

커먼레일 직접분사(CRDi)용 고압 디젤인젝터의 구동방식별 Pilot Spray 특성비교 (II) - 솔레노이드 및 피에조 구동방식 비교분석 -

이 진 옥*

Comparison of Pilot Spray Characteristics of HP Diesel Injectors with Different Driving Method for CRDi System (II)

Jin Wook Lee

Key Words: Common-rail System(커먼레일 시스템), Pilot Spray(사전분무), Solenoid-driven Injector(솔레노이드 구동 방식 인젝터), Piezo-driven Injector(피에조 구동방식 인젝터)

Abstract

The capability of pilot injection with small fuel quantity at all engine operating conditions is one of the main feature of the common rail direct injection system. The purpose of the pilot injection is to lower the engine noise and to reduce the NOx emissions. This study describes the pilot spray structure characteristics of the common-rail diesel injectors with different electric driving characteristics, including solenoid-driven and piezo-driven type. Namely three common-rail injectors with different electric current wave were investigated in this study. The pilot spray characteristics such as spray speed, spray tip penetration, and spray angle were obtained by spray images, which is measured by the back diffusion light illumination method with optical system for high-speed temporal photography. As this research results, it was found that pilot injection of common-rail system was effected by rate of injection with different electrical characteristic for injector driving.

기호설명

TDC : Top dead center

CRDi: Common-rail Direct Injection(커먼레일 직접분사)

ID_M : Main injection duration(주 분사 기간)

ID_P : Pilot injection duration(사전분사 기간)

Q_M : Main fuel quantity(주 분사 연료량)

Q_P : Pilot fuel quantity(사전분사 연료량)

P_i : Pressure of fuel injection [MPa]

P_c : Cylinder Pressure [MPa]

1. 서 론

글로벌 온난화규제가 본격화되면서 자동차 산업은 기술과 정책에 대한 새로운 각도에서 재평가 필요성이 제기되고 있는 실정이다. 이러한 맥락의 일부로, 향후 발효될 자동차 CO₂ 규제에 대비하여 디젤엔진에 대한 사회적 인식의 전환과 첨단엔진 기술개발이 요구되고 있다. 커먼레일을 적용한 초고압 직분식(direct injection) 디젤엔진은 이와 같은 환경규제에 대응하기 위하여 세계 주요 선진국 및 자동차회사에서 치열한 기술개발 경쟁을 벌이고 있는 첨단 친환경엔진이며, 가솔린 엔진에

(2010년 2월 17일 접수~2010년 6월 9일 심사완료, 2010년 6월 15일 게재확정)

*책임저자, 회원, 숭실대학교 기계공학과

E-mail : immanuel@ssu.ac.kr

TEL : (02)820-0929 FAX : (02)820-0668

비해 연료절감 및 CO₂ 배출감소 효과가 큰 것으로 알려져, 최근에 이에 대한 새로운 연구가 활발히 진행되고 있다⁽¹⁾.

이러한 직접분사식 디젤엔진에 적용되는 커먼레일 (common-rail) 시스템의 주된 특징은 엔진회전수와 관계 없이 인젝터의 연료공급압력을 제어하여 사전분사(pilot injection)를 통한 엔진소음 및 NO_x 저감을 할 수 있다는 것이다. 또한 이후에 발생하는 연소장내에서 전개되는 주분사에 지대한 영향을 끼치게 된다. 즉, 연소실내 가연범위로 혼합된 연료-공기 혼합물의 점화지연기간이 짧아져 빠르게 연소가 일어나게 되며, 연료액적의 증발 시간도 짧아짐과 동시에 연소실내에서의 급격한 연소압의 증가를 방지할 수 있다⁽²⁾.

따라서 본 연구는 짧은 시간 내 소량의 연료를 사전 분사하는 커먼레일 시스템에 사용되는 고압 디젤인젝터의 서로 다른 구동방식별로, 연소장 형성 이전에 발생하는 사전분무(pilot spray)의 특성을 정량적으로 비교·분석하고자 수행하였다. 이를 위해서, 이미 실제 직접분사식 디젤엔진 실험을 통해 구한 사전분사 특성을 고려하여⁽³⁾ 서로 다른 구동방식별로 사전분무 특성을 해석하고자 한다.

2. 인젝터 구동방식 분석

현재 상용화 되어 있는 커먼레일 시스템용 고압 디젤 인젝터는 솔레노이드 코일(solenoid coil) 또는 피에조 스택(piezo stack)에 의하여 인젝터의 니들 밸브(needle valve)를 개폐하는 방식이며, 일반 가솔린 인젝터와 달리 구동전류가 크다. Fig. 1은 커먼레일 적용 인젝터의 전류파형을 나타낸 것이다. Fig. 1(a)는 솔레노이드 구동방식으로써 Peak and Hold 방식으로 전류를 제어하고 있으며, 전류 상승시간(rising time)과 하강시간(falling

time)을 제어하여 인젝터의 응답성을 높이고 있다.

Fig. 1(b)는 1(a)와 동일한 구동방식을 사용하나, 전류 상승에 있어 차이를 보이고 있다. 따라서 솔레노이드 인젝터의 작동 전체기간 동안에는 구동 인가 전압이 ON/OFF상태로 펄스폭을 조절(pulse width modulation, PWM)하면서 낮은 저항 값을 가지는 코일 특성을 통해 피크 전류 및 홀드 전류를 제어하게 된다. 반면에 Fig. 1(c)의 피에조 구동방식의 경우, Charging and Discharging 방식의 전류 구동을 하고 있으며, 초기 Peak 전류값에 도달한 후 피에조의 특성으로 니들을 유지하며, charging 기간 동안에 분사가 이루어진다.

3. 실험장치 및 실험방법

서로 다른 구동방식을 가지는 디젤인젝터들에 대한 사전분무 특성을 해석하고자, 실제 2.0 L급 직분식 디젤 엔진에서 구한 분사맵(injection map)을 기준으로 하여 실험조건을 설정한 후, 각 인젝터별로 실제 연소실내 벽면과의 충돌을 배제한 자유분무에 대해 고속 분무 이미

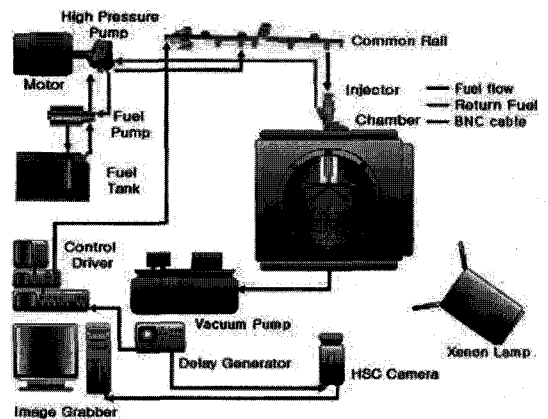
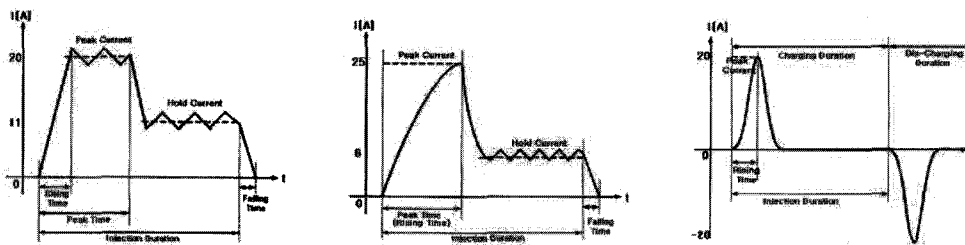


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup



(a) Solenoid-driven type(A) (b) Solenoid-driven type(B) (c) Piezo-driven type

Fig. 1 Driving current wave characteristics of three different Diesel injectors

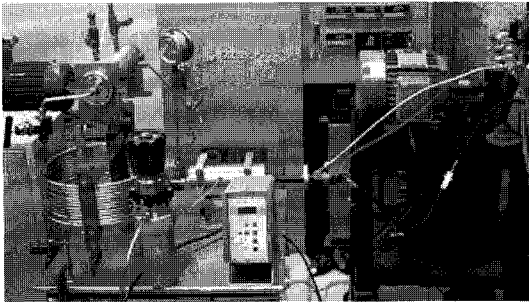
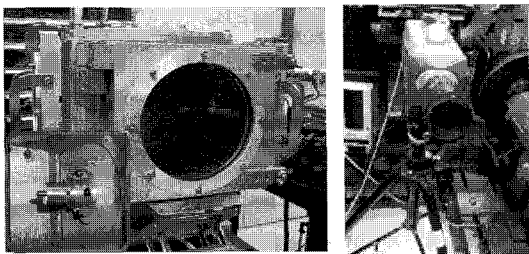


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus for measuring injection rate



(a) Spray Chamber (b) H.S. camera

Fig. 4 Experimental setup of spray visualization

지 획득을 통한 실험적 해석을 수행하였다. 이를 위한 커먼레일 시스템에서 인젝터 구동방식별 고압분사 해석용 실험장치는 크게 고압연료 시스템, 분무 가시화 시스템으로 구분하여 Fig. 2와 같이 구성하였다.

첫째, 고압 연료시스템으로써, 커먼레일내 고압연료를 저장하기 위해서 실제 자동차용 엔진에 적용되는 고압펌프를 이용하여 200 MPa까지 가압할 수 있었으며, 본 실험에서는 최대 3.7 kW(60 hz, 2000 rpm)출력을 발생시키는 DC 모터에 의해 구동되게끔 직렬로 장착하였다. 분무실내 분사된 연료는 배기펌프(680 mmHg)를 통해 순간적으로 분무실을 빠져 나가도록 구성하였다. Fig. 3의 커먼레일은 배기량 2.0 L 디젤엔진에 적용되는 동일시스템을 적용하여 분사율을 측정하였다. 이러한 고압연료는 인젝터를 통해 분사되는데, 분사기간 및 분

사압력은 별도의 인젝터 드라이버(TDA-3200H)를 사용하여 제어되도록 하였다.

다음으로, 고압분무 가시화 시스템의 경우, 분무 가시화를 위해 Fig. 4(a)와 같이 시스템을 구성하였다. 분무실 챔버의 전체 크기는 350(L)×320(B)×250(H)mm이며, 챔버의 수직면에 인젝터 어댑터를 설치하였다. 분무현상을 관측하기 위해 설치한 창(window)은 직경 200 mm, 두께 20 mm의 석영(quartz)으로 제작하였다. 분무 이미지 획득을 위해 Fig. 4(b)와 같은 50,000 fr/s인 High Speed Camera(Phantom v7.0)를 사용하였으며, 광원으로는 제논램프(최대출력 2 kw)를 이용하였다. Pilot 분사와 카메라 촬영의 동기화를 위해 Pulse generator(DG 535)를 이용하여 고속의 이미지를 획득하였다.

실험에 적용한 커먼레일용 인젝터 중, 솔레노이드 방식은 상용화 인젝터이고, 피에조 방식은 솔레노이드 A와 같은 니들부를 공유하며, 7A의 전기적 용량을 가진 시제품이다. Table 1은 실험에 적용한 인젝터의 제원을 나타낸 것인데, 피에조 인젝터는 solenoid A-1과 같은 분공수와 HFR(hydraulic fuel rate) 값을 갖는다.

4. 실험결과 및 고찰

서로 다른 구동 방식의 인젝터로부터 분사되는 고압 연료의 분무에 대한 특성을 해석하기 위하여, 동일한 조건하에서 2회 반복 측정하여 분무발달과정을 비교하여 분석하였다. Fig. 5는 4개 인젝터의 분사압력을 130 MPa인 조건하에서 사전분사기간을 250 μs로 설정하여 카메라 노출시간을 37 μs로 촬영한 분무발달과정이다. 고압분사가 진행되는 동안 Solenoid A(이하, 솔레노이드 인젝터)와 Piezo 인젝터에서는 거의 비례적인 분사길이와 분사각을 형성하며 발달하였지만, Solenoid B는 다소 비대칭적인 분무 발달과정을 보였다. 또한 인젝터의 종류에 따라 분사파라미터별 수치적인 차이가 나타남을 알 수 있는데, 이는 인젝터의 구동방식에 따른 영향으로 판

Table 1. Specification for CRDi Diesel injectors

Driven Type	Peak Current(A)	Hold Current(A)	Rising Time(μs)	Number of Holes	HFR	
Solenoid	A-1	22	12	160	5	400
	A-2	22	12	160	6	440
	B	25	6	260	6	440
Piezo	7	-	-	5	400	

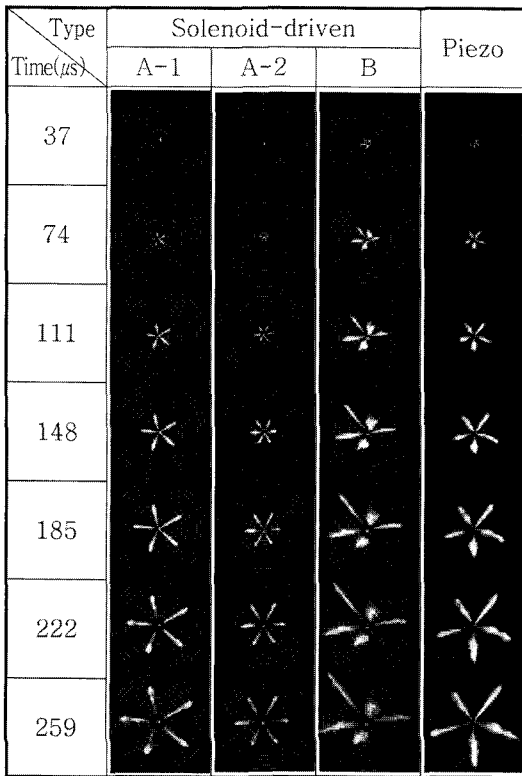
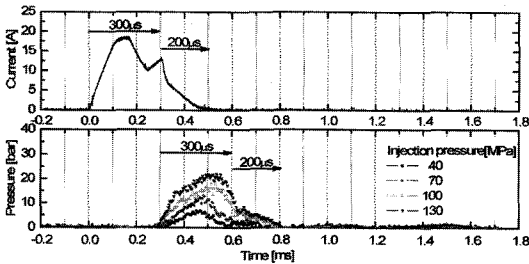
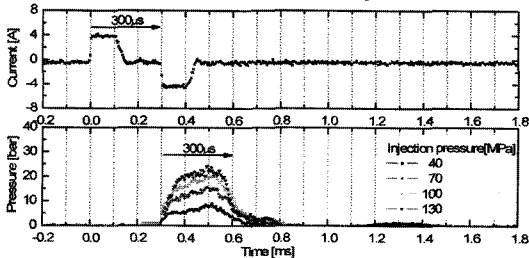


Fig. 5 High-speed temporal spray image



(a) Solenoid-driven injector

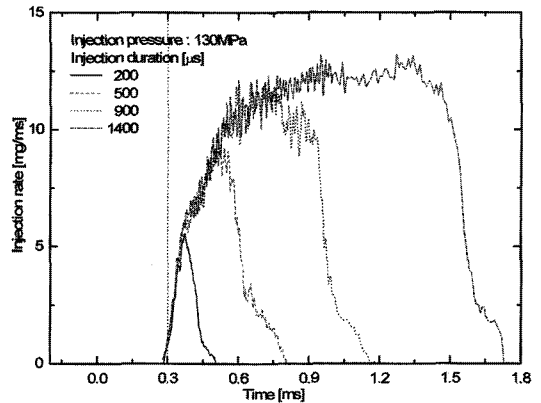


(b) Piezo-driven injector

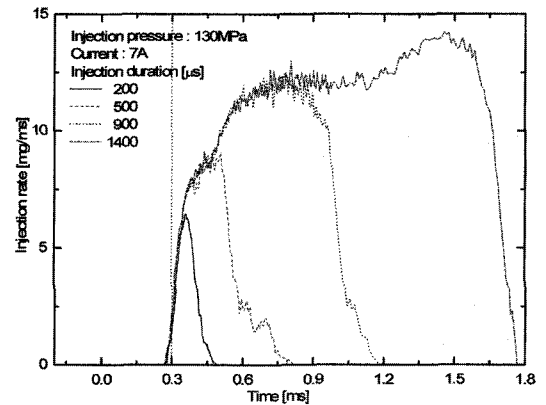
Fig. 6 Driving current and pressure variation of two injectors for measuring injection rate

단된다.

서로 다른 4가지 분사압력에 대하여 솔레노이드 인젝



(a) Solenoid-driven injector



(b) Piezo-driven injector

Fig. 7 Effects of injection duration on injection rate of two injectors

터와 피에조 인젝터의 구동 입력 전류 파형과 분사율을 구하기 위해 측정된 압력을 Fig. 6에 나타내었다. 두 인젝터 모두, 분사압력이 증가할수록 분사율은 정성적으로 증가하는 특성을 보이나, 분사율 패턴은 서로 다를 수 있었다. Fig. 7은 분사 압력 130 MPa, 분위기 압력 0.1 MPa의 경우, 서로 다른 4가지 분사시간에 대한 분사율 특성을 나타낸 것이다. 피에조 인젝터의 구동 조건은 구동 전압 120 V이며, 입력 전류는 7 A이다. 분사 시간이 증가함에 따라 두 인젝터 사이의 분사율 차이는 증가함을 알 수 있었다.

또한 최대 분사율의 위치는 분사시간이 길수록, 뚜렷한 차이를 보이나, 짧은 분사시간의 경우에는 상대적으로 비슷함을 알 수 있었다. 전반적으로 동일조건일때, 피에조인젝터가 솔레노이드인젝터보다 더 큰 분사율을 가짐을 알 수 있었다.

Figure 8은 솔레노이드 인젝터와 구동전압 120 V와

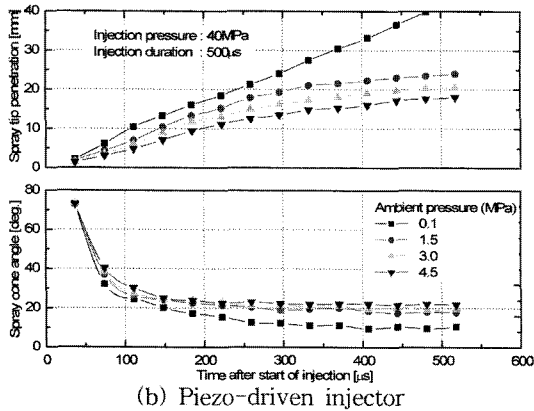
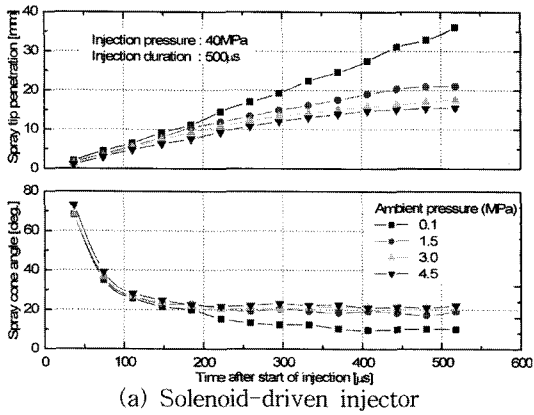


Fig. 8 Effect of ambient pressures on spray cone angle and spray tip penetration for two injectors

구동전류 7 A조건으로 구동된 피에조 인젝터에 대하여, 분사 압력 40 MPa과 분사기간 500 μ s인 경우, 4가지 분위기 압력별로 구한 분무 선단 관통거리 및 분무각의 변화를 나타낸 것이다. 여기서, 분무각은 노즐분공으로부터 분무의 중심을 따라 역광조명(back-light)의 80% 이상 투과로 취득된 최대 분무경계와 만나는 두 점을 노즐분공에 그은 직선과 각각 만나게 될 때, 직선이 이루는 각으로 정의하였다.

두 인젝터 모두, 분위기 압력이 증가함에 따라 분무 선단 관통거리는 짧아지고, 분무각은 커짐을 알 수 있었다. 이러한 분위기 압력의 증가에 따른 분무각과 분무 선단 관통거리의 감소 및 증가의 경향은 분위기 압력이 상압인 경우를 제외하고는 약 100 μ s이내까지는 비슷한 경향을 유지한 채, 분무가 성장됨을 알 수 있다. 이 후부터는 피에조 인젝터의 경우, 분무 선단 관통거리가 더 빠르게 증가하는데, 이는 인젝터 노즐을 통한 지속적 고압 연료 공급이 상대적으로 빨리 이루어지기 때문이다.

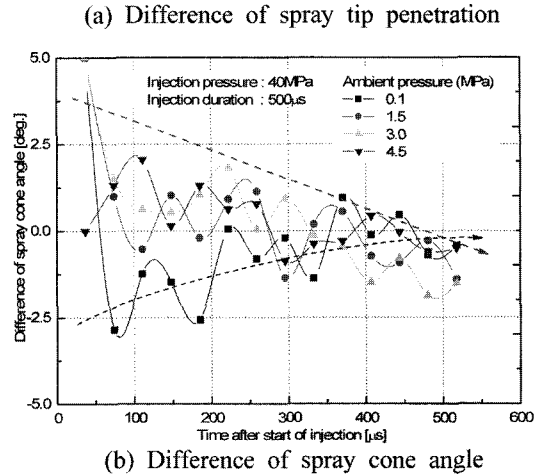
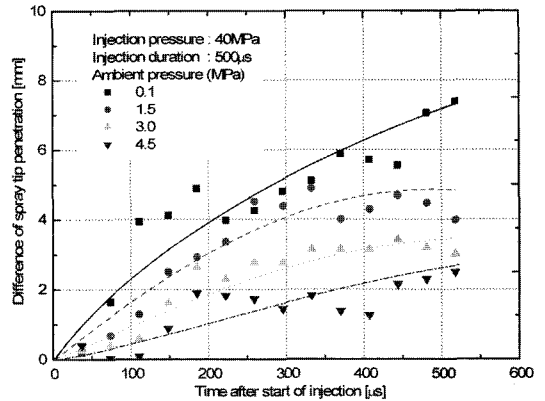


Fig. 9 Differences in spray characteristics between solenoid-driven injector and piezo-driven injectors

이러한 특징을 자세히 살펴보고자 피에조 인젝터의 분무 선단 관통거리와 분무각에 대하여 솔레노이드 인젝터의 분무 선단 관통거리와 분무각과의 차이 즉, 피에조 인젝터의 분무 특성 값에서 솔레노이드 인젝터의 분무 특성 값을 뺀 차이의 경향을 Fig. 9에 나타내었다. 분무 선단 관통거리의 차이는 분사 시간이 경과함에 따라 더욱 커지지만, 분위기 압력이 상압인 경우, 최대값을 가지며, 분위기 압력이 증가할 경우, 이 값은 점차 감소됨을 알 수 있다. 반면, 분사각의 차이는 분위기 압력의 유무에 따라 서로 상반되는 경향을 보인다. 상압의 분위기 압력인 경우, 솔레노이드 인젝터의 분무 폭이 분사 초기에는 상대적으로 크지만, 이 차이는 분무가 발달됨에 따라 점차 감소됨을 알 수 있으며, 분위기 압력이 증가할 경우, 분사 초기에 상대적으로 큰 피에조 인젝터의 분무 폭이 생성됨을 알 수 있었다.

Figure 10은 분사 압력 130 MPa, 분위기 압력 3 MPa,

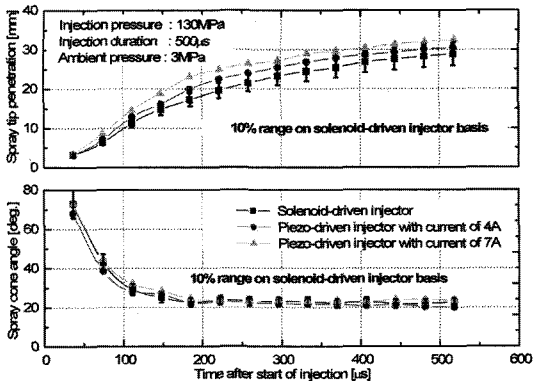


Fig. 10 Comparison between solenoid-driven injector and piezo-driven injector with different induced currents along the variation of spray cone angle and spray tip penetration

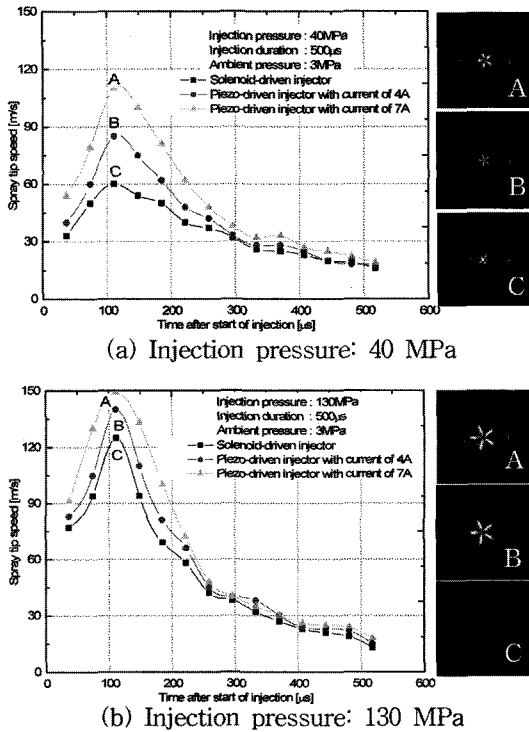


Fig. 11 Comparison of spray tip speed distributions for two injectors

그리고 분사시간 500 μs인 경우, 구동 입력 전류 4 A와 7 A의 피에조 인젝터와 솔레노이드 인젝터에 대한 분무 선단 관통거리 및 분무각의 변화를 나타낸 것이다. 두 인젝터는 분사가 진행되는 시점 이후부터 분명한 분무 특성의 차이가 있음을 알 수 있다. 솔레

노이드 인젝터의 경우, 피에조 인젝터에 비해 상대적으로 작은 분무 선단 관통거리와 다소 넓은 분무각을 형성함을 알 수 있었다. 또한 구동 입력 전류 7 A인 피에조 인젝터의 경우, 초기 분무 생성구간(200 μs 이내)에서의 분무 선단 관통거리는 솔레노이드 인젝터에 비해 Fig. 10에 표시된 편차 값의 2 배인 20%보다 더 증가함을 알 수 있었다.

Figure 11은 분사 압력 40 MPa과 130 MPa, 분위기 압력 3 MPa, 그리고 분사시간 500 μs인 경우, 구동 입력 전류 4 A와 7 A의 구동 조건을 갖는 피에조 인젝터와 솔레노이드 인젝터에 대하여 구한 분무 선단 속도의 변화를 나타낸 것이다. 분무 선단 속도는 분사압력이 증가함에 따라 급격히 증가하며, 피에조 인젝터의 경우, 솔레노이드 인젝터에 비해 더 빠른 연료의 운동량 때문에 상대적으로 빠른 분무 선단 속도를 보였다. 특히 상대적으로 분사압력이 낮을수록, 분무 선단 속도의 차이는 높은 분사압력의 경우보다 더 커짐을 알 수 있었다.

5. 결 론

서로 다른 구동방식에 의해 구동되는 디젤인젝터의 경우, 커먼레일시스템의 적용으로 엔진회전속도와 부하에 관계없이 다단분사가 가능해짐에 따라 고압 인젝터 자체의 분사성능이 매우 중요하고 있다. 이러한 맥락에 따라 기존 솔레노이드 구동방식과 새로운 피에조 구동 방식에 따른 고압 디젤인젝터의 사전분사 특성을 Mie산란 분무영상 가시화를 통해 정량적으로 비교·분석한 결과, 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 피에조 인젝터는 솔레노이드 인젝터보다 상대적으로 빠른 분무 생성 반응속도, 즉 응답성을 가짐을 알 수 있었다. 특히, 피에조 인젝터의 분무 선단 관통거리는 솔레노이드 인젝터보다 약 20% 더 증가하며, 분위기 압력이 커질수록 이 값은 점차 감소됨을 알 수 있었다. 또한 피에조 인젝터는 더 빠른 연료 운동량의 생성으로 인해 상대적으로 더 빠른 분무 선단 속도를 가짐을 알 수 있었는데, 이의 차이는 연료 분사 압력이 낮을수록 더 커짐을 알 수 있었다.

2) 궁극적으로 피에조 인젝터는 실제 분무에 유리한 빠른 니들 구동 응답특성을 가질 뿐 만 아니라, 적절한 구동전류의 제어를 통해 높은 분사율의 제어자유도를 제공할 수 있음을 밝힌다.

참고문헌

- (1) C. Fetters, and A. Leipertz, "Potential of a Piezo-Driven Passenger Car Common-Rail System to Meet Future Emission Legislation-An Evaluation by Means of In-Cylinder Analysis of Injection and Combustion", SAE 2000-01-3499, 2001.
- (2) S. P. Edwards, A. D. Pilley, S. Michon and G. Fournier, "The Optimization of Common Rail FIE Equipped Engines Through the Use of Statistical Experimental Design, Mathematical Modelling and Genetic Algorithms", SAE 970346, 1997.
- (3) J. W. Lee, "Comparison of Pilot Spray Characteristics of HP Diesel Injectors with Different Driving Method for CRDi System (I)", Journal of ILASS-Korea, Vol. 15, No. 1, pp. 25~30, 2010.