

125 MW급 우드펠릿 발전소에서 탈질설비 운전조건이 질소산화물 발생량에 미치는 영향

전문수*, 이재현**†

*한양대학교 파워엔지니어링공학과, **†한양대학교 기계공학부

Effect of the De-NO_x Facility Operating Condition on NO_x Emission in a 125 MW Wood Pellet Power Plant

Moonsoo Jeon*, Jae-Heon Lee**†

*Dept. of Power Engineering, Hanyang University

**†School of Mechanical Engineering, Hanyang University

ABSTRACT : This study tested the effect of de-NO_x Facility operating condition on Nox emission in a 125 MW wood pellet power plant in Yeongdong Eco Power Plant Unit 1, which is in operation. As SNCR urea flow rate increased, NO_x emission gradually decreased, but ammonia slip after SCR increased. The boiler under test has a structure that is unfavorable to SNCR operation due to the high internal temperature, and the optimum location of the nozzle will be required. SCR dilution air temperature change did not affect the amount of NO_x generated. Increasing SCR ammonia flow reduced the NO_x emission at SCR outlet and also increased the NO_x removal efficiency. However, the ammonia flow rate of 111 kg/h, which does not exceed the ammonia slip its own reference limit, is estimated to be the maximum operating standard. The increase in SCR mixer pressure reduced NO_x emission and the removal efficiency was also measured to be the most effective variable to inhibit NO_x production.

초록 : 본 연구는 실제 운영중인 영동에코발전본부 1호기 125 MW 우드펠릿 발전소를 대상으로 탈질설비 운전조건이 NO_x 발생량에 미치는 영향을 시험하였다. SNCR 요소 유량 증가에 따라 NO_x 농도는 점차 감소하였으나 SCR 후단 암모니아 슬립은 상승하였다. 시험대상 보일러는 고온의 내부온도로 인해 SNCR 운영에 불리한 구조이며 노즐의 최적위치 검토가 필요할 것이다. SCR 희석공기 온도변화는 NO_x 발생량에 영향을 미치지 않았다. SCR 암모니아 유량 증가는 SCR 후단 NO_x 농도를 감소시켰고 NO_x 제거효율도 증가시켰다. 다만 암모니아 슬립 자체 기준치를 초과하지 않는 암모니아 유량 111 kg/h가 최대 운전기준으로 추정된다. SCR 믹서 압력 상승은 NO_x 농도를 감소시키고 제거효율도 최대로 측정되어 NO_x 생성을 가장 효과적으로 억제하는 변수로 파악되었다.

Key words : Selective Non-Catalytic Reduction(SNCR, 선택적 비촉매 환원법), Selective Catalytic Reduction(SCR, 선택적 촉매 환원법), Nitrogen Oxides(NO_x, 질소산화물), Ammonia slip(암모니아 슬립), Urea(요소)

† Corresponding Author, jhlee@hanyang.ac.kr

125 MW급 우드펠릿 발전소에서 탈질설비 운전조건이 질소산화물 발생량에 미치는 영향

-기호설명-

N_i : SCR 전단 질소산화물 농도 (ppm)	
N_o : SCR 후단 질소산화물 농도 (ppm)	T : 회석공기 온도 (°C)
N_s : SCR 후단 암모니아 슬립 농도 (ppm)	m_a : 암모니아 유량 (kg/h)
m_u : 요소 유량 (kg/h)	P : 믹서압력 (bar)

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

정부는 헌법 제35조 제1항에서 “모든 국민은 건강하고 쾌적한 환경에서 생활할 권리를 가지며, 국가와 국민은 환경보전을 위하여 노력하여야 한다.”라고 규정한 환경보전을 위하여 환경기본법과 대기, 수질, 폐기물, 소음·진동, 악취 등 오염 원인에 따른 개별대책법, 환경피해구제법 등의 환경법체계를 제정 및 운영하여 그 의무를 부과하고 있다(1).

그리고 2017년부터 시행한 “환경오염시설의 통합관리에 관한 법률”(이하 통합환경관리법)은 오염 원인별 개별대책법에 우선하여 적용하는 상위법으로써 사업장에서 발생하는 오염물질을 하나의 통합허가 방식으로 최적화하여 관리하는 것을 목적으로 하고 있다(2).

2020년 1월 1일부터는 “대기환경보존법(시행규칙 별표 8)”에 따른 대기오염물질의 배출허용기준이 더욱 강화되었다. 본 연구의 시험 대상인 영동예코발전본부 1호기의 경우 2019년까지 대기 오염물질의 배출허용기준이 황산화물(SOx) 30ppm, 질소산화물(NOx) 90ppm, 먼지(Dust) 10mg/Sm³ 이었으나, 2020년부터는 각각 10ppm, 70ppm, 10mg/Sm³으로 적용받게 되었다(3). 또한 통합환경관리법 시행에 따라 한국남동발전 등 5대 한전 발전회사들은 2020년까지 기한인 통합환경인허가 취득을 조기 추진하기로 환경부와 협약을 맺고 진행하였다.

그 결과 영동예코발전본부 1호기는 2020년 5월 1일부로 통합환경인허가를 최종 승인받았다. 그러나 인허가 과정중 시행한 배출영향분석 결과 질소산화물의 허가배출기준이 일부 불만족으로 나타나 최종 배출농도 허용기준은 70ppm의 85%를 적용한 60ppm으로 적용받아 최대배출기준이 더 낮아지게 되었다.

다만 황산화물과 먼지의 평균 배출농도 운영수준은 약

5ppm, 5mg/Sm³으로 배출허용기준 변경 후에도 자체 운영기준 계획을 충족하는 반면, 질소산화물의 경우에는 운영 실적이 약 60ppm 수준으로 추가적인 감소대책이 필요한 실정이다.

1.2 연구내용

우드펠릿 보일러에서 연소 중 질소산화물이 생성되어 배출되는 과정은 연료(Fuel) NOx, 열적(Thermal) NOx 및 프롬프트(Prompt) NOx로 구분된다. 연료 NOx는 연료에 유기적으로 결합된 질소성분이 연소시 산화되어 발생하는 질소산화물을 의미하며, 열적 NOx는 연소용 공기가 고온에서 산화되는 경우로써 질소산화물 발생에 대부분을 차지한다. 반면 프롬프트 NOx는 화염내부 연료 농후영역에서 질소분자와 탄화수소가 산화되어 질소산화물이 되는 과정으로 열적 NOx에 비하여 생성량이 극히 미약하므로 무시할 수 있다(4).

탈질기술별 저감방법 중 선택적 비촉매 환원법(Selective Non-Catalytic Reduction, SNCR)은 연소가스(Flue gas)에 요소(Urea) 등의 반응제를 분사하여 질소산화물을 저감시키는 방법으로 선택적 촉매 환원법(Selective Catalytic Reduction, SCR)과 비교시 초기투자비는 적지만 탈질 효율은 약 30~50%로 상대적으로 낮고, 보일러 내부온도와 운전조건별로 탈질 효율이 크게 변동한다는 단점이 있다. 반면 SCR은 촉매 표면에서 암모니아를 반응시켜 질소와 물로 환원되는 원리를 이용하는 가장 발전된 탈질 제거기술로써 탈질 효율이 최대 90% 이상이고 설비 신뢰성이 높지만, 고가의 촉매 등 초기투자비가 매우 크고 많은 설치공간을 필요로 한다(4).

시험 대상인 영동예코발전본부 1호기는 저NOx 버너 사용과 보일러 연소기 상부로 공기를 공급하는 장치인 OFA(Over fire air) 댐퍼를 통한 2단 연소용 공기를 공급함으로써 주 연소영역의 온도를 낮추어 열적 NOx의 발생을 줄일 수 있게 하였다. 또한 보일러 상부와 후단에 SNCR 및 SCR 배연 탈질설비를 추가하여 운영함으로써 강화된 배출허용기준을 준수하고 있다. 이것은 초기투자비와 운영비 절감을 위하여 저NOx 버너와 2단 연소 등으로 질소산화물 생성을 최대한 줄이고 난 이후에 최소한의 SNCR과 SCR 탈질설비를 설치 운영하는 것이 최적의 경제성을 가

진 것으로 나타나기 때문이다⁵⁾⁽¹⁶⁾.

한편, 우드펠릿 연소방식이 석탄 연소 보일러와 거의 모든 면에서 유사하지만, 대형 우드펠릿 전소 발전소에서의 질소산화물 저감에 관한 연구가 미흡한 것은 사실이다. 다만 동일 보일러에서 선행 연구한 “우드펠릿 보일러에서 2단 연소용 공기 공급방식이 질소산화물 및 일산화탄소 발생에 미치는 영향” 논문⁷⁾에서는 2단 연소용 공기의 공급위치와 비율을 조절한 연소제어 기술로 질소산화물 등의 배출량 추이를 분석한 사례가 있었다. 이에 본 연구에서는 탈질기술별 저감방법 중 연소 후처리 제어기술인 SNCR과 SCR 탈질설비의 운전조건 변화를 통하여 우드펠릿 발전소에서의 질소산화물 생성에 미치는 영향을 실험적으로 살펴보고 설비 특성을 파악함으로써 환경규제치 준수를 위한 탈질설비 운영기준을 확립하는데 참고 자료로 활용하고자 한다.

2. 탈질설비의 구성 및 시험방법

2.1 설비의 구성

2.1.1 보일러 계통

우드펠릿 발전소에서 SNCR 및 SCR 운전조건이 질소산

화물 발생에 미치는 영향을 분석하기 위해 다음과 같은 시험 대상을 통해 연구를 수행하였다. 앞서 언급한 것처럼 시험 대상설비는 정격 용량 125 MW 출력의 영동예코발전본부 1호기 우드펠릿 보일러를 대상으로 선정하였다. 1973년 인근 탄광에서 생산되는 무연탄을 연소하며 상업운전을 시작한 이래 2017년 7월부터는 국내 최초, 최대용량의 우드펠릿 전소 발전방식을 도입 및 운영하여 신재생에너지 공급인증서(Renewable Energy Certificate, REC) 확보가 가능하도록 보일러 설비를 개조하였다⁸⁾.

이러한 목적계 바이오매스 발전은 정부의 온실가스 저감을 위한 발전사업자의 신재생 에너지공급 의무이행(Renewable Portfolio Standard, RPS)에 적극 동참하면서 석탄 대비 대기오염물질의 배출량이 적으며, 급전의 통제를 따르지 않는 독립적 운영이 가능함에 따라 이용률을 극대화할 수 있는 장점이 있다⁷⁾.

영동예코발전본부 1호기 우드펠릿 보일러의 주요 설비규격은 Table 2-1과 같다. 이 보일러는 자연순환, 평형통풍 및 대향식 버너 연소방식의 아임계압 드림형으로써 노의 크기는 8.1m×34.0m×42.7m 구조를 갖고 있으며 100% 터빈최대연속정격(Turbine maximum continuous rating, TMCR) 기준 보일러 열효율은 제작사 마진 0.50%를 제외한 84.20%, 증발량 372.31ton/h, 주증기 압력 131.20kg/cm², 주증기 온도는 541℃로 설계되었다⁹⁾.

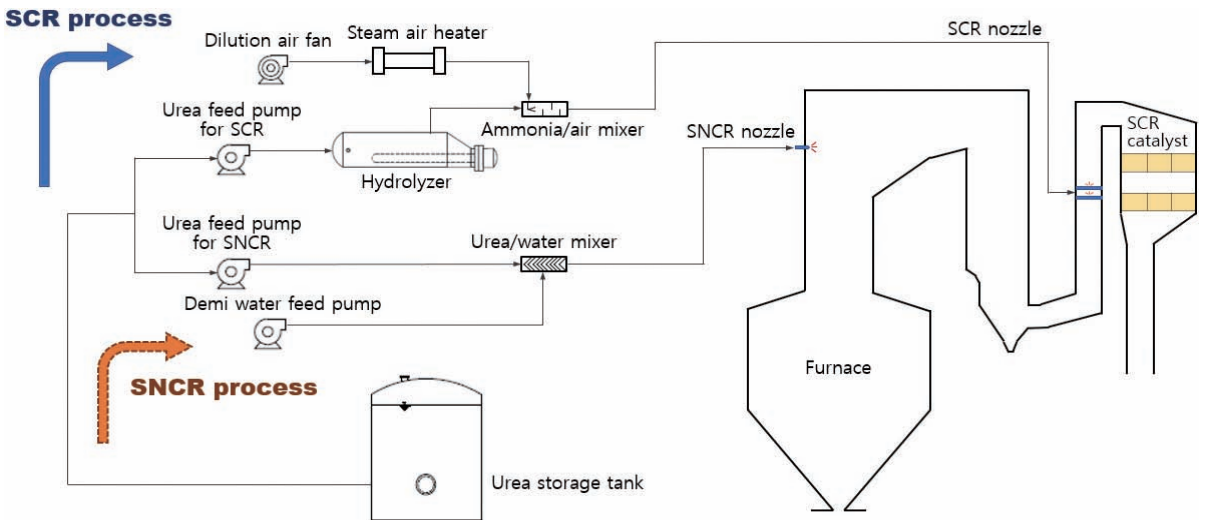


Fig. 2-1 Flow diagram of de-NOx system

125 MW급 우드펠릿 발전소에서 탈질설비 운전조건이 질소산화물 발생량에 미치는 영향

Table 2-1 Main specifications of the boiler

Description		Unit	Specification
Boiler type		-	Drum subcritical pressure Balanced Draft Biomass Firing
100% TMCR	Rated output	MW	125
	Heat rate	kcal/twh	2,104.78
	Boiler efficiency	%	84.20
	Main steam flow rate	ton/h	372.31
	Main steam pressure	kg/cm ²	131.20
	Main steam temperature	℃	541
NOx emission (6 % O ₂)		ppm	90
Design & manufacturing maker		-	Doosan Babcock

2.1.2 탈질설비 계통

1) 탈질설비 개요

시험 대상 보일러는 연소과정에서 생성되는 질소산화물 저감을 위해 SNCR과 SCR 배연 탈질설비를 동시에 갖추고 있다. 기존 보일러 후단에 설치된 SCR 외에 보일러 내부에 SNCR을 추가하여 이중화한 것을 하이브리드 탈질시스템이라고 하는데 이것은 질소산화물 제거 효율을 더욱 향상시키는 경제적인 시스템이다(5)(6).

영동예코발전본부 1호기 탈질설비의 구성과 요소 흐름을 Fig. 2-1에 도식화하여 나타내었다. 기존 암모니아 방식을 대신하여 인체에 무해하고 안전성이 확보된 요소수 방식으로 국내 최초 최대 용량의 발전용 탈질설비를 도입하게 되었다. SNCR과 SCR 탈질설비를 운영하기 위한 주 원료인 요소(NH₂CONH₂)는 제작사로부터 50% 수용액의 약액기성 상태로 저장탱크에 입고된다.

먼저 요소의 SNCR 공급 과정을 간략히 살펴보면 공급펌프를 거쳐 액체용 믹서(Urea/water mixer)에 도달한 요소는 탈이온수(De-mineralized water, Demi water)와 희석된 후 노즐을 통해 보일러 내부로 분사된다. SCR의 경우에는 공급펌프를 통해 가수분해설비(Hydrolyzer)로 이동한 요소는 암모니아로 성상이 바뀌어 가스용 믹서(Ammonia/air mixer)로 공급되고 가열된 공기와 혼합되어 희석된 상태로 SCR 노즐을 통해 보일러 내부로 분사하게 된다.

SNCR 및 SCR 탈질설비의 주요 설비규격은 Table 2-2와 같다(10). 요소와 탈이온수, 희석공기를 공급하는 펌프 및 팬류, 가수분해설비, 믹서 등 대부분 설비들은 점검, 정

Table 2-2 Main specifications of de-NOx system

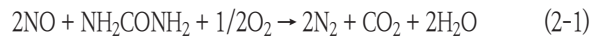
Description		Specification
SNCR	Urea feed pump (Capacity × Head)	2 EA (1.0 m ³ /h × 80 m)
SCR		2 EA (1.0 m ³ /h × 120 m)
Demi water feed pump (Capacity × Head)		2 EA (2.2 m ³ /h × 60 m)
Hydrolyzer	Dimension (D × L)	1,219 mm × 4,267 mm
	Volume	5.2 m ³ (Urea 2.6 m ³ , Ammonia 2.6 m ³)
	Quantity	2 EA (Operation 1EA, Stand-by 1EA)
	Ammonia generation rate	20 ~ 200 kg/h
Dilution air fan (Capacity × Head)		2 EA (10 m ³ /min × 80 mmAq)
Ammonia / air mixer		2 EA (In-line type)
SCR catalyst	Type	Honeycomb
	Volume	76 m ³ (2 Layers)

비 및 비상상황을 대비하여 기본적으로 운전용 1대, 예비용 1대로 2대씩 설치되어 있다.

2) SNCR 탈질 공정

앞서 살펴본 것처럼 SNCR 운전시 요소는 공급펌프를 거쳐 액체용 믹서에 도달하게 되고 탈이온수와 혼합되어 농도가 더 낮아져 노즐을 통해 보일러 내부로 분사한다. 정격 운전시 요소와 탈이온수 혼합비는 약 5.5로써 보일러에 최종 분사되는 요소 농도는 10% 이하의 희석된 상태가 된다. 이때 SNCR 주입부는 지상 38.4 m 높이의 보일러 전면 상부에 1개열 6개 노즐로 설치되어 있으며 모두 동일한 유량으로 분사된다.

SNCR에 의한 대표적인 질소산화물 제거 반응은 식(2-1)과 같다(11).



보일러 내부로 주입된 요소는 연소가스 속의 질소산화물을 산소와 반응시키고 환원제 역할을 하면서 질소와 이산화탄소, 물 등 무해한 성분으로 분해하여 제거한다.

3) SCR 탈질 공정

SCR 운전시에는 저장탱크로부터 공급된 요소가 공급펌프를 거쳐 가수분해설비로 이동된다. 이곳에서는 물 분자가 작용하여 일어나는 분해반응인 가수분해가 발생하는데 이 반응으로 요소는 분해되어 암모니아, 이산화탄소, 수증기를 생성한다. 이 과정은 흡열 반응으로 열공급이 필요하

며 반응식은 식(2-2)와 같다.



여기서 발생한 암모니아 가스는 가스용 믹서로 공급되고 가열된 공기와 혼합하여 희석된 상태로 SCR 노즐을 통해 보일러 내부로 분사된다. SCR 주입부는 촉매층(Catalyst bed) 전단에 격자(Grid) 방식으로 구성된 2개 층으로 설치되고 지상 33.8~35.3 m 높이에 위치하고 있다.

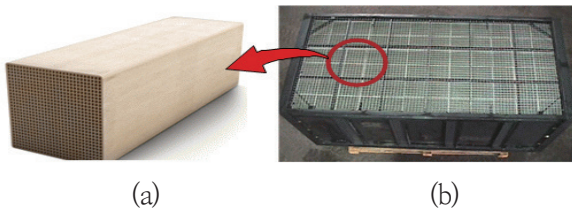
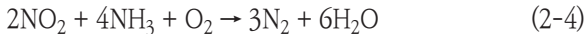
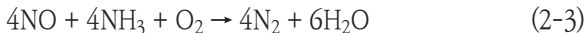


Fig. 2-2 Ceramic honeycomb type :

(a) Honeycomb catalyst, (b) Catalyst module assembly

SCR에 의한 질소산화물 제거 반응과정은 식(2-3), (2-4)와 같다(11).



이 과정에서 절탄기(Economizer) 후단과 공기에열기(Air heater) 전단에 위치하고 가스온도 300~400℃ 구간인 촉매층은 환원제인 암모니아와 질소산화물을 촉매 표면에 흡수 및 반응시켜 질소와 수증기로 분해하여 제거하는 역할을 한다. 생성물은 배기가스로 확산되고, 촉매 활성점은 회복되어 재반응을 진행하게 된다.

SCR 방식은 높은 질소산화물 제거 효율을 갖고 있으며, 상대적으로 암모니아 소비량과 불필요한 물질 생성을 최소화하는 장점을 가지고 있다. 다만 촉매에서의 응축 방지 목적으로 유입되는 가스온도는 이슬점 온도 이상으로 유지해야 하며, 특히 암모니아 슬립(Slip)이 증가하지 않도록 주의해야 한다(4).

SCR 촉매의 형상은 Fig. 2-2 (a)와 같이 벌집모양(Honeycomb)의 세라믹 타입이며 이러한 촉매는 (b)처럼

모듈로 구성되어 2개 층(Layer)에 걸쳐 설치된다. 촉매층 1개는 42개 모듈, 체적은 약 38m³의 크기로 구성되며 시험대상 보일러에는 총 84개의 모듈이 설치되어 있다(11).

영동예코발전본부 1호기 탈질설비의 주요 성능보증 사항에 대한 내용은 Table 2-3과 같다.

Table 2-3 The main warranted performance of de-NOx system

Description	Unit	SNCR	SCR
NOx (O ₂ 6%)	ppm	≤ 50	≤ 50
NOx Removal Efficiency	%	≥ 44.4	≥ 44.4
NH ₃ Slip (O ₂ 6%)	ppm	-	≤ 2
Conversion Rate (SO ₂ → SO ₃)	%	-	≤ 1
Catalyst Life	h	-	≥ 8,000

O₂ 6% 기준 질소산화물 배출농도는 50ppm 이하, 제거 효율 44.4% 이상, 암모니아 슬립농도는 2ppm 이하, SCR 촉매 수명은 8,000 시간 이상 등의 성능을 보증하고 있다.

최근 바이오매스 연료에 기인하는 칼륨(K₂O), 인(P₂O₅) 성분 증가로 인한 전형적인 피독물질 증가와 보일러 내 클링커 다량 발생으로 인한 연소가스 온도 상승이 SCR 반응 온도 상승으로 이어져 촉매 활성도가 빠르게 낮아지고 있다. 이러한 연소물질과 SCR 운전환경의 변화 현상은 보증된 촉매 수명을 점차 감소시키고 있는 실정이다(12).

2.2 시험 기준 및 방법

본 시험은 탈질설비에 따라 SNCR 운전조건에서 1가지, SCR에서 3가지 방법으로 구분하여 독립적으로 시행하였다. 4가지 모든 경우의 시험에서 탈질설비 운전조건 변화 이외의 다른 운전조건은 동일하였으며, 결과 데이터의 취득은 운전변수 조정후 10분간의 연소 안정화 시간을 확보한 후 2시간 데이터의 평균값을 적용하였다. 시험기간은 2019년 11월 6일부터 12일간 진행하였으며, 발전 출력은 정격보다 다소 낮은 122MW 부하에서 시행하였다. Table 2-4는 시험시 소비한 우드펠릿의 평균적인 성상을 나타낸다. 발열량은 연소 기준 4,367kcal/kg, 휘발분 74.90%, 애쉬 1.92% 등이며, 보일러에 공급하는 연료 입자의 크기는 분쇄기를 통과한 후 4mm 이하로 투입하였다.

125 MW급 우드펠릿 발전소에서 탈질설비 운전조건이 질소산화물 발생량에 미치는 영향

그리고 시험 제한사항으로 탈질설비 운전조건 변화시 SCR 후단에서의 암모니아 슬립(Slip) 농도가 발전소 자체 운전 기준치인 10ppm을 초과하게 될 경우에는 해당 조건의 시험을 중단하기로 하였다. 만약 배기가스 온도가 낮은 상태에서 암모니아 슬립이 많을 경우 황산수소암모늄(NH₄HSO₄, Ammonium Bi-Sulfate, ABS)를 생성하게 되는데, 이 물질은 산성으로 매우 강한 부식성과 점착성을

Table 2-4 Properties of wood pellet used for testing

Description		Design	Test
Calorific Value_fired basis (kcal/kg)		4,100	4,367
Proximate analysis (wt %)	Moisture	6.40	7.51
	Fixed carbon	17.16	15.67
	Volatile matter	74.73	74.90
	Ash	1.69	1.92
Ultimate analysis (wt %)	Carbon	50.00	49.48
	Hydrogen	6.17	5.72
	Oxygen	41.67	41.85
	Nitrogen	0.25	0.36
	Sulfur	0.03	0.03
	Ash	1.88	2.56

갖고 있으며 탈질설비 후단의 공기예열기, 전기집진기 및 덕트 등 설비부식과 막힘을 유발하여 설비 신뢰성에 치명적인 영향을 미칠 수 있다(4). 그렇기 때문에 운전 중에는 적정 암모니아 주입과 분배가 매우 중요한 요인이기에 엄격한 관리가 필요하다.

첫 번째 시험 방법은 SNCR 탈질설비의 요소 유량 조절에 따른 SCR 전단에서의 질소산화물 농도와 SCR 후단에서의 암모니아 슬립 변화를 분석하였다. 요소 유량은 정격 운전값 168 kg/h를 기준으로 약 25 kg/h씩 조정하여 2회 증가 및 감소시킨 상태에서 데이터를 취득하였다.

두 번째 방법은 SCR 탈질설비로 공급하는 회석공기 온도 변화를 통한 SCR 후단에서의 질소산화물 영향을 분석하였다. 회석공기 온도 조절은 SCR 회석공기 가열기로 공급되는 증기 제어밸브 개도 조절을 하면서 정격 운전 데이터 152℃를 기준으로 5℃ 간격으로 각각 2회 증가 및 감소를 진행한 상태에서 데이터를 취득하였다.

세 번째 방법은 SCR 탈질설비로 공급하는 암모니아 유량

조절을 통한 SCR 후단에서의 질소산화물 변화를 분석하였다. 암모니아 유량은 정격 운전값 95 kg/h를 기준으로 상하 2회 간격마다 약 15 kg/h씩 변화시키면서 데이터를 취득하였다.

마지막 네 번째 방법은 SCR 탈질설비 압력변화를 통한 SCR 후단에서의 질소산화물 영향을 분석하였다. 정상시 정격운전 상태인 SCR 가스용 믹서 압력 설정값 5.4 bar를 기준으로 0.5 bar씩 2회 증가 및 2회 감소시키면서 데이터를 취득하였다.

Fig. 2-3에는 본 시험의 주요 항목별 측정위치를 나타내었다. (a)는 SCR 전단 질소산화물 농도(Ni), (b)는 SCR 후단 질소산화물 농도(No), 그리고 (c)는 SCR 후단 암모니아 슬립 농도(Ns)를 각각 나타낸다. 질소산화물 농도 변화를 측정하기 위해 SCR 탈질설비 전단과 후단에 각각 설치된 계측기는 Sick사의 GM-32 고정 설치형 모델로써 지면으로부터 29.5 m 높이에 설치되어 있다. 측정방식은 자외선 흡수법을 이용하며 측정범위는 0~500ppm까지 가능하다. SCR 탈질설비의 암모니아 슬립 측정을 위한 계측기는 SCR 탈질설비 후단에 설치된 Siemens사의 고정 설치형 LDS6 모델이며 질소산화물 농도 계측기와 같은 높이에 설치되어 있다. 측정방식은 레이저 투과법을 이용하며 측정범위는 0~50ppm까지 가능하다.

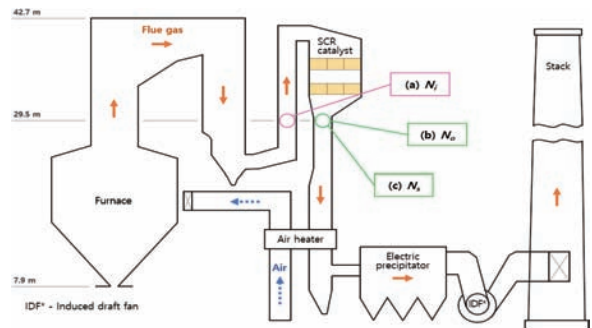


Fig. 2-3 Measurement positions by item

3. 탈질설비 운전조건 변화시험 결과

3.1 SNCR 요소 유량의 영향

SCR 탈질설비의 회석공기 온도(152℃), 암모니아 유량

(95 kg/h), 믹서 압력(5.4 bar)를 고정하고 SNCR 탈질설비의 요소 유량 μ 를 변경할 경우의 SCR 전, 후단에서의 질소산화물 N_i , N_o 및 SCR 후단에서의 암모니아 슬립 N_s 변화를 비교한 그래프는 Fig. 3-1과 같다. 요소 유량을 117 kg/h, 142 kg/h, 168 kg/h, 193 kg/h, 226 kg/h 로 증가시키는 경우로써 SCR 전단에서의 질소산화물 농도는 각각 98ppm, 97ppm, 91ppm, 86ppm, 84ppm으로 SNCR 요소 유량 증가에 따라 질소산화물 농도는 점차 감소한다는 것을 알 수 있었다.

질소산화물 배출 환경규제치 준수해야 하는 제약조건 때문에 SCR 단독운전이 불가하여 SNCR 운전에서 다른 질소산화물 제거 효율을 직접적으로 측정할 수는 없었다. 하지만 “SNCR Process for Coal fired Boilers” 문헌(13)에 따르면 SNCR 탈질제어 기술에서 최소의 암모니아 슬립과 최적의 질소산화물 환원을 위한 최적 온도는 약 900℃~1,020℃일 때 질소산화물 제거 효율은 90% 수준이며 SNCR 노즐 주위 내부온도가 1,200℃ 이상인 본 시험의 제거 효율은 급격히 낮아진 20% 미만인 것으로 제시하고 있다. 이 기준으로 요소 유량 범위 내 SNCR 설비의 질소산화물 제거 수준을 역산해 보면 대략 21ppm~25ppm 미만인 것으로 추정된다.

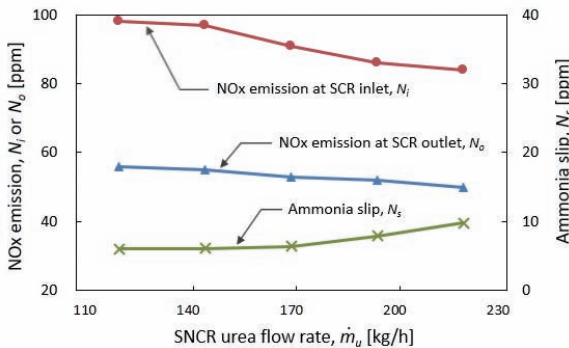


Fig. 3-1 Change of NOx emission with SNCR urea flow rate

SCR 후단에서의 질소산화물 농도는 각각 56ppm, 55ppm, 53ppm, 52ppm, 50ppm으로 측정되어 SCR에서의 질소산화물 제거 효율은 39.5%~43.3%로 나타났다. 계산 결과 제작사에서 보증한 성능치보다 약간 낮게 측정되었는데, 이는 2019년 5월 촉매 1, 2단 동시 교체 이후 운

전시간이 4,000 시간을 초과하면서 내부 피독물질 점착으로 인한 활성도가 낮아져서 촉매 효율이 점차 저하된 것으로 판단된다.

또한 SNCR 요소 유량 증가에 따른 SCR 후단에서의 암모니아 슬립 농도는 6.0ppm에서 9.8ppm으로 상승하였다. 이것은 SNCR에서의 요소 주입이 SCR 후단에서 암모니아 슬립에 대한 영향성이 존재한다는 것을 확인할 수 있었다.

검토 결과 시험 대상 보일러의 경우 탈질효율 측면에서 고온의 내부온도로 인해 SNCR 운영에 불리한 것으로 사료되며 향후 효율 향상을 위해 보일러 내부 온도분포에 최적화된 요소 분사노즐의 위치 변경을 적극 검토해 볼 필요가 있을 것이다.

3.2 SCR 희석공기 온도의 영향

SCR 탈질설비에 공급하는 암모니아 가스와 혼합, 희석시키는 공기 온도 T를 변화시켜 SCR 후단에서의 질소산화물 N_o 와 암모니아 슬립 농도 N_s 의 영향을 분석하여 Fig. 3-2에 나타내었다. 시험방법은 SNCR 요소 유량(168 kg/h)과 SCR 암모니아 유량(95 kg/h), 믹서 압력(5.4 bar)을 일정하게 유지하면서 희석공기 온도를 142℃, 147℃, 152℃, 157℃, 162℃ 구간으로 5℃씩 변화시키며 진행하였다. 이러한 온도 조절은 SCR 희석공기 가열기로 공급되는 증기의 유량을 조절하면서 시행하였고, 상시 운전조건은 약 152℃이다.

SNCR 요소 유량을 정격운전 기준으로 유지하였을 때 SCR 전단의 질소산화물 농도 N_i 는 87ppm~91ppm으로

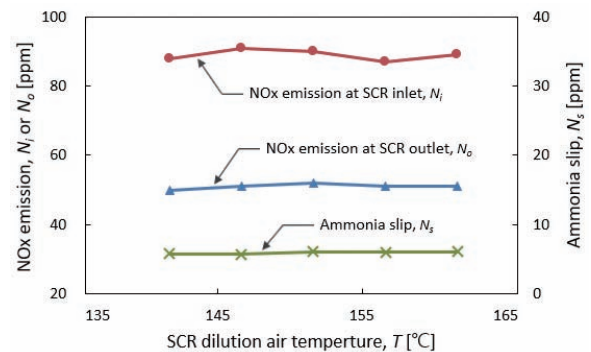


Fig. 3-2 Change of NOx emission with SCR dilution air temperature

125 MW급 우드펠릿 발전소에서 탈질설비 운전조건이 질소산화물 발생량에 미치는 영향

측정되었다. 희석공기 온도변화로 인한 SCR 후단의 질소산화물 농도는 50ppm~52ppm, 질소산화물 제거효율은 41.4%~43.9% 수준으로 특별히 경향성 없는 결과를 나타내었다.

SCR 공정에서 가장 중요한 변수는 온도(6)이며, 온도 상승은 분무되는 가스의 미립화를 촉진시키고 균일한 유동장 형성에 영향(14)을 미치기 때문에 암모니아 가스와 혼합하는 희석공기 온도 변화를 통해 질소산화물 생성을 저감시키는 효과를 기대하였으나 본 조건에서는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. SCR 후단에서의 암모니아 슬립 농도 역시 영향성이 미미한 것을 확인하였다.

설비 특성으로 인해 온도 변화 범위를 폭넓게 제어할 수 없는 상황이 아쉬웠다. 향후에 보다 다양한 범위로의 온도 조절이 가능하도록 SCR 희석공기 가열기로 공급되는 증기 제어시스템의 개선이 필요할 것이라 사료된다.

3.3 SCR 암모니아 유량의 영향

SCR 탈질설비에 공급하는 암모니아 유량 m_a 를 변화시켜 SCR 후단에서의 질소산화물 농도 N_o 와 암모니아 슬립 농도 N_s 의 분석결과를 Fig. 3-3에 도식화하였다. 시험방법은 SNCR 요소 유량(168 kg/h)를 동일하게 고정하였고, SCR 희석공기 온도(152℃) 및 가스용 믹서 압력(5.4 bar)도 일정하게 유지하면서 암모니아 유량 제어밸브 개도 조절을 통한 공급 유량을 67 kg/h, 80 kg/h, 95 kg/h, 111 kg/h, 126 kg/h로 변화시키면서 시행하였다.

SCR 전단 질소산화물 N_i 가 86ppm~92ppm 농도일 때

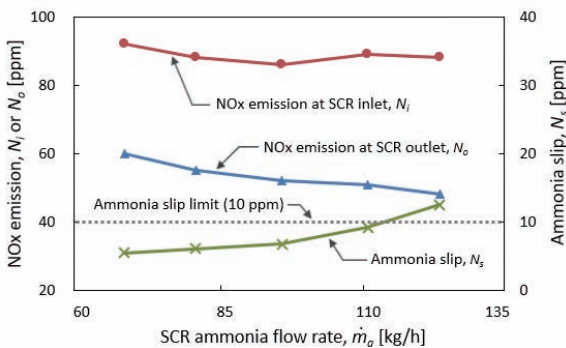


Fig. 3-3 Change of NOx emission with SCR ammonia flow rate

암모니아 유량 변화에 따른 SCR 후단 질소산화물 농도는 각각 60ppm, 55ppm, 52ppm, 51ppm, 48ppm으로 측정되었다. 암모니아 유량을 최소 72 kg/h에서 최대 126 kg/h로 증가시키기에 따른 SCR 후단 질소산화물 농도는 60ppm에서 48ppm으로 변화하여 최대 12ppm 감소하였으며, 정격운전 유량 95 kg/h일 때 52ppm 대비 약 4ppm 정도 감소하였다.

또한 SCR 질소산화물 제거 효율도 34.8%에서 45.5%로 점차 증가한 것으로 파악되어 암모니아 유량의 증가는 SCR에서 질소산화물 제거에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

다만 암모니아 유량 111 kg/h인 조건에서 암모니아 슬립 농도는 9.2ppm, 126 kg/h일 경우 최대 12.5ppm으로 자체 기준치를 초과하게 되어 더 이상 시험이 불필요하였다. 암모니아/질소산화물 비가 커질수록 제거효율은 높아지지만 과량의 암모니아의 분사로 인해 미반응 양이 많아져 암모니아 슬립이 증가한다는 사실을 확인하였다(15).

시험 결과 암모니아 유량의 최대 운전기준은 슬립 기준치를 초과하지 않는 약 111 kg/h 조건이 적절할 것으로 추정된다.

3.4 SCR 암모니아 유량의 영향

마지막으로 SCR 탈질설비인 암모니아/공기 믹서 압력 P의 변화를 통한 SCR 후단에서의 질소산화물 N_o 영향을 분석하여 비교한 그래프를 Fig. 3-4와 같이 나타내었다. 앞의 시험방법과 동일하게 SNCR 요소 유량, SCR 희석공기 온도와 암모니아 유량을 고정한 상태에서 믹서 압력을 4.4 bar, 4.9 bar, 5.4 bar, 5.9 bar, 6.4 bar로 조정된 결과 SCR 후단의 질소산화물 농도는 각각 64ppm, 61ppm, 53ppm, 49ppm, 39ppm으로 측정되었다. 압력 변화에 따른 최대 농도변화는 25ppm 감소하였고, 정격운전 5.4 bar 기준 믹서 압력을 6.4 bar로 상향시 14ppm 감소 효과가 있었다. 그리고 슬립 농도 N_s 는 5.1ppm~6.8ppm으로 자체 운영 기준치인 10ppm 이내를 만족하였다.

앞서 언급한 바와 같이 SCR 믹서는 가수분해설비에서 생산된 암모니아 가스와 희석공기가 공급되어 혼합하는 가스용 믹서이다. 암모니아 유량이 일정한 상태에서 믹서 압력의 상승은 희석공기의 유량이 증가한다는 것을 의미한다.

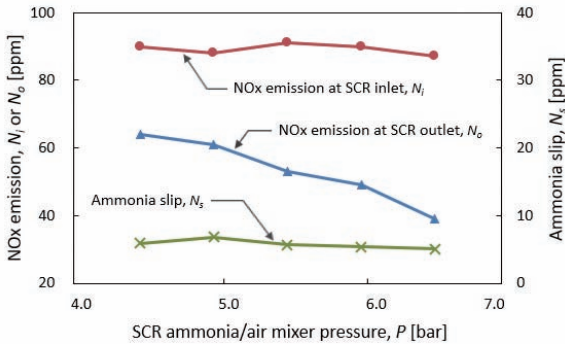


Fig. 3-4 Change of NOx emission with SCR ammonia /air mixer pressure

이것은 공기를 사용하여 암모니아를 미세 분사할 경우 입자경이 더 작아져 반응구간에서 체류시간 감소와 분산 확대로 제거효율은 높아지고 암모니아 슬립이 낮아진다(15)는 사실을 확인할 수 있었다.

또한 SCR 전단의 질소산화물 농도 N_i 가 87ppm~91ppm 수준일 때 제거 효율은 믹서 압력 6.4 기준 최대 55.2%로 파악되었다. 이러한 결과는 본 연구의 운전조건별 시험결과 중 믹서 압력의 조정이 질소산화물 생성을 가장 효과적으로 억제하는 변수인 것으로 파악되었다. 이 경우 암모니아 슬립도 자체 기준치를 만족하여 향후 운전조건으로 검토해 볼 필요가 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 125 MW급 우드펠릿 전소 발전소를 대상으로 연소 후처리 제어기술인 SNCR과 SCR 탈질설비의 운전조건 변화를 통하여 질소산화물 발생량에 미치는 영향을 시험하였다. SNCR의 요소 유량과 SCR의 회석공기 온도, 암모니아 유량 그리고 믹서 압력 변화에 따른 시험을 진행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. SNCR 요소 유량 증가에 따라 질소산화물 농도는 점차 감소한다는 것을 알 수 있었다. 또한 유량 증가에 따른 SCR 후단에서의 암모니아 슬립 농도가 상승하여 SNCR에서의 요소 주입이 SCR 후단에서 암모니아 슬립에 대한 영향성이 존재한다는 것을 확인하였다. 다만 시험 대

상 보일러의 경우 탈질효율 측면에서 고온의 내부온도로 인해 SNCR 운영에 불리한 구조이며 향후 온도분포에 최적화된 요소 분사노즐의 위치 검토가 필요할 것으로 판단된다.

- SCR 회석공기 온도 변화로 인한 질소산화물 생성을 저감시키는 효과를 기대하였으나 본 시험 결과에서는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. SCR 후단에서의 암모니아 슬립 농도 역시 영향성이 미미한 것을 확인하였다. 설비 특성으로 인해 온도 변화 범위를 폭넓게 제어할 수 없는 상황이었으며 향후 다양한 범위의 온도 조절이 가능하도록 관련 시스템의 개선이 이루어질 필요가 있다고 사료된다.
- SCR 암모니아 유량을 증가시키면 SCR 후단 질소산화물 농도는 감소하였고 SCR의 질소산화물 제거 효율도 점차 증가하였다. 암모니아 유량의 증가는 SCR에서 질소산화물 제거에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 또한 암모니아/질소산화물 비가 커질수록 제거효율은 높아지지만 과량의 암모니아의 분사로 인해 미반응 양이 많아져 암모니아 슬립이 증가한다는 사실을 확인하였다. 시험 결과 암모니아 유량의 최대 운전기준은 슬립 기준치를 초과하지 않는 약 111 kg/h 조건이 적절할 것으로 추정된다.
- SCR 암모니아/공기 믹서의 압력 상승은 SCR 후단의 질소산화물 농도를 감소시켰다. 믹서 압력의 상승은 암모니아를 미세 분사시켜 반응구간에서 체류시간 감소와 분산 확대로 제거효율은 높아지고 암모니아 슬립이 낮아진다는 사실을 확인할 수 있었다. 또한 질소산화물 제거 효율도 최대로 측정되어 본 연구의 운전조건별 시험결과 중 믹서 압력의 조정이 질소산화물 생성을 가장 효과적으로 억제하는 변수인 것으로 파악되었다.

참고문헌

- (1) KPLI, 2008, Thermal Power Plant Practice II, pp 700~712.
- (2) Law on Integrated Management of Environmental Pollution Facilities, Revised to Other Laws, 2019. 4. 2.

125 MW급 우드펠릿 발전소에서 탈질설비 운전조건이 질소산화물 발생량에 미치는 영향

- (3) Enforcement Rules of the Air Quality Conservation Act, [Appendix 8] Air Pollutant Emission Standards (related to Article 15), Revised 2020. 4. 3.
- (4) KOEN, 2008, Power and Combustion Engineering, pp 557~563.
- (5) Jin Sun Cha, et al, 2011, Nitrogen Oxides Removal Characteristics of SNCR-SCR Hybrid System, Korean Chemical Society, Industrial Chemistry 22, No. 6, pp 658~663.
- (6) Sang-Ki Choi, 2004, NO_x Removal Characteristics of Hybrid SNCR-SCR Applied Low-Temperature SCR, pp 46~52.
- (7) Jung, Kwang Sung, 2018, The Effect of Supply Patterns of Overfire Air on Generation of NO_x and CO in a Wood Pellet Fired Boiler, pp 1~28.
- (8) KOEN, Company Introduction - Power Plant Operation, <https://www.koenergy.kr/kosep/hw/fr/ov/ovhw23/main.do?menuCd=FN03050102> (Searched 2020. 4. 19.)
- (9) KEPCO Research Institute, 2018, Acceptance Thermal Performance Test Results After Fuel Conversion of YoungDong Thermal Power Plant Unit #1, pp 7~10.
- (10) POSCO ICT, 2018, Yeongdong Eco Power Plant Unit 1, 2 Denitrification Facility Completed Book, Data Book 1~4.
- (11) POSCO ICT, 2018, Yeongdong Eco Power Plant Unit 1, 2 Denitrification Facility Operation Manual, pp 2~14.
- (12) NANO Corp., 2019, Yeongdong Eco Power Plant Unit 1 The Performance report for SCR Catalyst, pp 7~11.
- (13) Bernd J. von der Heide, 2013, SNCR Process for Coal fired Boilers, Mehldau & Steinfath Umwelttechnik GmbH Essen, Germany, pp 1~23.
- (14) Lee, Chang ki, 2019, A Study on Spray Characteristics and NO_x Reduction Efficiency of SCR System, pp 20~49.
- (15) Dae-su Lee, 2004, A Study on the scale occurred in boiler tube by reacted reductant in the SNCR system, pp 20~24.
- (16) Kim, Woo Tae, 2008, Study of SNCR+SCR hybrid system application for NO_x elimination of power plant boiler, pp 59~65. 