

기상 환원제를 사용하는 선택적 환원촉매에서 유동혼합 개선에 관한 연구

고 상 철,¹ 이 범 호,^{*2} 조 승 환,² 이 상 현,² 흥 성 태,² 이 대 엽³

A STUDY ON FLOW MIXING IMPROVEMENT OF SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION USING GASEOUS REDUCTANT

S.C. Ko,¹ B.H. Lee,^{*2} S.H. Cho,² S.H. Lee,² S.T. Hong² and D.Y. Lee³

Since emission regulations for vehicles have become more stringent, SCR technology has drawn a strong attention in order to reduce NOx emissions. Optimal design of a reductant injection nozzle and a multi-hole plate located between the cone and catalyst is critical in that the uniform distribution of reductant is necessary to maximize the NOx conversion efficiency and minimize the slip of reductant in SCR. In this work, an LPG fuel(C3H8 in vapor state) was used as a reductant for LPG vehicles. A Realizable $k-\epsilon$ model is used for turbulence, and SCR body is defined as porous media with inertia and viscous resistances measured in this work. Effect of the number of nozzle holes on the flow mixing index was analyzed, which revealed that a four hole nozzle shows the best performance in terms of uniformity of flow. An installment of a multi-hole plate at the entrance of catalyst was evaluated with flow mixing index, uniformity of flow, and pressure drop. A multi-hole plate with gradual hole diameter change in three steps showed the best uniformity of flow within the conditions suggested in this work.

Key Words : 선택적 환원촉매(SCR; Selective Catalyst Reduction), 환원제(Reductant), 유동 균일도(Uniformity of Flow), 유동혼합 균일도(Flow Mixing Index)

1. 서 론

세계적으로 자동차 배출가스 규제가 강화되고 있고, 이 가운데 질소산화물(NOx)은 산성비의 원인 물질일 뿐만 아니라 대기광화학 반응에 의해 인체에 유해한 광화학 스모그 물질을 생성하는 등 대기 유해물질로서 배출량을 저감하는 것이 중요한 과제가 되어 있다. 이를 해결하기 위한 방안으로 선택적 환원촉매법(SCR: selective catalytic reduction)이 현재 가장 유효한 기술로서 실용화되고 있다[1-2].

선택적 환원촉매는 촉매 입구에서 요소(Urea), 탄화수소(Hydrocarbon)와 같은 환원제를 분사하여 이 환원제가 촉매에

서 배기가스와 환원반응을 통하여 NOx를 N₂로 전환 시켜 저감하는 것이다[3-4]. 선택적 환원촉매에서 환원제의 농도분포가 불균일하면 환원제와 촉매의 접촉면에서 화학반응 효율이 낮아지게 되고, 반면에 환원제의 농도가 높은 부분에서는 반응하고 남은 환원제가 대기로 방출되는 slip현상이 발생되어 대기환경 오염물질을 배출하게 된다[5-6]. 따라서 SCR장치에서 전환 효율을 극대화하고 환원제의 사용을 최소화하기 위한 촉매의 설계에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다. 액체 요소를 환원제로 분사하는 SCR의 최적 설계와 관련된 연구 사례[7-12]는 많고, 배기가스 정화장치 자체에서 유동 최적화와 관련 연구 사례[13]는 있지만, 기체상의 환원제를 사용하는 SCR에서 유동의 최적화 연구는 현재까지 보고된 바가 없다.

본 연구에서는 희박연소 LPG 엔진에서 연료를 환원제로 사용하는 HC-SCR에서 환원제의 농도 분포를 개선하기 위하여 환원제 분사 노즐의 형상 및 촉매 입구의 다공판 설치 효과, 그리고 이에 따른 유동속도 분포와 환원제의 농도분포에 관한 수치해석을 수행하였다. Benjamin 등[14]과 같이 선택적

접수일: 2009년 12월 30일, 심사완료일: 2010년 3월 16일,

게재확정일: 2010년 3월 19일,

1 정회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

2 인하대학교 대학원 기계공학과

3 인하대학교 기계공학과

* Corresponding author, E-mail: mechest@inha.ac.kr

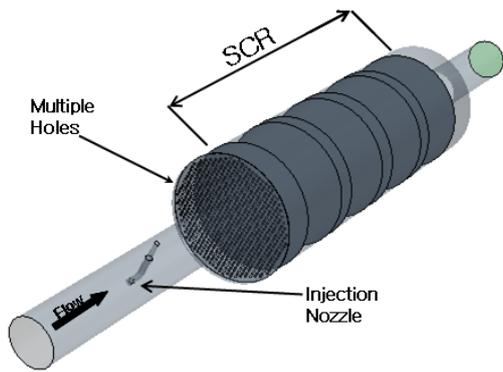


Fig. 1 A schematic of SCR

환원촉매 영역은 연속체로 모델링하였으며, 실험을 통하여 관성저항과 점성저항을 측정하였고, 이를 이용하여 다공성 매체로 표현하여 해석을 수행하였다.

본 연구의 결과는, LPG를 연료로 사용하는 상용차용 LPG 엔진에서 NOx를 저감시키기 위한 HC(LPG)-SCR의 설계에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. SCR 구성 모델

선택적 환원촉매 구조에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 배기가스의 유동 흐름에 대하여 역방향으로 디퓨저 앞부분에서 반경방향으로 환원제를 분사하는 노즐이 설치되어 있다. 디퓨저 끝부분에는 Fig. 2와 같은 다공판이 설치되어 있으며 그 다음에 선택적 환원촉매가 위치해 있다.

배기관 입구와 출구의 지름은 모두 100 mm이며, 선택적 환원촉매의 지름과 길이는 280 mm 및 135 mm로 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 4개의 선택적 환원촉매(400 cpsi 및 7.09 mil)로 이루어져 있다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 분사 노즐 홀의 갯수에 따라 4가지의 경우에 대하여 환원제의 유동 혼합 특성을 조사하였다.

촉매 입구 콘(디퓨저)의 역할은 상대적으로 작은 직경의 배기관에서 촉매의 큰 직경으로 연결해주는 기능을 한다. 배

Table 1 Comparison of Case A~E

Case	Holes diameter [mm]	Total flow area [mm ²]	Area ratio of flow passages
Case A	Without Multi-hole-plates		
Case B	5	12743	51%
Case C	7	24976	100%
Case D	5, 7	23148	93%
Case E	3, 5, 7	17631	71%

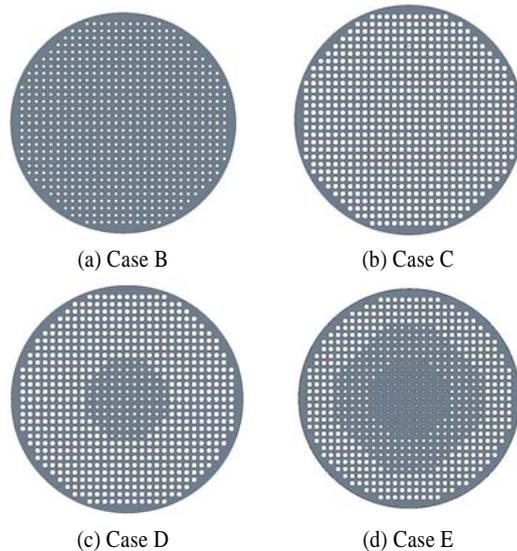


Fig. 2 Tested multi-hole plates

기관의 끝에서 촉매 내부로 제트와 같은 유동이 발생하지 않고 연속적으로 전달되어 유동의 분리(separation)가 발생하지 않도록 하는 역할을 한다. 유동 분리의 발생이 줄어들게 되면 유동에 따른 압력 저하도 줄일 수 있게 되고, 이는 엔진 성능의 향상에도 도움이 된다. Rajadurai[8]는 wiremesh로 구성된 mixer를 사용하여 35 mm 이동거리에서 uniformity index(식 (4))가 0.94에서 0.99로 높아지고, 요소의 열분해 증가에 따른 암모니아의 발생도 높일 수 있었다. 본 연구에서는 다공판을 콘과 담체의 사이에 적용하여 유동의 균일도를 높이도록 하였다. 다공판을 사용하지 않는 조건을 case A로 하고, Fig. 2 (a)~(d)에 각각 case B~E와 같은 배열의 다공판을 나타내었다. case B(a) 및 case C(b)는 홀의 크기가 균일한 경우이고, case D(c)와 case E(d)는 홀의 크기가 다양한 다공판을 적용하였고, 각각의 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

배기가스가 다공판과 선택적 환원촉매를 통과하면서 배기관에 압력(back pressure)이 증가 되며, 이는 엔진 효율 저하의 원인이 된다. 다공판의 중심 부분에서 홀 크기가 크면 속도가 높은 중심부로 많은 양의 환원제가 통과하게 되어 환원제의

Table 2 Comparison of nozzle configurations

Nozzle	Diameter (mm)	Total area of nozzle holes (mm ²)
1hole	2.5	4.91
4holes	1×4	3.14
6holes	1×6	4.71
8holes	1×8	6.28

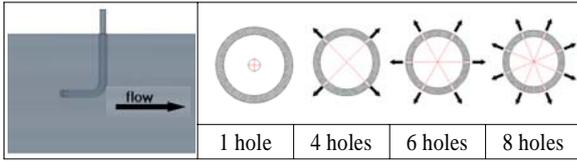


Fig. 3 Configuration of Nozzle in SCR

농도분포가 불균일하게 될 수 있는 문제점이 있다. 따라서 최적의 다공관 홀 사이즈 및 분포를 결정하는 것이 필요하다.

각 case에 대한 홀의 지름, 총 유동 면적, 반지름에 대한 홀 크기에 대한 분포 및 비율에 대한 수치는 Table 1에 나타내었다. 환원제 분사 노즐의 홀의 개수와 총 분사 단면적은 Table 2와 같다. 노즐의 형상 및 분사 방향은 Fig. 3에 나타내었다.

3. 유동해석방법

3.1 해석조건

과다한 환원제의 사용에 따른 경제성 악화를 방지하기 위하여 환원제의 분사량은 연료 소모량에 대하여 최대 5%에 해당하는 양으로 분사되며, 배기가스의 유량 및 경계조건은 Table 3에 나타내었다. 배기가스는 질소 77%, 산소 23%의 비율로 구성된 것으로 가정하였다. 선택적 환원촉매는 제올라이트(zeolite)계이며 담체(monolith)에 1차 코팅 후 귀금속으로 2차 코팅된 촉매로 673 K에서 최대 NOx 변환 효율을 나타내므로 해석모델의 촉매 입구온도 조건은 673 K로 설정하였다. Fig. 4에는 lab scale (D20 mm×L25 mm) 촉매(이후에 full scale로 제작하여 실험에 사용)의 NOx 전환효율을 나타내었고, 유사한 방식의 SCR에서도 동일한 온도 범위를 나타내었다[15].

해석 프로그램으로는 STAR-CCM+를 사용하였다[16]. 레이

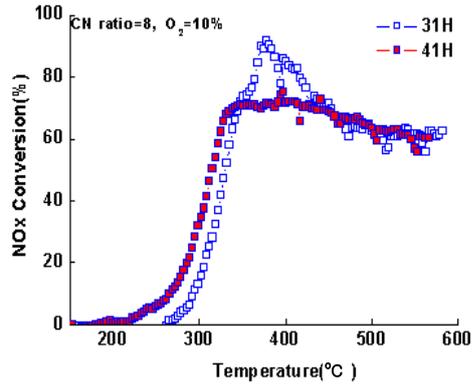


Fig. 4 NOx conversion curve for a SCR catalyst(Lab scale in D20 mm×L25 mm) used in this work

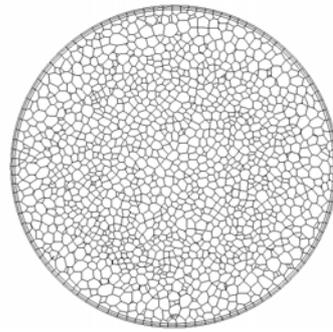


Fig. 5 Polyhedral meshes at the cross sectional area of a SCR

놀드 수는 30,000이상이며, 난류모델은 표준 *k-ε* 모델에서 난류 소산방정식을 새롭게 정리한 Realizable *k-ε* 모델을 사용하였다[17]. 계산 격자는 약 970,000개의 polyhedral mesh로 구성되었고, Fig. 5에 촉매 단면의 격자 예를 나타내었다.

Table 4에는 본 SCR이 적용된 엔진의 사양을 나타내었다. 해석에서 연료 성분은 프로판(C3H8) 100%로 가정하였고, 정상상태 유동으로 취급하였다.

Table 3 Boundary Conditions

		Boundary Condition	Value
Ambient Pressure		Pressure Output	101325 Pa
Temperature		Exhaust gas input	823 K
Wall		Wall	No-slip
Engine (rpm)	1000	Exhaust gas mass flow rate	4.74
	1400		7.56
	1800		9.10
	2200		12.01
Engine (rpm)	1000	Reductant mass flow rate	0.296
	1400		0.582
	1800		0.710
	2200		0.902

Table 4 Specifications of an engine with SCR

Type	In-line 6
Bore×Stroke	100 × 125 mm
Displacement volume	5,890 cc
Compression ratio	9.3
Fuel supply system	LPG liquefied Injection
Power	240PS/2,500 rpm
Torque	82 kg·m/1,400 rpm

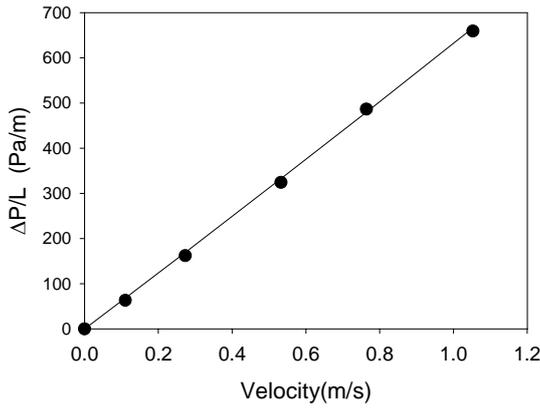


Fig. 6 Measured pressure gradient to estimate porous source term

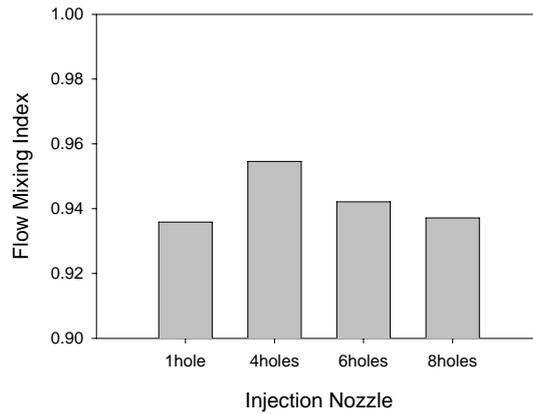


Fig. 8 Comparison of flow mixing index at the entrance of a monolith filter (without multiple holes, 1400 rpm)

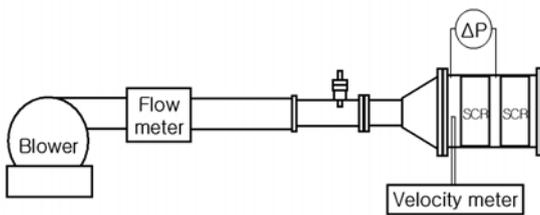


Fig. 7 A schematic of pressure drop measurement system as a function of flow velocity

3.2 다공성 매체

선택적 환원촉매의 담체(monolith)는 연속체로 모델링하였으며 다공성 매체로 정의하여 해석하였다. 다공성 매체로 정의하기 위해서 단위길이에 따른 차압을 실험을 통해 측정하였다. Fig. 6 및 Fig. 7에는 측정 결과와 엔진의 배기 유량에 해당하는 유량을 재현하기 위한 실험 장치의 개요를 각각 나타내었다. 열선유속계(Testo 445, probe 0635 6045)와 차압계(ULFA PDT-D250M)을 사용하여 유속과 차압을 각각 측정하였다. 측정 결과는 식 (1-3)에 적용하였고, Fig. 6에 식 (3)을 이용한 회귀분석을 한 결과, 관성저항 α_i 및 점성저항 β_i 의 측정 결과는 각각 16.57 kg/m^4 및 $615.46 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{s}$ 이다. 600 cpsi 및 3.5 mil의 담체의 경우, $\alpha_i=22.7 \text{ kg/m}^4$ 및 $\beta_i=573.4 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{s}$ 의 값이 보고된 예가 있다[13].

$$\frac{dP}{dx_i} = -K_i u_i \quad (1)$$

$$K_i = (\alpha_i |\bar{u}| + \beta_i) \quad (2)$$

$$\frac{dP}{dx_i} = -(\alpha_i |\bar{u}| + \beta_i) u_i \quad (3)$$

여기서 K_i 는 투과율(permeability)을 나타내며, u_i 는 공간속도(local velocity), \bar{u} 는 평균속도(average velocity), α_i 는 관성저항(inertial resistance), β_i 는 점성저항(viscous resistance)을 의미한다.

3.3 유동혼합과 유동 균일도

식 (4) 및 (5)는 SCR 단면에서 환원제의 농도분포와 속도 분포를 각각 평가하기 위한 식이다. n 은 단면에서 cell의 개수이며, w 와 \bar{w} 는 유동혼합을 각 cell에서의 질량분율(mass fraction)과 평균 질량분율(average mass fraction)을 나타낸다. 따라서 Γ 는 유동혼합 균일도(flow mixing index)를 나타내는 지수가 되고, 1일 때 단면에서 완전히 균일한 질량분율(mass fraction)을 나타내게 된다[18].

$$\Gamma = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(w_i - \bar{w})^2}}{\bar{w}} \quad (4)$$

배기가스 정화장치에서 유동의 분포를 평가하기 위한 표준 지표 가운데 하나가 균일도 지수(uniformity index)이다[19-20]. 균일도 지수(γ)는 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma = 1 - \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^n |v_i - v_{mean}| A_i}{A v_{mean}} \quad (5)$$

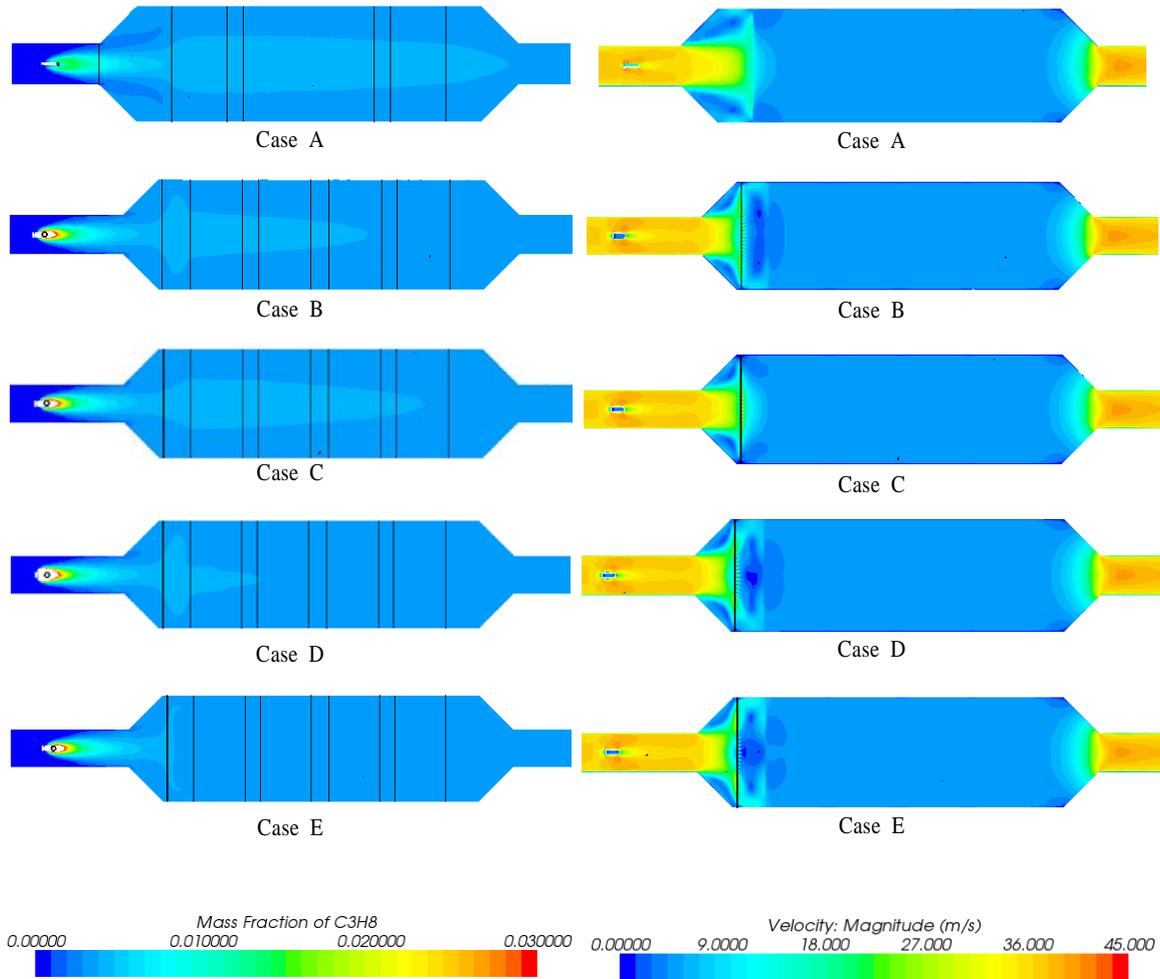


Fig. 9 Mass fraction(left) and velocity(right) contours for each Case at 1,400rpm

여기서 v_i 는 각 grid의 속도를 나타내고, A_i 는 각 grid의 단면적을 의미한다. 평균 속도 v_{mean} 은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$v_{mean} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$$

일반적으로 배기가스 정화장치 설계에는 0.9(90%) 이상의 유동균일도가 요구되는 것으로 보고된 바가 있다[13]. 또한 촉매 반응에 따른 전환 효율을 높이기 위해서는 촉매 단면에서 환원제의 농도 분포가 균일한 것이 중요하다. 따라서 식 (4) 및 식 (5)와 같은 유동혼합 균일도와 유동 균일도 지수를 사용하여 SCR에서 환원제의 공급의 효율성 여부를 평가할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

엔진의 최대 토크 영역은 1,400 rpm 부분에서 나타나며, 주행 중에 1,400 rpm~2,000 rpm 영역을 가장 많이 사용되기 때문에 이 영역에서 환원제의 유동혼합을 균일하게 만드는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 주행 중에 많이 사용하는 영역인 최대 토크 회전수인 1,400 rpm을 기준으로 노즐의 형상을 결정하였다. Fig. 8은 1,400 rpm에서 Case A(다공판이 없는 경우)에 대하여 Fig. 3에 나타낸 바와 같은 노즐의 분사 방향과 홀의 개수에 따라 유동혼합의 균일함을 나타낸 것이다. 환원제의 분사량은 82 kg·m/1,400 rpm의 조건에서 연료 소모량의 5%에 해당하는 0.582 g/s를 해석에 사용하였다.

유동혼합 균일도는 4홀 노즐에서 0.95로 가장 높기 때문에

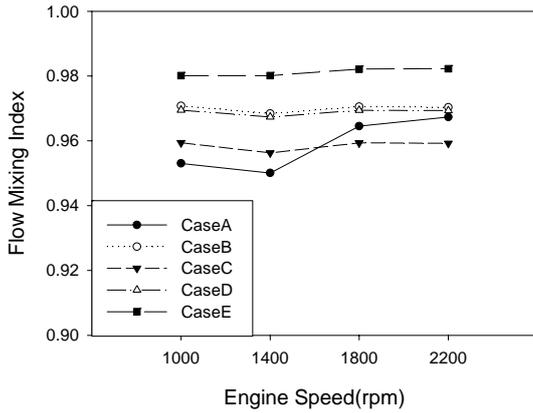


Fig. 10 Comparison of flow mixing index at the entrance of a monolith filter

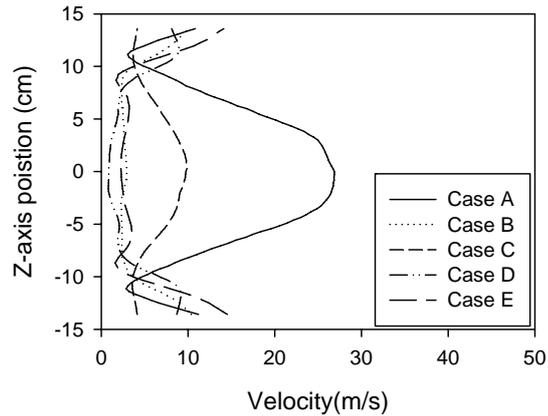


Fig. 12 Comparison of velocity profiles for each case

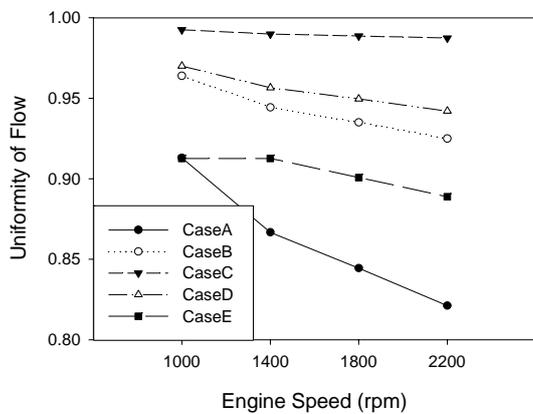


Fig. 11 Comparison of uniformity of velocity at the entrance of a monolith filter

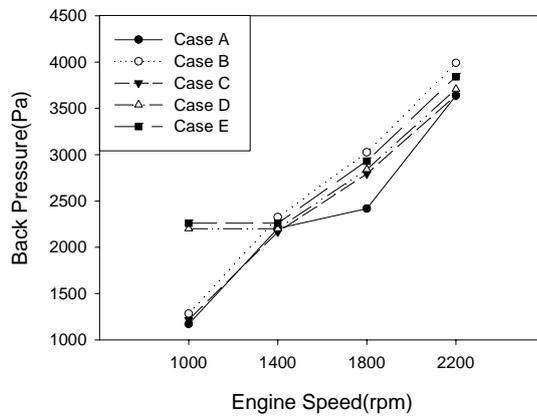


Fig. 13 Comparison of back pressures for each case

은 4홀 노즐을 기준으로 해석을 계속 수행하였다. 엔진 회전 수 1,400 rpm에서 Table 2에 열거한 다공판 조건에 해당하는 각 Case의 해석결과, 질량 분율장(mass fraction contour)과 속도장(velocity contour)은 Fig. 9와 같다. Case A는 다공판이 없는 경우이고, Case B 및 Case C는 지름 5 mm 및 7 mm의 홀로 균일하게 구성된 것이고, Case D는 중심 부분은 지름 5 mm 홀, 외각 부분은 지름 7 mm 홀로 4:6의 비(반경비)로 구성된 것이다. Case E의 중심 부분은 지름 3 mm, 외각 부분은 지름 5 mm와 지름 7 mm로 각각 4:3:3의 비(반경비)로 구성되었다.

Fig. 9의 Case A 디퓨저 부분에서 벽면에서 질량 분율이 높게 나타나고 있는데, 이것은 디퓨저의 각도와 선택적 환원 촉매의 유동저항으로 중심부분의 높은 농도가 역 유동(back flow) 현상으로 유동이 벽면 방향으로 발생되어 나타난 현상

이다. 관 중심 부분의 빠른 유속으로 인해서 벽면 부분까지 환원제와 배기가스의 혼합이 잘 이루어지고 있지 않다. 균일한 다공판을 사용하는 Case B와 Case C의 경우, 더 작은 크기의 홀을 적용한 Case B에서 더 높은 유동혼합 균일도를 나타내며, Fig. 9의 속도장에 나타난 바와 같이 다공판을 지나면서 벽면에서 더 빠른 유동속도를 나타내고 있다. 불균일한 다공판을 사용하고 있는 Case D 및 Case E의 결과를 보면, Case E에서 높은 유동혼합 균일도를 나타내며 Case D와 Case E 모두 중심보다 벽면에서 더 빠른 유동속도를 나타내고 있다.

배기가스 유량은 엔진의 속도와 부하에 따라 변화된다. 엔진의 상태에 따라서 다공판이 유동혼합 균일도, 유동 균일도 그리고 압력강하에 미치는 영향에 대해서 해석을 수행하였다 (Fig. 10). 다공판이 없는 Case A의 경우 유량이 증가 할수록 유동혼합 균일도는 증가한다.

다공판이 있는 경우에는 유량이 증가(엔진 회전수 증가)하여도 유동혼합 균일도에 변화 없이 일정하게 나타나고 있으며, Case E에서 가장 높은 수치를 나타내고 있다. Case C에 비하여 유동 통과 면적이 71%인 Case E에서 가장 높은 유동혼합 균일도를 나타내고 있다.

배기가스의 유동 균일도는 환원제와 선택적 환원촉매의 표면에서 화학반응시간에 영향을 미친다. 유동 균일도는 Fig. 11과 같이 유량이 증가할수록 감소하는 경향을 보이며, 다공판이 없는 Case A에서 1,000 rpm과 2,200 rpm의 경우를 비교했을 때, 유량이 증가함에 따라 가장 크게 감소하고 있다. 지름 7 mm로 균일한 홀의 다공판 Case C에서 가장 높은 약 0.99의 유동속도 균일도를 나타내고 있다. 각 경우에 대한 속도 분포를 나타내면 Fig. 12와 같다. 여기서 속도는 다공판과 촉매 전단의 중간 지점에서 계산된 결과를 나타낸 것이다.

선택적 환원촉매와 다공판에 의한 유동저항이 크게 되면 배기 압력이 증가하여 엔진의 출력에 영향을 미치게 되므로 압력차가 크지 않도록 선택적 환원촉매와 다공판을 설계해야 한다. Fig. 13에 나타낸 바와 같이 불균일한 다공판이 1,000 rpm에서 균일한 다공판 보다 약 800 Pa 낮게 나타나고 있다. 유량이 증가할수록 각 경우들 간에 압력차이가 줄어들고 있으며 2,200 rpm 영역에서 Case B가 가장 높은 압력강하를 나타내고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

선택적 환원촉매에서 환원제의 분포를 균일하게 하여 선택적 환원촉매의 효율 증가와 이에 따른 환원제의 대기 방출(slip)을 감소시키기 위한 연구를 수행하였다. 추가적인 오염 방지 및 환원제의 분사량을 저감시키기 위한 목적으로 환원제 분사노즐의 형상과 다공판을 설치하여 SCR 내부 유동을 변화시켜 환원제와 배기가스가 잘 혼합할 수 있도록 분사노즐의 형상과 다공판의 형상 설계를 위한 해석적 연구가 수행되었다.

1,400 rpm 및 WOT(wide open throttle) 조건에서 연료 소모량의 5%에 해당되는 환원제의 질량유량이 분사되도록 해석을 수행한 결과, 4홀 노즐에서 가장 높은 유동혼합 균일도를 나타내었다. 다공판을 적용하면 적용하지 않을 경우에 비하여 높은 유동혼합 균일도를 얻을 수 있었다. 유동 균일도는 유량이 증가할수록 불균일해지고, 다공판이 있을 때 균일하게 나타남을 알 수 있다. 배기 압력차는 유량이 적을 때(1,000 rpm) 불균일한 다공판에서 압력 강하가 높게 나타나며, 유량이 증가하면서 줄어드는 경향을 나타냈다. Case E와 같이 다양한 크기의 구멍이 단계적으로 배열된 다공판을 사용하면 유동혼합 균일도와 유동 균일도를 증가시킬 수 있으며, 유량이 증가

하면서 다공판 설치에 따른 배기압력 강하 차이가 감소하였다. 선택적 환원촉매의 가장 중요한 요소는 NOx 변환효율이며, 따라서 NOx 변환효율을 증가시키기 위해서 환원제의 유동혼합 균일도를 증가시켜야하기 때문에 본 논문의 해석결과, 4홀 노즐의 사용 및 Case E와 같은 다공판 형상이 다른 조건들에 비하여 선택적 환원촉매의 설계에서 최적의 변수임을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 인하대학교 기계공학과 BK21사업단 및 중소기업청 산학과의 지원으로 수행되었고, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- [1] 2009, Johnson, T.V., "Diesel Emission Control in Review," *SAE paper* 2009-01-0121.
- [2] 2009, Chi, J.N., "Control Challenges for Optimal NOx Conversion Efficiency from SCR Aftertreatment Systems," *SAE paper* 2009-01-0905.
- [3] 2007, Kim, K.-H., Bae, K.-J., Choi B.-K. and Hong, S.-H., "Denitrification Technology (SCR) Trend and Nanocatalyst," *KIC News*, Vol.10, No.4.
- [4] 2002, Ueda, M., Ansnno, A., Kondo, T. and Watanabe, Y., "Optimization of Diesel Engine After treatment System with a Model of Hydrocarbon Selective Catalyst Reduction (HC-SCR) and Evolutionary Programming," *SAE paper* 2002-01-0954.
- [5] 2007, Girard, J.W., Cavataio, G. and Lambert, C.K., "The Influence of Ammonia Slip Catalysts on Ammonia, N₂O and NOx Emissions for Diesel Engines," *SAE paper* 2007-01-1572.
- [6] 2008, Wang, D.Y., Yao, S., Shost, M., Yoo, J.-H., Cabush, D., Racine, D., Cloudt, R. and Willems, F., "Ammonia Sensor for Closed-Loop SCR Control," *SAE paper* 2008-01-0919.
- [7] 2007, Romzek, Z.M., "3-D Numerical Study of Flow Mixing in Front of SCR for Different Injection Systems," *SAE paper* 2007-01-1578.
- [8] 2008, Rajadurai, S., "Improved NOx Reduction Using Wiremesh Thermolysis Mixer in Urea SCR System," *SAE* 2008-01-2636.

- [9] 2006, 정수진, 이상진, 김우승, 이춘범, “대형 디젤엔진용 SCR 시스템의 암모니아 슬립 억제를 위한 인젝터의 형상 및 위치에 관한 수치적 연구,” *Transactions of KSAE*, Vol.14, No.1, pp.68-78.
- [10] 2008, 정수진, 이천환, “대형 디젤 엔진용 요소분사 SCR 촉매의 DeNOx 성능 향상을 위한 요소수용액의 분사특성 연구,” *Transactions of KSAE*, Vol.16, No.4, pp.165-172.
- [11] 2006, Birkhold, F., Meingast, U., Wassermann, P. and Deutschmann, O., "Analysis of the injection of urea water-solution for automotive SCR DeNOx-systems: Modeling of two-phase flow and spray/wall-interaction," *SAE paper* 2006-01-0643.
- [12] 2007, Yi, Y., "Development of a 3D numerical model for predicting spray, urea decomposition and mixing in SCR systems," *SAE paper* 2007-01-3985.
- [13] 2007, 안진렬, 구자형, 박종근, 김종원, “배기가스 정화장치 입·출구 형상에 따른 배압 및 유동특성에 관한 연구,” *한국자동차공학회 2007년도 춘계학술대회 논문집*, pp.81-86.
- [14] 2006, Benjamin, S.F. and Roberts, C.A., "Three-Dimensional Modelling of NOx and Particulate Traps Using CFD: A Porous Medium Approach," *Applied Mathematical Modelling* Vol.31, pp.2446-2460.
- [15] 1999, Traa, Y., Burger, B. and Weitkamp, J., "Zeolite Based Materials for the Selective Catalytic Reduction of NOx with Hydrocarbons," *Microporous and Mesoporous Materials* Vol.30, pp.3-41.
- [16] *STARCCM+ ver3.04 manual*, computational fluid dynamics.
- [17] 1995, Shih, T.-H., Liou, W.W., Shabbir, A. and Zhu, J., "A New k-ε Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows Model Development and Validation," *Computer Fluids*, Vol.24, No.3, pp.227-238.
- [18] 1993, Weltens, H., Bressler, H., Terres, F., Neumaier, H. and Rammoser, D., "Optimization of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD Prediction," *SAE paper* 930780.
- [19] 1993, Weltens, H., Bressler, H., Terres, F., Neumaier, H. and Rammoser, D., "Optimization of a catalytic converter gas flow distribution by CFD predictions," *SAE paper* 930780.
- [20] 1996, Bressler, H., Rammoser, D., Neumaier, H. and Tenes, F., "Experimental and predictive investigation of a close coupled catalytic converter with pulsating flow," *SAE paper* 960564.