

석탄화력 발전소 탈질설비의 암모니아 분사시스템 설계를 위한 CFD 기법 적용에 관한 연구

김민규, 김병석, 정희택*

경상대학교 기계공학부
52828 경남 진주시 진주대로 501

(2021년 2월 15일 접수; 2021년 3월 10일 수정본 접수; 2021년 3월 10일 채택)

Application of CFD to Design Procedure of Ammonia Injection System in DeNOx Facilities in a Coal-Fired Power Plant

Min-Kyu Kim, Byeong-Seok Kim, and Hee-Taeg Chung*

School of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University
501, Jinju-daero, Jinju, Gyeongnam, 52828, Republic of Korea

(Received for review February 15, 2021; Revision received March 10, 2021; Accepted March 10, 2021)

요 약

선택적 촉매 혼합법은 대용량의 화력 발전시스템에서 질소산화물을 제거하는 방법으로 많이 사용되고 있다. 분사된 암모니아와 유입된 배기가스의 균일한 혼합은 촉매 층에서의 탈질 환원 과정에서 매우 중요하다. 본 연구에서는 탈질설비의 암모니아 분사시스템 설계과정에 전산해석 기법을 적용하였다. 적용 모델은 현재 가동되고 있는 800 MW급 석탄 화력 발전소의 탈질설비이다. 유동 해석 범위는 암모니아 분사 시스템 입구에서 촉매 층 후단부이다. 2차원 유동장을 선택하였고 비압축성으로 가정하였다. 상용 소프트웨어인 ANSYS-Fluent를 사용하여 정상 상태의 난류 유동을 해석하였다. 설계 변수로는 암모니아 분사 시스템에서의 노즐 배치 간격과 분사 유량으로 4가지 경우에 대해 결과를 분석하였다. 촉매 층 입구에서의 몰 비에 의한 평균제곱근오차 값을 최적화 변수로 선정하였고 실험계획법을 기반으로 한 최적화 알고리즘을 도입하였다. 노즐 피치와 유량을 동시에 조절할 경우가 유동 균일성 관점에서 가장 우수하였다.

주제어 : 탈질, 암모니아 분사, 유동 제어, 전산해석, NOx 분포

Abstract : Selective catalytic reduction (SCR) is widely used as a method of removing nitrogen oxide in large-capacity thermal power generation systems. Uniform mixing of the injected ammonia and the inlet flue gas is very important to the performance of the denitrification reduction process in the catalyst bed. In the present study, a computational analysis technique was applied to the ammonia injection system design process of a denitrification facility. The applied model is the denitrification facility of an 800 MW class coal-fired power plant currently in operation. The flow field to be solved ranges from the inlet of the ammonia injection system to the end of the catalyst bed. The flow was analyzed in the two-dimensional domain assuming incompressible. The steady-state turbulent flow was solved with the commercial software named ANSYS-Fluent. The nozzle arrangement gap and injection flow rate in the ammonia injection system were chosen as the design parameters. A total of four (4) cases were simulated and compared. The root mean square of the NH_3/NO molar ratio at the inlet of the catalyst layer was chosen as the optimization parameter and the design of the experiment was used as the base of the optimization algorithm. The case where the nozzle pitch and flow rate were adjusted at the same time was the best in terms of flow uniformity.

Keywords : Denitrification, Ammonia injection, Flow control, Computational 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.2021.27.1.61 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

석탄을 주원료로 하는 증기화력 발전 시스템에서는 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x), 비산회(flying ash)가 주요 환경 유해물질이다. 이 중 질소산화물을 제거하는 방법으로 대형 화력 발전소에서는 대부분 선택적 촉매환원(selective catalytic reduction, SCR) 방법을 채택하고 있다[1].

석탄 화력 발전소에 설치되는 SCR형 탈질 설비는 Figure 1과 같이 유동 굴절과 확산 등 다소 복잡한 유동 구조를 가진다. 이에 대한 성능 개선을 위해서 고려해야할 인자는 배열회수보일러(heat recovery steam generator, HRSG)에 설치되는 탈질 시스템보다 훨씬 많다.

화력 발전소 내의 SCR 시스템에서 가장 중요한 요소는 촉매층 전단의 유동 특성과 균일성이다. Zhao et al. [2]은 660 MW급 발전용 설비의 SCR 시스템에 대하여 촉매 입구에서의 유동 특성을 예측하는 연구를 수행하였다. Lee et al. [3]은 국내에서 가동되는 500 MW급 화력 발전소에 설치된 SCR 시스템 내 곡확산부(turning-and-diffusing part)에 따른 유동 특성 및 성능을 비교하였다. Hwang et al. [4]은 SCR의 촉매층 전단으로 유입되는 혼합가스의 열유동 특성에 대한 연구를 수행하여 분석하였다. Zhu et al. [5]은 550 MW급 석탄화력 발전소에 설치된 탈질 시스템에 최적화 기법을 이용하여 성능을 향상시키는 연구를 수행하였다.

실증을 위한 파일럿 플랜트에서의 실험 결과에 전산해석기법을 비교 분석한 연구도 활발히 진행되고 있다. Ha and Kim [6]은 화력 발전용 탈질설비의 모형 실험을 통해 유동 및 농도 균일화 특성 관점에서 가이드 베인의 형상이 농도 혼합에 미치는 영향에 대해 연구를 진행하였다. Lee et al. [7]은 축소된 모형에 대해 실험과 전산해석기법을 통한 결과의 비교 연구로 설계 자료를 확보하였다. Yu et al. [8]은 촉매 층 전단에서의 유동 분포와 혼합 균일도가 탈질설비의 효율에 영향을 있음을 확인하였다. Jang et al. [9]은 580 MW급인 복합화력 발전소에서

출력에 따른 암모니아 소모량을 확인하여 질소산화물 배출량 저감에 대한 데이터를 확보하였다.

탈질 설비의 효율을 증가시키기 위해서는 암모니아 분사 그리드(ammonia injection grid, AIG) 내에 설치되는 노즐의 설계 변수에 대한 연구가 진행되고 있다. Kim and Lee [10]는 수평형 폐열회수보일러 내 암모니아 노즐에 대하여 분사 방향, 노즐 직경 등을 해석 변수로 선정하여 전산해석을 시행하여 최적 설계조건에 대한 필요성을 제시하였다. Park et al. [11]은 SCR 시스템 내 암모니아 분사 노즐의 각도, 분사량, 형상 등이 암모니아 농도 분포에 미치는 영향을 수치 해석 기법으로 연구하였다.

최적화 기법과 해석을 혼합하면 더 좋은 결과를 기대할 수 있다. Buzanowski and Fadda [12]는 노즐의 분사 유량의 최적화로 혼합 균일도의 개선 효과를 확인하였다. Chung et al. [13]은 HRSG 내에 설치된 AIG 분사 노즐의 배열 간격과 각도를 조절하여 혼합 가스의 균일성을 개선하는 연구 결과를 보고하였다. Seo et al. [1]은 탈질 설비 내 유입되는 배기가스의 유동 분포에 적합한 AIG 분사노즐의 분사 유량을 최적화를 통해 결정하여 암모니아 슬립 현상을 방지하고 AIG 운전을 위한 데이터를 확보하는 연구를 진행하였다.

탈질설비의 설계 과정에 전산유동해석을 적용하면 시간과 비용 측면에서 효율적이다. 이와 더불어 최적화 기법을 추가하면 최선의 설계를 기대할 수 있다. 본 연구에서는 암모니아 분사시스템의 노즐부 설계 과정에 최적화 전산해석 기법을 적용하여 설계 도구로서의 유용성을 확인하고자 한다.

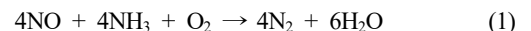
노즐부의 설계 인자는 배열 간격, 분사 각도, 분사 유량, 노즐의 분사 형상 등 다양하다. 본 연구에서는 이 중 기하학적인 인자인 노즐 배열과 운전 제어 인자인 분사 유량 등 2가지 관점에서 분석하였다.

2. 실험방법

2.1. 적용모델

본 연구에 채택한 모델은 영흥 화력발전소에 설치되어 있는 탈질설비이다[14]. 유동장의 해석의 범위는 Figure 2와 같이 배기가스가 유입되는 암모니아 분사 시스템(AIG)의 입구에서 3단으로 구성된 촉매 층의 출구이다. 피치(pitch) 방향의 길이는, 입구에서 3.2 m이고 출구에서는 11.8 m로 확대되어 확산비는 3.69이다. 배기가스가 AIG에서 촉매 층으로 수직으로 선회하므로 유동 굴절각은 90°이다.

배기가스의 유입 속도는 15.56 m s⁻¹이다. 배기가스의 질소산화물에서 일산화질소(NO)의 비율이 90% 이상이므로 유입 배기가스는 공기와 NO로만 구성하였다[15]. AIG에서 분사되는 혼합기체는 공기와 암모니아(NH₃)로 구성된다. 이상적인 환원 작용이 유지되기 위해서는 아래의 Equation (1)과 같이 암모니아와 일산화질소의 몰 비는 1이 되어야 한다.



본 연구에서는 AIG의 분사노즐을 8개로 설정하여 평균 분사

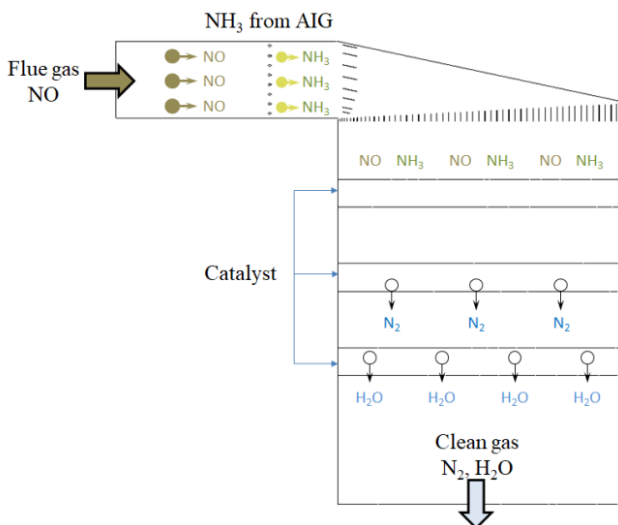


Figure 1. Concept of SCR-deNOx process in a coal-fired power plant.

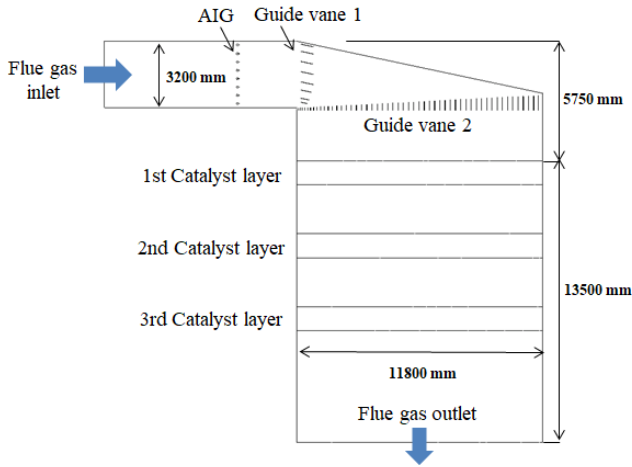


Figure 2. Definition of flow fields.

Table 1. Flow conditions

Locations	Descriptions	Value	Unit
Inlet flue gas	Mean velocity of air	15.56	$m s^{-1}$
	NO/air ratio	125	PPM
Injected ammonia gas	Mean velocity of air	24	$m s^{-1}$
	NH ₃ /air ratio	1316	PPM
Flow fields	Temperature	367	°C
	Air density	0.5514	$kg m^{-3}$

속도는 $24 m s^{-1}$ 로 설정하였다[14]. 설비 내의 온도는 $367 ^\circ C$ 로 일정하고 압력은 대기압과 같아 내부의 공기 밀도는 $0.5514 kg m^{-3}$ 이다. 유동 조건을 정리하면 Table 1과 같다.

2.2. 유동장의 전산 해석 기법

선행 연구[3]의 결과에 의하면 폭(span) 방향의 영향은 미미하였다. 본 연구에서는 주 유동 방향과 피치 방향만 고려한 2차원 유동장으로 설정하였다. 입구와 출구의 압력차가 0.6 kPa 이내로 작고 최대 유속이 $30 m s^{-1}$ 이내이므로 비압축성으로 가정하였다. 유동은 정상상태로 가정하고 난류 해석을 위해서 Realizable $k-\epsilon$ 모델을 채택하였다. 유동장에는 공기, 일산화질소, 암모니아 등 3가지 기체가 혼합되어 있다. 이에 대한 물질 전달 해석을 위해서 혼합종 모델 방정식(species transport equation)을 사용하였다.

전산 해석은 상용 열유동 해석 프로그램인 ANSYS-Fluent를 사용하였다[16]. 계산 용량의 경감을 위해 촉매 층은 다공성 매질 모델(porous media model)에 유속 $4.22 m s^{-1}$, 투과율 85%, 차압 140 Pa 등 현재 사용 중인 촉매의 물성 데이터를 사용하였다[14]. 유동장 입구에는 $15.56 m s^{-1}$ 의 유속이 조건으로 부여되었고, 출구에서는 정압을 0 Pa로 일정하게 주었다. Figure 3은 ANSYS-Meshing을 이용하여 생성된 계산 격자점을 도시한 것이다. 벽면이나 익형 부근에서는 사각형이고 그 외 영역에서는 삼각형인 복합 격자계이다. 총 격자점 수는 3.1×10^5 개이다.

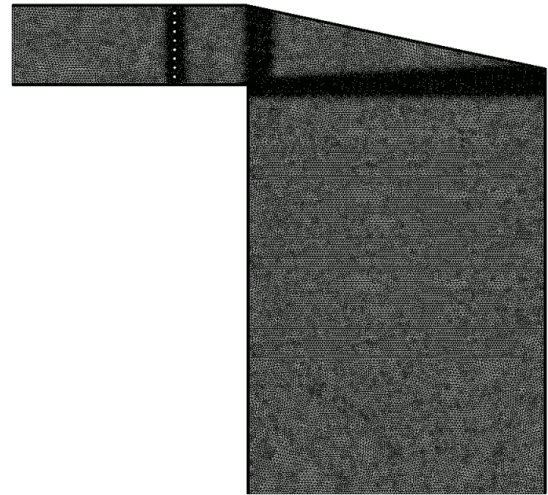


Figure 3. Computational meshes for the entire flow field.

2.3. 해석변수와 최적화 기법

본 연구의 목적은 탈질 성능을 개선하는 방법으로 촉매 층 입구에서의 NH₃/NO 균일도를 개선하는 것이다. 이는 평균 제곱근 오차(root mean square, RMS)로 판단한다. 본 연구에서는 NH₃/NO 몰 비(M)의 관점에서 Equation (2)와 같이 질량 유량에 대한 가중치를 적용하였다[1].

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

여기서 \bar{M} 은 몰 비의 평균으로 본 연구에서는 1이다.

본 연구의 적용 대상은 AIG의 노즐부이다. 설계 인자로는 기하적인 형상 인자와 운전 특성 인자로 구분할 수 있다. 형상 인자로는 노즐의 오리피스 형상, 배치 간격, 분사 각도 등이 주요 인자이다. 운전 인자로는 암모니아와 공기의 비율, 분사 온도 및 압력, 총 분사 유량, 노즐의 분사 유량 제어 등이 있다. 이들 인자들은 모두 탈질 성능에 영향을 주며 많은 연구가 진행되고 있다[1]. 본 연구에서는 이 중 기하학적인 인자인 노즐 배열과 운전 제어 인자인 분사 유량을 기준으로 4가지 조합에 대한 해석 기준을 선정하고 그 결과를 분석하였다.

선택한 해석 변수는 기하학적인 인자로 AIG 노즐의 간격과 운전 조건으로 분사 유량 등 2가지를 선정하고 이에 대한 조합으로 다음과 같이 4가지 경우를 선정하였다. 첫 번째는 노즐 간격이 355.6 mm로 일정하고, 분사유량이 $24 m s^{-1}$ 로 균일한 경우(case 1-a)로 이는 기존의 설계 방법이다. Equation (2)의 M_{rms} 을 최소화하는 방법으로 노즐 분사 량만 최적화 하는 경우(case 1-b), 노즐 간격만 최적화하는 경우(case 2-a), 노즐 간격과 분사 량을 모두 최적화하는 경우(case 2-b) 등 3가지의 설계 개선안을 기존의 설계 조건과 비교하였다. Figure 4는 노즐 간격이 일정한 경우의 AIG 부근의 계산 격자점 분포를 나타낸 것이다.

각 노즐의 해석 변수에 대한 최적화 과정은 실험계획법 (design of experiment, DOE), 응답표면형성(response surface

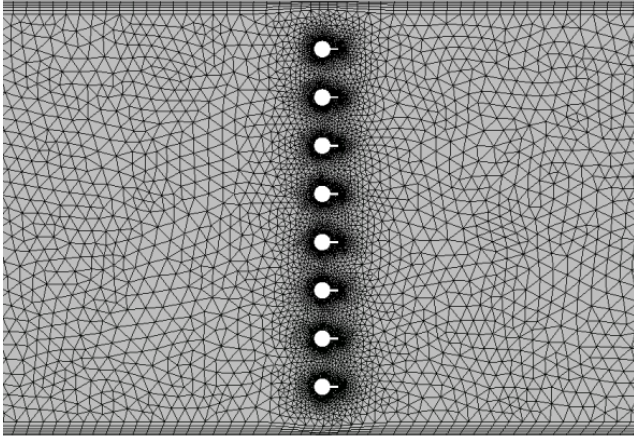


Figure 4. Blow-up of computational grids around the AIG nozzles initially arranged.

approximation, RSA), 최적화(optimization)의 3가지 단계로 진행 된다[17]. 실험계획법에서는 “optimal space-filling design” 기법을 선택하였고, “kriging” 기법으로 응답편면을 형성하였다. 최근에 가장 널리 사용되고 있는 “다중목적유전자 알고리즘 (multi-objective genetic algorithm, MOMGA)”으로 최적화를 완성하였다. 이에 대한 설명은 선행 연구인 참고문헌[1]에 기술되어 있다.

해석 변수에 대한 최적화 해석 절차는 Equation (2)로 정의된 NH₃/NO 몰 비의 RMS 값, 즉 M_{rms} 을 최소화하는 방향으로 결정된다. 예를 들어 case 1-b나 case 2-b와 같이 분사 유량을 최적화하는 경우에는 다음과 같이 3 단계로 진행 된다. 1단계인 초기화에서는 AIG의 공기 분사 량이 각 노즐 당 평균 속도인 24 m s⁻¹로 균일하게 설정된다. 2단계에서는 상용 열유동 해석 프로그램인 ANSYS- Fluent [16]로 유동장을 해석하여 촉매 층 입구에서의 M_{rms} 을 계산하여 수렴 여부를 확인한다. 원하는 목표치에 도달하지 않으면 3단계로 ANSYS Design Xplorer [17]으로 최적화 프로그램을 사용하여 노즐 별로 분사량을 조절하여 2단계인 유동해석을 다시 진행한다. M_{rms} 값이 목표치에 도달할 때까지 2단계와 3단계를 반복하여 수행한다.

노즐 간격의 최적화인 case 2-a는 1단계인 초기화에서는 노즐 간격을 355.6 mm로 일정하게 두고, M_{rms} 을 최소화하기 위해 유동해석인 2단계와 노즐 간격의 조절인 3단계를 반복하여 수행한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 초기 조건에서의 몰 비 특성

초기 조건(case 1-a)은 AIG 분사 노즐에 대한 기존의 설계 기법이다. 덕트의 피치 길이 3.2 m에 AIG의 설치되는 8개의 분사 노즐이 Figure 4와 같이 355.6 mm로 일정하게 배치된 것이다. 노즐 별 분사 유량은 평균 유속인 24 m s⁻¹로 일정하게 분사된다.

Figure 5는 배기가스가 균일하게 유입된 경우 탈질설비 내의

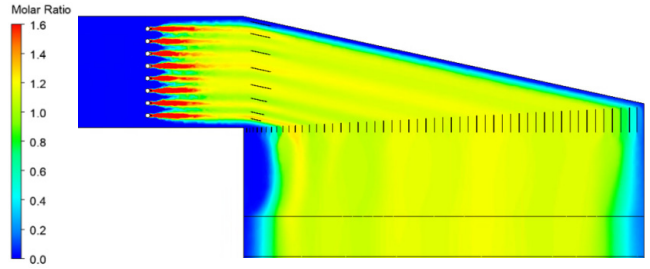


Figure 5. Distribution of NH₃/NO around the flow passage for case 1-a.

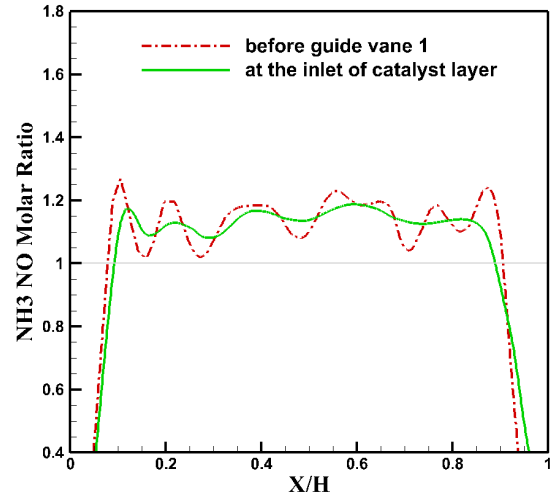


Figure 6. Variation of NH₃/NO ratio for case 1-a.

NH₃/NO의 몰비 분포이다. 벽면 부근에서 몰 비가 1보다 작으므로 NO가 NH₃와 전부 환원되지 않고 잔여 NO가 촉매 층을 빠져나갈 가능성이 있다. 즉, 질산의 농도가 환경 기준치를 초과할 우려가 예상된다.

Figure 2에 보듯이 본 탈질 설비에는 곡확산부에 유동의 선회와 확산을 원활히 유지하기 위해 두 개의 안내 깃(guide vane)이 설치되어 있다. 곡확산부를 따라 몰 비의 분포 변화를 입구와 출구에서 살펴보면 Figure 6과 같다. 출구에서는 유동의 선회와 확산으로 혼합이 일어나서 몰 비가 개선된다. 몰 비의 평균오차인 M_{rms} 값이 곡확산부의 입구에서는 33.12%이나 출구에서는 29.11%로 약간 감소하였다. 양 쪽 벽면 부근에서는 NO가 많고 가운데에는 NH₃가 많이 촉매 층으로 유입된다. 즉, NH₃/NO의 몰 비 불균형이 심하다. 양 쪽 벽면에는 환원되지 못한 잔존 질소산화물(NO)로 환경 오염치가 높을 가능성이 있다. 가운데 부분은 암모니아의 과잉 유입으로 배기가스의 황산과 결합하여 생성되는 황산암모늄으로 후반 설비인 공기에 열기(air heater)의 부식 가능성이 우려된다. 현재의 AIG의 분사 방법을 개선할 필요가 있다.

3.2. 최적화에 의한 몰 비 개선

3.2.1. 분사 유량 조절의 경우

2.3절의 최적화 기법을 사용하여 촉매 층 입구의 M_{rms} 를 최소화 하도록 AIG의 분사 유량을 조절하였다. 분사 유량의 변

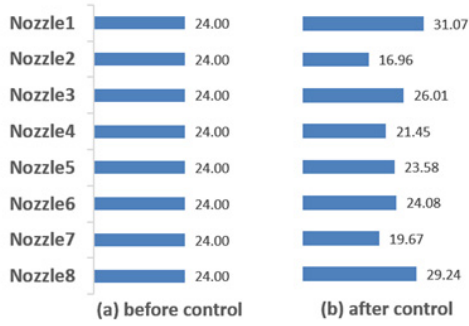


Figure 7. AIG nozzle flow-rate for case 1-b.

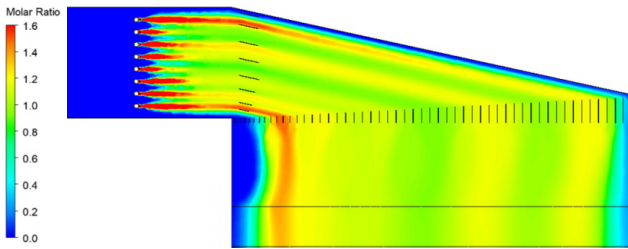


Figure 8. Distribution of NH₃/NO around the flow passage for case 1-b.

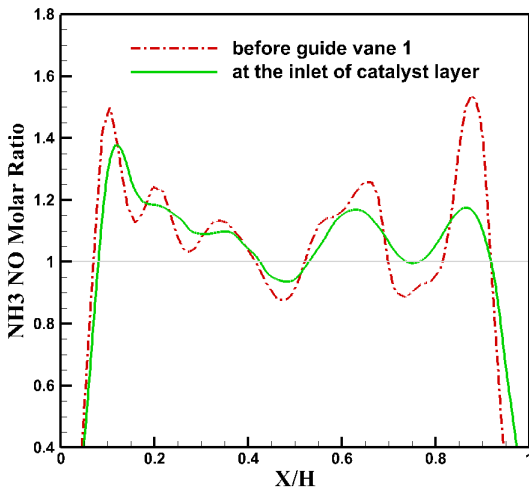


Figure 9. Variation of NH₃/NO ratio for case 1-b.

화는 Figure 7과 같다. 모든 노즐에서 유량이 조절되었다. 벽면 부근에 설치된 1번과 8번의 노즐에서는 암모니아의 분사 유량이 증가하였다. 이는 기존의 case 1-a에서 벽면 쪽에서의 NH₃/NO의 몰 비가 1 보다 작아 두 물질의 혼합이 균일하지 않은 것을 개선한 것이다. 암모니아의 총 분사량은 일정하므로 가운데 노즐의 유량은 평균값보다 작게 조절되었다. 이를 통해 기존에 NH₃/NO 몰 비가 1 보다 큰 부분에 대한 개선이 예상된다.

분사 유량의 조절에 의한 설비 내의 몰 비의 분포는 Figure 8과 같다. 초기 조건인 Figure 5와 비교해 보면 가운데 부분은 몰 비가 1에 접근해 보이나 벽면 쪽은 다소 불안정해 보인다.

곡확산부를 따라 몰 비의 분포 변화를 입구와 출구에서 살펴 보면 Figure 9와 같다. 몰 비의 평균오차는 곡확산부의 입구에서는 34.01%이나 출구에서는 26.58%로 감소한다. 초기 조건인

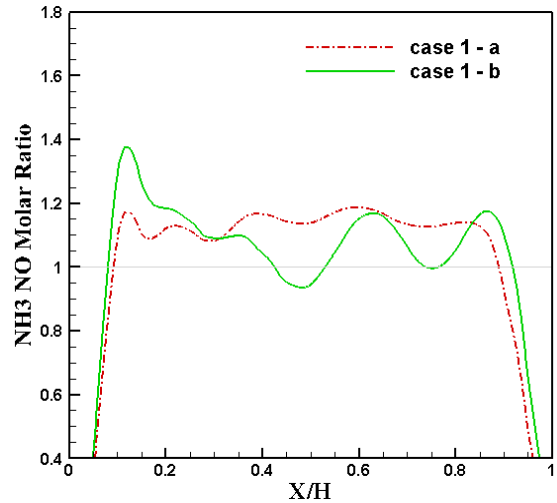


Figure 10. Comparison of molar ratio at the inlet of catalyst layers between case 1-a and 1-b.

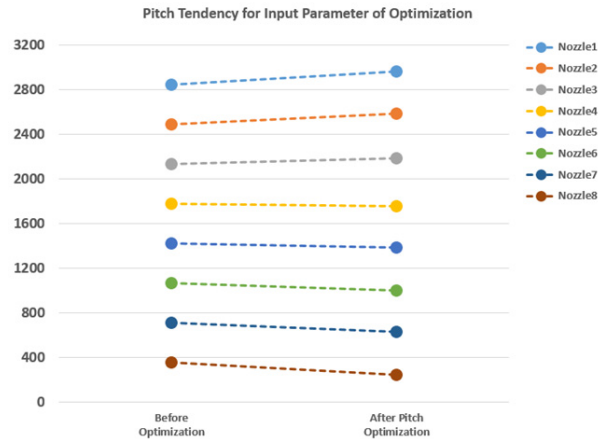


Figure 11. Rearrangement of pitch spacing between AIG nozzles for case 2-a.

Figure 6과 비교해 보면 평균값의 변화는 크지 않다.

분사 유량 조절에 의한 촉매 층 입구에서의 몰 비 변화를 비교하면 Figure 10과 같다. 분사 유량을 조절한 경우(case 1-b)에는 가운데에서는 몰 비가 1 부근으로 개선된 경향은 있으나 벽면에서의 몰 비가 오히려 증가하였다. 노즐의 암모니아 분사 유량만 조절한 경우에는 M_{rms} 값이 기존의 29.11%에서 조절의 경우인 26.58%로 평균값에는 약간의 개선을 얻었다.

3.2.2. 노즐 간격 조절의 경우

촉매 층 입구의 NH₃/NO의 몰 비를 1로 유지하도록 M_{rms} 를 최소화하는 방향으로 AIG의 노즐 간격의 조절하였다. 각 분사 노즐의 위치는 Figure 11과 같이 재배치되었다. 벽면 부근인 1번과 8번의 노즐 간격은 기존의 355.6 mm에서 241.8 mm로 줄어들었다. 나머지 가운데 노즐의 간격은 390 mm 내외로 소폭 증가하였다. Figure 4와 Figure 12를 비교해 보면 노즐의 배치 변화를 알 수 있다. 벽면 쪽으로 노즐을 배치함으로써 이 부근의 암모니아 분사 유량이 증가하는 효과를 얻을 수 있다.

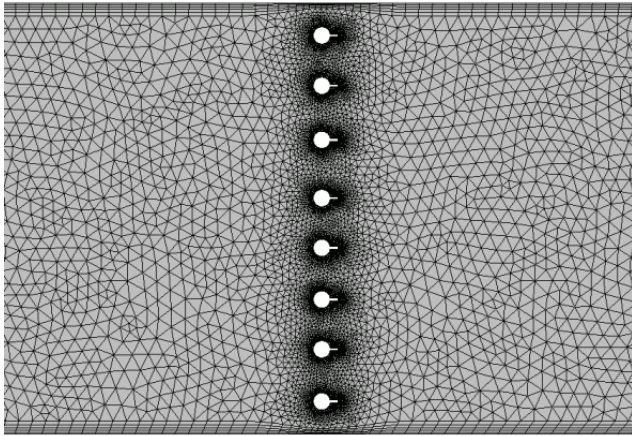


Figure 12. Blow-up of computational grids around the re-arranged AIG nozzles.

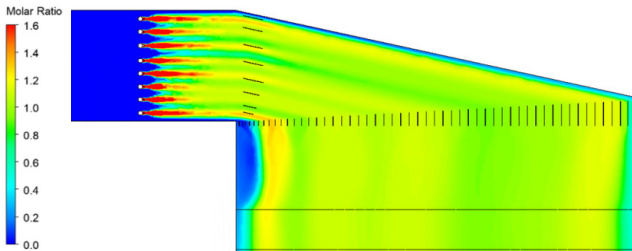


Figure 13. Distribution of NH₃/NO around the flow passage for case 2-a.

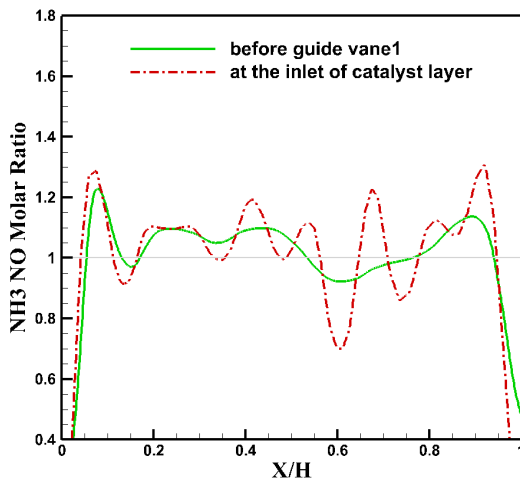


Figure 14. Variation of NH₃/NO ratio for case 2-a.

노즐 간격의 조절에 의한 설비 내의 물 비의 분포는 Figure 13과 같다. 초기 조건인 Figure 5와 비교해 보면 전 영역에서 물 비가 1에 접근해 보임을 알 수 있다.

곡확산부를 따라 물 비의 분포 변화를 입구와 출구에서 살펴 보면 Figure 14와 같다. 물 비의 평균오차는 곡확산부의 입구에서는 22.67%이고 출구에서는 15.50%로 감소한다. 초기 조건인 Figure 6과 비교해 보면 평균값이 크게 개선되었음을 알 수 있다.

노즐 간격의 조절에 의한 촉매 층 입구에서의 물 비 변화를

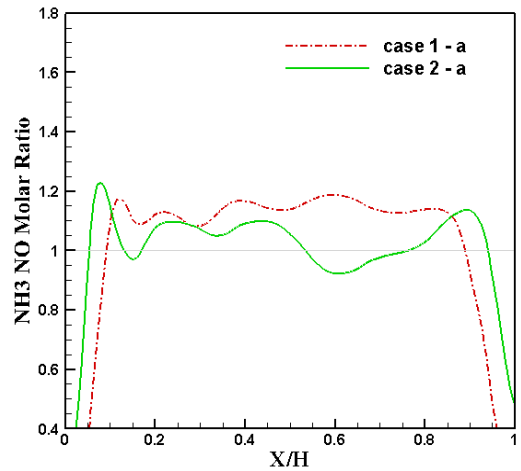


Figure 15. Comparison of molar ratio at the inlet of catalyst layers between case 1-a and 2-a.

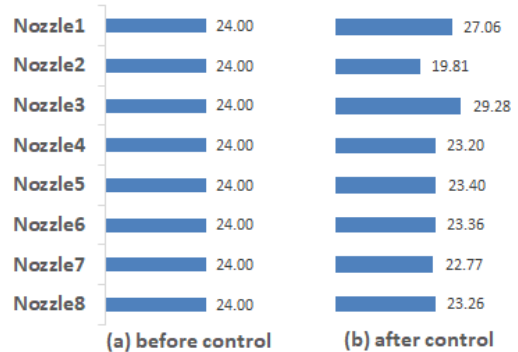


Figure 16. AIG nozzle flow-rate for case 2-b.

비교하면 Figure 15와 같다. Figure 13에서 나타난 바와 같이 전 영역에서 물 비가 1 부근으로 개선되었음을 확인할 수 있다. 노즐의 배치 간격만 조절한 경우에는 M_{rms} 값이 기존의 29.11%에서 조절의 경우인 15.51%로 평균값이 크게 향상되었음을 알 수 있다.

3.2.3. 동시 최적화의 경우

Figure 11과 같이 3.2.2절에서 조절된 배치 간격에 촉매 층 입구의 M_{rms} 를 최소화하도록 노즐 별로 분사 유량을 조절하였다. 초기의 균일 분사와 최적화 된 분사 유량의 변화는 Figure 16과 같다. 상단의 세 개의 노즐의 유량 변화는 크나 나머지는 거의 균일하다. 즉, 재배치된 노즐에서는 일부 유량만 조절하면 되는 것이다.

분사 유량의 조절에 의한 설비 내의 물 비의 분포는 Figure 17과 같다. 균일 분사인 Figure 14와 비교해 보면 왼쪽 벽면을 제외하면 거의 유사하다.

곡확산부를 따라 물 비의 분포 변화를 입구와 출구에서 살펴 보면 Figure 18과 같다. 물 비의 평균오차, M_{rms} 는 곡확산부의 입구에서는 24.37%이고 출구에서는 14.25%로 감소한다. 균일 분사인 case 2-a의 22.67% (입구), 15.50% (출구)와 비교해 보면 소폭 감소되었다.

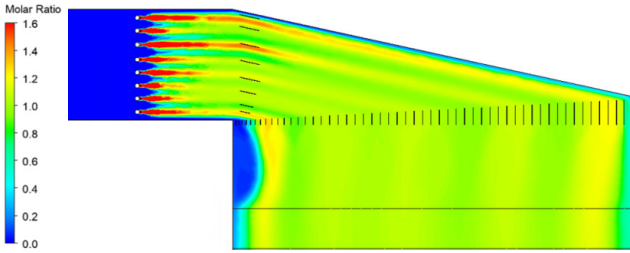


Figure 17. Distribution of NH₃/NO around the flow passage for case 2-b.

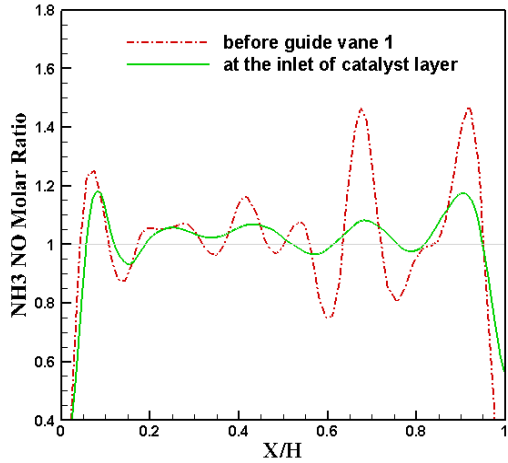


Figure 18. Variation of NH₃/NO ratio for case 2-b.

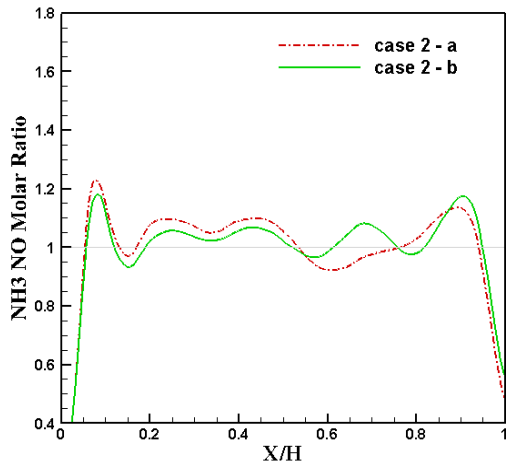


Figure 19. Comparison of molar ratio at the inlet of catalyst layers between case 2-a and 2-b.

배치 간격 조절 후 분사 량 조절에 의한 촉매 층 입구에서의 몰 비 변화를 비교하면 Figure 19와 같다. 유량을 조절한 경우가 전 영역에서 몰 비 1에 수렴함을 보인다. 평균 오차인 M_{rms} 값이 균일 분사의 15.43%에서 유량 조절은 14.25%로 소폭 개선을 얻었다.

3.3. 설계 개선 효과

촉매 층 입구에서의 NH₃/NO 몰 비 분포 관점에서 설계 변수의 최적화 효과를 비교하면 Figure 20과 같다. 몰 비가 1이 이

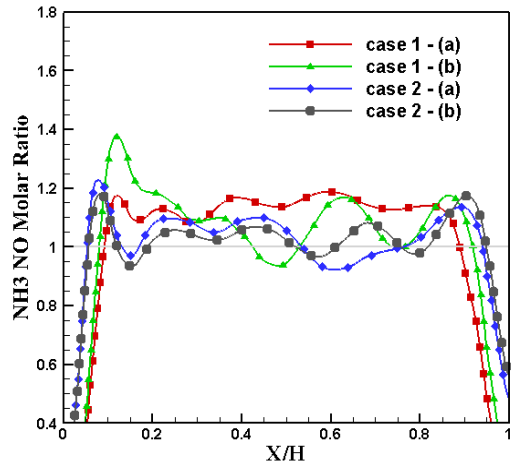


Figure 20. Comparison of NH₃/NO ratio at the inlet of catalyst layers for all cases.

Table 2. RMS of NH₃/NO molar ratio for comparison

[Unit : %]			
Condition	Case	RMS (NH ₃ /NO)	Improvement
Initial	1-a	29.11	-
Flow control	1-b	26.51	8.93
Pitch control	2-a	15.50	46.7
Pitch + flow control	2-b	14.25	51.0

상적인 상태이다. 분사 량의 조절 보다는 간격의 조절이 더 효과적임을 알 수 있다.

본 연구에서 수행한 결과를 NH₃/NO 몰 비의 M_{rms} 를 유동 제어 전과 유동 제어 후를 Equation (3)과 같은 성능 개선도 (performance improvement), I_p 관점에서 정리하면 Table 2와 같다.

$$I_p = (M_{rms,i} - M_{rms,f}) / M_{rms} \times 100 \quad (3)$$

여기서 $M_{rms,i}$ 은 초기 설계 조건(case 1-a)인 균일 간격 및 균일 분사에 의한 NH₃/NO 몰 비의 RMS 값이고 $M_{rms,f}$ 는 해석 변수의 최적화에 의한 RMS 값을 나타낸다.

암모니아 분사 노즐의 간격과 분사 유량을 둘 다 최적화 하면 촉매 층에 유입되는 NH₃/NO의 몰 비의 균일도가 51% 개선 되었음을 확인할 수 있다.

4. 결론

대용량의 석탄화력 발전소에 설치된 SCR형 탈질설비에서 촉매 층에 유입되는 NH₃/NO의 혼합비를 개선하기 위해 암모니아 분사 시스템의 노즐 간격과 분사 유량을 변수로 최적화 전산 해석기법을 적용하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

분사 노즐의 간격과 유량을 일정하게 하면 벽면에는 NH₃/NO 몰 비가 1 보다 작아 질소산화물이 잔존하게 되고 가운데에는 몰 비가 1 보다 커서 암모니아의 과잉이 발생하여,

물 비의 평균오차인 M_{rms} 가 29.11%로 탈질 성능이 떨어진다.

암모니아의 분사 유량 조절만 조절한 경우에는 성능 개선도가 8.93%로 작아 효과적인 성능 개선을 기대하기 어렵다. 노즐의 간격의 재배치가 선행되어야 한다.

노즐의 간격만 조절한 경우에는 M_{rms} 가 15.50%, 노즐 간격과 유량의 조절을 동시에 한 경우에는 14.25%로 개선되었다. 따라서 최적의 성능을 위해서는 노즐의 재배치와 같은 기학적 인 설계 인자와 분사 유량의 분사 제어와 같은 운전 특성의 변화도 함께 고려해야 한다.

본 연구에서는 암모니아 분사시스템의 노즐부 설계 과정에 전산 해석기법을 적용함으로써 초기 설계 조건에 비해 NH_3/NO 물 비 균일도가 51% 향상되는 결과를 얻었다.

감사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20181110100320). 김민규 군은 BK21 플러스사업 기체항공 미래인재 교육연구단의 참여 대학원생입니다.

References

1. Seo, D. C., Kim, M. K., and Chung, H. T., "The Numerical Study on the Flow Control of Ammonia Injection According to the Inlet NOx Distribution in the DeNOx Facilities," *Clean Technol.*, **25**(4), 324-330 (2019).
2. Zhao, D., Sheng, H., and Zheng., "CFD Study on Selective Catalytic Reduction of 660 MW Unit," *Int'l Conf. on Machinery. Materials and Computing Technology*, Hangzhou (Mar. 2016).
3. Lee, C. S., Kim, M. G., and Chung, H. T., "Numerical Study on the Aerodynamic Characteristics inside Curved-Diffusing Parts of DeNOx Facilities in Coal-Fired Power Plant," *J. Comput. Fluids Eng.*, **25**(1), 13-19 (2020).
4. Hwang, W. H., and Lee, K. G., "Mixer Design for Improving the Injection Uniformity of the Reduction Agent in SCR System," *Journal of The Korea Society of Computer and Information.*, **22**(1), 63-69 (2017).
5. Zhu, T., Li, D., Fang, Q., and Chen, G., "Flow Field Optimization for SCR System of Coal-Fired Power Plant," *J. Chin. Soc. Power Eng.*, **35**(6), 481-488 (2015).
6. Ha, J. S., and Kim, T. K., "A Study on the Flow and Concentration Uniformity before the Catalyst Layer of a SCR De-NOx System," *J. Nakdonggang Environ. Res. Inst.*, **15**(1), 262-270 (2011).
7. Lee, I. Y., Kim, D. W., Lee, J. B., and Yoo, K. O., "Reduced Scale Model Experiments and Numerical Simulation for Flow Uniformity in De-NOx SCR Reactor," *J. Korea Soc. Atmos. Environ.*, **17**(4), 347-354 (2001).
8. Yu, H., Zhou, N., Wang, Z., Li, C., He, F., Qu, L., Wang D., Qi, X., and Du, J., "Application and Effect Evaluation of AIG Optimization Adjustment Strategy for SCR Denitrification System After Ultra-low Emission Transformation of Coal-fired Units," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **310**(3). 032052. Guiyang (Aug. 2019).
9. Jang, Y. W., and Yoo, H. S., "Change of Ammonia Consumption with Gas Turbine Output in DeNOx System for a 580MW Combined Cycle Power Plant," *Journal of the Korean Institute of Plant Engineering & Construction*, **18**(1), 91-98 (2019).
10. Kim, K. S., and Lee, K. G., "Numerical Study on Optimization of the SCR Process Design in Horizontal HRSG for NOx Reduction," *J. Environ. Sci. Int.*, **22**(11), 1481-1498 (2013).
11. Park, S. M., Chang, H. S., and Zhao, T., "Numerical Study on the Arrangement of AIG for Determining the NH_3 Concentration Distribution in the Package Type of Small Scale SCR System," *J. Korean Soc. Environ.Eng.*, **33**(5), 368-377 (2011).
12. Buzanowski, M., and Fadda, D., "Optimized Ammonia Injection for Power Plant SCR Systems," *Proc. ASME Power Conf.*, Texas (Jan. 2007).
13. Chung, H. T., Seo, D. C., Kim, B. S., and Kim, M. G., "CFD Simulation of Ammonia Injection Nozzles for DeNOx Process," *Proc. 30th ISTP*, Halongbay (Nov. 2019).
14. Kim, M. G., and Chung, H. T., "Computational Analysis of Performance Improvement by Control of Ammonia Injection in DeNOx System of Coal-Fired Power Plant," *J. Comput. Fluids Eng.*, **25**(2), 91-97 (2020).
15. Lei, S., "Research on Optimization of Flow Field Uniformity in SCR Denitrification Flue of Coal Fired Power Plant," Master Thesis, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing (2018).
16. ANSYS, ANSYS FLUENT 2019 R1 User's Guide, ANSYS inc. (2019).
17. ANSYS, ANSYS Workbench-Mechanical Optimization Guide, ANSYS inc. (2019).