

탈질설비 내에서 입구유동 NOx 분포에 따른 AIG유동제어의 전산해석적 연구

서덕철¹, 김민규², 정희택^{2,*}

¹한국남동발전

52852 경남 진주시 사들로 123번길 32 (충무공동)

²경상대학교 기계공학과

52828 경남 진주시 진주대로 501

(2019년 10월 18일 접수; 2019년 11월 6일 수정본 접수; 2019년 11월 6일 채택)

The Numerical Study on the Flow Control of Ammonia Injection According to the Inlet NOx Distribution in the DeNOx Facilities

Deok-Cheol Seo¹, Min-Kyu Kim², and Hee-Taeg Chung^{2,*}

¹Korea South-East Power Company

123-32, Sadeul-ro, Jinju, Gyeongnam, 52852, Republic of Korea

²School of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University

501, Jinju-daero, Jinju, Gyeongnam, 52828, Republic of Korea

(Received for review October 18, 2019; Revision received November 6, 2019; Accepted November 6, 2019)

요 약

선택적 촉매환원법은 산업 설비에서 분사되는 배기가스의 탈질 과정에 유용한 방법이다. 촉매 층 입구에서의 암모니아-질소산화물의 혼합비 분포는 탈질 과정에서 중요하다. 본 연구에서는 전산해석 기법을 이용하여 탈질설비의 입구 배기가스 내 질소산화물의 유동 분포에 따른 암모니아 분사 노즐의 유량을 조절하여 NH₃/NO 몰 비의 균일도를 개선하였다. 출구 X/H = 3 지점에서의 몰 비에 의한 평균제곱근오차 값을 최적화 변수로 선정하였고 실험계획법을 기반 한 최적화 알고리즘을 도입하였다. 균일, 포물선, 상향 솔림, 임의 등 4가지 입구 유동 형태에 대해 8개의 분사 노즐의 암모니아 분사 유량을 도출하였다. 정상상태의 비압축성 점성 이차원 유동장 해석을 위해 상용 소프트웨어인 ANSYS-FLUENT에 $k-\epsilon$ 난류모델을 적용하였다. 본 해석의 결과, 입구 배기가스의 유동 형태 별로 9.58%에서 80.0%의 몰 비 개선 효과를 나타내었다.

주제어 : 탈질설비, 암모니아 분사, 전산해석, NOx 분포

Abstract : The selective catalytic reduction system is a highly effective technique for the denitrification of the flue gases emitted from the industrial facilities. The distribution of mixing ratio between ammonia and nitrogen oxide at the inlet of the catalyst layers is important to the efficiency of the de-NOx process. In this study, computational analysis tools have been applied to improve the uniformity of NH₃/NO molar ratio by controlling the flow rate of the ammonia injection nozzles according to the distribution pattern of the nitrogen oxide in the inlet flue gas. The root mean square of NH₃/NO molar ratio was chosen as the optimization parameter while the design of experiment was used as the base of the optimization algorithm. As the inlet conditions, four (4) types of flow pattern were simulated; i.e. uniform, parabolic, upper-skewed, and random. The flow rate of the eight nozzles installed in the ammonia injection grid was adjusted to the inlet conditions. In order to solve the two-dimensional, steady, incompressible, and viscous flow fields, the commercial software ANSYS-FLUENT was used with the $k-\epsilon$ turbulence model. The results showed that the improvement of the uniformity ranged between 9.58% and 80.0% according to the inlet flow pattern of the flue gas.

Keywords : DeNOx facilities, Ammonia injection, Numerical analysis, NOx distribution

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: htchung@gnu.ac.kr; Tel: +82-55-772-1626; Fax: +82-55-772-1577

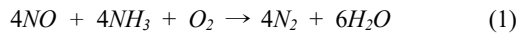
doi: 10.7464/ksct.2019.25.4.322 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

현재 화력발전소에서는 연소과정에서 주로 발생하는 열적 질소산화물(thermal NOx)의 저감을 위해 운전을 통한 연소방법의 개선과 선택적 촉매환원(selective catalytic reduction, SCR) 방법을 채택하고 있다.

SCR 방법에서는 배기가스의 질소산화물이 암모니아 분사 그리드(ammonia injection grid, AIG)에서 분산된 암모니아(NH3)와 균일하게 혼합된 후 아래의 Equation (1)과 같이 촉매층에서 화학적 작용으로 질소와 물로 분해되게 된다.



환원제로 사용되는 물질은 암모니아인데, 대용량의 발전소에서는 무수암모니아(anhydrous ammonia)와 요소수를 사용한다. SCR시스템에서 탈질 성능에 영향을 미치는 요소로는 촉매의 형태나 종류, 촉매량, 유입 가스의 온도, 유속 분포 등 다양한 요소가 있다. 이 중 질소 산화물을 탈질 촉매와 반응시키기 위하여 촉매 최상류층에서 유량이 균일하게 분포되는 것은 반응기에서의 환원 효율을 결정하는 중요한 요소가 된다.

만일 SCR 촉매에서 배기가스의 유속, 압력 등 유동분포가 균일하지 않다면, 탈질촉매에서의 질소산화물 제거효율이 균일하지 않아 전체적인 탈질효율이 낮아지게 된다. 따라서 균일한 유동분포의 SCR 시스템에서는 촉매와 노즐사이에 일정 거리가 확보되면 배기가스 확산과 대류에 의하여 농도의 균일화가 이루어지겠지만 균일화가 이루어지기 위한 충분한 체류시간을 확보할 수 없는 공간에 설치되는 SCR 시스템에서는 이러한 환원제 분사량의 불균일 문제는 NH3가 NOx와 모두 반응하지 않고 일부는 탈질설비 반응기를 그대로 통과하게 되는 암모니아 슬립(ammonia slip) 현상을 초래한다. 이는 후단 설비에서 배기가스 중의 잔존 SO3와 환원제 NH3가 반응하여 황산암모늄(ammonium-sulfate, ABS)을 생성하여 설비의 표면에 부식을 일으킨다[1].

최근 중국 내에서는 미세먼지 오염도가 급격하게 심화되면서 이에 대한 연구가 활발하다. Zhu et al. [2]은 이를 저감하기 위한 연구의 일환으로 석탄화력 발전소에 설치된 탈질 시스템 내 유동장 최적화에 대한 연구를 수행하였고, Zhao et al. [3]은 전산 해석 기법을 이용하여 연소가스를 균일하게 하여 AIG에서 암모니아 량 분포로 제일 상단 촉매의 속도 편차와 유동장의 분포를 확인하는 연구를 수행하였다.

국내에서도 석탄 화력에 의한 발전에서 야기되는 환경오염 물질의 저감에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Seo and Chang은 탈질설비 시스템 내 암모니아 분사 균일도 개선을 위한 AIG 설계의 연구를 노즐 직경에 의한 토출 유량 균일도 변화, 압력의 변화, 촉매 체적의 증가 등에 관한 연구를 수행하였다[4]. 가스터빈 발전소인 복합화력 발전소에 사용되는 탈질설비 최적화에 대한 연구로는 Lee et al. [5]와 Kim and Lee [6]의 연구 사례가 있다.

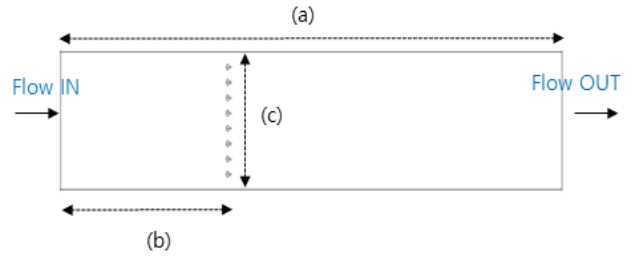


Figure 1. Definition of flow domain.

Table 1. Flow field conditions

| Descriptions | Value | Unit |
|---------------|--------|-------------------|
| Flowrate | 15.56 | m s ⁻¹ |
| Temperature | 640.15 | K |
| Density | 0.57 | kgm ⁻³ |
| Dimension (a) | 25.6 | m |
| Dimension (b) | 6.4 | m |
| Dimension (c) | 3.2 | m |

전산 해석 기법을 탈질 설비 내의 유동장 특성 연구에 적용하면 효과적인 결과를 기대할 수 있다. Chung et al. [7]은 폐 열회수보일러에 설치되는 탈질 설비 형태를 모사하여 AIG의 유동 제어에 대한 연구를 하였고, Kim et al. [8]은 800 MW급인 영동화력 발전소의 탈질 시스템 내의 NH3/NO 분포 특성을 수치해석 하였다. Seo et al. [9]은 수평형 SCR 설비 내 AIG 유동 분배관의 분배 특성을 3차원 전산 모사를 수행하였다.

본 연구의 목적은 전산해석 기법을 이용하여 배기가스 내 질소산화물의 분포 특성에 적합한 AIG 노즐의 암모니아 분사량을 예측하는 것이다. 유동장은 수평형 모델의 2차원으로 단순화하였고 유동 변수로 4 가지 유형의 질소산화물 분포를 선택하였다. NH3/NO의 혼합 가스 유동장은 범용 열유동 해석 프로그램인 ANSYS-CFD [10]를 사용하였고 실험계획법에 근거한 최적화 도구인 Design Xplorer [11]를 사용하여 출구에서의 NH3/NO 분포가 균일하게 하는 노즐의 암모니아 분사량을 도출하였다.

2. 실험방법

2.1. 해석모델

본 연구에서 해석을 위해 설정된 AIG 형상은 Figure 1과 같이 2D로 8개의 노즐로 설정하여 연소가스의 흐름 방향과 같게 하고, 또한 유량변화에 의한 토출 유량 균일도 파악을 위한 형상은 Figure 1과 같이 단순화한 2차원 배치형상이며 노즐의 직경은 14 mm로 균일하게 설정하였다.

덕트의 크기는 삼천포 발전본부 #3,4호기의 형상 데이터를 참조하여 길이를 25.6 m, 높이는 3.2 m, 입구에서부터 노즐까지의 거리를 6.4 m로 설정하였다. Table 1에서와 같이 유동장 조건에서는 입구에서의 NOx의 속도는 15.56 m s⁻¹, 탈질설비의 온도인 640.15 K로 하여 해석모델을 설정하였다[12].

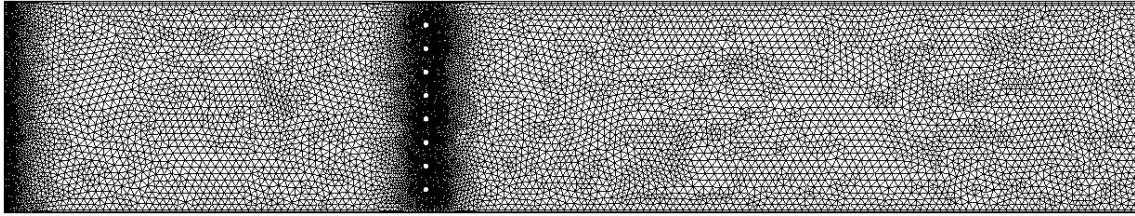


Figure 2. Computational grids for the entire flow fields.

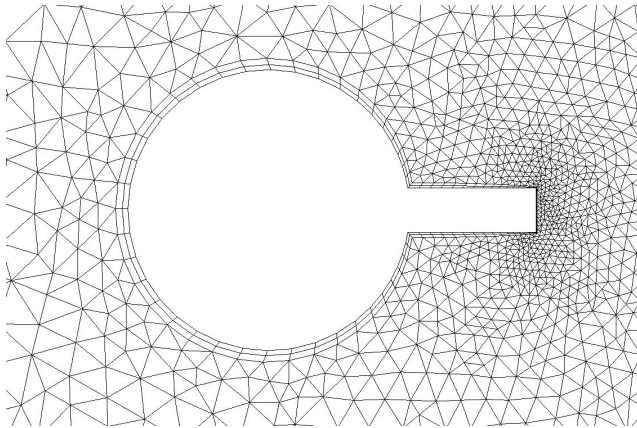


Figure 3. Blow-up of computational grids near the nozzle.

2.2. 유동장 해석 기법

전산유체해석에서의 경계조건은 해석 결과의 신뢰성에 큰 영향을 끼친다. 이전의 많은 연구자들에 의해 노즐에 관한 모델들을 가정하여 해석을 통해 검증하였고, 이에 본 연구에서는 경계조건에 관해 면밀하게 검토 하였다.

본 연구에서는 AIG 시스템에서의 유동을 단열상태 및 비압축성 유체로 가정하여 해석을 진행하였다. 이는 점성의 변화와 밀도의 변화가 유체 내부에서 매우 작거나 없을 때 적용할 수 있는데 유동의 분배해석에 관해 무리없이 적용될 수 있는 가정이다. 그렇지만 실제 조건의 유동인 경우 온도 같은 열적 조건에 따라 유속이 변할 수 있으므로 보편타당한 구속 조건인 질량유량의 보존조건을 설정하여 계산결과의 타당성을 확보하였다.

본 연구에서 사용된 계산 격자는 Figure 2와 Figure 3과 같이 벽면에서는 사형의 정규 격자형을 그 외에는 삼각형의 비정규 격자형을 선택하였다. 총 51,760개의 격자가 해석에 사용되었다. 보일러에서 탈질설비 입구로 유입되는 연소 가스는 질소산화물(NOx)로 가정하고, AIG에 유입되는 가스는 전부 암모니아(NH₃)로 가정하여 계산하였다. 실제 설비에 유입되는 암모니아 희석 가스는 하나의 SCR 시스템에 입구 유량이 15.56 m s⁻¹, 온도 367 °C (640.15 K)로 유입된다.

유동장 입구에서의 배기가스의 유동 형태는 Figure 4와 같이 균일 유동(uniform inlet flow), 포물선 분포(parabolic inlet flow), 상향 슬림 형태(upper-skewed inlet flow), 임의의 형상(random inlet flow) 등 4가지의 유동형태로 설정하였다.

유동장 해석에는 연속방정식과 난류모델로 하는 Navier-

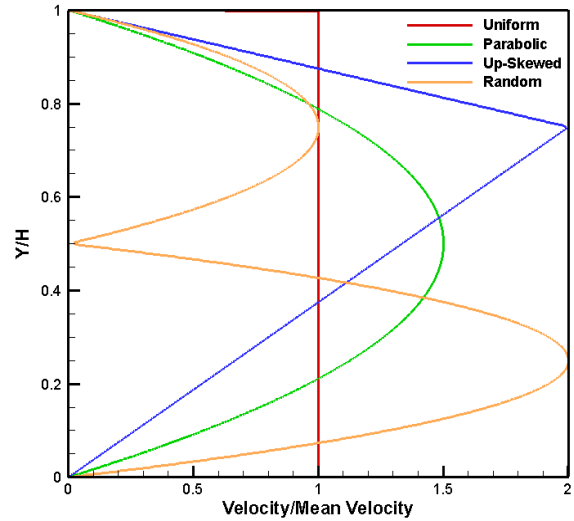


Figure 4. Flow pattern of inlet flue gas.

Stocks 방정식을 사용하였고, K-엡실론(k-ε) 난류 모델은 난류 유동 조건에 대한 평균 유량 특성을 시뮬레이션하기 위해 사용하였다[10]. 표준 벽 방정식(standard wall function) 적용에 적절하게 벽면에 격자를 밀집시켰다. 또한 공기, 일산화질소, 암모니아의 혼합 기체의 거동 해석에 적합한 종확산 모델(species transport model)을 사용하여 하였다.

유동의 균일도를 분석하기 위하여 평균제곱근오차(root mean square, RMS)로 판단하였다. 본 연구에서는 NH₃/NO 몰 비(M)의 관점에서 Equation (2)와 같이 질량 유량에 대한 가중치를 적용하였다.

$$M_{rms} = \frac{1}{M} \sqrt{\frac{\sum \{(M_i - \bar{M})^2 dm_i\}}{m}} \times 100[\%] \quad (2)$$

여기서 \bar{M} 은 몰 비의 평균을 나타낸다.

2.3. 최적화 기법

본 연구에서는 탈질설비 입구에서의 배기가스 내 질소산화물의 유동 형태에 따라 실험계획법에 기반한 알고리즘으로 8개 노즐의 속도를 각각 조절하여 촉매층의 선단부로 지정되는 후단 X/H = 3 위치에서의 NH₃/NO 몰 비의 RMS 값, 즉 M_{rms} 을 최소화하는 방향으로 해석을 진행하였다. AIG의 공기 분사량은 총 192 m³ s⁻¹로 노즐 당 평균속도는 24 m s⁻¹로

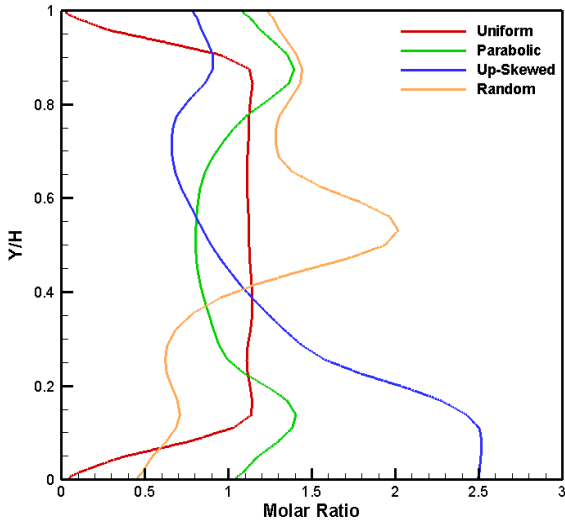


Figure 5. Spanwise variation of NH₃/NO molar ratio at X/H=3 before AIG flow control.

설정하였다.

이와 같은 각 노즐의 유량 변수에 대한 최적화를 수행하기 위하여, 본 연구에서는 상용 최적화 프로그램인 ANSYS Design Xplorer를 사용하였다[11]. 최적화 순서는 실험계획법 (design of experiment, DOE), 응답표면형성(response surface approximation, RSA), 최적화(optimization)의 순서로 진행된다.

실험계획법에서 상호관계를 이해할 수 있는 충분한 데이터를 수집하면서 실험횟수를 줄이는 과학적 방법으로 “optimal space-filling design”기법을 선택하였다. 이와 같은 실험계획법을 통해 목적함수(object function)인 각 노즐의 유량의 근사 값에 대한 정보를 얻을 수 있다.

두 번째 단계로, 유량 변수의 범위 내에서 근사 함수(approximation function)을 도출하기 위하여, 응답표면에서는 계산점들을 정확히 일치시켜 보간 하고 정확한 계산값을 확인하기 위해 “kriging” 기법을 적용하였다.

이러한 근사 모델을 통해 얻어진 유량 변수에 따른 근사 함수를 기반으로 최적화를 위해 “다중목적유전자알고리즘 (multi-objective genetic algorithm, MOMGA)”을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 해석은 총 2단계로 진행되었다. 첫 번째 단계에서는 배기가스의 NO 분포 형태에 상관없이 AIG 노즐에서의 분사 유량을 일정하게 하여 출구(X/H=3)에서의 유량 균일도를 파악하였다. 두 번째 단계에서는 2.3의 최적화 기법을 적용하여 NO 분포에 따른 AIG 노즐의 분사량을 조절하여 NH₃/NO 몰 비의 개선 효과를 분석하였다.

3.1. AIG 유량제어 전의 유동해석

Figure 4와 같이 입구에서의 4가지 배기가스의 유량 분포에 대해 AIG 노즐에서 일정한 속도 24 m s⁻¹로 유량을 분사했

Table 2. Comparison of AIG flow at uniform inlet flow

| Number of Nozzle | Before control | After control | Unit |
|------------------|----------------|---------------|-------------------|
| Nozzle 1 | 24 | 32.42 | m s ⁻¹ |
| Nozzle 2 | 24 | 16.68 | m s ⁻¹ |
| Nozzle 3 | 24 | 26.91 | m s ⁻¹ |
| Nozzle 4 | 24 | 22.33 | m s ⁻¹ |
| Nozzle 5 | 24 | 18.91 | m s ⁻¹ |
| Nozzle 6 | 24 | 26.66 | m s ⁻¹ |
| Nozzle 7 | 24 | 16.21 | m s ⁻¹ |
| Nozzle 8 | 24 | 33.66 | m s ⁻¹ |

을 때 촉매층이 설치될 출구(X/H=3)에서의 NH₃/NO 몰 비의 분포는 Figure 5와 같은 결과를 얻었다. 이상적인 몰 비는 1이다. 몰 비가 1보다 크면 촉매층으로 암모니아가 많이 유입되고 1보다 작으면 질소산화물이 많이 유입된다.

균일 유동(uniform)에서는 벽면 부근에서 질소산화물이 많이 유입되어 암모니아와 환원이 적게 되어 질소산화물이 외부로 방출될 가능성이 크다. 포물선 유동(parabolic)에서는 벽면과 중간에서는 혼합이 이뤄지지 않음을 확인 할 수 있다. 상향 슬립 유동(upper-skewed)에서는 아래벽면 쪽에서는 NOx량이 많아 혼합이 이뤄지지 않음을 확인할 수 있다. 임의 유동(random)에서는 중앙부에서 몰 비가 크므로 잔존하는 암모니아로 암모니아 슬립 현상이 나타날 가능성이 크다.

Equation (2)에 의한 몰 비에 의한 평균제곱근오차(RMS), M_{rms} 는 균일 유동에서는 28.4%, 포물선 유동에서는 19.7%, 상향 슬립 유동에서는 42.4%, 임의 유동에서는 38.7%이었다.

3.2. AIG 유량제어에 의한 유동 균일성 개선

암모니아와 질소산화물의 환원 작용이 일어나는 촉매층을 후류인 X/H=3으로 설정하여 Equation (2)로 정의되는 NH₃/NO 몰 비의 RMS 값이 최소화가 되는 노즐의 유속을 2.3 절의 최적화 기법으로 산출하였다.

입구에서의 질소산화물 분포 형태가 균일 유동인 경우에서의 AIG 각 노즐에서의 제어된 유량의 값을 유속으로 표현하면 Table 2와 같다. Figure 5에 도시된 바와 같이 유동 제어 전에는 벽면에서 몰 비가 작게 나타났는데 제어된 유량에서는 이를 개선하기 위해 암모니아의 유량을 증가시켰다. AIG 분사 총 유량을 고정시켰으므로 다음 번 노즐의 유속은 상대적으로 작게 조정되었다.

X/H=3에서의 몰 비 분포를 유동 제어 전과 제어 후를 비교하면 Figure 6과 같다. 벽면은 약간 개선되었으나 중간 부분은 AIG 유량의 분포 특성으로 1 부근에서 파동 형태를 나타내었다. 중앙에서 몰 비가 1 보다 약간 크다는 것은 질소산화물의 환원에 소요되는 암모니아의 총 분사량이 많다는 것을 의미한다. X/H=3에서의 M_{rms} 은 유량제어 전의 28.4%에서 유량 제어 후에는 25.6%로 9.58%의 개선을 보였다. Figure 7은 전 유동 영역에서의 몰 비의 분포 양상을 유동 제어 전과 후를 비교한 것으로 별다른 차이가 발견되지 않는다. 벽면에서의 몰 비는 1이하로 질소산화물의 환원에 필요한 암

Table 3. Comparison of AIG flow at parabolic inlet flow

| Number of Nozzle | Before control | After control | Unit |
|------------------|----------------|---------------|-------------------|
| Nozzle 1 | 24 | 15.85 | m s^{-1} |
| Nozzle 2 | 24 | 21.89 | m s^{-1} |
| Nozzle 3 | 24 | 24.27 | m s^{-1} |
| Nozzle 4 | 24 | 32.22 | m s^{-1} |
| Nozzle 5 | 24 | 33.42 | m s^{-1} |
| Nozzle 6 | 24 | 27.98 | m s^{-1} |
| Nozzle 7 | 24 | 20.66 | m s^{-1} |
| Nozzle 8 | 24 | 16.32 | m s^{-1} |

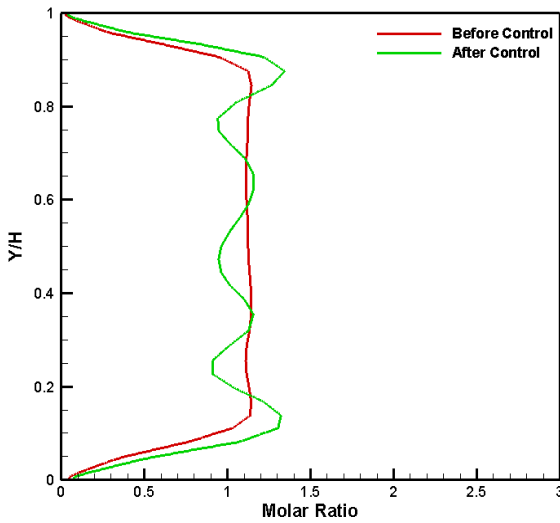


Figure 6. Comparison of NH_3/NO molar ratio at $X/H=3$ at uniform inlet flow.

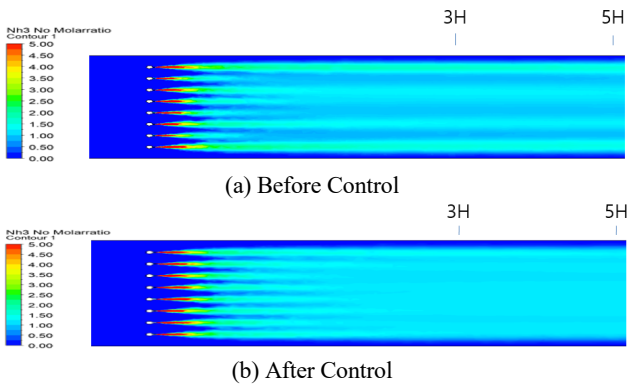


Figure 7. Distribution of NH_3/NO molar ratio at uniform inlet flow.

모니아의 분사량이 부족함을 보여준다.

Table 3은 포물선 형태로 NO가 유입된 경우에서의 AIG 각 노즐에서의 제어된 유속의 결과를 보여준다. 유동 제어 전에는 Figure 5에 나타난 바와 같이 벽면 부근에서 물 비가 크고 상대적으로 중앙에서는 작게 나타났다. 이를 개선하기 위해 최적화의 결과로 벽면에서는 암모니아의 유량을 줄이고 중앙에서는 증가됨을 보여준다.

이 결과로 Figure 8과 같이 $X/H=3$ 에서 물 비가 개선되었음을 확인할 수 있다. Figure 9(a)에서와 같이 유동 제어 전에

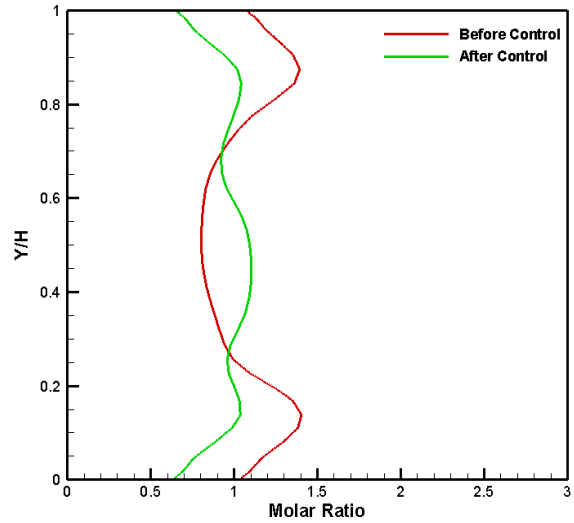


Figure 8. Comparison of NH_3/NO molar ratio at $X/H=3$ at parabolic inlet flow.

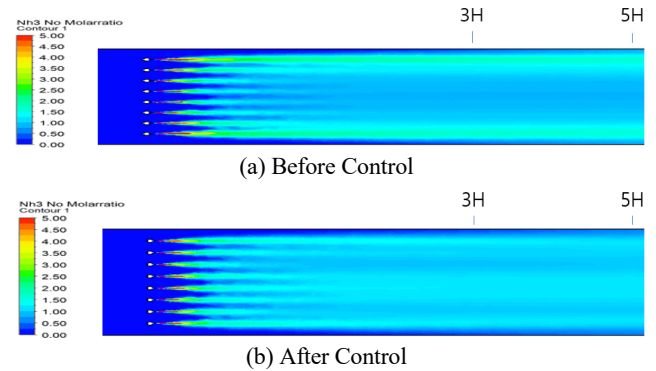


Figure 9. Distribution of NH_3/NO molar ratio at parabolic inlet flow.

는 벽면 부근에서의 녹색 띠(물 비가 1 이상)와 중앙의 청색 띠(물 비가 1 이하)가 후류에서도 여전히 발견되지만 유동 제어 후인 Figure 9(b)에서는 거의 희석되었음을 알 수 있다. 이 결과 $X/H=3$ 에서의 M_{rms} 은 유량제어 전의 20.0%에서 유량제어 후에는 9.30%로 AIG의 유량 제어로 물 비의 균일도가 52.7%의 향상을 보였다.

질소산화물의 분포가 상향 솔림 형태인 경우는 앞의 두 경우보다 변화가 크다. Figure 5의 결과에 보듯이 AIG에서 암모니아를 균일하게 분사하면 하향 벽면 부근에서 물 비의 불균형이 매우 크게 나타났고 M_{rms} 도 42.2%로 크다. 이를 개선하기 위한 유동의 제어 결과는 Table 4와 같이 상향 부근이 $Y/H=0.7$ 부근에서 최대 유속을 보여준다. 이러한 유동 제어의 결과로 물 비가 불균형한 지점에서의 개선된 효과를 Figure 10에서 확인할 수 있다.

배기가스 내 NO의 분포 양상을 고려하지 않고 AIG에서 균일한 양의 NH_3 를 분사할 경우에는 Figure 11(a)에서와 같이 하향에서 짙은 녹색 띠와 상향의 짙은 청색 띠가 뚜렷이 나타나고 후류에서도 그대로 유지되었지만 유동 제어 후인 Figure 11(b)에서는 물 비의 불균형이 많이 희석되었음을 확인할 수

Table 4. Comparison of AIG flow at up-skewed inlet flow

| Number of Nozzle | Before control | After control | Unit |
|------------------|----------------|---------------|-------------------|
| Nozzle 1 | 24 | 27.13 | m s ⁻¹ |
| Nozzle 2 | 24 | 31.97 | m s ⁻¹ |
| Nozzle 3 | 24 | 35.07 | m s ⁻¹ |
| Nozzle 4 | 24 | 30.71 | m s ⁻¹ |
| Nozzle 5 | 24 | 26.50 | m s ⁻¹ |
| Nozzle 6 | 24 | 16.30 | m s ⁻¹ |
| Nozzle 7 | 24 | 12.15 | m s ⁻¹ |
| Nozzle 8 | 24 | 12.12 | m s ⁻¹ |

Table 5. Comparison of AIG flow at random inlet flow

| Number of Nozzle | Before control | After control | Unit |
|------------------|----------------|---------------|-------------------|
| Nozzle 1 | 24 | 15.56 | m s ⁻¹ |
| Nozzle 2 | 24 | 18.32 | m s ⁻¹ |
| Nozzle 3 | 24 | 12.56 | m s ⁻¹ |
| Nozzle 4 | 24 | 12.04 | m s ⁻¹ |
| Nozzle 5 | 24 | 13.86 | m s ⁻¹ |
| Nozzle 6 | 24 | 35.92 | m s ⁻¹ |
| Nozzle 7 | 24 | 35.74 | m s ⁻¹ |
| Nozzle 8 | 24 | 35.98 | m s ⁻¹ |

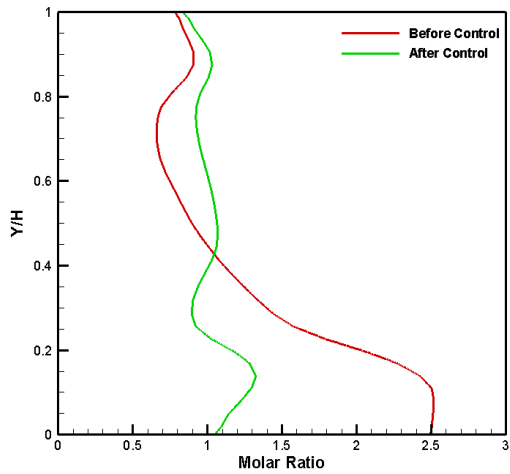


Figure 10. Comparison of NH₃/NO molar ratio at X/H=3 at upper-skewed inlet flow.

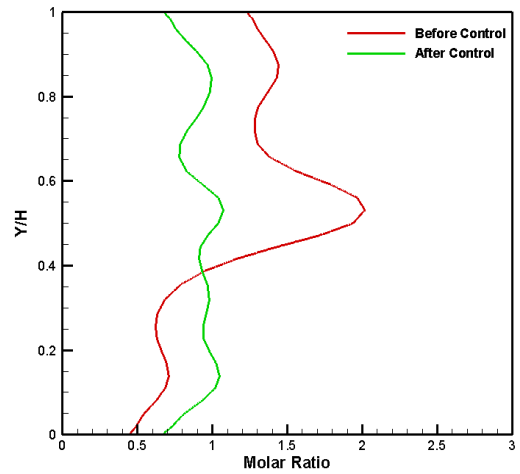


Figure 12. Comparison of NH₃/NO molar ratio at X/H=3 at random inlet flow.

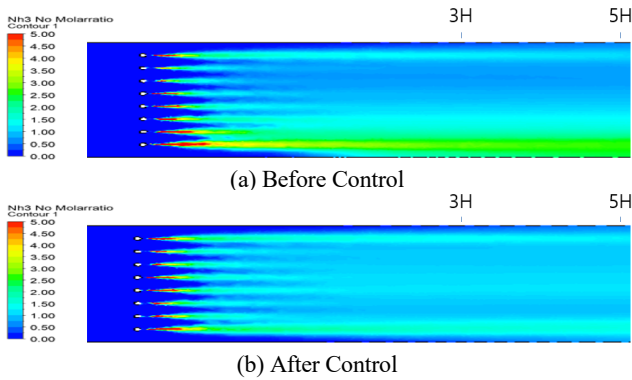


Figure 11. Distribution of NH₃/NO molar ratio at upper-skewed inlet flow.

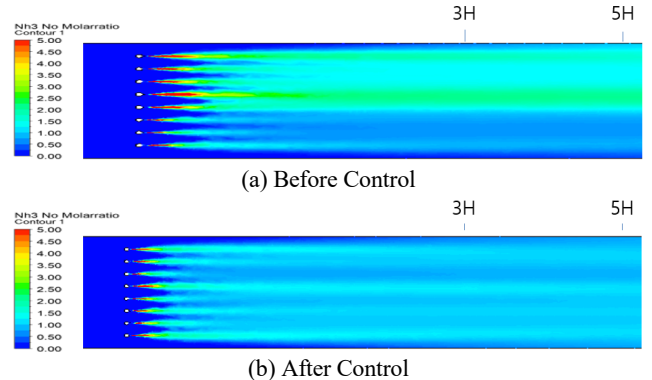


Figure 13. Distribution of NH₃/NO molar ratio at random inlet flow.

있다. 이 결과 X/H=3에서의 M_{rms} 은 유량제어 전의 42.2%에서 유량 제어 후에는 8.47%로 AIG의 유량 제어로 몰 비의 균일도가 80.0%로 크게 향상되었다.

입의 분포 형태는 질소산화물의 분포가 4가지 유형 중 가장 복잡한 유형이다. Figure 5의 결과에 보듯이 AIG에서 압모니악을 균일하게 분사하면 하향 벽면 부근에서 몰 비가 작게, 중앙에서는 최대, 상향에서는 다시 감소하는 복잡한 분포를 보이고 M_{rms} 도 38.7%로 크다. 이를 개선하기 위한 유동의 제어 결과는 Table 5와 같이 하향에서의 유량이 상향의 2배

이상으로 유량의 차이가 크다. 이러한 유동 제어의 결과로 몰 비가 불균형한 지점에서의 개선된 효과를 Figure 12에서 확인할 수 있다. 유동 제어 전에는 몰 비가 0.5에서 2.1로 변화가 크지만 제어 후에는 0.7에서 1.2로 변화의 폭이 줄어들었다.

배기가스 내 NO의 분포 양상을 고려하지 않고 AIG에서 균일한 양의 NH₃를 분사할 경우에는 Figure 13(a)에서와 같이 후류에서의 몰 비 변화가 뚜렷이 나타나지만, 유동 제어 후인 Figure 13(b)에서는 몰 비의 불균형이 많이 희석되었음을 확인할 수 있다. 이 결과 X/H=3에서의 M_{rms} 은 유량제어 전의

Table 6. RMS of NH₃/NO molar ratio at X/H=3

| Case | Before control | After control | Improvement | Unit |
|----------------|----------------|---------------|-------------|------|
| Uniform flow | 28.4 | 25.7 | 9.58 | % |
| Parabolic flow | 20.0 | 9.30 | 52.7 | % |
| Up-skewed flow | 42.2 | 8.47 | 80.0 | % |
| Random flow | 38.7 | 8.98 | 79.8 | % |

38.7%에서 유량 제어 후에는 8.98%로 몰 비의 균일도가 79.8%로 크게 향상되었다.

본 연구에서 수행한 결과를 NH₃/NO 몰 비의 균일도인 M_{rms} 관점에서 정리하면 Table 6과 같다. 최적화에 의한 AIG의 유량 제어는 균일 유동보다는 임의 유동 형태와 같이 배기가스의 NO분포가 불균일할수록 효를 크게 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 전산유체역학 기법을 이용하여 입구 배기가스의 4가지 유동 형태에 대한 NH₃/NO 몰 비의 균일화를 위한 최적의 AIG 분사량을 도출하였다.

이 결과, 출구 X/H=3 지점에서의 몰 비에 의한 평균제곱근 오차(RMS), M_{rms} 는 균일 유동에서는 9.58%, 포물선 유동에서는 52.7%, 상향 슬립 유동에서는 80.0%, 임의 유동에서는 79.8%의 개선됨을 확인하였다.

배기가스 내 질소산화물의 분포가 불균일할수록 AIG의 암모니아 분사량의 제어는 효과를 크게 나타냈다.

본 연구 결과로 탈질설비 운전 시 입구 유동흐름에 따른 유량을 최적화하여 탈질 설비 후단 반응의 균일화를 가능하게 하였다. 이로 인해 탈질설비의 성능을 향상시키고 암모니아 슬립에 의한 후단설비의 손상을 방지할 수 있을 것이며, NH₃/NO 슬립 현상의 예측과 AIG 운전을 위한 자료로의 활용을 기대할 수 있다.

감사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 2018 1110100320). 김민규 군은 BK21 플러스사업 차세대기체항공 창의적인재양성사업단의 참여 대학원생입니다.

References

- Choi, H. W., "Economic Operation of SCR Equipment," *KOEN Sustainability Management Forum*, Report No. 2 (2014).
- Zhu, T., Li, D., Fang, Q., and Cheng, G., "Flow Field Optimization for SCR System of Coal-Fired Power Plant," *J. Chin. Soc. Power Eng.*, 35(6), 481-488 (2015).
- Zhao, D., Sheng, H., and Zheng, W., "CFD Study on Selective Catalytic Reduction of 660MW Unit," *Int'l Conf. on Machinery, Materials and Computing Technology* (2016).
- Seo, M. H., and Chang, H. S., "Computational Study on Design of the AIG for the Enhancement of Ammonia Injection in the SCR System," *Clean Technol.*, 18(4), 410-418 (2012).
- Lee, S. H., Shin, S. W., and Kim, J. S., "An Optimized Analysis of the Optimal flow Uniformity in SCR Facility for Small-and Mid-Sized CHPs," *Korea Plant J.*, 3(9), 48-52 (2013).
- Kim, K. S., and Lee, K. O., "Numerical Study on Optimization of the SCR Process Design in Horizontal HRSG for NOx Reduction," *J. Environ. Sci. Int.*, 11(22), 1481-1498 (2013).
- Chung, H. T., Na, J. I., and Lee, D. H., "Numerical Study on Flow Characteristics around Ammonia Injection Gun for Denitrification of Flue Gases in the SCR System," *Proc. 12th ACFD*, Taiwan (Oct. 2018).
- Kim, B. S., Seo, D. C., Park, H. Y., and Chung, H. T., "Numerical Study on Flow Control Around Ammonia Injection System in DeNOx Facilities," *Proc. KSME Spring meeting*, Changwon, 29-30 (May 2019).
- Seo, D. C., Kim, M. K., and Chung, H. T., "Numerical Study on the Flow Characteristic of the Ammonia Injection System for DeNOx facilities," *Proc. KSCFE Spring meeting*, Jeju (May 2019).
- ANSYS, ANSYS CFD - Fluent Guide, ANSYS Inc. (2017).
- ANSYS, ANSYS Workbench - Mechanical Optimization Guide, ANSYS Inc. (2019).
- Lee, D. H., "Numerical Study on the Flow Characteristics around the Guide Vanes in SCR System of Coal Fired Power Plant," Master Thesis, Gyeongsang National University, Jinju (2019).