

500 MW 석탄화력발전소 촉매단추가에 따른 탈질설비 효율에 미치는 영향

이상수*, 문승재*†

*한양대학교 파워엔지니어링공학과, *†한양대학교 기계공학부

Effect of addition of a catalytic layer on Denitrification System efficiency in a 500 MW Coal-fired Power Plant

Sang Soo, Lee*, Seung-Jae Moon*†

*Department of Power Engineering, Hanyang University

*†Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

(Received Aug. 30, 2020; Revised Sept. 6, 2020)

ABSTRACT : The government has recently come up with a policy to tighten regulations on air pollutant emissions due to public concerns over the emission of pollutants such as fine dust. The coal-fired power plant is speeding up the improvement of the performance of environmental facilities, and this paper deals with the cases of performance improvement by adding a catalyst to the 500 MW standard coal-fired power DeNox system, and examines the change in the performance factors according to the addition of catalysts and the efficiency of NOx removal. The DeNOx efficiency before and after improvement increased from 80% to 88%, and the conversion rate of SO₂/SO₃, ammonia slip which are performance factors satisfied the design assurance value, but exceeded the design assurance value for differential pressure. At the same time, the ammonia slip concentration and differential pressure items increased as the NOx removal efficiency increased, resulting in the need for management and improvement.

초 록 : 최근 미세먼지 등 대기오염물질 배출에 대한 전국민적 우려로 정부는 대기오염물질 배출규제 강화정책을 내놓고 있다. 국내 석탄화력발전소는 대기환경설비 성능개선에 박차를 가하고 있으며, 이 논문에는 500 MW급 표준석탄화력 탈질설비에 촉매단을 추가하는 성능개선사례를 다루고 있으며, 촉매단 추가 전·후 성능시험시험과 NOx제거효율에 따른 탈질설비 핵심성능 인자의 변화를 살펴보았다. 연구결과 촉매단 추가 전·후 탈질설비 효율은 80%에서 88%로 상승했고, 핵심성능인자인 미반응 암모니아, SO₂/SO₃ 전환율은 설계보증치를 만족하였으나, 차압의 경우 설계보증치를 초과하였다. 동시에, NOx 제거효율에 따른 핵심성능인자 변화는, 미반응 암모니아 농도, 차압 항목은 NOx 제거효율이 증가에 따라 같이 증가하는 양상을 보여 관리 및 개선이 필요하다는 결과를 얻을 수 있었다.

Key words : Denitrification system(탈질설비), Denitrification system efficiency(탈질효율), Ammonia Slip concentration (미반응 암모니아), Pressure drop(차압), NH₃ Consumption(암모니아 사용량)

† Corresponding Author, smoon@hanyang.ac.kr

1. 서론

1.1 연구배경 및 필요성

국내 표준석탄화력은 급격한 산업의 발전에 따른 전력 수요 증가에 대응하기 위하여 표준화(500 MW)의 형태로 1990년대부터 건설, 준공되어 운영 중이다. 하지만 2015년 파리기후협약 이후 급격한 산업화에 따른 환경문제에 관한 관심의 증대로 석탄화력발전소들은 황산화물(이하 SOx) 제거를 위한 탈황설비, 질소산화물(이하 NOx) 제거를 위한 탈질설비, 먼지(Dust) 제거를 위한 전기집진기 등의 대기환경설비를 구축하여 환경문제에 대응하여왔으나, 최근 초미세먼지의 주요 원인으로 주목받게되어, 전국민의 우려를 사고 있다. 정부는 미세먼지 특별대책안을 통해 대기오염물질 배출규제치의 강화, 노후석탄화력 조기폐쇄 등 정책적으로 대기오염물질 배출관리에 강한 의지를 표명하고 있다.

정부의 강화된 NOx 배출규제치를 살펴보면 기존 규제치인 100ppm에 비해 60ppm으로 대폭 강화되었으며, 2021년부터 충청남도 조례안의 경우 48ppm, 중부발전 자체기준은 23ppm으로 한층 더 효율적인 탈질설비로의 설비개선 필요성이 증대되었다. 저자가 소속된 보령발전본부는 탈질설비 내 촉매단 추가를 통한 성능개선 사업을 시행하였다. 촉매단 추가를 통한 성능개선 계획 시 탈질설비 NOx 제거효율의 상승은 기대하였지만, 그 외 탈질설비 성능핵심인자들의 변화는 예측할 수 없는 상황이었다. 효율적인 탈질설비 운영관리를 위해서는 NOx 제거효율 이외에도 탈질설비 성능에 영향을 주는 요소들에 대한 관리가 필요로 하다. 이 논문에서는 성능개선 전·후 탈질설비 NOx 제거효율 및 탈질설비 성능핵심인자의 변화를 측정하여 성능개선의 효과를 파악하고, 성능개선 이후 탈질설비 NOx 제거효율을 변화시키며 그에 따른 성능핵심인자의 변화를 측정하여 NOx 제거효율에 따른 성능핵심인자의 영향을 파악하고자 한다.

1.2 연구내용 및 차별성

NOx 저감에 관한 기존 연구들을 살펴보면, 크게 2가지 방향으로 나뉜다.

첫 번째 방향은 탈질반응 향상을 위한 신규 촉매의 개발 및 관리방안에 대한 연구 분야이다. 연구를 통해 탈질설비 촉매 활성도 저하원인 규명을 위하여 장시간 배기가스에 노출된 촉매의 표면성분을 분석하여 그 원인이 촉매표면에 침적된 황산염에 있음을 확인할 수 있었고(1), 배기가스 조성 하에서 가장 내구성이 뛰어난 재질의 검증(2), 촉매 관리주기 및 재생 등 관리 중요성에 대한 연구(3) 등이 이뤄졌다.

두 번째 방향은 석탄화력발전소 등 NOx 발생량 자체의 저감을 위한 연구이다. 연소 과정에서의 저과잉공기를 조정, 재열증기 출구 온도조정에 의한 NOx 발생량 감소(4) 및 연소용 공기, 연소 보조용 공기 주입량 조정에 따른 NOx 발생량 감소에 관한 연구(5) 등 연소기술 개선을 통한 NOx 발생량 저감 연구가 이뤄졌다.

위에서 언급한 바와 같이 기존의 연구들은 촉매의 관리, 설비 운전측면에 관한 연구가 진행된 점에 반해 이 논문에서는 실제 운전 중인 500 MW 급 표준석탄화력 탈질설비에서 시행된 성능개선사업의 전·후 효율 및 성능핵심인자의 변화를 연구하고, 탈질설비 NOx 제거효율별 성능핵심인자의 변화추세를 확인함으로써 기존의 논문들이 다루지 않았던 분야, 실험실이 아닌 실제 화력발전소의 사례 연구라는 점에서 차이점을 가진다. 연

구는 탈질설비 촉매단 추가의 성능개선 전·후 시행된 성능시험 결과와 보령발전본부 발전운전정보를 통한 탈질설비 NOx 제거효율과 성능핵심인자(미반응 암모니아, 암모니아 사용량, SCR 차압, 이산화황/삼산화황 전환율)의 변화를 측정하고, 설계보증치 만족유무, NOx 제거효율에 따른 성능핵심인자의 변화를 확인하여 탈질설비 촉매단 추가의 성능개선 작업이 탈질설비에 미치는 영향을 알아보는 것이다.

2. 본론

2.1 질소 산화물의 발생과 탈질설비 구성

2.1.1 질소산화물(NOx)의 발생

석탄화력발전소에서 생성되는 NOx는 대부분 일산화질소(이하 NO)와 이산화질소(NO2)이며, 그 비율(NO/NO2)

은 90~95%로 화력발전소의 배기가스 중 NOx는 대부분이 NO이다. 화력발전소의 생성되는 NOx는 크게 세 가지 경로에 의해 생성되어진다. 첫 번째는 Thermal NOx이며 주로 연소용 공기 중의 질소와 산소가 고온상태에서 반응하여 발생하고 온도가 높을수록 발생이 쉽다. 두 번째는 Fuel NOx로 연료에 함유된 질소 또는 질소화합물의 일부가 연소할 때 발생하며(6), 세 번째인 Prompt NOx는 연소를 위한 화염대 부근에서 급속하게 생성된다.

2.1.2 탈질설비의 구성

500 MW 석탄화력발전소는 촉매와 환원제를 이용한 선택적 촉매환원법(SCR, Selective Catalytic Reduction) 방식을 주로 채택하고 있다.

선택적 촉매환원법 방식은 300 ~ 400℃ 온도하에서 배기가스와 환원제가 동시에 촉매층에서 반응하여 배기가스 내의 NOx를 환원제와의 선택적 반응에 의해 질소(N2)와 수증기(H2O)로 환원시키는 방법이다.

사용되는 환원제로는 무수암모니아(99.5%), 암모니아수(25%), Urea 용액(50%) 등이 사용되며, 다음 (1)~(2)식은 선택적 촉매환원법에서의 탈질반응식을 나타낸 것이다[7].

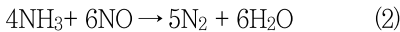
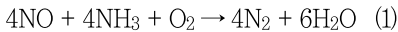


Fig. 1은 보령발전본부의 탈질설비 계통도이다. 보령발전본부는 앞서 언급한 선택적 촉매환원법 방식의 탈질설비를 운영중이며, 환원제로는 무수암모니아(99.5%)를 이용하고 있다. 탈질설비는 환원제로 사용되는 암모니아 저장, 이송설비, 촉매와 암모니아 주입을 통해 반응이 일어나는 SCR(이하 SCR) 설비로 구분할 수 있다. 환원제인 암모니아 저장, 이송설비로는 암모니아 저장탱크 (131m²×3기), 기화기(Vaporizer, 325kg/hr×9기), 완충기(Accumulator, 1.676m²×3기)가 있으며 이 저장 및 주입설비를 통해 보령발전본부 1~6호기 가 운영된다. 환원제인 암모니아는 액체상태로 암모니아 저장탱크에 저장된 후, 기화기에서 스팀을 통해 가열되어 기체상태로 상변이 되고, 기체상태인 암모니아를 완충기를 통해 승압되어 공기혼합기(Air Mixer)에서 공기와 1:1 비율로 혼합되어 SCR로 이송된다. SCR은 A, B Side 2개로 구성되어있으며, 암모니아 주입설비(이하 AIG, Ammonia Injection

Grid), 탈질촉매, 촉매 내 먼지 쌓임을 방지하는 제매기(Soot Blower)로 구성된다. AIG는 호기별 12열로, 제매기는 2단으로 단 마다 8기 총 16기로 구성되어있다. 탈질촉매는 Plate 형태를 사용중이며, 각 단마다 132모듈로 구성되어있다. 탈질촉매는 2년, 40,000시간 이상 경과시 촉매상태진단 후 신품 교체를 원칙으로 하고 있다.

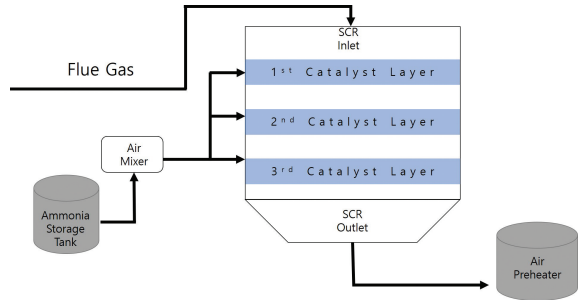


Figure 1. Overview of Denitrification system

2.2 연구수행 대상

본 연구를 위한 시험대상은 1998년에 최초 준공되어 상업운전 시행 중, 2009년에 탈질설비를 추가설치한 500 MW급 표준석탄화력인 보령발전본부 6호기이다. 촉매는 Plate 형태가 2단으로 구성되어 있었고, 추가 촉매단 설치를 위한 예비공간을 보유하고 있었다. 보일러에서 발생하는 250ppm의 NOx를 50ppm까지 처리하도록 설계되었으며 설계보증효율은 80%이다. 정상 운전시 100~200ppm의 NOx가 유입되어 탈질반응을 통해 70~90ppm로 처리하여 대기로 배출함으로써 대기오염물질 배출규제치를 준수하였다.

하지만, 앞서 언급한 바와 같이 강화된 정부의 대기오염물질 배출량 규제에 대응하기 위해서는 탈질설비 출구 측 NOx 농도를 23ppm 이하로 유지할수 있어야 한다. 이에 탈질설비 촉매층 예비단에 기존 1, 2단 촉매와 동일한 Plate 형태의 촉매의 1단 추가설치를 함으로써 탈질설비 제거효율 향상을 도모하였다.

Table 1은 촉매층 추가를 통한 성능개선 전·후의 설계보증치 자료이다. 이를 살펴보면 성능개선 전에는 Inlet NOx 농도가 250ppm으로 설정되어 있으나, 성능개선 후

500 MW 석탄화력발전소 촉매단추가에 따른 탈질설비 효율에 미치는 영향

에는 Inlet NO_x 농도를 150ppm으로 설정된 것을 알 수 있다. 이는 미세먼지 저감을 위한 저유황, 저질소분의 석탄을 사용연료로 설정됨에 기인한다. 동시에 탈질제거 효율은 80%에서 88%로 8% 증가되어진 것을 알 수 있다. 이는 촉매층의 추가설치를 통해 배기가스 내의 NO_x와 환원제인 암모니아의 반응을 위한 공간(Active site) 증가로 인한 NO_x 제거효율 향상이 기대되기 때문이다. 한편, 탈질설비 운영에 중요한 요소인 차압과 미반응 암모니아 농도, SO₂/SO₃ 전환율의 설계보증치는 기존과 같았다.

Table 1. Design of Denitrification system

Category	NO _x (ppm)			Pressure Drop (mmH ₂ O)	Slip (ppm)	SO ₂ /SO ₃ Conversion factor(%)
	In	Out	Efficiency (%)			
Before	250	50	80	60.3	2	1
After	150	10	88	60.3	2	1

2.3 연구수행

2.3.1 연구 수행개요

탈질설비 촉매단 추가 후 성능확인을 위한 성능시험을 시행하였다. 시험은 2019년 1월 24일에 이뤄졌으며, 촉매단 추가설치 전 시행하였던 6호기 18년 8월 30일 성능시험 기록을 비교군으로 제시하여 촉매단 추가설치 전·후의 변화를 확인하였다. 동시에 탈질설비 NO_x제거 효율변화에 따른 탈질설비 성능핵심인자의 변화를 확인하기 위해 2019년 11월 05일부터 2020년 1월 19일까지 각 2주일 동안 NO_x 제거효율을 84~90% 사이에서 변화시키며 미반응 암모니아농도, 암모니아 사용량, 차압 변화를 측정하였다. 탈질설비 NO_x 제거효율 변화에 따른 미반응 암모니아의 발생, 암모니아 사용량 변화, 차압발생 심화구간 등 성능핵심요소의 변화를 확인하여 NO_x 제거효율과 탈질설비 성능핵심인자의 연관성을 찾고자 하였다. 다만, SO₂/SO₃ 전환율 항목은 계측장비 및 전문연구원의 부재 등 제반조건 부족으로 아쉽게도 시행되지 못하였다.

본 연구의 수행을 위한 탈질설비 성능시험은 2018년도, 2019년도 보령발전본부 제 2발전소 탈질설비 성능진단 및 보령발전본부 탈질설비 최적운영방안 도출을 위한 시험을 통해 진행되었다. 성능진단은 설비의 효율 또는 성능을 확

인하기 위하여 성능관리기준 및 지침에 따른 계측장비, 실험을 통하여 일정한 운전조건 하에서 성능시험을 시행하고, 결과값을 분석하여 현재의 성능발휘 정도를 평가, 문제점을 파악하고 개선하는 일련의 과정을 말한다[8]. 본 연구를 위한 성능시험은 (주)중부발전의 대기환경설비 성능진단 기준에 의거하여 시행되었으며, 반기 1회의 주기로 시행하고 있다.

두 가지의 시험 모두 앞서 언급한 바와 같이 성능시험은 일정한 운전조건 하에서 이뤄져야 하므로, 탈질설비 성능시험은 부하 100% 정격출력 또는 최대 연속허용출력 하에서 시행되었으며, 보일러 부하변동은 최대 ±3% 이내로 제한하였다. 만약, 부하변동이 있는 경우에는 최소 6시간 경과한 후 탈질설비 운전이 안정화된 상태에서 재개하였다. 또한 성능시험 기간 중에는 일정한 탄종을 공급하여 동일한 배기가스 조성 하에서 성능시험을 시행하였고, 시험에 사용되는 계측장비는 사용전 검교정 또는 공인기관의 인증을 받은 장비를 사용하여 시험결과의 정확도를 확보하였다.

2.3.2 연구 수행항목 및 방법

탈질설비 효율 향상을 위해서는 SCR 자체의 NO_x 제거효율이 높아야 한다. 동시에 설비 운영과정에서 발생하는 부반응 발생을 최소화 하여야 한다. 부반응 발생에 의한 설비의 고장, 성능저하로 인한 손실 등도 광범위한 범위에서의 탈질설비 효율저하 요소로 인식될 수 있기 때문이다. 이에 연구 항목을 직접적인 NO_x 제거효율과 탈질설비에 효율에 영향을 미치는 4가지 성능핵심인자의 변화로 선정하였다. 연구의 수행에 필요한 항목의 측정을 위해 보령발전본부 탈질설비 내의 측정공을 이용하였으며, A, B SCR 입구, 출구 측 각각 6개씩, 총 12개소의 측정공을 통해 측정하여 측정값의 정확도를 높였다.

첫 번째 항목은 NO_x 제거효율이다. 탈질설비 효율변화를 측정하기 위하여 SCR 입구 및 출구 측의 NO_x 농도를 측정하였다

두 번째 항목은 암모니아 사용량이다. 암모니아 사용량은 기본적인 성능시험요소는 아니나, 탈질설비 효율관리를 위한 중요하다. 탈질공정에서 NH₃/NO_x의 비율이 1이며, NO_x 발생량에 비해 과도한 암모니아 투입이 이뤄지면 약간의 NO_x 제거효율 상승효과가 나타나지만 미반응 암

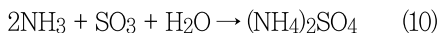
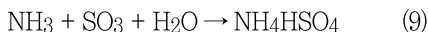
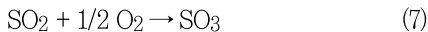
모니아의 생성에 따른 부반응을 야기한다[9]. 암모니아 사용량은 보령발전본부 발전운영시스템을 통해 성능시험 기간동안 SCR로 주입되는 암모니아 양을 자료화 하였다. 개선 전·후 및 NO_x 제거효율별 6호기 배기가스 내의 NO_x량을 산출하여 환원제로 주입된 암모니아의 양과 비교, NH₃/NO_x 비율을 산출하였고 이 NH₃/NO_x 비율 비교를 통해 탈질설비 성능핵심요소 간의 연관성을 찾아보았다.

세 번째 항목은 SCR의 압력손실이다. 압력손실이 높다는 의미는 SCR 내부 촉매층이 여러요인으로 인한 막힘 또는 변형발생에 의해 불완전한 배기가스 흐름을 유발한다고 해석할 수 있다. 탈질설비 촉매단 추가에 따른 SCR 내부 및 탈질설비 후단 공기예열기의 압력손실 현상을 확인하기 위하여 탈질설비 SCR 입구, 출구 측 각 6 개소, 총 12개소에서의 압력변화를 측정하였다.

네 번째 항목인 미반응 암모니아 농도는 환원제로 투입되는 암모니아 중 탈질반응에 참여하지 못하고 SCR 출구로 이동하는 암모니아의 농도를 측정하였다. 미반응 암모니아는 배기가스 중 SO₃ 성분과의 부반응으로 설비에 악영향을 미치므로 설비관리에 중요한 요소라 할 수 있다 [10].

미반응 암모니아 측정은 SCR 후단에서의 암모니아를 포집, 밀봉하여 분석실에서 암모니아 농도를 직접 분석하였다. 암모니아의 포집은 A, B SCR 출구 측 각 6개소, 총 16개소에서 진행되었으며, 농도분석은 대기오염공정시험방법에 따른 인도페놀법을 이용하였다.

다섯 번째 항목은 SO₂/SO₃ 전환율 항목이다. 석탄의 연소과정에서 발생된 SO₂ 는 촉매상에서 SO₃로 산화되어 미반응 암모니아와의 반응으로 황산염을 형성하여 촉매의 비활성화를 초래하고, SCR 후단 공기예열기에 침적되어 부식을 야기[11][12]하므로 성능관리에 중요한 요소이다. 아래 식 (7)~(10)는 황산염의 생성과정을 나타내었다.



SO₂/SO₃ 전환율 항목은 SCR 입구에서의 SO₂, SO₃ 및 SCR 출구측의 SO₃를 포집, 밀봉하여 분석실에서 농도를

직접 산출한다. SO₂ 및 SO₃ 농도 분석은 EPA Method 3 방법을 통한 분석을 시행하고 있으며, 포집은 SCR A,B 출구측 6개소, 총 12개소에서 진행되었다.

위에서 언급된 5가지 요소들은 서로 유기적인 연관이 있으며, 성능 및 효율관리에 중요한 핵심인자로 여겨진다.

3. 연구수행 결과 및 고찰

3.1 탈질설비 NO_x 제거효율변화

성능개선 전·후 탈질설비 유입, 배출 NO_x 농도는 Table 2와 같다. 성능개선 전 6호기 탈질설비의 입구 평균 NO_x 농도는 90.10ppm, 출구측은 16.62ppm을 나타내었다. 반면 성능개선 후에는 입구농도 129.18ppm, 출구농도 8.29ppm으로 측정되었다. 이 Table 2 에서는 촉매단 추가 설치 전·후 설비에 유입 NO_x량에 차이가 있는데, 이는 연료로 사용되는 탄종에 따른 차이이므로 NO_x 제거효율에는 큰 영향이 없을것이라고 판단되어진다.

Fig. 2는 탈질설비 성능개선 전·후 탈질효율을 나타내었다. 성능개선 전 NO_x 제거효율은 81.56%로 설계기준인 80%를 만족하였고[13], 개선 후에는 측정결과는 94.55%를 나타냈다. 촉매단 추가 설치를 검토과정에서 제시된 NO_x 제거효율 88%과 비교하여 만족하는 결과를 나타내었으며, 촉매단 추가 전과 비교하여 NO_x 제거효율이 약 13% 가량 증가함을 확인할 수 있었다.[14]

이는 탈질설비 내 촉매단 추가를 통하여 배기가스 내의 NO_x와 환원제인 NH₃ 가 탈질반응을 일으킬 수 있는 반응장소인 촉매량이 늘어난 부분에 기인한다. 배기가스 흐름방향에 따라 촉매 1단, 2단에서 반응에 참여하지 못한 배기가스 내 NO_x 성분들이 3단에서 한번 더 탈질반응에 참여할 수 있었기 때문이라고 사료되어진다.

Table 2. Measured NO_x concentration and removal efficiency of Unit 6

Category	Before		After	
	Inlet NO _x (ppm)	Outlet NO _x (ppm)	Inlet NO _x (ppm)	Outlet NO _x (ppm)
Average	90.10	16.62	129.18	8.29

500 MW 석탄화력발전소 촉매단추가에 따른 탈질설비 효율에 미치는 영향

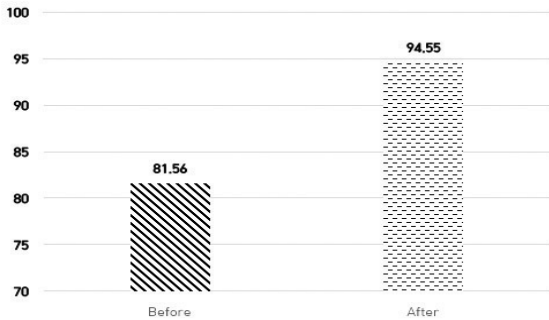


Figure 2. Measured NOx removal efficiency of Unit 6

3.2 촉매단 추가 전·후 및 NOx 제거효율에 따른 암모니아 사용량 변화

촉매단 추가 전·후 성능시험에서 암모니아 사용량 및 NOx 제거효율, NOx/NH3 비율을 항목의 측정 및 분석결과를 Table 3과 같다.

성능시험결과 6호기의 경우 성능개선 전 NOx 제거효율이 81.56%일 경우, 암모니아 사용량은 90.1 kg/hr, NH3/NOx 비율은 0.92를 나타내었다. 개선 후 성능시험에서 NOx 제거효율이 94.55%일 경우, 암모니아 사용량은 128.18 kg/hr 이며, NH3/NOx 비율은 1.01이다.

탈질설비 NOx 제거효율별 암모니아 사용량 측정결과를 Table 4에 나타내었다. 효율 84% 일때는 시간당 96.67 kg, 86%일 경우 99.17 kg, 88% 및 90%의 제거효율을 목표로 운전하였을 경우 각각 99.17, 99.58 kg의 암모니아를 소모하는 것을 알 수 있었으며, NH3/NOx 반응비율은 제거효율별 0.92%에서 0.95%까지 NOx 제거효율이 증가할수록 증가하는 경향을 보이고 있다.

위에서 살펴본 바와 같이 NH3/NOx 비율은 성능개선 전과 비교하였을 때 성능개선 후와 NOx 제거효율이 증가할수록 증가하는 추세를 보여주고 있다. 이는 NOx 발생량에 비해 점점 더 많은 양의 암모니아가 탈질반응을 위해 투입되고 있음을 말해주며, 제거효율 향상에 따라 미반응 암모니아 발생 가능성이 증가하고 있다고 볼 수 있다.

3.3 촉매단 추가 전·후 및 NOx 제거효율 변화에 따른 차압변화

촉매단 추가 전·후의 탈질설비 차압성능시험 결과를 나타내면 Table 5와 같다. 성능개선 전 SCR 입구 측

Table 3. Measured consumption of NH3 of Unit 6

Category	NOx removal rate(%)	Consumption NH ₃ (kg/hr)	NH ₃ /NOxrate(%)
Before	81.56	90.1	0.92
After	94.55	128.18	1.01

Table 4. Measured result of NH3 consumption of Test for optimal operation method Unit 6

Category	NOx removal rate(%)	Consumption NH ₃ (kg/hr)	NH ₃ /NOxrate(%)
1st	84	97.67	0.92
2nd	86	99.17	0.92
3rd	88	99.17	0.93
4th	90	99.58	0.95

-89.96mmH₂O, 출구측 -149.76mmH₂O으로 발생차압은 59.80mmH₂O으로 설계보증치인 60.3mmH₂O 이내에서 양호한 상태를 나타내었으나, 성능개선 후 SCR 입구측 ?83.40mmH₂O, 출구측 -144.82mmH₂O, 차압 61.42mmH₂O으로 설계보증치인 60.3mmH₂O 를 초과하였다. 결과적으로 촉매단 추가 설치 후 차압은 1.62mmH₂O 상승한 결과를 나타내었다.

탈질설비 NOx 제거효율에 따른 차압 변화 측정결과를 Fig. 3에 나타내었다. 효율이 84%~88% 일 경우, 차압은 각각 59.94, 60.11, 60.15mmH₂O으로 설계 보증치를 만족하였으나, 효율을 2% 씩 상승시켜 변화시킬 경우 차압은 조금씩 상승하는 추세를 보였고 효율이 90% 일 경우에는 61.23mmH₂O로 증가하여 결국 설계보증치를 초과하였다.

위 두 가지 시험결과를 보았을 때 NOx 제거효율이 증가할수록 차압이 상승한다는 결론을 얻을 수 있었다. 이는 배기가스가 촉매층을 통과할 때 기존 2단에 비해 3단의 촉매층을 통과할 경우에 발생하는 압력손실이 크다는 것을 확인할 수 있었으며, NOx 제거효율이 증가할수록 많은 양의 암모니아가 투입되어 미반응 암모니아가 생성되고, 그 부반응인 황산염의 생성되어 노후된 촉매층 막힘에 의한 압력손실 발생 가능성이 증가됨을 알 수 있었다. 이에 효율적인 탈질설비 운영을 위하여 향후 계획예방정비 시 촉매층 막힘의 확인 및 신규 촉매 교체추진 중에 있으며, 정

상운전 중 주기적인 제매기 및 수세정, 열소자 세척 등의 작업으로 지속적인 관리가 필요하다는 결론을 얻을 수 있었다. [15]

Table 5. Measured pressure in Denitrification system of unit 6
[unit : mmH₂O]

Category	Before		After	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
SCR A	-88.16	-148.97	-80.43	-143.17
SCR B	-91.76	-150.55	-86.36	-146.47
Average	-89.96	-149.76	-83.40	-144.82
Pressure Drop	59.80		61.42	

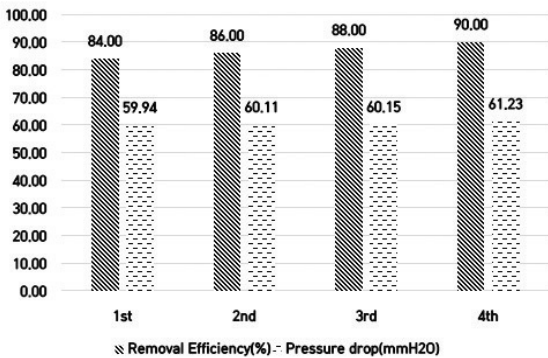


Figure 3. Measured pressure drop of Test for optimal operation method Unit 6

3.4 촉매단 추가 전·후 및 NO_x 제거효율에 따른 미반응 암모니아 농도 변화

탈질설비 성능시험 중 미반응 암모니아 측정결과를 다음 Fig. 4에 나타내었다. 촉매단 추가설치 전 SCR A 0.55ppm, SCR B 0.57ppm으로 평균농도 0.56ppm이 측정되어, 설계기준인 2ppm을 만족하고 있었다. 개선 후에도 SCR A 0.52ppm, SCR B 0.63ppm, 평균 0.58ppm으로 설계보증치를 만족하고 있었으며, 성능개선 전·후 약 0.02ppm 소량 증가하였다.

다음은 NO_x 제거효율 별 미반응 암모니아 농도를 측정결과를 Table 6에 나타내었다. NO_x 제거효율이 84%일 경우 0.52ppm을 나타내었고, 그 이후 86%, 88%로 NO_x 제거효율을 설정하여 운전한 결과 0.53ppm으로 소량 증

가하였으며, 이 때 잠시 농도가 정체하는 양상을 보였지만, NO_x 제거효율 목표를 90%로 상승하여 운전한 경우 0.57ppm으로 농도가 상승하는 양상을 확인할 수 있었다. 결과적으로 NO_x 제거효율 상승함에 따라 미반응 암모니아의 농도도 함께 상승한다는 것을 알 수 있었다.

촉매단 추가를 통한 성능개선 전·후 성능시험 결과와 NO_x 제거효율별 미반응 암모니아 농도 측정결과 모두 설계 보증치를 만족하고 있었으며, 두 가지 측정결과 모두 NO_x 제거효율 증가에 따라 미반응 암모니아 농도 역시 증가함을 보여주고 있었다. 이는 배기가스 내 NO_x 제거를 위해 암모니아 주입량이 증가하여 미반응 암모니아의 발생하는 것에 그 원인을 찾을 수 있다.

Table 6. Measured NH₃ slip concentration of Test for optimal operation method Unit 6

Category	NO _x Removal rate(%)	NH ₃ Slip(ppm)
1stTest	84	0.52
2ndTest	86	0.53
3rdTest	88	0.53
4thTest	90	0.57

3.5 촉매단 추가 전·후 및 NO_x 제거효율에 따른 SO₂ /SO₃ 전환율 변화

탈질설비 내 SO₂/SO₃ 전환율 측정을 통한 성능시험 결과를 다음 Table 7에 나타내었다. SO₂/SO₃ 전환율 측정결과를 살펴보면, 성능개선 입구 측 SO₂ 197.6ppm, SO₃ 농도는 4.76ppm, 출구 측 SO₃ 농도 6.19ppm 으로 전환율 0.72%를 나타내고 있으며, 성능개선 이후 입구 측 SO₂ 201.75ppm, SO₃ 5.08ppm, 출구 측 SO₃ 농도 6.35ppm으로 0.63%의 전환율을 보여 성능개선 전·후 모두 설계 기준을 만족하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 촉매단 추가 설치에 따른 SO₂/SO₃ 전환율에 대한 영향은 미비한 것으로 판단되어진다.

4. 결론

본 연구에서는 기존의 탈질설비 성능시험 자료와 환경설비 성능개선을 위해 시행된 탈질설비 촉매단 추가 후의 성

500 MW 석탄화력발전소 촉매단추가에 따른 탈질설비 효율에 미치는 영향

Table 7. SO₂ / SO₃ concentration measurement results for Unit 6

Category	Before			After		
	SO ₂ (In)	SO ₃ (In)	SO ₃ (Out)	SO ₂ (In)	SO ₃ (In)	SO ₃ (Out)
SCR A (ppm)	195.49	4.68	6.18	203.52	5.10	6.40
SCR B (ppm)	199.70	4.84	6.19	199.97	5.06	6.29
Average (ppm)	197.60	4.76	6.19	201.75	5.08	6.35
Conversion Rate (%)	0.72			0.63		

능시험 자료 결과를 비교해보고, 설계 보증치의 만족여부와 설비개선에 따른 효과, 성능핵심인자의 변화량에 대해 알아보았다. 동시에 탈질설비 NO_x 제거효율 변화에 따른 탈질설비 성능핵심인자의 변화량을 측정하고, 그 영향과 상관관계에 대해 살펴보았다.

탈질설비 촉매단 추가설치 이후 질소산화물 제거효율은 설계치인 88%를 만족하였으며 동시에, 질소산화물 배출농도가 10ppm 미만으로, 강화된 대기오염물질 배출규제치를 만족시키는 결과를 확인할 수 있었다. 개선 전·후 성능시험결과에서 설계보증치를 초과한 항목은 차압 항목이 유일하였다. 하지만 탈질설비 NO_x 제거효율 변화에 따른 탈질설비 성능 핵심인자의 변화를 확인한 결과, 제거효율 90% 이상으로 설비 운영시 반응기 차압, 미반응 암모니아 농도가 점차 증가하는 추세를 알 수 있었다. 이는 설계효율인 88% 이상을 목표로 설비의 지속운전 시에 주기적인 설비관리가 요함을 뜻한다.

이 연구의 핵심내용과 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 탈질설비 촉매단 추가에 따른 설비 개선 전·후 탈질설비 제거효율은 81.56%에서 94.55%로 향상되었으며, 설계 보증치를 만족하고 있다. 탈질설비 제거효율의 증가는 배기가스 내 NO_x 성분과 환원제인 NH₃의 반응이 일어나는 촉매가 증가되어 보다 더 활발한 탈질반응이 일어남에 기인할 수 있다.
- 2) 암모니아 사용량은 개선 전·후 성능시험에서 90.1 kg/hr에서 128.18 kg/h 로 증가하였지만, 이는 유입되

는 NO_x 농도에 영향을 받으므로 큰 영향은 없을 것으로 보인다. 다만, 이 측정결과를 SCR로 유입되는 NO_x량과 비교하였을 경우 NH₃/NO_x 비율이 0.92에서 1.01로 상승하였으며, 동시에 탈질설비 NO_x 제거효율별 암모니아 사용량 측정결과를 통해 NO_x제거효율이 증가할수록 NH₃/NO_x 비율이 증가하는 추세를 볼 수 있다. 환원제로 주입된 NH₃가 탈질반응에 참여하지 못한 미반응 암모니아의 존재할 가능성을 나타낸다.

- 3) 차압 항목의 경우, 개선 후 62.15mmH₂O를 나타내어 설계보증치를 초과하였다. 이는 배기가스가 기존의 2단 촉매층에서 3단 촉매층으로의 통과과정에서 발생하는 압력손실과 촉매 표면의 막힘 또는 변형 등에 따른 배기가스 흐름 불안정에 원인이 있다고 판단되어진다. 동시에 NO_x 제거효율이 증가에 따라 반응기 차압도 상승하는 경향을 보이므로, 주기적인 촉매관리작업 및 제매기 운전 등 탈질설비 유지관리강화가 필요하다고 여겨진다.
- 4) 미반응 암모니아 농도는 촉매단 개선 전·후 시행된 성능시험에서 0.56ppm에서 개선 후 0.58ppm으로 소량 증가하는 경향을 보였다. NO_x 제거효율별 미반응 암모니아 농도 측정결과에서는 NO_x 제거효율이 증가할수록 미반응 암모니아 농도 역시 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. NO_x 제거효율이 증가할수록 주입되어지는 암모니아의 양 역시 증가하므로, 미반응 암모니아 생성이 촉진된다고 할 수 있다. 미반응 암모니아 농도는 촉매단 개선 전·후 성능시험, NO_x 제거효율별 미반응 암모니아 농도측정 시험 모두에서 성능보증치를 만족하고 있었다. NO_x 제거효율이 증가할수록 미반응 암모니아 농도가 상승하므로 주기적인 설비관리가 요구되어진다.
- 5) SO₂/SO₃ 전환율의 경우도 개선 전·후 성능시험을 통해 개선전 0.72%에서 개선후 0.63%으로 소량 감소하였고, 두 항목 모두 설비개선 설계보증치를 만족하였다.
- 6) NO_x 제거효율 84~90%을 목표로 약 2달간의 탈질설비 최적 운영방안 시험을 시행한 결과 제거효율이 증가할수록 차압과 미반응 암모니아가 농도가 증가하는 경향을 보이고 있으며, 높은 탈질설비 NO_x 제거효율을 목표로 운전할 경우 위 두 항목의 지속적인 관리가 필요하며, 이를 개선방안을 도출해야 한다.

본 연구에서는 기존 탈질설비에 촉매단을 추가하는 성능

개선을 시행한 결과 질소산화물 제거효율 및 탈질설비 핵심인자에 미치는 영향을 살펴보았다. 향후 연구를 통해 탈질설비 차압을 저감기술이 개발, 적용되어 보다 효율적이고 청정한 석탄화력발전이 되길 기대한다.

참고문헌

- (1) Kwang Hee Park, Jun Yub Lee, Sung Ho Hong, Sang Hyun Choi, Sung Chang Hong, 2008, "A Study on the Deactivation of Commercial DeNox Catalyst in Fired Power Plant", Applied Chemistry for Engineering, Vol.19, No 4, pp 376~380
- (2) Senghee Youn, 2014, "Effect of preparation conditions of V2O5/TiO2 Catalysts for selective catalytic reduction of NOx with NH3", Master's degree thesis of Seoul National University, p 44.
- (3) Moon Hyeon Kim, 2016, "Performance Management of a DeNox System for Stationary Sources and Regeneration Strategies of DeNOx Catalyst", Clean technology, Vol.22, No 3, p152.
- (4) Min Su Park, 2014, "Reduction of Nitrogen Oxides Generation by Adjusting Combustion Conditions in a 350 MW Oil-Fired Power Plant", Master's degree thesis of Hanyang University, pp. 7, pp. 31
- (5) Da Doo Lim, 2015, "A Study on the NOx reduction technology of tangential corner firing boiler in 560 MW class coal fired power plant", Master's degree thesis of Yonsei University, p. 53.
- (6) Ju Kyung Park, 2014, "Correlation analysis of NOx concentration at the inlet of De-NOx system and influence factors in a natural gas fired thermal power plant", Master's degree thesis of Hanyang University, p. 10.
- (7) Korea Power Learning Institute, 2016, "Air Environment Facility Practice", pp. 122~128.
- (8) Korea Midland Power Company, 2017, "Standard for diagnosis of atmospheric environment facilities".
- (9) Ki-Ryoung Jung, 2013, "Prediction of Velocity distribution at inlet region of catalyst in a De-NOx system", Master's degree thesis of Hanyang University, pp. 4~7.
- (10) Dong Wook Kwon, Sung Chang Hong, 2016, "Selective Catalytic Reduction(SCR) Technology Trends for the Nitrogen Oxide Removal of Exhaust Gas", Korean Industrial Chemistry News, Vol.19, No 5, pp 17~18, p.21.
- (11) Jingjing Bao, Lin Mao, Yuhua Zhang, Hongmei Fang, Yajuan Shi, Linjun Yang, Hongmin Yang, 2016, "Effect of Selective Catalytic Reduction System on Fine Particle Emission Characteristics", Energy & Fuels, P.1325.
- (12) Joseph P. Dunn, Prashanth R. Koppula, Harvey G. Stenger, Israel E. Wachs, 1998, "Oxidation of sulfur dioxide to sulfur trioxide over supported vanadia catalyst", Applied catalyst B 19, p. 104.
- (13) Korea Midland Power Company, 2020, "Reports on Denitrification system of the distribution adjustment and performance test results for Units 4~6 in 2020.
- (14) Korea Midland Power Company, 2019, "Reports on Denitrification system of the distribution adjustment and performance test results for Units 3~6 in 2019.
- (15) Korea Midland Power Company, 2020, "Reports on test results to derive optimal operation plan for Denitrification system. 