

Mixer design for improving the injection uniformity of the reduction agent in SCR system

Woohyeon Hwang*, Kyungok Lee**

Abstract

In this paper, we propose a method to optimize the geometry and installation position of the mixer in the selective catalytic reduction (SCR) system by computational fluid dynamic(CFD). Using the commercial CFD software of CFD-ACE+, the flow dynamics of the flue gas was numerically analyzed for improving the injection uniformity of the reduction agent. Numerical analysis of the mixed gas heat flow into the upstream side of the primary SCR catalyst layer was performed when the denitrification facility was operated. The characteristics such as the flow rate, temperature, pressure loss and ammonia concentration of the mixed gas consisting of the flue gas and the ammonia reducing gas were examined at the upstream of the catalyst layer of SCR. The temperature difference on the surface of the catalyst layer is very small compared to the flow rate of the exhaust gas, and the temperature difference caused by the reducing gas hardly occurs because the flow rate of the reducing gas is very small. When the mixed gas is introduced into the SCR reactor, there is a slight tendency toward one wall. When the gas passes through the catalyst layer having a large pressure loss, the flow angle of the exhaust gas changes because the direction of the exhaust gas changes toward a smaller flow. Based on the uniformity of the flow rate of the mixed gas calculated at the SCR, it is judged that the position of the test port reflected in the design is proper.

▶ Keyword : CFD, Selective Catalytic Reduction, Injection uniformity, reduction agent, mixer design

I. Introduction

질소 화합물과 황산화물은 대기오염 물질의 주 발생 원인으로 인식되어 이에 대한 배출 규제를 더욱 강화하고 있다. 이를 맞추기 위해서 대부분 화력발전소에서는 연료를 바꾸거나 기존 장치를 설계를 다시 하고 있다[1, 2, 3]. 최근 연구에서는 화력 발전소용 탈질설비를 축소한 모형을 만들어 유동과 농도 균일화를 위한 가이드 베인 형상과 혼합장치 최적화를 시도하였으며 촉매층 전단에서 유동속도와 농도에 대하여 설계 기준에 합당한지의 여부로 최적화를 판정하기도 하였다[4].

또한 촉매 전단에서의 환원제 유동균일도에 따른 NOx 저감

효율을 파악하기 위해 다양한 설계 변수를 선정하여 변수의 변화에 따른 촉매 전단에서의 암모니아 유동 및 농도 균일도와 NOx 저감 효율에 대해 수치해석을 진행하였다[5]. 이를 통해 Diffuser angle의 기울기가 가장 완만한 12°일 때 암모니아 유동 균일도가 89%로 가장 높고, 급격한 유동 확산에 의한 유동 박리 영역과 그에 따른 압력손실을 줄일 수 있었고, 혼합기 브레이드 angle이 16°일 때 blade 끝단에서의 난류가 강하게 형성되기 때문에 배기가스의 혼합이 활발하게 이루어져 암모니아의 유동균일도가 19% 증가함을 확인하였다.

선택적 촉매환원(selective catalytic reduction, SCR) 시스템

• First Author: Woohyeon Hwang, Corresponding Author: Kyungok Lee
*Woohyeon Hwang (priwoo@gmail.com), School of Robot and Automation, Dongyang Mirae University
**Kyungok Lee(kolee@gtec.ac.kr), Department of Clean Production, Gyeonggi College of Science and Technology
• Received: 2016. 12. 12, Revised: 2016. 12. 25, Accepted: 2017. 01. 06.
• This work was supported by Research Grant of Dongyang Mirae Univ.

에서 사용되는 환원제의 효율성을 극대화하기 위해 적용되는 암모니아 주입관 성능은 절탄기를 거쳐나오는 배기가스의 유량분배에 가장 큰 영향을 받는다는 다양한 연구가 진행되고 있다[6, 7, 8].

본 연구에서는 이러한 SCR 설비의 성능의 지표가 되는 환원 촉매층 전단에서 암모니아 농도를 균일하게 유지할 수 있도록 암모니아 주입관 주변의 혼합기의 형상과 설치위치를 최적화하고, 본 연구 결과를 현장에 활용하여 환원제의 효율성을 높일 수 있는 방안을 전산유체역학 (CFD, computational fluid dynamics)을 이용하여 강구하고자 한다[9]. 이를 위해 먼저 배기가스 탈질설비 (Flue-gas desulfurization; FGD)에서 SCR 시스템의 특성과 해석 구간을 결정하여 CFD 해석을 수행하고, 혼합기의 설계에 미치는 유속, 온도, 압력손실, 암모니아 농도를 분석하고자 한다.

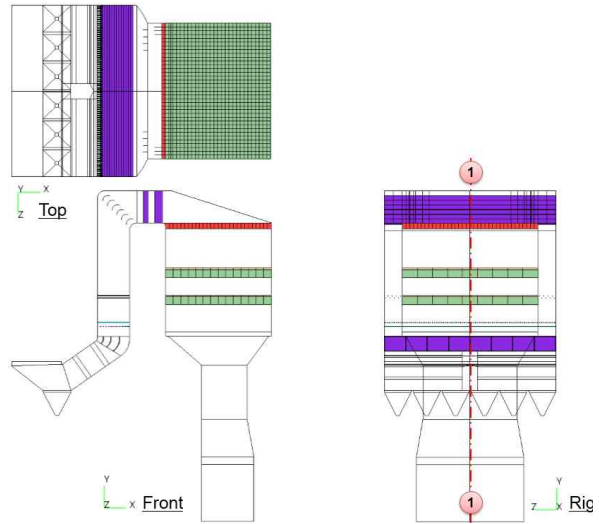


Fig. 2. Analysis section for flue gas system

II. Analysis boundary in FGD system

1. SCR in FGD system

Fig. 1과 같이 화력발전소에 탈질시스템의 주요장치는 촉매 반응기, 환원제를 위한 주입계통 및 저장 탱크로 이루어져 있고, 탈질설비는 절탄기와 공기에열기 사이에 설치되어있다.

2. Analysis boundary

본 연구에서 배연탈질시스템의 해석 구간은 Fig. 2와 같이 절탄기 출구부터 공기에열기 입구구간이며 암모니아 분사 격자 (ammonia injection grid, AIG)와 암모니아 가스 혼합장치를 포함하여 전산유체역학 해석을 수행하였다. A 발전소에 소요되는 1, 2호기 SCR 시스템은 완전한 대칭 형태이므로 1호기의 SCR를 대상으로 전산해석을 수행하였다. 1호기에 소요되는 SCR 시스템도 Fig. 1과 Fig. 2의 ①-① 면을 중심축으로 대칭 구조이므로 대칭면을 기준으로 Fig. 2의 네모 구간에 대해서만 해석을 수행하였다.

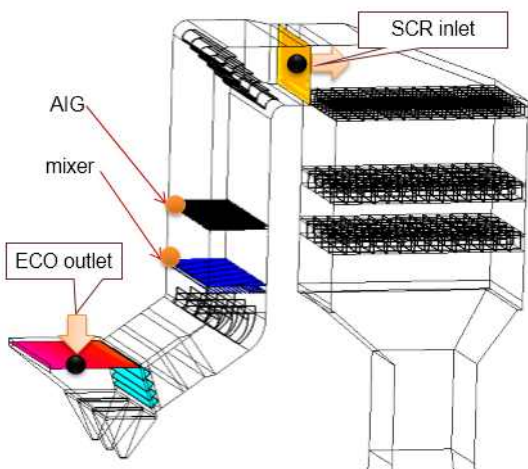


Fig. 1. Schematic diagram of SCR in FGD system

Fig. 3은 SCR 반응기에서 암모니아 가스를 주입하는 분사 그리드와 암모니아 혼합 장치의 위치를 나타낸 그림이다. 암모니아 혼합 장치는 암모니아 분사 그리드의 하부에 설치하여 배기가스가 균일하게 암모니아 분사 그리드를 통과할 수 있도록 1차 암모니아 분사 그리드의 중심에서 하부에 2차 암모니아 혼합 장치의 중심이 설치되도록 하였다.

절탄기 출구에서 유입되는 질소산화물을 포함하는 배기가스가 SCR 반응기를 거쳐서 질소산화물을 제거하고 공기에열기로 배출되는 구간에서 배기가스와 회석 암모니아 환원가스의 유동 특성을 해석하였다. 이를 위하여 해석 영역을 CFD-GEOM Version 2013을 사용하여 Fig. 4와 같은 계산격자를 생성하여 수행하였다.

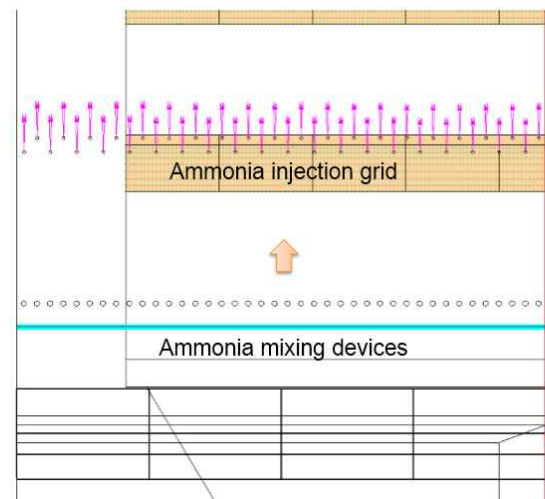


Fig. 3. Mixing devices and injection grid of ammonia

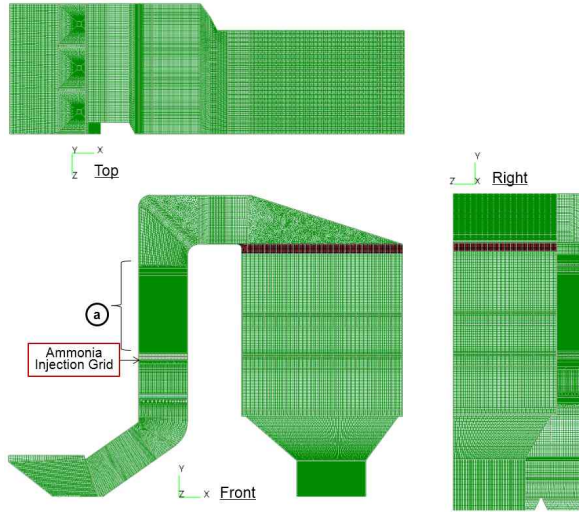


Fig. 4. Calculation grid for CFD Analysis

III. Numerical analysis method

1. Analysis assumptions

화력발전소에 소요되는 SCR에서 배기가스의 유동 특성을 다음과 같이 가정한다.

- (1) 배기가스는 정상 비압축성 뉴턴 유체이다.
- (2) 전산유체역학 해석 영역에서의 배기가스의 밀도, 점도, 열전도도, 열용량 등 열전달 특성 값은 온도와 화학조성의 함수로 계산한다.
- (3) 외벽과 안내깃은 단열조건을 적용한다.
- (4) 배기가스는 CFD 해석 영역에서 화학반응에 안정하다. 따라서 SCR 반응기에서 NOx 제거에 따른 영향은 계산범위에서 제외한다.
- (5) 전산해석의 입구(Eco. outlet, AIG nozzle outlet)조건은 입구단면의 법선 속도성분이 일정한 것으로 설정한다.
- (6) 배기가스는 벽면에서 미끄럼 방지조건(No slip)을 만족한다.
- (7) AIG Nozzle은 AIG 파이프에 뚫어진 구멍으로 가정하고 모든 AIG nozzle에서 분무되는 암모니아 희석가스의 유량이 일정하다.
- (8) Dilute NH₃가 AIG의 nozzle을 통과하여 SCR 덕트 내부로 투입될 때는 완전히 기체 상태이다.

2. Governing equations and analysis models

배기가스 계통과 흡수탑 내부의 유동, 압력분포 등을 해석하기 위하여 질량보존방정식, 운동량보존방정식, 난류방정식(표준 $k-\epsilon$ 난류모델) 등을 적용하였다. 수치해석 기법은 계산영역을 임의의 모양의 셀로 나누어 셀 중심에 압력과 속도 성분을 모

두 저장하는 셀 중심 유한체적법 (Finite Volume Method)을 사용하였다.

(1) 연속 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

(2) 운동량 보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

여기서 p 는 정압, μ 는 점도, g 는 중력가속도, F 는 다공매체 모델과 관련한 생성항이고, 응력텐서는 다음 식과 같다.

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3)$$

(3) 에너지 보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) \quad (4)$$

여기서 h 는 엔탈피, k 는 열전도도, J 는 j 화학종의 확산 플럭스이다.

(4) 화학종 보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i \quad (5)$$

여기서 Y 는 i 성분의 질량분율, J 는 i 성분의 확산 플럭스, $D_{i,m}$ 은 혼합물에서 i 성분의 확산계수이다.

(5) 난류모델

난류 운동에너지 k 방정식은 운동량 방정식에서 유도할 수 있는 반면에 난류운동에너지 소산율 ϵ 방정식은 물리적인 타당성 및 수학적 개념의 상사성을 이용하여 얻어진 방정식이다.

• 난류 운동에너지 k 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (6)$$

• 난류 소산율 ϵ 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (7)$$

여기서 $C_\mu = 0.09$, $C_{\epsilon 1} = 1.44$, $C_{\epsilon 2} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \epsilon$ 이다.

3. Boundary conditions

SCR 시스템의 전산해석을 위한 입구 경계조건은 절탄기의 출구에서 배기가스와 AIG 노즐 출구에서 암모니아 환원가스가 fixed normal mass flow rate 조건을 유입되는 것으로 적용한

다. 출구 경계조건은 SCR 출구에 배기가스와 암모니아 환원가스가 혼합되어 fixed pressure 조건으로 배출되는 것으로 설정한다. 배기가스와 환원가스의 입구에서는 보일러 운전조건에 대한 온도 값을 적용하였으며 탈질설비의 모든 외벽은 단열조건을 적용한다. 각 연료탄과 운전부하에 따른 배기가스와 암모니아 환원가스의 밀도는 이상기체 방정식을 적용하여 온도와 화학조성의 함수로 계산한다. 연료탄과 운전부하 변화에 대해서 배기가스에 비해 환원가스의 질량유량이 0.6%이하로 적기 때문에 점도, 열용량과 열전도도는 절탄기 후단에서 유입되는 배기가스의 온도와 조성으로부터 계산된 값을 전체 SCR 시스템에서 동일하다고 가정한다.

4. Calculation algorithm

본 연구는 배연탈질 설비의 유동 특성을 전산유체역학 해석하기 위하여 국내외에서 유동해석을 위해 사용하여 적합한 것으로 검증된 상용 CFD 소프트웨어인 CFD-ACE+를 사용하여 수치해석을 수행하였다[7]. SCR의 수치해석을 위해서 계산 영역을 수치모델의 적용에 적합하도록 여러 개의 작은 영역(격자)으로 분할하였다. 모든 물리량들은 이 제어체적들의 중심에 저장되며 이렇게 각 제어체적에 보존법칙을 적용한 유한 체적법을 이용하였다.

사용된 전산유체역학 코드인 CFD-ACE+의 경우 SIMPLE 계열의 알고리즘을 채택하고 있으며 속도항에서 각각의 성분을 따로 푸는 방법을 이용한다. 대류항의 차분화 기법으로 1차 상류차분도식을 사용하였으며, 수렴율과 안정성을 향상시키기 위하여 각 변수에 대하여 하향 이완을 수행하였다. 수렴판정은 각 변수의 잉여값이 10^{-4} 이하이면 수렴한 것으로 판정하였다.

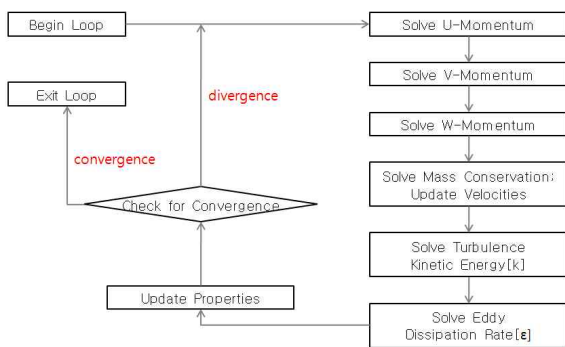


Fig. 5. Flow chart of segregated solver

IV. CFD results

Fig. 6은 SCR 반응기에서 암모니아 가스를 주입하는 분사 그리드와 암모니아 혼합 장치의 위치를 나타낸다. 화력발전소 배연탈질시스템의 해석 구간은 절탄기 출구부터 공기예열기 입구구간

이며 암모니아 분사 격자와 암모니아 가스 혼합장치를 포함하여 전산유체역학 해석을 수행하여 혼합기를 설계하였다.

1. Flow line through the absorber outlet

절탄기 출구를 통과하는 배기가스 유선을 Fig. 6에 나타내었고, 절탄기 출구를 통과한 배기가스가 SCR 입구덕트와 연결되는 ①구간을 통과할 때 덕트의 하부 ②로 치우쳐 통과하면서 덕트의 상부에는 배기가스의 유동이 없는 사각지대가 생성된다. 배기가스가 +y방향에서 +z방향으로 전환하는 곡관을 안내기를 따라 균일하게 통과한다. SCR 입구덕트와 SCR 반응기가 연결되는 축소 덕트 구간을 통과하는 배기가스가 축소 덕트의 외벽에서 내부로 쏠리는 것을 방지하기 위하여 수평판 안내기를 설치하였다.

SCR 반응기에 설치되는 가스 정류기(gas rectifier)를 배기가스가 통과하여 SCR 반응기 내부에 설치된 1, 2차 촉매층을 균일하고 나란하게 통과하게 된다. 1, 2차 촉매층을 통과한 배기가스는 SCR 출구덕트와 공기예열기의 연결부에서 완만한 축소덕트를 거쳐서 최종 공기예열기로 배출된다.

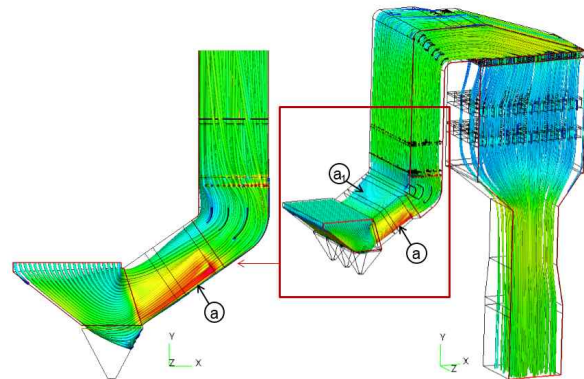


Fig. 6. Flow line of flue gas through absorber outlet

2. Velocity distribution at AIG inlet

Fig. 7은 절탄기 출구에서 AIG 전단까지의 유동방향에 수직인 단면에서 나타내었고, 유동의 치우침이 큰 단면 2에서도 최대 유속이 24m/s을 넘지 않는다. Fig. 7의 단면 1은 절탄기 출구를 바로 통과한 후의 단면으로 ①, ②와 같이 절탄기 호퍼에서 +y방향으로 20m/s 정도로 +y방향으로 상승하는 유동이 발생된다. 이는 절탄기 호퍼에 침강되어 있는 재를 다시 재비산이 일어날 가능성이 높다. Fig. 7의 단면 1~5는 모두 +x방향 ③의 유속이 크지만 2단 파이프 형태로 설치되는 암모니아 혼합설비를 통과한 후에는 단면6과 같이 유속이 매우 균일해진다.

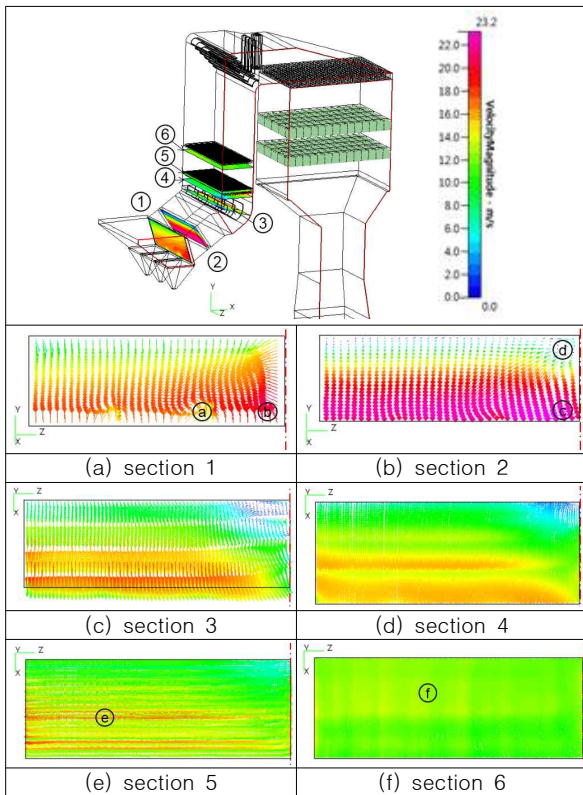


Fig. 7. Velocity distribution of flue gas at AIG inlet duct

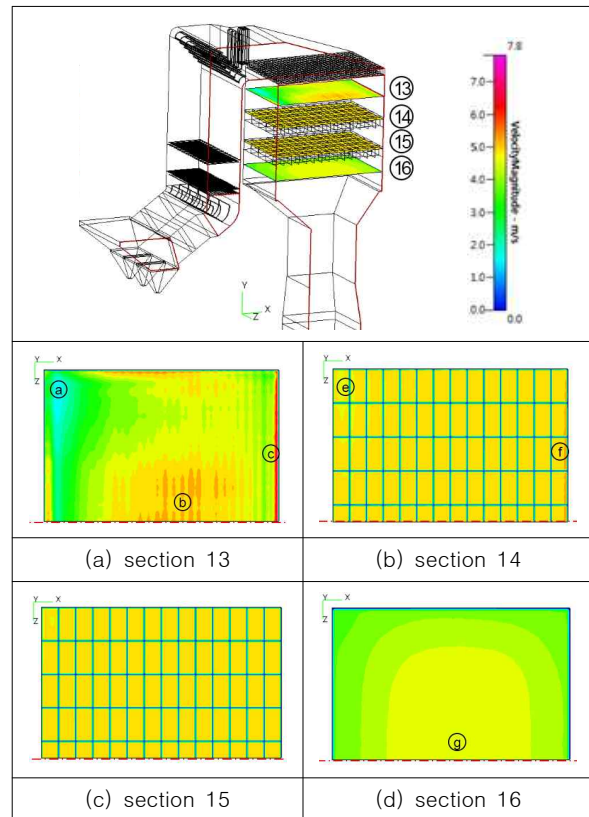


Fig. 9. Velocity distribution of flue gas at SCR reactor

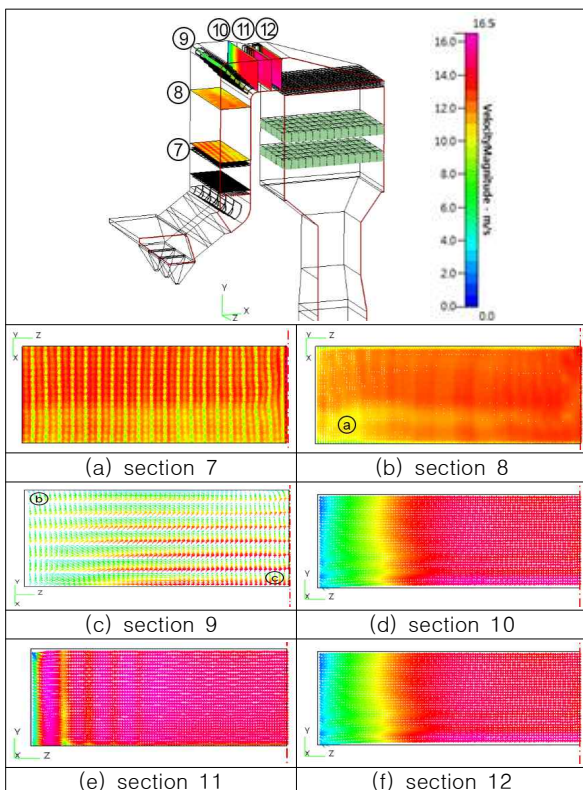


Fig. 8. Velocity distribution of flue gas at AIG outlet duct

3. Velocity distribution at AIG outlet

Fig. 8은 AIG 후단 덕트에서 유동방향에 수직인 단면에서 유속분포를 나타내며, 평균유속 15m/s이하로 설계되었으며 유동의 치우침이 큰 단면 9에서도 최대 유속이 16m/s를 넘지 않는다. Fig. 9의 단면 13은 가스 정류기를 통과한 후의 단면으로 ㉑보다는 ㉒, ㉓로 유속이 빠르나 1차 촉매층을 통과하기 전에는 단면 14와 같이 균일해진다. 단면 16은 예비 촉매층이 설치되는 위치에서 유속분포로 SCR 출구의 영향을 받아 ㉔에서 유속이 빠르다.

Fig. 10은 AIG 후단에서 1차 촉매층 상단까지의 암모니아 농도분포를 나타내었고, 단면7은 AIG를 통과한 혼합가스 중 암모니아 조성으로 암모니아 분사노즐에서 분사된 암모니아가 전체 단면으로 충분히 확산되지 못한 특성을 갖는다.

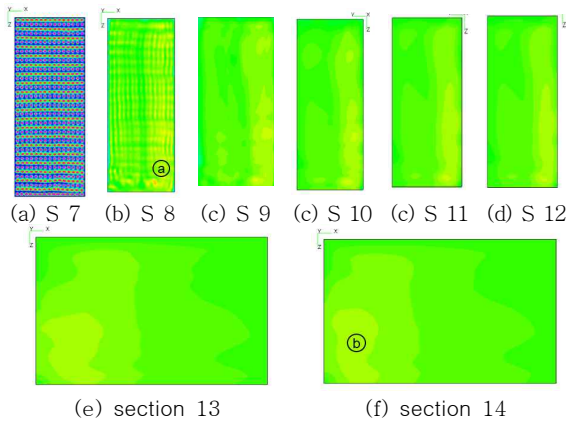


Fig. 10. Concentration distribution of ammonia at AIG outlet duct and SCR

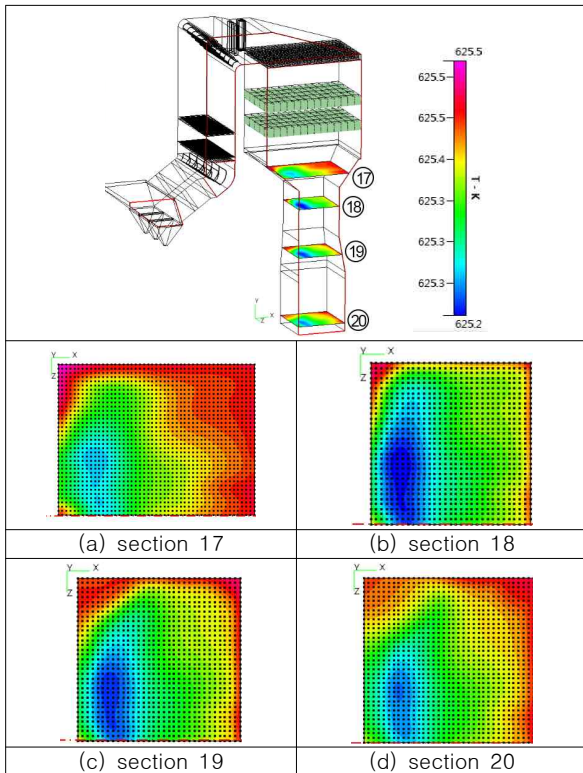


Fig. 11. Temperature distribution of flue gas at SCR outlet

4. Temperature distribution at SCR outlet

Fig. 11는 SCR 출구 유동방향에 수직인 단면에서 온도분포를 나타내고, 이 때 온도분포는 전산유체역학 해석의 가정에서 설명한 것과 같이 외벽을 통한 열교환과 촉매층에서 반응열을 전산해석에 고려하지 않았으므로 암모니아 회석가스와 배기 가스의 혼합에 의한 온도 분포 특성을 나타낸다.

5. Pressure loss at SCR analysis boundary

Fig. 12는 SCR 촉매층 구간에서 발생하는 압력손실은 촉매 제작사의 규격서를 기준으로 다공성 모델을 적용하여 계산한 값이다. 배기가스가 SCR 입구덕트에서는 암모니아 환원시스템을 통과할 때 압력손실이 크게 발생하며, SCR 반응기로 유입되기 전에 설치되어 있는 가스 정류기를 통과하면서도 압력손실의 크게 발생한다. 이는 암모니아 환원 설비와 가스 정류기에서 강제로 배기가스의 유동을 균일하게 하고 있다는 것이다.

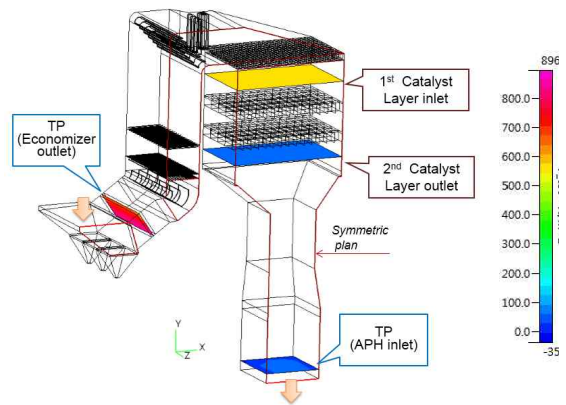


Fig. 12. Pressure loss in SCR analysis section

V. Conclusions

본 논문에서는 탈질설비가 운전될 때 1차 SCR 촉매층 전단으로 유입되는 혼합가스 열유동 특성을 상용 CFD 소프트웨어인 CFD-ACE+를 사용하여 전산유체역학기법으로 수치 해석을 수행하여 분석하였다. 또한 SCR 입구와 출구에 설치되는 테스트 포트에서 계산된 가스의 유속의 균일도를 기준으로 적합성을 판단하였다.

SCR의 촉매층 전단에서 배기가스와 암모니아 환원가스로 이루어진 혼합가스의 유속, 온도, 압력손실, 암모니아 농도와 같은 특성을 해석하여 혼합기 설계에 미치는 영향을 고려하였다. 촉매층 표면에서 온도 차이는 배기가스의 유량에 비하여 분무되는 환원가스의 유량이 매우 적기 때문에 환원가스에 의한 온도차가 거의 발생하지 않았다. 절탄기 출구와 SCR 입구 연결부 사이에서 발생하는 유동의 쏠림현상은 암모니아 환원설비, AIG와 가스 정류기를 거치면서 촉매층 전단까지 이동하는 동안 충분히 균일해 졌다. 배기가스와 AIG 구간에서 분무되는 암모니아 환원가스는 1차적으로 AIG 전단의 배기가스의 유동분포를 균일하게 제어하여 AIG를 통과시키므로써 AIG 후단에서부터 촉매 전단까지 이동하는 동안 충분히 균일하게 혼합되도록 설계하였다. 혼합가스가 SCR 반응기로 유입될 때 한쪽 벽 쪽으로 약간 쏠리는 현상이 있어 압력손실이 큰 촉매층을 통과할 때 배기가스가 유동이 적은 쪽으로 방향을 바꾸기 때문에

유동입사각이 생겼다. 또한 SCR 입구와 출구에 설치되는 테스트 포트에서 계산된 혼합가스의 유속 균일도를 기준으로 설계에 반영된 입출구 테스트 포트의 위치가 적절하다고 판단되어 이를 혼합기 설계에 반영하였다.

본 연구에서 제안한 SCR 설비의 성능의 지표가 되는 환원제 농도를 균일하게 유지하기 위한 혼합기의 최적화 설계 방안은 국내에서 운전 중인 여러 화력발전소에 향후에 직접 적용하고 분석하여 연구결과를 검증하고 성능을 높이는데 기여하고자 한다.

REFERENCES

- [1] W. Hwang, and K. Lee, "Computational Fluid Dynamic Analysis for Improving the Efficiency of Desulfurization System for the Wet Flue Gas," *Journal of The Korea Society of Computer and Information*, Vol.19, No.2, pp. 161~171, Feb. 2014.
- [2] S. Lee, C. Kim, and W. Lee, "CFD Explanation and Verification of Multi Inner Stage Cyclone for The Particle Removal," *Journal of The Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol.18, No.1, pp.149~156, Jan. 2013.
- [3] H. Seong, C. Lee, and J. Suh, "Study on Numerical Analysis of Shape and Guidevane Design for Improving a 500 PS SCR Reactor's Flow Uniformity," *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering* 28(1), pp.35~41, Jan. 2016.
- [4] J.S. Ha, and T.K. Kim, "A Study on the Flow and Concentration Uniformity before the Catalyst Layer of a SCR De-NO_x System," *Journal of Nakdonggang environmental research institute*, V.15, No.1, pp.262~270, June 2011.
- [5] M. Song, S. Kang, S. Lee, Y. Kang, and Y. Cho, "A Numerical study on the NO_x Reduction Rate Depending on the Flow Uniformity Index of NH₃ in front of the Catalytic Converter," *Proc. of the Korean Society Of Automotive Engineers*, pp.354~360, May 2013.
- [6] X. Tian, Y. Xiao, P. Zhou, W. Zhang, Z. Chu, and W. Zheng, "Study on the mixing performance of static mixers in selective catalytic reduction(SCR) systems," *Journal Marine Eng. & Tech.*, Vol.14, No.2, pp.57~60, Feb. 2015.
- [7] G. Zhang, Y. Du, and Y. Zhang, "Desulfurization reaction model and experimental analysis of high sulfur coal under hydrogen atmosphere," *Journal of Industrial & Engineering Chemistry*, Vol.20, No.2, pp.487~493, Feb. 2014.
- [8] H. Um, G. Kim, D. Kim, K. Kim, and J. Kim, "Numerical Analysis for the Flow Uniformity in the LP-SCR Reactor," *Korean Society of Combustion Symposium*, pp.61~63, Dec. 2015.
- [9] W. Hwang, K. Lee, and Y. Cho, "Optimization of the Design of Large Ducts with the Space Constraint in 500MW Power Plant," *Journal of Environmental Sciences.*, Vol.18, No.7, pp. 755~765, Jul. 2009.

Authors



Woohyeon Hwang received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in Chemical Engineering from Ajou Univ., KAIST, and Seoul National Univ., Korea, at 1988, 1990 and 1997, respectively.

Dr. Hwang joined the faculty of the School of Robot and Automation Engineering at Dongyang Mirae University, Seoul, Korea, in 1995. He is currently an Professor in the School and interested in process automation.



Kyungok Lee received the B.S., and M.S. degrees in Chemical Engineering from Busan National Univ., KAIST in Korea at 1989 and 1991, respectively, and completed and Ph.D. course at Kanazawa Univ. in Japan at 1999.

Prof. Lee joined the faculty of the Department of Clean Production at Gyeonggi College of Science and Technology, Gyeonggi-do, Korea, in 2000. She is currently an Professor in the School and interested in Computational Fluid Dynamics and its application.