

대형 디젤 엔진용 요소분사 SCR촉매의 deNOx 성능향상을 위한 요소수용액의 분사특성 연구

정수진^{*1)} · 이천환²⁾

자동차부품연구원 첨단동력/IT 종합연구센터¹⁾ · 자동차부품연구원 환경부품연구센터²⁾

A Study on the Injection Characteristics of Urea Solution to Improve deNOx Performance of Urea-SCR Catalyst in a Heavy Duty Diesel Engine

Soo-Jin Jeong^{*1)} · Chun-Hwan Lee²⁾

¹⁾Advanced Power & IT Research Center, Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjeong-ri, Pungse-myeon, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea

²⁾Environmental Parts R & D Center, Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjeong-ri, Pungse-myeon, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea

(Received 3 January 2008 / Accepted 11 February 2008)

Abstract : Urea-SCR, the selective catalytic reduction using urea as reducing agent, has been investigated for about 10 years in detail and today is a well established technique for deNOx of stationary diesel engines. In the case of the SCR-catalyst a non-uniform velocity and NH₃ profile will cause an inhomogeneous conversion of the reducing agent NH₃, resulting in a local breakthrough of NH₃ or increasing NOx emissions. Therefore, this work investigates the effect of flow and NH₃ non-uniformities on the deNOx performance and NH₃ slip in a Urea-SCR exhaust system. From the results of this study, it is found that flow and NH₃ distribution within SCR monolith is strongly related with deNOx performance of SCR catalyst. It is also found that multi-hole injector shows better NH₃ uniformity at the face of SCR monolith face than one hole injector.

Key words : Urea-SCR(요소 SCR), Diesel engine(디젤 엔진), Urea-water-solution(요소 수용액), Thermal decomposition(열해리), Injection(분무), Computational fluid dynamics(CFD; 전산유체역학)

1. 서론

비록 디젤엔진은 높은 열효율과 좋은 연비를 지니고 있지만 세계 각국의 배출물 규제는 입자상물질(PM)과 질소산화물(NOx)의 급격한 감소를 요구하고 있다. 이러한 배기법규를 만족시키기 위한 효과적인 방법 중 하나가 선택적 촉매환원법이다. 더욱이 대형디젤엔진의 배기법규는 강력한 NOx 저감법을 요구하고 있으므로 엔진의 연소개선 뿐만 아니라 후처리장치 개발이 절실히 요구되고 있다. 국

외에서의 디젤엔진용 SCR 촉매에 관한 주요 연구 항목은 배출가스의 NO:NO₂비에 따른 변환효율 예측¹⁾, 배출가스 중의 NOx 농도에 적절한 양의 요소(urea)를 공급 및 NH₃ slip 억제^{1,2)}, 배출가스 중의 산소 및 수분의 양이 NOx의 변환효율에 미치는 영향²⁾, 배출가스의 온도에 따른 변환효율의 변화³⁾등을 예측하는 것이 그 목적이었다.

Urea-SCR의 적용을 위해서는 설계 초기에 촉매 및 SCR/NH₃ 시스템의 설계와 관련된 여러 인자들의 수치해석과 더불어 유동분포, NH₃/NOx의 혼합,

*Corresponding author, E-mail: sjjeong@katech.re.kr

온도 그리고 NO_x의 농도와 같은 다른 운전조건이 고려되어야 한다.

이중에서 NH₃의 균일혼합은 특별한 NH₃ slip 제약을 만족시키면서 얻을 수 있는 최대 NO_x 변환효율에 매우 큰 영향을 미친다. 결과적으로 나쁜 혼합은 국부적으로 암모니아의 농도가 매우 높은 영역이 존재(pockets of ammonia rich)하게 한다(NH₃/NO_x>1). 따라서 이 영역에서의 NO_x는 모두 변환되었지만 반응하지 못하고 남은 여분의 NH₃은 슬립(slip)을 일으키게 된다. 이 문제는 SCR 기술을 자동차에 적용하는데 가장 큰 걸림돌이 되고 있다. 즉 공간적 제약으로 인하여 분사된 요소 수용액이 증발과 열해리를 거쳐 NH₃로 변환할 수 있는 충분한 잔류시간이 없어 SCR 모노리스 전방에 요소 수용액과 해리되지 못한 요소가 잔류하는 문제와 NH₃와 배출가스가 균일하게 혼합되지 못한다는 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근 전산유체역학기법을 활용하여 국내외적으로 다양한 연구가 진행 중이다.^{5,7,13,14)} 그러나 그 동안의 연구는 전체 SCR 시스템을 고려하지 못한 단순 배기관에서의 요소분사현상에 관한 연구¹⁴⁾이거나 3차원 유동해석 및 가시화 연구^{7,13)}가 대부분이었다. 따라서 요소분사특성이 NH₃ 슬립 및 농도분포, 그리고 SCR 촉매의 deNO_x 성능에 미치는 영향에 관한 보다 직접적인 연구가 필요하게 되었다.

본 논문에서는 7.6liter 엔진에 장착된 urea-SCR 촉매변환기를 대상으로 분사된 요소수용액의 증발, 열해리를 CFD해석 기법을 이용하여 3차원적으로 모델링하여 SCR 모노리스 내의 유속균일도 및 암모니아 분포가 deNO_x 성능에 미치는 영향과 분사구의 위치 및 개수가 모노리스 내에 분포하는 암모니아 농도의 균일도 향상에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하였다.

2. 실험방법

본 연구를 위하여 사용된 엔진은 EURO-III 7.6 liter급 시내버스용 디젤엔진이며 사용된 연료는 황함유량이 15ppm 이하의 초저유황연료를 사용하였다. 엔진동력계는 AVL사의 400kW급 AC 동력계를 사용하였으며, 배기분석계는 MEXA-7100D (Hori-

ba), Greenline 9000 (EUROTRON) 및 CLD844 (Eco-physics)를 사용하였다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 엔진과 후처리장치의 배치를 나타낸 사진이다. 요소수용액 분사를 위한 분사시스템은 분사패턴과 미립화를 양호하게 하기 위해서 air-assisted 분사방식을 채택하였다. 분사위치는 SCR 모노리스 전단으로부터 600mm 상류부분이다. 사용된 요소수용액은 요소 분말을 증류수에 33.3%(wt) 용해한 것과 DIN70070 규격에 의해 제작되어 사판되고 있는 Adblue를 사용하였다. SCR 촉매는 Zeolite이며 모노리스의 셀밀도는 400cpsi이다. 촉매의 체적은 17liter이다(10.5×12 inch).

본 연구에서는 SCR 촉매 하류에서의 NO_x의 변환효율을 측정하기 위하여 Fig. 1에서 나타낸 것과 같이 촉매에 직접 구멍을 뚫어 샘플포트를 삽입하여 측정하였다. 즉 엔진의 운전 및 환원제분사제어를 동일하게 유지시킨 상태에서 측정 푸르부(probe)를 움직여서 변환효율 분포를 얻었다.

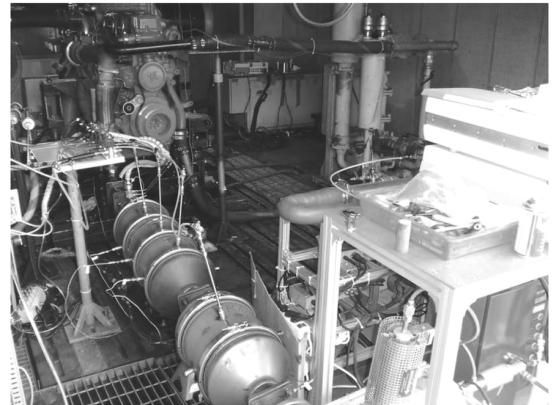


Fig. 1 Schematic diagram of Urea-SCR exhaust system

3. 수치해석

3.1 해석 방법

SCR 촉매변환기의 열,유동 해석을 위해서는 난류영역인 배기관 및 입, 출구 확대부와 모노리스 내의 층류영역을 동시에 해석하여야 하며 요소분사를 모델링해야 한다. 그러므로 본 연구에서는 해석 영역을 3가지로 분류하였다. 즉 화학반응이 일어나며 층류인 모노리스 부분과 그 밖의 자유흐름 영역 그

리고 가수분해가 일어나는 요소분사 영역이다. 본 연구에서는 모노리스 내의 층류 영역과 확대, 축소 관 및 배기관에서의 난류유동 그리고 인젝터에서 분무되는 요소수용액의 분무유동으로 구별하였으며 이를 동시에 해석하였다.^{4,5)} 기상인 배출가스의 연속상에 대한 지배 방정식은 질량보존 및 난류방정식과 연계된 운동량 보존식으로 이루어져 있으며 오일러 관점에서 해석하고, 액적의 분산상에 대한 지배방정식은 각 액적의 궤도를 추적하는 라그랑지안 관점에서 해석하는 오일러-라그랑지 방법을 사용하였다. 분무유동의 지배방정식에 대한 상세한 내용은 참고문헌^{4,5)}에 잘 설명되어 있다.

3.2 해석모델

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 7.6l 대형 디젤엔진용 SCR 시스템을 대상으로 연구를 수행하였으며 Fig. 2는 해석대상인 SCR의 격자생성 모델을 나타낸 것으로 약 660,000개의 격자를 사용하였다.

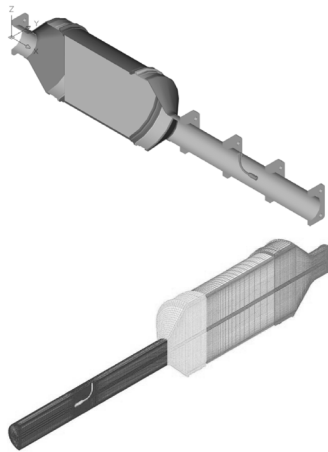


Fig. 2 3D CAD geometry and computational mesh system

3.2 요소수용액의 증발 및 열해리

Fig. 3에 나타낸 것과 같이 분사된 요소수용액 액적들은 아래 3단계를 통하여 암모니아로 변환된다.

(i) 요소수용액에서 물의 증발,



(ii) 열해리에 의한 암모니아와 HNCO(iso-cyanic acid)로의 변환,

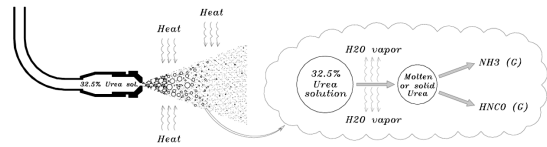
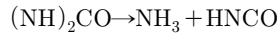
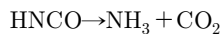


Fig. 3 Schematic of the thermal decomposition process for an injected Urea solution droplet in a hot exhaust gas stream



(iii) HNCO의 가수분해(hydrolysis)에 의한 암모니아 형성,



SCR 촉매의 NOx의 변환효율은 촉매 상류에서의 환원제인 암모니아의 공간분포와 증발율에 의해서 결정되어지기 때문에 배출가스 중의 요소 수용액 액적의 잔류시간이 충분히 확보되어야 한다.

본 연구에서는 액적 분열모델은 Pilch와 Erdman⁶⁾이 제안한 모델을 사용하였으며 액적의 벽면충돌시 액적의 거동을 예측하기 위하여 Bai가 제안한 분무 충돌모델⁸⁾을 사용하였다. 본 논문에서는 열해리 과정을 모사하기 위하여 액적은 물과 요소로 고려하였다. 본 연구에서는 Cremer et al.⁹⁾ 등과 같이 기상의 요소로부터 암모니아와 HNCO로의 반응을 매우 빠르다고 가정하여 물이 모두 증발한 시점에서 요소의 열해리는 바로 발생한다고 가정하였다. 열해리는 425K에서부터 활발히 일어나므로 배출가스의 온도가 700K 이상인 본 연구의 경우 이러한 가정은 타당하다고 생각되어진다.

배기배출가스의 밀도변화는 이상기체방정식으로부터 계산하였으며 와점성계수를 계산하기 위한 난류모델은 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 난류유동장 안에 분사되는 액적은 불규칙하게 변화하는 속도장을 경험하게 되며 관성에 따라 이에 반응하게 된다. 이러한 액적의 난류 분산효과는 확률방법⁸⁾(stochastic approach)에 의해 계산하였다. SCR 모노리스는 연속체로 모델링하여 1차원 다공성 물질로 가정하고 국부유속에 대한 단위길이 당 압력강하를 계산하였고⁴⁾ 모노리스를 통과하는 유동의 속도는 축방향으로 지배적이기 때문에 단면 방향으로의 물질 및 운동량전달은 무시하였다. 지배방정식에 대한 해를 얻기 위하여 유한체적법을 사용하는 상용

프로그램인 STAR-CD⁸⁾를 사용하였다. 지배방정식의 대류항 차분법은 2차 정도를 지니는 MARS를 사용하였으며 속도장 및 압력장의 연계를 위해 PISO 알고리즘을 사용하였다.

3.2 초기 및 경계조건

요소수용액의 분무는 배기관을 통과한 배출가스가 완전히 발달된 상태라고 가정하고 정상상태에서 얻은 속도장 및 온도장을 비정상상태 해석의 초기 조건으로 사용하였다. 요소수용액은 0.2 sec 동안 연속적으로 분무 되었으며 인젝터의 분사구 직경은 모든 경우에 대하여 2 mm로 설정하였다. 요소 SCR 시스템의 유동 및 분무해석에 사용된 운전조건, 초기 및 경계조건은 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서 사용된 air-assist 인젝터의 요소수용액의 분사압은 2 bar 이며 이때, 수용액의 질량유량은 모든 경우에 대하여 0.00183 kg/s 로 설정되었다. 배기관 및 모노리스 표면에서의 열손실은 Rich⁴⁾의 실험식을 사용하여 계산하였으며 이때 주위온도는 300K로 설정하였다. 요소수용액의 분사를 위한 다중홀에서의 분사모델, 농도분포 균일도 및 열분해 효율의 계산 등은 사용자 프로그램을 이용하였다.

Table 1 Summary of running condition

Case	Speed (RPM)	Torque (Nm)	Inlet mass flow rate (kg/h)	Inlet gas temperaute (°C)	Injection hole
1	1200	590	360	367.0	1
2	1200	590	360	367.0	4
3	1200	590	360	367.0	8
4	1600	461	512	335.0	1
5	1600	461	512	335.0	4
6	1600	461	512	335.0	8

3.3 유동혼합 균일도 및 증발효율지수

암모니아와 배출가스와의 유동 혼합 정도를 나타내기 위하여 임의의 단면에서 아래식과 같은 지수를 사용하여 유동 혼합 균일도를 나타내었다.

$$\Gamma = 1.0 - \frac{\int_{A_o} |C - C_o| dA}{2A_o C_o} \quad (1)$$

여기서, C는 단면 A를 통과하는 암모니아의 질량 농도이며 A_o는 단면적, C_o는 단면의 평균농도이다.

본 연구에서는 아래의 지표를 이용하여 각 운전 조건에 대한 요소수용액의 열분해 효율을 나타냈다.

$$\eta(t) = \frac{\sum_{i=1}^{i_{max}} m(t)_{gen}^i}{\sum_{i=1}^{i_{max}} m(t)_{cal}^i} \quad (2)$$

여기서, m(t)_{cal}ⁱ는 시간, t 까지의 배기관으로 분사된 요소수용액에서 생성될 수 있는 암모니아의 이론적 최대 생성량을 나타낸다. m(t)_{gen}ⁱ는 분사된 요소수용액에서 생성되어 인젝터의 분사구에서 모노리스 입구 사이에 존재하는 암모니아의 질량을 나타낸다.

4. 결과 및 고찰

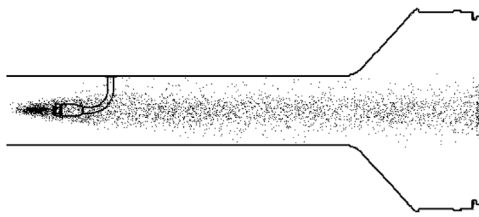
본 연구에서는 열해리된 암모니아와 배출가스와 의 3차원 공간분포가 SCR 촉매변환기의 deNOx 성능에 미치는 영향을 분석하고 모노리스 내의 균일한 암모니아 농도분포를 얻기 위하여 분사구 형상을 변경시켰다.

4.1 배기관 내의 Urea 분사의 물리적 특징

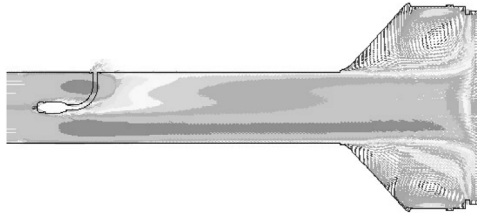
Fig. 4에 case 1의 운전조건에의 경우 중양단면에서의 요소 수용액의 액적분포, 속도분포, 암모니아의 농도분포, 수증기의 농도분포를 각각 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 인젝터에서 분사된 요소 수용액 입자들은 모노리스 중앙부를 집중 통과하고 있다. 따라서 Fig. 4(c), (d)에서 나타내었듯이 해리된 암모니아 농도는 모노리스 중앙부에 집중되어 있다. 이러한 국부적으로 높게 형성된 암모니아 농도 분포는 암모니아 슬립을 발생시키고 SCR 촉매의 deNOx 성능을 저하시키게 된다.

4.2 NH₃ 공간분포와 deNOx 성능

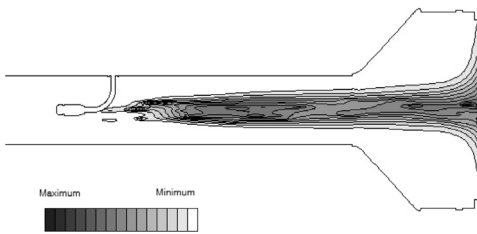
Fig. 5(a)에 case1의 경우의 실험으로 구한 SCR 모노리스 전방으로부터 4인치 하류 단면에서의 NOx의 변환효율분포를 나타내었다. 이와 모노리스 내



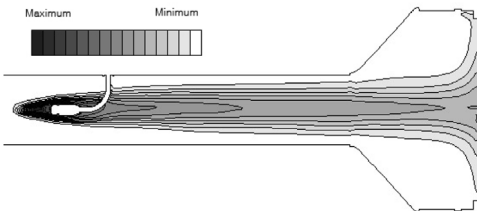
(a) Urea-water droplet distribution



(b) Exhaust gas velocity distribution



(c) Concentration distribution of NH₃

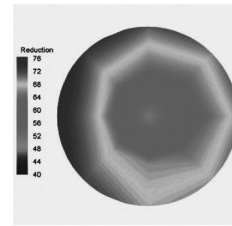


(d) Concentration distribution of water

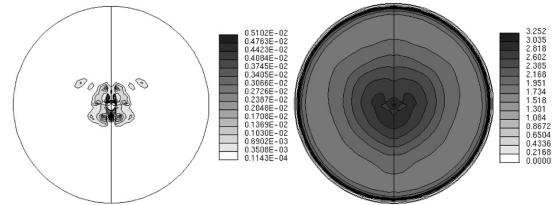
Fig. 4 Physical characteristics of Urea-SCR catalyst system

의 유속균일도 및 암모니아의 농도분포와의 상관관계를 연구하기 위하여 Fig. 5(b),(c)에 같은 위치에서의 속도 및 암모니아 농도분포를 나타내었다.

위의 그림으로부터 명확히 알 수 있는 점은 Fig. 5(b)에 나타내었듯이 암모니아의 높은 농도가 형성되어있는 모노리스 중앙부위에 가장 낮은 deNOx 성능을 보인다는 것이다. 즉 과도한 암모니아 농도의 집중은 SCR 반응을 억제하는 효과를 나타내기 때문에 이 영역에 낮은 deNOx 성능을 보이는 것이다.¹⁰⁻¹²⁾ 더욱이 이러한 암모니아 농도 집중영역에

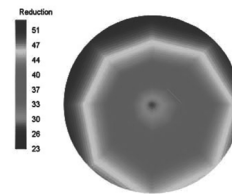


(a) Experimental result of NOx reduction rate (%)

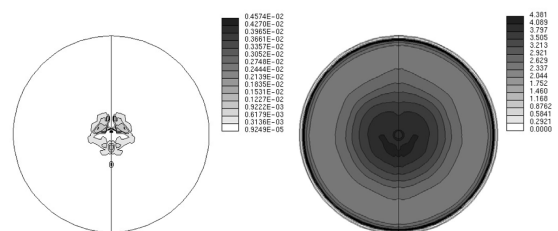


(b) NH₃ concentration (mass) (c) Velocity magnitude (m/s)

Fig. 5 The effect of NH₃ and flow distribution on deNOx performance (Case 1)



(a) Experimental result of NOx reduction rate (%)



(b) NH₃ concentration (mass) (c) Velocity magnitude (m/s)

Fig. 6 The effect of NH₃ and flow distribution on deNOx performance (Case 4)

는 암모니아 슬립이 일어나기 때문에 2차 오염이 발생하므로 열해리된 암모니아와 배출가스와의 균일한 혼합은 매우 중요한 설계인자라고 할 수 있겠다. Fig. 5(c)에 나타낸 유속분포를 보면 중앙부에 높은 유속이 집중되고 있음을 알 수 있는데 결국 분사된 요소 수용액 액적들은 이 부분으로 집중되게 되어 중앙부에 높은 암모니아 농도를 형성하게 되며 이 영역의 공간속도도 타 영역에 비해 매우 높게 형성

되게 되므로 결국 SCR 촉매의 deNOx 성능을 저하시키게 되는 것이다.

Fig. 6에 case4에 대한 결과를 나타내었다. Fig. 5와 동일한 결과를 나타내 주고 있음을 알 수 있다.

4.3 Urea 수용액의 분무 방법

정수진⁴⁾등은 요소 수용액의 분사구의 위치와 개수에 따른 공간이용률 향상효과가 SCR 촉매의 모노리스 내의 암모니아의 농도분포 및 열해리 성능에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하여 측방향 분사보다 반경방향 다중홀 분사방식이 높은 공간이용률과 SCR 모노리스 내에서 균일한 암모니아 농도 분포를 얻을 수 있음을 보고한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 동일한 운전조건에서 원주방향 등간격으로 분사홀을 4개와 8개 분포시켜 반경방향으로 분사시켜 2개의 하중조건에 대해 각 경우의 유속균일도 및 유동혼합 균일도를 나타내었다.

Fig. 7에 각 경우에 대한 암모니아의 유동혼합 균일도지수를 모노리스 앞면에서 식 (1)로 계산하여 나타내었다. 우선 유동혼합 균일도(Γ)는 배출가스의 유량이 높은 고부하 경우가 낮게 형성되어 있으며 주목할 것은 다중홀의 경우가 단일홀의 인젝터보다 모노리스 내의 암모니아의 균일도를 높일 수 있다는 것이다. 특히 같은 운전조건에서 8홀의 경우가 단일홀의 경우보다 월등히 높은 균일도 지수를 얻을 수 있었으며, 이는 유입유량이 작은 저부하 영역에서 두드러지게 나타나고 있다. 또한 분사된 액적을 분산(break-up)시킬 주흐름의 운동량이 충분하지 못한 저부하에서 다공홀의 공간이용률 향상효과가 두드러지게 나타나기 때문이다.

Fig. 8에 SCR 모노리스 입구면에서의 배출가스의 유속균일도지수(γ)⁶⁾를 각 경우에 대해서 나타내었다. 저부하 영역에서는 분사구의 개수가 증가할수록 모노리스 유입부에서의 유속균일도는 저하하고 있음을 알 수 있으나 부하가 증가하면 그 영향이 미미하다. 전반적으로 인젝터의 분사구 개수에 따른 SCR 모노리스 유입부에서의 유속균일도에 미치는 영향은 매우 미미함을 알 수 있다.

Fig. 9에 각 경우에 대한 식 (2)로 정의한 열해리 효율을 나타내었다. Fig. 7의 결과와 비교해보면 혼합

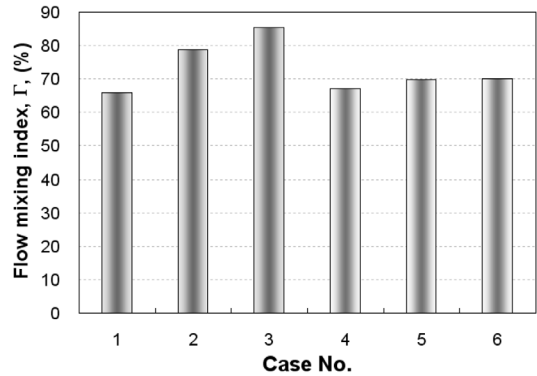


Fig. 7 NH₃ distributions within SCR exhaust system

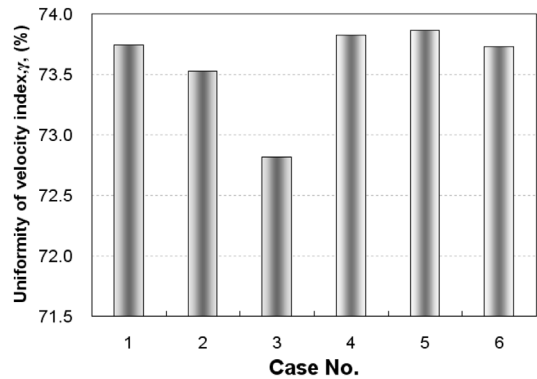


Fig. 8 Flow uniformities within SCR exhaust system

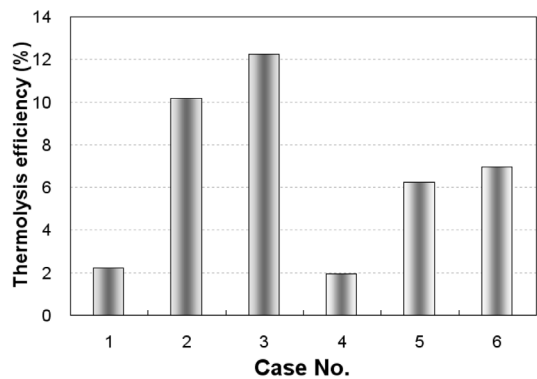


Fig. 9 Thermolysis efficiencies for various injector number of holes

유동 균일도가 높은 case3이 가장 높은 열해리 효율을 나타내고 있다. 즉 8개의 분사구를 가지며 잔류시간이 충분한 저부하의 경우에 많은 양의 암모니아가 열해리 될 수 있음을 알 수 있다. 그러나 높은 하중의 경우는 보다 짧은 잔류시간으로 인하여 낮

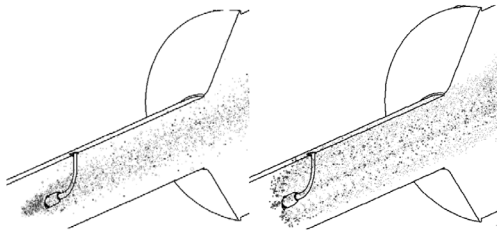


Fig. 10 Droplet propagation of urea solution: (a) axial direction one hole injection of Case 1; (b) radial direction (8 hole) injection of Case 4

은 효율을 보이고 있다. 결국, 요소수용액으로부터 암모니아로의 열해리 효율은 분사구의 개수와 분사 방향에 많은 영향을 받음을 확인할 수 있다.

Fig. 10에 단일 분사구의 경우와 8개의 분사구로 반경방향 분사하는 경우에 대한 요소 수용액 액적들의 거동을 3차원으로 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 다중 분사홀을 이용한 반경방향 분사가 배기관 내의 공간 이용율이 매우 높으며 따라서 배출가스와 열전달율이 증가하여 단일홀 축방향 분사 시보다 높은 유동 혼합균일도 및 열해리 효율을 보인다. 그러나 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 전반적으로 열해리효율이 작은 것은 분사된 액적의 잔류시간 부족으로 인한 배출가스와 액적간의 열전달량의 부족 때문이다. 이 경우 증발되지 못한 요소수용액은 상당부분이 SCR 모노리스로 유입될 가능성이 있다. 이는 NOx의 환원율을 저감시킬 위험이 있으므로 CFD를 이용한 암모니아의 공간균일도 및 증발량 등의 예측이 필수적이라 하겠다.

4. 결론

본 연구에서는 암모니아의 농도 및 유속분포가 암모니아를 환원제로 사용하는 SCR 촉매변환기의 deNOx 성능에 미치는 영향과 요소수용액의 인젝터의 분사구 개수와 분사방향이 SCR 촉매 모노리스 내의 암모니아의 농도분포 균일도에 미치는 영향을 실험 및 수치해석을 통하여 분석하였다.

1) 본 연구결과, 모노리스 내의 유속과 암모니아의 농도가 집중되는 영역에는 암모니아의 SCR 반응 억제효과 및 짧은 가스의 잔류시간으로 인하여 낮은 deNOx 성능을 보였다. 따라서 SCR 촉매

의 성능향상을 위해서는 모노리스 내의 유속균일도 및 암모니아의 균일도 확보가 필수적임을 확인하였다.

- 2) 모노리스 내의 암모니아 농도분포의 균일도 향상을 위해 다중홀을 통하여 반경방향으로 분사하는 기법을 적용하여 같은 운전조건에서 단일홀 축방향 분사 시 보다 높은 암모니아 농도균일도를 얻을 수 있었으며 그 효과는 유입 배출가스의 운동량이 작은 저하중 운전조건에서 두드러지게 나타났다.
- 3) 본 연구의 경우, 열해리 효율은 13% 미만이었다. 이는 유입가스의 온도 및 유속이 낮은 저하중 운전조건이기 때문인데 따라서 이와같이 낮은 하중의 운전조건에서 높은 열해리 효율을 얻기 위해서는 다중홀을 통한 반경방향 분사 방식이 효과적임을 확인할 수 있었다.
- 4) 향후, 본 연구에서 적용한 해석기법을 활용하여 설계초기에 엔진의 운전조건에 맞는 요소수용액의 분사기 형상 및 위치를 최적화한다면 urea-SCR 촉매 시스템의 높은 성능을 기대할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 지원하는 자동차기반기술개발사업의 핵심기반기술개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계기관에 감사사를 드립니다.

References

- 1) R. Shinozaki, Y. Takeda, H. Jyoutaki, S. Saito and A. Suzuki, "Development of Urea-SCR System for Commercial Vehicle-Basic Characteristics and Improvement of NOx Conversion at Low Load Operation," SAE 2003-01-3248, 2003.
- 2) M. D. Patil, P. Spurk, P. Floerchinger, J. Gieshoff, M. Pfeifer and C. Winkler, "Modeling of SCR deNOx Catalyst -Looking at the Impact of Substrate Attributes," SAE 2003-01-0845, 2003.

- 3) M. Ueda, A. Asano, T. Kondo, Y. Watanabe, T. Fukuma and Y. Harada, "A New Optimizing Technique of a Diesel Engine Aftertreatment System using HC deNO_x Catalyst," JSAE Review, Vol.24, pp.47-51, 2003.
- 4) S.-J. Jeong, S.-J. Lee, W.-S. Kim and C. Lee, "Simulation on the Optimum Shape and Location of Urea Injector for Urea-SCR System of Heavy-Duty Diesel Engine to Prevent NH₃ Slip," SAE 2005-01-3886, 2005.
- 5) S.-J. Jeong, S.-J. Lee, W.-S. Kim and C. Lee, "Numerical Study on the Injector Shape and Location of Urea-SCR System of Heavy-duty Diesel Engine for Preventing NH₃ Slip," Transactions of KSAE, Vol.14, No.1, pp.68-78, 2006.
- 6) H. Weltens, H. Bressler, F. Terres, H. Neumaier and D. Rammoser, "Optimisation of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD Prediction," SAE 930708, 1993.
- 7) X. Zhang, M. Romzek and C. Morgan, "3-D Numerical Study of Mixing Characteristics of NH₃ in front of SCR," SAE 2006-01-3444, 2006.
- 8) STAR-CD Ver.3.24 Manual, Computational Fluid Dynamics Ltd., 2005.
- 9) M. A. Cremer, E. Eddings, T. Martz, L. J. Muzio, Q. Quartucy, R. Hardman, J. Cox and J. Stallings, "Assessment of SNCR Performance on Large Coal-fired Utility Boilers," 1998 DOE Conference on SCR and SNCR for NO_x Control, Pittsburg, PA, 1998.
- 10) M. Koebel, M. Elsener and M. Kleemann, "Urea-SCR: a promising technique to reduce NO_x emissions from automotive diesel engines," Catalyst Today, Vol.59, pp.335-345, 2000.
- 11) H. L. Fang and H. F. M. DaCosta, "Urea thermolysis NO_x reduction with and without SCR catalysts," Applied Catalysis B: Environmental, Vol.46, pp.17-34, 2003.
- 12) Y. Qiu and L. Gao, "Blue-emitting Syanuric Acid-melamine Complexes from Urea Thermolysis," Materials Research Bulletin, Vol.40, pp.794-799, 2005.
- 13) J. Oh, J. Seo, K. Lee, J. Park, Y. Choi and J. Lee, "Visualization of Urea Mixing Characteristics by Mixer and Diffuser in SCR System," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.326-332, 2007.
- 14) J. C. Wurzenberger and R. Wanker, "Multi-Scale SCR Modeling, 1D Kinetic Analysis and 3D System Simulation," SAE 2005-01-0948, 2005.