

SCR Pilot Plant 성능실험 및 공정 설계

김정일*, 장인갑, 선철영

641-792 경남 창원시 귀곡동 555 두산중공업(주) 기술연구원 환경기술연구팀

(접수일자 : 2003. 5. 20 / 채택일자 : 2003. 6. 25)

Process Design and Performance Test of the SCR Pilot Plant

Jeong-Il Kim, In-Gab Chang, Chil-Yeong Seon, Kil-Ho Moon*
Environmental Technology Research Team, Doosan Heavy Industries,
555 Guygok-Dong, Changwon, Gyeongnam, Korea

요 약

화력발전소에서 배출되는 질소산화물 제어를 위한 선택적 촉매 환원 공정은 안정적이며 고효율 설계가 가능하여 범용적으로 사용되고 있는 기술이다. 선택적 촉매 환원 공정의 최적 설계를 위해서는 촉매 특성에 따른 설계기술이 정립되어야 하며, 다양한 조건에 대한 설계경험이 필요하다. 본 연구에서는 SCR 공정의 설계자료 도출을 위해 설계/제작된 1,000Nm³/hr급 SCR 파일럿 플랜트를 이용하여 반응온도, NH₃/NO 몰비, 공간속도, 선속도 및 압력손실 등의 설계변수에 대한 성능실험을 수행하고, 도출된 실험 결과를 통한 설계과정을 기술하였다.

주제어 : 선택적 촉매 환원, 질소산화물 제어, 성능실험, 최적 설계

ABSTRACT : The selective catalytic reduction (SCR) process is the most widely applied technology for the denitrification of coal-fired power plant flue gases due to its selectivity and high efficiency. In order to attain the optimum design of SCR process, it is required to consider various catalysis characteristics as well as various operating conditions. A systematic study to elucidate the effects of the design conditions (reaction temperature, NH₃/NO mole ratio, space velocity and linear velocity) on the reduction of NO_x using the SCR pilot plant with maximum flue gas flow rate of 1,000Nm³/hr was carried out and employed to identify the optimum design parameters. Design approaches of SCR process with test results were also presented.

keywords : Selective Catalytic Reduction, Denitrification, Performance Test, Optimum Design

1. 서론

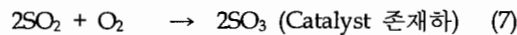
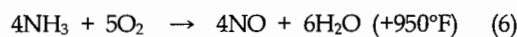
화석연료의 연소시 발생하는 질소산화물은 산성비, 광화학 스모그 및 오존층 파괴 등에 관여하는 주요 대기오염물질이다. 질소산화물이 환경오염에 미치는 심각성으로 인하여 세계 각국은 질소산화물의 배출량 규제치를 엄격하게 적용해 왔으며, 국내에서도 2005년을 기점으로 규제치가 강화될 예정이다. 이에 따라 신규 화력발전소를 비롯한 기존 발전소에서는 질소산화물 제어설비를 도입하고 있으며, 안정적이고 고효율 설계가 가능한 선택적 촉매 환원공정(Selective Catalytic Reduction, SCR)을 주로 채택하고 있다.

SCR 공정은 연소 배기가스에 환원제를 분사하여 질소산화물(NOx)을 무해한 질소 및 물로 전환시키는 기술로써 환원제로 암모니아를 사용하며 화학 반응식은 다음과 같다[1].



정상적인 화석연료 연소 시에는 식(1)의 반응이 우세하게 나타나며, SCR 반응공정의 부반응으로 산화반응 및 SO₃에 의한 황산암모늄염의 생성이 지적되고 있다[2].

산화반응



Sulfate & Bisulfate Reactions



SCR 공정에서의 촉매반응은 촉매표면의 흡착이론을 따르고 있으며, 제안된 반응메커니즘은 촉매표면에 암모니아만 흡착되어 반응이 진행되는 Eley-

Rideal type과 NO 및 암모니아 모두 흡착되어 반응이 진행되는 Langmuir-Hinshelwood type의 두 가지 유형으로 분류되어 진다. Topsoe 등[3,4]은 문헌조사 및 실험을 통해 Eley-Rideal type 흡착이론이 지배적임을 증명하였으며, Dumesic 등[5]은 다음의 3단계 반응메커니즘을 제안하였다.

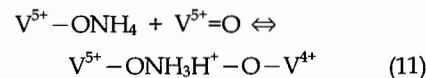
1st step : Adsorption of Ammonia

암모니아는 Brønsted acid site의 V-OH species에 흡착된다.



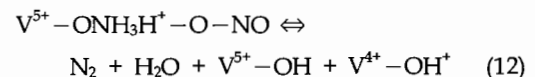
2nd step : Activation of the Adsorbed Ammonia

흡착된 암모니아는 NO와 반응하기 전에 V5+=O species에 의해 활성화된다. 이때 활성중간체가 생성(H원자의 이동)되면서 암모니아의 활성화과정에 참여하는 V5+=O site는 환원되어 진다.



3rd step : Reaction between the Activated Ammonia species and NO

배기가스 중의 NO는 촉매 표면의 활성화된 암모니아(NH⁺)와 반응하여 N₂, H₂O로 전환되며, Brønsted acid site의 V⁵⁺-OH species는 이 과정에서 재생성되어 진다.



상기의 반응메커니즘은 SCR 공정의 성능예측 및 설계를 위해 전산 수치해석에 사용되고 있으며, 이에 기초한 모델링 기법이 계속 발전되고 있다. 그러나 SCR 공정의 핵심인 촉매의 발전과 더불어 운전조건 및 설계조건 전체를 모델링에 반영하기 어려

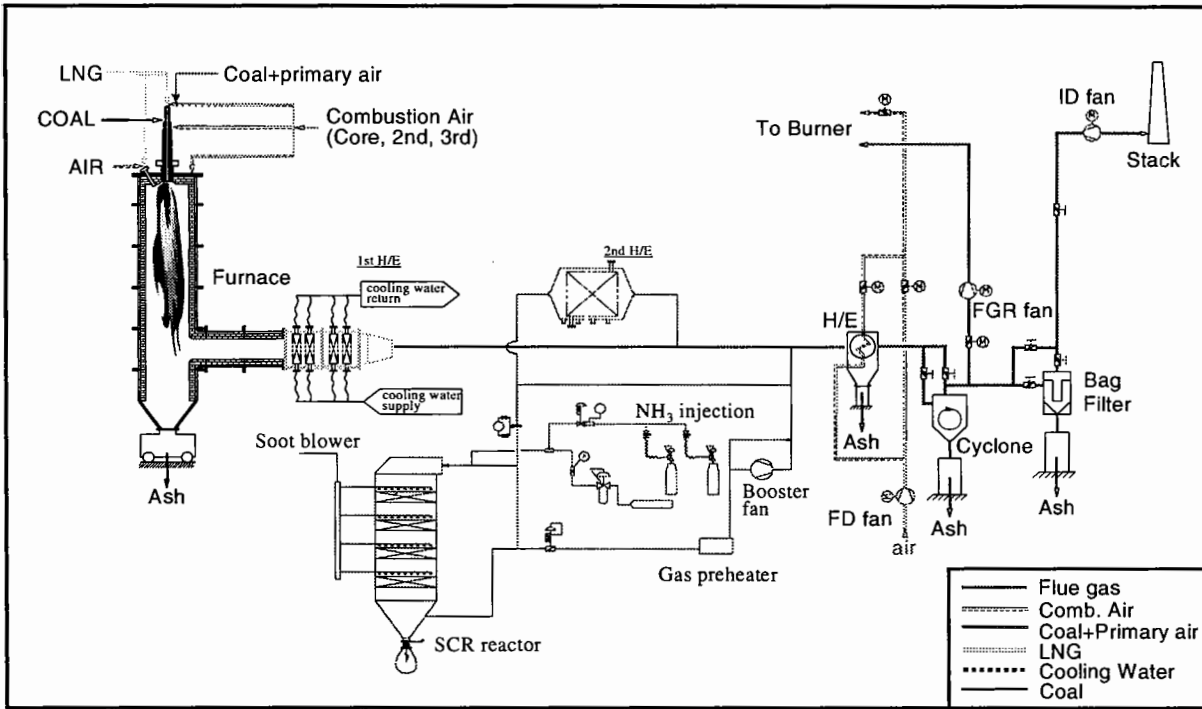


Fig. 1. Schematic diagram of SCR pilot plant.

우므로 실험적 방법에 의해 실제 설계자료를 확보하고 있다.

본 연구에서는 SCR 공정의 신뢰성 있는 설계자료 도출을 위해 1,000Nm³/hr급 SCR 파일럿 플랜트를 사용하여 반응온도, NH₃/NO 몰비, 공간속도, 선속도 및 압력손실 등의 설계변수에 대한 성능실험을 수행하고 도출된 실험결과를 토대로 SCR 공정의 설계과정을 기술하였다.

2. 실험방법

실험에 사용된 SCR 설비는 1,000Nm³/hr급 파일럿 플랜트로서 1 MWth급 실험연소로 후단에 설치되어 있으며, 설비 배치상 실제 석탄 화력발전소에 주로 적용되는 고분진형(high-dust type, 절탄기 후단)을 모사한 축소 모델이다(Fig. 1). 석탄 연소 배기가스는 절탄기(economizer) 역할을 하는 열교환기를 거쳐 SCR 반응기를 통과한 후 배기가스 예열기(air preheater)로 유입되며, 배기가스의 조성은 표 1과 같다.

배기가스의 온도는 1차 열교환기를 통과하면서 900℃에서 500℃로 냉각되고, 다시 2차 열교환기에서 반응기 유입온도가 200~500℃로 조절될 수 있도록 시스템을 구성하였다.

반응기는 다양한 조건별 성능실험 수행을 위하여 공간속도(space velocity, SV)를 3,000~36,000hr⁻¹로 조절할 수 있도록 설계되었으며, 유속 2~6m/s,

Table 1. Flue Gas Conditions.

Flue gas volume	1,000	m ³ /h (S.T.P. wet)
Flue gas temp.	200~500	℃
NO _x content	150~350	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	200	ppm
Dust content	<10	g/m ³ (S.T.P. wet)

온도 200~500℃, 유량 300~1,000Nm³/hr, NH₃/NO 몰비 0~1.4의 범위에서 조절 가능하게 하였다. 상기와 같은 조건이 반영될 수 있도록 제작된 반응기 크기는 450L × 900W × 8,600H(mm)이며, 유동 균일화를 위한 안내깃(guide vane) 및 정류기(flow straightener)가 설치되어 있다. 촉매층은 총 4단으로서 각 단은 촉매 모듈이 1set 설치되어 있으며, 각 단의 단면적을 축소할 수 있도록 설계되어졌다. 각 모듈은 150L × 150W × 500H(mm) 크기의 단위 촉매가 3×6열로 배열되어 있고, 반응기 내의 각 촉매층 상부에는 sootblowing을 위한 노즐을 설치하였다.

가스분석 및 데이터 획득 시스템은 NO분석기(TEL, Model 17C)를 반응기 전/후단에 설치하여 질소산화물의 농도분포를 실시간으로 감시할 수 있도록 하였으며, 그 외 O₂, CO, SO₂ 및 NH₃도 온라인화 하였다. 또한 가스성분 뿐만 아니라 온도 및 압력 데이터도 모니터링하여 석탄 화력발전소와 마찬가지로 실시간 운전자료 획득 및 부하변동에 따른 실험오차를 최소화하였으며, 유량조절 및 암모니아 주입량 조절을 위해 자동제어시스템을 구축하였다.

촉매는 고분진유에 적합한 물리/화학적 성상을 가진 상용 촉매를 사용하였다.

실험조건은 반응온도 300~450℃, NH₃/NO 몰비 0.6~1.2, 공간속도(Space Velocity) 2,800~7,500h⁻¹, 선속도(Linear Velocity) 0.58~2.33Nm/s로 변경시켜 NOx 제거 특성 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 촉매 전단면의 속도분포

촉매 전단면의 속도분포 균일도는 NOx 제거율과 촉매 수명에 영향을 미치는 중요한 인자로 반응기 설계시 필수 고려사항이다. 촉매 제조사별로 촉매의 성능에 영향을 미치지 않는 속도편차 허용한계를 설정하고 있으며, 통상 10~20%[6]을 적용하고 있다. 파일럿 플랜트의 속도 균일화를 위해 적용된 안내깃 및 정류기는 Fig. 2와 같으며, 전산유동해석의 범위는 안내깃과 정류기를 포함한 SCR 반응기 부분만을 고려하였고 촉매 층은 포함시키지 않았다. 해석에는 상용

유동해석 코드인 Fluent를 이용하였으며, 표 2에 반응기 유동해석에 사용된 경계조건을 나타내었다.

수치해석에 의한 균일도 지수는 91.812%로 나타났으며 평균유속에 대한 속도편차를 나타내는 유동균일도 지수는 다음과 같이 계산하였다.

$$\text{velocity deviation}(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{\sqrt{(U_i - U_{\text{mean}})^2}}{U_{\text{mean}}} \quad (13)$$

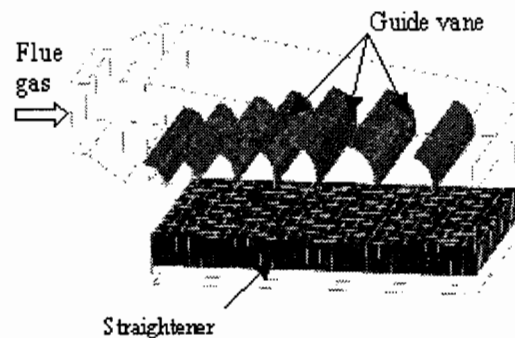


Fig. 2. Guide vane and flow straightner of SCR reactor.

Table 2. 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	κ-εmodel
Mesh type	Tetrahedron mesh

여기서, U_i 는 국부속도, U_{mean} 은 평균유속, 그리고 n 은 셀의 개수를 나타낸다.

3.2. NH₃/NO 몰비 및 촉매량 계산

환원제로 사용되는 암모니아는 식(1)에 나타난 바와 같이 산소 존재하에 NO와 1:1 반응을 한다. 따라서 암모니아 주입비는 요구되는 NO 제거율과 동

일하며 여유분을 추가 주입하게 된다. 여유분으로 추가 주입된 암모니아는 통상 미반응 암모니아(NH₃ slip)로 규정되며 SCR 후단 설비에 영향을 미치지 않는 범위에서 설정된다.

$$\text{NH}_3/\text{NO mole ratio} = \text{DeNO}_x \text{ rate} + \frac{\text{NH}_3 \text{ slip}}{\text{Inlet NO}_x}$$

촉매량 계산에 사용되는 설계인자로는 배기가스 량에 대한 촉매량의 비로 표현되는 공간속도(Space Velocity)이다. 공간속도는 암모니아 주입비와 NO_x 제거율의 상관그래프(Fig. 3)를 통해 도출될 수 있다.

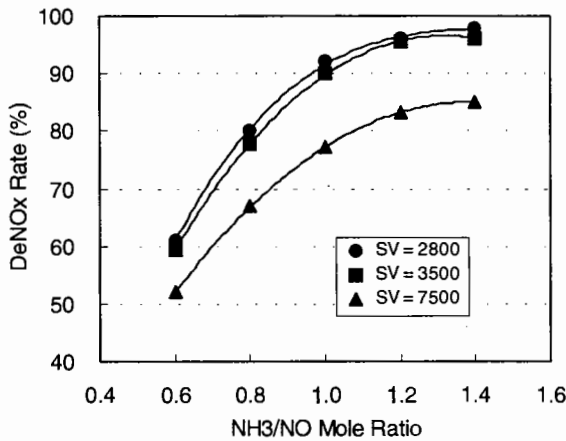


Fig. 3. Effect of NH₃/NO mole ratio on DeNO_x rate with various space velocity. (T = 350°C)

$$\text{Space Velocity (1/hr)} = \frac{\text{Flue gas flow rate (Nm}^3/\text{hr)}}{\text{Catalyst volume (m}^3\text{)}}$$

SCR 공정에서 탈질율과 암모니아 주입비는 선형적인 관계를 나타내지만 주위 여건에 의해 선형적인 증가가 둔화되는 부분이 발생한다[7]. 본 실험의 경우 대략 0.8의 암모니아 주입비에서 이러한 경향이 나타났으며, 0.8이상에서는 암모니아와 NO의 반응률이 감소하는 경향이 나타난다. 이러한 경향은 촉매의 특성에 따라 달라지며, 고효율 설계시는 촉매량, 암모니아 사용량 및 미반응 암모니아 등에 대한 전반적인 검토가 요구된다.

3.3. 온도에 의한 영향

SCR 공정의 적용 온도범위는 통상 300~400°C로서, 이 구간내에서 최적의 효율을 나타낸다. 고온에서는 식(6)의 NO 생성 반응에 의해 NO_x 제거율이 감소될 수 있으며, 촉매의 소결(sintering) 또는 결정화로 활성도가 저하된다. 저온의 경우는 암모늄염(ammonium bisulfate)의 응축에 의한 촉매 표면의 막힘(plugging)으로 활성도가 저하될 수 있다. Fig. 4는 본 실험에 사용된 촉매의 온도 영향을 나타내었다. 400°C까지는 온도가 증가할수록 NO_x 제거율이 증가하며, 400~450°C 범위에서 최고 효율을 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 온도에 의한 효율 특성

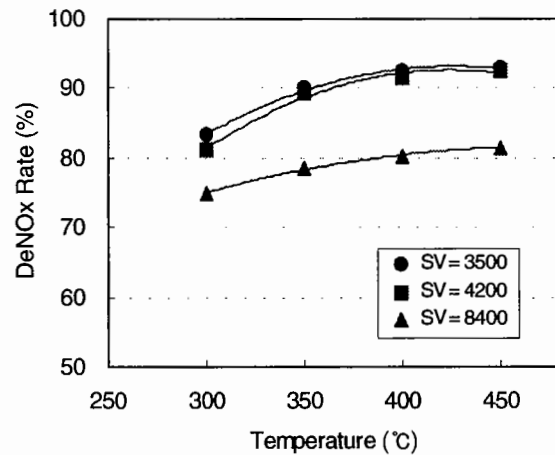


Fig. 4. Effect of reaction temperature on DeNO_x rate with various space velocity. (NH₃/NO = 1.0)

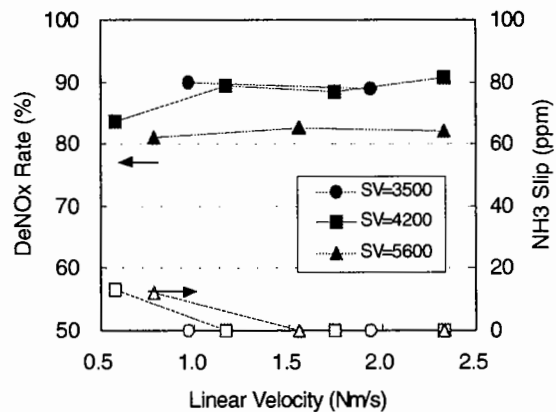


Fig. 5. Effect of linear velocity on DeNO_x rate with various space velocity. (NH₃/NO = 1.0, T = 350°C)

이 변하므로 실제 설계시는 온도 보정이 반영되어야 한다.

3.4. 선속도에 의한 영향

선속도는 배기가스량에 대한 반응기 단면적의 비로서 촉매 크기 및 반응기 sizing을 위한 중요 변수이며 다음과 같이 표현된다.

$$\text{Linear Velocity (Nm/s)} = \frac{\text{Flue gas flow rate (Nm}^3\text{/hr)}}{\text{Cross sectional area of reactor (m}^2\text{)}}$$

Fig. 5는 선속도에 따른 효율 및 미반응 암모니아의 관계를 나타낸다. NO_x 제거율은 선속도에 의한 영향이 크게 나타나지 않으나 낮은 범위의 선속도에서 미반응 암모니아가 높게 나타났다. 따라서 공간속도가 결정되면 미반응 암모니아를 줄이기 위해서는 최소 선속도 범위를 설정해야 한다. 본 촉매의 경우 5,600hr⁻¹이하의 공간속도에서 선속도 1Nm/s 적용시 10ppm의 미반응 암모니아가 발생하였으며, 설계 선속도는 최소 1.5Nm/s 이상으로 선정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

3.5. 활성도 감소율

촉매의 활성도를 나타내는 NO_x 제거율(η)은 다음 식(14)와 같이 공간속도(SV) 및 암모니아 주입비(m)에 의존한다[1].

$$\eta = m(1 - e^{-K/SV}) \quad (14)$$

여기서 m은 암모니아 주입비, K는 활성도 상수이다. 비례상수로 사용된 활성도 상수 K는 촉매 조성, 온도, 수분, 산소 등 촉매 활성에 영향을 미치는 인자들의 함수이다.

촉매의 활성은 운전시간이 증가할수록 비소(As) 및 알칼리 성분 등에 의한 촉매 피독, 촉매 공극 막힘(plugging) 및 소결(sintering)과 같은 요인에 의해 촉매의 활성도가 감소하며 활성도 감소율(K/K₀)로써

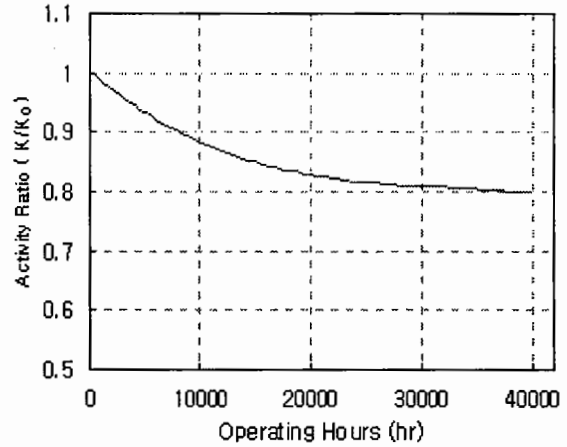


Fig. 6. Activity change of catalyst with operating hours.

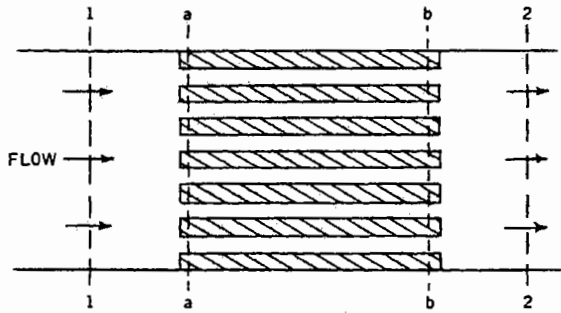


Fig. 7. Honeycomb catalyst model for pressure drop analysis used by Keys and London.[8]

표현된다. 보증이 요구되는 운전시간 내에서 시스템이 안정적으로 운전될 수 있기 위해서는 설계시 활성도 감소율이 반영되어야 한다. Fig. 6은 촉매제조사에서 제공한 자료로서 실험에 사용된 촉매의 활성도 감소율이다. 24,000hr 운전 후의 활성도 감소율은 대략 0.81정도로 나타났다.

3.6. 압력손실 특성

실제 SCR 공정 설계에 있어서 가장 먼저 고려해야 할 제한 조건 중의 하나로 반응기 설치에 따른 압력차를 생각할 수 있다. 반응기로부터 기인된 압력차가 연소공정에 미치는 영향이 지대한 것 알려진 사실이다. 반응기인 압력 손실은 다음의 요인에 의해 기인되는데, 유동이 반응기 내부로 유입됨에 따

라 촉매의 존재로 인해 자유 유동면적이 감소되어 이로 인한 유속의 증가가 입구 압력손실을 발생시키고, 유동이 반응셀 내부로 진행됨에 따라 점성 마찰로 인한 압력손실, 그리고 출구에서 단면의 급확대로 인해 압력차가 발생하게 된다.

이러한 허니컴 반응기 내에서 완전 발달된 비압축성 유체가 정상상태 흐름을 가지는 경우, 반응기의 압력차를 가장 잘 표현하는 것으로 알려진 식(15)가 Kays와 London[8]에 의해 유도되었으며 계산에 사용된 모델은 Fig. 7과 같다.

$$\Delta P = \frac{G^2 v_1}{2} \left[(K_c + 1 - \sigma^2) + 2 \left(\frac{v_2}{v_1} - 1 \right) + f \frac{A}{A_c} \frac{v_m}{v_1} - (1 - \sigma^2 - K_e) \frac{v_2}{v_1} \right] \quad (15)$$

여기서 G는 유동의 질량유속(kg/m²s), v는 비체적(m³/kg), A는 총 물질전달면적(m²), A_c는 최소자유유동면적(m²), K_c는 촉매 입구에서 축소에 따른 손실계수, K_e는 촉매 출구에서 확대에 따른 손실계수, f는 평균마찰계수, σ는 자유유동의 면적비이다. 등온 조건에서는 v₁ = v₂ = v_m = v이므로 다음과 같이 간소화된다.

$$\Delta P = \frac{G^2 v}{2} \left[f \frac{A}{A_c} + K_c + K_e \right] \quad (16)$$

본 연구에서는 온도와 공간속도 등의 다양한 실험범위에 대하여 배기가스 유량이 1,000Nm³/hr인 파일럿 플랜트의 성능실험을 통해 도출된 실험결과와 계산결과를 비교하였으며, 선속도에 따른 압력손실 추이를 Fig. 8에 나타내었다. 촉매에 의한 반응기 압력손실은 실제 실험값이 이론 계산값에 비해 대략 30% 정도 높게 나타나고 있으며, 이는 촉매층 단면에서의 가스조성, 불균일한 유동 및 온도 분포 등을 완전히 고려하지 못한 결과로 보여진다.

SCR 공정에서 선속도에 대한 영향은 압력손실 뿐만 아니라 저속에 따른 촉매표면의 입자 침적 가능성과 고속에 따른 촉매의 침식(erosion) 문제를 동

시에 고려해야 한다. 또한 압력손실의 경우 시스템 설치 비용과 직결되므로 압력손실의 비용 측면을 고려한다면 가급적 선속도가 낮게 설정되어야 하나, 탈질 및 NH₃ slip 등 촉매 활성도와와의 관계가 반영되어야 한다. 따라서 시스템 설계시는 비용과 성능의 관계를 고려해서 촉매의 특성에 따라 적절한 범위의 선속도를 설정하는 것이 효율적일 것으로 판단된다.

Fig. 9는 실제 조건과 유사한 파일럿 플랜트 실험을 통해 공간속도 및 선속도별 압력손실 결과를 나타낸 것으로서 설계시 압력손실을 예측하기 위한 자료로 활용된다. 선속도가 낮은 경우는 공간속도에 의한 압력손실 차가 크지 않으나 선속도가 증가할수

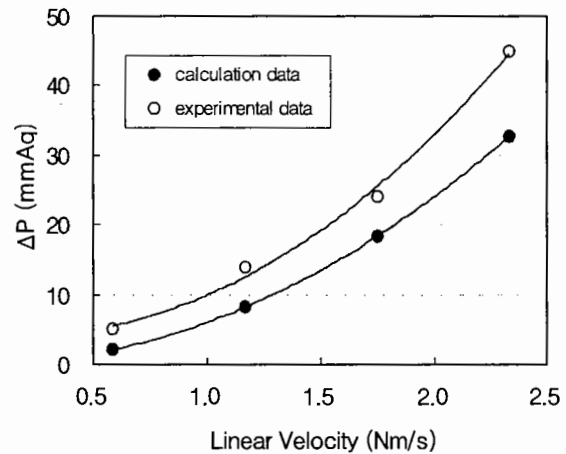


Fig. 8. Pressure Drop vs. Linear Velocity. (T=350°C, SV = 4,200 hr⁻¹)

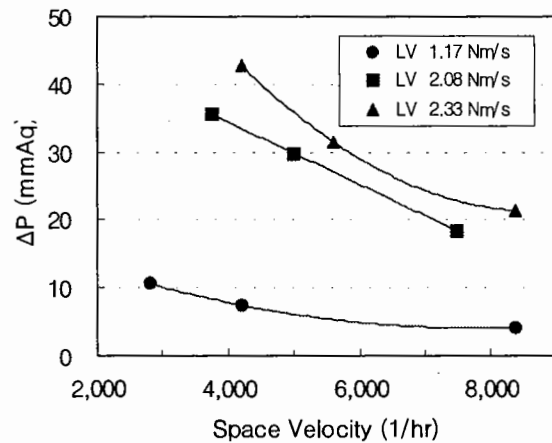


Fig. 9. Effect of space velocity on pressure drop with various linear velocity. (T = 350°C)

록 공간속도에 의한 압력손실 영향은 커짐을 알 수 있다.

4. 결 론

SCR 공정의 성능예측 및 설계를 위해 전산 수치 해석에 기초한 모델링 기법이 계속 발전되어 왔으나 촉매 특성, 운전조건 및 설계조건 전체를 모델링에 반영하기 어려우므로 실험적 방법에 의해 실제 설계자료를 확보하고 있다. 본 연구에서는 $1,000\text{Nm}^3/\text{hr}$ 급 파일럿 플랜트를 이용하여 연소공정에서 배출되는 질소산화물 제거를 위한 SCR 공정의 설계자료를 도출하고, 이를 토대로 설계과정 및 설계인자의 영향을 기술하고자 하였다

- (1) 촉매 전단면의 속도분포 균일도를 보장하기 위해 반응기에 안내깃 및 정류기를 설치하였으며, 수치 해석 결과 91.812%의 유동 균일도를 나타내었다.
- (2) 암모니아 주입비와 NOx 제거율은 선형적인 관계를 보이지만 암모니아 주입비가 일정 이상이 되면 암모니아와 NO의 반응률이 감소하는 경향이 나타난다. 이러한 현상은 촉매의 특성에 따라 달라지며, 본 연구에 사용된 촉매의 경우 암모니아 주입비 0.8에서 발생한다.
- (3) SCR 공정의 적용 온도범위는 일반적으로 300~400℃이다. 그러나 실험에 사용된 촉매의 경우 400℃까지는 온도가 증가할수록 NOx 제거율이 증가했으며, 400~450℃ 범위에서 최고 효율을 나타내었다.
- (4) NOx 제거율은 선속도에 의한 영향이 크게 나타나지 않았으나 낮은 범위의 선속도에서 미반응 암모니아가 높게 나타났다. 본 촉매의 경우 5600hr^{-1} 이하의 공간속도에서 선속도 $1\text{Nm}^3/\text{s}$ 적용시 10 ppm의 미반응 암모니아 발생되었다.
- (5) 요구되는 운전시간 내에서 시스템의 안정성을 보장하기 위해서는 촉매량 설계시 활성화도 감소율이 반영되어야 한다. 실험에 사용된 촉매의 활성화도 감소율은 24,000hr 운전시 대략 0.81정도이다.
- (6) 압력손실을 예측하기 위해서 실제 조건과 유사한 파일럿 플랜트 실험을 통해 공간속도 및 선속도별

압력손실 결과 그래프를 도출하였다. 이론적 계산치와 실험치를 비교한 결과 실험치가 대략 30% 정도 높게 나타났다. 이것은 촉매층 단면에서의 가스조성, 불균일한 유동 및 온도 분포 등을 완전히 고려하지 못한 결과로 보여진다.

참고문헌

1. Cho, S.M. and Dubow, S.Z. : Proceedings of the 5th Annual Meeting of the American Power Conference, 78(8), 717(1992).
2. Elston, J.T. and Frankling, H.N. : 1999 Conference on SCR/SNCR for NOx Control, NETL(1999).
3. Topsoe, N.Y., Dumesic, J.A. and Topsoe, H. : Journal of Catalysis, 151, 226(1995).
4. Topsoe, N.Y., Topsoe, H. and Dumesic, J.A. : Journal of Catalysis, 151, 241(1995).
5. Dumesic, J.A., Topsoe, N.Y., Slabiak, T., Morsing, P., Clausen, B.S., Tornqvist, E. and Topsoe, H. : New Frontiers in Catalysis, Elsevier Science, Amsterdam (1993).
6. Rogers, K., Albrecht, M. and Varner, M. : ICAC Forum 2000 on Cutting NOx Emissions, ICAC (2000).
7. Svachula, J., Ferlazzo, N., Forzatti, P., Tronconi, E. and Bregani, F. : Ind.Eng.Chem.Res, 32, 1053 (1993).
8. Kays, W.M. and London, W.M. : "Compact Heat Exchangers" 3rd edn, McGraw-Hill, pp.35~38 (1984).
9. Benitez, J. : "Process Engineering and Design for Air Pollution Control", PTR Prentice Hall, pp. 254~293 (1993).
10. Gurberlet, H. and Schallert, B. : Catalysis Today, 16, 207(1993).
11. Levenspiel, O. : "Chemical Reaction Engineering" 2nd edn, John Wiley & Sons, New York, pp. 460~536 (1972).
12. Rodui, B., Wokaun, A. and Baiker, A. : Ind.

- Eng. Chem. Res., 37, 457(1998).
13. Gaikwad, R.P. : ICAC Forum 2000 on Cutting NOx Emissions, ICAC(2000).
14. 문승현 : J. of KSEE, 21(2), 399(1999).
15. 이정빈, 이인영, 김동화, 엄희문, 지평삼 : J. of KSEE, 21(8), 1505(1999).