

Urea 수용액 분사용 인젝터의 분무 특성과 배기관내 분무 거동 특성

오정모* · 한영덕* · 김기범** · 이기형*†

* 한양대학교 기계공학과

The Spray Characteristics and Spray Behavior Characteristic in Exhaust Gas Flow of Urea Solution Injector

Jungmo Oh*, Youngdeok Han*, Kibum Kim* and Kihyung Lee*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received June 30, 2010 ; Revised September 9, 2010 ; Accepted September 10, 2010)

Key Words: Urea Solution(요소수용액), Diesel Engine(디젤 엔진), Sauter Mean Diameter(SMD 평균 입경), After-Treatment(후처리 기술), Root Mean Square Image(RMS Image 평균 화상)

초록: 디젤 엔진은 가솔린 엔진에 비해 열효율이 높고 이산화탄소 배출량이 적다. 그러나 입자상물질(PM)과 질소산화물(NOx)의 배출량이 가솔린 엔진보다 많은 단점을 가지고 있다. 디젤 엔진의 연소 배출물 중 질소 산화물을 저감시키기 위하여 LNT와 Urea-SCR과 같은 후처리 시스템이 최근 활발히 연구되고 있다. Urea-SCR은 Urea 수용액을 공급하기 위한 2차 분사 시스템이 필요하고, 분사된 Urea 수용액의 분무 거동 특성과 균일도에 따라서 촉매의 효율이 크게 달라진다. 본 연구에서는 배기관내 분사된 Urea 수용액의 분무균일도를 향상시키기 위하여 인젝터의 기초 분무 특성을 파악하였고, 모사배기관 시스템과 가시화 장비를 이용하여 배기관내에서의 분무 거동 특성을 파악하였다.

Abstract: Recently, many technologies have been developed in order to satisfy stringent emission regulations. However, in the case of diesel engines, the stringent emission regulations with respect to NOx and PM have not yet been satisfied. A dramatic reduction in the NOx and PM emissions could be achieved by using after-treatment systems such as lean NOx trap (LNT) and urea-SCR systems. However, the high temperature in the exhaust pipe affects the spray behavior of the secondary injector, which is used for supplying the Urea-SCR. Because of this high temperature, it is difficult to achieve uniform distribution of the reducing agent in the manifold. In this paper, the characteristics of a urea-SCR injector used for injecting in the exhaust pipe are presented. The purpose of this study was to investigate the spray characteristics of the injector, such as the spray angle, injection quantity, and SMD. In addition, laser diagnostics and high-speed-camera images were used to analyze the injector spray characteristics and to present a distribution of reduction in the transparent manifold.

1. 서론

디젤엔진은 기본적으로 가솔린엔진보다 높은 압축비에서 운전이 가능하고 희박영역에서 운전되기 때문에 열효율과 연료소비율 면에서 우수하다.⁽¹⁾ 이러한 장점 때문에 디젤 차량의 수요가 급격히 증가하고 있으나, 디젤 엔진에서 발생하는 입자상물질(Particulate matter) 및 질소산화물(NOx) 등은 인체에 심각한 영향을 미치기 때문에 전 세계적으로 배기규제가 강화 되고 있는 실정이다.

나날이 강화되어가는 배기규제를 만족하기 위해서 다양한 기술이 국내뿐만 아니라 전 세계적으로 연구되고 있고, 일부기술은 실제로 상용화 단계에 까지 이르렀다.⁽²⁾

이런 PM과 NOx를 저감시키는 방법에는 크게 두 가지가 있는데, 하나는 연소개선을 통한 방법으로 HCCI와 PCCI 등을 적용하는 방법이 연구되고 있다. 그러나 이 방법으로는 출력 악화라는 단점이 있고 서로 Trade-Off 관계인 PM과 NOx를 배기규제 만족기준까지 저감시키기에는 그 한계가 있다. 또 다른 하나는 후처리 기술로 LNT, HC-SCR, Urea-SCR등 다양한 기술들이 개발 중에

† Corresponding Author, hylee@hanyang.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

있고, 이러한 후처리 시스템 중 Urea-SCR은 높은 NOx 정화 효율로 실제 상용 디젤엔진에 적용되고 있는 실정이며, 승용 디젤엔진에 적용하기 위하여 지속적으로 연구가 진행되고 있다.^(3~5)

Urea-SCR은 Urea 수용액을 공급하기 위한 2차 분사 시스템이 필요하고, 분사된 Urea 수용액의 분무 거동 특성과 균일도에 따라서 촉매의 효율이 크게 달라진다.

본 연구에서는 Urea-SCR용 인젝터를 이용하여 실제 대기분무 실험을 통해 그 분무특성을 알아 보았고, 이를 실제 배기관을 모사한 모사배기관 내에 적용하여 엔진의 운전 조건에 따른 분사된 Urea 수용액의 분무 거동 특성을 파악하였다.

2. 실험 장치 및 실험 조건

2.1 대기 분무 특성 측정

인젝터의 대기 분무 특성을 파악하기 위하여 분무 가시화 시스템을 Fig. 1과 같이 구성하였다. 광원으로는 백색 특성 및 출력 변동 성능이 적은 Xenon 램프(Xenon)를 이용하였고, 반사판을 이용한 간접 조명 방식으로 분무 화상을 고속카메라(Phantom 7.0)를 이용하여 취득하였다. 또한, 펄스 발생기(BNC, Model 555 Pulse/delay generator)를 이용하여 인젝터 드라이버에 인가되는 신호를 제어하여 분사 시기와 분사 기간을 제어하였고, 동시에 고속카메라의 트리거 신호를 동기화시켰다.

본 연구에 사용한 인젝터는 Table 1과 같다. 액체를 가압하여 작은 오리피스 구멍을 통과하면서

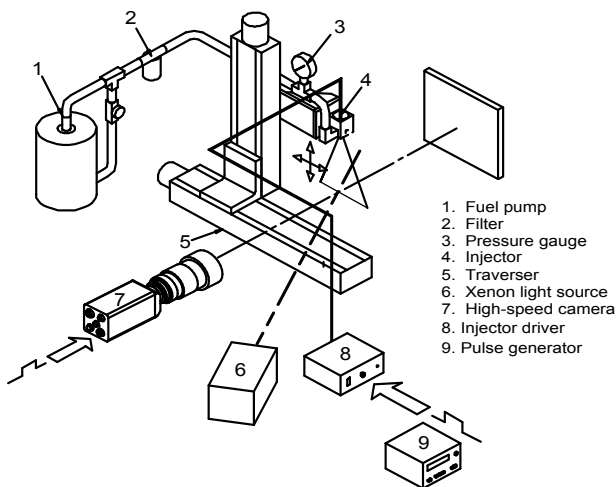


Fig. 1 Experimental setup for spray visualization system

미립화되는 Jet-spray type의 3-hole prototype injector이며, 운행차량에 가장 많이 사용하는 32.5% Urea 수용액을 이용하였다. 대기분무 실험에서 분위기 조건은 대기압과 상온이고, 단일 분사 시켰을 때 고속 카메라를 이용하여 10,000fps로 분무 이미지를 취득하였다.

2.2 분무 평균 입경 측정

환원제의 미립화와 증발 특성이 촉매의 성능에 미치는 주요한 인자라고 판단되므로 인젝터의 미립화 성능을 대표하는 분무 평균 입경을 측정하였다.

Fig. 2는 분무 평균 입경 측정에 사용된 Malvern사의 입도 분석 장치(Mastersizer S)의 개략도를 나타낸 그림이다. 입경 측정에 사용된 수광부 렌즈는 초점거리가 300mm이며, 측정 지점과의 거리를 200mm 이내로 하였다. 또한, 정상 분무상태에서 분무 입경을 측정하기 위하여 광염폐율(Obscuration ratio)이 5%이상일 때를 기준으로 측정하였다. 본 연구에 사용한 인젝터의 특성상 단발 분사의 경우 정상 분무상태에서 분포 액적의 수가 매우 적어서, 분사 조건을 대기압, 상온에서 duration=16ms, frequency=30Hz로 20회 분사하였다. 측정 오차를 줄이기 위해서 각 측정점에서 광염폐율(Obscuration ratio)이 5%이상 일 때 1000개의 입자가 샘플링 될 때까지 20회 분사한 것이며, 총 분무기간 320ms에 대하여 약 667ms의 측정시간 동안 평균 입경을 측정하였다.

Fig. 3은 액적의 분무 평균 입경 측정 시 사용한 측정점의 위치를 나타낸 그림이다. Fig. 2의 그림에 나타낸 바와 같이 3축 정밀 이송 장치를 이용하였고 인젝터 팁 하류방향으로 그림에 표시한 바와 같은 0.5D, 1.0D 그리고 Mixing 장치가 삽입되는 Distance A, B, C 지점을 기준으로 분무 축 중심으로부터 3mm 간격으로 5~13개의 측정점에 대한 평균 입경을 측정하였다.

Table 1 Injector specification. and experimental conditions

Injector type	Jet-spray
Spray geometry	3-hole
Fuel	Urea solution (32.5%)
Inj. pressure	4~6bar

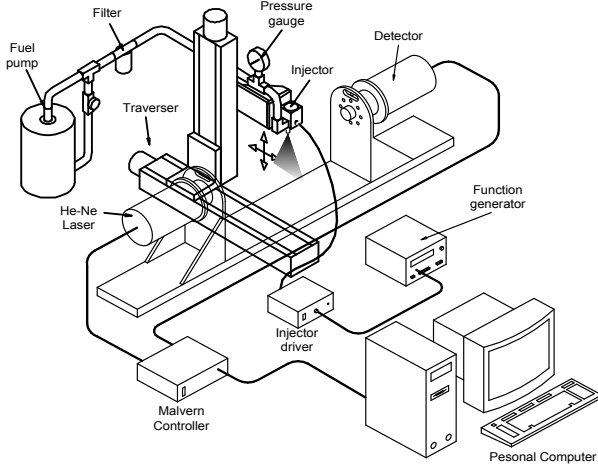


Fig. 2 Experimental setup of Malvern system

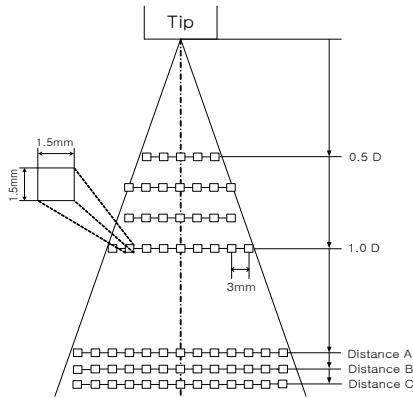


Fig. 3 SMD measuring points

2.3 모사배기관 내 분포 특성 측정

Fig. 4는 일반적인 엔진 배기관에서 Urea-SCR 시스템의 개략적인 모습을 나타낸 그림이다. 실제 엔진에서의 배기관 가시화는 particle과 설치공간 및 장치 설치의 어려움이 많은 바, 실제 배기관에서 Urea 수용액의 분무 거동특성을 파악하기 위하여 Fig. 4와 같이 엔진 대신에 배기가스의 온도와 유량을 모사한 모사배기관 시스템과 실제 배기관 layout과 pyrex 가시화 창을 이용하였다. Fig. 4에 적색으로 표시한 부위는 인젝터가 부착되는 마운트 부 이고, 이 인젝터 마운트 부를 실제 형상과 크기를 거의 동일하게 pyrex로 제작하여 분사된 Urea 수용액의 거동 특성을 가시화 하였다.

Fig. 5는 pyrex 가시화창을 이용한 모사배기관 시스템에서 Urea 수용액의 분무 거동 특성을 측정하기 위한 가시화 방법을 나타낸 개략도이다. 블로워로 공급된 공기를 30kW급 히터로 가열하여 온도를 250℃까지 높였고, 파이렉스관 내에

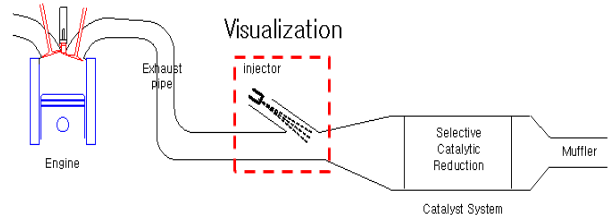
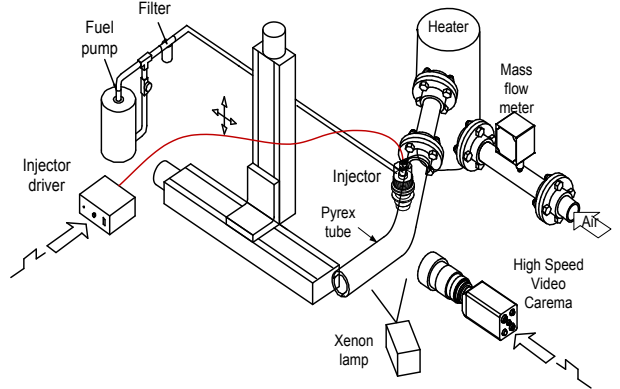
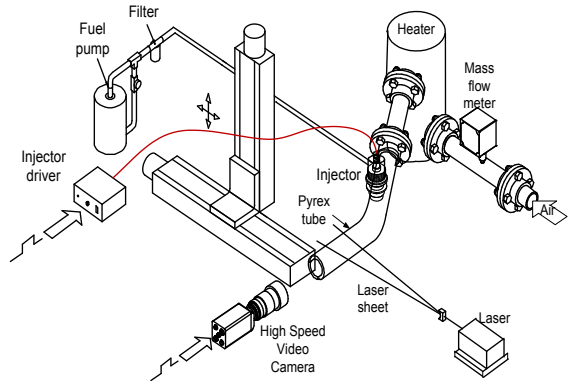


Fig. 4 Schematic of Urea-SCR system



(a) Parallel sectional visualization with air flow



(b) Cross sectional visualization with air flow

Fig. 5 Spray visualization systems in the exhaust pipe flow

Urea 수용액을 분사시켰다. 분무의 종단면과 횡단면을 Xenon 광원 혹은 2W Nd:YVO4 레이저 광원과 고속카메라를 이용하였다.

2.4 디지털 화상처리

취득한 이미지로부터 분사 영역을 명확하게 파악하고 Urea 수용액의 농도를 비교하기 위하여 전처리과정을 거친 후 모든 프레임에 대하여 각각의 화소값에 대한 RMS 평균을 취한 이미지를 주로 활용하였다.^(6,7) RMS를 구하기 위한 알고리즘은 식 (1)과 같다.

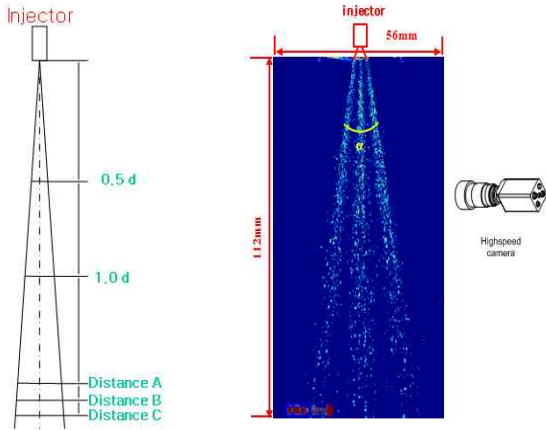


Fig. 6 Spray structure

$$S_R(x, y) = \sqrt{\frac{\sum^n S(x, y) \times S(x, y)}{n}} \quad (1)$$

여기서, $S_R(x,y)$ 는 RMS 평균 이미지, $S(x,y)$ 는 각각의 분무 화상 이미지, n 은 분사 시작부터 끝까지의 화상의 개수이다.

3. 실험 결과

3.1 인젝터의 대기 분무 특성

대기 분무를 고속 카메라로 취득한 영상을 이미지 처리 방법을 이용하여 Fig. 6에 나타내었다. 이 가시화 결과 그림으로부터 3개의 액주로 분무가 이루어져 있음을 알 수 있다. 세 줄기의 액주가 대칭적으로 뚜렷하게 나타나는 것을 확인하였으며, 분무각은 분사압력 4~6bar범위로 분사하였을 경우 일정각 α 값을 유지하였다. 또한, 취득한 영상으로부터 디지털 화상 처리 과정을 통하여 Fig. 7과 같이 분무 도달 거리를 측정하였다. 분무 도달 거리는 분사 시작 후 선형적으로 증가하는 결과를 보였고, 분무속도는 약 20.52m/s로 측정되었다. 분무 도달 거리가 분사 후 선형적으로 증가하는 이유는 유체가 Urea 수용이기 때문에 breakup length가 길어져서 측정범위 110mm내에서는 breakup이 진행 중이기 때문이다.

3.2 분사량 특성

Urea-SCR 인젝터의 기초적인 분사량 특성을 측정하였다. 측정방법은 4~6bar 사이의 일정압력 하에 0.5Hz와 1Hz 및 2Hz의 분사주기에 대하여

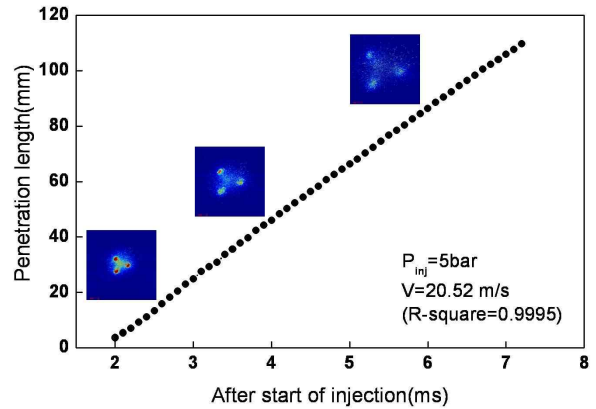


Fig. 7 Spray penetration length with elapsed time

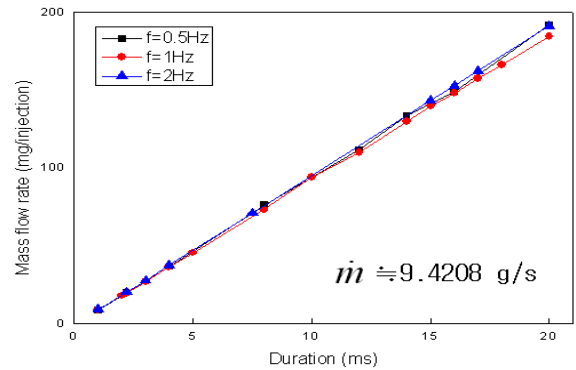


Fig. 9 Injection quantity with injection duration and frequency

100회씩 분사한 후 전자저울로 무게를 측정하였고, 10회 반복 측정 후 평균화함으로써 측정오차를 줄였다.

Fig. 9는 각 분사 주파수와 분사시간에 따른 분사량 측정 결과를 나타낸 그래프이다. 분사시간이 길어질수록 분사량은 선형적으로 증가하였고, 주파수 변화에 대한 영향은 거의 차이가 없었다. 따라서 기울기에 대한 평균치를 계산하였으며, 그래프에 표시한 바와 같이 분사시간에 따른 분사량은 9.4208의 비례 값을 도출하였다.

3.3 분무평균입경 특성

Fig. 10은 각 입경 측정점에서의 SMD를 비교한 그래프이다. 전체적으로 분무 축을 중심으로 대칭성을 잘 보였고 평균 입경이 약 65 μ m 정도로 작게 나타났다. 또한 노즐 중심축 선상에서 노즐 끝단과 가까운 지점에서는 SMD가 크게 나타났으며, 멀어질수록 SMD가 작아지는 경향을 알 수 있었다.

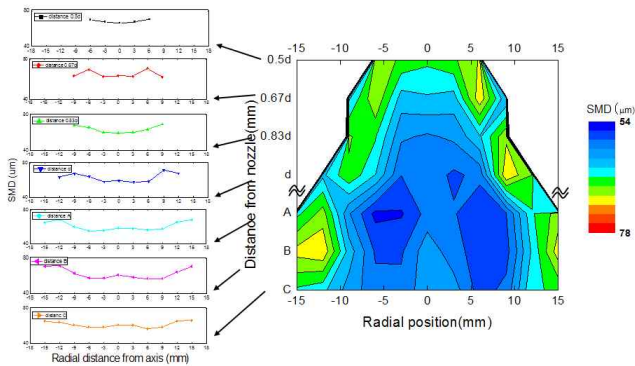


Fig. 10 Distribution of spray drop sizes

인젝터가 분무각을 가지고 있으므로 인젝터 끝단으로부터 멀어질수록 분무영역이 넓게 퍼져야 한다. 그러나 노즐 끝단으로부터의 거리 A 이상에서, 분무 중심축으로부터 ±18mm 이상의 범위는 입자가 거의 측정되지 않았다. 이는 입자의 미립화가 진행되면서 입자의 크기가 매우 작고 그 수도 적기 때문에 측정되지 않았으리라 판단된다.

3.4 모사배기관내 분무 거동 특성

Fig. 11은 일정 분사조건에서 단일 분사하여 고속 카메라로 취득한 화상을 RMS 평균화한 i 이미지이다. 공기유량이 증가할수록 벽류지점이 멀어지는 결과를 보였으며, 온도가 증가할수록 기화가 빠르게 진행됨에 따라서 Urea의 농도가 낮아지는 경향을 보였다.

공기유량과 온도의 변화에 대한 벽류지점의 변화를 파악하기 위해서 그림에 표시한 바와 같은 인젝터 끝단으로부터의 벽류지점을 측정하였다. Fig. 12는 하부와 측면 측에서 각 유량과 온도 변화에 대한 벽류지점 측정 결과이다. 공기 유량의 증가에 대해서는 벽류지점이 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 그러나 온도의 변화에 대해서는 일정한 변화를 보이지 않는다. Bottom view 기준에서 공기유량 60kg/h 이상, 온도 160℃ 이상에서 거의 일치하고, Side view 기준으로 측정 시에는 전체적으로 온도의 증가에 따라 약간씩 증가하는 경향이 있으나 변화폭은 5mm 이내로 작게 측정되었다. 따라서 온도의 영향은 매우 적은 것으로 판단된다.

온도의 변화에 대한 기화정도를 파악하고자 하였으나 본 실험에서는 화상 취득 시 boundary intensity를 균일하게 형성시키지 못하기 때문에 정량적으로 표현하기는 어려웠다.

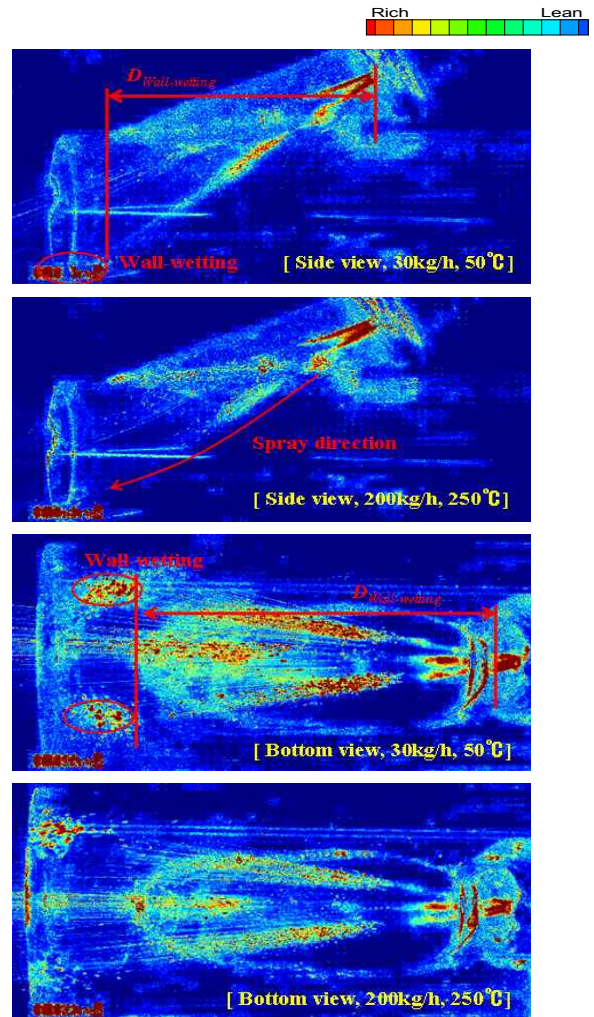


Fig. 11 RMS images of the spray vertical section pattern in the flow field

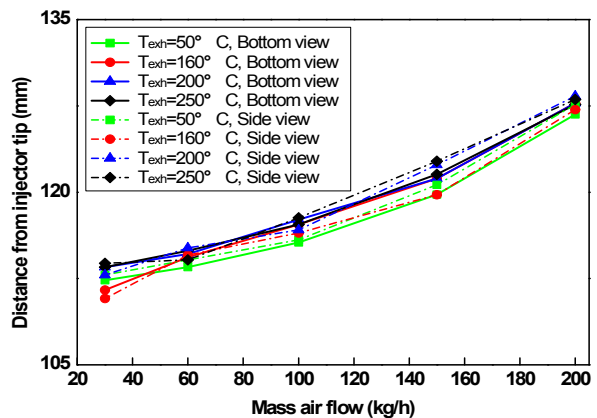


Fig. 12 Wall-wetting position with various mass air flows

유량이 증가할수록 분무 형태는 Fig. 11의 위 오른쪽 그림에 표시한 바와 같이 분사 방향이 휘게 됨으로써 정삼각형 형태가 변화되면서 인젝터

방향으로 치우치게 된다. 또한, 온도의 증가에 따라서 산란되는 액적의 수가 감소됨으로써 이미지 강도가 낮게 나타나고 그만큼 기화량이 증가하게 된다.

4. 결 론

Urea-SCR 시스템에서 사용되는 실제 Urea수용액을 이용하여 대기분무 가시화를 진행하였으며, 실제 배기관을 모사한 모사배기관내 분무 거동을 파악하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Urea 수용액 분사용 인젝터를 이용하여 분무를 가시화 한 결과 세 줄기 액주가 나타났고, 분사압력 4bar이상에서 일정 값의 분무각을 보였으며, 분무 속도는 약 20.52m/s로 측정되었다.

(2) 분사량은 분사시간에 대해 선형적으로 증가하였고, 분무평균입경은 약 65 μ m 로 작게 나타났다.

(3) Pyrex 가시화창을 이용하여 인젝터 부착위치에서 일정 거리부분을 가시화할 수 있었으며, 분무 유동 패턴을 파악할 수 있었다.

(4) 유량에 대해 벽류지점은 선형적으로 변화하였으며, 온도에 대해서는 그 변화가 매우 작았다.

후 기

이 연구는 산업자원부 지원의 "미래형 자동차 배기가스 제로화 기술개발"과제의 일부로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Heywood, J. B., 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals," *McGraw Hill*.
- (2) Eastwood, P., 2000, "Critical Topics in Exhaust Gas After-Treatment," *Research studies press Ltd.*.
- (3) Oh, J. T., Seo, J. W., Lee, K. I., Park, J. I., Choi, Y. H. and Lee, J. H., 2007, "Visualization of Urea Mixing Characteristics by Mixer and Diffuser in SCR system," *KSAE 2007*.
- (4) Choi, J. H., Choi, Y. S., Cho, I. E. and Lee, S. W., 2007, "A Study on the Distribution of Injected Urea into Exhaust Pipe in the SCR System," *KSAE 2007*.
- (5) Oh, J. M., Lee, K. H. and Lee, J. H., 2008, "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.
- (6) Jeong, H. Y., Lee, K. H. and Ikeda, Y., 2007, "Investigation of the Spray Characteristics for a Secondary Fuel Injection Nozzle Using a Digital Image Processing Method," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 18, pp. 1591~1602.
- (7) Oh, J. M., Lee, K. H. and Jeong, H. Y., 2008, "Study on the Spray Behavior and Diesel Fuel Distribution Characteristics of a Secondary Injector for a Lean NOx Trap Catalyst," *Energy & Fuels*, Vol. 22, pp. 1527~1534.