

배연탈질 SCR 반응기내 유동균일화를 위한 축소모형실험 및 전산해석

Reduced Scale Model Experiments and Numerical Simulation for Flow Uniformity in de-NOx SCR Reactor

이인영* · 김동화 · 이정빈 · 류경옥¹⁾

한국전력공사 전력연구원, ¹⁾한양대학교 공과대학 화학공학과

(2001년 5월 16일 접수, 2001년 8월 14일 채택)

In-Young Lee*, Dong-Wha Kim, Jung-Bin Lee and Kyong-Ok Yoo¹⁾

Korea Electric Power Research Institute, Korea Electric Power Corporation

¹⁾Dept. of Chemical Engineering, College of Engineering, Hanyang University

(Received 16 May 2001; accepted 14 August 2001)

Abstract

SCR (Selective Catalytic Reduction) process is presently considered as one of the most effective techniques for removing nitric oxides from exhaust gases. In this study, based on the conceptually designed SCR reactor of 500 MW coal fired power plant, a reduced scale (1/20) SCR reactor model was made to analyze the flow pattern in front of catalyst layer according to the guide vane's design factors such as the number, interval, and angle of vanes. The results of the test were compared to those of numerical simulation in order to assure the reliability of two methods. On the basis of our study, the critical Reynolds number (2.0×10^5) was proposed for ensuring the similarity between the reduced scale model and the prototype of SCR reactor. Optimum design parameters of guide vanes were determined as follows, 4 vanes, the first vane angle of 93° , and the vane intervals of 0.85 S/n, 1.05 S/n, 1.1 S/n, 1.0 S/n, 1.0 S/n (S: the distance of duct, n: the number of guide vanes). The excellent agreement between the results of the numerical simulation and the reduced scale model provides the validation of two methods for prediction of flow through SCR reactor.

Key words : SCR, NOx, reduced scale model, numerical simulation, flow uniformity

1. 서 론

발전소 보일러와 같이 고정원에서 배출되는 질소

산화물(NOx)을 제거하기 위한 기술 중, 선택적촉매 환원법(SCR: Selective Catalytic Reduction)은 배기 가스 중에 포함되어 있는 질소산화물을 암모니아와 촉매상에서 반응시켜 무해한 질소와 물로 전환하는 기술로 높은 탈질율과 안정화된 방법으로 상업적으로 널리 이용되고 있다(Bosch and Janssen, 1988).

* Corresponding author

Tel : +82-(0)42-865-5489, E-mail : iylee@kepri.re.kr

우수한 촉매가 확보되었을 경우, SCR 촉매반응기의 성능은 촉매층으로 유입되는 유동의 균일도에 따라 좌우된다. SCR 설비에서 촉매의 성능을 보장하기 위하여 촉매제조사들은 촉매전단에서의 속도 분포, 유동의 입사각, 온도편차, 암모니아 농도 분포에 대한 제한을 두고 있다. 유동이나 암모니아의 분포가 균일하지 않을 경우, 촉매층에서 편류가 발생하여 특정부위의 촉매만이 사용되게 되고 이로 인하여 촉매의 사용주기가 짧아지는 현상이 발생할 뿐 아니라 미반응한 암모니아(ammonia slip)가 누설되는 등 많은 문제가 발생하게 된다(Gutberlet and Schallert, 1993). 그러므로 촉매층 전단에서의 유동균일화를 보장하기 위하여서는 가이드 베인과 같은 유로변경장치의 설치는 필수적이다. 최근 전산 유체해석(CFD: Computational Fluid Dynamics)으로 알려진 수치해석기법과 컴퓨터의 발달로 인하여 경제적인 방법으로 반응기내에서의 유동현상을 예측하고 그에 따른 설계가 가능하게 되었으나 수치 해석적인 방법만으로는 신뢰성 있고 정확한 설계자료를 얻을 수 없다. 특히, SCR 반응기에서는 수치해석의 검증적 측면과 보완적 측면에서 모형시험을 통한 유동해석이 필연적으로 요구된다(류창국 등, 1999; Sayre and Milobowski, 1999).

본 연구에서는 국내 500 MW급 유연탄 화력발전소를 기준으로 개념 설계된 SCR 반응기를 대상으로, 반응기내에서 균일한 유동을 갖는 설계자료 확보와 설계자료의 신뢰성을 확보하기 위하여 상용 전산유체 코드인 Fluent와 1/20 크기의 축소모형장치를 이용하여 반응기내에서의 유동특성을 시험하였다.

2. 실험방법

2.1 설계대상 SCR 반응기

전산해석과 축소모형시험의 대상 SCR 반응기는 국내 500 MW급 유연탄 화력발전소를 기준으로 고분진용(high dust system)으로 설계되었으므로 발전소보일러의 절탄기(economizer)와 공기에열기(air preheater)사이에 장착된다. 대상 반응기는 이전 연구에서 개발된 촉매(이정빈 등, 1999)를 이용한 파일럿 시험결과(이인영 등, 2000; Choo *et al.*, 2000; 이정빈 등, 1999)와 SCR 반응기의 설계조건(표 1)

Table 1. SCR reactor design criteria.

| | |
|-----------------------|---|
| Catalyst | V ₂ O ₅ /TiO ₂ |
| Efficiency | above 80% |
| Space velocity | 4,000/hr |
| Linear velocity | under 6 m/sec |
| Catalyst life | 3 year |
| Reactor configuration | 3 catalyst layers |
| Pressure drop | under 10 cmH ₂ O |

을 기준으로 하여 설계된 폭 16.6×너비 12.0×높이 30.0m 크기의 반응기이다.

2.2 축소모형

축소모형이 원형의 유동을 정확히 모사하기 위해서는 원형과 모형 사이의 상사성(similitude)을 보장할 수 있어야 한다. 이와 같은 상사성을 충족시키기 위한 조건으로는 첫째, 모사대상의 형태에 대한 기하학적 상사 뿐만이 아니라 둘째, 유동의 동력학적 상사 조건을 만족할 수 있어야 한다(White, 1989). 본 연구에서는 모형의 기하학적 상사를 위하여 1/20 크기로 원형을 축소하여 반응기 각 부분의 구조를 충분히 대표할 수 있도록 하였으며 반응기에서 유동의 상태가 점성력에 지배되므로 마찰력에 대한 관성력의 상대적인 중요도를 나타내는 Reynolds 수를 이용하여 모형을 동력학적으로 상사하였다. 그러나 난류 유동을 모델링할 경우, 일정값 이상의 강한 난류영역에서는 동력학적 상사관계를 유지할 수 있으므로 Reynolds 수를 일정값 이상으로 유지한 상태에서 원형을 상사하고 있다. SCR 반응기를 모사할 경우, Siemens사(Hauenstein *et al.*, 1995)는 $Re = 2.0 \times 10^5$ 에서 KWH사(Frings and Immich, 1991)의 경우는 $Re = 1.8 \times 10^5$ 이상의 영역에서 반응기를 동력학적으로 충분히 모사할 수 있다고 제안하였다. 본 연구에서는 유량의 용량을 가변적으로 운전할 수 있는 송풍기(fan)를 이용하여 유동의 양상이 변하지 않는 임계 Reynolds 수를 찾아 반응기를 동력학적으로 상사하였다.

제작된 축소모형(그림 1)은 830×600×1,500 mm 크기로 투명 아크릴판(두께: 10 mm)을 이용하여 제작하였으며 송풍기는 700~7,000 Nm³까지 가변적으로 운전할 수 있는 송풍기를 사용하였다. 촉매층은 벌집형(honeycomb) 세라믹을 이용하여 모사하였으며 가이드 베인은 설계변수 별로(표 2) 모듈로

Table 2. Design factor of guide vanes for flow uniformity in SCR reactor.

| Case | The number of vanes (n) | Interval of vanes $a_i (S = \sqrt{b_0^2 + b_i^2})$ | Angle of vanes (θ_i) |
|---------|-------------------------|--|-------------------------------|
| Case 1 | 0 | - | - |
| Case 2 | 3 | $4 \times 1.0 S/n$ | 90, 90, 90 |
| Case 3 | 4 | $5 \times 1.0 S/n$ | 90, 90, 90, 90 |
| Case 4 | 5 | $6 \times 1.0 S/n$ | 90, 90, 90, 90, 90 |
| Case 5 | 7 | $8 \times 1.0 S/n$ | 90, 90, 90, 90, 90, 90, 90 |
| Case 6 | 4 | 0.90 S/n, 1.10 S/n, S/n, S/n, S/n | 90, 90, 90, 90 |
| Case 7 | 4 | 0.85 S/n, 1.15 S/n, S/n, S/n, S/n | 90, 90, 90, 90 |
| Case 8 | 4 | 0.85 S/n, 1.05 S/n, 1.1 S/n, S/n, S/n | 90, 90, 90, 90 |
| Case 9 | 4 | 0.85 S/n, 1.05 S/n, 1.1 S/n, S/n, S/n | 91, 90, 90, 90 |
| Case 10 | 4 | 0.85 S/n, 1.05 S/n, 1.1 S/n, S/n, S/n | 93, 90, 90, 90 |
| Case 11 | 4 | 0.85 S/n, 1.05 S/n, 1.1 S/n, S/n, S/n | 95, 90, 90, 90 |

Table 3. Flow condition of prototype and reduced scale model.

| | Prototype | Model (1/20) |
|--------------------------------|------------------------|---------------------|
| Flow rate (m ³ /hr) | 3,700,000 | 5,700 |
| Density (kg/m ³) | 0.552 | 1.158 |
| Viscosity (Pa.s) | 4.314 | 1.837 |
| Temperature (°C) | 350 | 25 |
| Reactor size (m ³) | 16.6 × 12.0 × 30.0 | 0.83 × 0.6 × 1.5 |
| Velocity in duct (m) | 18.0 | 11.1 |
| Reynolds number | 1.37 × 10 ⁶ | 2 × 10 ⁵ |

제작하여 반응기에 장착할 수 있도록 하였다. 설계 변수에 따른 유속분포를 측정하기 위하여 촉매층 전단에 8 × 10개의 측정점을 설치하여 Thermo Anemometer (APM360, ALNOR Co)를 이용하여 측정하였다. 표 3에 대상반응기와 제작된 축소모형간의 상사관계를 나타내었다.

2.3 전산해석

전산해석은 축소모형에서와 같이 2.1의 대상 반응기를 기준으로 가이드 베인의 설계변수에 따른 촉매층 전단에서의 유동특성을 상용 유동장 전산해석 코드인 FLUENT (ver 4.4)를 이용하여 3차원 해석하였다.

유동장 해석을 위한 계산에 사용된 지배 방정식을 텐서 형식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial (\rho u_i \phi)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi \tag{1}$$

위 식에서 ϕ 는 해석하고자 하는 종속 변수로서

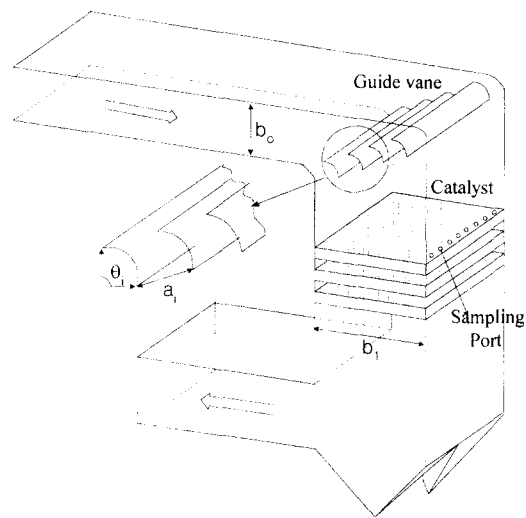


Fig. 1. Schematic diagram of reduced scale model.

각 방향의 속도성분 (u, v, w), 난류운동에너지 (k) 및 난류 운동에너지 소산율 (ϵ)을, 그리고 ρ 와 Γ_ϕ 는 밀도와 확산계수를 각각 나타낸다. 본 전산해석에서는 이상의 식의 해를 구하기 위한 난류모델로서 표준 k- ϵ 모델을 사용하였다. 격자계의 형태는 3차원 (105 × 100 × 30) 정렬격자계를 사용하였으며, 가이드 베인 부분에서 격자의 찌그러짐을 방지하고 가이드 베인들 사이에서 정렬격자계를 사용하기 위하여 앞 뒷면의 격자수가 다른 다중블럭의 격자계를 사용하였다. 촉매층 모사를 위하여 porous media 모델 중 perforated plate 모델을 적용하였다.

2.4 유동 균일도 평가

축매제조회사에서 축매의 성능을 보장하기 위한 축매층 전단에서의 유동조건은 제조사별로 다양하다. Siemens사의 경우 축매층 전단에서 속도편차가 $\pm 15\%$ 이상이 되는 영역 ($A_{\pm 15\%}$)이 전체 단면적 (A_{total})의 10% 이하가 되어야 한다는 조건을 필요로 한다 (Hauenstein *et al.*, 1995).

$$R_{\pm 15\%} = \frac{A_{\pm 15\%}}{A_{total}} \times 100 (\%) \quad (2)$$

KWH사의 경우 표준편차를 이용한 σ 값이 0.15 이하가 되는 조건을 요구한다 (Frings and Immich, 1991).

$$\sigma = \frac{1}{V_{avg}} \sqrt{\frac{\sum (V - V_{avg})^2}{(N-1)}} \quad (3)$$

여기서, V 는 측정점에서의 유속, V_{avg} 는 평균유속, N 은 측정점의 수이다.

축소모형 실험에서는 축매층 전단에서 측정된 유속 측정값들에 대한 σ 값을 이용하여 유동 균일도를

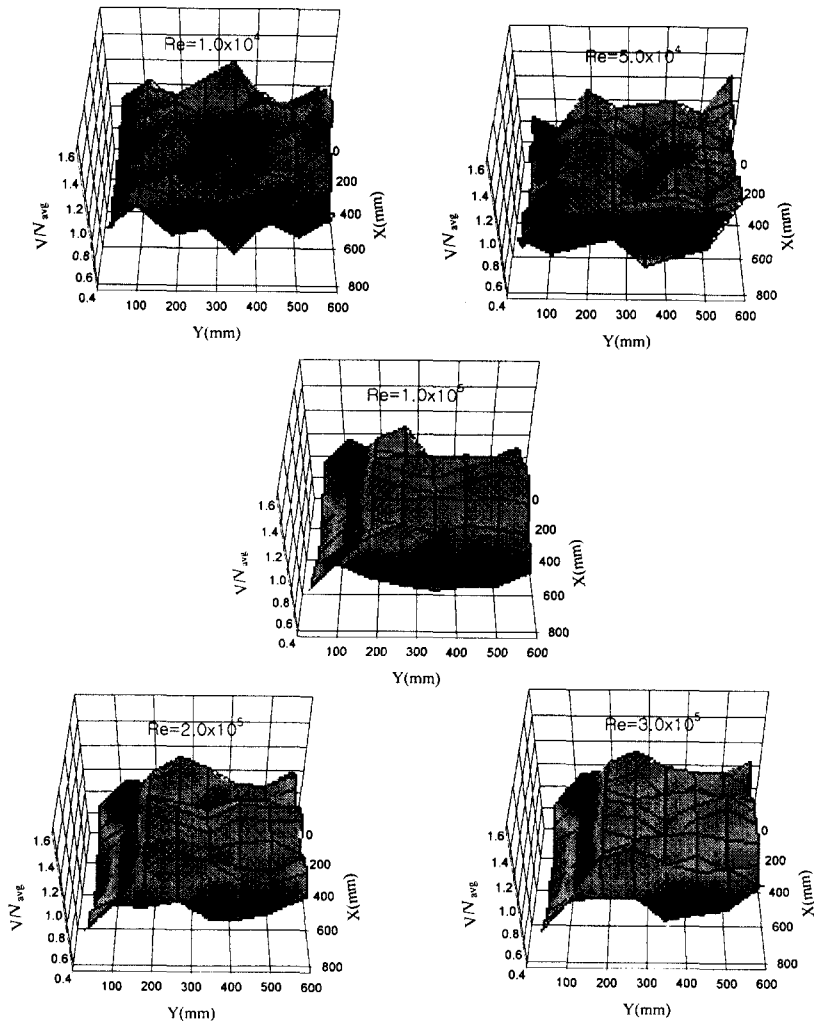


Fig. 2. Flow pattern in reduced scale model (Case 2) according to Re number.

평가하였으며 전산해석에서는 속도편차를 벗어난 영역을 나타내는 $R_{\pm 15\%}$ 값을 이용하여 유동의 균일도를 비교, 평가하여 SCR 촉매반응기에서 요구되는 유동조건을 만족하는 반응기 설계를 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 상사성의 검증

축소모형실험에서 Reynolds 수를 이용한 상사조건이 실험결과에 미치는 영향을 알아보기 위하여 가이드 베인 수 3개, 등 간격, 깃 각도 90°의 설계조건 (Case 2)에서 Reynolds 수를 증가시키며 촉매층 전단에서 유동의 양상과 속도편차의 변화를 알아보았다. 그림 2에서 알 수 있듯이 촉매층 전단에서의 유동의 양상은 Reynolds 수의 증가에 따라 다소 다른 유동 양상을 보이다가 Reynolds 수 2×10^5 이상의 영역에서는 거의 유사한 형태의 유속분포를 보여주는 것을 알 수 있다.

그리고 Reynolds 수의 증가에 따른 유동 균일도를 나타내는 그림 3 역시 2×10^5 이상에서는 거의 유사한 결과 값 ($\sigma=0.2$)을 보이는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 장치를 이용한 실험시 Reynolds 수를 Siemens사 (Hauenstein *et al.*, 1995)가 제안한 2×10^5 과 KWH사 (Frings and Immich, 1991)가 제안한 1.8×10^5 의 실험영역과 유사한 2×10^5 의 영역에서 충분히 발달된 난류를 얻을 수 있었으므로 이후 실험에서는 이 값을 기준으로 실험을 실시하였다.

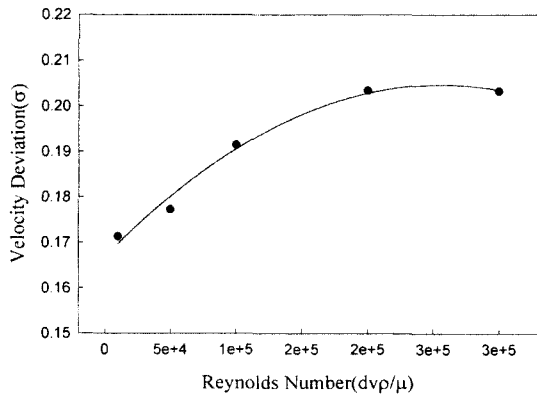


Fig. 3. Velocity deviation in reduced scale model (Case 2) according to Reynolds number.

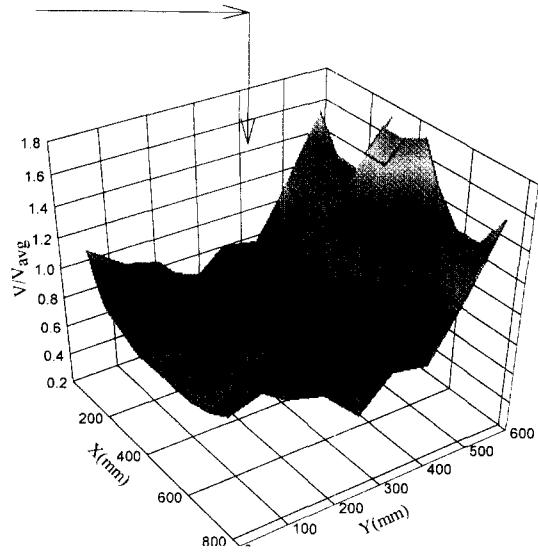


Fig. 4. Flow pattern in reduced scale model without guide vane (case 1).

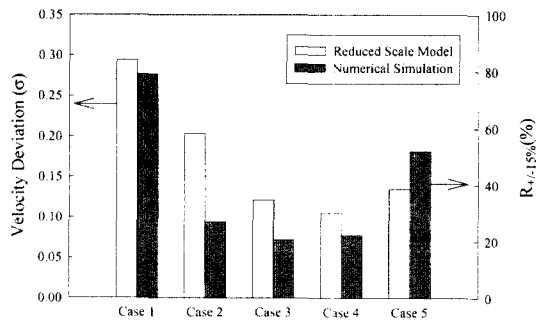


Fig. 5. Velocity deviation in SCR reactor according to the number of guide vanes.

3.2 가이드 베인이 없을 경우 속도분포

가이드 베인이 없는 경우 (Case 1) SCR 반응기로 유입되는 유체가 90°의 곡관을 지나 촉매와 접촉하게 되므로 그림 4와 같이 관성력에 의해 바깥쪽으로 집중되게 되고 유동의 안쪽과 바깥쪽의 압력차로 인한 이차 유동이 발생하게 되어 주 유동 방향으로의 속도 분포가 고르지 못하게 되는 것을 볼 수 있다. 이때 축소모형 실험 (그림 5)에 의한 σ 값은 0.294이고 전산해석에 의한 $R_{\pm 15\%}$ 값은 79.0%로 SCR 반응기에서 요구되는 유동조건을 크게 벗어난

다. 그러므로 이와 같은 불균일한 유속분포를 해결하기 위한 가이드베인의 개수 간격 각도 등 설계변수를 조정하여 유속분포를 개선하였다.

3.3 가이드 베인의 개수에 따른 속도분포

유속 분포를 개선하기 위한 가이드 베인 설계에 있어서 가장 먼저 결정되어야 할 사항은 가이드 베인의 개수이므로 가이드 베인이 없는 경우와 3개, 4개, 5개, 7개인 경우(Case 1~Case 5)에 대하여 모형시험과 전산해석 결과를 비교, 분석하였다. 이때 가이드 베인의 간격은 등 간격이고 각도는 90°이다. 모형실험 결과, 그림 5에서 알 수 있듯이 가이드 베인 수를 5개까지 증가시킬수록 속도편차는 $\sigma = 0.294$ 에서 $\sigma = 0.105$ 까지 줄어드는 것을 알 수 있다. 그러나 베인 수 7개인 Case 5에서 속도편차가 $\sigma = 0.135$ 로 증가하는 결과를 보여 주었는데 이는 좁은 갭간의 유로에 의해 2차 유동의 영향이 증대되어 생긴 것으로 판단된다.

전산해석 결과에서도 베인수를 증가할 수록 속도편차는 줄어들었으며 베인수 4개(Case 3)와 5개(Case 4)에서 각각 $R_{\pm 15\%}$ 는 21%와 22%의 유사한 결과값을 보였으며 베인수 7개(Case 5)에서 $R_{\pm 15\%}$ 는 52%로 증가하는 결과를 보여 축소모형과 일치하는 결과를 보였다. 베인 수 4개일 때와 5개일 때 좋은 결과를 보였으므로 그 중에서 작은 수인 4개를 가이드 베인의 개수로 정하였다.

그러나, 가이드 베인의 간격을 등간격으로 한 Case 3의 경우의 속도분포(그림 6)에서 알 수 있듯이 설계조건을 벗어난 대부분의 영역이 반응기 내벽의 재순환 영역이므로 가이드 베인의 간격 조정을 통하여 이 영역의 속도분포가 개선될 것으로 예측된다.

3.4 가이드 베인의 간격에 따른 속도분포

가이드 베인의 간격 조정을 통한 모형실험 결과, 그림 7에서와 같이 등간격으로 한 경우보다 첫 번째 가이드 베인을 내벽으로 0.1 S/n 만큼 이동시킨 경우(Case 6), 속도편차가 $\sigma = 0.121$ 에서 $\sigma = 0.112$ 로 상당히 줄어든 것을 알 수 있다. 그러나 첫 번째 가이드 베인을 Case 6보다 0.05 S/n 만큼 더 내벽쪽으로 이동시킨 경우(Case 7)는 Case 6에서 보다 속도편차 심한 결과를 보였다. 그러므로 첫 번째 베인을 등간

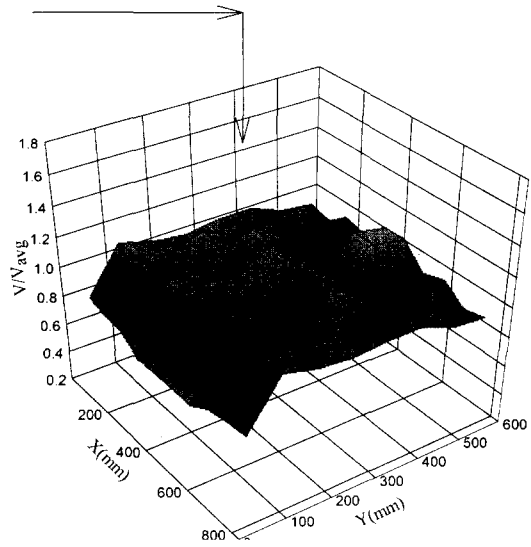


Fig. 6. Flow pattern in reduced scale model with 4 guide vanes (case 3).

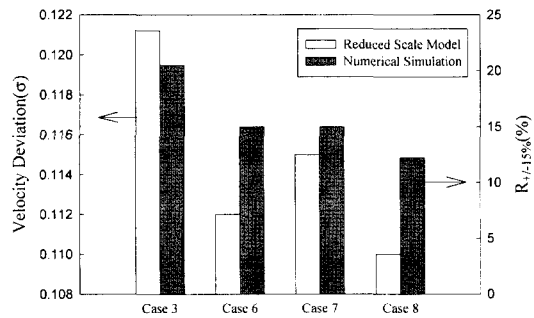


Fig. 7. Velocity deviation in SCR reactor according to distance of guide vanes.

격에서 0.15 S/n만큼 이동하고 두 번째 베인을 각 0.1 S/n 만큼 이동시켜(Case 8) 시험한 결과, 가장 우수한 속도 분포를($\sigma = 0.111$) 보였다. 전산유체 해석 결과(그림 8) 역시 축소모형시험과 같이 Case 8에서 가장 좋은 결과($R_{\pm 15\%} = 12.1\%$)를 보였다.

이상의 갭 간격 개선을 통하여 SCR 반응기에서의 유동상태를 개선시킬 수 있었으나 그림 8에서와 같이 여전히 유동의 박리에 따른 재순환 영역의 발생으로 내벽에서 유동 불균일 현상이 발생하는 것을 알 수 있다.

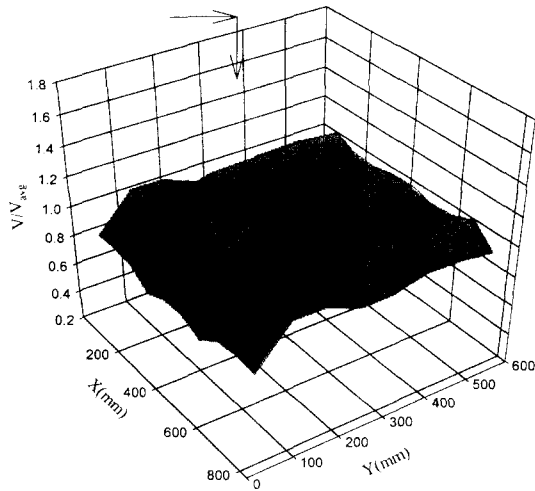


Fig. 8. Flow pattern in reduced scale model with $a_1 = 0.85$ S/n, $a_2 = 1.05$ S/n, $a_3 = 1.1$ S/n, $a_4 = 1.0$ S, $a_5 = 1.0$ S (case 8).

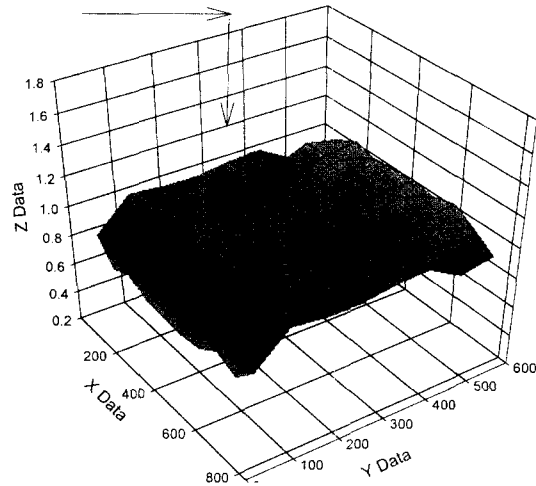


Fig. 10. Flow pattern in reduce scale model with $\theta_1 = 93^\circ$ (case 10).

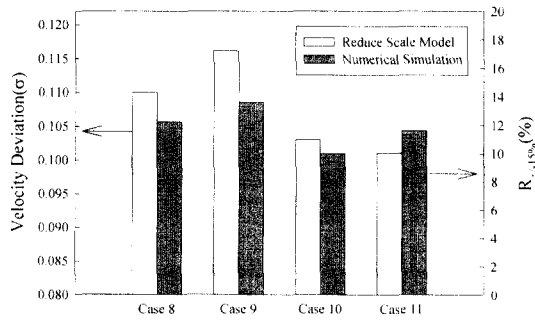


Fig. 9. Velocity deviation in SCR reactor according to angle of guide vanes.

3.5 가이드 베인의 각도에 따른 속도분포

이와 같은 촉매 내벽에서의 속도분포를 개선하기 위하여 첫 번째 안내 깃의 각도를 연장하여 유속분포를 개선하려 하였다. 이전 실험에서 좋은 결과를 보인 Case 8의 가이드 베인 간격에서 첫 번째 가이드 베인 각도를 91°(Case 9), 93°(Case 10), 95°(Case 11)로 연장시켜가며 속도편차를 비교하였다. 모형실험 결과는 그림 9에서와 같이 91°에서는 $\sigma = 0.116$ 으로 오히려 속도편차가 증가하는 결과를 보였으며 93°와 95°에서는 $\sigma = 0.103$ 과 $\sigma = 0.101$ 로 다소 개선된 속도편차를 보였다. 전산해석 결과(그림 9) 역시

93°와 95°에서 $R_{\pm 15\%} = 10.0\%$ 와 $R_{\pm 15\%} = 11.6\%$ 로 모형실험과 유사한 개선된 속도편차를 보여주었다. 그림 10은 최종적으로 우수한 속도분포를 보인 Case 10의 경우 모형실험을 통한 촉매층 전단에서의 속도분포를 보여주고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 500 MW급 유연탄화력발전소를 기준으로 개념 설계된 배연탈질용 SCR 촉매 반응기를 대상으로 반응기내에서 균일한 유동을 얻기 위하여 가이드 베인의 설계 변수에 따른 유동특성을 1/20 크기의 축소모형장치를 제작하여 전산해석 결과와 비교 실험하였다. 실험 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

첫째, 축소모형장치가 동력학적으로 SCR 촉매반응기를 충분히 상사할 수 있는 조건을 찾기 위해 요구되는 Reynolds 수에 대한 고찰 결과, 2×10^5 에서 상사성을 보장할 수 있는 임계 Reynolds 수를 제시할 수 있었다.

둘째, 가이드 베인의 설계 변수에 따른 최적화 과정을 통해 가이드 베인 개수가 4개 일 때, 가이드 베인 간의 간격은 각각 등간격(S/n)의 0.85, 1.05, 1.1, 1.0, 1.0배 되는 위치에서, 그리고 첫 번째 가이드

드 베인의 각도가 93° 일 때, 우수한 유동분포를 ($\sigma = 0.103, R_{\pm 15\%} = 10.0\%$) 보여, 촉매 반응기에서 요구되는 유동조건 ($\sigma \leq 0.15, R_{\pm 15\%} \leq 10.0\%$)을 만족할 수 있는 설계자료를 확보할 수 있었으며 설계변수에 따른 축소모형과 전산해석 결과가 유사한 양상을 보여 설계자료의 신뢰성을 확보할 수 있었다.

사 사

본 연구는 환경부의 환경기술개발사업의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

류창국, 심광보, 최상민 (1999) 모형실험과 전산해석을 통한 선택적 촉매 반응기 내부 유동 최적화 연구, 대한기계학회논문집 B권, 23(4), 548-555.
 이인영, 김동화, 이정빈, 엄희문, 남인식 (2000) 질소산화물 제거용 압출성형 SCR촉매의 상용화를 위한 내구성 연구, 대한환경공학회지, 22(8), 1467-1474.
 이정빈, 이인영, 김동화, 엄희문, 지평삼 (1999) 상업용 선택적환원촉매를 이용한 석탄화력발전소 배기가스 중 질소산화물 제거, 대한환경공학회지, 21(8), 1505-1510.
 이정빈, 이인영, 김동화, 엄희문, 지평삼, 추수태, 남인식

(1999) 국산 안료용 타이타니아를 담체로 이용한 V_2O_5/TiO_2 촉매상에서 질소산화물 제거활성, 한국대기환경학회지, 15(6), 791-797.
 Bosch, H. and F. Janssen (1988) Catalytic reduction of nitrogen oxides—a review on the fundamentals and technology, *Catalysis Today*, 2, 369-532.
 Choo, S.T., Y.G. Lee, I.S. Nam, S.W. Ham, and J.B. Lee (2000) Characteristics of V_2O_5 Supported on Sulfated TiO_2 for Selective Catalytic Reduction of NO by NH_3 , *Applied Catalysis A: General*, 200, 177-188.
 Frings, B. and M. Immich (1991) Optimization of Flue Gas Flow Management in DeNOx Reactors, KWH technical paper (13.07.010e), 3-7.
 Gutberlet, H. and B. Schallert (1993) Selective Catalytic Reduction of NOx from Coal Fired Power Plants, *Catalysis Today*, 16, 207-236.
 Hauenstein, K., W. Herr, and R. Sigling (1995) Fluid Dynamic Optimization of SCR Plant Logan Generating Plant, Siemens AG, KWU technical paper, 1-18.
 Sayre, A.N. and M.G. Milobowski (1999) Validation of Numerical Models of Flow through SCR Units, Proceeding of EPRI-DOE-EPA Combined Utility Air Pollutant Control Symposium: The MEGA Symposium, Washington, D.C. 3, P1-1-P1-14.
 White, F.M. (1989) *Fluid Mechanics*, 3th Ed., McGraw-Hill, New York, 251pp.