

열병합 보일러 SCR 장치의 유동 균일화를 위한 최적화 연구

박 영 빈, 장 춘 만[†]

한국건설기술연구원 설비플랜트연구실

Optimization for Flow Uniformity on the Selective Catalytic
Reduction (SCR) System of a Steam Supply BoilerYoung-Bin Park, Choon-Man Jang[†]

ABSTRACT: Selective Catalytic Reduction(SCR) has been used for the reduction of NO_x in a steam supply boiler. Recently, the reduction of NO_x becomes an important research field because of its negative effect on an environment. Shape optimization of circular poles installed in the chamber, which is located in upstream of a SCR, has been performed using response surface method and three-dimensional Navier-Stokes analysis to enhance gas flow uniformity. Three design parameters, diameter, arranging angle and stretching ratio of circular poles, are considered in the present study. Throughout the shape optimization of a circular pole, gas flow uniformity is successfully increased by decreasing local recirculation flow in a square duct chamber. Recirculation flow observed in the corner of the square duct can be reduced by proper installation of a guide vane or a blunt body. Detailed flow characteristics are also analyzed and discussed.

Key words: Selective Catalytic Reduction(선택적 촉매 환원법, SCR), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Design of Experiment(실험계획법), Response Surface Method(반응표면법)

기 호 설 명

k : Number of factors
 C : Number of center points
 S/R : Stretch ratio
 R : Radius of pole
 K_q : Quadratic Resistance Coefficient

ρ : density
 μ : coefficient of viscosity

1. 서 론

질소산화물(NO_x) 제어 기술 중 연소 후 탈질(flue gas treatment)기술에 속하는 선택적 촉매 환원법(Selective Catalytic Reduction, SCR)은 촉매를 사용하여 질소산화물(NO_x)를 환원하는 대표적인 배연탈질 기술로서 대형 연소기가 있는 각종 플랜트에서 다양한 방식으로 적용되어지고 있다.⁽¹⁻²⁾

그리스 문자

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-910-0494; fax: +82-31-910-0383

E-mail address: jangcm@kict.re.kr

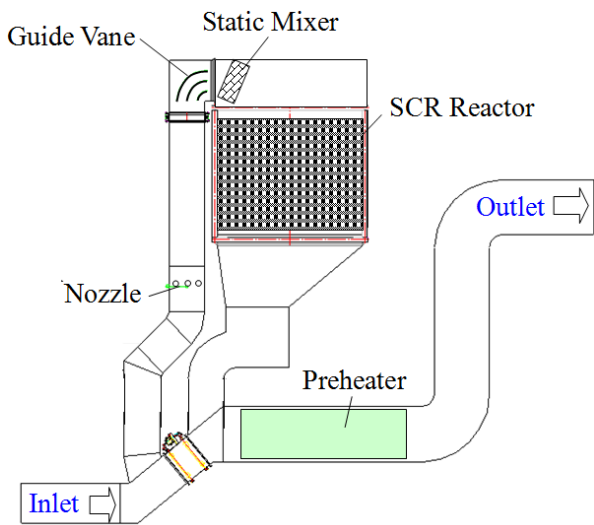


Fig. 1 Layout of SCR system of steam supply boiler

SCR장치의 성능에 영향을 미치는 인자들로 촉매의 종류나 형태, 촉매량, 유입가스의 온도, 유속분포 등을 포함하여 많은 요소들이 있다.

특히 질소산화물을 고체촉매와 반응시키기 위하여, SCR 상류측에 환원제인 무수암모니아수 투입시의 유입 농도분포 및 균일한 유입속도가 반응기에서의 환원효율을 결정하는 중요한 요소가 된다.⁽³⁻⁵⁾

본 연구에서는 열병합 보일러용 SCR의 질소산화물 환원효율을 향상시키기 위하여, SCR 상류단면에서의 환원제인 무수암모니아(NH₃) 농도분포를 포함하여 유입가스 속도분포와 유입각도를 각각 목적함수로 하여 반응면기법을 이용한 수치최적화를 수행하였다. 형상변수로는 SCR 상류부의 사각챔버 내에 유동제어용 원형 봉(pole)을 설치하고, 원형봉의 크기 및 설치위치로 하였으며, 삼차원 수치시뮬레이션을 이용하여 목적함수의 최적화를 실시하였다.

2. 열병합 보일러 SCR 시스템

열병합 보일러의 SCR시스템의 구성도를 Fig. 1에 나타낸다. 본 시스템은 환원제인 암모니아수 투입 노즐, 가스 혼합용 믹서부, SCR반응기 및 예열기 등으로 이루어져 있다.

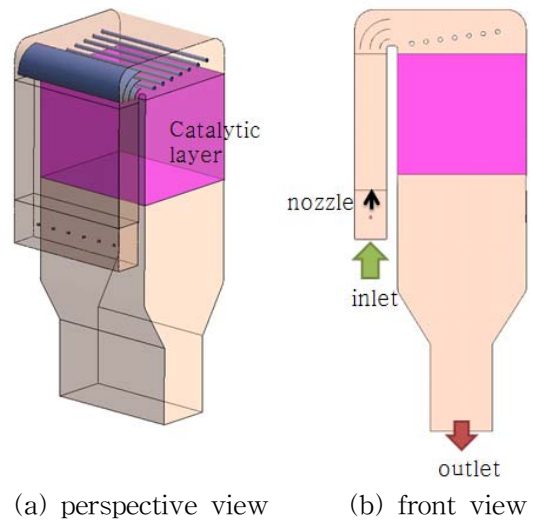


Fig. 2 Computational domain

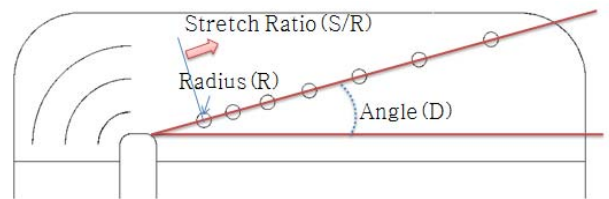


Fig. 3 Design factors

본 연구에서는 시스템의 간략화를 위하여, Fig. 2와 같이 노즐부를 포함하는 입구부로부터 SCR 반응기 하단부까지를 해석영역으로 하였다.

3. 설계변수 및 최적화 기법

본 연구에서는 형상의 최적설계를 위하여 반응표면법(Response Surface Method, RSM)을 이용한 실험계획법(Design of Experiment) 중 박스-벤켄법(Box-Behnken design)을 이용하여 3-인자(factor) 반응표면모델을 구성하였다. 박스-벤켄법을 이용할 때 시행되는 실험의 횟수는 k-1 완전요인 배치법(complete factorial design)으로 다음과 같이 구한다.^(6,7)

실험횟수:

$$k \times 2^{k-1} + C \quad (1)$$

Table 1 Box-Behnken design table

Test No.	Pattern	Angle	S/R	R
1	---0	0	1	75
2	-+0	0	1.4	75
3	+ -0	15.65	1	75
4	++0	15.65	1.4	75
5	0--	7.825	1	50
6	0-+	7.825	1	100
7	0+-	7.825	1.4	50
8	0++	7.825	1.4	100
9	-0-	0	1.2	50
10	+0-	15.65	1.2	50
11	-0+	0	1.2	100
12	+0+	15.65	1.2	100
13	000	7.825	1.2	75

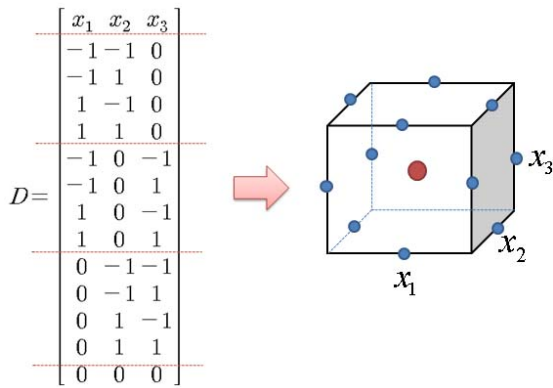


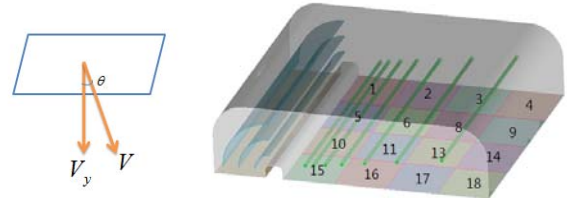
Fig. 4 Box-Behnken design

여기서 k는 인자수를 C는 중심점(center point)의 수를 의미한다.

본 형상최적화 연구에서는 SCR의 탈질 성능을 좌우하는 중요한 변수라 판단되는 SCR 입구 면에서의 배기가스 유입각도, 유입 가스의 속도 분포도, NH₃의 농도 균일도에 영향을 미치는 설계 변수로, Fig. 3에서와 같이 원형봉의 반경(R)과 유입 면에서의 유입각도(D), 확장비(stretch ratio, S/R)를 선정하였다.

Fig. 4에 k-1 완전요인 배치법에 의해 인자수 3, 중심점이 1인 경우에 대한 것을 도식한다.

실험횟수는 $3 \times 2^{(3-1)} + 1 = 13$ 이며, 각 변수의 설계영역은 장치의 형상에 따른 제약 조건과 선행계산을 통하여 구해진 수치들을 이용하여 다음과 같이 결정하였다.



(a) angle definition (b) data sampling area

Fig. 5 Angle definition and data sampling area

설계영역의 범위:

$$50 \leq R \leq 100 \quad (2)$$

$$0 \leq D \leq 15.65 \quad (3)$$

$$1 \leq S/R \leq 1.4 \quad (4)$$

Table 1은 상기의 설계영역에 대하여 박스-벤켄법을 이용한 실험계획을 나타낸다.

형상의 최적화를 위한 반응 값으로는 Fig. 5(a)의 정의와 같이 입구 면에 대한 유입 가스의 수직속도성분과 합성속도성분 사이의 코사인각도 (area averaged cosine value of flue gas velocity component, COS/AV), 속도의 표준편차 (standard deviation of flue gas velocity, V/SD)로 하였다.

통계분석을 위해 해당영역을 Fig. 5(b)와 같이 16등분하였으며 각각의 단면에서의 수치 평균값으로 정리하였다.

4. 수치해석 및 계산조건

SCR 내부의 유동장 해석을 위해 3차원 비압축성 정상유동에 대한 전산유체해석을 수행하였으며, 이를 위하여 상용코드인 CFX-11을 이용하였다. 3차원 비압축성 정상유동에 대한 지배방정식은 식(5)에서 식(8)과 같다.

연속방정식:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

U-Momentum 방정식:

$$\begin{aligned} & \rho U \frac{\partial U}{\partial x} + \rho V \frac{\partial U}{\partial y} + \rho W \frac{\partial U}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial U}{\partial x} - \rho \overline{u^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial x} \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial U}{\partial y} - \rho \overline{uv} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial U}{\partial z} - \rho \overline{uw} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

V-Momentum 방정식:

$$\begin{aligned} & \rho U \frac{\partial V}{\partial x} + \rho V \frac{\partial V}{\partial y} + \rho W \frac{\partial V}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial V}{\partial x} - \rho \overline{uv} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial V}{\partial y} - \rho \overline{v^2} \right] \\ &- \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial V}{\partial z} - \rho \overline{vw} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

W-Momentum 방정식:

$$\begin{aligned} & \rho U \frac{\partial W}{\partial x} + \rho V \frac{\partial W}{\partial y} + \rho W \frac{\partial W}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial W}{\partial x} - \rho \overline{uw} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial W}{\partial y} - \rho \overline{vw} \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial W}{\partial z} - \rho \overline{w^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial z} \end{aligned} \quad (8)$$

지배방정식인 나비에-스톡스(Navier-stokes) 방정식은 유한체적법(finite volume method)으로 이산화되며⁽⁸⁾, 대류항과 확산항의 이산화 방법으로는 각각 수정된 상류차분기법과 중심차분 기법이 사용되었다. 난류모델로는 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

수치해석 영역은 Fig. 2에서와 같이 SCR 반응기를 중심으로 사각 덕트가 이어진 형상으로 되어 있다. 입구의 흐름 하류(downstream)에 노즐이 일렬로 6개가 배치되어 암모니아를 분사하며 상단에는 가이드 베인과 유동제어용 원형봉이 배치되어 있고, 그 하류에 SCR 촉매층이 위치하고 있다. 촉매층의 압력강하를 효율적으로 계산하기 위하여 촉매층 내부를 다공관(porous media)으로 가정하여 수치해석을 수행하였다.

CFX를 이용한 수치계산에 있어서 다공관의 모델링은 다공관 입구와 출구의 압력차(dP), 두께(dX) 및 통과 유속(V)의 함수인 2차 저항계수(quadratic resistance coefficient)를 적정하게 계산하여 적용하였다.⁽⁹⁾

2차 저항계수:

$$K_q = \left(\frac{dP}{dX} \right) / V^2 \quad (9)$$

Table 2 Response

Test No.	COS/AV	V/SD
1	0.584769	0.414387
2	0.610155	0.752959
3	0.603274	0.383331
4	0.623113	0.457333
5	0.582312	0.717157
6	0.575244	0.657161
7	0.61029	0.493713
8	0.597528	0.453146
9	0.61756	0.692583
10	0.587091	0.504806
11	0.592319	0.764229
12	0.5952	0.441376
13	0.627157	0.376136
No pole	0.520243	1.1651

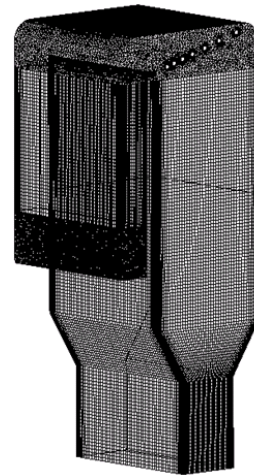
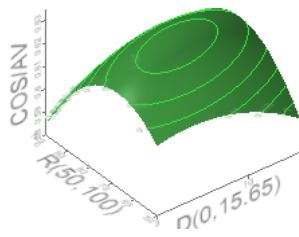
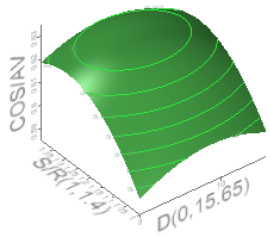


Fig. 6 Computational grid

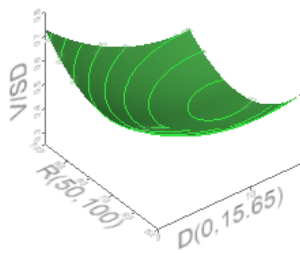
Fig. 6은 수치해석에 사용된 모델의 전체 격자 형상도를 나타낸다. 계산에 사용된 격자는 총 100만 노드이며, Tetra mesh와 Hexa mesh를 적절히 혼합하여 만들었다. 또한 계산 벽면 쪽에 조밀하게 격자를 분포시켜 벽면에서의 계산 정도를 향상 시켰다.



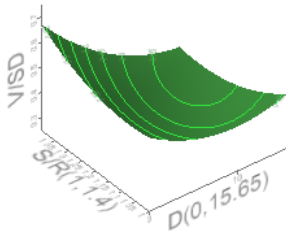
(a) COS/AV-R-D



(b) COS/AV-S/R-D

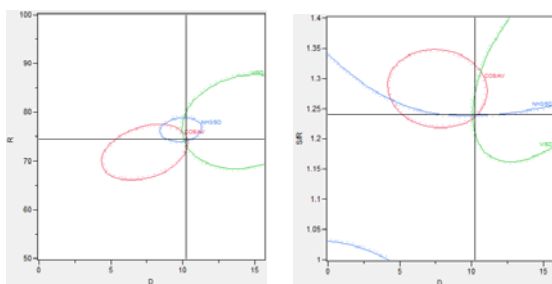


(c) V/SD-R-D



(d) V/SD-S/R-D

Fig. 6 Response surface profiler



(a) R-D

(b) S/R-D

Fig. 7 Contour profiler

Table 3 Optimized point

Test No.	Angle	S/R	R
Opt	10.26	1.24	74.44

Table 4 Prediction value versus CFD result

Test No.	COS/AV	V/SD
Prediction	0.628347	0.348819
CFD	0.625388	0.385888

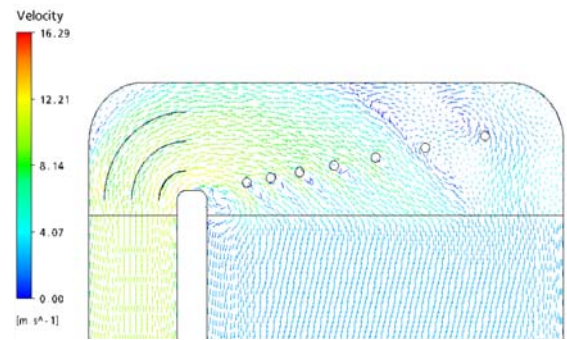


Fig. 8 Vector plot for optimum

5. 결과 및 고찰

Table 2는 수치해석을 통해 얻은 반응 값들을 나타낸다. 여기서 COS/AV는 망대 특성(Larger the better characteristics)을, V/SD는 망소 특성(Smaller the better characteristics)으로 품질 특성을 정하고 최소자승법으로 구해진 모수를 이용하여 회귀 모형을 표현하였으며, Fig. 6에 최적평가를 통한 반응면을 나타낸다.

그림에서 알 수 있듯이 각각의 변수에서의 최적값 영역이 일부 경계영역에 걸쳐있지만, 대부분 경계 내부에 위치함을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6의 반응 표면상의 등고선도에서 정상점 부근을 2차원으로 표현하고, 제한조건을 만족시키는 영역에서의 한 점을 최적점으로 결정한 것이다. 각 변수에 대한 최적점은 Table. 3에 나타낸다.

Fig. 8은 최적화된 모델의 계산 결과 중 유동 제어 붕이 설치된 SCR 상단 부분의 유동흐름을 벡터 선도로 나타낸다.

Table. 4는 최적 점의 값들을 이용하여 예측할 수 값과 CFD해석 결과 값을 비교한 표이다. 앞서 보았던 Table. 2의 반응 값들과 최적 값을 비교해보면 최적화를 통해 COS/AV와 V/SD의 경우에는 상당한 개선이 이루어졌음을 알 수 있다.

6. 결론

암모니아(NH₃)가 유입가스와 혼합되어 촉매층(SCR)으로 유입될 때 높은 혼합정도를 가질 수 있게 하고, 또한 촉매층 입구에서의 유속분포와 유입각도를 개선하여 질소산화물의 환원 효율을 향상시키는 연구를 수행하였다. 촉매층 상류에서의 가스유입속도의 균일화를 위하여 서로 다른 원형봉을 이용한 최적설계를 삼차원 수치시뮬레이션과 함께 수행한 결과, 유동제어용 원형봉의 배치와 형상에 따른 유동특성과 목적함수인 유입가스 균일도를 최적화 할 수 있었다. 즉 원형봉의 설계 최적화로 촉매층 내부로 유입되는 가스의 유속 분포 균일도를 높이고 유입각도가 개선되는 결과를 얻었다.

참고문헌

- Bell, A. T., Manzer, L. E., 1995, Protecting the Environment Through Catalysis. Chemical Engineering Reviews 95, no. 1, 209-225
- Cho. J. M., 2006, Study on Methodology to Improve the Performance of Selective Catalytic Reduction System Using CFD Analysis, Ph. D. thesis, Seogang University, Korea
- Ryu C. K., Shim K. B., Choi S. M., 1999, Flow optimization study of selective catalytic reactor by reduced scale model experiments and numerical simulations, Korea Society of Mechanical Engineering, Journal B, Vol. 23, No. 4, pp. 548-555
- K. J. Rogers, P. S. Nolan, 2001, SCR Reactor performance profiling and results analysis, The U.S. EPA/DOE/EPRI Combined Power Plant air pollutant control symposium: "The Mega symposium"
- K. J. Rogers, M. Albrecht, M. Varner, 2000, Numerical Modeling for Design Optimization of SCR Applications. ICAC NOx Forum 2000, Washington D. C.
- Box, G. E. P. and Wilson, K.B., 1951, On the Experimental Attainment of Optimum Conditions (with discussion). Journal of the Royal Statistical Society Series B 13(1):1 - 45.
- George Box, Donald Behnken, 1960, "Some new three level designs for the study of quantitative variables", Technometrics, Volume 2, pages 455-475.
- Patankar, S. V. 1980,. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Publishing Corporation, Washington D. C.
- Ansys Inc, 2007, Ansys CFX-Solver Theory Guide.