

# 인젝터 구동 방식에 따른 분무 거동 및 분무 미립화 특성

박지홍<sup>1)</sup> · 서현규<sup>1)</sup> · 박성욱<sup>1)</sup> · 김재욱<sup>2)</sup> · 이창식<sup>\*3)</sup>

한양대학교 대학원<sup>1)</sup> · 두원공과대학 자동차과<sup>2)</sup> · 한양대학교 기계공학부<sup>3)</sup>

## Effect of Injector-driven Type on Spray Behavior and Fuel Atomization Characteristics

Ji Hong Park<sup>1)</sup> · Hyun Kyu Suh<sup>1)</sup> · Sung Wook Park<sup>1)</sup> · Jae Wook Kim<sup>2)</sup> · Chang Sik Lee<sup>\*3)</sup>

<sup>1)</sup>Graduate School of Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

<sup>2)</sup>Department of Automobile Engineering, Doowon Technical College, Gyeonggi 456-718, Korea

<sup>3)</sup>Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 14 February 2005 / Accepted 3 November 2005)

**Abstract** : This study was performed to figure out spray behavior and fuel atomization characteristics of a piezo-driven injector and a solenoid-driven injector in the common-rail injection system under the same design parameters and test conditions. The process of spray injection was visualized by using the spray visualization system composed of a Nd:YAG laser and an ICCD camera. The atomization characteristics were investigated in terms of axial mean velocity, Sauter mean diameter(SMD) and droplet distributions obtained from a phase Doppler particle analyzer system.

Compared with solenoid-driven injector, the piezo-driven injector has short injection delay and reaches quickly to the maximum injection value. Spray tip penetration shows some difference, however, spray angle of piezo-driven injector is wider than that of solenoid-driven injector. Sauter mean diameter of piezo-driven type injector is smaller than that of solenoid-driven type.

**Key words** : Piezo-driven injector(피에조 구동식 인젝터), Solenoid-driven injector(솔레노이드 구동식 인젝터), Common-rail injection system(코먼레일 분사 시스템), Injection rate(분사율), Spray tip penetration(분무 선단 도달 거리), Spray angle(분무각), SMD(Sauter 평균 입경)

### 1. 서론

최근 환경오염 규제가 엄격해지면서 자동차 엔진의 유해 배출 가스 저감에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 디젤 엔진의 NO<sub>x</sub>, P.M., HC와 같은 주요 유해 배출물의 저감은 매우 중요한 과제가 되고 있다. 코먼 레일 엔진은 전자제어를 통해 고압으로 연소실 내부에 연료를 직접 분사하는 방식으로 디젤 엔진의 분사량, 분사시기, 분사압력을 자유롭

게 조절하여 유해 배출 가스와 진동 소음을 저감하는 장점이 있는 것으로 알려져 있다.

코먼 레일 고압 분사 시스템에서 솔레노이드 구동 방식 밸브의 최적화에 대한 연구결과가 진행되어, Bianchid 등<sup>1)</sup>은 솔레노이드 구동 방식에 비하여 피에조 구동 방식은 30% 정도 분사 지연 시간을 줄이면서 다중 분사가 가능함을 보고하였고, Lai 등<sup>2)</sup>은 고압 분사 시스템의 디젤 분무에서 노즐의 형상과 진동, 분사압력이 분무에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 또한 Mulemane 등<sup>3)</sup>은 연소실 내 디젤 연료의 분사를 모델링 하였다. 피에조 구동방

\*To whom correspondence should be addressed.  
cslee@hanyang.ac.kr

식의 분사 시스템은 넓은 운전 범위에 적용이 가능하고 분사시기, 분사압력과 밸브를 제어하는데 솔레노이드 구동방식의 분사 시스템보다 장점이 있어 기존의 분사 시스템을 대체할 수 있을 것으로 기대되고 있다.

피에조 구동방식에 관한 연구로는 Suh 등<sup>4)</sup>이 구동방식의 차이에 따른 분사율과 분무거동의 특성을 연구하여 피에조 구동방식이 분사 지연 시간이 짧고, 동일한 분무도달거리에서 분무각이 크음을 발표한 바 있다. Koyanagi 등<sup>5)</sup>이 엔진 가시화와 연소실험을 통하여 연소특성과 NO<sub>x</sub> 개선에 영향이 있음을 보고하였다. Fettes와 Leipertz<sup>6)</sup>는 실린더 내의 분사와 연소에서 피에조 방식이 유해 배기가스가 저감되고 분무의 증발과 분무의 발달과정이 향상되는 것으로 보고하였다. 또한 Chun 등<sup>7)</sup>은 피에조 구동방식이 전류, 전력의 소비가 적고 다중분사가 가능함을 보여주었다.

피에조 소자가 반응시간이 빠르고 분무의 미세제어가 가능하여 배기가스와 연료 소비량을 향상시킬 수 있는 장점이 있다고 알려져 있으나 디젤기관에서의 분무시스템에 대한 연구는 아직 미흡하여 체계적인 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 코먼 레일식 분사시스템에서 피에조 구동방식 시스템의 분무를 분사압력과 분사시간에 따라 가시화하고, 분사율과 분무거동을 솔레노이드 구동방식의 시스템과 비교하여 거시적 분무 특성을 실험적으로 연구하였다. 또한, 인젝터 구동방식의 차이가 SMD와 속도 분포 등의 미시적 분무 특성에 미치는 영향을 분사조건의 변화에 따라 비교 관찰하고, 그 결과를 분석하여 분무 및 미립화 특성을 이해하고자 하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

#### 2.1.1 고압 분사 시스템 및 가시화 장치

연료의 고압분사를 위한 코먼 레일 분사시스템을 Fig. 1과 같이 구성하였다. 코먼 레일로 고압의 연료를 안정적으로 공급하기 위하여 두개의 고압연료 펌프(Haskel, HSF-300)를 병렬로 연결하여 사용하

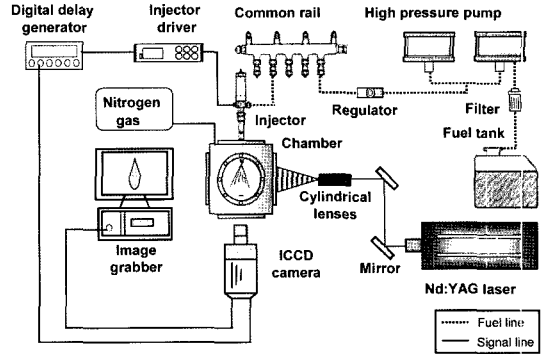


Fig. 1 High-pressure pump and spray visualization system

였으며, 펌프로 공급되는 압축공기의 압력을 이용하여 코먼 레일내의 압력을 조정하였다.

코먼 레일식 고압분사 시스템에서 피에조 구동방식 인젝터와 솔레노이드 구동 방식 인젝터의 분무 발달과정을 촬영하기 위한 가시화 시스템의 광원으로는 Nd:YAG 레이저를 사용하였고, 광학계로부터 형성된 레이저 시트 빔을 이용하여 분무의 단면을 가시화 하였다. 또한 ICCD 카메라와 인젝터 드라이버를 디지털 신호 발생기를 이용하여 동기화 하였고 이미지 그래버를 이용하여 분무의 이미지를 취득하였다.

#### 2.1.2 분사율 측정 장치

분사율의 측정은 Fig. 2와 같은 Bosch법의 원리를 이용한 분사율 측정 장치를 이용하였고, 코먼 레일 분사시스템에서 두 가지 구동방식의 분사특성을 파악함으로써, 분사 특성 예측에 필요한 측정자료와 분사율이 미치는 영향을 예측하고자 하였다.

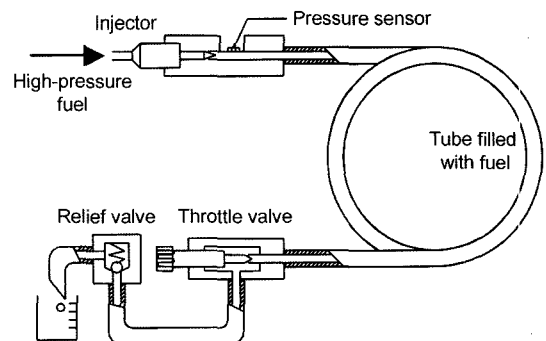


Fig. 2 Schematic diagram of fuel rate of injection meter

2.1.3 분무 입경 및 속도 측정 장치

본 실험에서는 연료 분무 액적의 입경과 속도를 구하기 위해 위상 도플러 입자 분석장치(PDPA)를 사용하였다. PDPA 시스템을 사용한 실험장치는 Fig. 3과 같으며 광원은 700mW 출력의 Ar-ion 레이저를 사용하였다. 레이저 빔은 40MHz의 주파수 편이를 가지는 각각 2개의 편이 빔과 무편이 빔으로 나누어지고, 이들 빔이 광케이블을 통하여 트랜스미터에 공급되면 빔이 교차하는 지점에 프린지가 형성된다. 연료 액적이 측정 체적을 통과하면 리시버에 산란광이 검출되고, 측정되는 신호의 위상차와 도플러 신호의 주파수는 신호처리를 통하여 연료 액적 평균 지름과 속도로 변환된다.

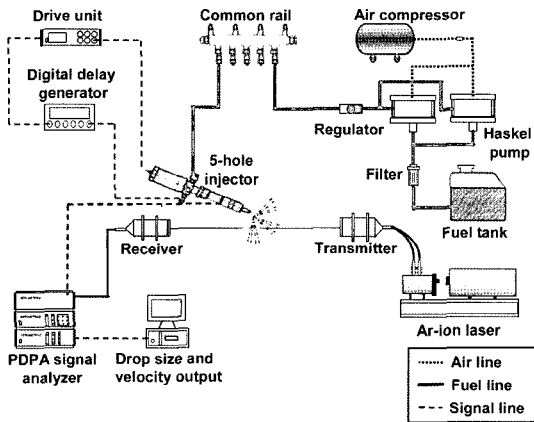


Fig. 3 Phase droplet particle analyzer system

2.1.4 실험용 인젝터

인젝터는 구동방식의 차이를 제외하고 동일한 조건의 인젝터를 사용하여 실험을 수행하였다. 솔레노이드 구동방식은 인젝터 드라이버(TDA-3200H, TEMS Co.)를 이용하여 솔레노이드에 전류를 흘려 분사시기와 간격을 제어하였다. 피에조 구동방식은 피에조 스택의 역전압 효과를 이용하는 것으로 가해지는 전류가 인젝터의 특성을 좌우하므로 시제품인 인젝터 드라이버(HVP-Diesel Ci 200/20-4, Piezo-mechanik)를 사용하여 제어하였다. 실험에 사용된 솔레노이드와 피에조 구동방식의 인젝터를 Fig. 4(a)에 나타내었다. Table 1은 실험에 사용된 인젝터의 제원이다.

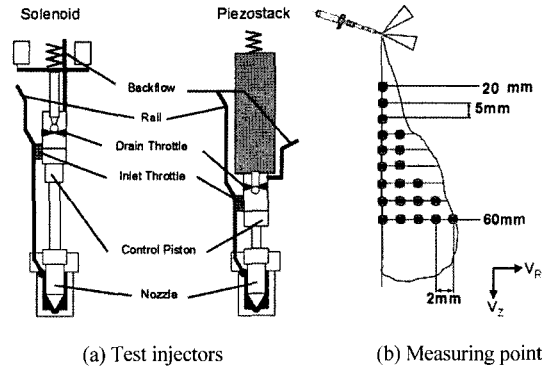


Fig. 4 Test injectors and measuring point

Table 1 Specifications of experimental injector

Nozzle driven type	Nozzle type	Number of holes	Hole diameter (mm)	Sac volume (mm <sup>3</sup> )
Piezo	Mini-sac	5	0.168	0.24138
Solenoid	Mini-sac	5	0.168	0.24138

2.2 실험 방법

구동방식의 차이에 따른 분무의 가시화와 분사율의 측정을 위해 분사압력은 60MPa, 80MPa, 100MPa로, 분위기 압력은 고압 챔버에서 대기압(0.1MPa)과 1MPa, 3MPa로, 분사기간은 0.3ms부터 0.7ms까지 0.1ms간격으로 변화시켜가며 실험하였다. 분사의 시작점은 인젝터의 노즐팁에서 분무가 보이는 시점으로 정의하였으며, 분무 가시화의 촬영은 분사시작 후 0.1ms부터 2.0ms까지 0.1ms간격으로 촬영하였다. 구체적인 실험 조건은 Table 2와 같다.

또한, 구동방식의 차이에 따른 미립화 특성을 비교하기 위해 분사압력은 60MPa로 고정하였고, 분사기간은 0.3ms, 0.5ms, 0.7ms로 0.2ms간격으로 변화시켜가며 실험하였다. 측정 지점은 Fig. 4(b)와 같이 노즐 팁으로부터 축 방향 20mm지점부터 60mm 지점까지 5mm간격으로 측정하였고 축 방향 35mm

Table 2 Experimental conditions

Injection system	Common-rail
Injector type	Piezo-driven type Solenoid-driven type
Injection pressure (P <sub>inj</sub> )	60MPa, 80MPa, 100MPa
Ambient pressure (P <sub>amb</sub> )	0.1MPa, 1MPa, 3MPa,
Injection duration (T <sub>D</sub> )	0.3ms, 0.4ms, 0.5ms, 0.6ms, 0.7ms

지점부터 60mm지점까지 분무 중심축에서 반경방향으로 2mm간격으로 측정하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 분사율 측정 결과

분사율 측정 장치를 이용하여 측정한 분사율의 특성을 Fig. 5에 나타내었다. 동일한 분사 압력에서 분사율의 특징을 비교한 결과, 분사 압력이 80MPa 인 경우의 피에조 구동방식은 솔레노이드 구동방식보다 분사 지연시간이 약 0.1ms정도 짧은 것으로 나타났다고, 분사시간이 0.3ms일 때를 제외하고는 분사 최대값이 거의 일정하게 나타났다.

이것은 분사시간 0.3ms가 분사 최대값에 도달하기에는 짧은 시간이기 때문인 것으로 생각된다. 반면에 솔레노이드 구동방식은 분사율의 최대값이 분사시간이 커질수록 점차 증가하는 경향을 보였다.

동일한 분사 압력과 동일한 분사시간에서의 분사율 특성은 피에조 구동방식이 전 영역에서 솔레노이드 구동방식보다 높은 값을 나타내었다.

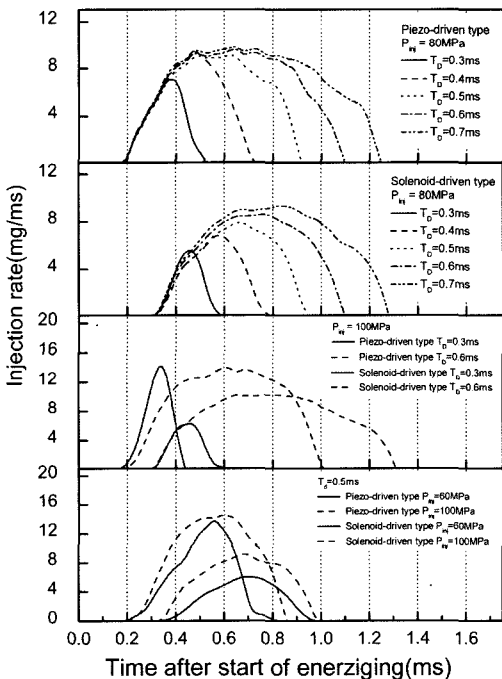


Fig. 5 Comparison of injection rate according to the injection duration and injection pressure

#### 3.2 분무 도달거리 비교

##### 3.2.1 자유분무의 분무도달거리

Fig. 6은 자유분무의 발달과정을 분사시작 후 분사 압력과 분사시간의 경과에 따라 나타낸 것이다. 피에조 구동방식과 솔레노이드 구동방식 모두 분사 시간과 분무 선단 도달거리가 비례 관계에 있는 것으로 나타났다.

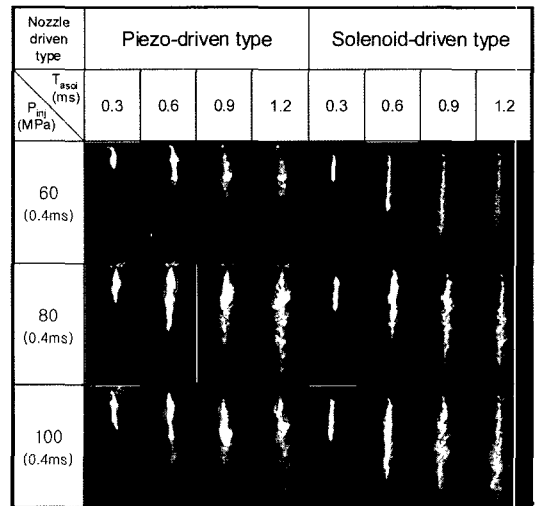


Fig. 6 Process of spray development as a function of time after start of injection

피에조 구동방식은 솔레노이드 구동방식보다 분무량이 많고 분무각이 큰 것으로 나타났다. 이러한 경향은 분사율 실험의 결과와 일치하는 것으로 보인다.

분사시간에 따른 분무의 발달 과정은 동일한 분사 압력에서 분사시간이 길어질수록, 분사압력에 따른 분무의 발달과정은 분사압력이 증가할수록 빠른 분무 성장을 보여주었으며, 분무 선단 도달거리가 증가하였다.

동일한 분사 압력과 분사시간에서 구동방식의 차이에 따른 분무 선단 도달거리를 Fig. 7에 나타내었다. 동일한 분무 조건하의 두 구동방식의 분무 선단 도달거리는 큰 차이를 보이지 않았고, 분무각은 피에조 구동방식이 큰 값을 가지는 것으로 나타났다.

##### 3.2.2 분위기 압력에 따른 분무도달거리

분위기 압력을 0.1MPa, 1MPa, 3MPa로 변화시키

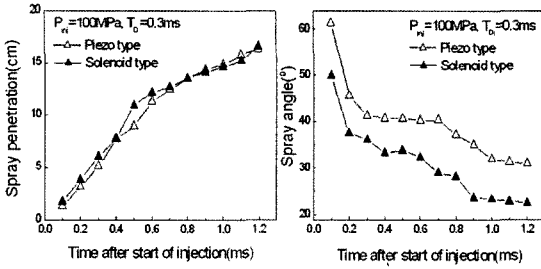


Fig. 7 Effect of driven type of injector on spray tip penetration and spray cone angle

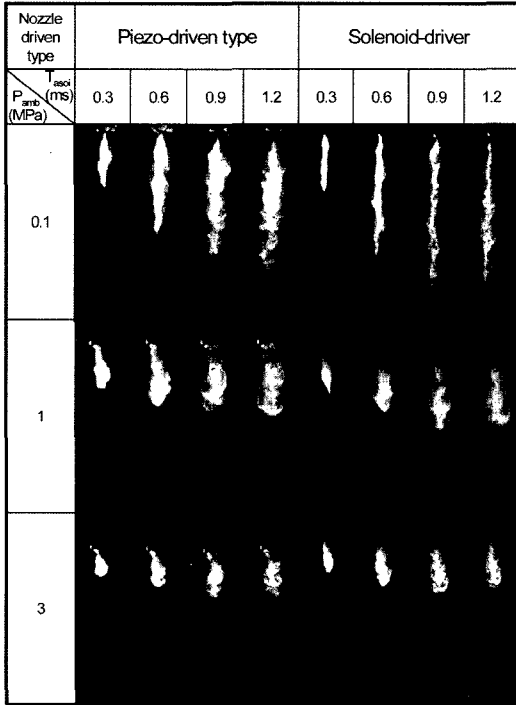


Fig. 8 Process of spray development according to the ambient pressure ( $P_{inj}=80MPa$ )

면서 분무 선단 도달거리를 측정하였다.

Fig. 8은 분사 압력이 80MPa인 경우의 분위기 압력에 따른 분무의 발달과정을 나타낸 것이다. 자유 분무의 경우 앞의 결과와 동일한 결과를 보였고 분위기 압력이 증가할수록 분무 선단 도달거리가 두 구동방식 모두 감소하는 경향을 보였다.

실험을 통해 얻은 분무 거동의 이미지를 분석한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 분무 선단 길이는 구동 방식에 상관없이 자유분무의 경우가 가장 길고 분위기 압력이 증가할수록 짧아지는 경향을 보였다.

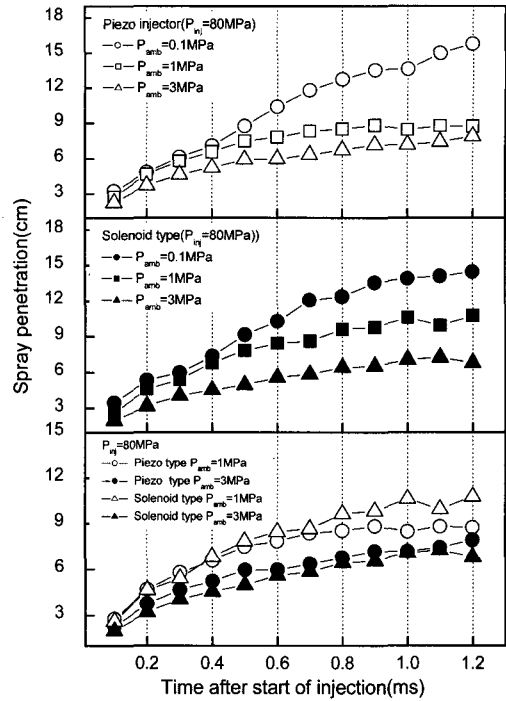


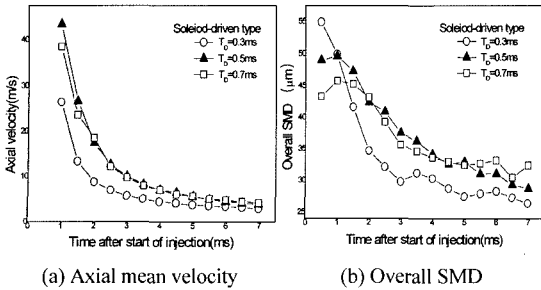
Fig. 9 Effect of ambient pressure on spray tip penetration

동일한 분위기 압력 1MPa인 경우에 분무 선단 도달 거리는 피에조 구동방식이 솔레노이드 구동방식에 비해 분무 선단 도달거리가 짧은 경향을 보였는데 Fig. 8에서 보는 바와 같이 분무각이 커서 분무각이 작은 솔레노이드 구동방식에 비해 분무의 성장이 지연되어 감소하는 것으로 판단된다. 반면에 동일한 분위기 압력 3MPa인 경우에는 피에조 구동방식의 분무 선단 도달거리가 긴 것으로 나타났다. 이것은 순간적으로 빠른 속도와 운동량을 가진 연료를 분사하는 피에조 구동방식의 특성상 높은 분위기 압력 하에서 먼저 분사된 연료가 분무 성장을 방해하는 마찰과 항력을 감소시켜 나타난 결과라고 판단된다.

### 3.3 분무 미립화 특성

#### 3.3.1 Solenoid-driven type의 미립화 특성

솔레노이드 구동방식의 분사시간에 따른 축 방향 속도를 Fig. 10(a)에 나타내었다. 분사 시작 후 6ms까지 분사시간 0.3ms일 때가 가장 느리게 나타났으나 6ms 이후에서는 모든 조건의 축 방향 속도가 거의



(a) Axial mean velocity (b) Overall SMD  
 Fig. 10 Comparison of the axial mean velocity and overall SMD according to the Tasoi ( $P_{inj}=60MPa$ ,  $P_{amb}=0.1MPa$ )

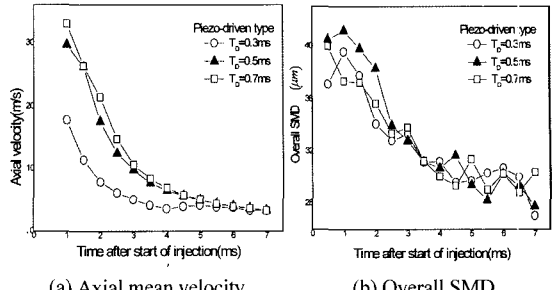
일치하였다. 분사시간 0.5ms와 0.7ms의 속도는 분사 초기부터 분사 후기까지 일치하였다.

Fig. 10(b)에는 분사시간에 따른 SMD를 나타내었다. 분사 초기의 SMD는 분사시간이 짧을수록 크게 나타났다. 분사시간이 0.5ms일 때와 0.7ms일 때의 SMD는 분사 시작 후 2ms에서부터 거의 일치하였다. 분사시간이 0.3ms일 때 초기값이 가장 크게 나타났으나 분사 시작 후 3ms까지 급격히 감소한 후 SMD는 25m에서 30m 사이에서 수렴하였다. 이것은 분사 초기에 인젝터의 니들이 완전히 열리지 않아 완전한 분무의 형상을 갖추지 못했기 때문에 SMD가 작게 나타나는 것으로 생각된다. 이러한 이유로 분사시간이 0.3ms일 때 축 방향 속도가 가장 느리게 나타나는 것으로 판단된다.

**3.3.2 Piezo-driven type의 미립화 특성**

피에조 구동방식의 분사시간에 따른 축 방향 속도를 Fig. 11(a)에 나타내었다. 솔레노이드 구동방식과 비슷하게 분사 시작 후 5ms까지 분사시간 0.3ms일 때가 가장 느리게 나타났으나 5ms 이후에서는 모든 조건의 축 방향 속도가 거의 일치하였다. 분사시간이 0.3ms인 경우를 제외한 나머지 두 개의 조건에서는 축 방향 속도가 전 구간에서 일치하였다. 이것은 솔레노이드 구동방식과 마찬가지로 분사시간이 0.3ms일 때는 분무의 완전한 형상이 형성되기에는 짧은 시간이기 때문에 축 방향 속도가 분사시간 0.5ms와 0.7ms보다 작게 나오는 것으로 생각된다.

반면에 SMD는 Fig. 11(b)에 나타나듯이 분사시간에 상관없이 3가지 조건의 SMD가 일치하였다. 0.3ms의 축 방향 속도가 다른 조건에서의 축 방향 속



(a) Axial mean velocity (b) Overall SMD  
 Fig. 11 Comparison of the axial mean velocity and overall SMD according to the Tasoi ( $P_{inj}=60MPa$ ,  $P_{amb}=0.1MPa$ )

도보다 느림에도 불구하고 SMD가 모든 조건에서 일치한다는 것은 응답시간이 빠르고 분무의 미세제어가 가능한 피에조 소자의 특징 때문으로 판단하였다.

**3.3.3 분무 미립화 특성의 비교**

인젝터의 구동방식이 분무 미립화 특성에 미치는 영향을 축 방향 속도와 SMD의 결과를 통하여 비교하였다.

Fig. 12는 동일한 분사시간에 인젝터의 구동방식에 따른 SMD와 축 방향 속도를 비교한 것이다. 분사시간에 따른 SMD의 비교결과, 분사시간이 0.3ms인 경우의 SMD는 분사초기에는 솔레노이드 구동방식이 큰 값을 보였으나, 시간의 경과에 따라 차이가 감소하여 분사시작 후 2ms지점부터 거의 차이를 보이지 않았다. 반면에 0.7ms로 분사시간이 증가할 경우에는 분무초기부터 솔레노이드 구동방식이 높은 액적지름(SMD)를 가지는 것을 볼 수 있었다. 따라서, 분사시간이 길어질수록 두 구동방식 간의 SMD의 차이는 증가하며, 피에조 구동방식이 분무 미립화가 활발히 일어나 작은 SMD값을 가진다고 판단된다. 분사율 측정실험을 통하여 분무가 완전히 발달된다고 생각되는 분사시간 0.7ms의 경우에는 거의 동일한 축 방향 속도에서 피에조 구동방식의 SMD값이 작은 것으로 나타났는데, 피에조 소자의 빠른 응답성으로 인하여 최대 분사율에 도달하는 시간이 짧고, 인젝터 홀의 진공 현상이 분무 미립화에 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다.

축 방향 속도를 비교한 결과는 시간의 경과에 따라 두 구동방식 모두 축 방향 속도가 감소하여 일정

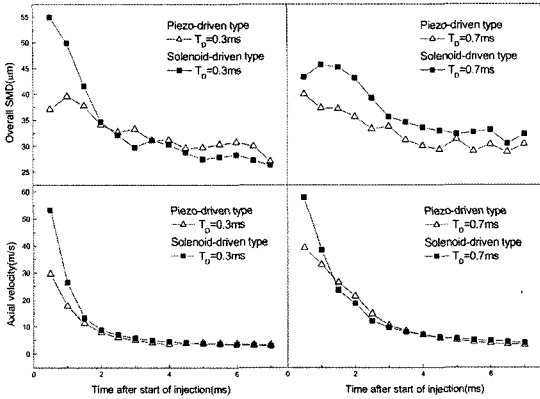


Fig. 12 Comparison of overall SMD and axial mean velocity

한 값에 수렴하는 경향을 보였으며, 분무초기에는 솔레노이드 구동방식이 높은 축 방향 속도를 보였으나, 분무가 진행될수록 축 방향 속도의 차이는 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 SMD의 비교 결과에도 영향을 미친다고 판단되는데, 분무초기에 피에조 구동방식이 솔레노이드 구동방식에 비해 SMD가 작기 때문에 축 방향속도도 솔레노이드 구동방식에 비하여 낮은 값을 가진다고 사료된다.

두 구동방식의 축 방향 거리에 따른 액적의 입경과 축 방향 속도와의 상관관계를 Fig. 13에 나타내었다. 피에조 구동방식의 경우, 솔레노이드 구동방식에 비하여 직경이 작고 축 방향 속도가 높은 액적들이 분포하는 것으로 나타났다. 또한, 축 방향 거리가 증가할수록 두 구동방식 모두 미립화의 영향으로 축 방향 속도와 액적의 직경이 감소하였다. 반면에, 축 방향 거리가 멀어질수록 측정된 액적의 전체의 평균 축 방향 속도는 작아지는 경향을 보였으나 액적의 최대속도는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 최대 속도를 갖는 액적은 입경이 매우 작은 액적들로 나타났는데 분무시작 후 하류로 진행할수록 속도의 증가에 의해 증발이나 운동량이 작은 액적들과의 충돌 및 합체 등으로 운동량에 변화가 발생하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 14는 인젝터의 반경 방향 거리에 따른 액적의 입경과 반경 방향 속도와의 상관관계를 나타낸 것이다. 피에조 구동방식은 솔레노이드 구동방식에 비해서 직경의 크기는 비슷하고 반경 방향 속도가 높은 액적들이 분포하는 것으로 나타났다. 이것

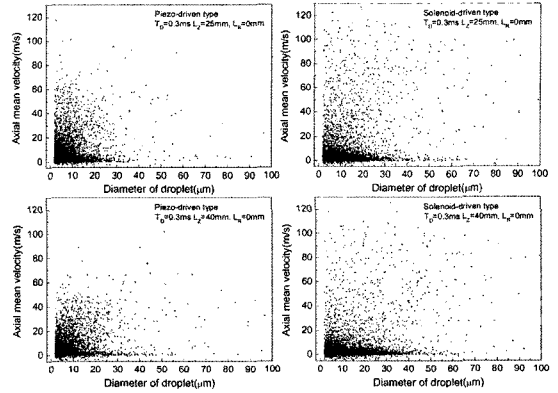


Fig. 13 Correlation between diameter and axial mean velocity according to the axial distance

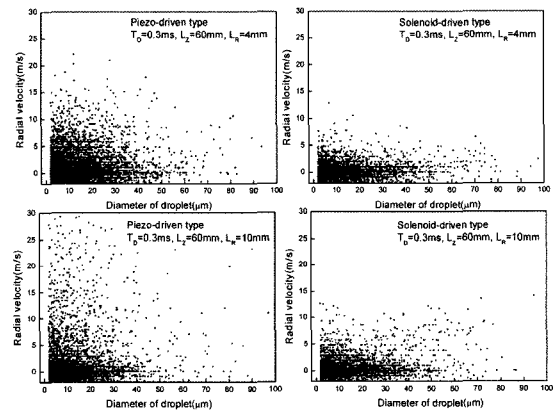


Fig. 14 Correlation between diameter and radial mean velocity according to the axial distance

은 피에조 구동방식의 분무각이 솔레노이드 구동방식의 분무각보다 크기 때문에 반경 방향 속도 또한 크게 나타난다고 판단된다. 또한 반경 방향 거리가 증가할수록 두 구동방식 모두 미립화의 영향으로 축방향 속도와 액적의 직경이 감소하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서 인젝터의 구동방식에 따른 고압 분사 시스템에서의 분무거동과 미립화 특성의 영향을 실험적으로 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 피에조 구동방식이 솔레노이드 구동방식에 비하여 분사 기간과 분사 압력이 증가할수록 높은 분사율을 보였고, 그 증감의 기울기가 큰 것으로 나타났다.

- 2) 피에조 구동방식의 인젝터는 솔레노이드 구동방식의 인젝터에 비하여 동일한 실험조건에서 연료의 분사량이 많고 분무각이 큰 것으로 나타났다.
- 3) 분위기 압력에 따른 분무의 발달과정은 피에조 구동방식이 상대적으로 낮은 분위기 압력에서는 넓은 분무각의 영향으로 분무의 성장이 지연되며, 높은 분위기 압력에서는 먼저 분사된 연료가 분무의 성장을 도와 분무 선단 도달거리가 길게 나타난다.
- 4) 두 가지 구동방식에서 축 방향 속도는 완전한 분무의 형상을 갖추지 못하는 분사 초기의 0.3ms에서 가장 느리게 나타났으며, SMD의 경우 솔레노이드 구동방식에서는 분사 초기 0.3ms에서 가장 작게 나타났으며 피에조 구동방식에서는 3가지 조건에서 거의 일치하였다.
- 5) 분사기간이 길어질수록 두 구동방식 간의 SMD 차이는 증가하며, 피에조 구동방식의 분무미립화가 활발히 일어나 낮은 SMD값을 가진다.
- 6) 축 방향 거리가 증가할수록 두 종류의 구동방식 모두 미립화의 영향으로 축 방향 속도와 액적의 직경이 감소하였다. 피에조 구동방식의 경우, 솔레노이드 구동방식에 비하여 직경이 작고 축 방향 속도가 높은 액적들이 분포하는 것으로 나타났으며, 반경 방향 속도가 큰 액적들이 많이 분포하는 것으로 나타났다.

## 후 기

본 연구는 교육인적 자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 최우수실험실지원 사업 및 환경부 Eco-STAR project(무 저공해 자동차 사업단)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

- 1) G. M. Bianchi, P. Pelloni, F. Filicori and G. Vannini, "Optimization of the Solenoid Valve Behavior in Common-Rail Injection Systems," SAE 2000-01-2042, 2000.
- 2) M.-C. Lai, T. C. Thomas Wang, X. Xie, J.-S. Han, N. Henein, E. Schwarz and W. Bryzik, "Microscopic Characterization of Diesel Sprays at VCO Nozzle Exit," SAE 982542, 1998.
- 3) A. Mulemane, J.-S. Han, S. Subramaniam, P.-H. Lu, S. J. Yoon and M.-C. D. Lai, "Modelling Dynamic Behavior of Diesel Fuel Injection Systems," SAE 2004-01-0536, 2004.
- 4) H. K. Suh, S. W. Park, J. W. Kim, and C. S. Lee, "Injection Characteristics and Spray Behavior of Fuel Spray Injected by a Piezo-Driven Injector," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.363-368, 2004.
- 5) K. Koyanagi, H. Oing, G. Renner and R. Maly, "Optimizing Common Rail-Injection by Optical Diagnostics in a Transparent Production Type Diesel Engine," SAE 1999-01-3646, 1999.
- 6) C. Fettes and A. Leipertz, "Potentials of a Piezo-Driven Passenger Car Common Rail System to Meet Future Emission Legislations-An Evaluation by Means of In-Cylinder Analysis of Injection and Combustion," SAE 2001-01-3499, 2001.
- 7) D.-P. Chun, J.-S. Lim, S.-Y. Ahn, H.-S. Shin and W.-J. Yoo, "Piezo Injector Driving Circuit in Diesel Common Rail System." Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.391-396, 2003.