



화력발전소 탈질설비의 암모니아 혼합 관에서 희석 공기와 암모니아의 혼합에 관한 연구

김기호 · †하지수*

계명대학교 기계공학과 석사, *계명대학교 기계공학과 교수
(2022년 2월 21일 접수, 2022년 4월 25일 수정, 2022년 4월 26일 채택)

A Study on the Mixing of Dilution Air and Ammonia in the Ammonia Mixing Pipe of the Thermal Power Plant De-NO_x Facility

Ki-Ho Kim · †Ji-Soo Ha*

Graduate school of Mechanical Engineering, Keimyung University, Daegu 1000, Korea

**Dept. of Mechanical Engineering, Keimyung University, Daegu 1000, Korea*

(Received February 21, 2022; Revised April 25, 2022; Accepted April 26, 2022)

요약

강화되는 환경 규제에 따라 석탄 화력발전소에서는 암모니아를 환원제로 사용하는 선택적 촉매 환원법을 이용하여 질소산화물의 발생량을 감소시키고 있다. 본 연구에서는 전산유동 해석을 수행하여 암모니아 혼합 관에서 희석 공기와 암모니아를 효과적으로 혼합하기 위한 혼합 장치를 도출하는 것을 목적으로 수행하였다. 혼합 장치가 없는 기존 혼합 관 형상인 Case 1-1 형상을 기준으로 혼합 관내의 후류 단면과 16개 출구에서 암모니아 농도의 %RMS를 비교하여 혼합 효과를 비교하였다. 혼합 장치는 암모니아 공급 관 후류에 사각 판과 혼합 관 벽면에 원호 모양의 판의 위치를 변경하여 수행하였다. 기존 형상의 경우(Case 1-1)에 16개 출구에서 암모니아 농도의 %RMS는 29.50%로 나타났다. 혼합 장치 형상이 암모니아 공급 관 후류에 사각 판이 있는 것과 인접한 곳에 원호 판을 설치한 Case 3-2 형상의 16개 출구에서 암모니아 농도의 %RMS는 2.08%로 나타났으며 암모니아 혼합에 가장 효과적인 혼합 형상을 알 수 있었다.

Abstract - According to reinforce environmental regulations, coal power plants have used selective catalytic reduction using ammonia as a reducing agent to reduce the amount of nitrogen oxide generation. The purpose of the present study was to derive a mixing device for effectively mixing dilute air and ammonia in the ammonia mixing pipe by performing computational fluid dynamic analysis. The mixing effect was compared by analysing the %RMS of ammonia concentration at the down stream cross section in the mixing pipe and the 16 outlets based on the case 1-1 shape, which is an existing mixing pipe without a mixing device. The mixing device was performed by changing the positions of a square plate on the downstream side of the ammonia supply pipe and an arc-shaped plate on the wall of the mixing pipe. In the case of the existing geometry(Case 1-1), the %RMS of ammonia concentration at the 16 outlets was 29.50%. The shape of the mixing device for Case 3-2 had a square plate on the downstream side of the ammonia supply pipe and an arc plate was installed adjacent to it. The %RMS of ammonia concentration for Case 3-2 was 2.08% at 16 outlets and it could be seen that the shape of Case 3-2 was the most effective mixing shape for ammonia mixing.

Key words : selective catalytic reduction, mixer plate, ammonia concentration, mixing pipe, %RMS

†Corresponding author:jisooaha@kmu.ac.kr

Copyright © 2022 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

산업혁명 이후 산업 고도화가 진행되면서 많은 양의 전기가 필요하였고 그에 따라 발전량을 증대시키기 위해 석탄 화력발전소가 건설되었다. 2021년 기준 총 60기의 석탄화력발전기가 운전 중[1]이며 배출되는 공해물질이 많아 대기오염은 불가피한 상황이다. 국내뿐만 아니라 국외에서도 환경오염에 대한 걱정과 관심으로 환경 관련 법을 엄격하게 제·개정하고 있고 매년 공해물질 배출허용기준을 더욱 강화하고 있다. 신재생 에너지의 발전으로 석탄 화력발전소에서 발전량이 줄어들고 있지만, 국내 발전량 36% 이상이 석탄 화력발전소에서 생산[2]되고 있다. 그러므로 석탄 화력발전소를 폐쇄하는 것은 불가능하며 석탄 화력발전소에서 나오는 공해물질 발생을 줄이는 방향으로 다가야 하는 실정이다.

환경 규제로 인해 석탄 화력발전소에서 탈황설비 및 탈질설비, 전기집진기와 같은 환경설비가 설치되고 있다. 탈질설비는 대기오염 물질인 질소산화물(NOx)을 감축하는 후처리 공정을 뜻한다. 후처리 공정에는 선택적 무 촉매 환원법 (Selective Non-Catalytic Reduction, SNCR)과 선택적 촉매 환원법(Selective Catalytic Reduction, SCR)이 있고 석탄 화력발전소에서는 질소산화물 저감 효율이 높은 SCR[3]을 주로 사용하고 있다. SCR 탈질설비는 질소산화물을 제거하는 환원제로 암모니아(Ammonia)를 사용하여 선택적 촉매 환원법이라 불린다. 암모니아는 질소산화물과 촉매층에서 반응하여 질소산화물이 물과 질소로 변환된다.

질소산화물 발생을 감축하기 위해서는 촉매층 전단에서 환원의 효율을 높이고 불균일한 유동으로 발생하는 암모니아 슬립 현상을 줄여야 한다. 환원의 효율을 향상시키기 위해서는 촉매층 전단에서의 유동 및 압력 균일화, 촉매 반응온도 유지, 암모니아 농도 균일도가 중요한 요인이다. 현재 유동 안정화 및 균일도를 높이기 위해 Guide Vane 최적설계[4], Static Mixer의 각도 및 형상변환[5-6]과 암모니아 분사 그리드(Ammonia Injection Grid, AIG) 노즐 각도 및 분사량 제어[7] 등 많은 연구들이 국내외에서 활발하게 이루어지고 있다.

본 연구는 암모니아 분사 그리드에서 균일한 분사량과 암모니아 농도가 균일하도록 하기 위하여 전산 유동해석을 이용하여 암모니아 혼합 관에서 유동해석을 수행하였다. 암모니아 혼합 관에서 혼합을 위하여 혼합 장치 형상과 위치에 따라 유동과 암모니아 농도 분포를 분석하여 암모니아와 공기의 균일한 혼합을 통한 암모니아 균일도 향상에 적합한 암모니아 혼

합장치의 설계에 목적을 두고 있다.

II. 해석 방법

2.1. 지배방정식

본 연구에서는 전산해석을 수행하기 위해 정상상태의 3차원 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식, 난류모델은 Standard $k-\epsilon$ 을 사용하였고 암모니아와 공기의 질량분율 방정식을 이용하였다. 수치해석에서 사용된 모든 방정식은 아래에 정리하였다.

$$\begin{aligned} &\text{연속방정식} \\ &\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} &\text{정상상태 운동량방정식} \\ &\rho(\vec{V} \cdot \nabla \vec{V}) = -\nabla P + \nabla(\mu_{eff} \nabla \vec{V}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} &\text{에너지 방정식} \\ &\rho C_p(\vec{V} \cdot \nabla T) = \nabla(k \nabla T) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} &\text{난류 운동에너지방정식} \\ &\rho(\vec{V} \cdot \nabla k) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] - \rho \epsilon + G_k \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} &\text{난류 소산율방정식} \\ &\rho(\vec{V} \cdot \nabla \epsilon) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} &\text{난류점성계수} \\ &\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} &\text{유효점성계수} \\ &\mu_{eff} = \mu + \mu_t \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} &\text{공기와 암모니아 질량분율 방정식} \\ &\rho(\vec{V} \cdot \nabla Y_{NH_3}) = \nabla(\rho D \nabla Y_{NH_3}) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} &\text{공기, 암모니아 질량분율 관계식} \\ &Y_{NH_3} = 1 - Y_{air} \end{aligned} \quad (9)$$

2.2. 암모니아 혼합 관 형상 및 유동해석조건

본 연구의 대상은 현재 화력발전소에서 운영되고 있는 탈질설비에서 희석 공기와 암모니아를 혼합하는 혼합 관이며 암모니아가 암모니아 분사 그리드

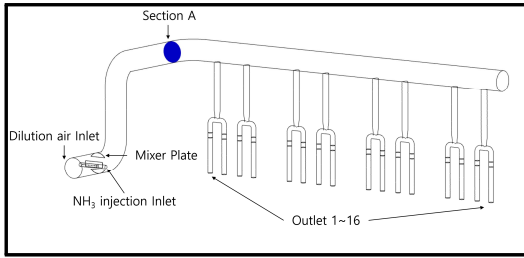


Fig. 1. Configuration of ammonia mixing pipe.

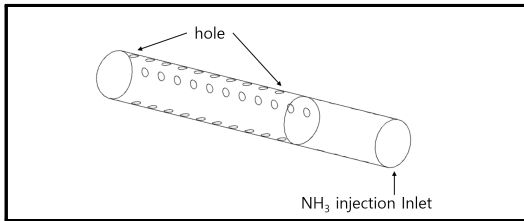


Fig. 2. Configuration of NH₃ injection pipe.

(Ammonia Injection Grid, AIG)에서 분사되기 전 암모니아와 공기를 혼합시켜주는 장치이다. 암모니아 혼합 관의 전체적인 형상은 Fig. 1에 나타내었다. 암모니아 분사 그리드 16개에 공급되는 출구 번호는 희석 공기 입구(Dilution air inlet)에서부터 가장 가까운 출구를 1, 가장 먼 출구를 16으로 선정하였다. Fig. 2는 암모니아 공급 관(NH₃ injection pipe)을 확대하여 나타내었다. 암모니아는 암모니아 유입 입구로부터 유입되며 여러 개의 구멍(hole)을 통과하여 희석 공기와 혼합하게 된다. Fig. 1에서 Section A 단면은 16개의 암모니아 분사 그리드로 흘러가기 전에 암모니아가 혼합되는 정도를 살펴보기 위해 설정한 단면이다.

본 연구에서 전산 유동 해석은 상용 소프트웨어인 Fluent ver. 21를 활용하여 유동해석을 수행하였다. 격자의 개수는 약 540만개이고 격자의 형상은 Tetrahedron, 격자 품질 기준인 Skewness는 0.87로 격자를 생성하였다.

전산유동해석은 혼합 장치의 형상과 위치를 변화하여 진행하였고 Fig. 3에 6개의 해석 Case의 형상을 나타내었다. Case 1-1은 암모니아 혼합 관에 혼합 장치가 없는 것이고, Case 1-2는 암모니아 공급 관 후방 중앙에서 암모니아 공급 관의 지름(D)의 2배인 곳에 폭이 1.5D인 사각 혼합 판이 있는 경우이다. Case 2-1은 암모니아 혼합 관의 곡관을 지난 수직 배관에 어긋난 위치에 원형 관 벽면에 2개의 원호 형태의 혼합 판을 설치하였다. Case 2-2는 Case 1-2와 Case 2-1을 혼

합한 형상이다. Case 3-1은 암모니아가 분사되는 부근에 2개의 원형 관 벽면에 원호 형태의 혼합 판을 설치한 형상이고 Case 3-2는 Case 1-2와 Case 3-1을 혼합한 형상이다. Case 3-2에서 혼합 판들의 위치와 폭의 크기를 Fig. 4에 나타내었다.

희석용 공기의 질량유량은 0.9085kg/s이고, 암모니아의 질량유량은 0.0185kg/s이다. 희석 공기 입구 직경은 406mm이고 암모니아 입구 직경은 73mm이다. 혼합된 공기와 암모니아가 혼합된 경우의 평균 질량분율은 2.00%이다.

III. 유동해석 결과분석

3.1. Case 1-1, Case 1-2에서의 암모니아 혼합 특성 분석

본 절에서는 암모니아 혼합 관에서 혼합 효과를 보기 위해 혼합 장치 형상 중에 Case 1-1과 Case 1-2의 형상에서 암모니아 농도 분포를 분석하여 혼합 특성을 살펴보기로 한다. 암모니아 혼합 특성을 파악하기 위해 Fig. 5에서 암모니아 혼합 관의 중간 단면과 Section A에서 암모니아 contour를 비교하여 나타내었다. 중간 단면에서 암모니아 농도 분포를 살펴보면 어떠한 혼합 장치도 없는 경우인 Case 1-1는 희석공기와 혼합되는 초기 영역에서 Case 1-2에 비하여 잘 섞이지 않고 후류로 흐르는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 결과로 Section A에서 Case 1-1의 경우가 암모니아 농도가 낮은 파란색 영역이 상대적으로 넓게 분포하는 것을 관찰할 수 있다.

암모니아의 혼합 정도를 정량적으로 비교하기 위하여 Section A 단면과 16개 분사 그리드의 출구(outlet)로 나가는 유동의 암모니아 농도에 대한 %RMS(Root Mean Square)를 계산하여 비교하기로 한다. %RMS와 암모니아 농도 편차 비율(R_{NH_3})은 아래의 식과 같이 정의하였다. 식 (10)에서의 $Y_{NH_3,k}$ 는 Section A 단면 내 격자에서의 암모니아 질량분율을 뜻하고, $Y_{NH_3,mean}$ 은 Section A 단면에서의 암모니아 질량분율 평균값을 뜻한다. 식 (11)에서의 $Y_{NH_3,mean}$ 은 16개 AIG 출구의 암모니아 질량분율 평균값을 뜻한다.

$$\%RMS = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^N (Y_{NH_3,k} - Y_{NH_3,mean})^2}}{Y_{NH_3,mean}} \times 100 \quad (10)$$

$$R_{NH_3} = \frac{(Y_{NH_3,i} - Y_{NH_3,mean})}{Y_{NH_3,mean}} \times 100 \quad (11)$$

($i = 1 \sim 16$)

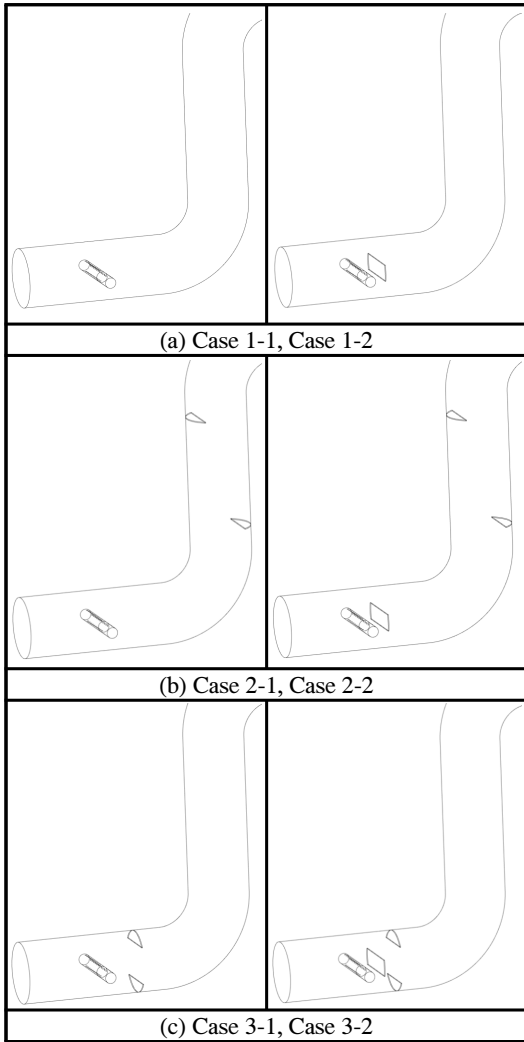


Fig. 3. Shapes of the ammonia mixing pipe for 6 cases.

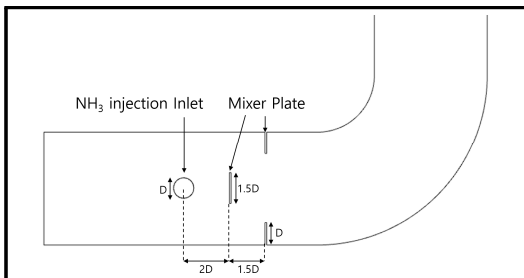


Fig. 4. Shape and location of the mixer plate in the ammonia mixing pipe for Case 3-2.

Section A 단면에서 암모니아 농도의 %RMS는 앞에서 예측한 것과 같이 Case 1-1은 27.58%이고 Case 1-2는 16.32%로 나타났다. Fig. 6에 16개 출구에서 Case 1-1과 Case 1-2의 암모니아 농도 편차 비율의 변화를 나타내었다. 혼합 장치가 없는 Case 1-1은 출구 번호(outlet number) 1번과 2번에서 높은 농도를 보여주고 있고 5번에서 8번까지는 상대적으로 낮은 농도 분포를 보여 주고 있다. Case 1-2는 출구 번호 1번과 2번에서 낮은 농도이고 3번과 4번에서 높은 농도를 보여 주고 있다. 이러한 분포의 결과로 16개의 출구 농도로 계산한 %RMS는 Case 1-1이 29.50%이고 Case 1-2는 21.78%로 나타났다. 이로부터 Case 1-2에서 사용한 혼합 장치는 암모니아 혼합 효과로 %RMS로 판단할 때 7.72%만큼 감소하게 하는 효과를 보여 주고 있다. 이러한 결과는 Table 1에 정리하여 나타내었다.

3.2. Case 2-1, Case 2-2에서의 암모니아 혼합 특성 분석

앞서 해석한 Case 1-1과 Case 1-2의 결과를 바탕으로 유동 및 암모니아 분포 균일도를 향상하기 위해 혼합 판의 위치를 변경한 Case 2-1과 Case 1-2와 Case 2-1을 혼합한 Case 2-2 혼합 장치 형상에 대하여 희석 공기와 암모니아의 혼합 효과에 대하여 살펴보기로 한다.

Fig. 7은 Case 2-1과 Case 2-2의 혼합 판의 중앙 단면과 Section A에서 암모니아 농도 분포 contour를 나타내었다. Case 2-1에서는 수직 구간에서 2개의 혼합 판의 영향으로 유동 교란이 발생한다. 하지만 Case 2-1은 암모니아가 원형 관 벽면 주위로 치우치게 되는 것을 확인할 수 있다. Case 2-2는 분사된 암모니아가 전방부의 사각 혼합 판에 의해 퍼지게 됨으로써 균일해지는 것을 확인할 수 있고 수직관 이후에 Case 2-1에 비하여 다소 혼합이 잘 되어 낮은 농도의 영역이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과로 Section A 단면에서 Case 2-2의 농도 분포가 상대적으로 잘 혼합되어 나타나는 것을 확인할 수 있다. Section A 단면에서 암모니아 농도의 %RMS는 Case 2-1이 10.05%이고 Case 2-2가 5.57%로 나타나서 Case 2-1에 사용한 혼합 장치 형상도 암모니아 혼합에 상당한 효과가 있음을 보여 주고 있다.

Fig. 8에 16개 출구에서 암모니아 농도의 편차 비율을 나타내었다. Case 2-1의 경우에는 3번과 4번 출구에서 농도 편차 비율이 약 5%로 높게 나오지만 그 외의 영역에서는 거의 균일한 농도임을 보여 주고 있다. Case 2-2는 3, 4, 5, 6번 출구에서 다소 농도 편차 비율이 상대적으로 높거나 낮게 나타나지만 Case 2-1에 비

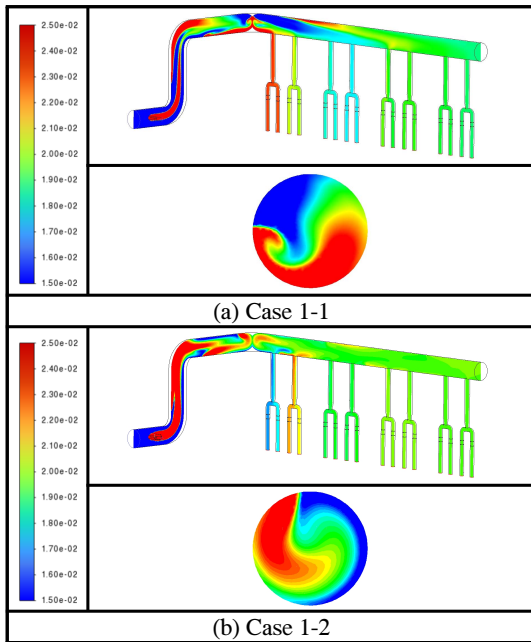


Fig. 5. Contours of NH_3 concentration at the center section plane and section A for Case 1-1, Case 1-2.

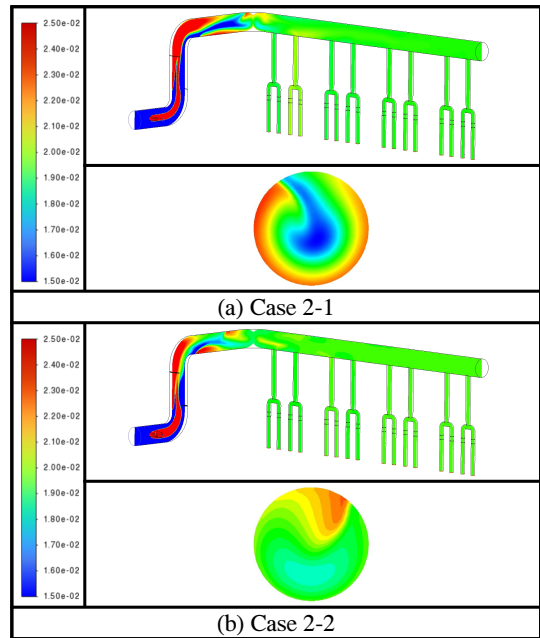


Fig. 7. Contours of NH_3 concentration at the center section plane and section A for Case 2-1, Case 2-2.

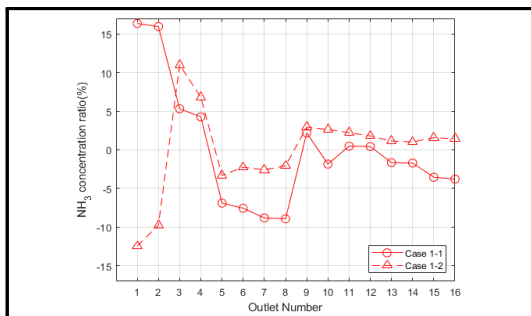


Fig. 6. NH_3 concentration ratio at outlet for Case 1-1 and Case 1-2.

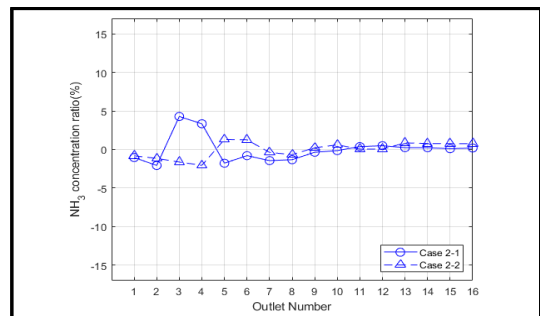


Fig. 8. NH_3 concentration ratio at outlet for Case 2-1 and Case 2-2.

하여 균일한 농도 분포를 보여 주고 있다. Case 2-1의 암모니아 %RMS는 6.56%, Case 2-2는 3.95%로 나타났다.

3.3. Case 3-1, Case 3-2에서의 암모니아 혼합 특성 분석

수직 원형관 벽면에 위치한 혼합 관의 위치를 암모니아 공급 관 인근으로 위치를 변경한 경우인

Case 3-1과 Case 3-2를 살펴보기로 한다. Fig. 9는 다른 경우와 마찬가지로 중앙 단면과 Section A에서 암모니아 농도 분포 contour 결과를 보여 주고 있다. Case 3-1은 혼합 관으로 인해 암모니아가 좁아진 원형 관을 지나기 때문에 암모니아 거동에 큰 변화가 이루어진다. 좁은 단면을 지난 후 혼합 관 후류에 발생하는 와류로 인해 암모니아의 혼합이 잘 이루어질 것으로 예상되며 Section A 단면의 농도

Table 1. %RMS of Y_{NH_3} at Section A and 16 outlets

	%RMS of Y_{NH_3} at section A	%RMS of Y_{NH_3} at 16 outlets
Case 1-1	27.58%	29.50%
Case 1-2	15.60%	21.78%
Case 2-1	10.05%	6.56%
Case 2-2	5.57%	3.95%
Case 3-1	7.32%	8.24%
Case 3-2	3.13%	2.08%

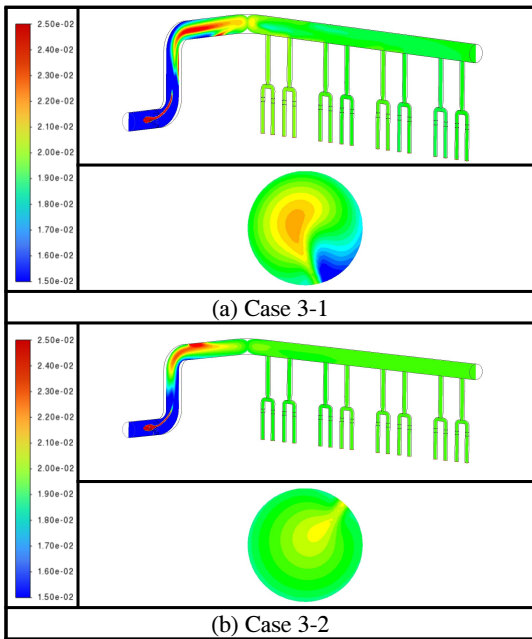


Fig. 9. Contours of NH_3 concentration at the center section plane and section A for Case 3-1, Case 3-2.

분포도 아래 부분 외에는 혼합이 잘 이루어진 것을 확인할 수 있다. 사각 혼합 판이 함께 있는 Case 3-2의 Section A에서 농도 분포를 살펴보면 다른 모든 Case에 비해 농도 분포가 균일하게 분포된 것을 확인할 수 있다. Section A 단면에서 %RMS는 Case 3-1은 7.32%, Case 3-2는 3.13%로 나타났다.

Fig. 10에 16개 출구에서 암모니아 농도 변화를 나타내었다. Case 3-1의 경우에는 출구 번호 1번에

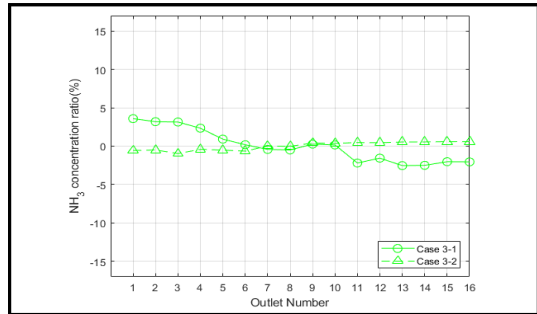


Fig. 10. NH_3 concentration ratio at outlet for Case 3-1 and Case 3-2.

서 4번 사이와 11번에서 16번 사이에서 농도 편차 비율이 약 2~4% 변화가 있는 것을 확인할 수 있고 Case 3-2는 농도 편차 비율이 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 16개 출구에서 암모니아 농도의 %RMS는 Case 3-1은 8.24%, Case 3-2는 2.08%로 나타났다.

이러한 결과로부터 6개 형상에 대하여 암모니아 농도 혼합 효과에 대한 전산 유동 해석을 통해 나온 결과는 Case 3-2 형상이 가장 혼합 효과가 좋은 것으로 나타났다.

VI. 결론

본 연구에서는 전산 유동 해석을 통하여 암모니아 혼합 관 내 혼합 장치의 위치에 따라 6가지 형상으로 나누었으며 수행하였으며 16개의 암모니아 분사 그리드 전방 단면과 16개 출구에서의 암모니아 농도 분포를 분석하여 희석 공기와 암모니아의 혼합에 효과적인 혼합 장치를 분석하였으며 결과는 다음과 같다.

탈질설비에서 사용되고 있는 기본 형상 혼합 관 (Case 1-1)은 암모니아 유동 교란에 도움을 주는 혼합 판이 존재하지 않기 때문에 암모니아 혼합 관에서 암모니아 농도 균일화가 잘 이루어지지 않아 Section A 단면에서 암모니아 분포에 대한 %RMS는 27.58%로 나타났고 16개 출구에서 암모니아 %RMS는 29.50%로 나타났다. 기본 형상의 혼합 관에서 사각 혼합 판이 추가된 Case 1-2는 각각의 %RMS 값이 15.60%와 21.78%로 나타났으며 사각 혼합 판의 효과로 16개 출구에서 %RMS 값이 7.72% 감소하는 효과를 보여 주었다.

암모니아 혼합 관의 수직 배관에 어긋나게 설치한 혼합 장치 형상인 Case 2-1에서 Section A 단면과 16개 출구에서의 암모니아 농도의 %RMS는 각각 10.05%와 6.56%로 나타났다. 이 혼합 장치의 효과로 16개 출구에서 %RMS 값이 22.94% 감소하여 상당한 혼합 효

과를 보여 주었다. Case 1-2와 Case 2-1 형상을 혼합한 형상인 Case 2-2의 경우는 Section A 단면과 16개 출구에서의 %RMS는 각각 5.57%와 3.95%로 나타나서 16개 출구에서 %RMS 감소 값이 25.55%로 나타났다.

Case 2-1에 사용한 혼합 장치 형상을 암모니아 공급관 인접한 곳에 설치한 Case 3-1의 경우는 Section A 단면과 16개 출구에서 각각 7.23%와 8.24%로 나타났다. 16개 출구에서 %RMS 감소는 21.26%로 나타났다. Case 1-2와 Case 3-1의 혼합 형상인 Case 3-2의 경우는 Section A에서와 16개 출구에서의 %RMS 값이 3.13%와 2.08%로 나타났으며 16개 출구에서 %RMS 감소가 27.42%로 가장 혼합 효과가 좋은 것으로 나타났다.

이러한 결과로 Case 3-2의 형상이 암모니아 혼합에 가장 효과적인 암모니아 혼합 장치인 것을 알 수 있었다.

사용기호

P	: pressure [pa]
\vec{V}	: velocity vector [m/s]
T	: temperature [K]
k	: turbulent kinetic energy [m^2/s^2]
	: thermal conductivity [W/mK]
C_p	: specific heat [J/kg $^{\circ}C$]
D	: mass diffusion coefficient [m^2/s]
Y	: mass fraction
RNH3	: NH ₃ concentration ratio

그리스 문자

ρ	: density [kg/ m^3]
μ	: viscosity [kg/ms]
μ_{eff}	: effective viscosity [kg/ms]
ϵ	: turbulent dissipation rate [m^2/s^2]

REFERENCES

- [1] Kim, J. G., "Statistics of Electric Power in KOREA", *Korea Electric Power Corporation*, 46, (2021)
- [2] KEPCO, "The Monthly Report on Major Electric Power Statistics", *Korea Electric Power Corporation*, 517, 40, (2022)
- [3] Choi, G. G., Keel, S. I., Lee, J. K., Heo P. W., Yun, J. H., "Comparative Study on DeNO_x Characteristics in SNCR and SCR using Urea Solution", *Journal of Energy&Climate Change*, 13(2), 89-101, (2018)
- [4] Go, Y. G., Ryu, C. K., and Choi, S. M., "Numerical Simulation for Flow Optimization of De-NO_x Selective Catalytic Reactor", *Journal of the Korean Society of Combustion*, 99-105, (2001)
- [5] Park, T. W., Sung, Y. M., Kim, T. K., Lee, I. W., Choi, H. M. and Kim, D. J., "Effect of Static Mixer Geometry on Flow Mixing and Pressure Drop in Marine SCR Applications", *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6(1), 27-38, (2014)
- [6] Ha, J. S., "A Study on the Uniform Mixing of Ammonia-Air with the Change of Ammonia Supply Device Shape in a De-NO_x System", *Journal of the Korean Institute of Gas*, 23(3), 20-26, (2019)
- [7] Park, S. M., Jang, H. S., "The Numerical Study on the Effect of the AIG Holes on the NH₃ Concentration Distribution in SCR System", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 621-623, (2015)