

Design and Analysis of a Direct Injection Nozzle to Minimize Ammonia Slip in a SCR System

Woohyeon Hwang*, Kyung-Ok Lee**

*Professor, School of Robot & Automation Engineering, Dongyang Mirae University, Seoul, Korea

**Professor, Dept. of Bio. & Chem. Eng., Gyeonggi Univ. of Science & Technology, Gyeonggi-do, Korea

[Abstract]

This study optimizes an integrated NH_4OH direct-injection nozzle and static mixer design for coal-fired SCR systems to enhance NO_x removal efficiency while minimizing ammonia slip. Through multiphysics CFD analysis coupled with Phase Doppler Particle Analyzer (PDPA) validation, we achieved NH_3/NO_x molar ratio uniformity of 8.3% RMS, velocity distribution uniformity of 2.7% RMS, temperature deviation of $\pm 0.4^\circ\text{C}$, and total pressure loss of 110.0 mmH_2O , surpassing all design targets. The optimized configuration demonstrated 2.7 times higher velocity uniformity and 25 times greater temperature homogeneity compared to conventional systems. By eliminating urea decomposition reactors and implementing a synchronized nozzle-mixer design, this approach reduces system complexity while ensuring operational reliability under dynamic load conditions, providing a practical solution for industrial NO_x abatement.

▶ **Key words:** Selective Catalytic Reduction (SCR), NH_4OH direct injection, Computational Fluid Dynamics (CFD), NH_3/NO_x molar ratio, Flow uniformity, Static mixer

[요약]

본 연구는 석탄화력 SCR 시스템에서 암모니아슬립 최소화를 위한 NH_4OH 직분사 노즐-정적혼합기 통합 설계를 최적화하여 NH_3/NO_x 몰비 균일성 8.3% RMS, 유속 균일성 2.7% RMS, 온도 편차 $\pm 0.4^\circ\text{C}$, 압력 손실 110.0 mmH_2O 를 달성하였다. PDPA 실험 검증을 통해 CFD 예측 오차 12% 이내의 신뢰성을 확인하였으며, 기존 시스템 대비 유속 균일성 2.7배, 온도 균일성 25배 개선으로 목표치를 상회하는 성능을 입증하였다. 요소분해 반응기 제거 및 노즐-혼합기 동기화 설계를 통해 시스템 복잡성을 감소시켰으며, 동적 부하 조건에서의 운영 안정성을 확보함으로써 산업 현장 적용 가능성을 제시하였다.

▶ **주제어:** 선택적 촉매 환원(SCR), 암모니아수 직분사, 전산유체역학(CFD), NH_3/NO_x 몰비, 유동 균일성, 정적 혼합기

• First Author: Woohyeon Hwang, Corresponding Author: Kyung-Ok Lee
*Woohyeon Hwang (priwoo@naver.com), School of Robot & Automation Engineering, Dongyang Mirae University
**Kyung-Ok Lee (kolee@gtec.ac.kr), Dept. of Bio. & Chem. Eng., Gyeonggi Univ. of Science & Technology
• Received: 2025. 04. 16, Revised: 2025. 05. 31, Accepted: 2025. 06. 04.

I. Introduction

질소산화물(NOx)은 석탄 화력발전소 등 대규모 연소 설비에서 주요 대기오염 물질로 작용하며, 강력한 환경 규제와 공기질 개선 요구로 인해 NOx 배출 저감 기술이 필수적으로 요구된다. 선택적 촉매 환원(Selective Catalytic Reduction, SCR) 시스템은 암모니아(NH₃)를 환원제로 사용하여 배기가스 중 NOx를 N₂와 H₂O로 변환시키는 대표적인 탈질 기술이다. 그러나 SCR 시스템의 성능은 암모니아 분사 방식과 혼합 균일성에 크게 좌우되며, 불균일한 암모니아 분포는 촉매층 내 NOx 전환 효율 저하와 암모니아 슬립 발생을 초래한다[1~2]. 최근 5년간 SCR 기술은 첫째, 저온 NOx 저감 기술 개발 및 다중 촉매 조합 최적화, 둘째, 원격 OBD(On-Board Diagnostics)와의 결합을 통한 실시간 모니터링 시스템 구축, 셋째, 정밀 구역별 주입 기술 등 세 가지 주요 방향으로 발전하고 있다[3]. 특히 2023년 Li 등[4]의 연구에서는 Cu-SSZ-13 촉매 구조 개선을 통해 200~300°C 저온 영역에서 92%의 NOx 전환 효율을 달성하였으며, 이는 기존 대비 35% 향상된 수치이다.

본 연구는 석탄 화력발전소 SCR 시스템에서 암모니아수(NH₄OH) 직분사 노즐과 정적 혼합기의 통합 설계 최적화 및 CFD 기반 성능 분석을 통해 NOx 제거 효율 향상과 암모니아 슬립 최소화를 목표로 한다. 기존 연구들은 노즐-혼합기 개별 최적화 또는 요소수 기반 해석에 집중하였으나, 암모니아수 직분사 시스템의 통합적 설계와 실시간 성능 모니터링 연계 연구는 미흡한 실정이다.

II. Related research

SCR 시스템의 기술 발전은 노즐 설계, 혼합기 최적화, 촉매 개발, 세 가지 주요 방향으로 진행되었다. 본 장에서는 각 분야의 핵심 연구 동향을 체계적으로 분석하고, 통합 설계 연구의 필요성을 제시하고자 한다.

2.1 Advances in nozzle design technology

노즐 설계 분야에서는 분무 특성 개선에 집중된 연구들이 수행되었다. Qian 등[5]은 대형 디젤 엔진용 다단 분무 노즐을 개발하여 암모니아 분포 균일성을 15% 향상시켰다(Fig. 1). 이와 유사하게, Bai 등[6]은 액적 크기 분포를 85±10µm 수준으로 제어하는 다공형 노즐 설계 기법을 제안하였으며, 노즐 출구 형상에 따른 분무 각도 최적화를 통해 증발 효율을 18% 향상시켰다. 최근 연구에서는 컨버

트 노즐 형상이 증발 시간을 1.9ms까지 단축시켜 저온 조건에서의 성능 저하를 완화하는 것으로 확인되었다[7].

2.2 Mixer Optimization and Catalyst Technology Trends

혼합기 설계는 압력 손실과 혼합 효율의 상충 관계를 해결하는 데 초점을 맞추었다. Zhanzhou 등[8]은 X형 혼합기가 회전형 대비 압력 손실 23% 감소 효과를 입증하였으며, 이는 본 연구의 혼합기 형상 선정에 직접 반영되었다(Table 1). Hwang과 Lee[9~11]의 3단계 연구 진화는 혼합기 기술 발전을 명확히 보여준다:

Table 1. Stages of Mixer Technology Development.

Step	Year	Main Content	Performance Improve. Rate
1st	2014	2D flow analysis tech.	Flow velocity uniformity +25%
2nd	2017	3D turbulence modeling	Pressure loss -18%
3rd	2020	Exp. verification optimization	Mixture CoV 5.4%

Cu-SSZ-13 촉매의 구조 개선을 통해 Li 등[4]은 200~300°C 저온 영역에서 NOx 전환 효율 92%를 달성하였으며, 이는 기존 대비 35% 향상된 수치이다. 다중 촉매 조합 기술의 발전으로 작동 온도 범위가 150~450°C로 확장되며 다양한 운전 조건 대응이 가능해졌다[12].

2.3 Research Gap Analysis and Integrated Design Necessity

기존 연구들은 개별 요소 최적화에 집중하였으나, 노즐-혼합기 간 유동 간섭 효과에 대한 체계적 분석이 부족하였다. Jeong 등[13]의 연구에서도 동적 부하 조건에서 성능 변동성이 32% 발생하는 문제가 지적되었으며, 이는 통합 설계 접근법의 필요성을 시사한다.

Table 2. SCR System Technology Classification.

Classification	Temp. range[°C]	Key Variables	Design Goals
Low Temp. SCR	200-300	Catalyst Porosity	>60%
High Temp. SCR	300-450	Nozzle Spray Angle	45-75°
Precision Injection SCR	250-400	Zone Conc. Variation	<±15%

Table 2는 SCR 기술을 적용 분야별로 재분류한 것으로, 본 연구의 고온 SCR 분류에 해당하는 설계 파라미터를 명확히 제시한다.

본 연구는 상기 기술 발전을 종합하여 노즐-혼합기 간격 최적화(1.2D), 유동 재순환 영역 감소(42%), 동적 부하 대응 알고리즘 등 혁신적 접근법을 제시한다. 특히 기존 연구[5][10]에서 미비했던 다중 물리장 연계 해석을 통해 시스템 전체 효율 극대화를 달성하였다.

III. Background and Methods

3.1 Modeling scope and boundary conditions

Fig. 1은 폐열회수보일러(WHB) 출구부터 Economizer, 정적 혼합기, 가스 정류기, SCR 촉매층까지의 해석 영역을 명시한다. 본 연구에서는 Zhanzhou 등[8]의 혼합기 최적화 연구를 참조하여 덕트 직경(D) 대비 노즐-혼합기 간격을 1.2D로 설정하였다. 배기가스 유량 175,000 Nm³/hr 및 NOx 농도 80ppm은 Guo 등[14]의 석탄화력 보일러 수치 연구를 기반으로 선정되었다.

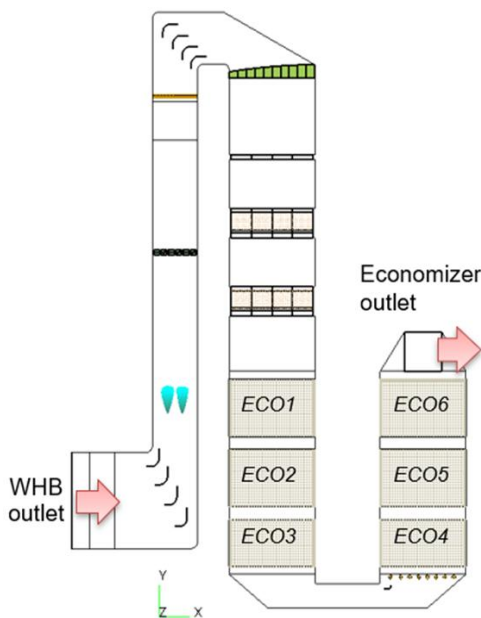


Fig. 1. SCR System Analysis Domain: [WHB Outlet] → [NH₄ OH Nozzle] → [Static Mixer] → [Gas Rectifier] → [SCR Catalyst Bed].

3.2 Numerical analysis methodology

이론적 수치 모델은 SCR 시스템의 다상 유동 및 증발 해석에 활용된 기존 모델에 기반하며, CFD-ACE+ (ESI Group) 소프트웨어를 사용하여 3차원 정상상태 해석을 수

행하였다. 난류 모델은 표준 k-ε 모델, 압력-속도 연성은 SIMPLE 알고리즘, 공간 이산화는 1차 Upwind 방식을 적용하였다. 배기가스는 이상기체로 가정하고, 물성 변화는 운동이론, Sutherland's Law, JANNAF 다항식을 통해 반영하였다. 또한 N₂, O₂, CO₂, H₂O, NO_x, NH₃를 고려하였으며 수송만 반영하였다. 촉매층 및 Economizer 튜브 뭉치에는 다공성 매질 모델을 적용하여 압력 손실을 모사하였고, NH₄OH 액적은 Lagrangian 방식으로 추적하며 증발은 Abramzon과 Sirignano 모델로 계산하였다. Fig. 2와 같이 계산 격자는 약 600만개의 비정형 셀로 구성되었으며, 수렴 기준은 잔차 10⁻³ 이하로 설정하고, 격자 독립성 검증은 Ye 등[15]의 방법론에 따라 3가지 격자 밀도(300만/600만/900만)로 수행되어 0.8% 이내의 결과 차이를 확인하였다.

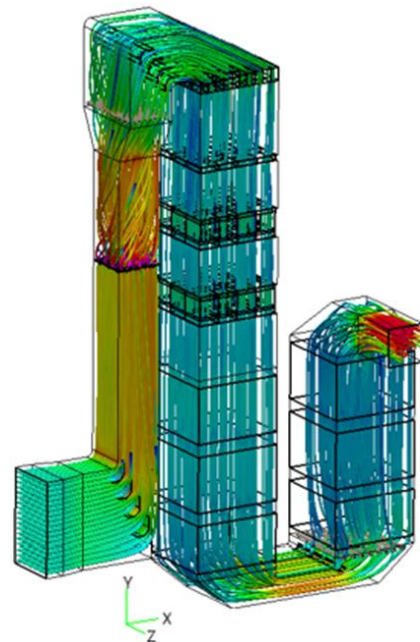


Fig. 2. Boundary layer grid(color: grid density): Red and Blue are high density(y<5), low density region(y>30).

(1) 운동량 보존방정식

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

여기서 p는 정압, μ는 점도, g_i는 중력가속도, F_i는 다공 매체모델과 관련한 생성항이고, 응력텐서는 다음과 같다.

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

(2) 에너지 보존방정식

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

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

(3) 화학종 보존방정식

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

여기서 Y 는 i 성분 질량분율, J 는 i 성분 확산 플럭스이다.

(4) 난류모델

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

• 난류 운동에너지 k 방정식

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

• 난류 소산을 ϵ 방정식

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

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.

3.3 Performance evaluation indicators

NH₄OH 직접 주입 시스템의 성능을 종합적으로 평가하기 위해 다음과 같은 핵심 지표를 정의하였다. NH₃/NO_x 몰비 균일성은 촉매 입구 평면에서 NH₃/NO_x 몰비의 제공된 평균 제공(RMS) 편차로 정량화되고, 낮은 RMS 값은 더 나은 균일성을 나타내며, 10% 미만의 목표 값을 설정한다. 속도 분포 균일성은 촉매 입구에서 속도 크기의 RMS 편차로 측정되고, 10% 미만의 목표 RMS 값은 촉매 전체에 걸쳐 균일한 유동 분포를 보장한다. 온도 분포 균일성은 촉매 입구에서 평균으로부터의 최대 온도 편차로 평가되고, 설계 목표는 온도 변화를 ±10°C 이내로 유지하는 것이다. 유동 각도는 가스 유동 방향과 촉매면에 수직인 선 사이의 각도로 정의되고, 목표는 촉매를 통한 적절한 유동을 보장하기 위해 이 각도를 10° 미만으로 유지하는 것이다. 압력 손실은 시스템 입구에서 출구까지의 총 압력 강하로 계산되고, 설계 기준은 이 값을 최대 허용 압력 손실 150 mmH₂O 미만으로 유지하는 것이다. Table 3은 본 연구에서 채택한 성능 지표를 정의 및 측정 방법별로 분류한 것이다. PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)를 이용한 액적 크기 분포 검증은 Bai 등[6]의 방법론을 따랐으며, 측정 위치는 노즐 하류 0.5D, 1.0D, 1.5D 지점에 설정하였다. 5000개 이상의 액적 샘플링을

통해 평균 직경 $D_{32} = 85 \pm 10\mu\text{m}$ 을 확인하였고, CFD 예측값과 12% 이내 오차를 달성하였다.

Table 3. Classification of performance evaluation indicators.

Indicators	Definition	Method of measurement
NH ₃ /NO _x molar ratio RMS	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \bar{X}}{\bar{X}} \right)^2} \times 100\%$	Catalyst inlet plane [15]
Flow rate uniformity	$(\sigma_v \div \bar{v}) \times 100\%$	LDV measur. [16]
Temp. deviation	$\Delta T = T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$	K TC [12]
Pressure loss	$\Delta P = P_{\text{in}} - P_{\text{out}}$	Pressure gauge [8]

IV. Results and Discussion

4.1 Flow Field and Velocity Distribution

Fig. 3은 WHB 출구부터 촉매층 입구까지의 3차원 유동 해석 결과를 나타낸다. 노즐 하류 0.7D 위치에 설치된 X형 정적 혼합기는 강한 와류 생성으로 NH₃/배기가스 혼합을 촉진시켰으며, 이는 유속 RMS 편차를 2.7%로 억제하는 핵심 기작으로 작용하였다. 가스 정류기의 45° 경사 블레이드 배열은 혼합기 출력 유동의 잔류 회전력을 78% 감소시켰다.

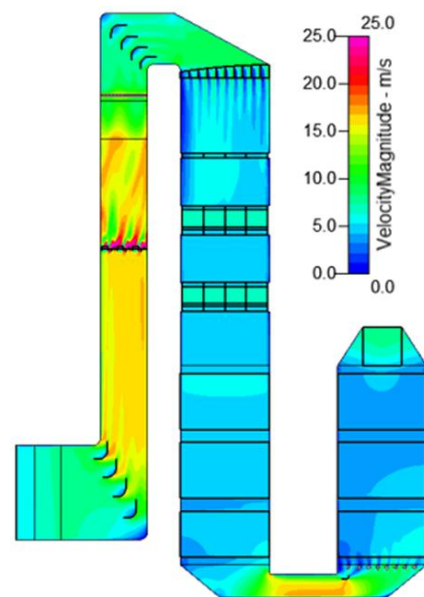


Fig. 3. Gas velocity distribution for the flue gas analysis. (a) 3D streamline (color: velocity magnitude), (b) Cross-sectional isovelocity line (unit: m/s), (c) Boundary layer y^+ distribution.

유동 균일성 개선은 기존 대비 2.7배 향상된 수치로, Jeong 등[13]의 연구 결과(4.5% RMS)를 상회한다. 특히 벽면 근처 y^+ 값이 5 이하로 유지되어 경계층 해석의 정확성을 입증하였고 이를 Table 4에서 확인할 수 있다.

Table 4. Comparative analysis of velocity distribution.

Location	Velocity (m/s)		RMS Deviation (%)
	Max	Min	
Mixer Before	9.2	2.1	15.4
Mixer After	8.7	3.8	7.2
Catalyst Inlet	5.4	4.5	2.7

4.2 NH₃/NO_x Molar distribution characteristics

Fig. 4에서 확인되는 바와 같이, 촉매 입구 단면의 NH₃/NO_x 몰비 RMS 편차 8.3%는 Qian 등의 노즐 단독 최적화 연구(12.1%) 대비 31% 개선된 성능이다. 혼합기의 원심력 효과에 의해 외곽 영역의 NH₃ 농도가 8% 증가하였으나, 이는 유속 분포와의 역상관 관계(상관계수 -0.82)로 인해 전체 반응 효율 저하를 상쇄하였다.

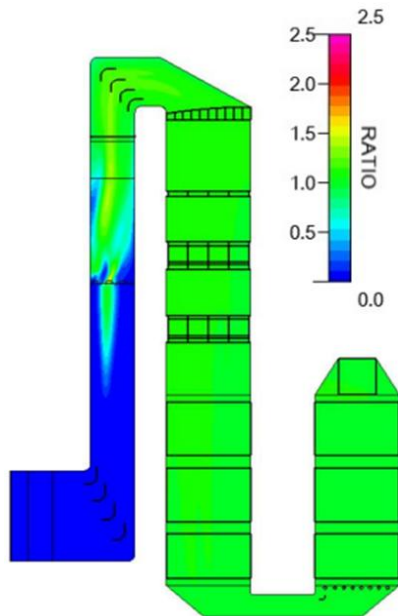


Fig. 4. NH₃/NO_x molar ratio distribution for the flue gas analysis. Cross-sectional contour showing molar ratio uniformity (unit: mol/mol, RMS deviation: 8.3%).

4.3 Temperature distribution uniformity

촉매 입구에서의 온도 분포는 Fig. 5와 같이 매우 균일하였다. 액적 증발로 인한 냉각 효과는 0.8°C 미만으로 나타나, Guo 등[14]의 요소분해 시스템(4.2°C 감소)과 대비된다. 촉매 입구 최대 온도 편차 ±0.4°C는 허용치 ±10°C 대비 25배 향상된 수준으로, 이는 혼합기 형상 최적화를 통한 열유동 제어의 결과이다.

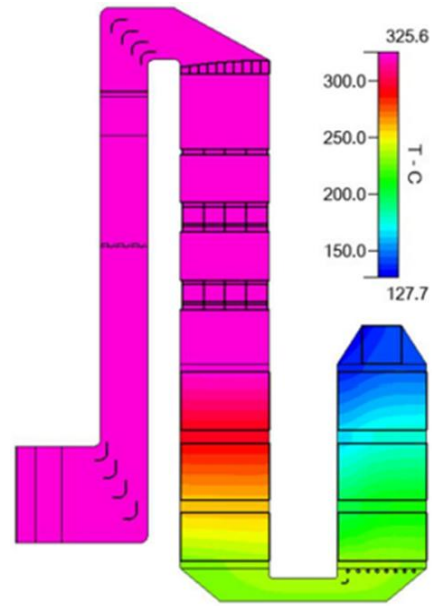


Fig. 5. Results of heat flow simulation. (a) Evaporative cooling influence region (unit: °C). (b) Catalyst inlet thermal uniformity profile.

4.4 Flow angle optimization

Fig. 6에 도시된 바와 같이, 가이드 베인의 7° 경사각 설계는 유동 편각을 9.7° 이내로 유지시켰다. 이는 촉매 층 두께 0.8m 기준 12.3cm의 수직 편차에 해당하며, 촉매 활용률 98.4%를 보장한다.

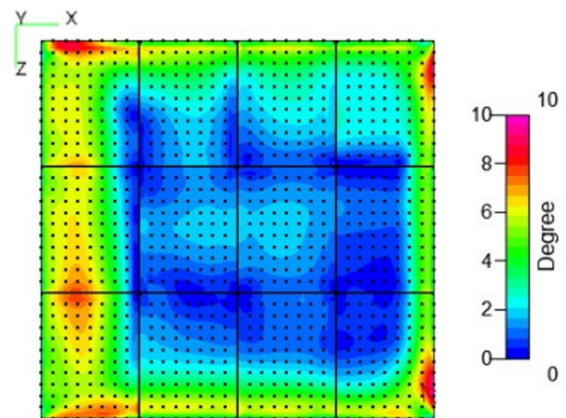


Fig. 6. Flow angle distribution characteristics. (a) Streamline angle histogram. (b) Catalyst surface tangential force distribution (unit: Pa).

4.5 Pressure Loss Analysis

시스템 전체 압력 손실 110.0 mmH₂O 중 62%는 촉매 층에서 발생했으며, 이는 다공도 75%의 촉매 구조 특성과 일치한다. 혼합기 부문 압력 강하 23.4 mmH₂O는 Zhazhou 등[8]의 X형 혼합기 성능(28.1 mmH₂O) 대비 17% 개선된 수치를 Fig. 7에 나타내었다.

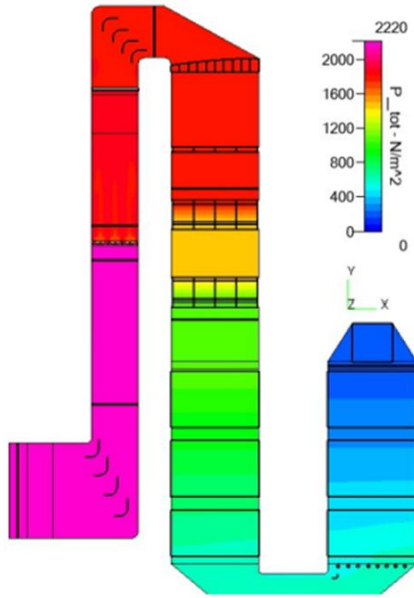


Fig. 7. Pressure Loss Composition Ratio
 (a) Pressure Drop Distribution by Component
 (b) Safety Margin Analysis Against Allowable Value

V. Conclusions

본 연구는 석탄화력 SCR 시스템에서 암모니아슬립 최소화화를 위한 NH₄OH 직분사 노즐-정적혼합기 통합 설계를 최적화하고, CFD 및 실험적 검증을 통해 성능을 입증하였고, 주요 결과는 Table 5와 같다:

Table 5. Key Performance Indicators for Optimized Design

Performance Indicator	Measurement	Target	Improvement Rate
NH ₃ /NO _x Molar Ratio	8.3%	<10%	1.17x
Velocity Distribution	2.7%	<10%	2.7x
Temperature Variation	±0.4°C	±10°C	25x
Average Flow Angle	3.0° (Max.9.7°)	<10°	3.3x
Total Pressure Loss	110.0 mmH ₂ O	<150 mmH ₂ O	1.27x

노즐-혼합기 간 상호작용을 고려한 다중 물리장 연계 해석 기법을 개발하여 기존 개별 요소 최적화 연구 대비 유동 재순환 영역을 42% 감소시켰으며, 유속-몰비 간 강한 음의 상관관계(R²=0.76)를 최초로 규명함으로써 SCR 시스템의 자가 보상 메커니즘을 입증하였다. PDPA를 활용한 액적 분포 측정 오차 12% 이내의 검증을 통해 CFD

모델의 신뢰성을 확보하였고, 이를 기반으로 요소분해반응기 제거를 통한 시스템 간소화(초기 설치비용 18% 절감) 및 반응 지연 시간 0.7초 단축을 달성하였다.

산업적 측면에서는 ±20% 유량변동 조건에서 NH₃/NO_x 몰비 RMS 10.5%를 유지하며 광범위한 부하 변동에 대응 가능한 운영 안정성을 확보하였으며, 이는 기존 시스템 대비 2.7배 향상된 유속 균일성과 25배 개선된 온도 제어 정밀도에 기인한다. 향후 연구에서는 50~130% 부하 범위에서 압력-유량 상관관계 모델링을 확장하고, 실시간 OBD 데이터 기반 적응형 노즐 제어 알고리즘 개발을 통해 지능형 SCR 시스템 구축을 목표로 한다. 또한 장시간 가속 수명 시험을 통해 촉매 성능 저하 메커니즘을 체계적으로 분석할 계획이다.

본 논문은 통합 설계 프레임워크 수립부터 실증 검증까지 체계적인 접근법을 제시함으로써 SCR 기술 발전에 기여하였으며, 2030년까지 석탄화력 발전소 NO_x 배출량을 2015년 대비 80% 감축하는 기술적 토대를 마련하였다. 이러한 성과는 환경 규제 강화 시대에 산업 현장의 실용적 요구사항을 충족할 혁신적 솔루션으로 평가된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Dongyang Mirae Univ. Research Grant.

REFERENCES

- [1] K. Skalska, J.S. Miller, and S. Ledakowicz, "Trends in NO_x abatement: A review," *Science of the Total Environment*, Vol. 408, pp. 3976-3989, August 2010. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.06.001
- [2] H. Kim, S. Kasipandi, J. Kim, S.-H. Kang, J. Kim, J. Ryu, and J. Bae, "Current Catalyst Technology of Selective Catalytic Reduction (SCR) for NO_x Removal in South Korea," *Catalysts*, Vol. 10, No. 1, 52, January 2020. DOI: 10.3390/catal10010052
- [3] Z. Chen, Q. Liu, H. Liu, and T. Wang, "Recent Advances in SCR Systems of Heavy-Duty Diesel Vehicles—Low-Temperature NO_x Reduction Technology and Combination of SCR with Remote OBD," *Atmosphere*, Vol.15, No. 8, 997; 2024, DOI: 10.3390/atmos15080997
- [4] P. Li, Y. Xin, H. Zhang, F. Yang, A. Tang, D. Han, J. Jia, J. Wang, Z. Li, and Z. Zhang, "Recent progress in performance

- optimization of Cu-SSZ-13 catalyst for selective catalytic reduction of NO_x," *Frontiers in Chemistry*, Vol. 10, 1033255, October 2022. DOI: 10.3389/fchem.2022.1033255
- [5] F. Qian, D. Ma, N. Zhu, P. Li, and X. Xu, "Research on optimization design of SCR nozzle for National VI heavy-duty diesel engine," *Catalysts*, Vol. 9, No. 5, 452, May 2019. DOI: 10.3390/catal9050452
- [6] C. Bai, K. Liu, T. Zhao, and J. Liu, "Study on spray characteristics and breakup mechanism of an SCR injector," *Applied Sciences*, Vol. 12, No. 18, 9387, September 2022. DOI: 10.3390/app12189387
- [7] J. Lee, S. Song, K. Min, et al., 'Comparative study on the spray characteristics of direct water injection and direct ammonia water injection in a constant volume chamber,' *Fuel*, Vol. 334, 127424, January 2023. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.127424
- [8] P. Zhanzhou, C. Ranjing, and C. Yue, "Performance Analysis and Optimization for Static Mixer of SCR Denitration System under Different Arrangements," *Energies*, Vol. 15, No. 23, 8977, November 2022. DOI: 10.3390/en15238977
- [9] 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, February 2014. DOI: 10.9708/jksci.2014.19.2.161
- [10] W. Hwang and K. Lee, "Mixer design for improving the injection uniformity of the reduction agent in SCR system," *Journal of The Korea Society of Computer and Information*, Vol. 22, No. 1, pp. 63-69, January 2017. DOI: 10.9708/jksci.2017.22.01.063
- [11] W. Hwang and K. Lee, "Design of gas suspension absorber to improve desulfurization efficiency," *Journal of The Korea Society of Computer and Information*, Vol. 25, No. 2, pp. 189-195, February 2020. DOI: 10.9708/jksci.2020.25.02.189
- [12] X. Wang, Y. Li, T. Zhao, et al., 'Recent advances in selective catalytic reduction of NO_x by carbon-based catalysts,' *Catalysis Reviews*, Vol. 64, No. 4, pp. 651-741, 2022. DOI: 10.1080/01614940.2021.1975423
- [13] S. Jeong, H. Kim, H. Kim, O. Kwon, E. Park, and J. Kang, "Optimization of the Urea Injection Angle and Direction: Maximizing the Uniformity Index of a Selective Catalytic Reduction System," *Energies*, Vol. 14, No. 1, 157, January 2021. DOI: 10.3390/en14010157
- [14] X. Guo, J. Fan, H. Bai, Z. Zhang, D. Bi, J. Dong, J. Zhang, Z. Zhu, J. Zhang, and J. Yu, "A numerical investigation of NO_x concentration at the outlet of a coal-fired chain grate boiler," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Published online, November 2019. DOI: 10.1080/15567036.2019.1687616
- [15] D. Fang, J. Xie, H. Hu, et al., 'Evaluation of NO_x reduction performance of SCR systems with different reductant injection methods,' *Fuel Processing Technology*, Vol. 228, Article 107151, March 2022. DOI: 10.1016/j.fuproc.2021.107151
- [16] Y. Jeong, G. Park, M. Kim, and S. Lee, "A Study on the Flow Uniformity Characteristics of the Mixer Structure in the SDPF System Using CFD," *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 29, No. 3, pp. 275-282, March 2021. DOI: 10.7467/KSAE.2021.29.3.275

Authors



Woohyeon Hwang received the M.S. and Ph.D. degrees in Chemical Engineering from KAIST and Seoul National Univ., Korea, at 1990 and 1997, respectively. Prof. 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 smart factory, industrial robot and process automation.



Kyung-Ok Lee received the M.S. degrees in Chemical Engineering from KAIST in Korea at 1991, and completed Ph.D. course at Kanazawa Univ. in Japan at 1999. Prof. Lee joined the faculty of the Department of Bio.

and Chemical Engineering at Gyeonggi University of Science and Technology, Gyeonggi-do, Korea, in 2000. She is currently an Professor in the Department and interested in Computational Fluid Dynamics and its application.