

580 MW급 복합발전소 탈질설비에서 가스터빈 출력에 따른 암모니아 소모량 변화

장용우*†, 유호선**

*† 한국동서발전(주), ** 숭실대학교 기계공학과

Change of Ammonia Consumption with Gas Turbine Output in DeNOx System for a 580 MW Combined Cycle Power Plant

Yong-Woo Jang*†, Ho-Seon Yoo**

*† Korea Midland Power Co., Ltd., Sejong 30100, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

ABSTRACT : In this study, ammonia consumption by gas turbine output was adjusted to find out the amount of ammonia consumption that complies with the enhanced Air Quality Preservation Act and internal regulation emission standards in SCR type DeNOx System for a 580 MW Sejong Combined Cycle Power Plant. For measurements, the gas turbine output was varied to 50, 99, 149, 198 MW and ammonia consumption was adjusted with the combustion gas and ammonia supply conditions fixed at each stage. When the emission limit were change from 10 ppm to 8 ppm, ammonia consumption was increased from 78, 93, 105, 133 kg/h to 89, 113, 132, 176 kg/h. The increase rate of ammonia consumption was 14, 22, 26, 32% per output category compared to the 10 ppm emission limit, which was shown to increase as output increased.

초록 : 본 연구에서는 580 MW급 세종복합발전소의 선택적 촉매환원방식 탈질설비 1호기를 대상으로 강화된 대기환경보전법 및 환경평가협약의 질소산화물 허용배출기준을 준수하는 암모니아 소모량을 찾고자 가스터빈 출력별 암모니아 투입량을 조절하며 측정하였다. 측정을 위해 가스터빈 출력은 50, 99, 149 그리고 198 MW로 변동시키고 각 출력단계별 연소가스 및 암모니아 공급조건을 고정한 상태에서 탈질설비 내 암모니아 소모량을 조절하였다. 질소산화물 배출기준을 10 ppm에서 8 ppm으로 변경하였을 때 출력대별 암모니아 소모량은 각각 78, 93, 105 그리고 133 kg/h에서 89, 113, 132 그리고 176 kg/h로 증가 되었다. 암모니아 소모량 증가율은 질소산화물 배출기준 10 ppm 대비 출력대 별 각각 14, 22, 26 그리고 32%로 출력이 증가할 수록 증가율도 늘어남을 알 수 있었다.

Key words : 선택적 촉매환원법(selective catalytic reduction), 암모니아 소모량(Ammonia consumption), 질소산화물 농도(NOx Concentration), 탈질설비(DeNOx system)

- 기호설명 -

P_G : 가스터빈 발전기 순시출력(MW)

$\overline{P_G}$: 가스터빈 발전기 평균출력(MW)

A_f : 암모니아 순시소모량(kg/h)

$\overline{A_f}$: 암모니아 평균소모량(kg/h)

N_{out} : 배출가스 질소산화물 순시농도(ppm)

$\overline{N_{out}}$: 배출가스 질소산화물 평균농도(ppm)

$\overline{N_{out}} limit$: 배출가스 질소산화물 규제치(ppm)

t : 운전시간(min)

- 약어설명 -

SCR : selective catalytic reduction

AIG : ammonia injection grid

†Corresponding Author
hsy@ssu.ac.kr

1. 서론

2017년 9월 환경부가 발표한 미세먼지 관리 종합대책의 후속조치로 질소산화물 등 미세먼지 배출 규제를 강화하는 대기환경보전법 시행규칙 일부 개정안을 입법예고(1)하였다. 국내 미세먼지 발생과 대기환경오염의 주요 인자인 질소산화물은 화력발전분야에서 높은 배출기여도를 차지하고 있으며 특히 8차 전력수급계획에 따라 LNG 발전소의 비중이 높아질 계획이다.(2) 이에 배출되는 미세먼지를 낮추기 위한 정부의 환경규제는 더욱 강화되고 있으며 질소산화물의 경우 대기환경보전법 배출허용 기준이 2001년 이전 100 ppm에서 2015년 이후 20 ppm으로 점점 낮아지고 있는 추세이다. 질소산화물은 고온연소 반응의 부산물로 그 자체로 인체에 해로울 뿐만 아니라 산성비를 유발하며 대기 중에서 2차 오염물질을 형성하여 환경문제를 유발시킨다.

세종복합발전소는 580 MW급 도심 열병합발전소로서 대기환경보전법에 따라 질소산화물 배출가스 허용기준 20 ppm을 적용받지만, 발전소 자체 관리기준을 법적 규제치보다 엄격한 기준인 10 ppm로 적용하여 운영되고 있다. 그러나 세종복합발전소의 경우 지자체와의 별도 환경영향 평가 협의기준 의무준수로 질소산화물 배출허용기준이 8 ppm으로 낮아짐에 따라 세종복합발전소는 질소산화물 배출 규제치를 8 ppm으로 낮추는 방안을 추진하고 있다. 이에 따라 본 논문에서는 강화된 질소산화물 허용배출기준 8 ppm을 만족하며 과잉 탈질하지 않는 가스터빈 출력대별 암모니아 소모량을 알아보고자 한다.

본 연구에서는 580 MW급 세종복합발전소 선택적 촉매환원 탈질설비 1호기를 대상으로 198 MW급 가스터빈 발전기 출력 이 50, 99, 149 그리고 198 MW 범위일 때 각 출력단계별 연소가스 조건을 고정한 상태에서 탈질설비 촉매 반응단에 투입하는 환원제 암모니아 유량을 1 kg/h씩 조절하여 이때 배출가스 내의 질소산화물 평균 농도가 대기환경보전법 및 세종복합발전소 내부규정을 준수하며 연속 운전할 수 있는 가스터빈 출력대별 암모니아 소모량을 알아보고자 하였다.

2. 복합발전소 탈질설비

2.1 설비의 구성

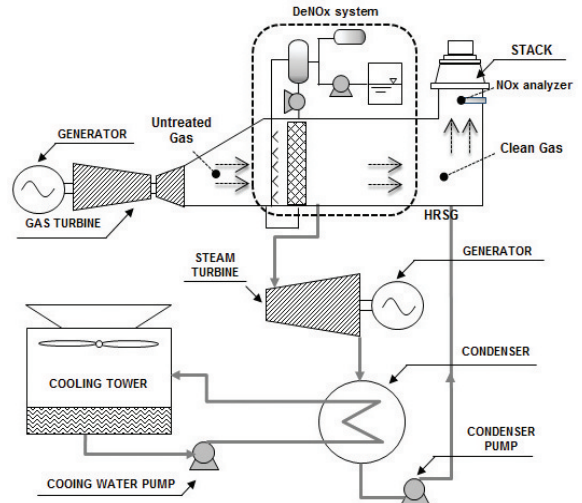


Fig. 2-1 Schematic Diagram of the Sejong combined cycle power plant

Fig. 2-1은 본 연구의 대상플랜트인 세종복합발전소 설비의 구성을 나타낸 그림이다. 천연가스 연소 가스터빈, 수평 3압식 비조연 배열회수보일러, 증기터빈 그리고 냉각탑으로 구성되어 있다. SCR 탈질설비는 배열회수보일러 내부의 고압증발기와 고압 절탄기 사이에 설치되어 있다. 가스터빈의 연소과정에서 발생된 배기가스는 배열회수보일러 입구 덕트를 거쳐 고압증발기를 통과하여 SCR 촉매단으로 유입된다. 배기가스 중에 포함된 질소산화물은 고압증발기 후단에 설치된 암모니아 분사격자 노즐(AIG)에서 분사된 암모니아는 촉매단에서 선택적 반응에 의해 무해한 질소와 수증기로 분해되어 연돌을 통해 대기로 배출된다.(3)

본 연구는 세종복합발전소의 SCR 탈질설비 1호기를 대상으로 시험하였으며 탈질설비의 개략도는 Fig. 2-2와 같다. 탈질설비는 크게 암모니아 저장, 공급, 기화, 주입 그리고 반응계통으로 이루어져 있으며 암모니아수는 저장탱크 2기와 희석탱크 1기를 거쳐 암모니아 공급펌프 2기를 지나 유량조절 밸브를 통해 암모니아 기화기 계통으로 들어온다.

기화계통으로 들어온 암모니아수는 압축공기와 섞여 노즐을 통해 기화기 내부로 분무되면 탈질설비 전단 추기배관에서 블로워 팬 2기를 통해 들어온 350℃ 정도의 고온 배기가스로 기체 암모니아로 상(Phase)변화하여 배열회수

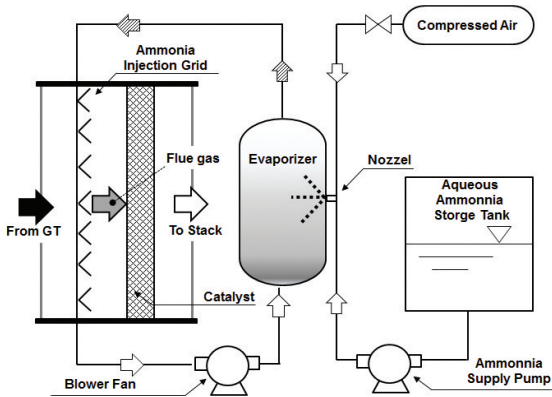
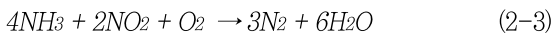
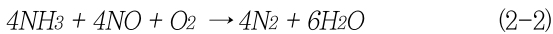
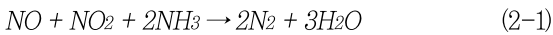


Fig. 2-2 Schematic Diagram of the DeNOx system in Sejong power plant No. 1

보일러 내 암모니아 주입 노즐(AIG)을 통해 분사되면 1개 층의 촉매단과 반응하여 배기가스가 질소와 수증기로 탈질 처리된다.

2.2 탈질 반응

본 연구대상 세종복합발전소의 탈질설비는 선택적 촉매 환원 탈질방식을 채택하고 있으며 환원제로 농도 25% 암모니아수와 촉매로 금속산화물 계열의 이산화티타늄(TiO₂), 오산화바나듐(V₂O₅) 그리고 삼산화텅스텐(WO₃) 혼합물을 사용하고 있다. 촉매는 벌집(honeycomb) 모양으로 1단의 88개 모듈로 설치되어 있고 환원제인 암모니아 가스를 분사 격자의 798개 주입노즐을 통해 주입하여 대략 330℃ 정도의 온도에서 촉매반응이 이루어진다.(4) 배출되는 질소산화물은 일산화질소(NO)와 이산화질소(NO₂)가 대부분을 차지한다. 탈질공정에서 촉매 표면에서의 환원제 암모니아와 질소산화물 사이의 주반응은 (2-1) ~ (2-3) 과 같다.(5)



2.3 정격 운전조건

Table 2-1에는 본 연구의 대상인 한국중부발전 세종복합발전소 탈질설비 1호기의 정격 운전 조건을 나타내었다.

Table 2-1 Rated operating conditions of the DeNOx system in Sejong power plant No. 1

Item	Values
Generator output[MW]	580
Turbine inlet temperature[℃]	1,350 ~ 1,400
Exhaust gas pressure[bar]	1.039
Exhaust gas temperature[℃]	630±5
Exhaust gas flow rate[kg/h]	1,586
Fuel Consumption flow rate [kg/h]	38,207
Pressure drop in SCR[mmH ₂ O]	≤35
SCR inside temperature[℃]	330 ~ 340
Pressure in SCR[kgf/cm ²]	23.6
Ammonia Slip[ppm]	≤2

터빈 198 MW 정격 출력 운전시 터빈 입구 온도는 1350℃이며 터빈 출구 배기가스는 압력 1.039 bara, 온도 630℃ 그리고 유량은 1,586 kg/h로 운전 된다. 정격 운전시 탈질설비 압력강하는 35 mmH₂O이며 촉매반응온도는 330℃에서 암모니아 슬립은 2 ppm 이하로 유지된다.(6)

3. 가스터빈 출력 및 암모니아 소모량 측정

3.1 측정 조건

출력 단계별 설계치를 반영하여 정격 기준 출력 25, 50, 75 그리고 100%에서 각각 터빈 출구 배기가스 온도는 410, 544, 577 그리고 611℃를 ±5℃ 이내에서 유지하였고 유량은 1,276, 1,284, 1,525 그리고 1,777 t/h로 조정하였다. 발전설비로 연료의 공급 온도는 195℃ 및 압력은 33 kgf/cm²로 일정하게

유지하였고 암모니아수의 공급 온도와 압력은 30℃, 5 kgf/cm²로 각각 일정하게 하였으며, 암모니아 기화용 블로워 팬 1대는 고정운전을 하고 시험은 대기온도는 5±1℃에서 시행하였다.

3.2 측정 기준 및 방법

가스터빈 정격출력 198MW를 기준으로 25, 50, 75 그리고 100%로 각 단계별 출력 조정 후 기준 질소산화물 배출 기준 10 ppm 이하를 충족하는 암모니아 소모량에서

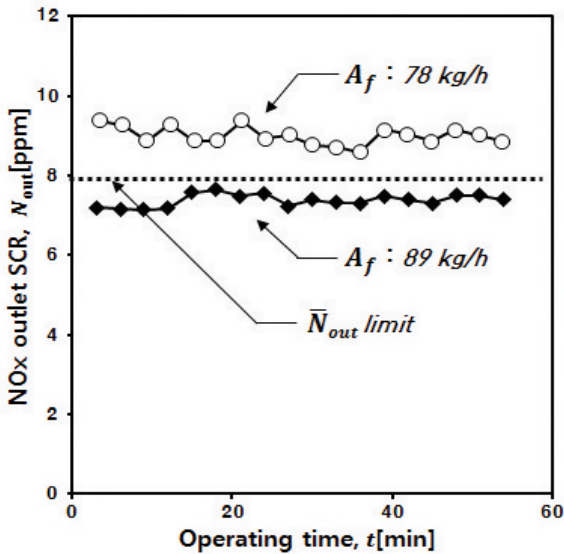


Fig. 4-1 Change of NOx concentration in exhaust gas with ammonia consumption for 1hr. : 50 MW

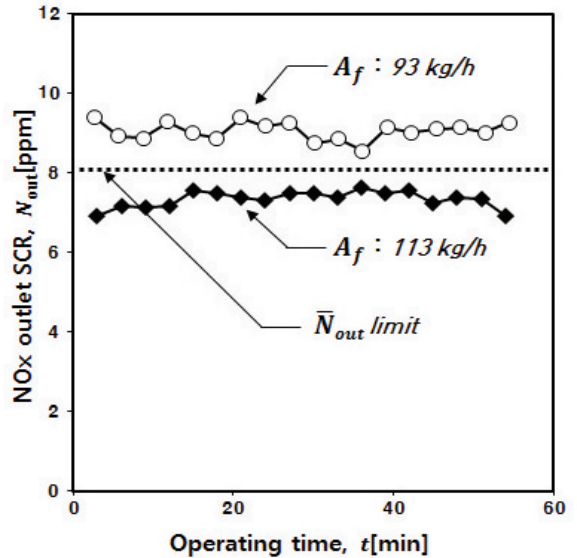


Fig. 4-2 Change of NOx concentration in exhaust gas with ammonia consumption for 1hr. : 99 MW

1kg/h 간격으로 암모니아 소모량을 증가시켜서 1시간 평균값이 배출기준 8 ppm 준수를 위한 자체규정 7.4 ppm 이하를 만족하고 미반응 암모니아 농도 2 ppm 이하를 유지하는 최소 암모니아 소모량을 구하였다. 시험 측정 데이터로 사용된 암모니아 소모량, 탈질설비 출구 질소산화물 농도 그리고 발전출력 측정주기는 매 3분 평균값을 사용하였다. 데이터 측정을 위해 터빈식 암모니아 유량계, 광학식 질소산화물 분석기, 전자식 적산 전력량계 그리고 운전정보 시스템을 계측장비로 설치하고 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 가스터빈 출력 별 암모니아 소모량

4.1.1 가스터빈 출력 50 MW인 경우

출력 50 MW에서 안정 운전 후 연소가스 유량 1,142,360 kg/h에서 암모니아 소모량을 78 kg/h에서 1 kg/h씩 증가시켜 탈질설비 출구 질소산화물이 배출기준 8 ppm에 0.6 ppm이상 여유를 두어 7.4 ppm 이하에 도달하는 89 kg/h까지 변화시켰다. Fig. 4-1은 암모니아 소모량이 각각 78 kg/h과 89 kg/h 일 때 1시간 동안의 질소산화물 농도 변화를 나타낸 것으로 암모니아 소모량이 89

kg/h 일 때 질소산화물 평균 농도가 7.4 ppm으로 안정적으로 유지됨을 알 수 있었다.

4.1.2 가스터빈 출력 99 MW인 경우

출력 99 MW에서 안정 운전 후 연소가스 유량 1,249,560 kg/h에서 암모니아 소모량을 93 kg/h에서 1 kg/h씩 증가시켜 탈질설비 출구 질소산화물이 배출기준 8 ppm에 0.6 ppm이상 여유를 두어 7.4 ppm 이하에 도달하는 113 kg/h까지 변화시켰다. Fig. 4-2은 암모니아 소모량이 각각 93 kg/h과 113 kg/h 일 때 1시간 동안의 질소산화물 농도 변화를 나타낸 것으로 암모니아 소모량이 113 kg/h 일 때 질소산화물 평균 농도가 7.4 ppm으로 안정적으로 유지됨을 알 수 있었다.

4.1.3 가스터빈 출력 149 MW인 경우

출력 149 MW에서 안정운전 후 연소가스 유량 1,477,080 kg/h에서 암모니아 소모량을 105 kg/h에서 1 kg/h씩 증가시켜 탈질설비 출구 질소산화물이 배출기준 8 ppm에 0.6 ppm이상 여유를 두어 7.4 ppm 이하에 도달하는 132 kg/h까지 변화시켰다.

Fig. 4-3은 암모니아 소모량이 각각 105 kg/h과 132 kg/h 일 때 1시간 동안의 질소산화물 농도 변화를 나타낸

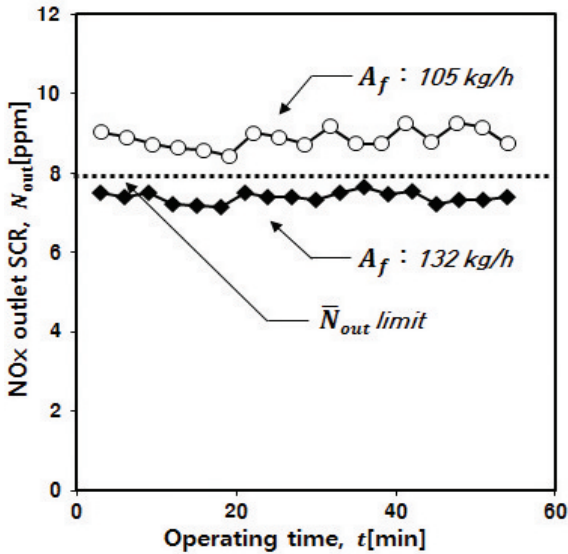


Fig. 4-3 Change of NOx concentration in exhaust gas with ammonia consumption for 1hr, : 149 MW

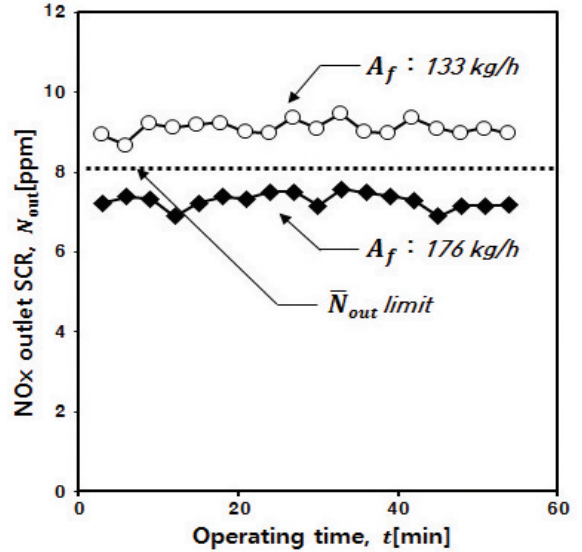


Fig. 4-4 Change of NOx concentration in exhaust gas with ammonia consumption for 1hr, : 198 MW

것으로 암모니아 소모량이 132 kg/h 일 때 질소산화물 평균 농도가 7.3 ppm으로 안정적으로 유지됨을 알 수 있었다.

4.1.4 가스터빈 출력 198 MW인 경우

출력 198 MW에서 안정운전 후 연소가스 유량 1,711,440 kg/h에서 암모니아 소모량을 133 kg/h에서 1 kg/h씩 증가시켜 탈질설비 출구 질소산화물이 배출기준 8 ppm에 0.6 ppm이상 여유를 두어 7.4 ppm 이하에 도달하는 176 kg/h까지 변화시켰다.

Fig. 4-4은 암모니아 소모량이 각각 133 kg/h과 176 kg/h 일 때 1시간 동안의 질소산화물 농도 변화를 나타낸 것으로 암모니아 소모량이 176 kg/h 일 때 질소산화물 평균 농도가 7.2 ppm으로 안정적으로 유지됨을 알 수 있었다.

4.2 가스터빈 출력에 따른 암모니아 소모량 변화

Fig. 4-5에는 앞선 실험을 통해 얻은 결과를 바탕으로 탈질설비 출구 질소산화물 배출기준 10 ppm, 8 ppm일 경우 가스터빈 출력 50, 99, 149 그리고 198 MW에 따른 암모니아 소모량 변화와의 관계를 표현하였다. 가스터빈 출

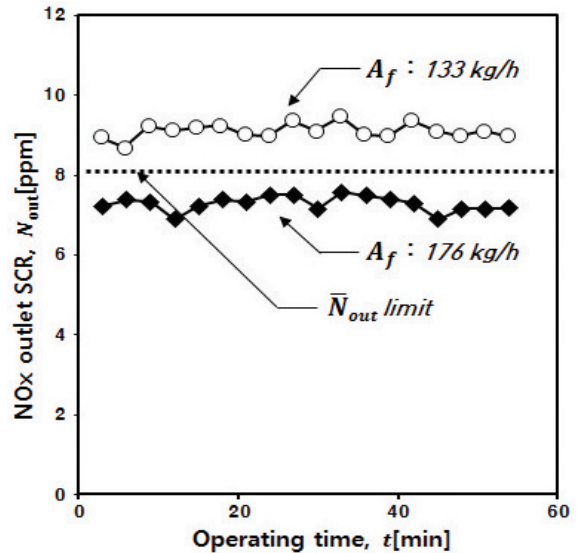


Fig. 4-5 Change of Ammonia Consumption with Average Gas Turbine Output

력이 증가할수록 암모니아 절대 소모량은 증가하는 경향을 보였으며 특히 정격출력 75%에서 급격히 증가하였다. 또한 질소산화물 배출기준 8 ppm을 충족하는 암모니아 소모량은 기존 운전치 질소산화물 배출기준 10 ppm 대비

50, 99, 149 그리고 198 MW에서 각각 12, 22, 26 그리고 32% 증가되어 출력이 높을수록 증가율도 늘어나는 경향을 보였다.

5. 결론

본 연구에서는 580 MW급 복합발전소 탈질설비에서 가스터빈 출력이 50, 99, 149 그리고 198 MW일 때 배기 연소가스 중 질소산화물 농도를 허용배출기준 8 ppm 이하로 충족시키는 암모니아 소모량을 알아보고자 측정하고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 가스터빈 출력이 50, 99, 149 그리고 198 MW일 때 탈질설비 내부의 암모니아 소모량은 각각 89, 114, 132 그리고 176 kg/h로 운전하여야 연돌로 배출되는 연소가스의 질소산화물 농도를 8 ppm 이하로 유지할 수 있었다.

2) 가스터빈 출력이 증가할수록 암모니아 절대 소모량은 증가하는 경향을 보였으며 질소산화물 배출기준 8 ppm을 충족하는 암모니아 소모량은 질소산화물 배출기준 10 ppm 대비 출력 50, 99, 149, 그리고 198 MW에서 각각 14, 22, 26 그리고 32% 증가되어 출력이 높을수록 증가율도 늘어났다.

참고문헌

- (1) Minister of Environment, 2017, Enforcement Regulations of the Air Quality Preservation Act, Article 15, Law 16, Paragraph 1, Annex 8. Minister of Environment
- (2) Minister of Trade, Industry and Energy, 2017, 8th Basic Plan for Electricity Supply and Demand, Minister of Trade, Industry and Energy, No. 2017-2031. pp. 37.
- (3) Doosan Heavy Ind. & Constr, 2013, Sejong combined Cycle Power Plant, Operation & Maintenance manual Vol.9, Doosan, pp. 58.
- (4) KC Cottrell, 2012, Sejong combined Cycle Power Plant SCR design standards & operation manual, Vol.2, KC Cottrell, pp. 23 ~ 28.
- (5) Lee Kang Woo, 2011, Control technology of NOx in combustion exhaust gas, Dongwa technology, pp. 51 ~ 56.
- (6) Kepco E&C, 2012, DeNOx system engineering service results final report, Ver 3, Kepco E&C, pp. 45 ~ 70. 