

# 소형 SCR 시스템 내 유동 제어를 위한 Baffle의 구조 결정에 관한 수치해석적 연구 Numerical Study on the Baffle Structure for Determining the Flow Characteristic in Small Scale SCR System

박미정 · 장혁상<sup>†</sup> · 하지수\*  
Mijung Park · Hyuksang Chang<sup>†</sup> · Jisoo Ha\*

영남대학교 환경공학과 환경에어로졸공학연구소 · \*계명대학교 에너지환경과학과 열에너지연구소  
Environmental Aerosol Engineering Laboratory, Department of Environmental Engineering, Yeungnam University  
\*Heat and Energy Laboratory, Department of Energy and Environmental Science, Keimyung University

(2010년 7월 12일 접수, 2010년 9월 30일 채택)

**Abstract :** Numerical analysis was done to evaluate the gas flow distribution in small scale SCR system which has 2.4×2.4×3.1 m<sup>3</sup> in volume and 25,300 Sm<sup>3</sup>/hr in flue gas flow capacity. Various types of baffles proposed for controlling the flow uniformity were evaluated by the CFD analysis to find the optimal geometry of the baffle in the SCR system. By installing baffles in the SCR system, the RMS (%) value was raised up to 6.2% compared with the baffle-uninstalled state. The effect of baffle thicknesses on the RMS (%) value was not shown within 0 and 8 mm in thickness, but the RMS (%) value was raised by 2.5% in 10 mm of baffles thickness, which causes the unstability in flow. By comparison between the shape of baffles, it is known that the lattice type baffle has better performance in controlling the flow uniformity than the circular truncated cone type baffle or mixer type baffle. RMS (%) values have more than 10% difference according to the shape of baffle type.

**Key Words :** CFD (Computation Fluid Dynamics), SCR (Selected Catalytic Reduction), Baffle, Retention Time, Flow Uniformity

**요약 :** 소형 SCR 시스템(처리용량 25,300 Sm<sup>3</sup>/hr, 내부용적 2.4×2.4×3.1 m<sup>3</sup>)의 촉매성능개선을 목적으로 배기가스 유동제어를 위한 수치 해석적 연구가 수행되었다. 유동제어를 위해 여러 형태의 배플이 제안되었으며 CFD 해석을 통해 최적의 배플형상을 결정하였다. 유동 균일화를 위해서 설치된 배플의 유무에 따라 본 연구의 SCR 시스템에서의 촉매층 전단 5 mm에서 유속에 대한 RMS(%) 값은 약 6.2%의 차이를 보였다. 수치해석에 의해 결정된 격자 형상의 배플에서 사용된 배플판의 두께범위가 0~8 mm에서는 RMS(%) 값의 변화가 없었으나 두께 10 mm가 되면 2.5% 가량 수치가 증가하여 유동에 영향을 주었다. 격자 형상의 배플은 원뿔대 형상, 믹서 형상 배플에 비해 상대적으로 높은 유동안정도를 나타내며 형상에 따라 RMS(%) 값은 10% 이상의 차이를 나타내었다.

**주제어 :** 전산해석연구, 선택적 촉매 환원법, 배플, 체류시간, 유동균일도

## 1. 서론

국내외적으로 대기오염물질 배출을 저감하기위한 노력의 일환으로 관련법령의 개정과 보완이 시행되어 있으며 우리나라의 경우 가장 최근인 2010년에 대기환경보전법의 시행규칙이 개정 보완되어 오염규제가 강화되고 있다.<sup>1)</sup> 이러한 법률개정조치들은 대기오염물질 배출규제에 매우 효과적이어서 주요 대기오염물질의 배출을 획기적으로 저감시키는 역할을 했다. 하지만 이런 오랜 시간 동안의 법적규제조치의 시행에도 불구하고 질소산화물에 대한 배출량 저감은 만족할만한 수준의 성과가 얻어지지 못한 부분으로 남아있다. 이러한 상황이 초래된 가장 큰 요인은 연소과정에서 발생하는 여러 가지 대기오염물 중 질소산화물의 제어가 기술적인 면에서 다른 오염물질에 비해 용이하지 않기 때문이다. 그러나 이러한 상황임에도 불구하고 질소산화물의 배출허용기준은 단계적으로 강화될 전망이며 대형 오염시설 위주로 적용되었던 오염물질 배출규제가 선박, 중·소형 보일러, 자동차 등의 소형배출시설에 대해서 확대 적용되고

있다.

배기가스에 포함된 질소산화물을 처리하는 후처리 시설로는 SCR (selected catalytic reduction) 시스템, SNCR (selective non-catalytic reduction) 시스템이 대표적으로 채택되어 사용되고 있다.<sup>2-4)</sup> SNCR 시스템은 촉매층이 필요 없는 등 구성상의 단순성이 장점이다. 그러나 고온반응영역에서 환원제가 반응해야하는 특징이 있기 때문에 반응에 필요한 고온상태를 조성하기 어려운 연소로 밖에서는 현실적으로 적용이 불가능하다. SCR 시스템 또한 초기 설비비용과 환원제 투입에 의한 운전비용이 많이 든다는 단점이 있으나 배기가스에 대해 안정적이면서 높은 저감효율로 시스템을 운영할 수 있다는 장점이 있어 널리 적용되고 있다.<sup>2)</sup> SCR 시스템은 시설운영비용이 고가인 문제점 때문에 주로 대형배출시설에 적용이 되고 있는 실정이다. 하지만 앞에서 언급된 바와 같이 질소산화물 규제의 적용범위가 점차 소형배출시설로 확대되어가고 있기 때문에 소형배출시설에 적용 가능한 경제적이고 효율적인 SCR 시스템의 개발요구가 증대되고 있다.

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: hschang@yu.ac.kr Tel: 053-810-2547 Fax: 053-811-5288

SCR 시스템의 성능은 촉매의 성능과 적절한 운전조건 유지에 따라 좌우된다. 시스템의 운전 변수에는 반응온도, 체류시간, 배기가스의 성분, 질소산화물과 환원제 간의 비율, 환원제의 농도분포 등이 있는데 이러한 운전변수에 따른 시스템의 성능변화에 관해서는 이미 여러 연구가 진행되어 의미 있는 결과들이 보고되었다.<sup>4-6)</sup>

본 연구에서는 소형배출시설에 연결되어 운영되는 SCR 시스템 내에 장착된 촉매층을 통과하는 배기가스 유동이 촉매층 내에서 동일한 체류시간을 가지도록 하기 위해 필요한 유동제어에 관한 연구를 시행하고자 한다. 유동제어가 적절히 이루어지지 않으면 환원제로 주입된 암모니아가 배기가스와 충분히 균일하게 혼합된 경우라도 촉매를 통과하는 동안 체류시간이 달라져 반응시간의 차이가 발생하여 촉매층의 효율성을 낮추게 되며 경우에 따라 암모니아 슬립(ammonia slip) 같은 문제가 발생한다. 대형시스템의 경우 환원제가 분사 투입되는 위치와 촉매층 사이의 거리가 상대적으로 멀기 때문에 배기가스가 흐름 방향으로 이동하는 동안 혼합이 충분히 이루어져 환원제의 혼합농도가 균일화되고 또 흐름의 단면에서 기체속도 분포의 균일도가 상대적으로 높다. 하지만 소형 SCR 시스템의 경우 시스템 내부용적이 작고 기하학적 구조가 복잡하기 때문에 유동의 불균일도가 높을 뿐만 아니라 유동제어 역시 쉽지 않다. 이러한 이유로 소형 SCR 시스템 내 유동 균일도를 높이기 위한 연구는 대형 SCR 시스템의 유동 균일화를 위한 연구나 다른 운전 조건에 대한 연구에 비해 미흡한 실정이다.

SCR 시스템에서 발생하는 유동의 불균일은 시스템의 전단에 연결된 덕트(duct)를 통해 시스템으로 공급되는 배기가스 도입부의 확대영역에서 주로 발생되는데 이러한 유동의 불균일도를 최소화하기 위한 방법으로 유동 불균일이 발생하는 부분에 유동제어를 위한 배플(baffle)을 설치하여 바람직한 유동특성을 조성하는 조치가 제안될 수 있다. 유

동제어를 목적으로 하는 배플에 관한 설계변수로서는 배플의 형상, 각도, 간격 등이 선택될 수 있는데 적절히 설계된 배플에 의해 안정화된 유동은 촉매층의 운전성능을 크게 개선시킬 수 있다. 본 연구에서는 환원반응에 영향을 주는 배기가스의 온도 및 성분이 일정하게 고정되고 또 주입된 환원제가 배기가스와 충분히 혼합된 상태라는 전제하에 SCR 시스템 내 유체 도입부의 배플의 설계변수에 따른 유동의 변동을 CFD (computational fluid dynamics) 상용코드를 이용하여 해석하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 해석모델

본 연구에서는 육상용 소형보일러의 배기관에 장착되는 것을 전제로 구성되는 SCR 시스템을 대상으로 시스템의 성능에 영향을 주는 내부 가스유동을 최적화하기 위한 설계점을 찾는 것을 연구목적으로 한다. 본 연구에서 유동제어를 위해 선택된 배플에 대하여 배플의 기하학적 형상, 배플 사이의 각도, 배플의 두께를 서로 달리 설계하여 유동에 주는 영향을 비교, 분석하였다.

#### 2.1.1. SCR 시스템의 기본 유동해석

해석대상의 SCR 시스템의 기본 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 이 SCR 시스템은 약 22 MW (75 MBtu/hr)의 용량을 가지는 육상용 보일러에 장착되는 것을 전제로 하며 2.4 (X) × 2.4 (Y) × 3.1 (Z) m<sup>3</sup>의 내부 용적을 가지는 정방형 구조를 가지며 배기가스 처리용량은 25,300 Sm<sup>3</sup>/hr이다. 시스템 하단에 6개의 AIG (ammonia injection grid)가 위치한다. 이 AIG는 측면 Y축 방향으로 길이 2.4 m의 크기를 가지며 각 AIG에는 16개의 분사구가 등간격으로 위치한다. 촉매층은

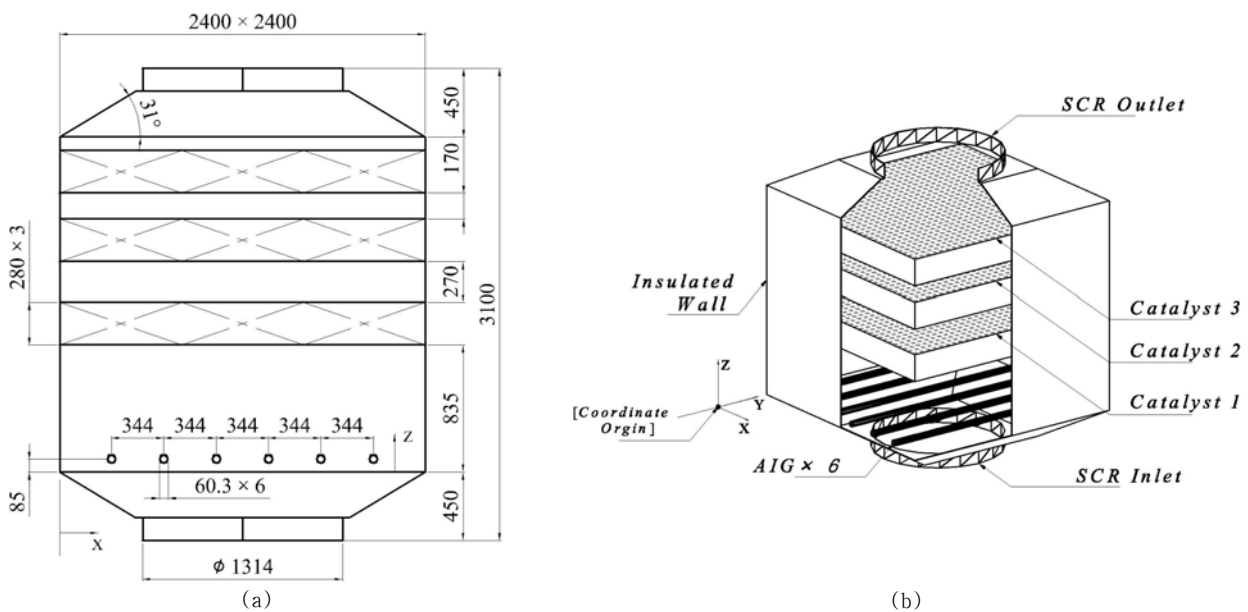


Fig. 1. Schematic of the SCR system: (a) dimensions of the SCR system, (b) cut view of the SCR system.

2.4×2.4×0.28 m<sup>3</sup>의 용적을 가지는데 SCR 시스템의 단면이 원통형의 덕트로부터 사각형상의 몸통이 시작된 점(Z=0 m)을 기점으로 하여 Z축 방향 0.835 m 위에 첫 번째 단이 위치하고 그로부터 0.27 m 위에 두 번째 단이 위치하며 또 0.17 m 위에 세 번째 단이 위치한다. Case 0은 해석대상인 Fig. 1의 SCR 시스템에 유동제어를 위한 배플을 장착하지 않은 상태에서의 시스템에 대한 내부유동을 해석하는 기본 작업이다. 이 때 AIG로부터 분사되는 환원제 가스가 유동에 주는 영향 또한 case 0의 해석에 포함하였다. 실제 시스템에서 분출되는 환원제 가스의 구성은 공기 99.63%와 암모니아 0.37%로 이루어지는데 유동해석의 편의를 위해 전량 공기가 분출되는 것으로 하여 해석하였다. AIG로부터 분출되는 가스의 조건은 다른 case의 연구에서도 동일하게 적용된다.

2.1.2. 배플 형상에 따른 유동해석

Case 0과 동일한 조건의 SCR 시스템 내에 추가로 설치된 배플의 형상에 따른 유동변화를 해석하였다. 제안된 배플은 Fig. 2에 보인 바와 같이 세 가지 형태의 구조적 특성을 가지며 Fig. 2(a)에 보인 격자 형상(lattice type)의 배플, Fig. 2(b)에 보인 원뿔대 형상(circular truncated cone type)의 배플, Fig. 2(c)에 보인 믹서 형상(mixer type)의 배플들이 그것이다. 배플의 형상에 따른 유동해석 시 배플의 두께는 0 mm로 하였다. 본 해석의 목적은 배플 사이의 각도나 간격이 주어진 상태에서 제안된 세 가지 형상 중 어느 것이 가장 유리한 유동특성을 조성시킬 수 있는가를 판단하는 것이다. 배플 형상에 따른 유동특성변화를 비교할 때 추가로 파악한 부분은 배플의 각도나 간격이 다르게 주어졌을 경우 배플 형상에 따른 성능의 상대적 우위가 달라질 수 있기 때문에 Fig. 3에서와 같이 case A 및 case B의 두

가지 형태의 배플 간격과 각도를 구성하여 다른 조건에서 비교해석을 수행하였다. 해석은 각 case 안에서 기본격자 형상, 원뿔대 형상, 믹서 형상에 대해 각각 수행하였으며 동일한 case에 대해 형상별 성능을 비교 분석하였다. 시스템 구조상 덕트 입구 단면에 비해 촉매층은 4배 이상 넓은 단면을 가지므로 유체가 배플을 지나면서 유동 균일성을 확보할 수 있도록 배플의 형상을 구성하였으며 각 배플은 시스템 확장부에 Z 방향으로 동일한 위치에 설치하였다. 이 때 SCR 시스템 내 배플의 설치를 제외한 AIG, 촉매층 등 다른 장치의 위치 및 크기는 case 0과 같도록 구성하였고 해석 방법 또한 동일하였다.

2.1.3. 격자 형상 배플의 구조설정에 따른 유동해석

배플의 다른 기하학적구조는 고정시킨 상태에서 배플의 각도를 조절하여 각도에 따른 유동변화를 해석하였다. 배플은 X축, Y축 각각 8개의 격자 구조로 구성 하였으며 Z 방향 위치는 다른 case와 같다. 중심으로부터 7° 간격으로 설치한 배플을 case C-(a), 10° 간격으로 설치한 배플을 case C-(b), 13° 간격으로 설치한 배플을 case C-(c), 15° 간격으로 설치한 배플을 case C-(d)로 하여 해석하였으며 각 case 별 배플의 각도와 간격을 Fig. 4에 나타내었다.

배플의 다른 기하학적구조는 고정시킨 상태에서 배플의 두께에 따른 유동변화를 해석하였다. 2.1.2에서 유동변화를 해석하였던 격자 형태의 case A를 기본 배플의 형상으로 이용하였다. 배플이 설치된 Z 방향 위치는 다른 case와 동일하다. Case A-(a)은 배플 두께를 0 mm로 설정하여 기본적인 배플 설치에 의한 유동 특성을 확인한 것이며 case A-(b), case A-(c), case A-(d)의 배플 두께를 각각 5 mm, 8 mm, 10 mm로 설정하여 두께에 따른 유동변화를 해석하였다.

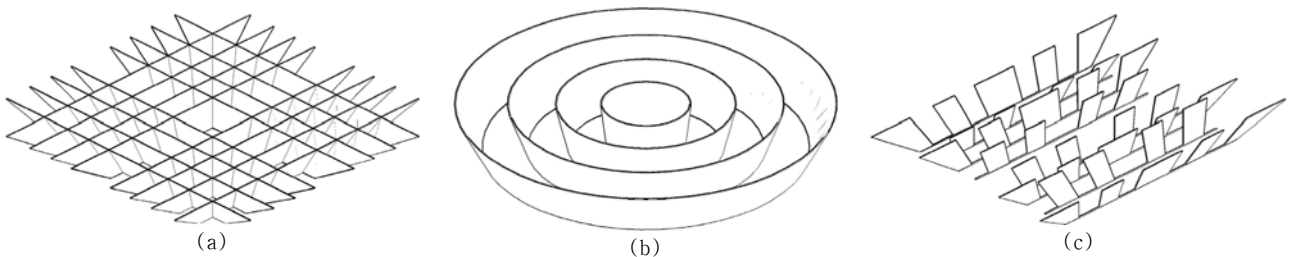


Fig. 2. Shapes of the testing baffles: (a) lattice type, (b) circular truncated cone type, (c) mixer type.

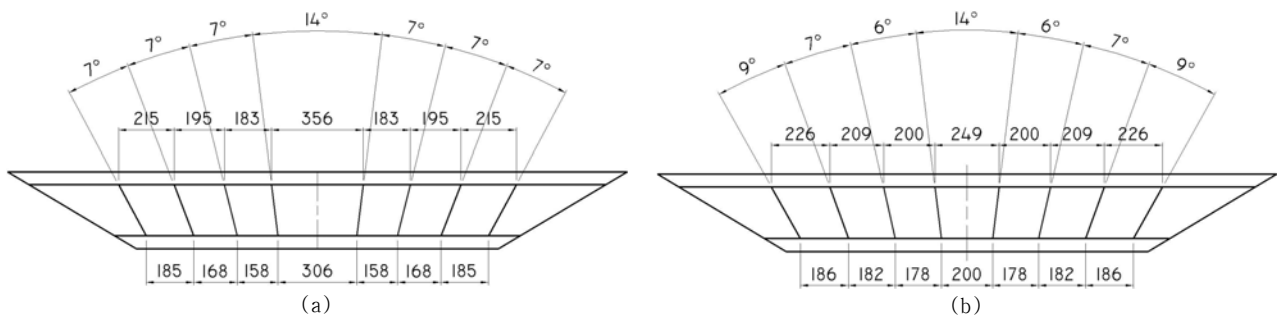


Fig. 3. Geometry of testing baffles: (a) case A, (b) case B.

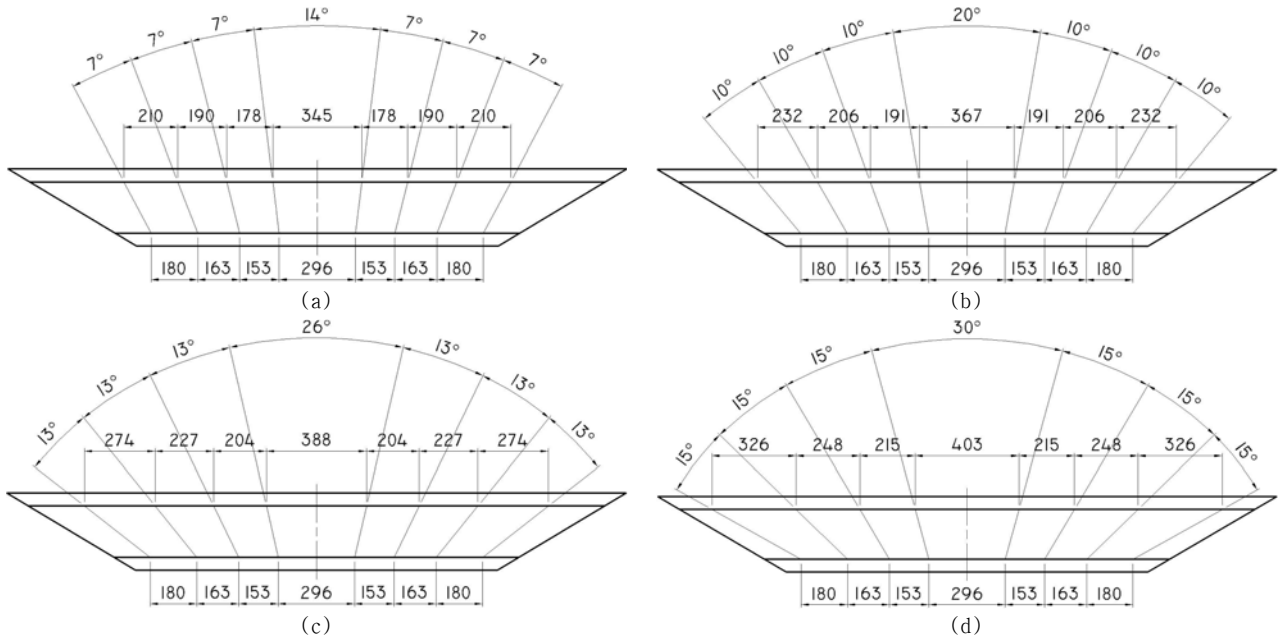


Fig. 4. Geometry of testing baffles in different channel angles: (a) case C-(a) (7°), (b) case C-(b) (10°), (c) case c-(b) (13°), (d) case C-(d) (15°).

## 2.2. 전산해석

SCR 시스템 내에서의 유동에 대한 각 케이스 별 수치해석은 CFD 상용코드인 FLUENT<sup>7)</sup>를 이용하였다. GAMBIT<sup>8)</sup>을 사용하여 전체 시스템 외관과 배플, 촉매층, AIG 등을 형상화 하고 내부에 격자를 생성하였다. 해석을 위해 구성된 SCR 시스템 모델에 사용된 계산용 셀(cell)수는 약  $1.8 \times 10^6$  개로 이루어진다. 일반적으로 계산 셀수가 많아지면 수렴 시간이 길어진다. 그러므로 본 연구의 해석에서도 계산 시간을 단축하기 위해 유체의 흐름이 단순한 촉매층 이후 영역은 계산용 셀의 구성을 단순하게 하여 셀수를 줄였다. 하지만 전체 유동을 결정하는 중요 영역인 촉매층 이전 영역에서는 보다 정확한 유동해석이 필요하므로 셀을 조밀하게 구성하여 시스템 전체적으로 계산에 적절하도록 셀을 구성하였다. 장치의 형상에 따라 각 영역별로 촉매층, 벽, AIG 등 외관에 해당하는 부분을 벽으로 설정하였다. 방정식 해의 수렴성을 판정하기 위해 각 해의 잔차(residual)가 온도장에 대해서는  $1 \times 10^{-6}$  미만의 값을 가지고 속도장, 난류장에 대해서는  $1 \times 10^{-3}$  미만의 값을 가질 때를 수렴기준으로 설정하였다. 이 값을 만족할 때 본 해석은 수렴하였다고 판단하고 수렴까지 반복 계산을 수행한다. 이 때 모든 방정식의 계산은 하향 이완(under relaxation)을 사용하는데 이는 반복계산 시 해의 종속변수 값의 변화를 느리게 하여 수렴성을 향상시키며 비선형 방정식 계산에 유용하게 사용된다.<sup>9)</sup>

## 2.3. 지배방정식

본 연구에서 사용된 보존 방정식은 질량, 운동량, 에너지 등에 대한 방정식으로 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식, 난류방정식 등 네 개의 방정식을 사용하여 유동을 확인하였다. 난류 모델은 standard  $k-\epsilon$  turbulence model을

이용하였다.<sup>10)</sup> Standard  $k-\epsilon$  turbulence model은 난류 운동 에너지  $k$ 와 난류 운동 에너지의 소산을  $\epsilon$ 에 대한 수송 방정식(transport equation)을 기초로 한 반경험적(semi-equation) 모델인데 난류 운동 에너지  $k$ 에 대한 수송 방정식은 완전 방정식으로 도출되고 소산율  $\epsilon$ 에 대한 수송 방정식은 물리적 추론에 의해 도출된다. 식 (1)과 (2)는 각각  $k$ 와  $\epsilon$ 에 대한 수송방정식에 관한 식이다.<sup>7)</sup>

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (1)$$

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

여기서  $\mu_t$ 는 난류 점성(turbulent viscosity),  $G_k$ 와  $G_b$ 는 각각 평균속도구배와 부력에 의해 생성된 난류 운동 에너지를 말한다. 또  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$ ,  $C_{3\epsilon}$ 는 모델 상수이며  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\epsilon$ 은 각각  $k$ 와  $\epsilon$ 에 대한 난류 Prandtl 수를 의미한다. 해석 시 실험적 값으로 가장 널리 사용되는 값을 선정하여 계산하였는데  $C_{1\epsilon}=1.44$ ,  $C_{2\epsilon}=1.92$ ,  $C_{3\epsilon}=0.09$ ,  $\sigma_k=1.0$ ,  $\sigma_\epsilon=1.3$ 로 설정되었다.

## 2.4. 경계조건

배기가스가 SCR 시스템의 덕트 입구를 통해 유입될 때 조건을 velocity-inlet으로 설정하여 입구에서 유입될 때 속도를 동일하게 설정하였고 덕트의 출구 부분은 pressure-outlet으로 설정하여 일정 압력이 존재하는 조건에서 배기

**Table 1.** Boundary conditions for numerical analysis of the SCR system

Zone	Values	Outlet	AIG hole	Catalyst	Wall
Boundary Condition	Velocity Inlet	Pressure Outlet	Mass Flow Inlet	Porous Media	Adiabatic
Values	10.9 m/s 300 °C	1.0 atm	86.1 g/s	-	-
Material	Air	Air	Air (Air:99.63%+ NH <sub>3</sub> :0.37%)	-	-

가스를 배출시켰다. 각 AIG의 분사구는 mass flow inlet으로 설정하였으며 본 연구의 주된 목적은 배플에 따른 유동 특성을 알아보고자 함이므로 시스템 내 유입되는 배기가스와 AIG 분사구에서 분사되는 가스를 전량 공기로 가정하고 해석하였다. SCR 시스템내의 촉매층은 다공성 물질로 촉매에서의 유동 해석을 위해 porous media를 적용하여 투과율, 관성저항 등의 특성 값을 갖는 것으로 가정하여 해석하였다.<sup>7,11)</sup> 각 경계에 설정된 조건을 Table 1에 나타내었다.

2.5. 유동 균일도의 평가방법

SCR 시스템 내의 축 방향 유체 속도 분포는 시스템 유체 도입부에 설치한 배플의 형상에 따라 달라진다. 유체가 촉매층에 전달될 때 유동 균일도를 판단하기 위해 RMS (root mean square) (%) 값을 계산하였는데 이는 식 (3)과 같이 정의된다.<sup>2,12)</sup>

$$RMS(\%) = \frac{1}{\bar{u}} \sqrt{\frac{\int \rho u (u - \bar{u})^2 dA}{\int \rho u dA}} \times 100 \quad (3)$$

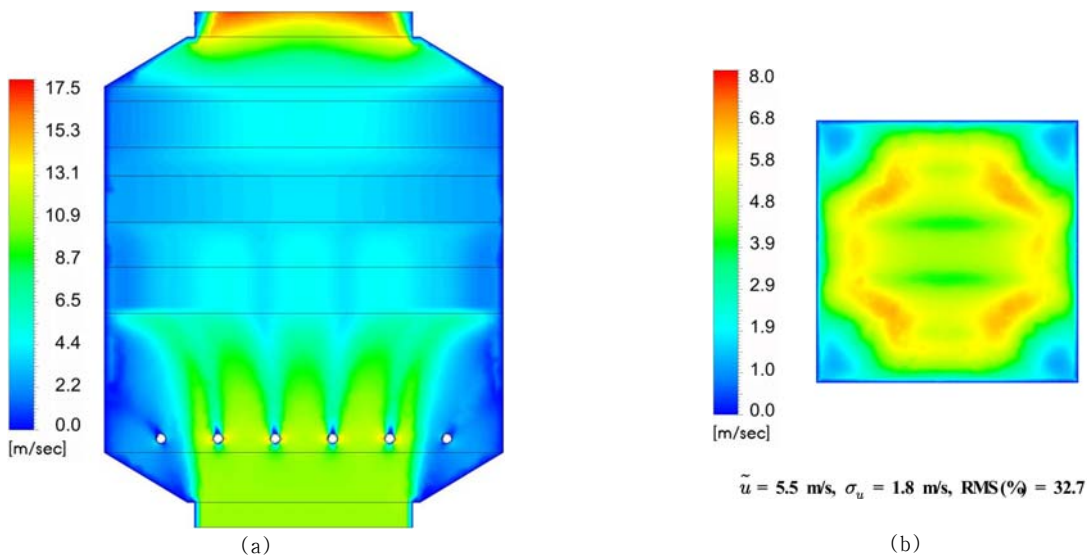
여기서  $u$ 는 지점에서의 기체의 속도,  $\bar{u}$ 는 기체의 평균속도,  $\rho$ 는 기체밀도를 각각 나타낸다. RMS(%)는 유체 균일

도를 판단하는 기준으로 채택되었으며 배기가스가 촉매층을 얼마나 효율적으로 통과하는지를 나타내는 척도가 된다. RMS(%)가 100%에 가까운 값을 나타내면 한 셀로만 모든 유동이 들어오는 경우이고 0%에 가까운 값을 나타내면 전 단면적에 걸쳐 골고루 들어오는 경우를 나타내는데 0%에 가까운 값을 나타낼수록 촉매층 내에서 배기가스와 환원제가 효율적으로 반응할 수 있다. 본 연구에서는 전 case에서 시스템 내 세 단의 촉매층 중 첫 번째 촉매층 전단 5 mm (Z=0.83 m)의 유체 균일도 판단을 위해 RMS (%) 수치를 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기본유동 해석

배플이 장착되어있지 않은 case 0의 경우 해석 결과가 Fig. 5에 정리되어 있다. 덕트 입구에 평균속도 10.9 m/sec로 들어온 배기가스는 시스템 확장부까지 덕트 입구의 형상대로 흘러가며 확장부로 흘러간 유동은 시스템 내 하나의 장애물로 작용하는 AIG에 의해 유동이 분할되면서 급격히 변하게 된다. 기본 유동의 case 0에서 촉매층 전단 5 mm에서 유체의 평균속도( $\bar{u}$ )는 5.5 m/sec이고 속도표준편차( $\sigma_u$ )는 1.8 m/sec이며 식 (3)의 정의에 따라 계산된 RMS (%) 수치는 32.7%이다. 유동의 해석결과에 있어 단면속도의 속도 표준편차 값이 작을수록 속도의 균일성이 확보되었음을 나타내는데 case 0에서는 속도표준편차가 높게 나타나 RMS (%) 수치가 낮지 않았다. 촉매 전단 5 mm에서의 속도분포를 나타내는 Fig. 5(b)에서도 볼 수 있듯이 유체의 속도 분포는 시스템의 중심부에 위치할수록 상대적으로 높은 값을 가지고 시스템의 모서리 쪽에서는 0에 가까운 값을 가진다. 이러한 속도분포의 불균일은 속도 표준편차와 RMS (%) 수치를 높게 만드는 원인이 된다.



**Fig. 5.** Distribution of velocity at case 0: (a) Y = 1.2 m, (b) Z = 0.83 m.

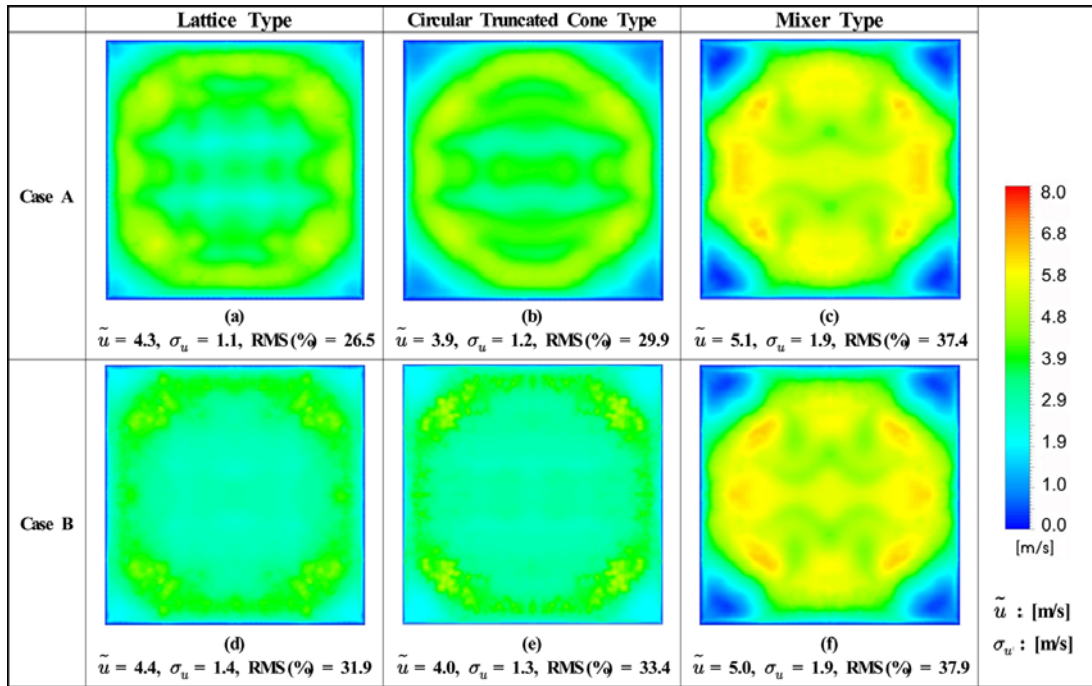


Fig. 6. Distribution of velocity per baffle shapes at case A and case B ( $Z=0.83$  m).

### 3.2. 배플 형상에 따른 유동해석

Fig. 6은 서로 형상이 다른 세 가지 배플에 의해 결정된 유동 해석 결과를 축매층 전단 5 mm ( $Z=0.83$  m)의 위치의 속도 분포로 나타낸 것이다. 배플 사이의 각도와 간격이 같더라도 형상에 따라 유동의 균일화 정도가 서로 다르게 나타나는데 비교된 세가지 형상 중 격자 형상(lattice type)의

배플이 가장 좋은 유동 특성을 나타내고 믹서 형상의 배플이 유동에 대한 데드존(dead zone) 증가로 비교적 좋지 않은 유동을 나타냈다. Fig. 6의 결과에서 보인 case A 및 case B는 Fig. 3에 보인 두 가지 기하학적 배치를 각 형상의 배플에 대해 적용한 것을 구분한 것이다. 배플 형상별로 case A와 case B를 적용하여 해석하면 당연히 유동형태가 서로

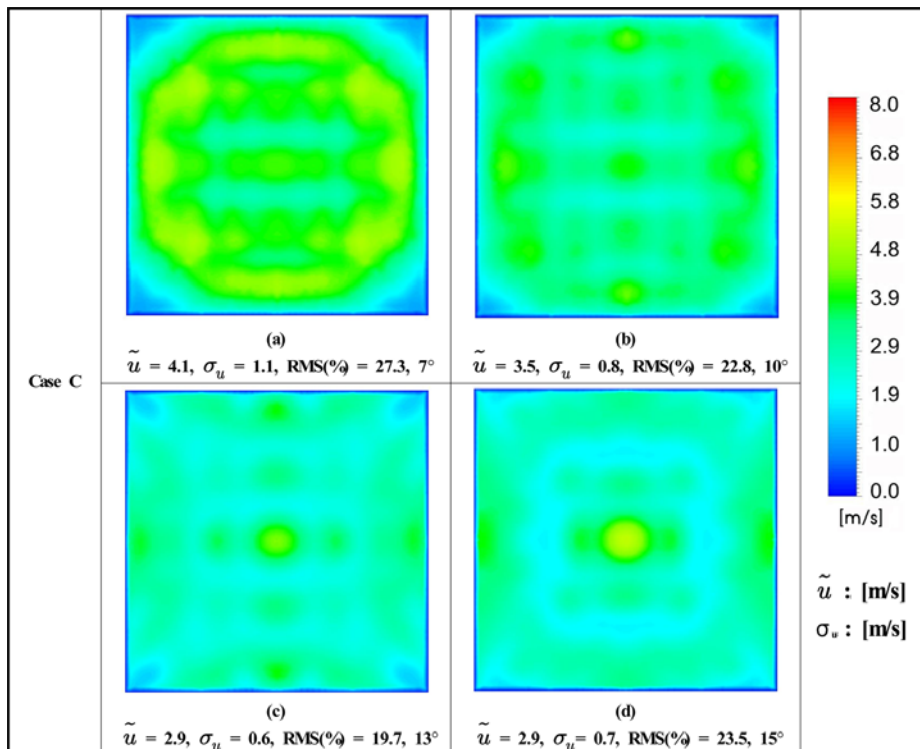


Fig. 7. Distribution of velocity per different channel angles at case C ( $Z=0.83$  m).

다르게 나타나며 case A 및 case B의 기준으로 나누어 배플형상별 유동특성을 해석해보면 격자 형상의 배플, 원뿔대 형상의 배플, 믹서 형상의 배플 순으로 모서리 쪽 데드존의 증가가 나타났다. Case에 관계없이 같은 경향의 결과가 나타나는 것을 보아 배플의 각도와 간격에 관계없이 격자형상(lattice type)의 배플이 유동 균일화의 역할을 가장 잘 수행한다고 판단할 수 있다. 격자형상의 경우 case A의 배플구성에 대해 해석된 RMS (%) 수치는 26.5%로서 배플을 설치하지 않은 경우인 case 0의 RMS (%)인 32.7%와 비교했을 때 6.2% 정도 개선된 RMS (%)를 가지므로 그 역할을 충분히 수행한다고 할 수 있다. 격자형상 및 원뿔대형상의 배플설치에 의해 형성된 속도분포인 Fig. 6의 case A-(a), case A-(b)와 case B-(a), case B-(b)의 결과는 배플을 설치하지 않은 case 0의 결과인 Fig. 5(b)의 결과와 비교해 보았을 때 촉매 전단의 각 모서리에 발생하는 데드존의 분포가 상대적으로 적게 발생한다. 이러한 결과는 유동 균일도 개선측면에서 배플의 설치가 필수적이고 이를 통해 비교적 균일화 된 배기가스가 AIG에서 분사되는 환원제와 혼합되었을 때 촉매층이 최선의 효과를 나타낼 것이라 판단된다. 믹서형상의 배플을 설치한 경우에는 배플이 없는 case 0의 유동에 비해 더 불안정한 유동특성을 보였다. Fig. 6 case A-(c), case B-(c)의 결과는 표준편차( $\sigma_u$ ) 1.9 m/s, RMS (%) 37.4% 및 표준편차( $\sigma_u$ ) 1.9 m/s, RMS (%) 37.9%를 나타낸다. 이는 case 0의 RMS (%) 수치 32.7%에 비해 오히려 약 5% 정도 증가된 결과를 나타내는 것인데 믹서형상의 배플의 경우 유동 균일화 장치로서의 역할을 적절히 수행하지 못할 뿐 아니라 오히려 유체의 흐름에 장애물로 작용될 수도 있음을 보여주고 있다.

### 3.3. 격자형상 배플의 구조설정에 따른 유동해석

예비해석을 통해 유동제어에 있어 상대적 우위를 가지는 격자형상(lattice type)의 배플에 대해 배플 사이 각도배치 및 배플의 두께를 변경시켜 이에 따른 유동 변화를 해석하였다.

Fig. 7은 격자형상의 배플을 Fig. 4에 설명된 구조로 배치했을 때 촉매층 전단 5 mm( $Z=0.83$  m)에서의 속도 분포를 나타내고 있다. 배플에서 격자의 다른 구조는 그대로 유지한 상태에서 격자간 각도 변경을 한 경우를 case C로 명명하였다. 유동의 기본측면에서 보면 배플 사이의 각도가 증가하면 덕트로 공급된 배기가스가 배플을 지나면서 유체의 흐름이 시스템 내 더 넓은 면적에 닿을 수 있도록 퍼지게 되어 유동의 균일도가 높아진다. 그러나 이러한 현상은 격자간 각도범위가 일정 각도 범위 내에서만 이루어지는 현상이며 특정 각도를 넘어서면 오히려 유동불균일의 원인이 되기도 한다. Case C-(a)는 Fig. 4(a)의 경우를 해석한 것이며 이 때 속도분포는 평균속도( $\bar{u}$ )는 4.1 m/s, 표준 편차( $\sigma_u$ )는 1.1 m/s, RMS (%)는 27.3%의 값을 가진다. Case C-(b)와 case C-(c)에서는 RMS (%) 값이 각각 22.8%, 19.7%로 배플 사이 각도가 증가할수록 유동의 균일도가 높아지

는 것을 알 수 있다. 이러한 경향을 배플의 각도가 증가할수록 덕트로부터 유입된 유동이 흐름의 반경 방향으로 분산 확장됨과 동시에 난류 강도 역시 증가되어 종합적으로 배기가스의 혼합이 증가되기 때문이다.<sup>13)</sup> 그러나 case C-(d)의 경우 RMS (%) 값이 23.5%가 되어 case C-(c)에 비하여 높아지는데 이는 격자사이의 각이 과대해져 유체의 흐름을 방해함과 유동을 부분적으로 모이게 하여 시스템의 각 모서리 및 중심에서 유동에 대한 데드존을 발생시키기 때문이다. 본 연구에서 사용된 시스템 형상에서는 case C-(c)에 서처럼 격자형상의 배플의 격자 사이 각이 13°로 등간격을 이루어 전체적으로 104°의 각으로 펼쳐진 상태를 이룰 때 시스템 내를 흐르는 유체의 균일도가 최대가 되어 촉매층에서 최적의 속도 균일도를 가지는 유체를 공급할 수 있었다.

격자형상 배플을 이용하여 배플 두께에 따른 유동 변화를 해석한 결과를 정량적으로 비교하기 위해 촉매층 전단 5 mm에서의 평균 속도와 표준편차, RMS (%) 수치를 Table 2에 나타내었다. 배플의 두께를 조정하여 유동을 확인한 결과 두께가 두꺼워질수록 미세한 면적의 데드존이 점차 증가함이 파악되었다. 이러한 데드존의 변화는 유동 균일도를 나타내는 수치로서 보다 정확히 판단할 수 있다. 본 연구에서 해석된 모든 경우에 대해서 배플 격자의 두께가 변하여도 평균 속도는 4.3 m/s로 비슷한 수치를 가졌으나 표준편차는 큰 차이를 보였다. 배플 격자 두께의 영향을 파악하는 해석 시 설정한 배플의 구조는 Fig. 3(a)에 설명된 case A의 구조를 기본으로 사용하였고 배플 격자의 두께만 변화시켜 그 영향을 해석하였다. Table 2에 요약된 바와 같이 배플 두께가 8 mm가 되는 case A-(c)까지는 두께 0 mm로 설정하여 해석한 case A-(a)의 표준편차 1.1 m/s와 비슷한 수치를 가졌으나 두께 10 mm(case A-(d))가 되면서 그 값이 1.3 m/s로 증가하였다. 계산된 RMS (%) 수치는 두께 8 mm에서 26.9%, 10 mm에서 29.4%로 2.5% 가량 증가하였다. 위의 계산 값에서도 알 수 있듯이 배플의 두께가 두꺼워질수록 효율적인 면에서 손실이 일어나 운전비가 증가될 뿐만 아니라 설치비의 증가도 가져오게 되어 경제적인 면에서 손실이 발생되므로 각 시스템의 특성에 맞는 적절한 배플 두께의 선택이 탈질설비의 최적성능을 확보하는 인자가 된다.

Table 2. Velocity distribution in case A at  $Z = 0.83$  m with respect to baffle thickness

	case A-(a)	case A-(b)	case A-(c)	case A-(d)
Baffle thickness (mm)	0	5	8	10
Average velocity (m/s)	4.3	4.3	4.3	4.3
Standard deviation (m/s)	1.1	1.1	1.1	1.3
RMS (%)	26.5	26.5	26.9	29.4

#### 4. 결론

본 연구에서는 SCR 시스템 운전에서 유체 흐름에 균일화된 유체를 전달하여 SCR 시스템 성능을 극대화하기 위한 방안으로 배플의 형상을 변화시켜 유동 균일도를 조절하는 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 1) 배기가스의 도입부에 비해 반응이 일어나는 SCR 시스템 내의 형상이 크게 변동하는 시스템의 경우 유동제어를 위한 배플을 설치하지 않을 경우 도입부 형상에 의해 결정된 유동이 촉매층에 그대로 전달되므로 SCR 시스템의 운전성능이 나빠진다. 따라서 이 경우 유동제어를 위한 배플의 설치가 필수적이다. 본 연구대상의 SCR 시스템에서는 배플이 없는 경우 RMS (%) 값은 32.7%이고 유체 도입부에 배플을 설치한 경우 RMS (%) 값은 약 26.5%로 배플의 유무에 따라 RMS (%) 수치는 6.2%의 차이를 보였다.
- 2) 배플의 형상에 따라 유동은 크게 영향을 받는데 격자형상의 배플이 원뿔대 형상이나 믹서형상의 배플에 비해 유동 균일화에 크게 기여하므로 배플 사이에 적절한 각도와 간격을 가지는 격자형상의 배플을 설치하는 것이 바람직하다.
- 3) 설치된 배플은 유체가 촉매층 단면에 고루 분포하기 위해서 적절한 각도를 이루어야하며 본 연구대상 시스템에서는 격자형상의 배플이 중심에 대해 대칭적으로 최대 104°의 각에 대해 각 격자의 사이 각이 13°로 배치될 때 RMS (%) 값이 19.7%인 가장 양호한 상태를 이루었다. 배플이 유체의 흐름에 장애물로 작용하지 않는 수준에서 최대 각을 이룰 때 각도가 작을 때에 비하여 유동의 분산 개선 및 난류 강도 증가에 의해 시스템 내 배기가스의 혼합이 증진하게 되므로 비교적 고른 유체 균일도를 가지게 된다.
- 4) 배플의 형상과 각도가 일정할 때 설치되는 배플의 두께에 대해 일정 두께까지는 유동변화에 영향을 주지 않으나 제한 두께 이상의 값에 대해서는 유동에 영향을 주어 불균일도를 증가시키므로 선택에 주의가 필요하다. 본 연구의 시스템에서는 배플 두께 8 mm까지는 유동균일도가 크게 좌우되지 않으나 10 mm 이상의 경우 그 보다 얇을 때에 비해 RMS (%) 수치가 26.9%에서 29.4%로 2.5% 가량 증가하였으므로 설치되는 배플의 두께는 최대 8 mm가 좋다.

본 연구 결과를 요약하면 SCR 시스템의 운전 성능을 극대화하기 위해서는 촉매층에 도달하는 유동의 균일도를 제어하기 위한 적절한 배플의 설치가 필수적이며 SCR 시스템 형상과 운전 조건에 맞는 적절한 두께와 형상, 각도를 가진 배플은 환원제 주입을 위해 잘 설계된 AIG의 조합과 함께 촉매층의 성능을 최대로 하는 중요 요소가 된다.

#### 사사

본 연구는 지식경제부 동남광역경제권선도산업 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

KSEE

#### 참고문헌

1. 환경부, “대기환경보전법,” (2010).
2. 김광추, 박만홍, 윤준규, 임종한, “복합화력 탈질설비 성능 향상을 위한 암모니아 주입 그리드의 최적설계 방안에 관한 연구,” 대한설비공학회지, **19**(12), 811~820(2007).
3. Kenneth, W., Cecil, F. W. and Wayne, T. D., Air Pollution Its Origin and Control, 3rd ed., Prentice Hall, New Jersey (1998).
4. 홍길화, 공호정, 황인구, 박심수, “NH<sub>3</sub>-SCR 반응기 내에서의 NH<sub>3</sub>/NOx 및 SCR 촉매 온도가 DeNOx 성능에 미치는 영향,” 대한기계학회 2008 추계학술대회 논문집, 평창, pp. 3096~3101(2008).
5. 한정원, 홍길화, 황인구, 명차리, 박심수, 이내현, “디젤배기모사장치를 이용한 Urea-SCR 시스템의 NO/NO<sub>2</sub>의 비율과 촉매 온도가 DeNOx 효율에 미치는 영향,” 대한기계학회 2008 에너지 및 동력공학부문 추계학술대회 논문집, 대전, pp. 67~72(2008).
6. 장익규, 윤여빈, 박영준, 이성욱, 조용석, “선택적 환원 촉매(SCR)에서 암모니아(NH<sub>3</sub>) 분사량 최적화에 대한 실험적 연구,” 대한기계학회 2008 추계학술대회 논문집, 평창, pp. 2874~2879(2008).
7. FLUENT Inc., FLUENT User's Guide, Ver.12.0(2009).
8. FLUENT Inc., GAMBIT User's Guide, Ver.2.0(2000).
9. Patankar, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, New York(1980).
10. Frost, W. and Moulden, T. H., Handbook of Turbulence, Volume 1: Fundamentals and Application, Plenum Press, New York(1977).
11. 임석채, 장혁상, 하지수, “수치해석적 방법을 이용한 비등온 고농도 연무의 배기량 산정에 관한 연구,” 대한환경공학회지, **30**(5), 534~543(2008).
12. 신완호, 홍원석, 송동근, “전기집진기 내부 유동 균일도 평가 기준인 ICAC EP-7과 %RMS 간 상관관계,” 한국대기환경학회지, **26**(2), 234~240(2010).
13. 한지용, 정영식, 이창연, “난류강도가 수소 동축분류 난류 확산화염의 NOx 생성에 미치는 영향,” 대한기계학회지, **25**(2), 147~155(2001).