

1,000Nm³/hr 급 SCR Pilot Plant 의 설계 및 성능실험

김정일*, 장인갑*, 선철영*, 김종석*, 천무환*

Design and Performance Test of SCR Pilot Plant(1,000Nm³/hr)

J.I. Kim, I.G. Chang, C.Y. Seon, J.S. Kim and M.H. Chon

Key Words : Selective Catalytic Reduction(선택적 촉매 환원 설비), DeNOx(질소산화물 제거), space velocity(공간속도), linear velocity(선속도), NH₃/NO ratio(암모니아 주입비)

Abstract

As a preceding process for developing design technology and establishing operation technology, the design procedure of the SCR(Selective Catalytic Reduction) pilot plant that can handle 1,000Nm³/hr of flue gas was reported in this paper. And we also considered several factors that might cause abnormality of the plant in the designing process. The plant was designed and fabricated to test the DeNOx performances in variable operating conditions in the range of 3000~36,000 hr⁻¹ in space velocities, 1.67~6 m/s in linear velocities, 200~500 °C temperatures, 300~1,000 Nm³/hr flow rates, and 0~1.4:1 NH₃/NO ratios. In order to maintain the flow uniformity, the guide vanes and flow straightener were designed and constructed in the plant. The SCR pilot plant can be operated by the automatic control system, which enable to obtain performance data in real time and to set up the operating technology. The catalyst reactor consists of 4 catalyst layers and surface area of each layer can be adjusted to be of small size. Arrangement of catalysts per layer is 3×6 with the catalyst dimensions of 150×150×500 mm(L×W×H).

1. 서 론

화석연료의 연소로부터 발생되는 질소산화물은 자체적으로 독성을 갖고 있을 뿐만 아니라 산성비를 생성하고 광화학스모그의 원인이 된다. 또한 대기중의 오존층까지 파괴하는 환경오염물질로서 대기오염의 주범이 되고 있다.

질소산화물의 배출을 억제하기 위해서 정부에서는 배출허용기준을 대폭 강화할 예정이며, 2004년 이후는 강화된 기준을 적용할 것으로 입법예고하고 있다. 이와 더불어 총량규제 등과 같은 배출량 최소화 정책을 시행함으로써 법적 규제치 준수 및 배출량을 최소화할 수 있는 제어설비의 설치가 고려되고 있다. 이러한 규제 강화 추세로 인해 질소산화물 저감기술중 저 NOx 연소기술로는 강화되고 있는 규제에 대비하기 어려운 실정이며, 안

정적 효율 및 범용화되어 있는 선택적촉매환원공정(Selective Catalytic Reduction:SCR)과 같은 고효율 설비의 적용 가능성이 매우 높다.

SCR 공정은 최초 미국에서 개발되었으나 일본과 독일에서 발전시켜왔으며 이들 일부 국가에서만 보유하고 있는 기술이다. 국내에서도 SCR 공정의 핵심기술인 촉매에 대한 다양한 연구가 진행되고 있으며 일부에서는 상용화 단계에 있다. 그러나 신규 및 기존 플랜트에 적용할 경우 검증된 설계기술이 없으므로 외국의 기술보유업체에 의존할 수 밖에 없다. 따라서 다양한 조건에 대한 설계기술 개발이 시급한 실정이며, 이와 더불어 설비 이상을 초래할 수 있는 요인에 대한 정립과 이를 대비할 수 있는 운전기술을 습득해야 한다.

본 고에서는 설계기술개발 및 운전기술 정립을 위한 선행과정으로서 다양한 설계조건 변화에 따른 성능실험이 가능한 1,000Nm³/hr 급 pilot plant 의 설계절차를 기술하였으며, 설비이상을 초래할 수 있는 요인에 대한 설계단계에서의 고려사항을 점

* 두산중공업(주) 기술연구원 환경기술연구팀

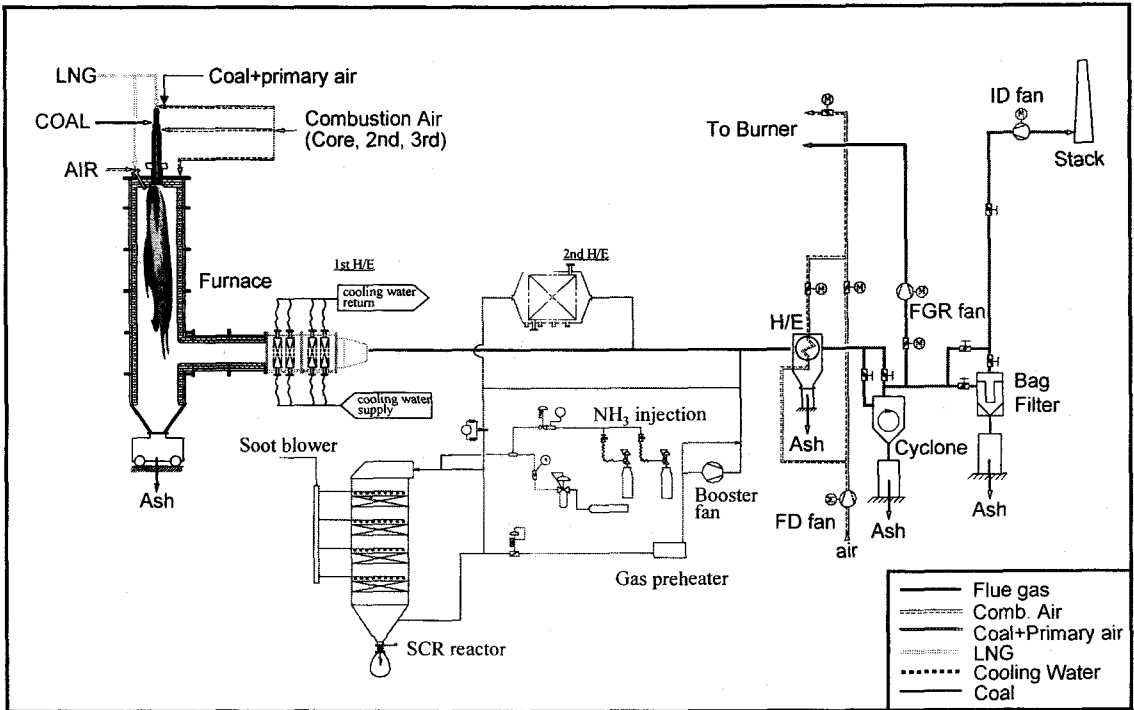


Fig. 1. Schematic diagram of SCR pilot plant.

검하였다.

2. 설비구성 및 설계조건

2.1 설비구성 및 Configuration

SCR system의 석탄화력발전소 적용시 설비 배치에 따라 high-dust(절탄기 후단), low dust-hot side(ESP 후단), low dust-cold side(FGD 후단)의 세가지 유형으로 구분되어 진다. 이 중 high dust type이 운전비용 및 설비부지 등의 측면에서 유리하며 현재까지는 가장 널리 보급되어 있는 유형이다. 이에 본 pilot plant의 기본 모델 역시 high dust type으로 설정하였으며, Fig. 1에 설비구성을 나타내었다. Pilot plant는 1MW_{th}급 실험연소로 후단에 설치되고, 배기가스는 절탄기(Economizer) 역할을 하는 열교환기를 거쳐 SCR Pilot Plant를 통과한 후 공기예열기(Air Preheater)로 유입될 수 있도록 구성되었다.

SCR 반응기 전단에는 배기가스의 온도를 조절할 수 있도록 열교환기를 설치하였으며, SCR 반응기 후단에는 시스템 초기기동시 heat impact 및 먼지에 의한 촉매의 활성도 저하 요인을 없애기 위하여 gas preheater를 설치하였다. NO 분석장비를

반응기 전후단에 설치함으로써 질소산화물의 실시간 농도분포를 측정할 수 있도록 하였으며, O₂, SO₂, CO 및 NH₃도 측정할 수 있도록 구성되었다. SCR pilot plant의 성능실험시 석탄화력발전소의 실제 모사, 실시간 운전자료 획득 및 부하변동에 따른 실험오차 최소화를 위하여 자동제어시스템을 구축하였다.

2.2 실험탄 및 배기가스 특성

Table 1,2에는 1MW_{th}급 실험연소로에 사용되는 중국산 Yulin 탄의 공업분석 및 원소분석 결과를 나타내었다.

Table 1. Proximate Analysis of Yulin Coal(wt %)

| Moisture | Volatile | Fixed Carbon | Ash |
|----------|----------|--------------|------|
| 8.14 | 31.0 | 51.54 | 9.31 |
| Dry Base | 33.8 | 56.1 | 10.1 |

Table 2. Ultimate Analysis of Yulin Coal(wt%)

| C | H | N | S | O | Ash |
|-------|------|------|------|-------|-------|
| 69.13 | 4.44 | 1.17 | 0.52 | 23.08 | 10.14 |

공업분석은 TGA-501(LECO 사)로 분석하였고, C,H,N 성분은 CHN-600(LECO 사), S 성분은 SC-432(LECO 사)로 분석하였다.

Fly ash, 산소, 수분, 황산화물과 같은 성분은 촉매 및 반응기 설계에 영향을 미치며, Table 3 에 실험연소로에서 배출되는 배기가스의 조성을 나타내었다.

Table 3. Flue Gas Conditions.

| | | |
|--------------------------|------|--------------------------------|
| Flue gas volume | 1000 | m ³ /h (S.T.P. wet) |
| Flue gas temperature | 500 | °C |
| NO _x -content | 500 | ppm |
| N ₂ -content | 75 | vol.% (S.T.P. wet) |
| O ₂ -content | 4 | vol.% (S.T.P. wet) |
| H ₂ O-content | 6 | vol.% (S.T.P. wet) |
| CO ₂ -content | 14 | vol.% (S.T.P. wet) |
| SO ₂ -content | 300 | ppm |
| Dust-content | >10 | mg/m ³ (S.T.P. wet) |

3. 설계시 고려사항

SCR 시스템은 사용연료 및 가스조성 등 여건에 따라 설계의 유연성이 발휘되어야 하며, 그렇지 못할 경우 기존설비와 SCR 시스템의 효율에 지장을 초래할 수 있다. 따라서 전체 공정 및 SCR 시스템에 영향을 미칠 수 있는 요인에 대한 점검이 필요하다.

3.1 먼지농도(Dust Concentration)

연소배기가스 내에 먼지의 함유량이 클 경우 촉매의 opening 또는 pitch 가 커지므로써 결과적으로 촉매의 overall volume 이 커지게 된다. 그러나 먼지의 입경이 클 경우 촉매 및 공기에열기 표면에 침적된 황산 암모늄염의 plugging potential 을 감소시키는 cleaning effect 가 수반되어질 수 있다. 반면 연소배기가스 내에 먼지의 함유량이 작을 경우 촉매의 소요량이 작아질 뿐만 아니라 반응기 크기 및 중량이 작아지므로써 설치비(steel & foundations)가 낮아지나 미세입자에 의한 plugging 으로 빈번한 sootblowing 이 요구되어 진다.

3.2 황산화물 함량 (Sulfur Compounds)

SCR 및 기존설비의 장애를 유발하는 가장 널리

알려진 것이 황성분이다. SO₃ 는 NH₃ 와 반응하여 황산암모늄염을 생성한다. 황산암모늄염은 저온에서 stick 화 되기 때문에 촉매의 plugging 을 방지하기 위해서는 최소 운전온도를 설정하고, 석탄화력발전소의 보일러 출력 감소시는 가스 온도 보장을 위해 절탄기의 bypass 를 고려해야 한다.

3.3 온도 (Temperature)

SCR 시스템에서 사용되어지는 온도범위는 통상 300~400 °C 로서, 이 구간내에서 최적의 효율을 나타낸다. 고온에서는 촉매의 sintering 또는 결정화로 활성도가 저하되며, 저온에서는 ammonium bisulfate 의 응축에 의한 촉매 표면의 plugging 으로 활성도가 저하될 수 있다. 최근 저온에서도 촉매의 내구성 및 고효성도를 유지하는 촉매가 개발되고 있으며 저온 촉매의 석탄화력발전소 적용시는 low dust-hot side type 의 SCR 시스템이 적극 고려될 것이다.

3.4 연료내 미량물질(As, Ca, V, Pt, etc)

연료내 미량물질은 촉매피독, plugging 및 NH₃ 산화에 의한 NO_x 생성 등을 유발한다. 일단 촉매 피독현상이 발생되면 촉매의 활성도 감소, NO_x 배출량 증가, NO_x 배출량 제어를 위해 암모니아 주입량 증가, 암모니아 slip 증가 및 공기에열기 plugging 과 같은 악순환이 되풀이 된다. 따라서 SCR 설계시는 이러한 미량물질에 대한 분석이 선행되어야 하며 촉매 선정시 연료 성분별 허용 가능 범위가 설정되어야 한다.

3.5 기타 고려사항

개보수 공정의 SCR 시스템 설치는 전체 공정의 압력손실 증가를 초래하므로 I.D Fan 의 증설이 요구된다. 석탄화력발전소의 경우 저부하 출력에서는 온도 감소에 의한 암모늄염 생성을 방지하기 위해 절탄기의 bypass control 이 고려되어지므로 재열기(Reheater) 및 과열기(Superheater)의 효율 감소가 초래된다. 또한 석탄화력발전소에 사용되는 촉매는 SO_x 에 강항 저항성이 있어야 하며, 먼지에 의한 plugging 및 erosion 에도 저항성이 커야 한다.

4. Pilot Plant 설계

SCR 시스템 설계에 있어서 중요변수는 촉매소요량 및 반응기 sizing 결정을 위한 공간속도(space velocity, hr⁻¹)와 가스 선속도, 탈질율에 영향을 미치는 암모니아 주입량과 유동 균일도이다. Fig. 2

에 SCR pilot plant 설계과정에 대한 순서도를 나타내었다. 이밖에 고농도의 먼지에 의한 압력손실 발생에 대처할 수 있는 soot blower를 고려하였으며 주기, 강도 및 blowing time을 조절할 수 있도록 설계하였다.

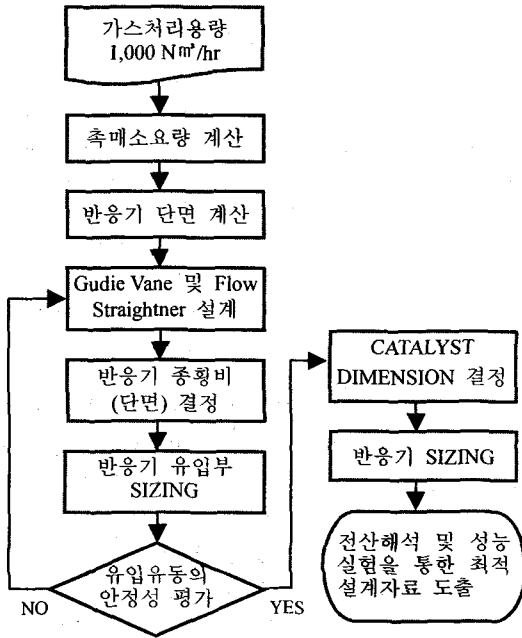


Fig. 2. Design Procedure of SCR Pilot Plant.

4.1 공간속도(Space velocity)

공간속도는 소요 촉매량 및 반응기 크기를 결정할 수 있는 중요변수로서 다음과 같이 구해진다.

$$S.V. = \text{Gas Flow rate} / \text{Catalyst Volume}$$

상기 식에서 보는 바와 같이 공간속도가 증가할수록 소요 촉매량은 감소되어지고 동시에 반응기 크기도 축소된다. 그러나 마모에 의한 촉매의 내구성 감소 및 시스템의 효율과 상관관계를 가지므로 주위 여건을 고려한 적절한 범위의 공간속도를 결정할 수 있는 설계능력이 요구된다.

Pilot plant에서는 최저 3,000hr⁻¹의 공간속도에서 성능실험이 가능하도록 촉매량을 결정하였으며, 소요 촉매량은 0.81m³이다. 반응기 단면적 및 촉매의 layer를 조절하므로써 최고 36,000hr⁻¹까지 가능하도록 제작되었다.

4.2 반응기 단면적

가스처리유량에 대한 적절한 범위의 반응기내 선속도를 설정하므로써 반응기 단면적을 결정할 수 있다. 선속도가 크면 mass transfer가 높아지기 때문에 촉매의 활성도가 커지게 되지만 압력손실 및 먼지에 의한 erosion이 커지게 된다. 따라서 적절한 범위의 가스 선속도를 선정해야 한다.

Pilot plant의 경우 1.67~6m/sec의 선속도 범위에서의 성능실험이 가능하도록 제작되었다. 최소 선속도인 1.67m/sec의 유속에서 0.81m³의 촉매를 반응기에 장착하기 위해서는 촉매의 총 depth가 2000 mm로 계산되었으며 공간속도의 원활한 가변을 위해 촉매 depth를 500mm씩 4단으로 분리하여 설치하였다. 각 단은 150^L×150^W×500^Hmm 크기의 촉매가 3×6 열로 배치되었다.

4.3 암모니아 분사량

암모니아 분사량은 탈질율에 가장 큰 영향을 미치는 변수일 뿐만 아니라 암모늄염에 의한 설비 이상을 초래할 수 있는 인자이다. 따라서 미반응 암모니아를 최소화하며 탈질율을 극대화할 수 있는 분사량 결정 및 분사조건을 구성해야 한다.

암모니아 분사량의 정확한 조절을 위해 질량유량계를 설치하고 NH₃/NO의 주입비를 NO 500ppm 기준 1.4:1 까지 가변 가능하도록 하였다. 아울러 최적의 분사조건이 될 수 있도록 다양한 분사모델을 고려하고 있다.

4.4 Guide vane 및 Flow Straightner 설계를 위한 반응기 내부 유동장 수치해석

SCR 시스템 설계시 배가스의 반응기내 유동특성은 촉매의 활성도 및 수명 측면에서 아주 중요한 parameter이며, velocity profile의 균일도를 검토해야 한다. 유동의 균일도는 탈질효율에도 영향을 미치므로 반응기 유입부와 guide vane의 배치가 최적화되어야 하며 model test가 수반되어야 한다. 본 실험설비는 이러한 반응기내 속도분포가 균일할 수 있도록 설계에 반영하고 있으며, 이러한 유동분포의 균일화를 검토하기 위하여 guide vane의 위치 및 straightner가 유동에 끼치는 영향과 유동특성을 살펴보고자 반응기 내부 유동장을 수치해석 하였다.

해석 범위는 Fig. 3의 guide vane과 straightner를 포함한 SCR 반응기 부분만을 고려하였고 촉매층은 포함시키지 않았다. 유입되는 배기가스는 air로 가정하여 해석하였다. Table 4에 반응기 유동해석에 사용된 경계조건을 나타내었다.

Table 4. Boundary Conditions for Numerical Analysis.

| | |
|------------------------|---------------------------|
| volume flow rate(air) | 1,000 Nm ³ /h |
| Inlet temperature | 350 °C |
| Inlet velocity | 7.02 m/s |
| Mean velocity(reactor) | 1.48 m/s |
| Turbulence model | $\kappa - \epsilon$ model |
| Mesh type | Tetrahedron mesh |

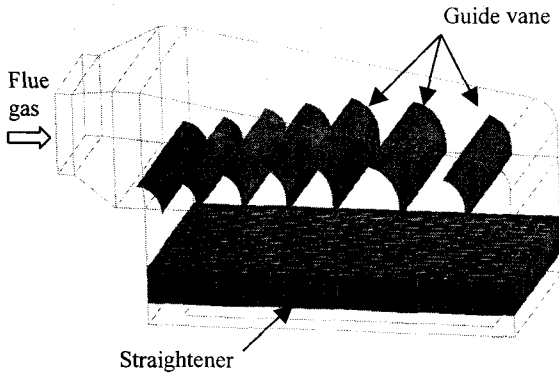


Fig. 3. Guide vane and Straightener

평균유속에 대한 속도편차를 나타내는 유동균일도 지표의 계산은 아래와 같다.

$$\text{velocity deviation}(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(v_i - v_{mean})^2}}{v_{mean}}$$

여기서, v_i 는 국부속도, v_{mean} 은 평균유속, 그리고 n 은 셀의 개수를 나타낸다.

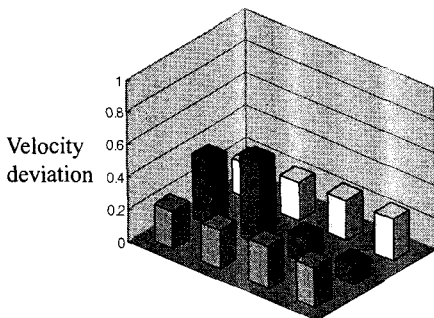


Fig. 4. Velocity deviation of cross sectional area.

해석결과를 살펴보면 유동분포가 균일하게 형성되어야 하는 촉매층 전단부분의 평균 속도편차는 0.25로 나타났으며, Fig. 4에서 단면의 각 부분별로 속도편차를 나타내었다. 속도편차분포는 배기가스 유입부쪽 중심부에서 다른 부분과 비교하여 비교적 크게 나타났다.

Fig. 5는 guide vane을 통과한 후 촉매전단층까지 반응기 중심부에서의 속도분포를 나타낸 그래프이다.

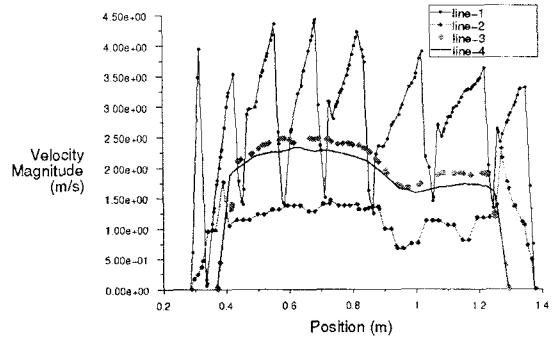


Fig. 5. Velocity distribution of center line on cross section area.

위 그래프에서 Line 1은 guide vane 통과 직후의 속도분포이고, Line 2는 straightener 통과 직후의 속도분포를 나타내고 있다. Guide vane을 통과한 후 불균일하던 유동이 straightener를 통과하면서 조금씩 균일화되는 경향을 보이면서 촉매 전단층(line 4)에서는 비교적 균일화된 유동분포를 보이고 있다. 이 부분에서의 속도분포는 단면의 평균속도인 1.48m/s 보다는 조금 높게 나타났으므로 다른 부분보다는 반응기의 중심부에서 비교적 많은 유동이 있다고 판단되지만 속도편차나 균일도를 고려해 볼 때 촉매의 활성화 및 내구성에 영향을 미치지 못할 것으로 판단된다.

Fig. 6은 반응기 내부의 속도벡터를 나타낸 수치해석 결과이다. Guide vane을 통과한 유동은 straightener를 통과하면서 유동방향이 촉매층에 유리한 입사각으로 유입되도록 형성이 되어지며 비교적 전면적에 걸쳐 균일한 유동분포를 나타내었다. Fig. 5와 6은, 5번째 guide vane과 6번째 guide vane 사이의 간격이 넓어 부분적으로 유동이 적어지는 지역이 형성되는 것을 볼 수 있었으나 앞의 속도분포 결과에서 살펴보았듯이 촉매에 영향을 미칠 정도는 아닌 것으로 판단된다.

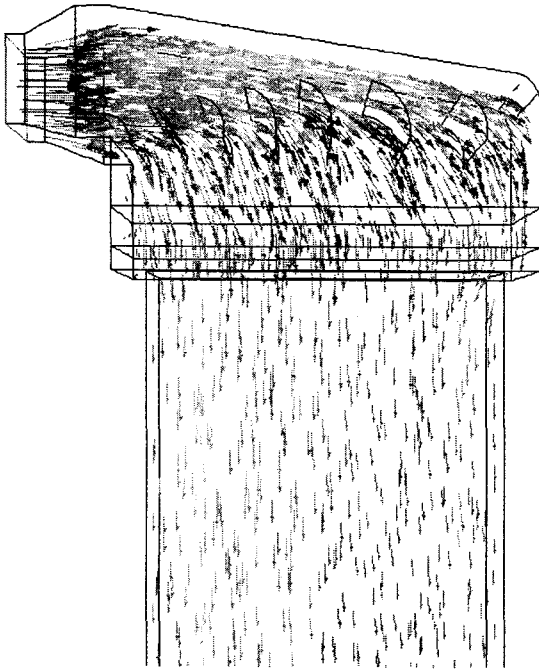


Fig. 6. Velocity vectors by velocity magnitude (m/s)

5. 결론

Pilot plant 는 다양한 조건별 성능실험 수행을 위하여 공간속도를 $3000\sim 36,000\text{hr}^{-1}$ 로 조절할 수 있도록 설계되었으며, 유속 $1.67\sim 6\text{m/s}$, 온도 $200\sim 500^\circ\text{C}$, 유량 $300\sim 1,000\text{Nm}^3/\text{hr}$, NH_3/NO 분사비 $0\sim 1.4:1$ 의 범위 조절이 가능하다. 상기와 같은 조건이 반영될 수 있도록 제작된 반응기 크기는 $450^{\text{L}}\times 900^{\text{W}}\times 8600^{\text{H}}\text{mm}$ 이며, 유동균일화를 위한 guide vane 및 flow straightner 가 설계되어졌다. 반응기는 ash hopper 및 soot blower 가 포함되어 있으며, 전 시스템의 운전기술정립 및 실시간 자료 획득을 위하여 자동제어시스템이 구축되어졌다. 촉매층은 총 4 단으로서 각 단은 module 이 1set 설치되어 있으며, 각 단의 단면적을 축소할 수 있도록 설계되어졌다. 각 module 은 $150^{\text{L}}\times 150^{\text{W}}\times 500^{\text{H}}\text{mm}$ 크기의 촉매가 3×6 열로 배열되어 있다.

본 pilot plant 는 설계기술확보 및 운전기술정립을 위해 제작되어졌으며, 촉매별 성능실험에 활용되어질 것이다. 또한 현 시스템상 coal firing 및 gas firing 이 가능하므로 다양한 조건 또는 부하변동에 따른 성능자료 도출이 가능할 것으로 판단된다.

- (1) J.Benitez, 1993, Process Engineering and Design for Air Pollution Control, PTR Prentice Hall, pp254-293.
- (2) R.P.Gaikwad, 2000, "Optimizing SCR Reactor Design for Future Operating Flexibility", ICAC Forum 2000 on Cutting NOx emissions, Session 6.
- (3) J.T.Elston, 1999, "Impacts of Selective Catalytic Reduction on Utility Sized Boiler System", 1999 Conference on Selective Catalytic and Non-Catalytic Reduction for NOx Control.
- (4) H.Gurberlet and B.Schallert, 1993, "Selective Catalytic Reduction of NOx from Coal Fired Power Plants", Catalysis Today, vol.16, pp. 207~236.
- (5) S.M.Cho and S.Z.Dubow, 1992, "Design of a Selective Catalytic Reduction System for NOx Abatement in a Coal-Fired Cogeneration Plant", Proceedings of the 5th Annual Meeting of the American Power Conference, vol. 78, no. 8, pp. 717~722.
- (6) H.Rabitsch, 2000, "Latest Developments and the State of the Art of Catalytic DeNOx Plants after 15 Years of Experience", Proceeding of ICIPEC, pp. 383~393.
- (7) EPA Final Report on Performance of Selective Catalytic Reduction on Coal-Fired Steam Generating Units, 1997.
- (8) 정수진, 김우승, 1998, "자동차 촉매변환기의 유동특성에 관한 실험 및 수치적 연구", STARCD User Conference.