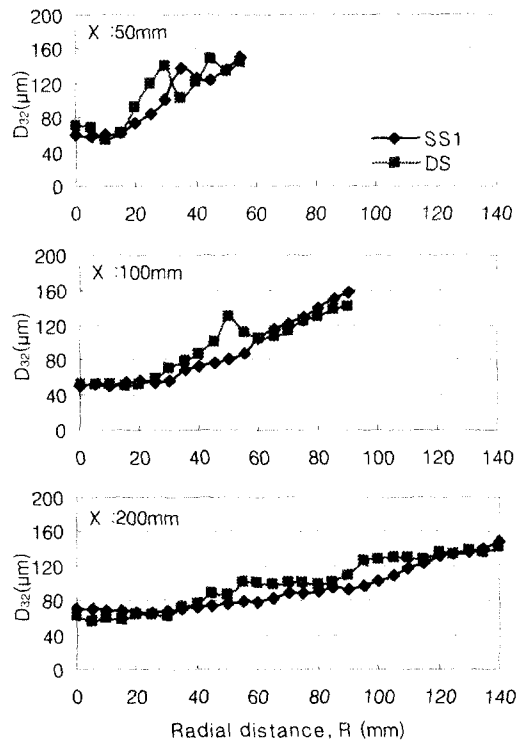


Fig. 10 Comparison of simplex swirl(SS1) with 2-staged swirl atomizer(DS)

축 거리가 50mm 에서의 입경분포를 보면 SS1 노즐에서의 입경은 반경 약 40mm 근처에서 1 개의 정점을 갖는 분포를 보이는데 반해, DS 노즐의 경우는 2 개의 정점이 존재하는 것을 알 수 있다. 이는 내부 및 외부의 분무상태가 분명한 경계를 이루고 있음을 의미한다. 따라서, 축방향 거리 50mm 에서는 분무의 중첩이 발생되지 않으나 100mm 이후 측정단면에서는 분무된 액적의 확산 등으로 액적간 중첩이 발생할 수 있으며 Fig. 10 에서 입경의 정점이 무더지는 결과를 보인다. 모든 축방향의 측정단면에서 단순 선회 분무식 노즐(SS1)은 2 단 선회 분무식 노즐(DS)보다 전반적으로 입경이 조금 작게 나타나고 있다.

이상의 결과로부터 전반적인 분무 영역에서 입경의 차이가 크지 않으므로 SS1 노즐과 저 NOx 용으로 설계된 DS 노즐의 연소효율은 서로 유사할 것으로 추측된다.

4.4 실기 적용 결과

2 단 선회 분무식 노즐의 NOx 저감 효과를 확인하기 위해 200MW 실기 보일러에 적용하여 기존 선회 분무식 노즐(SS1)과 2 단 선회 분무식 노즐의 연소 시험 결과를 비교하였다. 이때 사용한 연료는 중유(B-C oil) 이었다. 기존 SS1 노즐에 의한 연소와는 달리 2 중 화염 구조를 형성시킬 수 있도록 설계된 DS 노즐에 의한 연소에서 NOx 배출량이 현저하게 감소하는 결과를 보였다.

Fig. 11 는 보일러 출력 185MW 조건에서 4 단 3 열의 총 12 개 버너의 SS1 노즐을 DS 노즐로 교체하는 과정에서의 NOx 배출 특성의 변화를 보여주고 있다. DS 노즐의 교체는 보일러 상부 버너에서부터 하부로 진행되었으며, 각 단(3 개버너)의 노즐 교체 후 NOx 를 측정하였다. DS 노즐로 모두 교체한 경우 NOx 배출량은 기존 노즐에 비해 약 27%의 저감 효과가 있음을 확인할 수 있었으며 CO 의 발생량은 노즐 교체 전후에서 유사한 값을 나타내었다.

5. 결론

본 시험에 적용된 2 단 선회 분무식 노즐은 2 중 화염 구조를 형성시킬 수 있도록 연료를 분사하여 연료 다단연소(Fuel Staging)를 통해 NOx 생성을 억제 시키는 노즐이다. 이 노즐의 개발 및 실기적용 과정을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

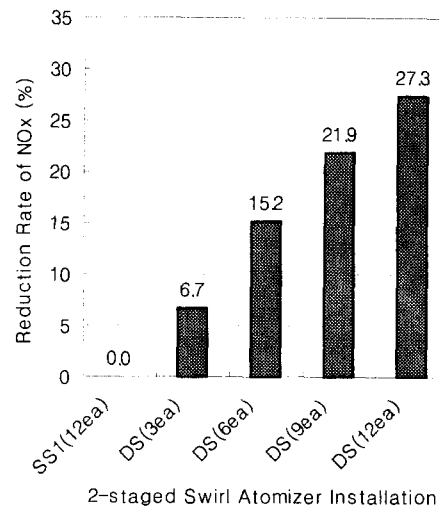


Fig. 11 The result of combustion test

(1) 단순 선회 분무식 노즐의 유량-압력관계는 이론적으로 구한 노즐 형상계수(K)와 유량계수(C_d)의 관계로부터 정확히 예측할 수 있었으나, 환형 선회(외측) 노즐에서 분사되는 유량-압력관계에 대해서는 식 (6)과 같이 유량계수에 내부 고체면의 유동저항을 반영하여 보정할 필요가 있음을 알 수 있었다.

(2) 선회 분무식 노즐의 분무각은 이론적으로 구한 분무각과는 차이가 있으며, 특히 환형 선회(외측) 노즐에서의 분무각은 큰 차이가 있음을 알 수 있었다. 이는 환형 구조물에서 물의 유동이 내부 고체면을 따라 흐르고자 하는 특성에 의한 것으로 추측된다. 기

(3) 존의 사용하던 노즐을 2 단 분사노즐로의 교체만으로 NOx 를 약 27%정도까지 저감 할 수 있었으며, 이로 인해 2 단 분사노즐을 통한 다단 연소 재현으로 NOx 를 저감할 수 있음을 간접적으로 확인할 수 있었다.

이상의 연구 결과로부터 저 NOx 2 단 선회 분무식 노즐의 설계 기술을 확보할 수 있었다. 실제 운전되고 있는 화력 발전소 보일러에서의 연소실험 여건상 2 단 선회 압력 분무식 노즐의 분무각 및 내외측 유량비 배분 등의 주요 변수에 대한 실험을 진행하지 못한 아쉬움이 남는다. 향후 이에 대한 연구를 진행하여 저감 능력이 보다 향상된 노즐을 개발하고자 한다.

참고문헌

- (1) Bowman, C.T., 1992, "Control of Combustion-Generated Nitrogen Oxide Emissions : Technology Driven by Regulation," *Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion / The Combustion Institute.*, pp. 859~878
- (2) Muzio, L.J., Quartucy, G.C., 1997, "Implementing NOx Control : Research to Application," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 23, pp. 233~266
- (3) 채재우, 전영남, 이운영, 1993, "단계적 연소의 NOx 저감에 대한 연구," *大韓機械學會論文集*, 第 17 卷, 第 6 號, pp. 1556-1571
- (4) Ahn, K.Y., Kim, H.S., Cho, E.S., Ahn, J.H., 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. 477~489
- (5) Lefebvre, H., 1989, "Atomization and Spray," Hemisphere Publishing Co., pp. 165~189
- (6) Bayvel, L., Orzechowski, Z., 1993, "Liquid Atomization," Taylor & Francis Publishing Co., pp. 252~266
- (7) 이상용, 1996, "액체의 미립화," 민음사, pp. 184~200
- (8) 石塚 悟, 徳田 君代, 松原三千郎 외, 1992, "油燃焼의 理論과 實際," pp. 186-195
- (9) Missaghi, M., Pourkashanian, M., Williams, A., Yap, T.L., 1991, "Prediction NOx Emission from Oxygen-Enriched Low NOx Burner," *For Presentation at the International Conference on Environmental Control of Combustion Processes*, Honolulu, Hawaii, October, pp. 7~10
- (10) Smart, J.P., Morgan, D.J., 1994, "The Effectiveness of Multi-fuel Reburning in an Internally Fuel-Staged Burner for NOx Reduction," *Fuel*, Vol.73, No. 9, pp. 1437~1442