

화력발전 배가스 탈질 환원제의 혼합특성

최항석* · 김관태* · 김석준* · 정상현* · 송영훈* · 홍성호** · 이준엽**

A Mixing Characteristic of De-NO_x Reducing Agent for Flue Gas in Thermal Power Generation

H.S. Choi* · K.T. Kim* · S.J. Kim* · S.H. Jeong* · Y.H. Song* · S.H. Hong** · J.Y. Lee**

ABSTRACT

In this study, to increase the mixing between flue gas and reducing agent, new shapes of NH₃ ejection nozzles are designed and experimentally and numerically tested. The nozzles have six holes perpendicular to the ambient flue gas flow and the tilting angle between direction of ambient flow and the hole axis is varied. To evaluate the mixing efficiency of the proposed nozzles, numerical and experimental tests are applied to several flow conditions comparing with single hole nozzle, which is commonly used in conventional SCR process. From the results the nozzle with tilted multi-holes has the large region of high turbulent intensity compared with conventional single hole nozzle. This is originated from the high vorticity near the upstream of the jet flow issuing from the hole. The high turbulent intensity and vorticity magnitude lead to enhanced mixing between flue gas and reducing agent. Hence, the most suitable molar ratio between NO_x and reducing agent for the catalytic reaction can be obtained on behalf of the intensified scalar mixing within shorter physical mixing length.

Key Words : NO_x, Nozzle, Selective Catalytic Reduction, Turbulent mixing

1. 서론

질소화합물의 제어기술로는 크게 연소 전 탈질, 연소조건 개선 및 연소 후 탈질의 3개 분야로 나눌 수 있으나 제거효율 측면에서 연소 전 탈질과 연소조건의 개선은 최대 60%를 넘지 못한다. 따라서 화석연료를 사용하는 플랜트에 대한 탈질설비로는 대부분 연소 후 탈질기술이 적용되고 있어 이중 선택적 촉매환원법(Selective Catalytic Reduction)은 우수한 탈질 효율과 높은 신뢰도로 인하여 전 세계적으로 폭넓게 사용되고 있는 추세이다. SCR(Selective Catalyst Reduction)은 발전소 등의 연소 후 배기가스에 암모니아 등의 환원제를 혼합하여 다공질 형상의

촉매 층에 통과시킴으로써 질소산화물(NO_x) 등이 환원제와 반응하여 인체에 무해한 질소와 수증기로 환원하도록 하여 배기가스 중의 질소산화물 농도를 저감시키는 공정이다.

이러한 선택적 촉매환원법을 이용한 SCR 시스템 설계에 있어서 중요한 설계 변수는 SCR 시스템으로 유입되는 유동의 균질성 및 환원제와 처리 가스 사이의 충분한 혼합을 제한된 공간 안에서 확보하는 것이다[1,2]. 이와 같은 설계 조건을 만족시키기 위해서는 SCR 시스템 내 빠른 혼합을 유도하는 유동조건이 우선적으로 확보가 되어야 하며, 만일 촉매전단에서 충분한 혼합조건이 형성되지 않으면, 사용되는 환원제의 질량이 적절하더라도 시스템의 성능은 저하되며, 이러한 배가스와 환원제의 혼합조건을 가장 크게 좌우하는 요인은 분사 노즐의 형상, 노즐의 설치 조건 및 운전유량 등이다. 만일 배가스 유동에 대하여 분사 노즐의 형상 및 설치 조건이 적절하

* 한국기계연구원 환경에너지기계연구본부

** 한국전력기술주식회사

† 연락처자. hschoi@kimm.re.kr

지 않으면, 환원제의 완전 혼합을 위해서 매우 긴 거리의 혼합 영역을 필요로 할 것이고, 이점은 SCR 시스템이 필요 이상으로 커져서 설치비용의 상승을 가져오는 요인이 된다. 이와 같은 이유로 SCR 시스템 내에서 사용되는 환원제 분사용 노즐은 환원제 분사 후 가장 짧은 거리 내에서 배가스와 충분한 혼합이 이루어 질 수 있도록 설계되어야 하며, 이를 위해서는 노즐의 형상, 설치위치, 설치수량 등 설계의 최적화가 이루어져야 한다.

이러한 제트의 혼합성능을 향상시키기 위해서 많은 연구들이 수행되어왔고[3-5], 이를 위하여 본 연구에서는 제트가 분사되는 노즐의 형상변화를 통하여 배가스와 환원제의 혼합중대를 도모하였다.

2. 계산 및 실험 방법

2.1 다공 노즐 형상

그림1은 본 연구에서 사용된 다공 노즐의 형상을 보여준다. 그림에서 보듯이 환원제 공급관에 수직하게 원형 실린더 노즐이 위치하고, 노즐에는 6개의 분사관이 일정 간격으로 뚫려있다. 따라서 환원제 공급관을 따라 이동한 환원제가 수직으로 뚫린 6개의 분사관을 통해 주위 배가스 유동으로 분사된다. 본 연구에서는 분사관과 주위 배가스 유동이 이루는 각도 A를 15°에서 90°까지 5단계로 변화시켜가면서 다공노즐의 분사 및 혼합 특성을 살펴보았다. 또한, 다공노즐의 혼합성능을 파악하기 위하여 단공상용노즐의 실험도 수행되었고, 이때 단공노즐의 직경과 다공노즐 분사관의 직경비 D/d는 3이다. 여기서 D는 단공노즐의 직경이고 d는 다공노즐 분사관의 직경이다.

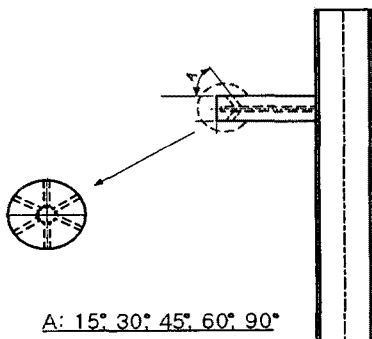


Fig. 1. 다공노즐 형상

2.2 지배방정식 및 계산방법

본 연구에서는 비압축성 유체 유동 내 화학종간 혼합 특성에 대해 전산해석이 수행되었고, 유체 유동과 화학종들의 거동에 관한 레이놀즈(Reynolds) 평균 지배 방정식들이 사용되었다. 아래 식(1)과 식(2)는 연속식과 Navier-Stokes 방정식을 나타낸다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right] \tag{2}$$

식 (2)에서 레이놀즈(Reynolds) 응력항, $\overline{u_i u_j}$ 는 통상 난류 모델링을 통하여 구하여지는데, 본 연구에서는 standard $k-\epsilon$ 모델을 이용하여 상기 레이놀즈 응력항을 계산하였다. Standard $k-\epsilon$ 모델에서 레이놀즈 응력항은 아래와 같이 표현 되고,

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \tag{3}$$

위식 (3)에서 난류 점성계수(turbulent viscosity) ν_t 는 아래의 식으로 표현이 된다.

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \tag{4}$$

식(3)과 식(4)에서, 난류 운동에너지(turbulent kinetic energy), k 와 그것의 소산율 (rate of dissipation), ϵ 의 값이 추가로 필요하게 되고, 이는 k 와 ϵ 에 관한 아래의 지배방정식을 풀어줌으로써 얻어진다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \epsilon \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ &+ C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \tag{6}$$

여기서, G_k 는 난류운동에너지의 생성항이며, 식 (4), (5), 그리고 (6)에 사용된 모델 상수들은 다음과 같다.

$$C_{1\epsilon} = 1.44, \quad C_{2\epsilon} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

화학종에 관해서는 화학종들의 거동을 살펴보기 위하여 아래의 지배방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(D_{i,m} + \frac{\nu_t}{Sc_i} \right) \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \right] \quad (7)$$

위식 (7)에서, $D_{i,m}$ 은 화학종 i 에 대한 확산계수이며 Sc_i 는 0.7로 주어졌다.

본 계산은 유한 체적법(Finite Volume Method)을 이용하여 위에 나열한 지배방정식들을 이산화(discretization) 하였다. 이산화시 각 방정식들의 공간미분에 관한 항들은 일차 풍상 차분법(First Order Up-Wind Scheme)을 사용하여 차분화 하였으며, 상용코드인 Fluent를 사용하여 계산하였다. 계산격자는 tetrahedral mesh를 사용하여 구성되었으며, grid-dependency를 확인하여 격자수는 해에 오염이 없는 범위에서 충분히 주어졌다.

2.3 실험장치 및 실험방법

그림 2는 유동가시화 장치를 나타내며, 산란입자 발생기, light sheet 발생을 위한 laser와 polygon mirror, test section 및 ICCD 카메라 등으로 구성된다. 가시화 실험을 위한 산란입자는 향을 태워 발생하는 연기(smoke)를 산란입자로 활용하였으며, 가시화를 위한 광원은 10mW급 He-Ne 레이저를 사용하였다. 레이저에서 방출된 광원은 polygon mirror를 이용하여 평면 광으로 변환되고, 이를 노즐로부터 분사되는 산란입자에 조사하였다. 가시화를 통한 노즐의 분사특성은 ICCD 카메라를 이용하여 촬영되었으며, 이때 주위류 속도 및 노즐의 분사속도는 실제 플랜트에서의 운전조건과 동일하도록 각각 송풍기용 인버터와 MFC(Mass Flow Controller)를 이용하여 유량을 제어하였다.

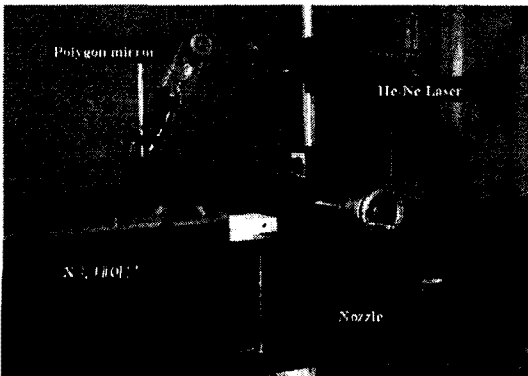


Fig. 2. 유동가시화 실험장치

그림3은 혼합특성을 파악하기 위하여 사용된 화학종들의 농도를 측정하기 위하여 구성된 실험장치를 보여주는 그림이다. 본 연구에서는 노즐의 분사특성에 대한 평가로 유동 가시화와 더불어, 노즐에서 분사되는 가스와 주위류와의 혼합 정도를 정량적으로 파악하기 위하여, 환원제인 암모니아 가스를 대체할 수 있는 가스로 분자량이 유사한 메탄가스(CH_4)를 노즐을 통하여 분사한 후, 그림 3과 같이 다 지점 동시 시료 채취 장치를 이용하여 혼합가스를 tedlar bag에 채취하고 이를 가스크로마토그래피(GC-FID)를 이용하여 정량화하였다. 여기서 실험 및 계산에 적용된 닥트입구와 노즐출구에서의 공기와 메탄제트의 속도비, V_{CH_4}/V_{air} 는 단공상용노즐을 기준으로 $V_{CH_4}/V_{air} = 16.8$ 이다.

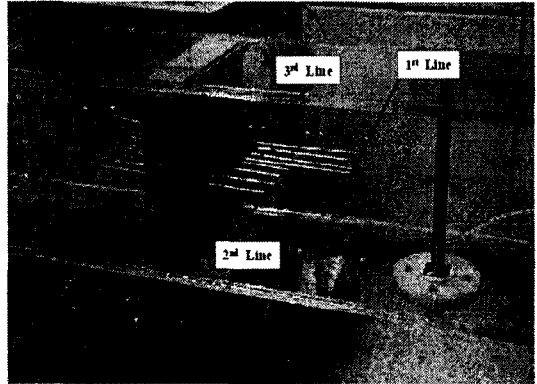


Fig. 3. 화학종 농도 측정 실험장치

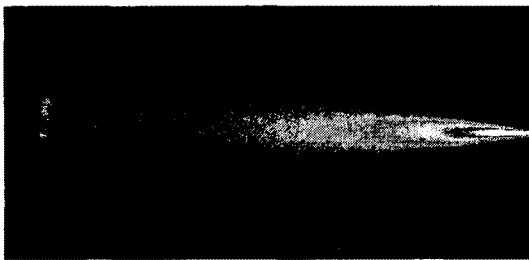
3. 결과 및 고찰

3.1 실험결과

그림 4는 노즐 중앙을 자르는 단면을 촬영한 사진으로, 다공노즐의 분사각이 주위의 가스흐름과 이루는 각도에 따른 5종의 노즐 중 확산특성이 상대적으로 양호한 2종류와 단공상용노즐을 함께 비교한 그림이다. 그림 4(a)는 단공상용노즐에 대해 ICCD를 이용한 유동가시화 실험 결과를 나타낸 그림이다. 가시화영역은 그림에서 보는 바와 같이, 유동 방향으로 노즐 팁에서 촉매가 설치된 지점까지(166D, 여기서 D는 단공상용노즐의 직경), 반경방향으로는 약 100D의 길이에 대하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 상용노즐의 경우 촉매가 설치되어 있는 후류부근에서도 반경방향으로 약 20D 정도만 확산이 이루어지는 것으로 나타났다. 실제 플랜트에서 노즐과 노즐사이의 간격이 80D 정도이므로 닥트단면에 대하여 충분한 확산이 이루어지기 위해서는 반경방향으로 40D 이상 산란입자가 분포해야 양

호한 노즐이라 할 수 있다.

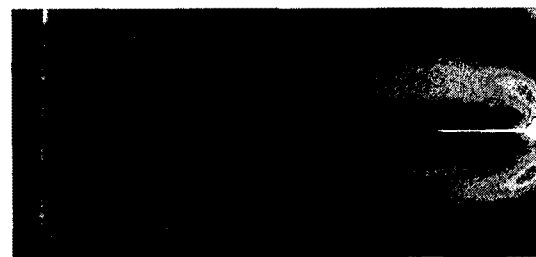
그림에서 보는바와 같이 3가지 노즐 모두 축방향에 대해서는 후류 쪽으로 갈수록 확산을 통해 농도가 균일해지는 공통적인 특성을 보이나, 반경방향으로는 단공상용노즐과 다공노즐이 다소 다른 특성을 나타낸다. 상용노즐의 경우 제트축 중심부근에서 농도가 높고 외곽 쪽으로 갈수록 낮은 반면, 다공노즐은 분사 각이 큰 관계로 충분한 혼합 거리(mixing length)를 확보하지 못한 제트의 상류부근(특히 60D 이내)에서는 제트축 중심부근에서 농도가 낮고, 오히려 중심을 약간 벗어난 지점에서 가장 높은 값을 보인 후 후류로 갈수록 점차 낮아지는 경향을 보였다. 가시화결과에서 보듯이 상용노즐에 비해 60°와 90°의 분사 각을 갖는 다공노즐이 동일한 조건에서 넓은 영역에 걸쳐 확산이 잘 이루어지며, 이 중 90°의 경우가 보다 양호한 것을 알 수 있으며, 이는 다음의 농도장 측정결과를 통하여 확인 할 수 있다.



(a) 단공상용노즐



(b) 다공노즐(분사각 60°)



(c) 다공노즐(분사각 90°)

Fig. 4. 노즐의 분사특성

그림 5는 3종류의 노즐에 대해 메탄 농도를 측정된 결과를 나타낸 그림이며, 유동방향의 각 지점에서 제트 중심으로부터 반경방향의 메탄 농도 분포를 나타내는 그림이다. 단공상용노즐의 경우는 후류에서도 여전히 제트 중심 부근에 높은 메탄농도를 보여주며, 이는 아직도 주위공기와 충분한 혼합이 이루어지지 않았음을 보여준다. 다공노즐의 경우 단공상용노즐보다는 반경방향으로 혼합이 많이 일어남을 알 수 있다. 특히, 분사각 90°의 경우가 60°의 경우보다 혼합의 정도가 노즐 선단으로부터 60D 이상의 거리에서 균일하고 혼합 거리(mixing length) 또한 충분히 짧은 것을 알 수 있다. 따라서, 촉매 전단에서 충분한 혼합조건을 갖는 암모니아 분사용 노즐로 분사 각 90°의 다공 노즐이 가장 우수한 것으로 평가되었다.

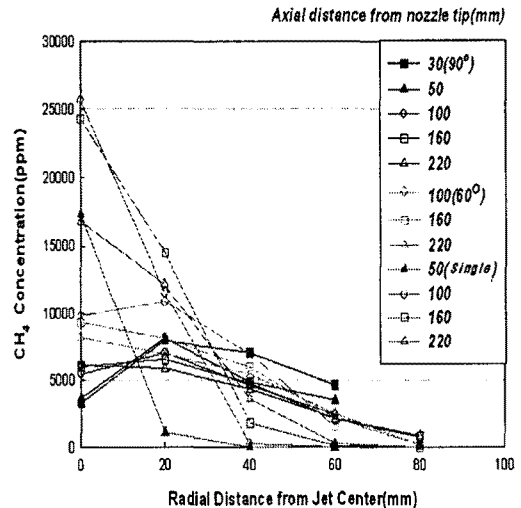


Fig. 5. 유동방향 각 지점에서 메탄의 농도분포

3.2 계산결과

그림 6은 그림 1에서 보여준 노즐을 대상으로 수행한 전산해석의 계산영역, 격자구성 및 경계조건을 나타낸다. 그림 1에서 보는바와 같이 본 실험에 사용한 다공 노즐의 경우는 유동이 대칭인 성격을 가지고 있으므로, 전 실험 영역 중 1/4만 계산 영역으로 구성하여 수치 해석을 수행하였다. 따라서 그림 6에서 보는바와 같이 경계조건으로 두 개의 대칭면이 존재하게 된다. 격자는 사면체 격자로 구성하였으며, 노즐 부근에서는 격자가 조밀하게 주어지고, 하류로 갈수록 점점 격자가 커지나 격자의 크기가 어느 한계는 넘지 않도록 구성 하였다.

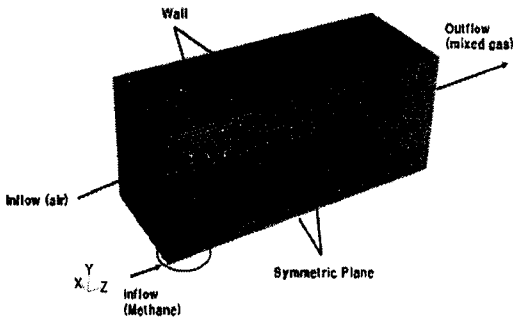


Fig. 6. 계산격자 및 경계조건

메탄의 물분율에 대한 그림7은, 축매전단 즉, 유동방향 $z=180D$ 에서 y 방향의 물분율 분포를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이, 노즐의 각도에 따른 물분율의 분포는 상용단공노즐인 경우보다, 각도가 증가할수록 물분율의 최대값이 낮아짐을 알 수가 있다. 또한 y 방향 물분율의 분포가 노즐의 각도가 증가할수록 평평해 지는 경향이 있음을 알 수가 있다. 이는 실험의 경우와 정성적으로 잘 일치하고 있음을 알 수가 있다. 그러나 실험의 결과와 정량적으로 약간의 차이를 나타내는데 이는 실험의 불확실성과 전산해석시 사용된 난류 모델 및 차분화법에 기인한다고 할 수 있다. 그림 7에서 알 수 있듯이 다공 노즐을 사용할 경우 90° 의 노즐이 환원제의 확산에 가장 최적함을 알 수가 있고, 90° 를 기반으로 변화된 형상, 예를 들어 swirl을 줄 수 있는 형상 등이 고려되어 질 수 있다.

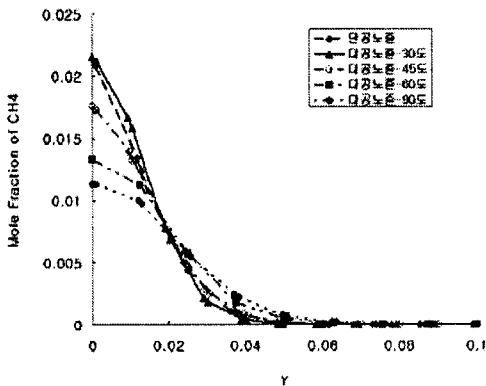
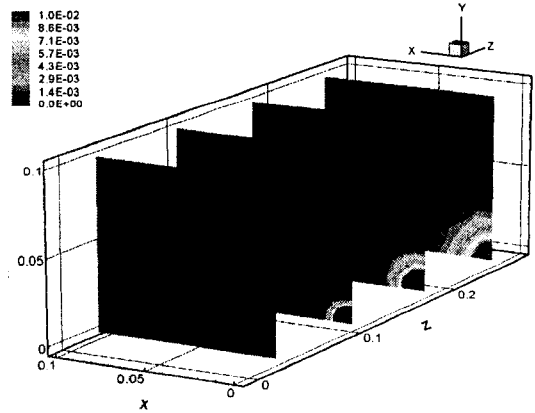


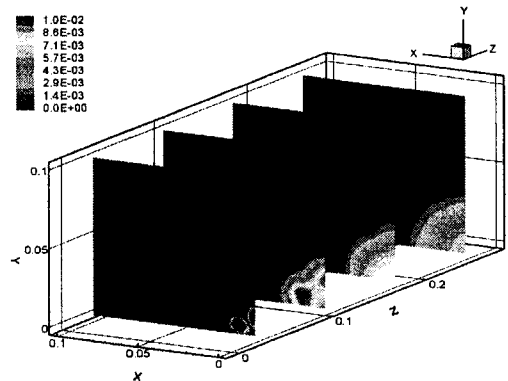
Fig. 7. 노즐의 분사각도 변화에 따른 메탄의 물분율 분포

이러한 다공노즐의 환원제와 배가스의 혼합에

대한 혼합특성을 알아보기 위하여 그림 8과 같이 유동방향(z 방향) 4지점에서 유동방향에 수직한 단면을 끊어 메탄의 농도분포를 살펴보았다. 그림 8(a)에서 보는바와 같이 단공노즐의 경우는 노즐끝단에서 멀리 떨어진 하류에서도 메탄이 상류에 비해 주위로 확산되기는 하나 여전히 제트의 중심부근에서 메탄의 농도가 높음을 알 수 있다. 반면, 다공노즐의 경우는 유동의 상류에서, 분사관으로부터 분사되는 제트와 제트사이에 주위공기가 유입되어 메탄제트와의 혼합이 활발히 일어나 유동하류로 갈수록 단공노즐보다 메탄과 공기의 혼합이 잘 일어남을 알 수 있다. 이는 노즐의 분사관에서 분사된 제트와 제트의 사이에서 이차유동이 생성되어 주위의 공기를 빨아들임으로써 혼합성능이 향상됨에 기인한다 할 수 있다. 이러한 이차 와류의 효과를 확인하기 위해 노즐상류 $z=16D$ 에서 (x,y) 단면의 vorticity magnitude 분포를 살펴보면 그림 9와 같다.



(a) 단공상용노즐



(b) 다공노즐(90°)

Fig. 8. 유동방향 각 단면에서의 메탄의 질량분율 분포

여기서, vorticity magnitude는 각 방향 와도를 이용하여 다음과 같이 구해진다.

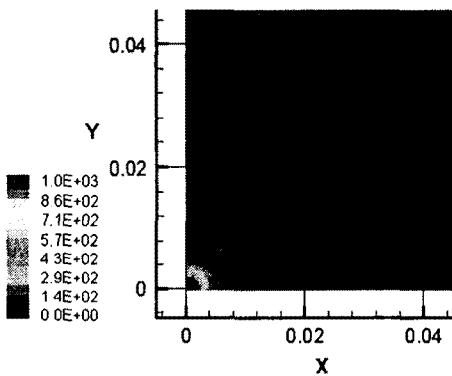
$$vorticity\ magnitude = \sqrt{\Omega_x^2 + \Omega_y^2 + \Omega_z^2}$$

앞에서 말한바와 같이 다공노즐의 경우 분사관에서 분사되는 제트와 제트 사이에서 발생하는 이차유동의 영향으로 넓은 범위에 걸쳐 큰 값의 vorticity magnitude가 분포함을 알 수 있다. 한편, 단공상용노즐의 경우에는 제트 부근에만 큰 값의 vorticity magnitude가 존재함을 알 수 있고, 이는 제트와 주위류 사이에 존재하는 속도 전단층에 기인한다 할 수 있다. 다공노즐의 경우 생성되는 이차유동은 그림 9(b)를 확대한 그림 10에서 확인할 수 있고, 이러한 와류에 대한 연구는 여러 연구자들에 의해 다루어지고 있다 [6-8].

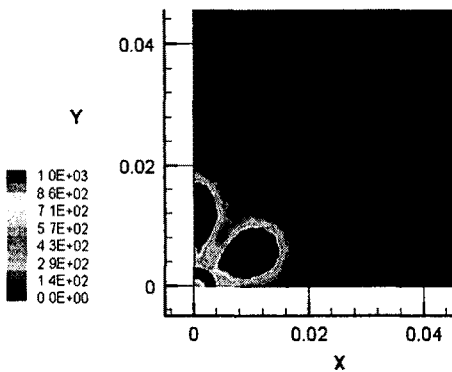


Fig. 10. 다공노즐 상류에서의 vorticity magnitude와 (x,y)속도벡터 분포

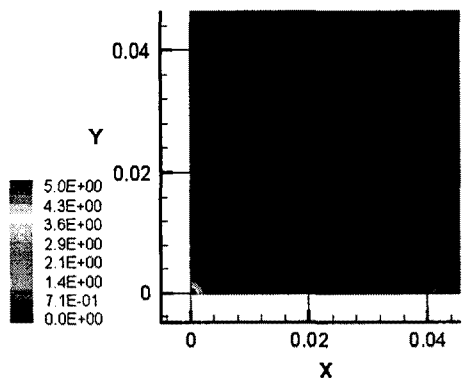
그림 11은 노즐상류 z=16D에서 (x,y) 단면의 난류강도 분포를 나타낸다. 그림 8과 9로부터 알 수 있듯이 단공노즐의 경우 큰 값의 난류강도가 노즐로부터 분사된 제트 주위에 한정되어 분포하는 반면, 다공노즐의 경우에는 보다 넓은 범위에 분포하게 된다. 그림 9와 10으로부터 다공노즐의 경우가 노즐 상류에서 제트와 이차유동의 상호작용으로 vorticity magnitude 및 난류강도가 커짐을 알 수 있고 결과적으로 그림 8에서 볼 수 있듯이 혼합이 상류에서 빨리 일어남을 알 수 있다.



(a) 단공상용노즐

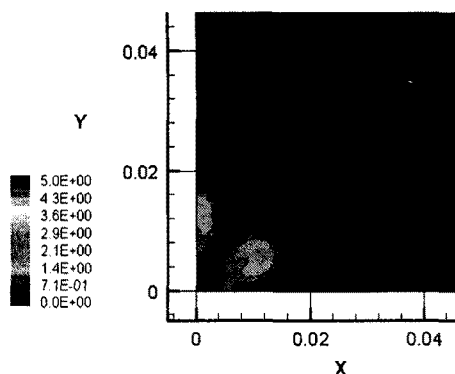


(b) 다공노즐(90°)



(a) 단공상용노즐

Fig. 9. z=16D지점, (x,y)단면에서의 vorticity magnitude 분포



(b) 다공노즐(90°)

Fig. 11. $z=16D$ 지점, (x,y) 단면에서의 난류강도 분포

4. 결론

- 1) 실험 및 계산 결과에서 알 수 있듯이 주위류에 평행하게 분사되는 상용단공노즐보다, 주위류에 수직으로 분사되는 다공노즐의 경우가 혼합이 빠리, 그리고 촉매전단에서 보다 균일하게 일어남을 알 수 있다.
- 2) 이는 단공노즐의 경우, 주위류와 제트사이의 속도전단층에서 주로 혼합이 일어나는 반면, 다공노즐의 경우는 제트와 2차유동의 상호작용에 의해 더 넓은 범위에서 활발한 혼합이 일어남에 기인한다 할 수 있다.
- 3) 따라서, 실제 SCR시스템에서 다공노즐을 사용할 경우, 단공노즐을 사용할 경우보다 더 짧은 거리에서 보다 균일한 혼합을 이끌어 낼 수 있고, 이는 SCR의 제작과 운전에 드는 비용을 크게 감소시킬 수 있다.

후 기

이 연구는 한국전력기술주식회사 주관 “중형탈질시스템 요소설계 기술개발 사업”을 통해 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- [1] M. Ostberg, K. D. Johansen, J. E. Johnsson, “Influence of Mixing on the SNCR Process”, *Chemical Engineering Science*, 1997, Vol. 52, pp. 2511-2525.
- [2] M. Oliva, M. U. Alzueta, A. Milera, R. Bilbao, “Theoretical Study of Influence of

Mixing in the SNCR Process. Comparison with Pilot Scale Data”, *Chemical Engineering Science*, 2000, Vol. 55, pp. 5321-5332.

[3] R. S. Miller, C. K. Madnia, P. Givi, “Numerical Simulation of Non-Circular Jets”, *Computer & Fluids*, 1995, Vol. 24, pp. 1-25.

[4] G. Singh, T. Sundararajan, K. A. Bhaskaran, “Mixing and Entrainment Characteristics of Circular and Noncircular Confined Jets”, *Journal of Fluid Engineering*, 2003, Vol. 125, pp. 835-842.

[5] L. P. Chua, S. C. M. Yu, X. K. Wang, “Flow Visualization and Measurements of a Square Jet with Mixing Tabs”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2003, Vol. 27, pp. 731-744.

[6] F. B. Tehrani, A. Shahmir, A. H. Kashani, “Numerical Analysis of a Single Row of Coolant Jets Injected into a Heated Crossflow”, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2004, Vol. 168, pp. 53-63.

[7] W. P. Jones, M. Wille, “Large-eddy Simulation of a Plane Jet in a Cross-Flow”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1996, Vol. 17, pp. 296-306.

[8] B. Wegner, Y. Huai, A. Sadiki, “Comparative Study of Turbulent Mixing in Jet in Cross-Flow Configurations Using LES”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2004, Vol. 25, pp. 767-775.