

## 비상발전기용 PM/NO<sub>x</sub> 저감장치의 유동특성 연구

방효원\*<sup>†</sup> · 박기영\* · 이성욱\*\*

### Flow Analysis of PM/NO<sub>x</sub> Reduction System for Emergency Generator

Hyo-Won Bang, Gi-Young Park, and Seong-Wock Lee

**Key Words:** Emergency generator(비상발전기), SCR(선택적환원촉매), CFD(전산유체역학), Uniformity index(유동균일도 지수), Back pressure(배압)

#### Abstract

Emergency generators normally use diesel engines. The generators need to conduct weekly no-load operation inspections to ensure stable performance at emergency situations. In particular, the generators with large diesel engines mainly use rectangle type filter substrates. In order to minimize hazardous emissions generated by generators, optimizing the reduction efficiency through CFD analysis of flow characteristics of PM/NO<sub>x</sub> reduction system is important. In this study, we analyzed internal flow by CFD, which is difficult to confirm by experimental method. The main factors in our numerical study are the changes of flow uniformity and back pressure. Therefore, changes in flow characteristics were studied according to urea injector locations, selective catalyst reduction (SCR) diffuser angle, and filter porosity.

#### 기호설명

$\gamma$  : 유동 균일도 지수  
 $\mu$  : 동점성계수  
 $\rho$  : 유체 밀도  
 $P$  : 압력  
 $A$  : 단면적  
 $N$  : 셀 밀도  
 $n$  : 셀 개수  
 $U$  : 내부에너지  
 $\varepsilon$  : 공극률  
 $\phi_s$  : 입자 구형도  
 $D_p$  : 입자 직경

$\bar{V}_0$  : 평균유효속도  
 $d$  : 촉매 직경  
 $L$  : 촉매 길이  
 $v_r$  : 반경방향유속  
 $q$  : 체적유량  
 $C_i$  : 단위격자(Mesh) 당 평균 농도

#### 약어

DOC : diesel oxidation catalyst  
DPF : diesel particulate filter  
SCR : selective catalyst reduction

(Received: 30 Aug 2021, Received in revised form: 27 Oct 2021, Accepted: 27 Oct 2021)

\*국민대학교 자동차공학전문대학원

\*\*국민대학교 자동차공학과

<sup>†</sup>책임저자, 회원, 국민대학교 자동차공학전문대학원

E-mail : bhw9521@naver.com

TEL : (02)910-5033 FAX : 02-910-4718

## 1. 서론

비상발전기는 발전용 디젤엔진을 사용하며, 건물에 설치되어 정전 발생 시 비상 대체 전력을 공급하거나,

화제가 감지되면 스프링클러 작동에 필요한 동력을 제공한다. 비상발전기의 안정된 시동성을 보장하기 위하여 산업안전공단은 비상발전기 운전점검 기준을 마련하여, 매주 1회, 30분 이상 무부하 시험운전을 수행하도록 규정하였다. 그러나 비상발전기는 부하율 75% 이상의 고 부하 조건에서 운전되고, 규모에 따라 500 kW급 이상의 중대형 엔진을 사용한다. 따라서 시험운전을 수행하는 과정에서 PM, NO<sub>x</sub> 등 디젤기관 유해 배출물이 다량으로 발생한다. 그러나 국내의 경우, 대기환경보전법 시행규칙상 비상발전기는 배출가스 점검 및 규제 대상에서 제외되어 있다. 이 때문에 비상발전기에서 발생하는 유해배출물이 규제 사각지대에 놓여있는 실정이다. 더욱이 국내 비상발전기는 2016년 서울시 기준, 평균 사용 연수가 18년 이상으로 노후화된 비상발전기가 대부분이다. 반면 해외의 비상발전기 후처리 기술력은 국내 대비 크게 앞서고 있다, 이는 미국 환경보호청(EPA)에서 Table 1과 같이 발전용 디젤엔진에 대해 더욱 엄격한 배출가스 규제치를 적용하기 때문이다.<sup>(1)</sup> 이러한 글로벌 환경규제를 충족시키기 위해서는 저감 효율을 최적화한 비상발전기용 후처리장치 국산화 개발이 필요하다.

비상발전기용 후처리장치의 기본 구성은 디젤 산화촉매(Diesel Oxidation Catalyst, DOC)를 시작으로 디젤 입자상물질 필터(Diesel Particulate Filter, DPF), 선택적환원촉매(Selective Catalyst Reduction, SCR) 등으로 이루어진다. 하지만 500 kW를 상회하는 대형 후처리장치는 원형 담체보다는 사각 담체가 배기 용량에 대응하기 쉽고, 제작이 상대적으로 용이하기 때문에 사각 담체를 주로 적용한다, 따라서 단면 형상의 차이에 따른 내부유동 특성 변화를 고려해야 최적설계가 가능해진다.

Urea-SCR 시스템에서는 Reactor 구간에 설치된 Urea 분사기에서 분사한 Urea 수용액이 배기온도에 의해 열분해되면서 이소시아산(HNCO)을 생성하고, Reactor(혼합영역)에서 가수분해 반응을 일으켜 암모니아(NH<sub>3</sub>) 환

원제를 생성하게 된다. 이어 암모니아를 포함한 배기가스가 Diffuser를 통하여 SCR 담체에 유입되고, 암모니아가 촉매 내에서 SCR 반응을 일으켜 NO<sub>x</sub>를 무해한 H<sub>2</sub>O와 N<sub>2</sub>로 변환시킨다.<sup>(2)</sup> 따라서 SCR 전단에 분포되는 암모니아의 유동균일도는 후처리장치의 저감 효율을 판단할 수 있는 지표가 된다. 또한 후처리장치의 전단(Inlet)과 후단(Outlet)에서의 압력을 계산하여 배압을 측정하여 사전에 후처리장치가 엔진의 출력특성에 미치는 영향을 파악할 수 있다. 그러나 이러한 유동특성은 실험적 방법으로 분석하기에 한계가 있다. CFD 해석법을 이용하면 최적설계에 필요한 시행착오를 크게 줄일 수 있어, 이를 활용한 후처리 시스템의 해석적 연구가 이루어져 왔다. 특히 Urea-SCR 시스템에 대한 CFD 연구는 지난 2009년 Hwang<sup>(3)</sup> 등에 의한 믹서 장착유무에 따른 SCR 시스템의 NO<sub>x</sub> 정화 효율 연구를 시작으로, 엔진의 부하율, SCR 장치 형상에 따른 내부 유동특성을 분석하는 연구가 수행되었다.<sup>(4,5)</sup> 최근에는 Urea 혼합기의 날개 사양과 암모니아 반응기의 길이에 따른 SCR의 배압 및 유동 특성을 다루는 해석적 연구가 이루어졌다.<sup>(6)</sup>

본 연구에서는 상용 CFD 소프트웨어인 ANSYS社의 FLUENT를 이용하여 Urea injector 위치, SCR 확대관의 각도, 그리고 공극률의 변화에 따른 SCR 전단 유동균일도 및 후처리장치 전체에 작용하는 배압을 분석하였다.

## 2. 해석 방법

### 2.1 해석 모델

본 연구의 목적은 난류를 포함하는 내부유동을 해석하는 데 있다. 해석 대상은 560 kW급 대형 디젤엔진에 대응 가능한 후처리 장치이며, 규모가 큰 관계로 통상 차량에 적용하는 원형이 아닌 사각 형태의 담체를 적용하였다. SDPF(SCR on DPF)는 공간 효율상에 이점이 있지만, 비상발전기는 후처리장치 설치 시 공간제약으

Table 1 EPA emission control for non-road & generator engines

| Tier          | Year | CO   | NMHC                        | NO <sub>x</sub> | PM   |
|---------------|------|------|-----------------------------|-----------------|------|
| Tier 1        | 2000 | 11.4 | -                           | 9.2             | 0.54 |
| Tier 2        | 2006 | 3.5  | 6.4 (NMHC+NO <sub>x</sub> ) |                 | 0.2  |
| Tier 4f (발전기) | 2015 | 3.5  | 0.19                        | 0.67            | 0.03 |

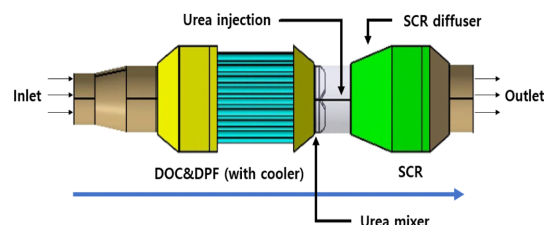


Fig. 1 Configure of PM/NO<sub>x</sub> reduction system for emergency generator

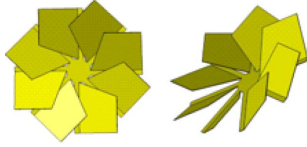


Fig. 2 Standard urea mixer design

로부터 자유롭고, DPF 내에 SDPF 용 촉매를 코팅하는 과정에서 일반적으로 공극률이 떨어지기 때문에 도입하지 않았다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 후처리장치의 전체 형상을 나타내고 있다. 유동균일도는 SCR 전단에서 해석하며, Inlet과 Outlet 양 단에 걸리는 배기압력을 측정하여 배압을 계산하였다.

DPF와 SCR 사이에는 혼합구간(Reactor)이 있으며, Reactor 2/3 지점에는 Urea 분사 노즐이, Reactor 전단에는 Fig. 2과 같은 Urea 혼합을 위한 지름 150 mm의 8엽 믹서(Mixer)가 장착되어 있다.

2.2 해석 조건

본 연구는 유한 체적법에 기초한 수치해석 기법을 적용하였으며, 배기 유동은 정상상태의 압축성 난류 유동을 가정하였다. 이에 따라 압축성 유동 기반의 운동량 방정식, 연속방정식, 난류 운동방정식을 함께 적용하였다. 믹서가 발생시키는 스윙(Swirl)의 분석을 위하여 난류 선회유동에 비교적 강건한 결과값을 계산해 내는 RNG  $k-\epsilon$  난류 모델을 사용하였다.<sup>(7)</sup> 고기공의 담체 필터에 대해서는 다공성 매체(Porous media)로 설정하고 내부유동은 층류(Laminar)로 가정, 해석하였다.

2.2.1 다공성 매체

Porous media(다공성 매체)를 설정하여 해석을 진행하면 미소 격자로 구성된 촉매를 관성저항과 점성저항에 관련된 수식으로 대체하여, 격자 생성 없이도 정확한 수치해석이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 Porous model을 이용하여 비상발전기용 등방성 촉매에 대하여 실제 다공성 매질이 지니는 특성값인 점성저항, 관성저항을 가지는 영역으로 설정하여 해석하였다.

필터의 경우 공극률과 셀 밀도가 여과 능력을 좌우하게 되는데, DPF 담체의 공극률은 45%, SCR 70%를 기준으로 설정하였다. 하지만 본 연구에서는 공극률의 변화에 따른 유동 특성 변화가 관심의 대상이어서 공극률 변화와 공극률 변화에 따른 점성 및 관성저항 값 변화를 고려한 해석을 진행하였다. Table 2는 필터 각각의

Table 2 Cell zone conditions

| Item |                                 | Value |
|------|---------------------------------|-------|
| SCR  | Standard porosity               | 70%   |
|      | Cell density(N), CPSI           | 400   |
|      | 150 mm × 150 mm × 150 mm (40EA) |       |
| DPF  | Standard porosity               | 45%   |
|      | Cell density(N), CPSI           | 200   |
|      | 150 mm × 150 mm × 300 mm (20EA) |       |

제원을 나타내고 있다.

2.2.2 압력 강하

다공성 매질에서 발생하는 압력강하는 Hagen-Poiseuille 방정식으로부터 다음 식을 기반으로 계산하였다.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{2(fRe)\mu U}{\phi d^2} = -\frac{k_r \mu U}{d^2} \tag{1}$$

여기서,  $k_r$  은 반경방향 및 축방향 저항계수이며, 오른쪽 항과 같이 공극률  $\phi$ 와 미찰계수  $f$ , 그리고 모노리스 채널에서의 Reynolds number를 통해 계산하였다.

모노리스 촉매 입구에서는 유동 단면적이 변화하는 과정에서 유동 방향이 급격히 변화하기 때문에 경계층이 발달하기 시작하면서 난류강도는 급감한다. 이러한 입구에서의 유동 특성 변화를 고려하기 위해 Lai는 다음의 압력 강하식에 추가적인 계수  $D_1$ 을 첨가하였다.

$$\Delta p = -\frac{D_1 k_r \mu U L}{d^2} \tag{2}$$

$$D_1 = \left[ 1 + 0.0445 \frac{\rho U d^2}{\mu L} \right]^{0.5} \tag{3}$$

하지만 위의 모델링 수식만으로는 촉매 입구에서 발생하는 유동박리 및 유동 재순환 현상에 따른 추가 손실을 고려하지 못하므로, Benjamin<sup>(9)</sup> 등이 제안한 입구에서의 압력손실 수식을 기반으로 계산하였다.<sup>(14)</sup>

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\left[ \frac{\rho v_r^2}{2L} + \frac{k_r \mu U}{d^2} \right] \tag{4}$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\left[ \frac{\rho v_r^2}{2L} + D_1 \frac{k_r \mu U}{d^2} \right] \tag{5}$$

본 연구에서는 Hagen-Poiseuille 방정식과 Lai 모델, 유동 재순환에 따른 손실을 함께 고려하여 압력강하를 해석하였다.

2.2.3 유동 균일도 지수

SCR 전단을 통과하는 암모니아의 유동 균일도 지수는 NO<sub>x</sub> 저감 효율은 물론, 촉매의 활성화 시간은 물론, 내구성에도 영향을 미치는 변수이다. 일반적으로 Welten<sup>(10)</sup> 가 최초로 제시한 유동 균일도 지수(Uniformity index,  $\gamma$ )가 사용되며, 다음 식과 같이 정의된다.

$$\gamma = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{i=0}^n \frac{\sqrt{(C_i - \bar{C})^2}}{\bar{C}} \quad (6)$$

2.2.4 경계조건

배기가스의 밀도 변화는 이상기체 상태 방정식으로 계산하였으며 시간 변화에 따른 내부유동 변화를 관찰하기 위해 비정상상태를 가정하여 해석하였다. Reactor 구간에서 요소 수용액을 분사하는 Urea injector의 분사 압력과 온도, 질량 유량은 각각 6 bar, 298 K, 5 g/s로 설정하였다.

Urea injector는 요소 수용액을 일정한 유속으로 정상 유동(Steady flow), Solid-cone 타입으로 분무한다. 따라서 해당 Injection 조건을 Inlet 배기가스 유동과 분리하여 설정하였다. 요소 수용액의 혼합비율은 Urea 32.5%, water 67.5%로 설정하였다. 액적의 운동 궤적은 Discrete Phase Model(DPM)을 통해 입자가 받는 저항력 및 관성력, Saffman 양력, LISA(Linearized Instability Sheet Atomization) 1차 무화 모델, KHRT 2차 무화 모델, 증발 모델이 모두 고려되었다.

Table 3 Boundary conditions for CFD analysis<sup>(12)</sup>

| Item                  |                      | Value            |
|-----------------------|----------------------|------------------|
| Engine Specifications | Type                 | V-12             |
|                       | Displacement         | 39.0 l           |
|                       | Power output         | 560 kW/1,800 rpm |
|                       | Emission level       | Tier-2           |
| Exhaust system        | Inlet mass flow rate | 1.223 kg/s       |
|                       | Outlet pressure      | 0                |
|                       | Exhaust temp.        | 678 K            |
| Urea injection system | Number of nozzle     | 4 EA             |
|                       | Cone angle (Solid)   | 39°              |
|                       | Hole diameter        | 200 μm           |
|                       | Liquid temp          | 298.15 K         |

Table 3는 해석에 사용된 경계조건을 나타내고 있다. 정상상태로 분사된 요소 수용액은 비정상상태의 배기유동과 혼합된 직후부터는 해당 배기유동과 함께 비정상 다상유동으로 가정하여 해석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Urea 분사 위치에 따른 비교

Urea 분사 위치와 방향에 따른 SCR 전단 암모니아 분포를 보았다. Urea 분사 위치는 Urea의 체류시간과 암모니아 생성 위치를 결정하기 때문에 유동 균일도에

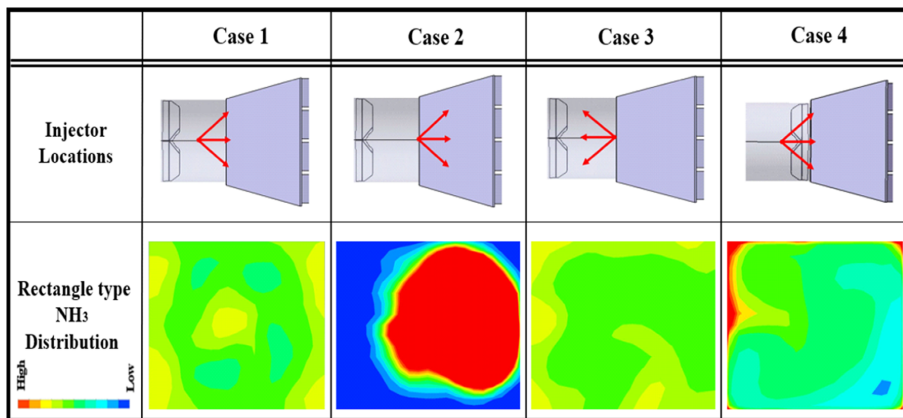


Fig. 3 NH<sub>3</sub> Distribution with injector locations

직접적인 영향을 주는 변수이다. 따라서 압력손실을 최소화하면서도 사각 담체의 모서리 부분에서 발생하는 Dead zone에 의한 손실을 최소화할 수 있는 최적의 분사 위치를 도출해야 한다.

Base 설계안은 Urea injector 전단에 Urea의 혼합을 균일하게 하는 날개 각도 45°의 Mixer가 장착되며, Urea injector의 위치를 변화시키며 유동 균일도의 변화를 보았다.

믹서 후단에 Injector를 최대한 근접하게 위치시킨 Case 1, Case 1과 대비하여 Injector를 상대적으로 믹서로부터 멀게 위치시킨 Case 2, 믹서와 Injector의 상호 위치를 반전시킨 Case 3, 분사 방향을 배기 유동에 반대 방향으로 설정한 Case 4등 네 가지 Case에 대해 해석을 진행하였다. Fig. 3는 원형 및 사각 후처리 시스템에 대하여 각각의 Urea injector의 배치 Case 별 SCR 전단 암모니아 분포를 정리한 것이다.

Figure 4는 원형 및 사각 후처리 시스템에 대하여 Urea injector 위치에 따른 유동 균일도와 배압 특성을 비교하여 보여주고 있다.

Case 1의 결과는 암모니아가 전반적으로 불균일하게 분포하는 모습이 관측된다. 즉, Injector 전단에 장착된 믹서에 의해 난류가 형성되었으나 확대관과 Injector 사이의 거리가 상대적으로 가까워 고른 분포가 일어나지 못하고 국부적으로 농후한 암모니아 분포가 이루어졌다.

Case 2와 같이, Injector를 믹서로부터 멀게, SCR 전단에 더욱 가까이 위치시키게 되면 혼합기에 의한 난류 형성 효과가 감소하고 중앙에서 분사된 Urea가 충분히 Dead zone까지 도달하지 못하여 암모니아 분포가 중앙에 현저히 집중되는 현상이 나타났다. 그 결과 가장 낮은 유동 균일도 수치를 나타내었다. 다만, 상대적으로

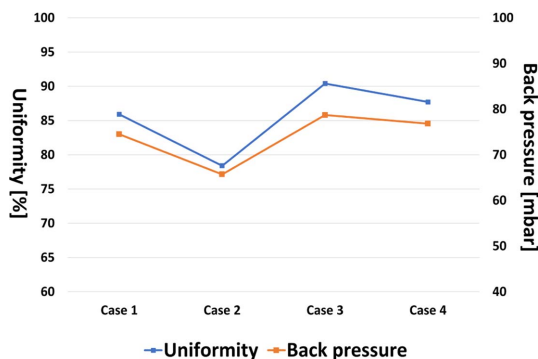


Fig. 4 Correlation between uniformity, back pressure, and urea injector locations

배압은 가장 낮은 수치를 기록하였다.

Injector를 배기 유동 방향과 마주 보는 역방향으로 설정한 Case 3의 경우 역방향 분사된 요소 수용액은 믹서에 의해 형성된 난류 배기 유동과 만나 빠르게 섞이게 되면서 암모니아 분포 측면에서 개선되는 특성을 보였다. 배기 유동과 요소 수용액의 유속이 서로 반대 방향으로 만나는 과정에서 저항력이 발생하여 유속이 감소하고, 배압의 증가로 이어지나, 유동균일도가 큰 폭으로 개선되었다.

마지막으로, Injector 후단에 믹서를 위치시킨 Case 4의 경우, 분사된 요소 수용액이 믹서에 의해 바로 혼합되며 SCR 전단에서 효율적인 혼합이 일어나게 된다. 하지만 암모니아 일부가 Dead zone에서 정체되는 현상이 나타나게 되어 배압은 Case 3보다 낮지만, 균일도는 상대적으로 떨어지는 현상이 나타났다. 따라서 유동 균일도의 상승을 고려하였을 때, 배기 유동에 역방향으로 Urea를 분사하는 Case 3가 가장 효율적인 배치라고 볼 수 있다. Urea injector를 역방향으로 설치하게 되면, 최초 모델과 비교하여 배압이 상승하여 출력이 일부 저하되는 현상이 발생할 수 있지만, NH<sub>3</sub>와 배출가스가 배기관에서 월등히 고르게 혼합되어 NO<sub>x</sub>의 저감 효율을 높은 수준으로 끌어올릴 수 있다.

### 3.2 SCR 확대관 각도에 따른 비교

SCR 전단에 마련된 확대관(Diffuser)은 유체의 흐름에 수직 방향으로 작용하는 압력인 정압을 최대화하여 암모니아의 고른 분포를 위해 마련된다. 그러나 확대관 입구와 SCR 촉매 전단 사이의 면적의 차이에 의한 유동 박리 현상이 일어나게 되면서 유속이 급격히 감소하게 되는데, 이 과정에서 유동에 부차적 손실이 발생하게 된다. 따라서 확대관의 각도에 따른 유동 분포를 해석하여 유동의 손실을 최소화하면서 암모니아 유동 균일도를 극대화할 수 있는 최적의 각도를 찾아내는 것이 중요하다.

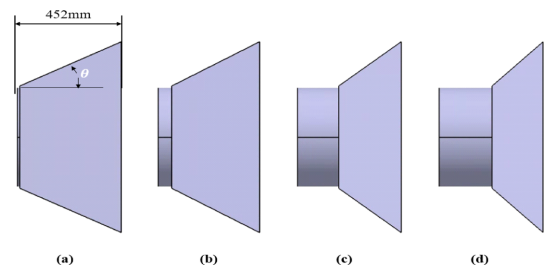


Fig. 5 SCR diffuser angle type; (a) 25°, (b) 30°, (c) 35°, (d) 40°



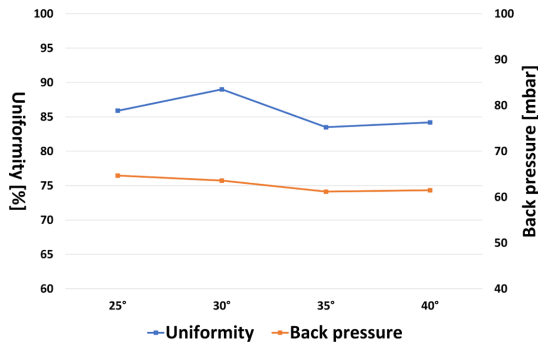


Fig. 6 Correlation between uniformity, back pressure, and diffuser angle

확대관 각도가 시스템의 효율에 미치는 영향을 명확히 보기 위해 전체 후처리 시스템의 총 길이는 고정시키고 확대관 각도를 25°, 30°, 35°, 40°로 변화시키면서 해석을 진행하였다. Fig. 5는 수치해석을 위한 확대관 각도 모델을 나타낸 것으로, 각 모델의 전체 길이는 동일하다.

Figure 6은 확대관 각도에 따른 유동 균일도 및 배압의 변화를 보여준다. 각도 상승에 따른 유동 균일도 변화는 불규칙적으로 나타났으나, 배압의 경우에는 점진적으로 향상된다. 가장 높은 유동균일도를 보여주는 확대관 각도는 30°이다.

확대관 각도 증가에 따른 압력 강하가 크지 않은 이유는 유동 박리 현상으로 인한 국부적인 암모니아의 재순환 유동이 발생하여 역 압력구배 현상을 유도했기 때문이다. Fig. 7은 각각 25°, 40° 확대관 모델에 대한 유선(Streamline)의 차이를 보여준다. 빨간색 원으로 표시

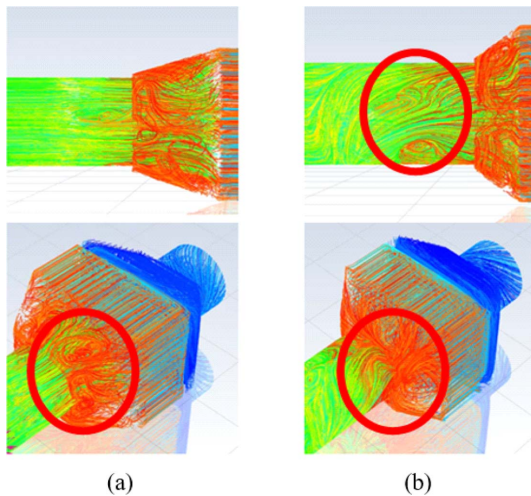


Fig. 7 Pathline at reactor, and diffuser with different angle; (a) 25°, (b) 40°

한 부분이 바로 재순환 유동이 생성되는 영역이며, 이는 확대관 각도가 상승할수록 더 강하게 나타난다. 특히 확대관 각도가 40° 이상이 되면 유동 박리에 따른 역방향 유속이 발생하여 Reactor 영역부터 재순환이 발생하여 Urea 일부가 암모니아로 변환된 이후에도 SCR로 유입되지 않고 정체현상이 나타났다. 이로 인하여 평균 유속 또한 감소하였다.

즉, 확대관은 적절한 각도로 설계할 때 정압을 유도하여 유동 균일도를 상승시킬 수 있지만, 일정 각도 이상 증가하면 유속이 감소하고, 유동 박리 현상에 따라 Dead zone을 중심으로 유동의 재순환이 발생하여 유동 균일도가 다시 하락하게 되는 원인을 제공한다.

### 3.3 필터 공극률에 따른 비교

유동해석의 효율성을 높이기 위해 DOC, DPF와 같은 필터는 Porous media로 설정하며, 여기서 공극률 값은 주요한 변수가 된다<sup>(13)</sup>.

본 연구에서는 사각 후처리 시스템을 기준으로 기공의 크기와 벽면 두께는 고정값으로 두고, 담체 공극률만을 변수로 설정하여 동일한 조건에서 담체 공극률 변화가 배압과 유동균일도에 어떠한 영향을 미치는지 분석하였다. 통상적인 DPF 담체의 공극률은 40%, SCR의 공극률은 70% 전후이므로, 평균 50%의 공극률을 기준으로 하여 DPF의 공극률을 30%, 50%, 70%, 90%로 증가시키며 유동균일도와 배압의 변화를 파악하였다.

Figure 8은 DPF의 공극률 변화에 따른 유동 균일도 및 배압의 변화를 나타내고 있다. 동일한 조건에서 공극률이 증가할수록 필터의 채널(Channel)을 통과할 때 발생하는 배기 유동 저항이 감소함과 동시에 배압이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 동시에, 공극률이 증가에 따라 유동 균일도는 하락하는 추세가 나타났다.

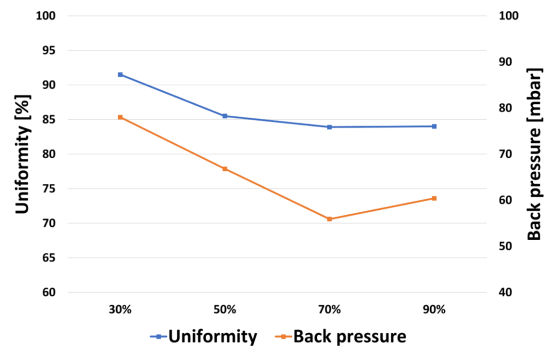


Fig. 8 Correlation between uniformity, back pressure, and filter porosity

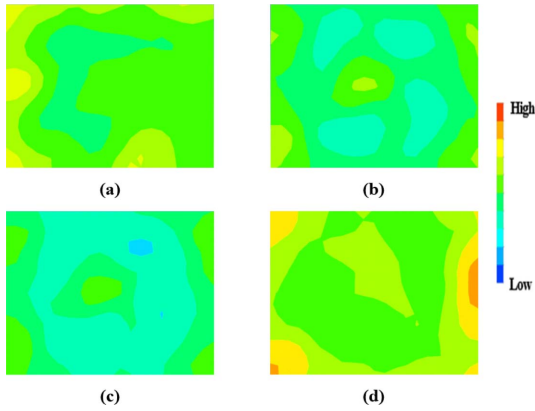


Fig. 9 NH<sub>3</sub> Distribution with filter porosity; (a) 30%, (b) 50%, (c) 70%, (d) 90%

Figure 9는 공극률에 따른 SCR 전단 암모니아 분포를 비교한 것으로, 공극률이 70%보다 크면 유동 분포 특성이 악화된다는 점이 나타났다.

공극률이 일정 수준 이상 높아졌을 경우, 유동 특성이 떨어지는 근거는 다공성 매체를 통과하는 공탑속도(Superficial Velocity, SV)와 공극률과의 관계에서 찾을 수 있다. 공탑속도는 촉매 층과 같은 다공성 매체 속을 흐르는 유체의 대략적인 평균 속도를 의미한다. 다공성 매체 내부의 유체 유동을 다룬 달시.바이스바하(Darcy-Weisbach) 방정식에서 언급되며, 공탑속도  $v$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$v = \frac{q}{\epsilon A} \tag{11}$$

즉, 공탑속도는 체적유량에 비례하고 촉매 단면적 및 공극률에 반비례하는 값으로, 공극률이 증가할수록 공탑속도는 감소하게 된다. 공극률이 증가하면 전체 단면적 중 가용 면적이 증가하기 때문에 결과적으로는 유동 면적이 증가하는 효과를 가져오기 때문이다.

이 때문에 공극률이 증가하면 유속이 감소하며, 배압 수치도 하락하나, 90%의 공극률을 넘어서면 오히려 배압은 다시 상승하는 결과가 나타났다. 이는 지나친 유속의 감소로 인해 Dead zone에서의 암모니아 정체현상이 일어났기 때문이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 대형 비상발전기용 PM/NO<sub>x</sub> 저감장치

의 유동해석을 수행하였다. 요소 수용액 분사 위치, Selective Catalytic Reduction(SCR) 확대관의 각도, 그리고 공극률에 따른 배압과 유동균일도 변화를 파악하고자 CFD 해석을 수행하였으며 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) Urea injector와 믹서 간 거리가 멀어질수록 유동 균일도는 하락한다. Urea 분사 방향을 배기 유동에 역방향으로 배치하면 배압이 상승하지만, 수직 방향으로 작용하는 정압이 증가하면서 유동 균일도가 크게 상승하게 된다.

(2) 확대관의 각도가 30° 이내일 경우, 각도가 상승하면 유속의 감소보다는 정압의 증가가 미치는 영향력이 크기 때문에 유동균일도가 상승한다. 그러나 확대관의 각도가 30°보다 크면 각도 상승에 따른 유동 박리 현상이 크게 나타나며, 유동 재순환에 따른 유동정체 현상이 심화되면서 유동균일도가 감소한다.

(3) 필터의 공극률이 높아지면 배압이 감소하지만 Dead zone을 중심으로 유동분포 특성이 악화되고, 유동 균일도가 감소한다. 공극률이 90% 이상 증가하면 Dead zone에서 유동 정체현상이 심화되면서 배압이 증가한다.

#### 후 기

본 연구는 한국환경산업기술원의 재원으로 미세먼지 사각지대 해소 및 관리 실증화 기술개발사업의 지원을 받아 수행하였으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) United States Environmental Protection Agency(EPA), "Regulations for Emissions from Heavy Equipment with Compression-Ignition (Diesel) Engines," <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-emissions-heavy-equipment-compression>, 2018.
- (2) I. Arsie, G. Cialeo, F. D'Aniello and C. Pianese, "Control Oriented Modeling of SCR Systems for Automotive Application," SAE Technical Paper, 2017-24-0121.
- (3) I. Hwang, C. Myung, S. Park, K. Lee and J. Park, "Investigation on the Flow and Spray Characteristics of Urea SCR System in Light Duty Diesel Engine to

- Improve NOx Reduction Efficiency,” KSAE 09-A0117, 2009, pp. 675~678.
- (4) S. Moon, N. Jo, S. Oh, H. Lee and T. Kim, “Research on the Prediction of the Nitrogen Oxide Reduction in the Urea-SCR System using the CFD,” Transactions of KSME, Vol. 40, No. 3, 2016, pp. 127~138.
- (5) M. Seo and H. Chang, “Computational Study on Design of the AIG for the Enhancement of Ammonia Injection in the SCR System,” Clean Technology, Vol. 18, No. 4, 2012, pp. 410~418.
- (6) 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 KSAE, Vol. 29, No. 3, 2021, pp. 275~282.
- (7) S. Kwag, “Numerical Simulation of Turbulent Flows in Inlet Duct of Heat Recovery Steam Generator,” Journal of Advanced Marine Engineering and Technology, Vol. 35, No. 6, 2011, pp. 809~813.
- (8) M. Lai, T. Lee, J. Kim, C. Cheng, P. Li and G. Chui, “Numerical and Experimental-Characterization of Automotive Catalytic Converter Internal Flows,” Journal of Fluid and Structures, Vol. 6, No. 4, 1992, pp. 451~470.
- (9) S. F. Benjamin, N. Haimad, C. A Roberts and J. Wol-  
lin, “Modelling the Flow Distribution through Auto-  
motive Catalytic Converters,” Proc. Instn. Mech. Engrs,  
Vol. 215, Part C, 2001. pp. 379~383.
- (10) H. Weltens, H. Bressler, F. Terres, H. Neumaier and D.  
Rammoser, “Optimization of Catalytic Converter Gas low  
Distribution by CFD Predictions,” 1993, SAE 930780.
- (11) ANSYS Fluent 2021 R1 Theory Guide, “The Kuhnke  
Model,” [https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?  
returnurl=/Views/Secured/corp/v211/en/flu\\_th/flu\\_th\\_sect\\_  
wall\\_film\\_impact.html%23flu\\_th\\_sect\\_wall\\_film\\_  
Kuhnke](https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v211/en/flu_th/flu_th_sect_wall_film_impact.html%23flu_th_sect_wall_film_Kuhnke), 2021.
- (12) Y. Yi, “Development of a 3D numerical model for pre-  
dicting spray, urea decomposition and mixing in SCR sys-  
tems,” SAE Technical Paper, 2007-01-3985, 930780.
- (13) C. Shin, J. Kim, M. Kim et al., “Examinations on the  
Frictional Flow Features of Porous Media by Flow  
Velocity and Porosity Variations,” Transactions of the  
KSME, Vol. 42, No. 3, 2018, pp. 207~214.
- (14) Y. Kim, S. Jeong and W. Kim, “An Numerical Study on  
the Flow Uniformity and Pressure Drop in Dual Mono-  
lith Catalytic Converter during the Rapid Acceleration /  
Deceleration Driving,” Transactions of KSAE, Vol. 15,  
No. 5, 2007, pp. 63~71.