

# Urea-SCR시스템 액막형 선회분사기의 분사압력변화에 따른 무특성에 관한 연구

김덕진<sup>1</sup> · 양동욱<sup>2</sup> · 이지근<sup>†</sup>

(원고접수일 : 2013년 6월 10일, 원고수정일 : 2013년 6월 18일, 심사완료일 : 2013년 6월 25일)

## Effect of injection pressure on the atomization characteristics of a liquid sheet-type swirl injector for Urea-SCR system

Duckjin Kim<sup>1</sup> · Donguk Yang<sup>2</sup> · Jeekeun Lee<sup>†</sup>

**요약:** Urea-SCR시스템에 적용하기 위한 액막형 선회분사기의 분사압력변화에 따른 분무특성이 실험적으로 조사되었다. 실험에 사용된 노즐은 형상비 3.1을 갖는 단공 압력식 액막형 선회노즐이며, 노즐선단에 분사되는 유체에 선회류를 형성하기 위한 선회기가 설치되어 있다. 노즐의 분사량 조절은 PWM(pulse width modulation)기법에 의해 제어되었다. 분무의 발달과정은 2차원 PIV에 의해 가시화되었으며, 분무각 변화가 조사되었다. 분무액적의 속도 및 크기는 2차원 PDPA에 의해 상온 대기압 조건에서 측정되었다. 분무구조는 분사압력에 큰 영향을 받으며, SMD는 분사압력 증가에 따라 감소하며 선행연구자의 반실험적 결과와 유사한 경향을 보임을 알 수 있었다.

**주제어:** 압력식 선회노즐, 분무, 미립화, 위상도플러입자분석기, Sauter 평균직경

**Abstract:** In this study, the spray characteristics of a pressure swirl atomizer classified into a liquid sheet-type swirl nozzle for Urea-SCR system were investigated experimentally with the variation of injection pressure. The length to diameter ratio ( $l_0/d$ ) of the nozzle was 3.1, and the swirler was set inside the nozzle tip to give injecting fluid angular momentum. The injection duration of the nozzle was controlled by PWM (pulse width modulation) modes. The development processes of the spray were imaged by a 2-D PIV system, and the change of spray angle was measured. The atomization characteristics, including axial velocity and SMD, were measured using a 2-D PDA system with the injection pressures at room temperature and ambient pressure conditions. As the experimental results, the injection pressure had a significant impact on the spray structure showing a different shape around the spray leading edge, and the smaller SMD was observed with increasing injection pressures, which was similar to that of the previous work.

**Keywords:** Pressure-swirl injector, Spray, Atomization, PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer), SMD (Suter mean diameter)

### 1. 서론

디젤엔진은 내연기관 중에서 에너지효율이 가장 높아 연료경제성이 좋을 뿐만 아니라 온실가스배

출이 작은 장점을 가지고 있어 세계의 주요 산업 동력원으로서 사용빈도가 증가하고 있다. 또한 내구성, 신뢰성 그리고 안전성 등이 검증되어 점차

<sup>†</sup>Corresponding Author: Division of Mechanical System Engineering, College of Engineering, Chonbuk National University, 664-14, Duckjin-dong 1-ga, Jeonju, Chonbuk 561-756, Korea, E-mail: leejk@jbnu.ac.kr, Tel: 063-270-2369

1 Korea Automotive Technology Institute, E-mail: djkim@katec.re.kr, Tel: 041-559-3297

2 Jeonbuk Institute of Automotive Technology, ydongy812@jiat.re.kr, Tel: 063-472-2355

강화되는 배기가스 규제에도 불구하고 디젤엔진의 수효는 늘어나고 있다[1].

그러나 디젤엔진은 입자상물질(particulate matter, PM), 질소산화물(NOx) 등이 가솔린엔진 대비 상당히 많은 양이 배출되고 있어 디젤엔진에서 배출되는 오염물질을 저감시키기 위한 세계 각국의 법적 규제는 날로 엄격해지고 있다. 이러한 배기가스 규제를 만족하기 위하여 NOx와 PM을 저감하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 최근에는 엔진 자체의 NOx저감 연소기술 및 DeNOx 후처리기술이 동시에 적용되고 있다. DeNOx 후처리방식으로 NOx 전환효율이 80% 이상을 보이는 우레아(Urea)를 환원제로 사용하는 Urea-SCR시스템이 적용되고 있다[2]-[4]. Urea-SCR시스템을 성공적으로 적용하기 위해서는 비정상상태로 운행되는 엔진조건에 반응하여 배기관 내에 요구되는 요소수를 매우 짧은 시간분해능을 갖고 분사할 수 있어야 하며, 낮은 온도에서 촉매의 반응율을 높이기 위해 SCR촉매 전단에 분무의 균일공간분포가 형성되어야 한다[5][6].

Kowatari et al. [7]은 배기관 내에 벤츄리 와 선회기를 설치하여 배기가스와 요소수의 원활한 혼합을 유도하고 촉매 전단의 환원제 공간분포가 NOx 저감율에 미치는 영향을 연구하였다. Nishioka et al. [8]은 배기관 내로 수직 분사되는 분무가 배기관 벽면에 도달하기 전에 별도로 설치한 충격판에 충돌함으로써 요소수 분무액적의 배기관 벽면 충돌을 방지하고 균일한 공간분포를 형성하기 위한 충격판(impinging plate)을 고안하여 DeNOx 성능에 미치는 영향을 조사한 바가 있다. Jeong et al. [9]은 배기관 내에 선회기 및 충격판 등을 설치하는 대신 요소수 분사방향을 배기가스 유동방향과 반대로 설치하여 촉매 전단의 분무액적의 공간분포 향상을 도모하였으며 노즐의 최적 설치위치 및 노즐의 분공수의 영향이 NOx저감율에 미치는 영향을 해석적으로 조사한 바가 있다.

한편 배기관 내로 분사된 요소수 분무액적은 배기가스 열에 의해 증발 및 열분해를 통해 암모니아 가스로 환원되며 SCR촉매에서 NOx와 반응하여 인체에 무해한 N<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O로 변환되는 메커니즘

을 갖고 있다[10]. 따라서 요소수 액적증발 및 열분해 과정에 대한 이해를 향상시키기 위해서는 분무 구조 및 액적크기에 대한 정보가 요구된다. 요소수 분무의 액적크기는 노즐의 기하학적 특성 및 분사압력에 영향을 받을 뿐만 아니라 요소수가 분사되는 배기관 내의 조건 및 요소수의 물성치 등에 영향을 받는다. Urea-SCR시스템을 상용화하기 위한 초기단계에서는 완전히 증발하지 못한 요소수 분무의 열화현상에 따른 노즐팁 근처의 우레아염 발생 및 노즐 막힘 현상을 방지하고 작동 안전성을 확보하기 위해 압축공기를 이송공기로 하는 이우체 노즐이 검토 되어 왔으나[11] 최근에는 시스템의 단순화, 응답성 향상 및 분무의 공간분포 향상을 위해 단공 압력식 선회노즐에 대한 연구가 수행되어 오고 있다[12].

Ham et al. [13]은 단공 및 4홀 압력식 노즐을 이용하여 노즐 형상변화 및 선회 유무에 따른 NOx저감 및 NH<sub>3</sub> slip 특성을 조사하고 선회가 있는 노즐의 무화 및 NOx저감 특성이 상대적으로 양호함을 보인 바가 있다. Kim et al. [14]은 NOx저감형 연료 분사노즐 선정에 위해 압력식 노즐의 홀 직경 및 개수 변화가 연료소비율 및 NOx저감 특성에 미치는 영향을 조사하였다. Rho et al. [15]은 노즐 내부에서 공기를 선회시키는 선회기 각도변화에 따른 분무특성을 2-D PDPA시스템을 이용하여 조사하고 선회각이 증가함에 따라 분무의 반폭 및 난류강도는 증가하고, SMD는 감소하는 경향을 나타냄을 밝힌 바가 있다.

따라서 본 연구에서는 대형 디젤엔진의 NOx저감용 Urea-SCR시스템에 적용하기 위한 단공 압력식 액막형 선회분사기의 분사압력변화에 따른 분무의 거시적 특성 및 액적속도, 액적크기 등을 측정하여 분사기 최적설계 및 Urea-SCR시스템의 운전조건 설정을 위한 자료를 얻고자 하였다. 또한 액적크기 측정 결과를 이론적 해석결과에 실험적 상수값을 조합한 기존의 반실험식과 비교 분석함으로써 분사압력변화에 따른 액적크기의 변화를 예측하여 요소수 분사시스템이 Urea-SCR시스템 성능에 미치는 영향을 예측할 수 있는 관계식을 정립하고자 하였다.

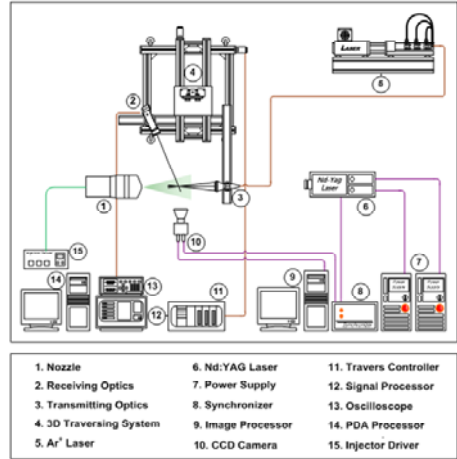
## 2. 실험장치 및 측정방법

### 2.1 실험장치

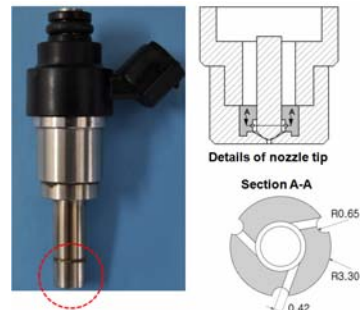
노즐로부터 분사되는 분무의 액적속도 및 크기를 측정하기 위한 실험장치를 **Figure 1**과 같이 구성하였다. 실험장치는 액체 공급장치, 분무영상 획득장치, 액적속도 및 크기 측정을 위한 PDPA시스템으로 구성되어 있다. 액체는 질소가스에 의해 가압되는 압력용기로부터 일정한 압력으로 노즐로 공급되며 노즐입구에 압력조절용 레귤레이터를 설치하여 압력을 정밀하게 제어하였다. 분무영상은 2차원 PIV시스템을 이용하여 가시화하였으며 광원으로 532 nm의 파장을 가지는 Nd:YAG Laser (120 mJ/pulse, 14.5 Hz)를 사용하였다. 레이저와 CCD카메라는 동기화 장치에 의해 트리거 신호로 제어되었으며, 분무의 산란광은 CCD카메라(1600×1200 pixels, 12bit)에서 획득하여 frame grabber를 통해 컴퓨터에 일괄적으로 처리되었다.

분무의 액적크기 및 속도 측정을 위해 2차원 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer) 시스템을 사용하였다. PDPA시스템은 이송장치, 송광부, 수광부, 신호처리기, 프로세서로 구성되어 있다. 광원으로는 Ar-ion 레이저(300 mW)를 사용하였으며, 514.5 nm(green)과 488 nm(blue) 파장을 가진 두 개의 빔을 사용하였다. 두 개의 빔이 형성하는 측정체적을 지나는 액적의 산란광은 수광부(receiving optic)에서 수집되어 광증폭기(PM tube)에서 신호를 전기신호로 변환하고 신호처리장치(signal processor, Dantec Co., 58N10)에 전달하여 컴퓨터(Sizeware for DOS)를 통해 일괄적으로 데이터를 평균값으로 처리하였다.

**Figure 2**는 실험에 사용된 노즐의 노즐팁 및 선회기에 대한 상세도를 나타낸 것이다. 노즐은 단일 유체를 사용하는 단공 액막형 선회분사기로써 Urea-SCR시스템에서 요소수를 분사하기 위한 노즐이다. 홀 직경(d)은 0.4 mm 이며 오리피스 길이( $l_0$ )는 1.24 mm 로서 형상비( $l_0/d$ )는 3.1이다. 분사되는 요소수에 각운동량을 부여하여 분무의 확산 및 분열을 촉진하기 위한 선회기는 직경 0.42 mm의 포트가 27°의 경사각을 갖고 있으며 3개가 등간격으



**Figure 1:** Schematics of experimental setup (PIV and PDPA system)



**Figure 2:** Schematics of swirl injector and cross-sectional view of tip and swirler

로 설치되어 있다. 노즐은 소비전류 peak 3.5 A, hold 0.5 A, 최대 분사량은 100 g/min으로 설계되었으며, 이에 따른 노즐 드라이버는 소비전류 peak 4 A, hold 1 A에서 주파수와 부하비 변경이 가능하도록 별도로 제작하였다. 노즐과 드라이버는 시리얼 통신으로 제어되는 소프트웨어를 제작하여 사용하였으며 노즐의 유량은 PWM(pulse width modulation)방식으로 제어되었다.

### 2.2 실험조건 및 측정방법

노즐로부터 분사되는 액체유량은 **Figure 3**의 PWM제어 선도에 도시한 바와 같이 주파수를 5 Hz로 고정된 상태에서 부하비(Duty ratio) 변화 및 분사압력을 압력조절용 레귤레이터를 이용하여

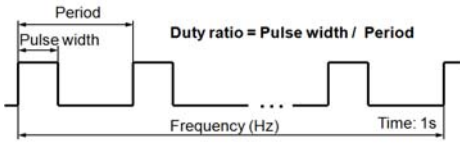


Figure 3: Schematic diagram of PWM control

Table 1 Experiment conditions

Item	Specification
Injection pressure	3, 4, 5, 6, 7, 8 and 9 bar
Frequency	5 Hz
Duty ratio	30%(injection duration:60ms)
Ambient pressure	Atmospheric pressure
Temperature	Room temp. (20°C)
Working fluid	Water

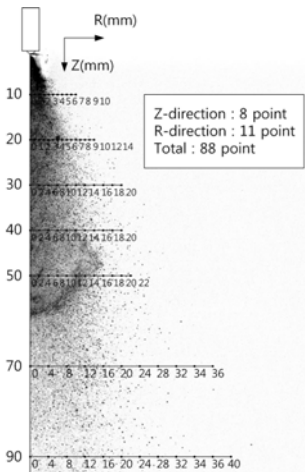


Figure 4: PDPA measurement points

3~9 bar로 변화시켜가면서 측정하였다. 작동유체는 요소수 대신 증류수를 사용하여 실험을 수행하였으며 실험조건을 Table 1에 나타내었다. 분사량은 분사압력변화에 따라 각각 3회 1분 동안 측정된 후 평균값을 계산하였다.

Figure 4는 PDPA시스템의 측정영역을 표시한 것으로 분무액적 속도 및 크기는 3차원 이송장치를 이용하여 연속적으로 측정되었다. 분사되는 노즐의 출구를 좌표계의 원점으로 하여 분무의 축방향을 Z축, 반경방향을 R축으로 설정하였다. 각 조건에 따라 측정점의 위치는 동일하며 측정점의 수는

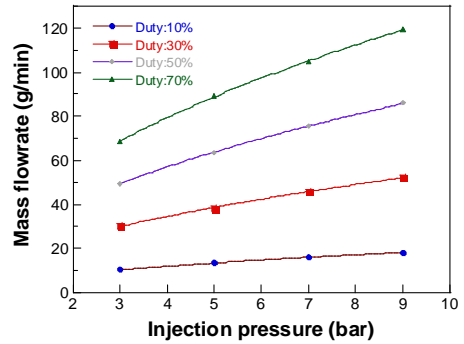


Figure 5: Mass flowrate with injection pressures for various duty ratio (frequency : 5Hz)

노즐출구 끝단에서 축방향으로 10 mm 지점부터 110 mm 지점까지 8 포인트로 설정하였다. 반경방향의 측정점은 분무 중심에서 40 mm 지점까지 총 11 포인트로, 총 88개의 측정 포인트에서 데이터를 수집하였다. 측정 데이터는 한 포인트에서 25,000개의 액적을 샘플링한 후 평균 처리하여 결과로 나타내었으며, 측정시간은 150초를 넘지 않도록 설정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 압력변화에 따른 분사량

Figure 5는 주파수를 5 Hz로 고정하고 부하비 (duty ratio)를 10, 30, 50, 70 그리고 분사압력을 3, 5, 7, 9 bar로 변화시켰을 때 분사량을 측정한 결과를 나타낸 것이다. 분사압력 증가에 따른 분사량 변화는 부하비 변화에 관계없이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 일반적으로 압력식 단공 노즐로부터 분사되는 분사량은 베르누이 방정식을 적용한 이론적 해석으로부터 분사압력의 0.5승에 비례하여 증가하는 것을 알려져 있으나[16], 실험이 수행된 분사압력변화에 대해 부하비와 관계없이 분사압력의 0.51~0.52승에 비례하여 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이와 같이 증가경향이 이론적 해석 결과보다 약간 높게 나타나는 것은 PWM제어의 특성상 노즐니들의 관성력의 영향을 받아 니들의 열림과 닫힘이 입력신호와 다르게 약간 지연됨에 따라 나타나는 현상으로 보인다.

### 3.2 유출계수

노즐 오리피스를 통과하는 실제유량에 대한 이론유량의 비로서 식 (1)과 같이 정의되는 노즐의 유출계수는 오리피스 형상비, 레이놀드 수, 주위압력 및 캐비테이션 유무에 따라 변화한다.

$$Q_{act} = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_L}} \quad (1)$$

여기서,  $C_d$ 는 유출계수,  $A$ 는 노즐 오리피스 출구의 단면적,  $\rho_L$ 는 작동유체의 밀도이다.

특히 압력을 작동변수로 사용하는 Urea-SCR시스템의 경우 분사압력변화에 따른 방출유량을 예측하기 위해서는 노즐의 유출계수에 대한 정보가 필수적이다. 주파수 5 Hz, 부하비 30%에서 작동압력이 3~9 bar로 변화 할 때 식 (1)을 이용하여 계산한 노즐의 유출계수는 0.524~0.530 정도였고, 평균값은 0.527로 평가되었다. 이러한 결과는 Nakayama [17]가 제시한 단공 오리피스에 대한 유출계수에서 오리피스 형상비( $l_o/d$ )가 3.1일 경우의 최대값인 0.79보다 작은 값이며, 압력식 선화노즐에 대한 Benjamin et al. [18]의 실험적 경험식에 의한 0.35 보다는 큰 값을 나타내고 있다. 이러한 결과는 노즐팁 내부에 위치한 선회기 형상 및 선회기와 노즐니들 사이에 형성된 복잡한 기하학적 형상에 영향을 받아 내부 유동구조가 서로 다르기 때문으로 판단된다.

### 3.3 분무구조

Figure 6은 주파수 5 Hz, 부하비 30%에서 분사시작 후 10.2 ms에서 분사압력 3, 5, 7, 9 bar에서 PIV 시스템을 이용하여 획득한 분무 이미지를 나타낸 것이다. Figure 3에 나타낸 것과 같이 주어진 주파수 5 Hz에서 한 개의 주기는 200 ms 이며 부하비 30%에서 분사기간은 60 ms이다. 또한 분사기간 60 ms에서 노즐니들 밸브가의 완전히 개방되는 열림시간(opening time)이 1.8 ms로 측정되었다. 따라서 분무 이미지를 획득하는 시간인 10.2 ms는 분무가충분히 발달된 시점으로 판단 할 수 있으며 분사가 종료되는 60 ms까지는 정상상태를 유지하는 것

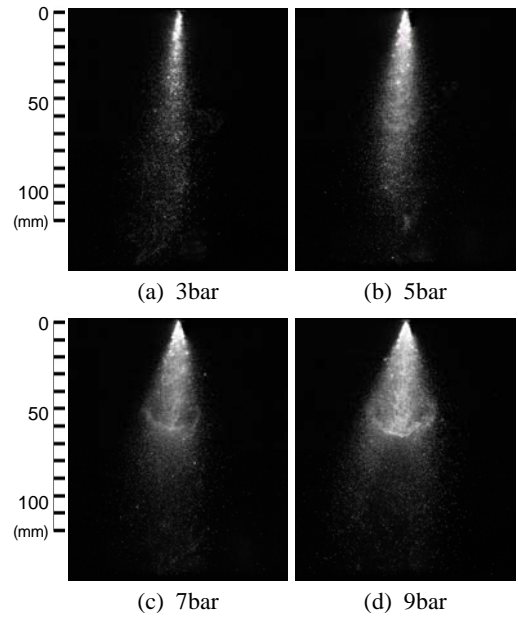
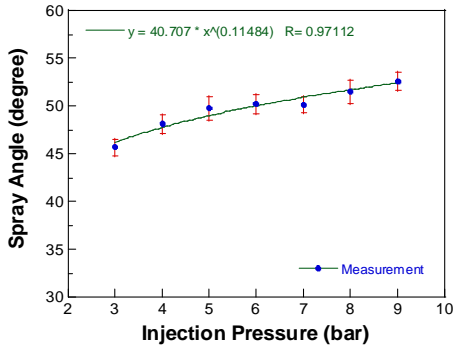


Figure 6: Spray images with injection pressure (frequency : 5 Hz, duty ratio : 30%, injection time : 10.2 ms)

으로 볼 수 있다.

분사압력이 낮은 3 bar 및 5 bar의 경우 솔리드 콘(solid cone) 형태의 분무구조를 나타내고 있으며, 분무 중심부의 비교적 강한 산란광으로부터 중심부의 수밀도가 높음을 알 수 있다. 분사압력이 높은 7 bar 및 9 bar의 경우 분사압력이 낮은 경우와 다르게 분무선단 부분에서 환상형 와도(toroidal vortex) 구조가 형성되고 있으며 분무폭 또한 증가했음을 알 수 있다. 이와 같이 분무선단에 환상형 와도가 형성되는 것은 Nishida et al. [19][20]이 지적한 바와 같이 압력식 선화노즐의 전형적인 특징이다. 압력식 선화노즐의 액적생성 메커니즘은 분사 초기단계에서 노즐니들과 선회기 출구사이의 dead volume에 존재하는 유체가 선회성분 없이 방출되면서 형성되는 큰 액적과 뒤이어 분출되는 액막분열에 의한 액적으로 구성된다. 따라서 분무선단은 비교적 높은 수밀도를 나타내며 분무선단이 정지상태의 주위공기의 저항에 의해 분무외곽으로 밀려가고 분무 내로 유입되는 공기유동에 영향을 받아 환상형 와도가 형성된다. 이러한 환상형 와도



**Figure 7:** Spray angle with injection pressures (Frequency : 5 Hz, Duty ratio : 30%, Injection time : 10.2 ms)

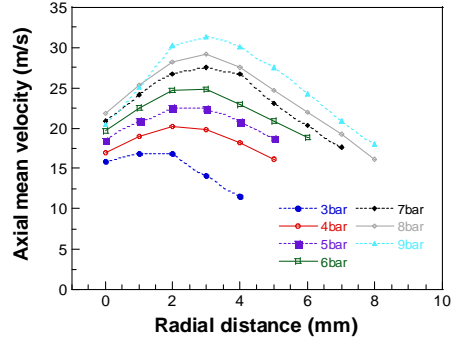
는 노즐의 선회가 강할수록 그리고 분사압력이 높을수록 더 큰 구조를 형성하며 분무의 반경방향 확산에 기여하는 것으로 알려져 있다.

**Figure 7**은 **Figure 6**과 동일한 조건에서 측정된 분사압력변화에 따른 분무각을 나타낸 것이다. 분무각은 이미지의 영상처리 과정에서 분무경계를 결정하기 위한 cut-off 수준을 결정한 후 분무 경계를 보이는 지점의 값을 측정된 후 이를 평균하여 계산하였으며 그림에서 수직 바(bar)는 측정된 분무각의 편차를 나타낸 것이다. 분무각은 분사압력 변화에 따라 증가하며 3 bar에서 46°를 그리고 9 bar에서 54° 정도를 나타내고 있다. 전반적인 분무각의 증가경향은 분사압력의 0.12승에 비례하여 증가함을 알 수 있다.

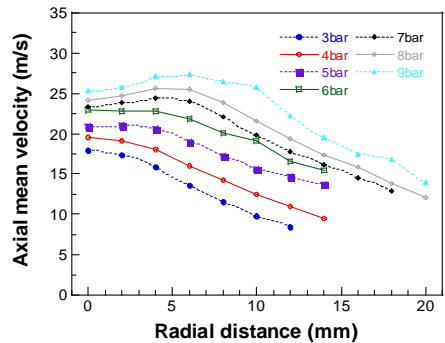
### 3.4 분무 축방향 평균속도분포

Urea-SCR시스템에서 요소수 분무는 분무구조에 비하여 그다지 크지 않은 배기관 내로 분사된다. 따라서 분무의 축방향 속도분포를 포함한 발달과정은 배기관 내 분무의 분포특성을 예측하는데 중요하다. **Figure 8**은 노즐선단으로부터 축방향으로 10~110 mm 지점에서의 반경방향에 따라 측정된 분무액적의 축방향 속도분포를 나타낸 것이다.

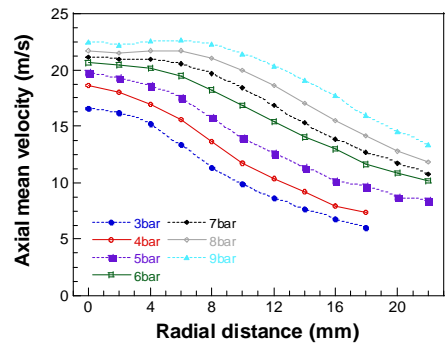
노즐선단으로부터 10 mm 지점에서는 선회유통의 효과가 강하게 나타나 반경방향으로 갈수록 축방향 속도가 증가 한 후 3 mm 지점에서 가장 높은 값을 나타낸 후 감소하는 경향을 나타내고 있으며



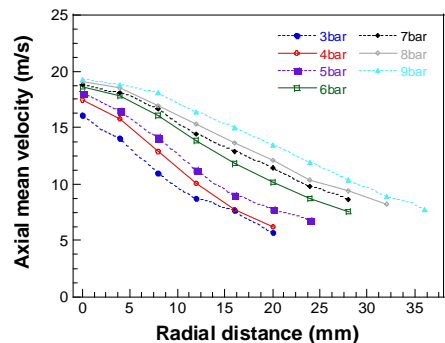
(a) 10 mm from nozzle tip



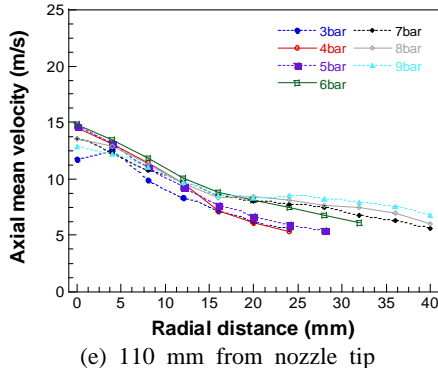
(b) 30 mm from nozzle tip



(c) 50 mm from nozzle tip



(d) 70 mm from nozzle tip



(e) 110 mm from nozzle tip

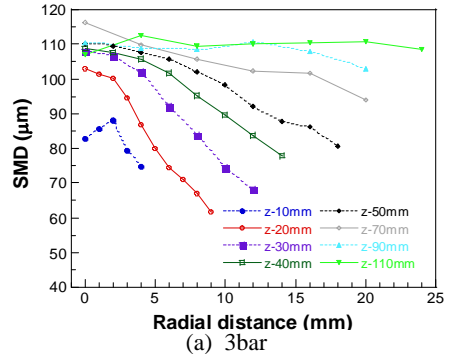
**Figure 8:** Axial mean velocity distributions with axial distance for injection pressures

분사압력이 증가할수록 높은 속도분포를 나타내고 있다. 그러나 축방향 거리 30 mm 및 50 mm 지점에서는 반경방향 5 mm 지점까지 일정한 축방향 속도 또는 작은 감소경향을 보인 후 그 이후에서는 거의 선형적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 분무 하류에 해당하는 110 mm에서는 반경방향 거리에 따라 감소하는 경향을 보이고 있으며 분사압력의 효과가 거의 사라져 분사압력에 따른 속도 차이가 매우 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 분무 하류에서 분사압력변화에 따른 효과가 매우 약하게 나타나는 이유는 Figure 6에서 볼 수 있듯이 분무선단의 축방향 운동량이 주위공기와의 저항에 의해 반경방향으로 확산된 결과로 볼 수 있다.

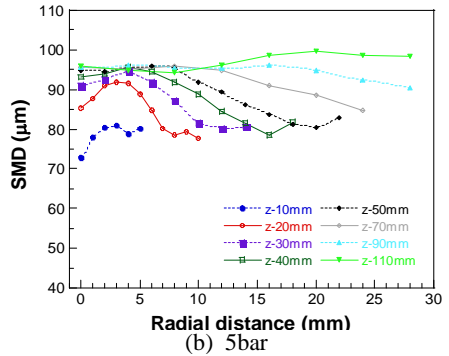
### 3.5 SMD(Sauter mean diameter) 분포

분무의 미립화특성 파악을 위한 방법에는 분무의 평균직경을 비롯한 여러 가지 대표직경, 평균직경을 중심으로 분무의 산포 정도를 나타내는 균일도, 분포변수 그리고 수학적인 분포함수 등이 있다. Urea-SCR시스템과 같은 화학반응이 주로 일어나는 시스템에서 분무특성을 고찰하고자 할 때는 체적 대 표면적 비로 정의되는 SMD (Sauter Mean Diameter,  $D_{32}$ )가 주로 사용되고 있다.

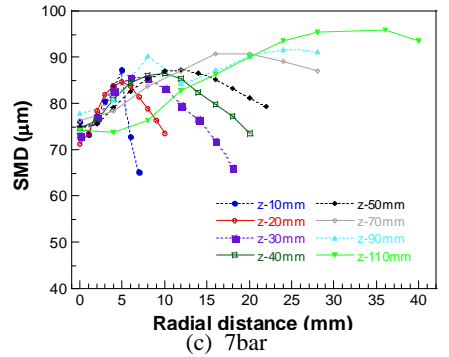
Figure 9는 분사압력 3, 5, 7, 9 bar 및 축방향 거리변화에 대하여 반경방향 위치변화에 따라 측정된 SMD 값을 보여주고 있다. 분사압력 3 bar 및 5 bar의 경우 노즐선단 근처 영역에 해당하는 10~20 mm 위치에서 상대적으로 작은 SMD가 관찰되고



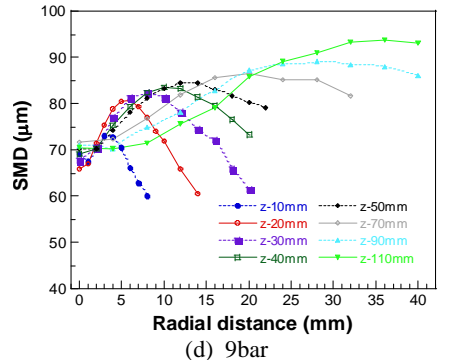
(a) 3bar



(b) 5bar



(c) 7bar



(d) 9bar

**Figure 9:** SMD distribution with axial distance for injection pressures

있다. 이러한 현상은 선회노즐의 액적형성 메커니즘인 액막분열에 의한 액적형성과 관련이 있는 것으로 축방향 거리 10~20 mm 위치에 액막으로부터 분열된 액사 또는 비구형액적이 다수 존재함을 의미하는 것이다. 즉 구형액적만을 인식하는 PDPA 시스템의 특성으로 인하여 액사 또는 비구형액적이 액적크기 평가에 반영되지 못했기 때문이다. 그러나 축방향 위치 30 mm 이후부터는 solid cone 분무와 같이 분무 중심부에서 큰 액적이, 반경방향으로 갈수록 크기가 작아지는 액적분포를 나타내고 있으며 분무 하류에서는 반경방향에 따라 거의 유사한 액적크기분포를 나타내고 있다.

한편 분무선단에 환형 와도가 형성되는 7 bar 및 9 bar의 경우 분무 중심부에서 작은 액적크기를 보이며 반경방향으로 갈수록 액적크기가 증가하는 분포를 나타내고 있다. 또한 축방향 거리가 증가함에 따라 액적크기가 작아지는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 분사압력이 증가함에 따라 분출속도가 증가함과 동시에 분사되는 유체에 부여되는 각운동량이 증가하여 반경방향 속도성분이 증가하고 수밀도가 높은 분무선단이 주위공기의 영향을 받아 반경방향으로 확산되기 때문이다.

분무 중심부에서 분사압력변화에 따른 액적크기는 노즐선단 근처인 10~20 mm를 제외하면 3 bar에서 109 μm를 보인 후 5 bar에서 94 μm 그리고 7 bar와 9 bar에서 각각 75 μm 및 69 μm를 나타내고 있어 분사압력이 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

Figure 10은 분사압력변화가 액적크기변화에 미치는 영향을 조사하기 위해 측정된 분무장 전체의 SMD 평균값과 비구형액적이 전체 액적크기 평가에 미치는 영향을 알아보기 위해 10 mm 위치에서의 평균값을 분사압력변화에 대하여 나타낸 것이다. 또한 실험결과와 이전 연구자에 의해 제시된 반실험식과 비교분석을 위해 Lefebvre[21]가 제시한 압력식 선회노즐에 대한 SMD를 나타내는 식 (2)의 결과와 함께 나타낸 것이다.

$$SMD(\bar{d}_{32}) = 2.25 \left( \frac{\sigma^{0.25} \mu_L^{0.25} W_L^{0.25}}{\Delta p_L^{0.5} \rho_A^{0.25}} \right) \quad (2)$$

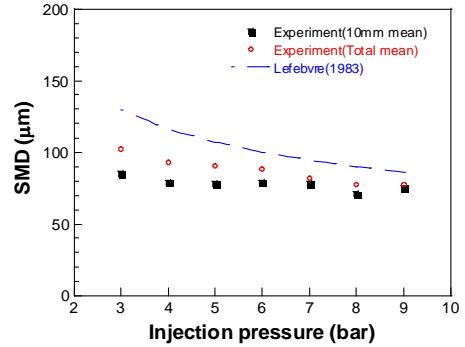


Figure 10: Comparison of SMD distribution with injection pressure

여기서  $\sigma$ 는 액체의 표면장력,  $\mu$ 는 점성계수  $W$ 는 질량유량을 나타내며 첨자  $L$ 은 액체를  $A$ 는 주위공기를 나타낸다.

압력식 선회노즐의 경우 SMD는 분사압력의 0.28~0.44승에 반비례하는 것으로 알려져 있으며 [22] Lefebvre가 제시한 식 (2)의 경우 0.5승에 반비례 관계를 나타내고 있다. 본 연구에서 얻어진 전체 분무장에 대한 결과는 분사압력변화에 따른 SMD 변화가 0.34승에 반비례하는 경향을 보여주고 있다.

#### 4. 결 론

대형 디젤엔진용 Urea-SCR시스템에 적용하기 위한 단공 압력식 액막형 선회분사기의 분사압력변화에 따른 분무의 거시적 특성 및 액적속도, 액적의 크기를 측정하고 기존에 제안된 반실험식과 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 노즐 형상비( $l_0/d$ ) 3.1, 선회각 27°의 선회 포트 3개가 설치된 선회기를 갖는 노즐에서 분사량은 분사압력에 따라 0.50~0.52승에 비례하여 증가하며 유출계수는 조사된 분사압력 범위에서 0.527의 평균값을 나타냈다.
- (2) 분무구조는 분사압력변화에 따라 큰 차이를 나타내며 분사압력이 7~9 bar의 경우 분무선단에 환형 와도가 형성됨을 알 수 있었다.
- (3) 분무의 축방향 속도분포는 노즐선단 근처에



서 분사압력에 따라 큰 차이를 보인 반면에, 분무 하단에서는 분사압력의 영향이 상대적으로 작게 나타남을 알 수 있었다.

(4) 분무장 전체에 대한 SMD의 평균값은 분사압력변화에 따라 감소하며 감소경향은 분사압력의 0.3승에 반비례함을 알 수 있었다.

## 참고문헌

[1] T. V. Johnson, "Diesel emission control in review," Society of Automotive Engineers 2007-01-0233, 2007.

[2] J. Girard, R. Snow, G. Cavataio, and Christine Lambert, "The influence of ammonia to NOx ratio on SCR performance," Society of Automotive Engineers Technical Paper 2007-01-1581, 2007.

[3] K. Narayanaswamy and Y. He, "Modeling of copper-zeolite and iron-zeolite selective catalytic reduction (SCR) catalysts at steady state and transient conditions," Society of Automotive Engineers Technical Paper 2008-01-0615, 2008.

[4] J. Thompson, J. O. De Beeck, E. Joubert, and T. Wilhelm, "Case studies of urea SCR integration on passenger cars monitoring of urea inside the tank during hot and cold environment test missions," Society of Automotive Engineers Technical Paper 2008-01-1181, 2008.

[5] H. Weltens, H. Bressler, F. Terres, H. Neumaier, and D. Rammoser, "Optimization of catalytic converter gas flow distribution by CFD prediction," Society of Automotive Engineers Technical paper 930780, 1993.

[6] Å. Johansson, U. Wallin, M. Karlsson, A. Isaksson, and P. Bush, "Investigation on uniformity indices used for diesel exhaust after-treatment systems," Society of Automotive Engineers Technical Paper 2008-01-0613, 2008.

[7] T. Kowatari, Y. Hamada, and K. Amou, "A study of a new aftertreatment system(1): A new dosing device for enhancing low temperature

performance of Urea-SCR," Society of Automotive Engineers Technical Paper, 2006-01-0642, 2006.

[8] A. Nishioka, Y. Sukegawa, K. Katogi, H. Mamada, and T. Kowatari, "A study of a new aftertreatment system(2): control of urea solution spray for Urea-SCR," Society of Automotive Engineers Technical Paper, 2006-01-0644, 2006.

[9] S. J. Jeong, S. J. Lee, W. S. Kim, and C. B. Lee, "Simulation on the optimum shape and location of urea injector for Urea-SCR system of heavy-duty diesel engine to prevent NH<sub>3</sub> slip," Society of Automotive Engineers Technical Paper, 2005-01-3886, 2005.

[10] Z. Huang, Z. Zhu, Z. Liu, and Q. Liu, "Formation and reaction of ammonium sulfate salts on V2O5/AC catalyst during selective catalytic reduction of nitric oxide by ammonia at low temperatures," Journal of Catalysis, vol. 214, pp. 213-219, 2003.

[11] S. M. Kang, J. K. Lee, and B. J. Rho, "Effect of assist air flowrate on the atomization characteristics in a dual air supplying twin-fluid swirl nozzle," Proceedings of Fall Conference of The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 11-16, 2007.

[12] D. W. Yang, J. K. Kim, K. N. Kim, D. J. Kim, and J. K. Lee, "Breakup characteristics of liquid sheet type swirl injector using LIF technique," Proceedings of Fall Conference of The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 2930-2936, 2010.

[13] Y. Y. Ham, S. W. Kim, and H. S. Jang, "A study on the effect of the air-assist injection nozzle configurations on DeNOx characteristics in Urea-SCR system," Transaction of The Korean Society of Automotive Engineers, vol. 17, no. 6, pp. 67-63, 2009.

[14] K. D. Kim, W. H. Youn, B. S. Kim, J. S. Ha, K. H. Ahn, and J. T. Kim, "Performance

simulation for the variation of fuel injection nozzle configurations in medium speed diesel engine," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 30, no 6, pp. 662-668, 2006 (in Korean).

- [15] B. J. Rho, S. J. Kang, and J. H. Oh, "Swirl effect on the spray characteristics of a twin-fluid jet," *The Korean Society of Mechanical Engineers International Journal*, vol. 12, no. 5, pp. 899-906, 1998.
- [16] S. Y. Lee, *Atomization of the Liquid*, Minumsa Co., pp. 166-167. 1996.
- [17] Y. Nakayama, "Action of the fluid in the air micrometer: first report, characteristics of small diameter nozzle and orifice," *Bull. Japan Society of Mechanical Engineers*, vol. 4, pp. 516-524, 1961.
- [18] S. M. Jeng, M. A. Jog, and M. A. Benjamin, "Computational and experimental study of liquid sheet emanating from simplex fuel nozzle," *The American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, vol. 36, no. 2, 1998.
- [19] J. K. Lee, K. Nishida, and M. Yamakawa, "An analysis of ambient air entrainment into split injection D.I. gasoline spray by LIF-PIV technique," *Society of Automotive Engineers Technical Paper*, 2002-01-2662, 2002.
- [20] J. K. Lee, K. Nishida, B. J. Rho, Y. K. Lee, and E. S. Kim, "Breakup process of initial spray of D.I. gasoline injector by LIF imaging technique," *13th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, 2006.
- [21] H. Lefebvre, *Atomization and Sprays*, New York: Hemisphere Publishing Corporation, pp. 215-217, 1989.
- [22] S. Y. Lee, *Atomization of the Liquid*, Seoul: Minumsa Co., pp. 194-196. 1996.