KIGAS Vol. 23, No. 3, pp 20~26 2019 https://doi.org/10.7842/kigas.2019.23.3.20
(Journal of the Korean Institute of Gas)

탈질설비에서 암모니아 혼합기의 형상에 따른 암모니아-공기 균일 혼합에 관한 연구

†하지수
계명대학교 기계자동차공학과
(2019년 2월 6일 접수, 2019년 5월 24일 수정, 2019년 5월 25일 채택)

A Study on the Uniform Mixing of Ammonia-Air with the Change of Ammonia Supply Device Shape in a De-NOx System

†**Ji Soo Ha**
Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 1000, Korea
(Received February 6, 2019; Revised May 24, 2019; Accepted May 25, 2019)

요 약

석탄 화력발전소 등의 대형 연소기기에서 질소산화물을 저감하기 위해 선택적 촉매환원 방법(SCR)의 탈질설비가 널리 쓰이고 있다. 본 연구에서는 SCR 탈질설비에서 암모니아를 공급하는 암모니아 분사 그리드(AIG)에 있는 암모니아와 희석 공기 혼합기에서 암모니아와 희석 공기의 균일한 혼합에 적합한 최적의 혼합기 형상을 도출하는 것을 목적으로 전산유체해석을 통해 수행하였다. 이를 위해 기본 형상의 혼합기(Case 1)에서 유동 특성과 NH_3 농도 분포 특성을 살펴보았다. 기본 형상의 혼합기에서는 희석 공기 주 배관에서 암모니아 주입 배관 입구 반대쪽의 벽면으로 NH_3 분포가 치우치는 것을 확인하였다. 이를 개선하기 위해 암모니아 주입 배관의 상단 구멍 1 개와 측면 구멍 4개를 막은 경우(Case 2)와 암모니아 주입 배관의 상단에 수평 평판을 설치한 경우(Case 3), 수평 평판과 함께 원호 평판을 설치 한 경우(Case 4)의 혼합기 형상에 대하여 유동과 NH_3 농도 분포 특성을 분석하였다. 암모니아 주입 배관 상단에 수평 평판과 원호 평판을 설치한 경우(Case 4)에 혼합기 출구에서 NH_3 분포의 % RMS 값이 가장 작은 값인 4.92%이고 농도 비율(R_{NH3}) 범위가 -10.82~8.34%로 가장 최적의 NH_3 균일 분포임을 알 수 있었다.

Abstract - Selective catalytic reduction(SCR) method is widely used among various methods for reducing nitrogen oxides in combustion devices of coal power plant. In the present study, the computational fluid dynamic analysis was accomplished to derive the optimal shape of ammonia-dilution air mixing device in a ammonia injection grid. The distribution characteristics of flow and NH_3 concentration had been elucidated for the reference shape of ammonia mixing device(Case 1). In the mixing device of Case 1, it could be seen that NH_3 distribution was shifted to the wall opposite to the inlet of the ammonia injection pipe. For the improvement of NH_3 distribution, the case(Case 2) with closing one upper injection hole and 4 side injection holes, the case(Case 3) with installing horizontal plate at the upper of ammonia injection pipe, the case(Case 4) with installing horizontal plate and horizontal arc plate at he upper of ammonia injection pipe were investigated by analyzing flow and NH_3 concentration distributions. From the present study, it was found that the % RMS of NH_3 for Case 4 was 4.92%, which was the smallest value among four cases, and the range of R_{NH3} also has the optimally uniform distribution, -10.82~8.34%.

Key words : selective catalytic reduction, ammonia mixing device, dilution air, ammonia injection grid

†Corresponding author:jisooha@kmu.ac.kr
Copyright ⓒ 2019 by The Korean Institute of Gas

Ⅰ. 서 론

석탄 화력발전소와 자동차 등의 연소기기에서 질소산화물을 저감하기 위하여 여러 가지 방법을 사용하고 있다. 대형의 석탄 화력발전소에서는 선택적 촉매환원 탈질설비(selective catalytic reduction, SCR)를 이용하고 있다. 이러한 탈질설비는 연소로 후단에 설치하는데 암모니아 분사 그리드(Ammonia Injection Grid, AIG)에서 희석용 공기와 암모니아를 혼합하여 암모니아를 고온의 배기가스에 분사한다. 배기가스 중에 포함된 연소과정 중에 발생한 질소산화물을 암모니아 분사장치 후단에 설치된 촉매 층에서 무해한 질소와 물로 환원하게 된다.

탈질설비에 관한 연구는 여러 부분으로 이루어지고 있다. 탈질설비의 유동 최적화에 관한 연구[1,2]와 탈질설비의 촉매 반응기 설계에 관한 연구[3,4] 그리고 탈질설비 암모니아 분사 그리드의 최적설계에 관한 연구[5] 등의 연구 들이 이루어지고 있다. 특히 암모니아 분사 그리드 최적 설계에 관한 연구[5]에서는 배열회수 보일러(HRSG)에서 암모니아 분사 그리드의 형상과 노즐의 각도에 따른 CFD 해석을 수행하였다. 암모니아 분사 그리드는 암모니아와 질소산화물이 포함된 배기가스와의 균일한 혼합을 위해 중요한 장치이다. 균일한 혼합 여부에 따라 촉매 층에서 질소산화물이 효과적으로 환원이 되는 것에 지대한 영향을 미친다.

암모니아 분사 그리드는 탈질설비 촉매 층 전의 덕트에 설치되는데 덕트 내에서 배기가스와 암모니아와의 균일한 혼합을 위해 많은 수의 분사 노즐로 구성되어 있다. 이러한 노즐로 암모니아가 분사되기 전에 소량의 암모니아를 이송하는 희석 공기와 암모니아를 혼합하는 장치가 있다. 암모니아 분사 노즐에 암모니아와 희석 공기가 잘 혼합되어야 암모니아 분사 그리드에서 균일한 암모니아 농도로 분사할 수 있다. 본 연구에서는 암모니아와 희석 공기의 혼합기에서 혼합기의 형상에 따른 암모니아와 희석 공기의 균일한 혼합 효과를 살펴보기 위해 혼합기 형상에 대하여 유동해석을 수행하여 유동 특성과 혼합 특성을 비교 분석함으로써 균일한 혼합을 위한 최적의 형상을 도출하는 것을 목적으로 하였다.

Ⅱ. 수치해석 방법

탈질설비에서 암모니아와 희석 공기의 혼합기 배관 형상을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)에 일반적으로 사용하고 있는 혼합기의 형상을 나타내었는데 왼쪽 형상이 혼합기 배관 형상 전체를 보여 준 것이다. 혼합 배관의 아래에서 희석 공기가 흘러 들어오고 주 배관 중간에서 수직으로 가로 지르는 배관으로 암모니아가 주입된다. 희석 공기의 주 배관 직경(D)은 0.314 m이고 암모니아 주입 배관 직경(d)은 0.041 m이다. 희석 공기의 질량 유량은 0.9520 kg/s이고 암모니아의 질량 유량은 0.0223 kg/s이다. 희석 공기와 암모니아가 완전히 혼합되면 암모니아의 질량 분율은 2.29%가 된다. Fig. 1(a)의 오른쪽 그림을 보면 암모니아 주입 배관의 형상을 관찰할 수 있다. 암모니아 주입 배관은 희석 공기 주 배관 내부에 있는 영역에서는 암모니아가 분사되는 구멍이 그림에서 보여주듯이 정면에서 보았을 때 암모니아 주입 배관 양 측면에 균일 간격으로 8개씩 있고 상부에서 보이는 것처럼 암모니아 주입 배관 상부에 9개의 구멍이 있다. Fig. 1(a)형상을 기본 형상(Case 1)으로 해석을 진행하였다.

Fig. 1(b)에는(Case 2) Fig. 1(a) 형상에 대하여 유동 해석을 진행하여 분석해 본 결과 암모니아 주입 배관에 있는 분사 구멍의 암모니아 주입 입구와 반대쪽의 구멍을 통해 분사되는 암모니아 유량이 상대적으로 많아서 상부의 구멍 한 개와 양측면의 구멍 두 개씩 총 5개의 구멍을 막은 형상이다. Case 2 형상을 선정하기 위하여 상부 구멍과 양 측면 구멍을 막아서 유동 해석을 여러 가지로 진행하였는데 최종적으로 Case 2와 같은 형상으로 선정하였다. Fig. 1(c)는 Case 2 형상으로 유동 해석한 결과를 분석한 결과 상부 구멍을 통해 분사 되는 암모니아의 확산이 원활하지 않아서 상부 구멍의 상부에 암모니아 주입 배관 직경의 2배(2d) 위치에 폭이 1.5d 되는 수평 평판을 설치한 형상이다(Case 3). Fig. 1(d)는 Case 3 형상에 대한 유동 해석한 결과를 분석한 후 양 측면에서 주입되는 암모니아의 혼합을 위해 Case 3에 추가로 수평 평판 후류 쪽 2d 위치에 최대 폭 d인 원호 평판을 주 배관 양쪽에 설치한 형상이다(Case 4). 이와 같이 본 연구에서는 Case 1을 기본 형상으로 하여 유동과 암모니아 분포 균일도를 분석하여 수직 주 배관의 출구에서 암모니아의 농도 혼합이 균일하게 되도록 혼합기를 개선하여 최적의 혼합기를 도출하였다.

본 연구의 전산유동 해석에 사용한 격자수는 약 500만개 이며 ANSYS WORKBENCH 모델링 프로그램을 이용하여 모델링 및 격자를 생성하였으며, 전산 열유체 상용 해석 프로그램인 FLUENT 프로그램을 이용하여 해석을 수행하였다.

본 연구의 수치해석에 사용한 지배방정식은 3차원 정상상태 연속방정식, 운동량방정식 그리고 $k-\epsilon$

난류방정식, 에너지방정식, 공기와 암모니아의 질량분율 방정식으로 이루어졌으며 아래에 나타내었다.

연속방정식

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j}=0 \tag{1}$$

운동량방정식

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j}=-\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\overline{u'_i u'_j})+\frac{\partial}{\partial x_j}(\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_j})-\frac{\partial p}{\partial x_i} \tag{2}$$

에너지방정식

$$\rho C_p\frac{\partial}{\partial x_j}(u_i T)=\frac{\partial}{\partial x_j}(k\frac{\partial T}{\partial x_j}) \tag{3}$$

난류모델은 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였으며 아래에 관련 식을 정리하였다.

$$\rho\overline{u'_i u'_j}=-\mu_t(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i})+\frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \tag{4}$$

여기서 난류 에디 점성은 다음과 같이 정의 된다.

$$\mu_t=C_\mu\rho\frac{k^2}{\epsilon},\ \mu_{eff}=u_t+u_{lam} \tag{5}$$

난류 에너지에 대한 보존 방정식과 소산율 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k)=\frac{\partial}{\partial x_j}(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\sigma_j})+G-\rho\epsilon \tag{6}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j\epsilon)=\frac{\partial}{\partial x_j}(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon}\frac{\partial\epsilon}{\sigma x_j})+C_1\frac{\epsilon}{k}G-C_2\frac{\epsilon^2}{k}\rho \tag{7}$$

공기와 암모니아 질량분율 방정식

$$\rho\frac{\partial}{\partial x_j}(u_i Y_k)=\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho D\frac{\partial Y_k}{\partial x_j}) \tag{8}$$

$k=1: Air,\ k=2: NH_3$

Ⅲ. 결과 및 고찰

3.1. 기본 형상 혼합기에서 유동 및 NH3 농도 분포 특성

본 절에서는 Fig. 1(a)에 도식화 되어 있듯이 탈질설비의 암모니아와 희석 공기의 혼합기 형상 중에 기본 형상에 대한 유동 특성과 NH_3 농도 분포 특성을 살펴보기로 한다.

Fig. 2에 혼합기 기본 형상인 Case 1에서 암모니아 주입 배관 부근에서 속도 분포를 나타내었다. Fig. 2에는 혼합기 배관의 정면과 왼쪽 측면 그리고 iso 방향에서 본 속도 분포를 나타내었다. 속도 분포 단면은 정면 분포에서는 암모니아 주입 배관의 대칭 단면이고 왼쪽 측면 분포는 이 단면의 수직 단면인데 희석 공기 배관의 중앙 단면이다. 이하의 몇 개 그림에서도 이러한 단면에서 유동 특성을 살펴 볼 예정이다. 정면 방향에서 본 속도 분포를 보면 암모니아 주입 배관에서 상부의 구멍을 통해 암모니아가 분출되는 것을 관찰할 수 있고 왼쪽에 있는 구멍에서 분출되는 유동은 반대쪽인 오른쪽 방향으로 유동이 흐르는 것을 알 수 있다. 왼쪽 측면에서 본 속도 분포를 보면 암모니아 주입 배관의 상부와 양 쪽 측면에서 암모니아가 분출 되는 것을 관찰할 수 있고 또한 암모니아 주입 배관 대칭면 부근의 후류에서는 원관의 저항으로 상대적으로 낮은 속도 보포를 보여 주고 있다. iso 단면에서는 앞에서 설명한 단면들의 속도 분포를 함께 관찰할 수 있다.

Fig. 3에는 Fig. 2와 같은 단면에서 NH_3의 농도 분포를 나타내었다. 정면에서 본 NH_3 농도 분포를 보면 희석 공기가 흐르는 주 배관에서 암모니아 주입구에 반대 방향으로 농도 분포가 치우치는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 2에서 관찰하였듯이 상단의 암모니아 분출 구멍에서 유출되는 속도가 이 방향으로 치우치는 것으로 예측할 수 있다. 왼쪽 측면에서의 농도 분포는 거의 대칭 분포를 이루고 있으며 대칭면 가운데에 NH_3 농도가 높게 분포하는 것을 알 수 있다.

3.2. 개선 형상 혼합기에서 유동 및 NH_3 농도 분포 특성

기본 형상에서 속도 분포와 농도 분포를 살펴 본 결과 암모니아 주입 배관에서 분출된 암모니아는 암모니아 주입 배관 입구의 반대 쪽 영역과 주입 배관의 대칭 면 영역에 암모니아의 농도가 치우치는 것을 관찰하였다. 이에 따라 우선 암모니아 주입 배관의 반대 쪽 영역에 치우치는 농도를 균일화하기 위해 Fig. 1(b) 형상과 같이 상부 구멍과 측면 구멍 총 5개를 막은 후에 유동 해석한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에는 NH_3 농도 분포만 나타내었다. 정면에서 본 농도 분포를 보면 Fig. 2에서 관찰했던 것과 다르게 이 경우에는 암모니아 주입 배관 입구의 반대쪽에 치우치지 않고 거의 가운데

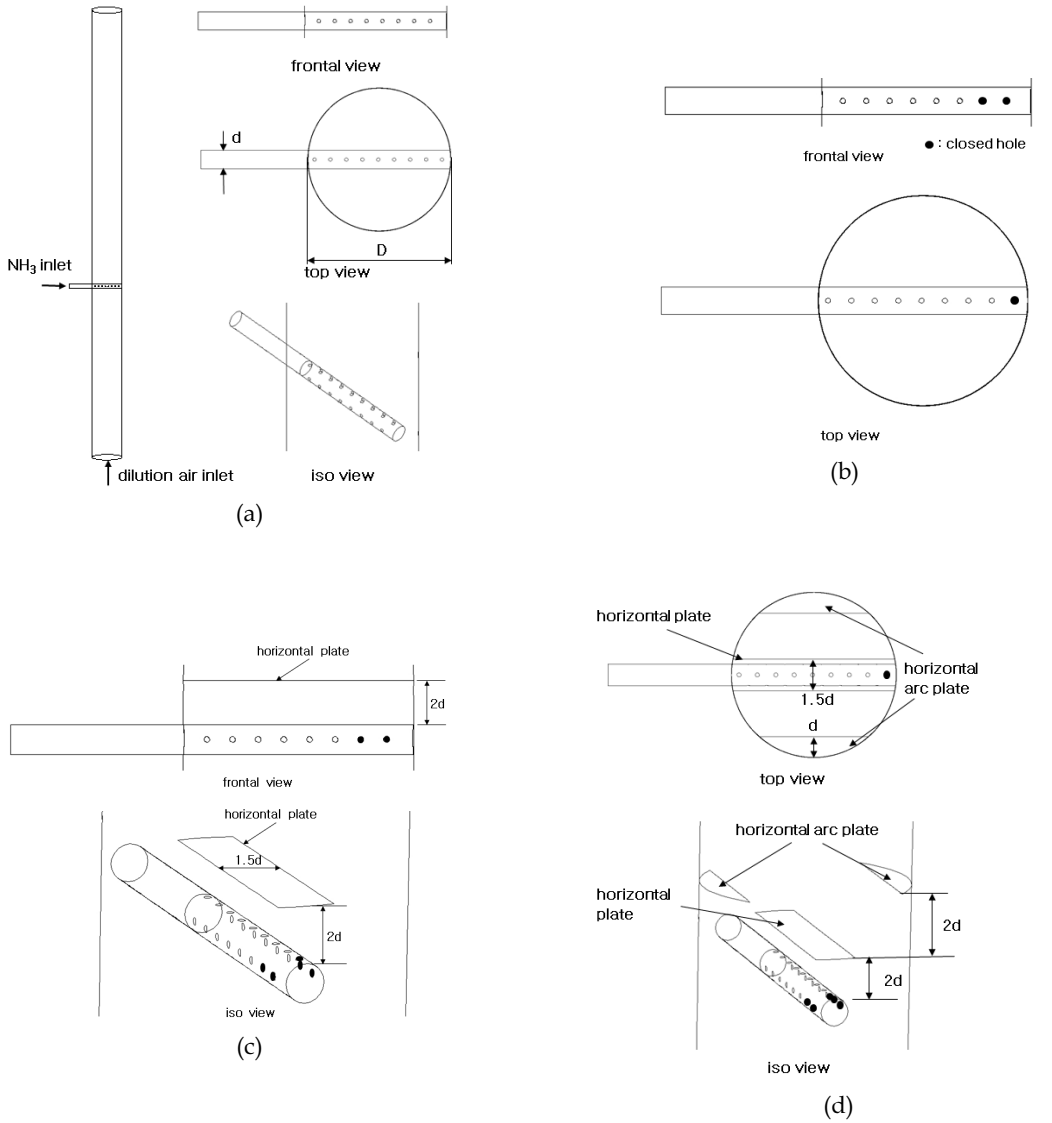


Fig. 1. Geometry configurations of ammonia supply device (a) Case 1 : Base shape, (b) Case 2 : Case 1 with 1 top hole, 4 side hole close, (c) Case 3 : Case 2 with center horizontal plate, (d) Case 4 : Case 3 with 2 side horizontal arc plate.

로 모이는 것을 관찰할 수 있다. 왼쪽 측면에서 본 농도 분포는 Fig. 2의 농도 분포와 유사하지만 좌우로 농도가 퍼지는 것이 Case 1 보다 더 넓게 된 것을 관찰할 수 있다.

Case 2 형상에서도 NH_3 농도 분포를 보면 정면에서 볼 때 가운데 영역에 치우쳐 있고 왼쪽 측면에서 볼 때 좌우 벽면으로 농도가 확산 되는 것이 아직 부족한 것이 판단되었다. 이에 따라 암모니아 주입 배관의 상부에 수평 평판을 설치한 경우(Case 3)와 이와 함께 원호 평판을 설치한 경우(Case 4)에 대한 유동 해석을 수행하였으며 이에 대한 결과는 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 좌측면에서 본 속도 분포인데 Case 3에서 속도 분포를 보면 암모니아 주입 배관의 상부에 설치된 수평 평판의 영향

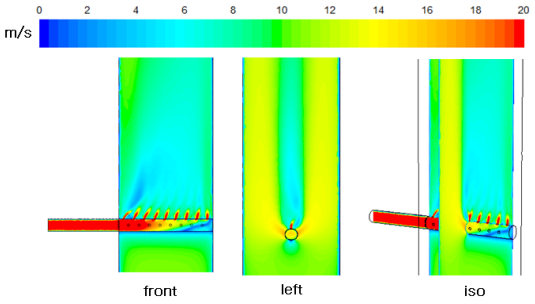


Fig. 2. Velocity contours for Case 1 at two sections, ammonia injection pipe center and its perpendicular section.

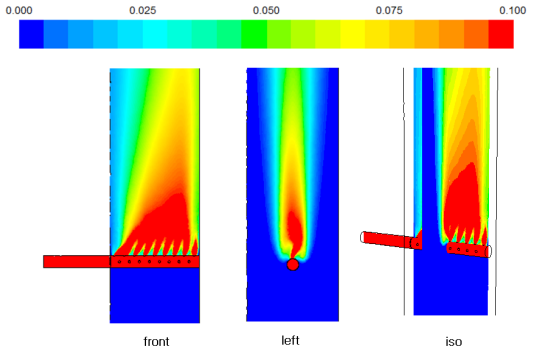


Fig. 3. NH_3 distributions for Case 1 at two sections, ammonia injection pipe center and its perpendicular section.

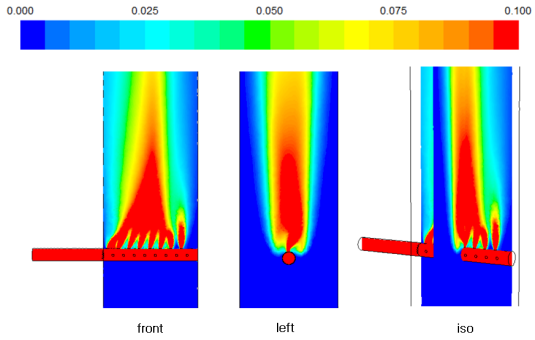
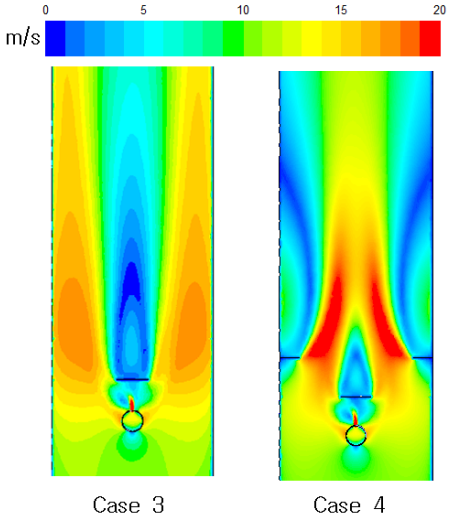
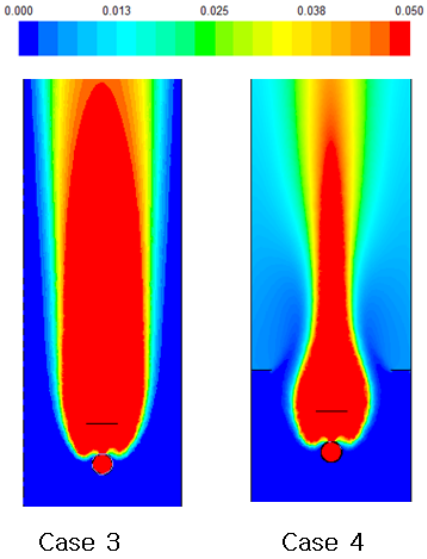


Fig. 4. NH_3 distributions for Case 2 at two sections, ammonia injection pipe center and its perpendicular section.

으로 유동이 원형 관과 수평 평판의 좌우로 흐르는



(a) velocity



(b) NH_3 mass fraction

Fig. 5. Velocity and NH3 distributions for Case 3 and Case 4 at left side view section.

것을 관찰할 수 있고 원형 관과 수평 평판의 후류에는 유동의 재순환이 일어나는 것을 알 수 있다. Case 4의 경우는 원호 수평 평판의 설치에 따라 이 영역을 지날 때 유속이 빨라지는 것을 알 수 있고 특히 암모니아 주입 배관의 상부와 원호 수평 평판

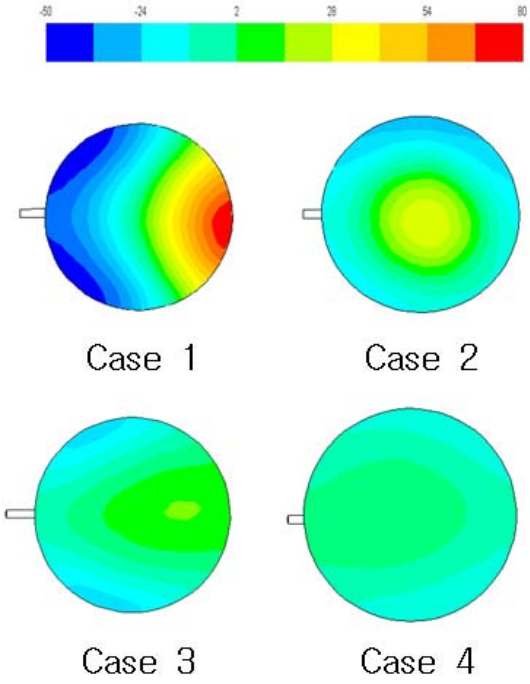


Fig. 6. R_{NH3} distributions for four cases at outlet section.

의 후류에 재순환 영역이 발생하는 것을 알 수 있다. 유동의 재순환 영역이 존재하면 재순환 영역의 경계에서 유동의 전단 응력이 커지기 때문에 난류 특성이 활발해 지고 물질 전달이 더욱 활발히 일어나는 것으로 알려 져 있다. Fig. 5(b)에 NH_3 농도 특성을 비교하여 나타내었다. Case 3의 경우를 보면 Case 1과 Case 2의 농도 분포 보다 좌우로 상대적으로 더 많이 확산되어 있는 것을 알 수 있다. Case 4의 경우를 보면 원호 수평 평판 후류에 형성된 재순환 영역에 의해 Case 3과 비교할 때 이 영역에서 NH_3 농도가 더 많이 확산되어 있는 것을 확인할 수 있다.

4가지 Case의 출구에서 NH_3 농도 분포를 Fig. 6에 비교하여 나타내었다. Fig. 6에는 NH_3 농도 분포 비율을 다음과 같은 정의 식을 이용하여 나타내었다.

$$R_{NH_3} = \frac{Y_{NH_3} - Y_{NH_3 mean}}{Y_{NH_3 mean}} \tag{9}$$

지금까지의 해석 결과 분석을 통해 알 수 있듯이, NH_3 혼합기를 지난, 주 배관의 출구에서 농도

Table 1. % RMS of Y_{NH3} and min./max. of R_{NH3} at outlet section for four cases

Case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
% RMS of Y_{NH3}	37.92	16.10	10.38	4.92
min./max. of R_{NH3}	-47.15/ 83.27	-28.23/ 31.10	-21.53/ 15.40	-10.83/ 8.34

분포는 Case 4가 가장 혼합이 잘 될 것으로 예측할 수 있다. 이에 관한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Case 1에서 불균일한 농도 분포는 Case 2에서 상당히 균일해 지는 것을 알 수 있고 Case3과 Case 4에서 더욱 균일해 지는 것을 관찰할 수 있다. 이에 관한 정량적 비교는 Table 1에 나타내었다. Table 1에는 출구 단면에서 NH_3의 % RMS(root mean square) 값과 R_{NH3}의 최소/최대값을 나타내었다.

$$\%RMS = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{N} (Y_{NH_3 k} - Y_{NH_3 mean})^2 \frac{A_k}{A}}}{Y_{NH_3 mean}} \tag{10}$$

이 표에서도 Fig. 6에서 관찰 한 것과 같이 Case 1에서 Case 2,3,4로 형상이 변하면서 NH_3 % RMS 값이 작아지는 것을 알 수 있고 또한 R_{NH3}의 최소/최대값의 범위도 줄어드는 것을 알 수 있다.

이러한 결과로부터 암모니아-희석 공기 혼합기는 기본 형상인 Case 1 형상에서 Case 4 형상으로 개선하면 암모니아 혼합이 매우 효과적임을 알 수 있다.

Ⅳ. 결 론

발전용 탈질설비에서 환원제인 암모니아와 희석 공기의 혼합을 효과적으로 하기 위해서 몇 가지 형상에 대하여 유동과 암모니아 농도 분포 특성을 살펴보았으며 이에 관한 결과는 아래와 같이 정리할 수 있다.

기본 형상 혼합기(Case 1)에서 암모니아 주입 배관에서 분출된 암모니아 유동은 암모니아 주입 입구의 반대쪽 방향으로 치우쳐서 흐른다. 이러한 유동 경향으로 NH_3 농도 분포에서 관찰할 수 있듯이 암모니아 주입 배관의 입구 반대 벽면으로 NH_3 농도가 높게 나타나서 균일한 농도 분포가 이루어지고 있지 않음을 알 수 있었다.

기본 형상 혼합기에서 암모니아 주입 배관의 상단 1개와 측면 4개의 구멍을 막은 형상 혼합기

(Case 2)에서는 Case 1 형상 보다 NH_3 농도 분포가 비교적 가운데로 분포하였지만 희석 공기 주 배관의 전체 영역에 균일한 분포는 보여 주고 있지 않았다. 암모니아 주입 배관의 상단에 수평 평판을 설치한 형상의 혼합기(Case 3)에서는 Case 2 형상보다 NH_3 농도 분포가 주 배관의 가운데에서 상대적으로 넓게 확산되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 암모니아 주입 배관 위에 추가로 원호 평판을 설치한 형상 혼합기(Case 4)는 원호 평판을 지나고 난 뒤의 재순환 유동에 따라 주 배관의 벽면까지 NH_3 농도가 확산되는 것을 확인할 수 있었다.

혼합기의 출구에서 NH_3 농도의 균일도 측도인 % RMS 값은 Case 4가 다른 형상과 비교했을 때 가장 작은 값인 4.92%이며 NH_3 농도 비율의 최소/최대 값의 범위도 -10.83~8.34로 가장 균일한 분포이었다.

이러한 결과로부터 Case 4 형상의 암모니아 혼합기가 희석 공기와 암모니아 혼합 균일화에 가장 적합한 형상임을 알 수 있었다.

사용기호

- p : pressure [Pa]
- u_j : velocity for j axis [m/s]
- x_j : coordinate for j axis [m]
- k : turbulent kinetic energy [m^2/s^2]
- A_k : cell area at k-th cell
- D : mass diffusion coefficient [m^2/s]
- Y_k : mass fraction
- R_{NH3} : 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^3]

REFERENCES

[1] Park, B. C., Park, S. J., and Jo, H. H., "Design optimization of guide vane for flow uniformization in front of selective catalytic reduction system", *KSME Conference*, 37-38, (2015)

[2] Ko, Y. G., Ryu, C. K., and Choi, S. M., "Numerical Simulation for Flow Optimization of De-NOx Selective Catalytic Reactor", *KOSCO Symposium*, 99-105,(2001)

[3] Jang, Y. W., *Change of Ammonia Consumption with Gas Turbine Output in DeNOx System for a 580 MW Combined Cycle Power Plant*, Thesis, Hanyang University, (2018)

[4] Park, J. K., *Correlation Analysis of NOx Concentration at the Inlet of De-NOx System and Influence Factors in a Natural Gas Fired Thermal Power Plant*, Thesis, Hanyang University, (2014)

[5] Kim, K. C., Park, M. H., Yoon, J. K., and Lim, J. H., "A Study for Optimal Design of the AIG to Improve the Performance of DeNOx Facilities Installed in Combined Cycle Plant", *Korean J. of Air-Cond. and Ref. Eng.*, 19(12), 811-820, (2007)