

요소수 분무특성이 SCR시스템 내 분무균일도에 미치는 영향

김세훈* · 고진석* · 고재유* · 조영준* · 이동률†

Effect of NH₃ Uniformity Index on SCR System According to Urea Spray Characteristics

Kim Se Hun, Ko Jin Seok, Ko Jae Yu, Cho Young Jun and Lee Dong Ryul

Key Words: SCR(선택적 환원 촉매), Urea injector(요소수 분사모듈), NO_x (질소산화물), Uniformity index(분무균일도), Spray characteristics(분무 특성)

Abstract

Diesel engines have the advantages of higher thermal efficiency and lower CO₂ emissions than gasoline engines, but have the disadvantages that particulate matter (PM) and nitrogen oxides (NO_x) emissions are greater than those of gasoline engines. In particular, nitrogen oxides (NO_x) emitted from diesel engines generates secondary ultrafine dust (PM_{2.5}) through photochemical reactions in the atmosphere, which is fatal to humans. In order to reduce nitrogen oxides (NO_x), pre-treatment systems such as EGR, post-treatment systems such as LNT and Urea SCR have been actively studied. The Urea SCR consists of an injection device injecting urea agent and a catalytic device for reducing nitrogen oxides (NO_x). The nitrogen oxide (NO_x) reduction performance varies greatly depending on the urea uniformity in the exhaust pipe. In this study, spray characteristics according to the spray hole structure were confirmed, and the influence of spray uniformity on spray characteristics was studied through engine evaluation.

1. 서 론

최근 폭스바겐 디젤 게이트 이후 급격한 배기규제의 강화(실도로 규제의 조기도입 등)가 진행되면서 디젤엔진 관련 배기규제 대응 기술의 급격한 변화가 있었다. 이러한 배기규제 대응 기술은 엔진 전처리 및 후처리 적용 기술의 변화를 이끌고 있고 최근 미세먼지의 관심과 더불어 차량에서의 부가적인 모니터링 등을 요구 받고 있는 상황이다. 엔진 후처리 시스템의 변화를 살펴보면 입자상물질 저감 장치 DPF(Diesel Particulate Fil-

ter)는 필수 장착되고 있고 질소산화물 저감장치는 엔진 배기량에 따라 대응 기술이 조금씩 차이는 있지만 스캔들 이전 소형차량의 경우, DeNO_x 기술 기반의 active LNT시스템이 빠르게 SCR 시스템으로 변경되고 있다. 이에 중대형차 중심의 SCR 기반 부품들의 수요가 소형으로 급격히 확대되면서 시장의 요구가 커지고 있는 상황이다⁽¹⁻³⁾.

SCR 시스템은 요소수 분사모듈 및 펌프, 제어기(DCU : Dosing control unit), 혼합기(mixer), 촉매로 이루어진 후처리 시스템이다. SCR시스템에서 요소수 용액은 분사모듈을 통해 배기관 내 고온의 배기가스에 분사된 후 열분해 (thermal decomposition)를 통해 암모니아 가스로 전환되어 질소산화물(NO_x)을 질소와 물로 환원시킨다. SCR시스템 내에서 분사된 요소수 용액의 열해리, 증발 시간의 부족 등에 의한 분무 균일도 감소는 암모니아 슬립(ammonia slip)과 관련 문제점을 가지고 있다.

(Received: 11 Oct 2019, Received in revised form: 29 Nov 2019, Accepted: 2 Dec 2019)

*현대케피코 기술연구소

†책임저자, 회원, 현대케피코 기술연구소

E-mail : SeHun.Kim@kefco.co.kr

TEL : (031)450-8875 FAX : (031)450-9436

이러한 문제점은 SCR 촉매 전단에서 분사된 요소수 분무 특성이 혼합기(mixer)와 최적화되지 않아 분무 균질도가 악화되어 결국 SCR시스템 질소산화물 저감 성능에 악영향을 미친다⁽⁴⁻⁷⁾.

따라서 본 연구에서는 요소수 분사모듈의 분사홀구조에 따른 분무 특성을 상용 해석 SW인 Converge 2.4.16을 이용하여 분석하고 각각의 분사홀 구조가 적용된 제품을 제작하여 미립화 특성 및 분무 거시적 거동을 측정하여 해석값과 비교한다. 최종적으로SCR시스템이 장착된 실제 양산 엔진에 적용하여 분사홀 구조에 따른 분무 특성이 배기관 내 요소수 분무 균일도에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

2. 본 론

2.1 인젝터 분사홀 구조

분무 특성이 SCR시스템 내 분무 균일도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 당사에서 개발중인 인젝터에 SHP (spray hole plate), MOP (multi orifice plate) 각각 적용하여 기본적인 분무 특성 및 실제 엔진 대상으로 분무 균일도를 분석하였다. SHP (spray hole plate), MOP (multi orifice plate)의 사양은 Table 1과 같다.

2.2 수치 해석

요소수 인젝터의 분무 특성인 분무 거동을 모사하기 위해 상용 소프트웨어인 Converge를 사용하였다. 해석에 사용된 요소수의 물성치는 소프트웨어에서 제공하는

Table 1 SHP, MOP spray hole structure

SHP spray hole structure	
	Labels: spray hole, valve seat, SHP (t=0.2mm)
MOP spray hole structure	
	Labels: spray hole, valve seat, MOP (t=0.1mm), Support plate

Table 2 CAE & Test condition for spray characteristics

	해석 조건	가시화 측정	미립화 측정
분사압력	5 bar	5 bar	5 bar
통전시간	5 ms	5 ms	5 ms
시험유	aus 32.5 물성사용	aus 32.5	aus 32.5
주변온도 / 압력	상온 / 대기압	상온 / 대기압	상온 / 대기압
측정위치	-	-	20~100 mm (20 mm간격)

molten solid urea 접근법을 사용하였다. liquid spray parcel size는 시험에서 측정된 PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer) 결과를 이용하여droplet사이즈를 cumulative volume fraction으로 환산하여 입력 조건으로 사용하였으며, 요소수 액적의 상호작용은 고려하지 않았으며 spray 해석에는 모델로는 taylor analogy breakup (TAB)을 사용하였다. 본 해석을 위한 조건은 Table 2와 같다.

2.3 실험 장치 및 방법

요소수 인젝터의 분무 특성인 분무 거동 측정을 위하여 Fig. 1과 같이 고속카메라(photron, fastcam)와 메탈 할라이드 램프로 가시화 장치를 구성하였다.

인젝터에서 분사되는 요소수 액적의 미립화 수준을 측정하기 위하여 Fig. 2와 같이 위상 도플러 입자 분석

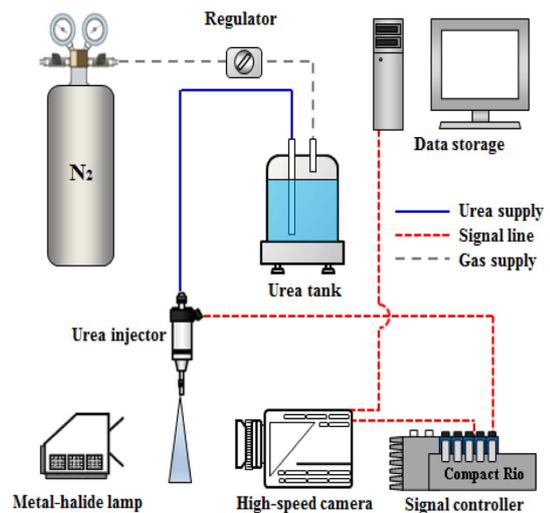


Fig. 1 Schematic diagram for spray visualization test

기 (phase doppler particle analyzer)를 구성하였다. 제어 모듈(NI, compact rio)구성하여 계산된 신호를 요소수 인젝터에 전달하여 일정한 분사 시간 동안 정밀한 요소수를 분사하도록 제어하고 고속 카메라, PDPA 장비를 동기화하여 분무 특성을 측정하였다.

분무 가시화 및 미립화 측정을 위하여 실제 차량에 사용중인 요소수 용액 (aus 32.5)를 적용하였다. 분사홀 구조 및 분사 압력을 변수로 정하여 실험을 수행하였으

며 상세한 실험 조건은 Table 2와 같다.

SHP 및 MOP분사홀 구조에 따른 분무 균일도 평가를 위하여 Fig. 3과 같이 디젤 엔진 및 배기가스 측정기를 구성하였다. 대상 엔진 제원은 Table 3과 같다. 요소수 분무 균일도 평가를 위하여 엔진 조건은 Table 4와 같이 중부하 영역과 고부하 영역으로 구분하여 진행하였다.

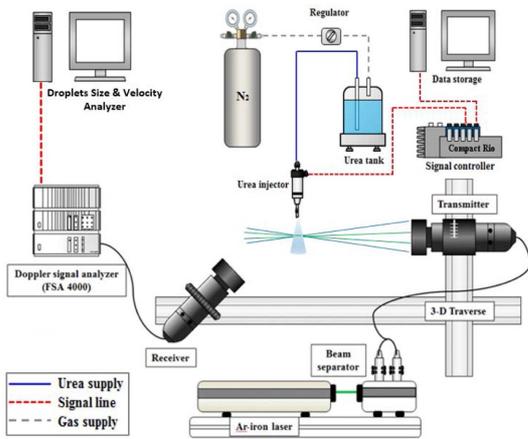


Fig. 2 Schematic diagram for spray droplet test

Table 3 Engine specifications for uniformity index test

항목	내용
Displacement	1,998 cc
Cylinder No.	4
Type	Turbo diesel (VGT)
Max. power (ps/rpm)	181 / 4,000
Max. speed (rpm)	4,600
Max. torque (Nm/rpm)	360 / 2,000~3,000
Emission certification	euro5
Mixer type	

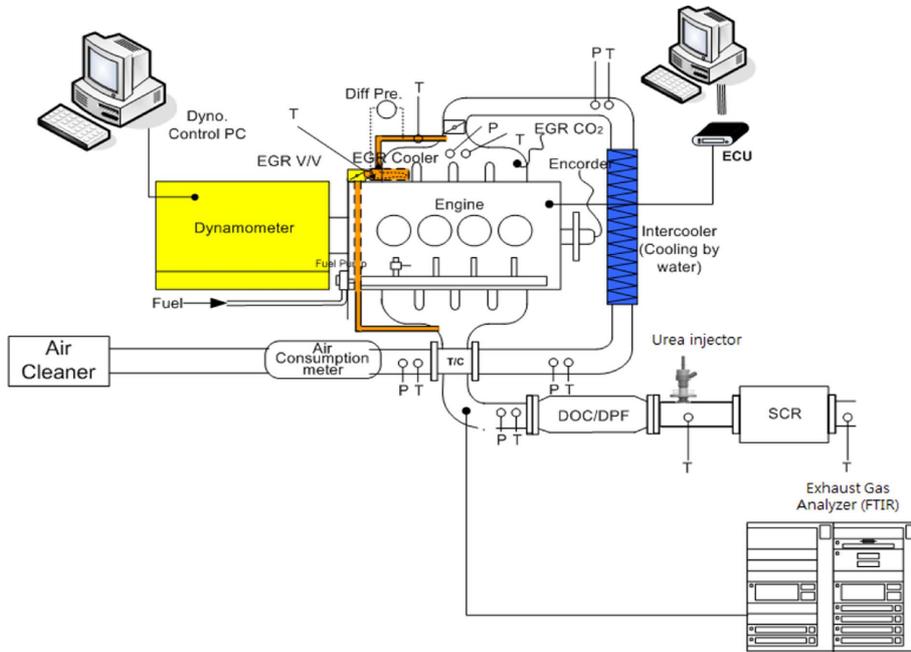


Fig. 3 Schematic diagram for uniformity index test

Table 4 Test condition for uniformity index characteristics

Engine operating points (EOP)	EOP #1	EOP #2
Engine speed	2,000 rpm	3,000 rpm
Exhaust mass flow rate	248 kg/h	486 kg/h
SCR inlet temperature	345°C	340°C
Measuring point on exhaust pipe		

분무 균일도는 식 (1)과 같이 각 포인트에서의 측정된 촉매 전·후단 질소산화물의 농도 차이로 분무 균일도를 나타낸다. 촉매 전단의 질소산화물 농도는 NOx센서에서 취득한 값이고 후단 질소산화물 농도는 배기분석기로 취득한 값이다.

$$Uniformity = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(C_i - C_{avg.})^2}}{C_{avg.}} \quad (1)$$

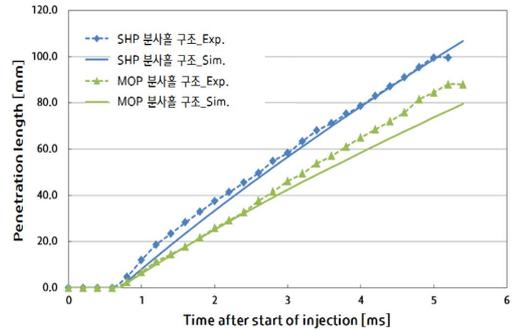
- C_i : 해당 포인트의 질소산화물 농도
- C_{avg.} : 19개 포인트의 질소산화물 평균 농도
- n : 원형 영역 넘버

3. 결과 및 고찰

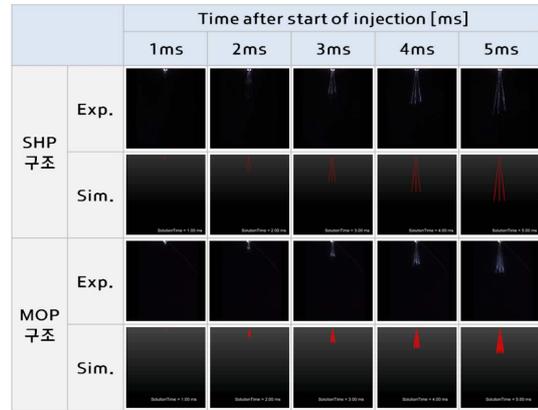
3.1 분무 특성

먼저 분사홀 구조에 따른 분무 특성을 확인하기 위하여 수치 해석으로 진행하였으며, 실제 분무 거동 평가 결과와 비교 분석하였다. Fig. 4와 같이 각 SHP구조와 MOP 구조의 분무 도달 거리 및 분무 거동은 해석값과 실험값의 경향성은 유사 하였다. Fig. 6과 같이 MOP구조가 적용된 인젝터의 분사된 분무 입경은 SHP 구조가 적용된 인젝터에서 분사되는 것보다 더욱 작은 크기를 나타낸다.

이는 분사홀 직경과 분사홀 길이의 비인 L/D가 작은 MOP 분사홀 구조에서 분사홀 내부 유동의 난류가 더욱 강하게 형성되어 분사되는 액적의 입경이 작아 미립화가 활성화 되고 L/D가 큰 SHP 분사홀 구조에서 분사홀 내부유동이 잘 발달하여 분사되는 액적의 입경이 상대적으로 커 미립화는 다소 감소한다.



(a) Spray tip penetration



(b) Spray behavior

Fig. 4 Test result of spray characteristics (Exp., Sim.)

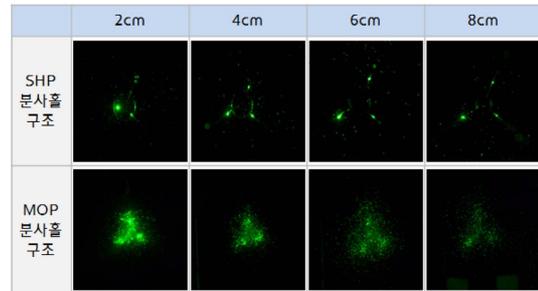


Fig. 5 Spray section image on horizontal axis

이와 같이 분사홀 구조에 따른 분무 미립화 성능은 Fig. 4, Fig. 5와 같이 분무 거동에 영향을 미친다. MOP 분사홀 구조에서 분사되는 액적의 입경이 작아 운동량의 크기는 작아지며 주변 공기의 항력에 의해 충분히 분무가 발달하지 못하여 분무도달거리가 짧아지고 분무 단면에서의 액적 분포는 고르게 나타난다. SHP 분사홀 구조에서 분사되는 액적의 입경은 상대적으로 커 주변 항력을 극복할 수 있는 충분한 운동량을 가지고 있으며

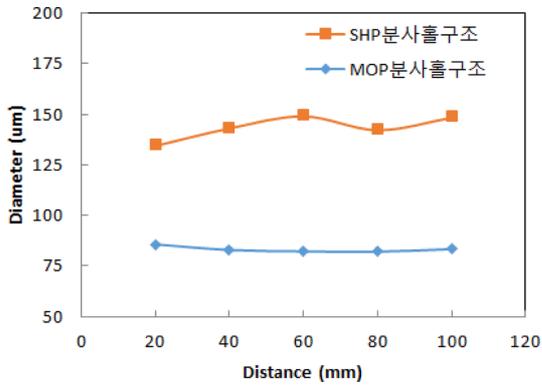


Fig. 6 Test result of spray atomization

이로 인해 분무 도달 거리가 길어지고 분무 단면에서 액적 분포는 낮게 나타난다.

3.2 분무 균일도 및 NOx 전환 성능

Figure 7은 특정 분사조건으로 배기관 내부에 요소수를 분사 후 혼합기(mixer)를 지나 촉매 후단에서 측정된 19포인트에서 전환된 질소산화물 농도 변화의 분포를 나타낸 것이다. 엔진 연소 후 배출되는 배기가스 유량이 증가할수록 인젝터에서 분사된 요소수는 분사홀 구조에

따른 분무 특성과 상관없이 내부 유동에 의해 1차 혼합이 원활히 이루어지며, 2차적으로 혼합기(mixer)에 의해 요소수는 더욱 균일하게 분포된 상태로 SCR촉매에 도달하게 되어 질소산화물의 농도 분포가 균일하게 나타나게 된다.

배기가스 유량이 작은 영역에서는 인젝터에서 분사되는 분무 거동 및 미립화 특성이 혼합기 (mixer) 전단인 1차 혼합영역에서 요소수 혼합에 영향을 미쳐 결국 혼합기(mixer)에 의한 2차 혼합에 추가적인 영향을 미친다. SHP분사홀 구조에서 분사되는 요소수는 액적의 크기가 크고 운동량이 높은 수준으로 낮은 유량의 배기가스가 유입될 시 분사구 주변 유동에 의해 액적 분열이 감소하여 1차 혼합이 잘 이루어 지지 않은 상태로 혼합기 (mixer) 전단에 도달하여 2차 혼합이 원활히 발생하지 않는다. MOP 분사홀 구조에서 분사되는 요소수는 액적의 크기가 작고 운동량이 낮아 분사구 주변 1차 혼합영역에서 배기 유동 흐름에 쉽게 혼합되어 배기관 내 고르게 분포된 상태로 혼합기(mixer)에 도달하여 2차 혼합이 더욱 원활히 진행되어 요소수 분무 균일도가 높아지는 경향이 있다.

Figure 8은 각 온도 및 배기가스 유량상태에서 분사홀 구조에 따른 질소산화물 전환율을 나타낸 것이다. 식

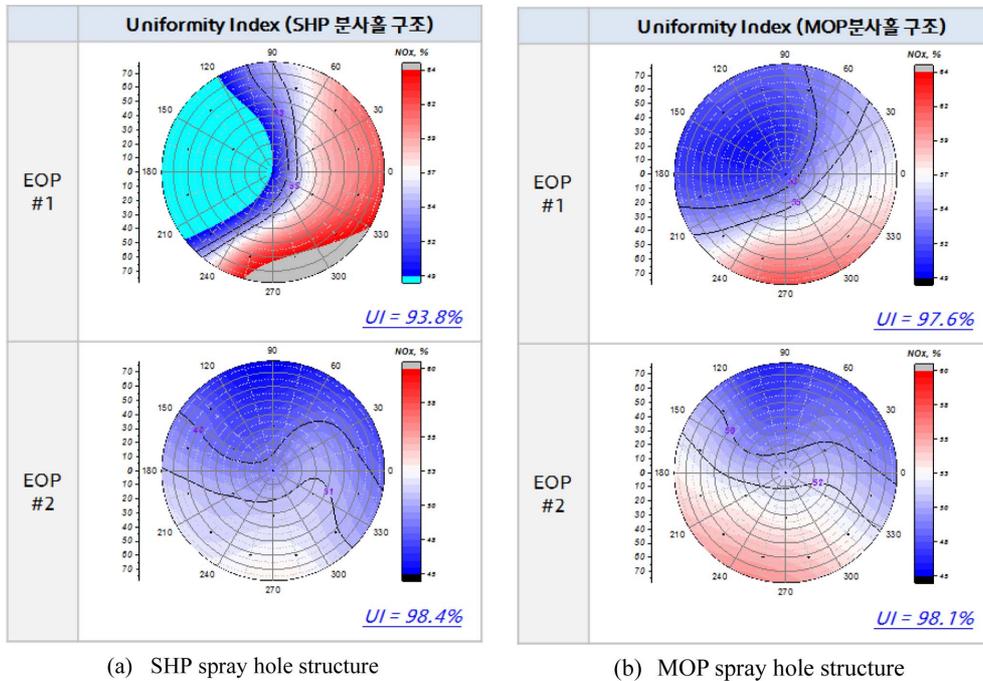


Fig. 7 Test result of uniformity index

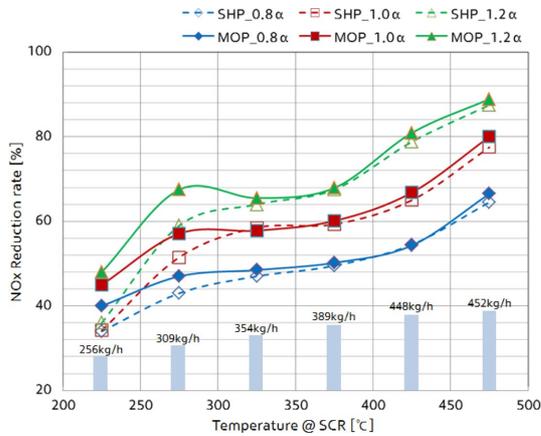


Fig. 8 Test result of NOx reduction ratio

(2)에서 α(alpha)는 배출되는 질소산화물과 분사되는 요소수량을 비율로 나타낸 것으로 1.0은 stoichiometric ratio 상태이다.

$$\alpha = \frac{\text{Urea injection quantity [g]}}{\text{NOx emission quantity [g]}} \quad (2)$$

질소산화물 저감을 위한 환원 반응은 배기가스의 온도가 증가할수록 촉매 반응이 더욱 활성화되어 저감 성능이 향상된다. 또한 동일 배기가스 유량 및 배기가스 온도 조건에서는 요소수 분사량이 많을 수록 촉매에 흡장되는 요소수 비율이 증가하여 질소산화물의 전환율이 더욱 높아진다. SHP분사홀 구조가 적용된 경우, 배기가스 유량이 적은 영역에서는 감소된 분무 미립화 특성으로 인해 분무 균일도가 감소하여 질소산화물의 저감이 낮아지는 경향이 있다. 배기유량이 차츰 증가함에 따라 내부 유동이 강하게 되어 분사홀 구조와 상관없이 촉매 전단에서 요소수가 균일한 상태로 촉매에 유입되어 동등한 수준의 질소산화물 저감성능을 나타낸다.

4. 결 론

분사홀 구조에 따른 분무 거동 및 분무 미립화에 미치는 영향성을 파악하였으며, SCR시스템이 장착되어 있는 엔진 대상으로 배기관 내 분사된 요소수의 분무 균일도 및 질소산화물 저감성능을 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 분사홀 길이가 짧은 MOP 분사홀 구조는 내부난류유동이 강하게 형성되어 액적의 미립화를 증진시키는 반면 액적의 운동량은 감소되어 분무 도달 거리가 상대

적으로 짧았다.

(2) 분사홀 길이가 상대적으로 긴 SHP 분사홀 구조는 내부 유동발달이 안정화되어 액적의 미립화가 감소되어 액적의 크기는 상대적으로 커져 운동량이 증가하여 분무 도달 거리가 상대적으로 길었다.

(3) 배기유량이 많은 경우는 분사홀 구조에 따른 분무 특성과 상관없이 배기관 내부 전체 영역에서 배기 유동이 강하여 요소수 용액은 배기관 내 고르게 분포되며 혼합기 (mixer)에 의한 2차 혼합으로 분무 균일도가 높은 수준으로 유지된다.

(4) 배기유량이 상대적으로 적은 영역에서는 분무 특성이 분무 균일도에 영향을 미친다. 특히, MOP가 적용된 인젝터에서 분사되는 요소수 액적은 작고 운동량이 낮아 분사 초기부터 주변 배기 유동에 의해 잘 혼합된 상태로 혼합기(mixer)에 도달하여 분무 균일도가 상대적으로 높게 확인되었다.

(5) MOP분사홀 구조가 적용된 인젝터는 배기 유량이 낮은 영역에서도 높은 분무 균일도를 나타내었으며 이는 실제 SCR 시스템이 적용된 엔진에서 질소산화물이 더욱 많이 저감되는 우수한 성능을 나타내었다.

(6) MOP 분사홀 구조가 적용된 요소수 인젝터가 전체 엔진 운전 영역에서 분무 균일도가 우수하고 이는 질소산화물 저감 성능을 향상시켰다.

참고문헌

- (1) J. T. Oh, J. T. Seo Oh, J. W. Seo, K. I. Lee, J. I. Park, Y. H. Choi and J. H. Lee, "Visualization of Urea Mixing Characteristics by Mixer and Diffuser in SCR system", KSAE 2007.
- (2) J. H. Choi, Y. S. Choi, I. E. Cho and S. W. Lee, "A Study on the distribution of injected urea into exhaust pipe in the SCR system", KSAE 2007.
- (3) J. M. Oh, K. H. Lee and J. H. Lee, "A study on the optimal injection conditions for an HC-LNT catalyst system with a 12-hole type injector", Journal of Thermal Science and Technology, Vol. 3, No. 2, pp. 278~291
- (4) J. Gieshoff, A. Schäfer-Sindlinger, P. C. Spurk, J. A. A. van den Tillaart and G. Garr., "Improved SCR Systems for Heavy Duty Applications", SAE 2000-01-0189, 2000.
- (5) M. Rice, J. Kramer, K. Mueller-Haas and R. Mueller, "Innovative Substrate Technology for High Performance Heavy Duty Truck SCR Catalyst Systems", SAE 2007-01-1577, 2007.

(6) E. Ottaviani, E. Jean, H. Albert and B. Amon, "Dual Line Exhaust Design Optimisation to Maximize SCR Catalyst Efficiency thru Improved Ammonia Distribution", SAE 2009-01-0914, 2009.

(7) J. C. Wurzenberger, "Multi-scale SCR Modeling, 1D Kinetic Analysis and 3D System Simulation", SAE 2005-01-0948, 2005.