

탈질 설비의 성능 개선을 위한 CFD 기법 적용에 관한 연구

김민규¹, 정희택^{2*}¹비에이치아이(주)

52063 경남 함안군 장백로 122

²경상국립대학교 기계공학부

52828 경남 진주시 진주대로 501

(2023년 11월 13일 접수; 2023년 11월 30일 수정본 접수; 2023년 11월 30일 채택)

Application of CFD Methods to Improve Performance of Denitrification Facility

Min-Kyu Kim¹ and Hee-Taeg Chung^{2*}¹BHI Co.

122, Jangback-ro, Haman, Gyeongnam 52063, Republic of Korea

²School of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University

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

(Received for review November 13, 2023; Revision received November 30, 2023; Accepted November 30, 2023)

요 약

환경 요구 조건의 강화로 오래된 탈질 설비에 대한 성능 개선이 필요하다. 본 연구에서는 전산 해석 기법을 이용하여 성능 향상의 가능성을 제시하고자 하였다. 입구 안내 깃과 곡확산부 등 설비 내 유로의 기하학적인 형상의 수정과 암모니아 분사량의 제어 등 설계와 운전 조건을 둘 다 변경하여 해석을 수행하였다. 촉매 층에 유입되는 혼합가스의 유동 균일성과 NH_3/NO 조성비, 설비의 압력 강하 등 3가지 성능변수 관점에서 기존에 운영되는 조건과 본 연구에서 제시된 조건을 비교하였다. 전산 해석에서 적용된 유동장의 범위는 연소로 절탄기의 출구에서 공기 예열기의 입구까지로 탈질 설비의 전 영역이다. 전산 해석 도구로 열유체 전용 소프트웨어인 ANSYS-Fluent를 사용하여 유동 특성을 해석하여 성능을 도출하였고 최적화 알고리즘인 Design Xplorer를 사용하여 암모니아의 분사량을 노출별로 조절하였다. 변경된 설비 조건은 기존의 조건과 비교하여 유동 균일성과 NH_3/NO 조성비는 각각 45.1%와 8.7% 향상되었으나 전체 압력 강하는 1.24% 증가하였다.

주제어 : 탈질, 유동 제어, 물 비, 전산유체역학, 성능 개선도

Abstract : Due to the strengthening of environmental requirements, aging denitrification facilities need to improve their performance. The present study aims to suggest the possibility of improving performance using computational analysis techniques. This involved modifying both the geometric design and the operating conditions, including the flow path shape of the equipment such as the inlet guide vane and the curved diffusing part, and the flow control of the ammonia injection nozzle. The conditions presented in this study were compared with existing operating conditions in terms of the flow uniformity, the NH_3/NO molar ratio of the mixed gas flowing into the catalyst layer, and the total pressure drop of the facility. The flow field applied in the computational analysis ranged from the outlet of the economizer in the combustion furnace to the inlet of the air preheater, the full domain of the denitrification facility. The performances were derived by solving the flow fields using ANSYS-Fluent and the injection amount of ammonia was adjusted for each nozzle using Design Xplorer. Compared to the denitrification performances of the equipment currently in operation, the conditions proposed in this study showed an improvement in the flow uniformity and NH_3/NO composition ratio by 45.1% and 8.7%, respectively, but the total pressure drop increased by 1.24%.

Keywords : Denitrification, Flow control, Molar ratio, Computational fluid dynamics, Performance improvement

* 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.2023.29.4.305 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. 서 론

현재 운영되고 있는 발전 설비에서 석탄이나 천연가스와 같은 화석연료는 여전히 상당한 부분을 차지하고 있다. 여기서 배출되는 환경 오염 물질 중 하나인 질소산화물(NO_x)을 제거하기 위해 대형 발전 시스템에서는 주로 선택적 촉매환원(selective catalytic reduction, SCR)형 탈질 설비를 별도로 설치하여 운영하고 있다. 최상의 탈질 성능을 얻으면서 암모니아 슬립을 방지하기 위해서는 촉매 층에 유입되는 질소산화물과 암모니아(NH_3)의 혼합비가 1:1로 유지되어야 한다[1].

화력에 의한 발전 설비는 대부분 500 MW 이상의 대용량이고 탈질 설비가 설치되는 공간 등의 제약으로 유로 형상이 복잡하다. 그리고 질소산화물의 환원에 필요한 암모니아의 분사 장치(ammonia injection grid, AIG)도 다관으로 구성되어 있어 탈질 성능에 미치는 인자도 다양하고 서로 연관되어 있다. 전산 열유체 해석 기법(computational fluid dynamics, CFD)을 적용하면 빠른 시간에 결과를 예측할 수 있는 장점이 있다.

Seo et al.[2]은 배기가스의 유동 분포에 따라 AIG의 분사 유량을 조절하는데 최적화 기법을 배열회수보일러(heat recovery steam generator, HRSG)에 설치되는 탈질 시스템과 같이 단순한 구조에 적용하였고 이를 3차원 유동장으로 확장하여 적용하였다[3]. Kim et al.[4]은 이 기법을 국내에서 가동 중인 800 MW급 발전 시스템의 SCR형 탈질 설비에 적용하였다. AIG 분사 노즐의 설계 변수인 분사 방향, 분사 각도, 노즐의 직경 등의 영향에 대해 CFD 기법을 이용한 사례도 있다[5,6].

촉매 층의 환원 속도와 공간 제약으로 곡확산(curved-diffusing)형 덕트가 설치되고 유입되는 배기가스나 암모니아와 혼합된 가스의 유동이 균일하게 분포하기 위해 입구, 곡확산부, 출구 등 여러 부분에 안내 깃(guide vane)이 배치된다. 이러한 부품들의 기하학적 형상은 유동의 균일성과 압력 강하 등 공력 성능에 영향을 준다.

Lee et al.[7]은 세 가지 유형의 곡확산형 덕트에 대해 공력학적 특성을 비교하였다. Zhao et al.[8]은 곡확산부에 설치되는 안내 깃의 배열과 반경을 변수로 최적화를 시도하였다. Bae et al.[9]는 현재 운전 중인 탈질 설비의 입구에 설치된 안내 깃을 재배열하여 유동의 균질성이 개선된 결과를 보고하였다. Ryu [10]는 유동의 균일성을 개선하기 위한 곡확산부 덕트와 안내 깃의 형상 변경을 전산 해석 기법으로 연구하였다.

오래전에 설치된 설비는 탈질 성능이 열악하여 최근에 강화된 환경 기준을 맞추려면 성능의 개선이 필요하다. 촉매 층 입구의 혼합가스 조성비는 질소산화물과 암모니아의 환원 작용에 직접적인 영향을 준다[2]. 이외에도 혼합가스의 유입량이 균일하면 촉매 층의 수명이 오래 유지된다. 유로의 압력 강하는 설비의 구동 동력과 연계된다. 따라서 탈질 설비의 성능 개선을 개선하려면 NH_3/NO 의 혼합비 뿐만 아니라 유동의 균일성과 압력 강하 등 공력 특성도 함께 고려하여야 한다[7].

본 연구에서는 유로 형상의 개조와 암모니아 분사량 제어를 통해 탈질 성능의 개선 방향을 제시하고자 한다. CFD 해석을 통해 혼합가스의 조성비와 유동의 균일성, 압력 강하 등 3가지

관점에서 기존 설비와 수정된 설비 조건을 비교하였다.

2. 해석 방법

2.1 적용 대상

삼천포 화력발전소 3호기는 발전 용량이 550 MW이며 1993년 4월에 준공되었다. 질소산화물을 처리하는 탈질 설비는 절탄기(economizer)의 출구와 공기 예열기(air preheater)의 입구 사이에 설치되어 있다[11].

설비 내 작동 유체의 유동을 중심으로 한 2차원 형상은 Figure 1과 같다. 본 연구에서는 이를 기존 모델로 하고 case 1로 명명하였다. 주요부의 형상 데이터는 Table 1과 같다. 탈질 설비 안으로 유입되는 배기가스의 평균 속도는 Table 2와 같이 13.6 m s^{-1} 이다. 촉매 층 내에서 환원에 적합하도록 혼합가스의 속도를 4.3 m s^{-1} 이내로 유지하기 위해 곡확산부(curved-diffusing part)에서 (g)와 (c)의 비율은 3.69로 설계되었다. 곡확산부 앞에 설치된 AIG에서 분사되는 암모니아는 배기가스에 포함된 질소산화물과의 몰 비가 1:1이 되도록 총량이 조절된다. 설비 내의 온도는 640 K이고 압력은 대기압이다.

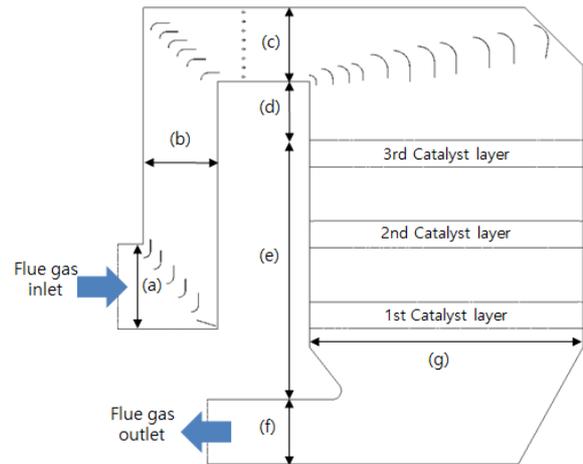


Figure 1. Definition sketch of the flow field for case 1.

Table 1. Geometrical conditions for Figure 1

Descriptions	Value	Unit
(a)	3.66	m
(b)	3.2	m
(c)	3.2	m
(d)	2.55	m
(e)	11.2	m
(f)	2.8	m
(g)	11.8	m

2.2 기존 모델의 수정

적용 모델의 성능 개선을 위하여 개선된 모델에서는 유로의 형상을 수정하는 공력학적 재설계와 AIG의 암모니아 분사량 조절된 운전 조건의 변경 등 두 가지 관점을 모두 고려하였다.

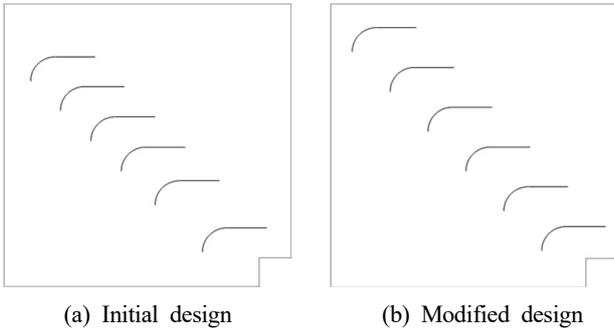


Figure 2. Configuration of guide vanes installed before AIG.

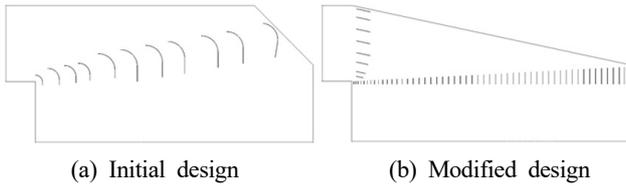


Figure 3. Geometrical configuration of curved-diffusing parts.

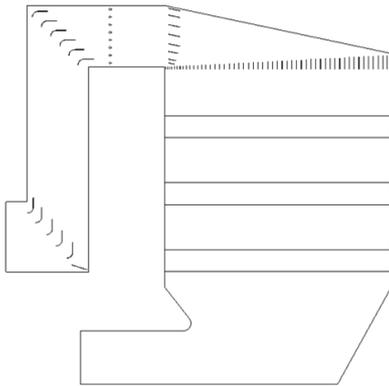


Figure 4. Geometrical configuration of the entire flow field for case 2.

본 저자들의 선행 연구[9]에 의하면 입구에 설치되는 안내 깃을 중심선을 따라 배열을 일정하게 하면 AIG 선단에서 배기가스의 유동 균일성이 개선되었다. 이 기법을 곡확산부의 안내 깃의 재설계 경우에 적용한 결과 유동의 균일성이 개선된 사례를 도출하였다[12]. Figure 2(a)에 보듯이 기존의 안내 깃은 배열이 불규칙하여 Figure 2(b)와 같이 균일하게 재배치하였다.

곡확산부의 출구에서 나오는 혼합가스의 유동은 촉매 층의 환원에 직접적인 영향을 준다. 선행 연구[7]에 의하면 비교적 최근에 설치된 영흥화력발전소의 탈질 설비의 곡확산부는 Figure 3(a)와 같은 삼천포 화력발전소의 형상보다 유동의 균일성이 우수하다고 보고되었다. 이를 본 설비에 적용하면 Figure 3(b)와 같은 형상이 된다.

공력 특성에 대한 선행 연구의 결과를 바탕으로 AIG 앞에 설치되는 안내 깃을 재배열하고 곡확산부의 덕트 형상을 변경한 수정된 모델의 형상은 Figure 4와 같다. 본 연구에서는 이를 수정 모델로 하고 case 2로 명명하였다.

촉매 층 입구의 폭은 11.3 m로 넓고 벽면에 경계층이 존재하며 유입되는 배기가스 내의 질소산화물의 분포도 일정하지

않다. 이로 인해 발생하는 암모니아 슬립 현상을 방지하기 위해서는 AIG에서 암모니아의 분사량을 노즐별로 조절할 필요가 있다[2]. 기존 설비에는 균일 분사(uniform injection)만 가능하지만 본 연구에서는 선행 연구[4]에서 개발된 최적화 기법(optimization)[13]을 적용하여 분사 유량을 조절(controlled injection)하는 운전 조건을 제시하여 성능 개선의 효과를 함께 검토하였다.

2.3 성능변수

적용된 모델의 초기 조건(case 1)과 수정된 모델(case 2)에 대한 성능은 촉매 층에 유입되는 혼합가스의 유동 균일성과 NH₃/NO 조성비, 설비의 압력 강하 등 3가지 관점에서 비교하였다. 각 성능변수는 다음과 같이 정의된다.

유동의 균일성은 촉매 층 입구에 유입되는 혼합가스의 속도 편차로 정의한다. 평균제곱근오차(root mean square, RMS), V_{rms} 는 Equation (1)와 같이 질량 유량에 대한 가중치를 적용하였다[2].

$$V_{rms} = \frac{1}{V_{outlet}} \sqrt{\sum_i \frac{(V_i - \bar{V}_{outlet})^2 dm_i}{\dot{m}}} \times 100 [\%] \quad (1)$$

여기서 V_i 는 임의의 지점에서의 속도의 수직 성분이고 \dot{m}_i 는 질속 유량이다.

혼합가스의 몰 비 조성비인 NH₃/NO에 대한 균일성도 속도의 경우와 유사하게 평균 제곱근 오차(root mean square, RMS)로 판단한다. 이에 대한 정의는 Equation (2)와 같다.

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

여기서 \bar{M} 은 몰 비의 평균이다. 이상적인 환원에서는 NH₃와 NO의 비율이 1:1이므로 \bar{M} 의 값은 1이다.

압력의 변화는 작동 유체의 유동 형태와 연관이 있을 뿐만 아니라 설비의 운전과도 직접 관련이 있다. 절탄기에서 유입된 혼합가스가 탈질 과정을 거쳐 공기 예열기로 유출되는 전 흐름은 팬으로 구동되므로 압력 강하는 설비의 운전 특성에도 중요한 인자가 된다.

설비의 주요 부분인 입구부(1), AIG 선단(2), 촉매 층 입구(3), 출구부(4)의 압력을 P_1, P_2, P_3, P_4 로 각각 표기하면 설비 전체의 압력 강하, ΔP_{total} 는 Equation (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$\Delta P_{total} = P_1 - P_4 \quad (3)$$

유입부의 압력 강하는 $\Delta P_{1-2} = P_1 - P_2$ 이고 곡확산부의 압력 강하는 $\Delta P_{2-3} = P_2 - P_3$, 촉매 층 내부의 압력 강하는 $\Delta P_{3-4} = P_3 - P_4$ 로 구할 수 있다.

본 연구에서 제시된 수정 모델(case 2)의 성능 개선 정도를 초기 조건인 기존 모델(case 1)과 비교하여 성능변수별로 Equation (4)와 같이 성능 개선도(performance improvement), $I_p(\phi)$ 를 정의하였다.

$$I_p(\phi) = (\phi_1 - \phi_2) / \phi_1 \times 100[\%] \quad (4)$$

여기서 ϕ 는 성능변수로 유동 균일성은 V_{rms} 이고, NH₃/NO 조성비는 M_{rms} 이며 압력 강하는 ΔP 이다. 하부 첨자 1은 case 1 이고 2는 case 2이다.

2.4 유동장의 전산 해석 기법

유동 해석 범위는 Figure 2와 같이 배기가스가 절탄기에서 유입되는 입구에서 공기 예열기로 배출되는 출구까지 탈질 설비의 전 영역으로 2차원 형상이다. 총 압력 강하는 1 kPa 미만 이고 유동장 내 유속은 30 m s⁻¹이므로 압축성을 무시하였다. 외부 열원이 없으므로 에너지 방정식은 사용하지 않았다. Realizable κ - ϵ 모델로 난류를 해석하였고 촉매 층에 대해서는 다공성 매질 모델(porous media model)을 사용하였다[2].

Figure 5는 case 1의 유동 해석을 위한 계산 격자점이다. 벽면이나 안내 갭 부근에서는 사각형 격자를 사용하고 그 외 영역에서는 삼각형 격자를 채택하였다. 총 계산 격자점은 2.5×10⁵개이고 계산의 최소 수직성은 0.25로 본 연구의 유동장과 같이 형상이 복잡한 유동 해석에 적합하다. Case 1과 case 2의 계산 격자점 분포를 유동 변화가 큰 곡확산부 부근에서 비교하면 Figure 6과 같다. 수정 모델인 case 2의 경우에는 곡확산부에 안내 갭이 2개이므로 계산 격자의 수는 3.1×10⁵개로 case 1보다 24% 더 많다. 내부 유동장은 열유체 전용 소프트웨어인 ANSYS-Fluent를 사용하였다[14].

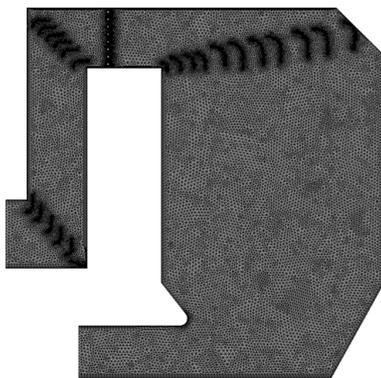


Figure 5. Computational meshes of the entire flow field for case 1.

AIG의 분사 노즐은 8개로 단순화하였고 초기 운전에서는 모든 노즐에서 24 m s⁻¹로 일정하게 분사(uniform injection)된다. 촉매 층 입구에서의 NH₃/NO 몰 비를 해석하여 최적화 프로그램인 Design Explorer[13]으로 각 노즐별로 분사량을 조절(controlled injection)하여 유동 해석이 반복 수행한다. AIG의 유동 제어와 연계된 전산 해석 기법은 본 저자들의 선행 연구

[4]에 상술되어 있다. 최적화 전(before optimization)의 균일 분사와 최적화 후(after optimization)의 제어 분사의 결과를 비교하여 3.2절에서 성능 효과를 분석할 예정이다.

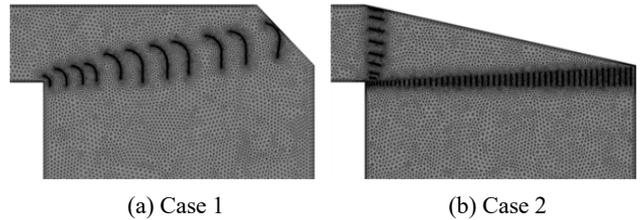


Figure 6. Blow up of configuration meshes around the curved-diffusing parts.

3. 결과 및 고찰

3.1 공력 성능

2.2절에서 입구 안내 갭과 곡확산부 두 군데에서 공력 형상을 수정하였다. 이에 대한 유동장 해석 결과를 유동 형태와 압력 특성 관점에서 분석하면 다음과 같다.

기존 모델(case 1)과 수정 모델(case 2)의 공력 특성은 유동 형태에서 알 수 있다. Figure 7은 배기가스의 유입부에서 혼합된 가스의 출구까지 전 유동장에서의 유동의 흐름을 비교한 결과이다. Figure 7(a)에서 보듯이 기존 모델의 곡확산부에서는 대부분의 안내 갭 부근에서 큰 와류가 생성됨을 발견할 수 있다. 촉매 층 입구에서 횡 방향을 ‘피치(pitch)’로 규정하였다. 오른쪽 벽면 부근인 피치 끝 부분에서는 후류 전 영역에서 긴 와류가 촉매 층 입구까지 계속된다. 전반적으로 불안정한 유동이 나타난다. Figure 7(b)의 수정 모델에서는 후방 갭의 피치 선단에서 작은 와류가 있지만 전반적으로 혼합가스는 균일하게 촉매 층으로 유입된다.

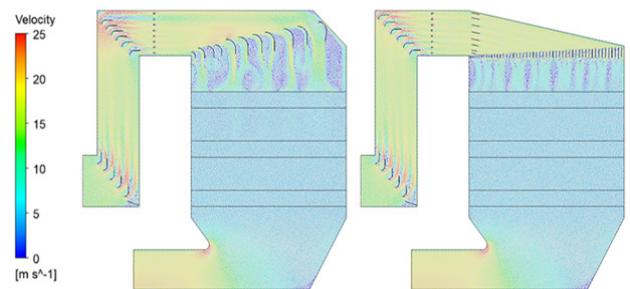


Figure 7. Comparison of the velocity distribution for the entire flow field.

수정 모델에서는 입구 안내 갭이 Figure 2와 같이 재배치되었다. 이로 인해 유동 균일성이 개선된 효과는 Figure 8에서 확인할 수 있다. 피치 후단에서는 기존 모델은 유동 편차가 큰데 안내 갭이 재배열된 수정 모델에서는 개선되었다. Equation (1)에 의한 유동 균일도는 기존 모델의 14.7%에서 수정 모델에서는 9%로 Equation (4)의 개선도 기준으로 성능이 38.6% 향상되었다.

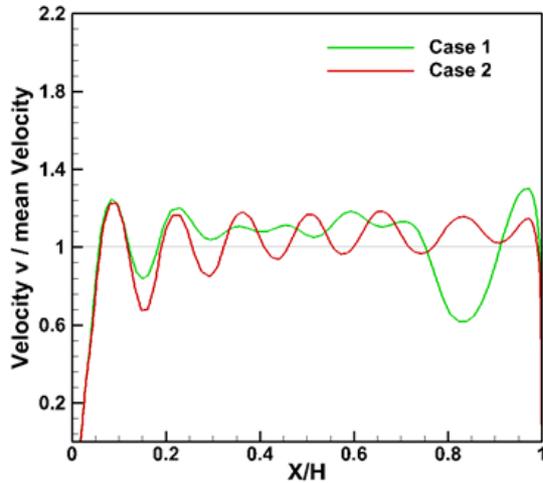


Figure 8. Comparison of spanwise velocity distribution prior to AIG.

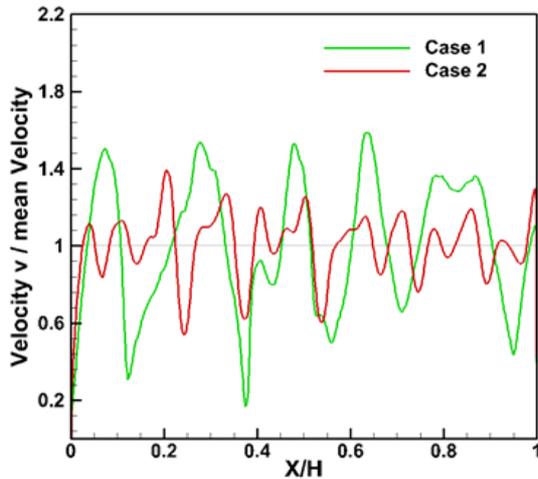


Figure 9. Comparison of spanwise velocity distribution at the inlet of catalyst layers.

Table 2. Flow conditions

Locations	Descriptions	Value	Unit
Flue gas inlet	Mean velocity	13.6	m/s
	Total flow rate	49.8	m^3/s
	NO/air ratio	125	PPM
AIG inlet	Mean velocity	24	m/s
	Total flow rate	2.69	m^3/s
	NH3/air ratio	1320	PPM
Flow fields inside	Temperature	640	K
	Density	0.551	kg/m^3

Figure 3과 같은 곡화산부의 형상 수정에 의한 유동 균일도도 Figure 9에서 알 수 있다. 촉매 층 입구 전반적으로 유동이 균일하게 향상되었다. V_{rms} 는 기존 모델은 27.9%인데 수정 모델은 15.4%로 성능 개선도가 44.7%로 유동 균일도가 상당히 향상되었다. 촉매 층으로 유입되는 혼합가스의 양이 일정하면 촉매에 걸리는 부하가 일정하여 안정된 환원 작업을 기대할 수 있고 촉매의 수명도 연장되는 이점이 있다.

Table 3. Comparison of velocity uniformity, RMS of velocity

Location	Case 1	Case 2	Improvement	Unit
Prior to AIG	14.7	9.00	+38.6	%
Catalyst inlet	27.9	15.4	+44.7	%

Table 4. Comparison of pressure drops

Location	Symbol	Case 1	Case 2	Improvement
Domain inlet to AIG	ΔP_{1-2}	107 [Pa]	91.4 [Pa]	+14.4 [%]
AIG to catalyst inlet	ΔP_{2-3}	53.8 [Pa]	90.4 [Pa]	-68.0 [%]
Catalyst inlet to domain outlet	ΔP_{3-4}	803 [Pa]	794 [Pa]	+1.12 [%]
Total	ΔP_{total}	964 [Pa]	976 [Pa]	-1.27 [%]

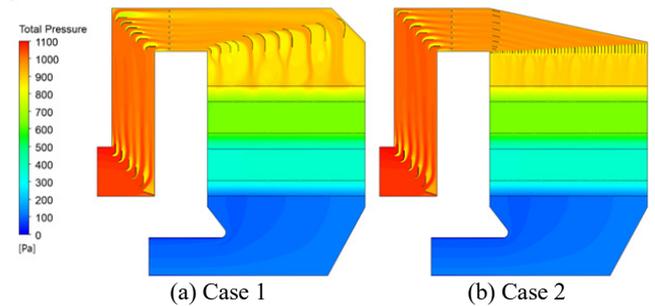


Figure 10. Distribution of total pressure for the entire flow field.

유동의 균일성에 대해 성능을 비교하면 Table 3과 같다. AIG 선단(prior to AIG)의 결과는 안내 기의 재배열에 의한 효과이고 촉매 층 입구(catalyst inlet)에서의 결과는 수정 모델에서 제시한 곡화산부에 의한 성능 개선을 보여준다.

유동장에서의 압력 분포와 변화 형태는 전술한 유동 특성과도 연계된다. Figure 10은 전 유동장에서 전압(total pressure)의 분포를 비교한 것이다. Figure 7(a)에서 기존 모델은 곡화산부의 유동이 불안정하고 촉매 층으로 유동이 불균일하게 유입되었는데 이와 유사한 형태가 Figure 10(a)의 압력 분포에서도 발견할 수 있다. 수정 모델에서는 Figure 7(b)의 유동에서와 같이 압력 분포-Figure 10(b)도 비교적 주 유동 방향으로 일정하게 변화한다.

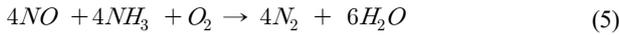
Table 4는 유동 방향으로 압력 강하를 정리한 것이다. 입구 (1)에서 AIG 선단(2)까지인 유입부에서의 압력 강하, ΔP_{1-2} 는 수정 모델이 15.4 Pa 감소하였다. 이는 전술한 유동 특성에서 유동 균일도가 개선되어 압력 손실이 줄었기 때문이다. 또한 촉매 층 내부의 압력 강하, ΔP_{3-4} 도 개선 모델에서는 줄어들었는데 이는 Figure 9에서 촉매 층 입구로 혼합가스가 안정되게 유입된 것과 관련이 있다.

수정 모델의 곡화산부 형상은 유동의 안정화에는 유리하나 구조적으로 유동을 압박하여 기존 모델에 비해 압력 강하가 크다[7]. 그러나 대부분의 압력 강하는 촉매 층 내부에서 발생하므로 수정 모델은 기존 모델보다 압력 강하에 의한 구동 부하

가 1.27% 정도 소폭 증가한다.

3.2 NH₃/NO 혼합 특성

작동 유체는 공기(air)와 일산화질소(NO), 암모니아(NH₃)의 혼합 가스로 Table 2에 보듯이 질량을 기준으로 하면 공기는 암모니아나 일산화질소에 비해 월등히 많다. 따라서 유동 균일성과 압력 강하와 같은 공력 특성은 공기에 의해 좌우되므로 AIG 노즐의 암모니아의 분사량 조절 방법에 영향을 별로 받지 않는다. 그러나 촉매 층에서의 환원 작용은 Equation (5)와 같이 암모니아와 일산화질소의 몰 비(molar ratio)에 직접적인 영향을 받는다.



촉매 층 입구에 유입되는 NO가 NH₃보다 많으면 즉 NH₃/NO의 몰 비가 1보다 작으면 NO는 환원되지 않고 대기로 배출되어 오염도가 증가한다. 역으로 몰 비가 1보다 크면 반응하지 않고 남은 암모니아(NH₃)는 후단 설비에서 배기가스 중의 잔존 SO₂와 반응하여 황산암모늄을 생성하여 설비의 표면에 부식을 일으키는 암모니아 슬립(ammonia slip) 현상을 초래한다. 따라서 촉매 층 입구에서의 NH₃/NO의 몰 비 분포는 탈질 성능에서 가장 중요한 요소 중 하나가 된다.

AIG에서 분사되는 암모니아의 총 몰 양은 유입되는 배기 가스의 일산화질소의 양과 같고 노즐 당 평균 분사 속도는 24 m s⁻¹이다. Figure 11은 기존 모델(case 1)에서의 노즐별 분사 속도를 제어하기 전인 균일 분사(uniform injection)와 촉매 층 입구에서 M_{rms} 의 최적화에 의한 제어 분사(controlled injection)를 비교한 것이다.



Figure 11. AIG nozzle flow rate for case 1.

Figure 12는 배기가스의 일산화질소(NO)의 농도가 균일하게 유입되는 경우에 설비 내의 NH₃/NO의 몰 비 분포를 나타낸 것이다. 최적화 알고리즘이 적용되기 전(before optimization)인 균일 분사의 경우, Figure 12(a)와 같이 촉매 층 입구의 왼쪽 벽면 부근에서 몰 비가 1보다 커서 이 부근에는 암모니아가 환원

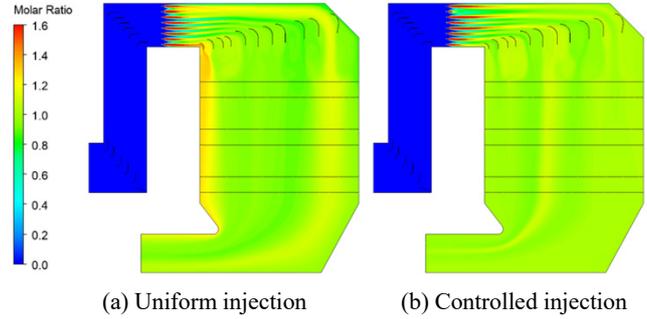


Figure 12. Distribution of NH₃/NO molar ratio for case 1.

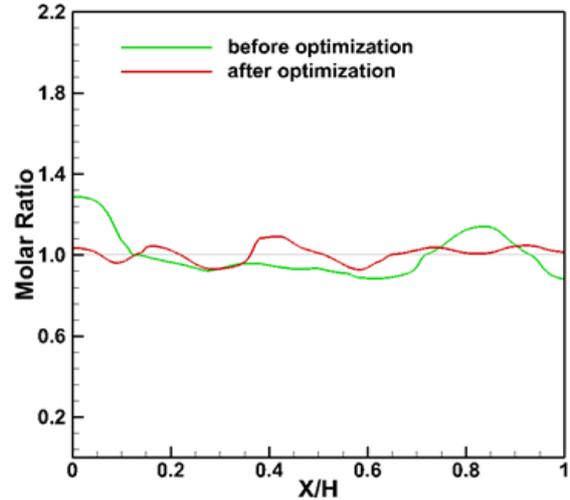


Figure 13. Comparison of NH₃/NO molar ratio at the inlet of catalytic layers for case 1.

되지 않아 슬립이 발생할 가능성이 크다. 최적화 기법으로 노즐별로 분사 유량을 조절한 결과는 Figure 12(b)와 같다. 균일 분사에 비해 왼쪽 벽면 부근의 몰 비의 불균형성이 상당히 개선되었음을 알 수 있다.

환원 작용이 일어나는 촉매 층의 입구로 유입되는 혼합가스의 몰 비 분포를 비교하면 Figure 13과 같다. Figure 12(a)에서 보았듯이 최적화 전(before optimization)의 균일 분사에서는 왼쪽 벽면에 암모니아가 많다. 최적화 후(after optimization) 분사량을 조절한 경우에는 전 영역에서 NH₃/NO의 몰 비가 일정하게 개선되었다. 조성비의 편차인 M_{rms} 값은 균일 분사의 10.8%에서 분사량의 조절로 4.35%로 성능개선도가 59.7%로 향상되었다.

Figure 14는 수정 모델(case 2)에서의 노즐별 분사 속도를 균일 분사인 경우와 최적화 알고리즘으로 조절된 분사 형태를 비교한 것이다.

Figure 15는 NH₃/NO의 몰 비 분포를 나타낸 것이다. Figure 15(a)에 보듯이 균일 분사(uniform injection)의 경우는 case 1의 Figure 12(a)와 유사하게 촉매 층 입구의 왼쪽 벽면 부근에서 NH₃/NO의 몰 비가 1보다 크다. 암모니아 분사량이 조절된 경우는 Figure 15(b)와 같은 결과를 나타내었다. 전 영역에서 몰 비의 불균형성이 상당히 개선되었음을 알 수 있다.

환원 작용이 일어나는 촉매 층의 입구로 유입되는 혼합가스



Figure 14. AIG nozzle flow rate for case 2.

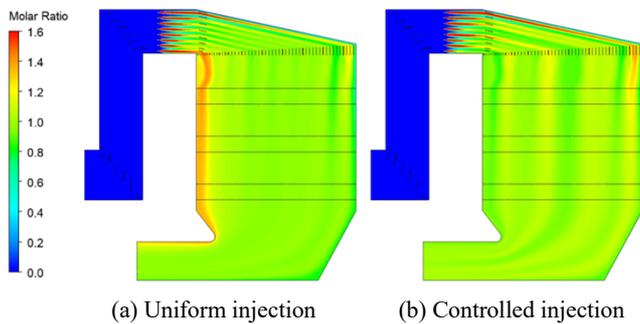


Figure 15. Distribution of NH₃/NO molar ratio for case 2.

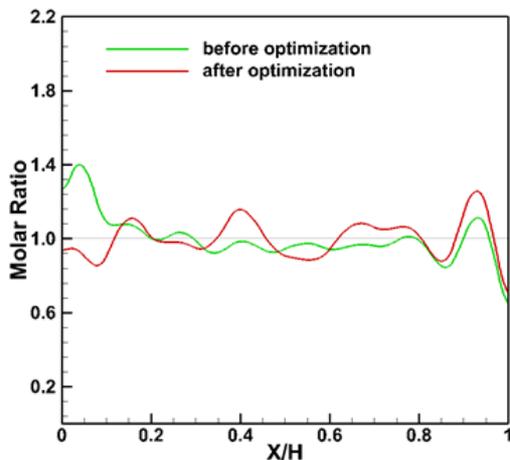


Figure 16. Comparison of NH₃/NO molar ratio at the inlet of catalyst layers for case 2.

의 몰 비 분포를 비교하면 Figure 16과 같다. Figure 15(a)에서 보았듯이 최적화 전의 균일 분사에서는 왼쪽 벽면에 암모니아가 많았다. 분사량을 조절한 경우에는 전 영역에서 NH₃/NO의 몰 비가 일정하게 개선되었다. 조성비의 편차인 M_{rms} 값은 균일 분사에서는 12.0%에서 분사량의 조절로 9.86%으로 성능이 소폭 개선되었다. Case 2는 case 1에 비해 암모니아 분사 제어의 효과가 작았다.

AIG의 암모니아 분사량 제어의 효과를 촉매 층 입구에서의 NH₃/NO 편차로 정리하면 Table 5와 같다. 분사량 제어에 의한

Table 5. Comparison of RMS of NH₃/NO molar ratio at the catalyst inlet

Case	Before optimization	After optimization	Improvement	Unit
Case 1	10.8	4.35	+59.7	%
Case 2	12.0	9.86	+17.6	%

Table 6. Summaries of performance improvement

Location	Definition	Case 1	Case 2	Improvement	Unit
Catalyst inlet	V_s	27.9	15.3	+45.1	%
Catalyst inlet	M_s	10.8	9.86	+8.70	%
Domain inlet to catalyst inlet	ΔP_{1-3}	161	182	-13.1	Pa
Domain inlet to outlet	ΔP_{total}	964	976	-1.24	Pa

효과는 기존 모델이 수정 모델보다 크다. 이는 촉매 층 입구 직전에 설치된 곡확산부의 유동 특성이 기존 모델이 더 불안정하여 암모니아와 일산화질소의 혼합(mixing)이 활발하기 때문이다. 수정 모델과 유사한 곡확산부 형상에 대한 본 저자들의 선행 연구[4]에 의하면 설비에 유입되는 배기가스의 일산화질소 분포가 불균일할수록 암모니아의 분사량 제어 효과가 크다고 보고되었다. 본 연구에서는 설계 조건으로 일산화질소의 분포를 균일하게 두어서 AIG 분사 제어 효과가 다소 적게 나타났다고 추정된다.

3.3 성능 개선 분석

기존에 운전되고 있는 형상(case 1)과 균일 분사 조건(uniform injection)인 초기 조건과 본 연구에서 제시한 수정 형상(case 2)과 제어 분사 조건(controlled injection)인 개선된 조건의 성능을 촉매 층 입구에서의 유동 균일성(V_{rms})와 NH₃/NO 조성비(M_{rms}), 그리고 설비의 총 압력 강하(ΔP)로 정리하면 Table 6과 같다.

입구 안내 깃의 재배열과 곡확산부의 형상 변경으로 Equation (1)로 정의되는 속도 편차는 27.9%에서 15.3%로 유동의 균일성이 크게 향상되었다. 이는 압력 손실을 감소시킬 뿐 아니라 촉매에 균등한 부하를 주어 환원 작용과 수명 연장에 도움이 된다.

설비의 형상에 무관하게 암모니아의 분사량을 노즐별로 조절하면 균일 분사보다 NH₃/NO 조성비를 1로 유지하는데 매우 유리하다. Table 5에 나타난 바와 같이 AIG의 분사 방법이 같은 경우에는 수정 모델(case 2)은 초기에 설계된 기존 모델(case 1)보다 불리하다. 그러나 수정 모델(case 2)에 암모니아 분사를 조절(controlled injection)하면 기존 모델(case 1)에서 분사를 조절하지 않는 경우(uniform injection)보다 RMS 편차가 10.8%에서 9.86%로 소폭 감소한다.

압력 강하는 유동 특성 뿐만 아니라 설비의 형상에도 영향을 받는다. 수정된 형상의 곡확산부의 경우 유로의 균일성으로는

압력 강하가 개선되나 덕트 형상의 구조적 특성으로 압력 강하가 증가하는 이중적인 원인을 가지고 있다. 설비의 압력은 촉매 층 내부에서 80%를 차지한다. 기존 모델의 형상 수정에 의해 총 압력 강하는 소폭 증가하여 이로 인한 설비의 운전 부하는 1.24% 증가하였다.

4. 결 론

탈질 설비의 성능 개선 과정에 전산 열유체 해석 기법을 활용하였다. 형상 변경과 운전 조건의 조정을 동시에 적용하여 다음과 같은 성능 개선 효과를 도출하였다.

첫째, 입구 안내 깃과 곡확산부의 형상을 수정하여 환원 작용이 일어나는 촉매 층 입구에 유입되는 혼합가스의 유동 균일성이 45.1% 향상되었다.

둘째, 최적 제어 기법을 적용하여 암모니아 분사 노즐의 분사량을 조절하여 혼합가스의 NH_3/NO 의 조성비를 8.7% 개선하였다.

셋째, 유동의 질이 개선되어 입구 부분과 촉매 층에서는 압력 강하가 감소하였으나 곡확산부에서는 구조적 특성으로 압력 강하가 증가하여 설비 전체의 압력 부하는 1.24% 증가하였다.

구동에 필요한 압력 부하는 소폭 증가하여 설비의 운영 측면에서는 다소 불리하지만 촉매 층 입구에 유입되는 혼합가스의 유질이 상당히 개선되어 설비의 전체적인 성능에는 유리하다고 판단된다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No.20181110100320).

References

1. Choi, H. W., "Economic Operation of SCR Equipment," *KOEN Sustainability Management Forum*, Report No. 2 (2014).
2. Seo, D. C., Kim, M. G., 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).
3. Seo, D. C., Kim, M. G., and Chung, H. T., "Application of CFD Methods to Flow Control of Ammonia Injection Nozzles in SCR DeNOx System," *J. Compt. Fluids Eng.*, **27**(4), 92-98 (2022).
4. Kim, M. G. and Chung, H. T., "Computational Analysis of Performance Improvement of Ammonia Injection in DeNOx System of Coal-Fired Power Plant," *J. Compt. Fluids Eng.*, **25**(2), 91-97 (2020).
5. Kim, K. S. and Lee, K. G., "Numerical Study on Optimization of the SCR Process Design in Horizontal HRSG for NOx Reduction," *Journal of Environmental Science International*, **22**(11), 1481-1498 (2013).
6. 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).
7. 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. Compt. Fluids Eng.*, **25**(1), 13-19 (2020).
8. 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, Hangzhou (Jan. 2016).
9. Bae, S. W., Kim, M. K., Lee, C. S., and Chung, H. T., "Computational Simulation of the Aerodynamic Parameters in the Guide Vanes for DeNOx Facilities," Proc. 11th NCFE Conf., Jeju (Aug. 2020).
10. Ryu, C., "CFD Manual for Application to Facilities of Coal-Fired Power Plant," Doc. No.2015-Edu-02, KOEN (2016).
11. 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).
12. Lee, C. S., Kim, M. G., Ahn, B. H., and Chung, H. T., "A CFD Study on Aerodynamic Performances by Geometric Configuration of Guide Vanes in a Denitrification Facility," *Clean Technol.*, **28**(4), 316-322 (2022).
13. ANSYS, ANSYS Workbench-Mechanical Optimization Guide, ANSYS inc. (2019).
14. ANSYS, ANSYS FLUENT 2019 R1 User's Guide, ANSYS inc. (2019).