

3가지 니들구동방식별 CRDi 디젤엔진용 고압 인젝터의 거시적 분무특성 비교해석

이진욱[†] · 민경덕^{*}

(원고접수일 : 2006년 1월 10일, 심사완료일 : 2006년 2월 9일)

Analysis of Macroscopic Spray Characteristics of Diesel Injectors with Three Different Needle Driving Type in Common Rail Direct Injection System

Jin-Wook Lee[†] · Kyoung-Doug Min^{*}

Abstract : The capability of high pressure injection with small fuel quantity at all engine operating conditions is one of the main feature in common rail fuel injection system, which is used in small and light-duty Diesel engine. The key parameter for the better atomized fuel sprays and multiple injections of this common rail fuel injection control, that can be freely selected irrespective of the engine speed and load is the mechanism controlling the needle energizing and movement in high pressure Diesel injector. In the electro-hydraulic injector, the injection nozzle is being opened and closed by movement of the injector's needle which is balanced by pressure between the nozzle seat and the needle control chamber. This study describes the macroscopic spray structure characteristics of the common rail Diesel injectors with different electric driving method i.e. the solenoid-driven and piezo-driven type. The macroscopic spray characteristics such as spray tip speed, spray tip penetration and spray cone angle were investigated by the high speed spray, which is measured by the back diffusion light illumination method with optical system for the high speed temporal photography in a constant volume chamber pressurized by nitrogen gas. As the results, the prototype piezo-driven injector system was designed and fabricated for the first time in domestic case and the effect of injector's needle response driven by different drive type was compared between the solenoid and piezo-driven injector. It was found, therefore, that the piezo-driven injector showed faster needle response and had better needle control capability by altering the electric input value than the solenoid-driven injector.

Key words : Diesel spray(디젤 분무), Needle drive type(인젝터 니들 구동방식), Solenoid-driven injector(솔레노이드 구동 인젝터), Inverse piezoelectric effect(역 압전효과), Piezo-driven injector(피에조 구동 인젝터), Common rail direct injection system(커먼레일 직접분사시스템)

[†] 책임저자 (한국기계연구원 친환경엔진연구소), E-mail : immanuel@kimm.re.kr, Tel : 042) 868-7386

^{*} 서울대학교 기계항공공학부

1. 서 론

지구 온난화규제가 본격화되면서 자동차 산업은 기술과 정책에 대한 새로운 각도에서 재평가해야 할 필요성이 제기되고 있다. 또한 향후 발효될 자동차 CO₂ 규제에 대비하여 상대적으로 우수한 열효율을 가지는 디젤엔진에 대한 사회적 인식의 전환과 첨단엔진 기술개발이 요구된다. 특히 커먼레일 연료분사시스템을 적용한 고압 직접분사식(direct injection) 디젤엔진⁽¹⁾은 매연 후처리장치와 연계하여 세계 주요 선진국 및 자동차회사에서 치열한 기술개발 경쟁을 벌이고 있는 분야이다. 이에 적용되는 커먼레일 연료분사시스템(common rail fuel injection system)⁽²⁾의 주요 특징은 엔진회전수와 부하에 관계없이 고압 연료공급압력과 인젝터를 통한 분사압력을 제어할 수 있을 뿐만 아니라 매우 짧은 분사 기간내 고압 분사 제어를 통해 다단 분사(multiple injection)를 수행할 수 있어 엔진소음 및 질소산화물(NO_x)를 저감할 수 있다⁽³⁾. 이러한 다단 분사에서는 주 분사(main injection)이전의 사전 분사(pilot injection)를 통해 연소실내 가연범위로 혼합된 연료와 공기 혼합물의 점화 지연(ignition delay)기간이 짧아져 빠른 연소가 일어나게 되며, 또한 연료 액적의 증발시간도 짧아지고, 연소실내에서의 급격한 연소압력의 증가를 방지할 수 있다. 그리고 주 분사 이후의 후 분사(post injection)기간내 분사된 연료가 연소실내에서 연소하는 대신에 배출가스 잔류열에 의해 배기관내에서 연소하게 된다. 이때 분사된 연료중의 일부는 배기재순환시스템을 통해 연소실내로 다시 재순환되어 사전 분사와 유사한 효과를 내거나, 후처리시스템(촉매, 필터)을 통해 질소산화물과 입자상물질 저감에 적용되게 된다. 특히 후 분사를 통해 배출가스 온도 상승을 도모하는 연료공급시스템의 제어 기술과 접목된 후처리시스템의 실용화 가능성은 매우 높은 것으로 분석된다. 이를 위해서는 고응답성과 자유도가 높은 제어 성능을 가지는 고압 인젝터가 필수적이다⁽⁴⁾.

따라서 본 연구에서는 새로운 인젝터 구동방식으로써, 피에조 액츄에이터 개념을 응용한 피에조 구동방식과 기존 솔레노이드 구동방식을 실제 생성된 거

시적 분무현상의 정성적 비교를 통해 해석하였다⁽⁵⁾.

2. 디젤 고압인젝터의 구동방식

Fig. 1은 본 연구에 사용된 커먼레일 분사시스템용 3개 고압 인젝터의 구동 전류파형을 나타낸 것이다. 현재 상용화되어 주로 사용중인 커먼레일 분사시스템용 고압 인젝터는 Fig. 1(a)와 (b)와 같이 솔레노이드(solenoid)에 의해 인젝터 니들 밸브를 개폐하는 방식인데, 이는 가솔린 엔진용 인젝터와는 달리 구동 전류가 크며 피크-홀드(peak and hold)방식으로 전류를 제어한다. 즉, 전자기 유도 소자인 코일로 만들어진 솔레노이드에 전압을 인가하여 전류 상승시간(rising time)과 하강시간(falling time)을 제어하여 인젝터의 응답성을 높이고 있다. 상대적으로 저항과 인덕턴스가 작은 Fig. 1(b)는 구동 초기에 25A의 고전류로 인젝터를 구동하지만, 전류 상승시간에 있어서는 Fig. 1(a)와 차이를 보이고 있다. 일반적으로 솔레노이드 인젝터를 구동하기 위해서는 차량 전원(battery)에서 공급되는 12V의 전압만으로는 100 μ s 이내에서 20A까지 구동 전류를 상승시키는 것은 불가능하기 때문에, 더 높은 전압을 인가하여 솔레노이드의 전류를 증가시키고 전류 상승시간을 줄여야 한다. 따라서 초기 상승전류를 높이기 위한 별도의 고압 전원장치(charge pump)가 필요하게 된다. 반면에 Fig. 1(c)는 피에조 구동방식의 구동 전류 파형인데, 충·방전 방식으로 전류를 제어하게 된다. 사용된 피에조 스택(piezo stack)에 물리적 힘을 가하면 그 가해진 힘의 방향과 크기에 따라 전압이 발생하며 이것을 압전 효과라 하고, 반대로 전압을 가하면 극과 크기에 따라 스택의 길이가 변하는데 이를 역 압전효과(inverse piezoelectric effect)라 한다.

Fig. 2는 피에조 인젝터의 구동원리인 역 압전 효과를 도식화한 것으로써, 가해지는 전압의 극성에 따라 피에조 스택의 길이가 변화하는 것을 나타낸 것이다. 이러한 피에조 스택의 변위는 인장계수, 스택 층수, 작동 전압에 따라 결정되기 때문에 식(1)로 계산되어진다. 아울러 인젝터내 한정된 공간에 피에조 스택의 설치 및 이에 전기 공급을

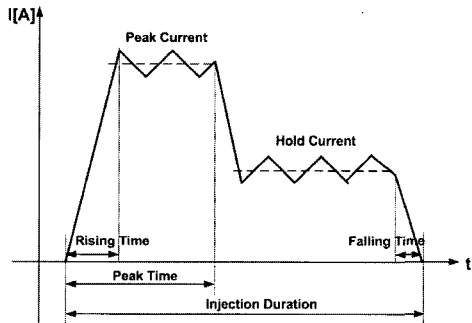
위한 배선에 대한 설계 및 제작기술은 핵심 공정기술에 해당된다. 본 연구를 위해 제작된 시제품 피에조 인젝터는 이러한 개념을 응용하여 제작한 것으로서, 피에조 스택에 가해지는 전압값에 따라 인젝터의 구동 특성은 크게 좌우된다.

$$Pd = C_n \cdot N \cdot V \quad (1)$$

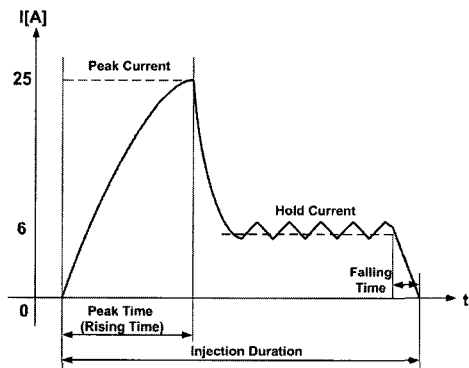
Pd = 스택변위
 C_n = 인장계수 (m/V)
 N = 스택의 적층수
 V = 전압 (V)

Fig. 3은 기존의 솔레노이드 구동방식 인젝터의 니들 구동부를 제외한 모든 부분들을 공유하는 피에조 인젝터의 내부 구조를 나타낸 것이다. 커먼레일에 축압된 고압의 연료는 입구 오리피스(inlet orifice)를 통과하여 압력 제어실로 유입되며, 출구 오리피스(outlet orifice)의 개폐에 따라 제어 피스톤에 연결된 인젝터 니들의 상하운동의 유무가 결정된다. 출구 오리피스의 상태는 바로 상단부에 위치한 구형 밸브에 의해 제어되는데, 이 밸브는 피에조 스택의 동작에 비례하게 된다. 피에조 스택의 작동에 의해 이 구형 밸브가 열리면 하단부에 위치한 제어실과 이 밸브 전후에 작용하는 연료 압력차에 의해 인젝터의 니들이 윗 방향으로 움직이면서 고압의 연료는 분사하게 된다.

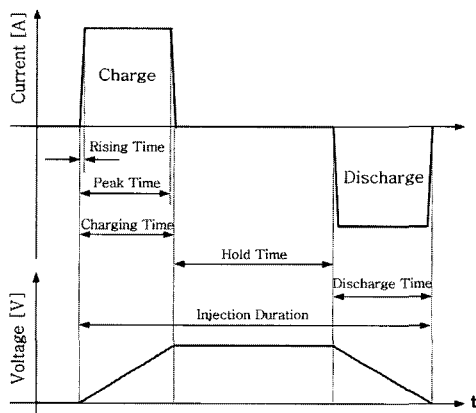
본 연구에서 실험적 해석을 위해 사용한 피에조 구동 인젝터는 이와 같은 내부 니들 구동부를 가지는 형태로 시제품(prototype)으로 제작된 것으로서, 이 인젝터의 구동원(driving source)인 전류 발생을 위한 인젝터 제어기와 함께 Photo. 1에 나타내었다. 피에조 인젝터 전용 제어기는 주로 승압 회로 및 충·방전 회로로 구성되어 있으며, 4개의 피에조 스택을 동시에 구동 제어할 수 있는 독립 채널을 가지며, 이 4개 채널 모두에 동일한 최대 출력 전압을 인가할 수 있는 중앙 전원공급장치는 각각 고유의 출력전압(distinct output voltage)에 맞추어질 수 있는 특징이 있다. 또한 각 구동 채널은 외부의 직사각형과 TTL신호에 의해 작동이 되며, 고유 상수와 흔들림없이(jitter-free) 충전과 방전 전류 그리고 정전용량에 의해 피에조 스택의 변위를 제어할 수 있도록 구성되어 있다. Table 1은 본 연구에 사용된 3개 고압 인젝터의 전기적 주요사양과 노즐의 제원을 나타낸 것이다. 시제품 피에조 인젝터는 엔진 배기량 2.0ℓ급에 해당되는 직접분사식 디젤엔진에 사용되는 솔레노이드 인젝터를 기본 모델로 하여 제작하였다.



(a) Solenoid-driven type (Base & A)



(b) Solenoid-driven type (B)



(c) Piezo-driven type

Fig. 1 Driving current wave of three high pressure injectors used in common-rail system

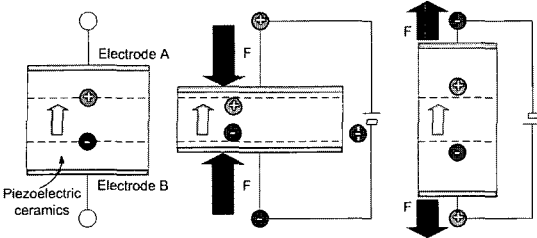


Fig. 2 Schematic of inverse piezoelectric effect for driving the piezo-driven injector

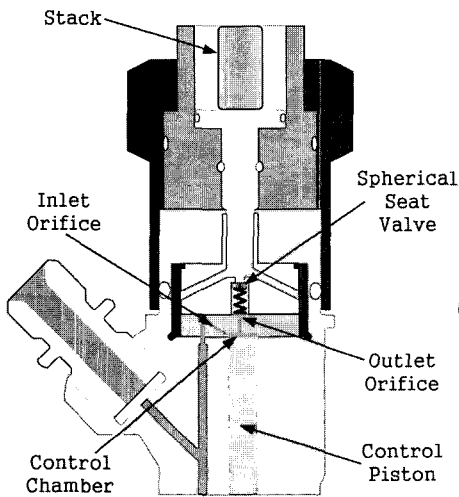


Fig. 3 Internal fuel flow structure in piezo control chamber of piezo-driven injector

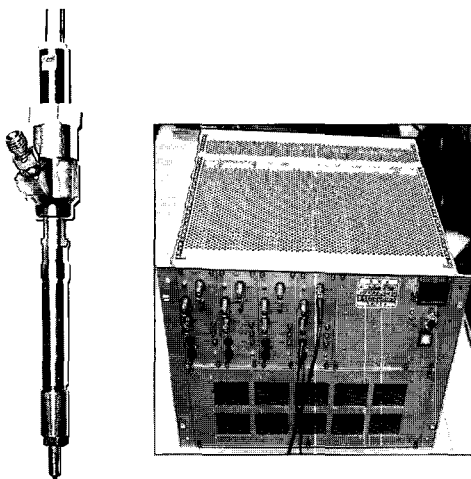


Photo. 1 Prototype piezo-driven injector and controller

Table 1 Electrical and nozzle specification for three common rail injector

Parameter \ Type	Solenoid			Piezo
	Base	A	B	
Peak current(A)	20		25	7
Hold current(A)	11		6	-
Rising time(μ s)	160		200	50
Hole No.	5	6	6	5
HFR(cc/30sec.)	400	440	440	400

3. 실험장치 및 실험방법

커먼레일 분사시스템에서 서로 다른 구동방식에 대한 고압 인젝터의 분무특성 해석을 위한 실험 장치를 Fig. 4와 같이 크게 고압 연료시스템, 분무 가시화시스템으로 구성하였다.

먼저, 커먼레일내 고압 연료를 저장하기 위해서 실제 배기량 2.0ℓ급 디젤엔진에 사용되는 고압펌프를 이용하여 최대 200MPa까지 가압할 수 있었으며, 본 실험에서는 이 고압펌프를 최대 3.7kW (60hz, 2000rpm)출력을 발생시키는 DC모터에 의해 구동되도록 직렬로 연결하였다. 생성된 고압 연료는 인젝터를 통해 분사하게 되는데, 솔레노이드 인젝터의 경우, 분사시간 및 분사압력은 인젝터 전용 드라이버(TDA-3200H)를 사용하여 제어할 수 있었다.

거시적 분무 영상 가시화를 위해 Photo. 2(a)와 같은 고압 분무실(350(L)×320(B)× 250(H)mm)에 수직 방향으로 인젝터 어댑터를 설치하여 인젝터 장착을 용이하도록 하였으며, 3개의 관측창(직경 200mm, 두께 20mm의 석영)을 설치하였다. 그리고 고속 분무 영상의 취득을 위해 Photo. 2(b)에서 보듯이 최대 50,000frame/sec.인 고속 카메라(Phantom v7.0)를 사용하였으며, 광원으로는 제논램프(최대출력 2kw)를 이용하였다. 또한 인젝터 구동과 고속 카메라의 동기화(synchronism)를 위해 제어신호발생기(DG 535)를 이용하여 정확한 고속 분무 영상을 획득하였다. 대부분의 실험은 주위 유동이 정지한 상태에

서 실제 사전 분사시간을 포함한 일정 분사조건(분사압력 및 시간)에서 수행하였다.

가 약 20% 더 높기 때문에 인젝터 니들의 초기 구동성 향상에 유리한 것으로 판단이 된다.

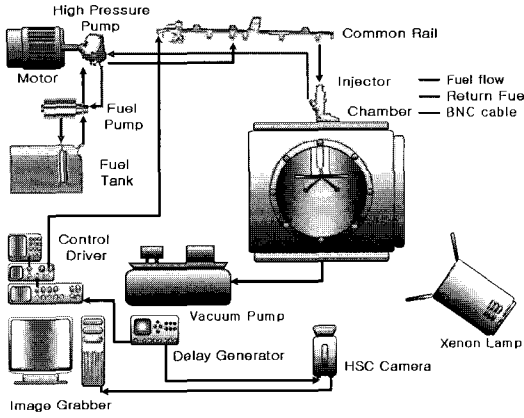
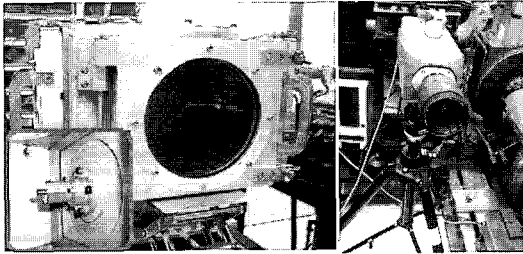


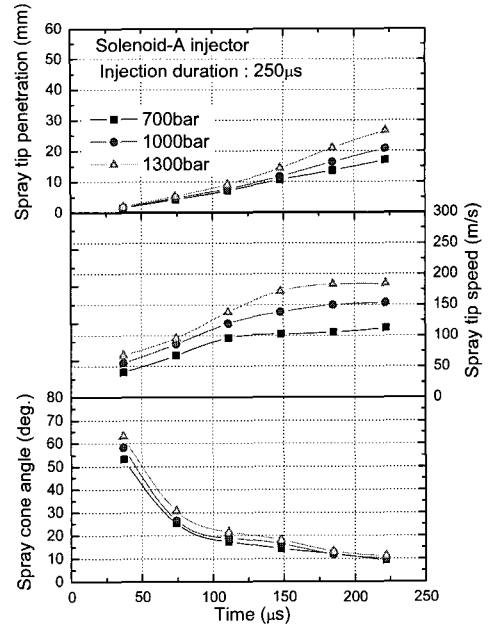
Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup



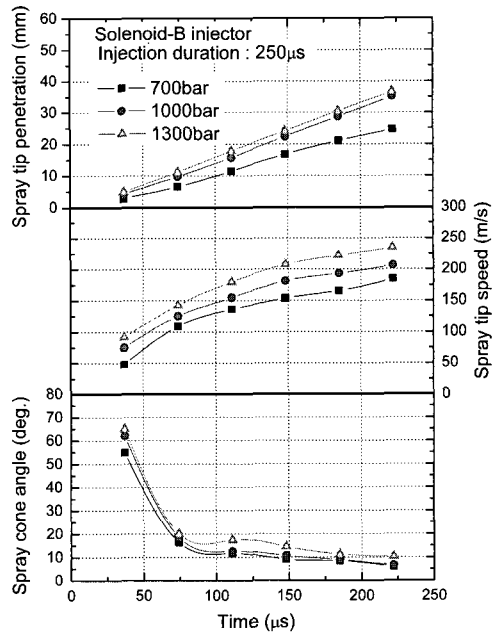
(a) Spray chamber (b) High-speed camera
Photo. 2 Apparatus for spray visualization

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 6개 노즐 분공을 갖는 솔레노이드 인젝터에 대하여 각각 서로 다른 인젝터 구동 전류파형을 가지는 솔레노이드 A와 B 인젝터의 분무 특성을 분무 선단관통거리(spray tip penetration), 분무 선단속도(spray tip speed) 그리고 분무각(spray cone angle)으로 나타낸 것이다. 두 인젝터 모두 분사압력이 증가함에 따라 분무 선단속도와 분무각은 비례적으로 증가하지만, 구동전류 상승시간이 긴 솔레노이드 B 인젝터가 솔레노이드 A 인젝터보다 상대적으로 더 빠른 분무 선단속도를 가지며, 분무각은 작음을 알 수 있다. 비록 솔레노이드 B 인젝터의 전류상승시간이 솔레노이드 A 인젝터보다 길지만, 초기 발생하는 최대 전류의 크기

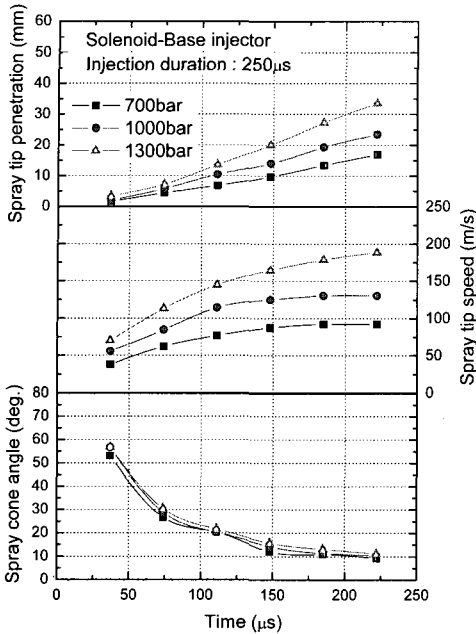


(a) Solenoid-A Injector

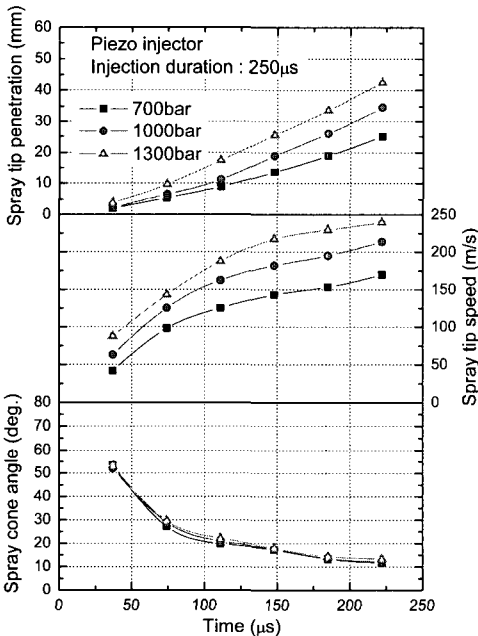


(b) Solenoid-B Injector

Fig. 5 Comparison of spray characteristics of solenoid injector with different drive type



(a) Solenoid-Base Injector



(b) Piezo Injector

Fig. 6 Comparison of spray characteristics between solenoid and piezo-driven injector

Fig. 6은 5개 노즐 분공을 갖는 솔레노이드 인젝터(Base)와 피에조 인젝터의 분무특성을 나타낸

것이다. 피에조 인젝터가 솔레노이드 인젝터에 비해 높은 분무 선단속도를 나타내고 있으며, 분무각에 있어서는 비슷한 경향을 나타냄을 알 수 있었다. 이는 피에조 인젝터의 경우, 작은 구동전류에도 불구하고 매우 짧은 전류상승시간의 영향으로, 인젝터 니들의 움직임이 상대적으로 더 빨라지기 때문으로 판단이 된다.

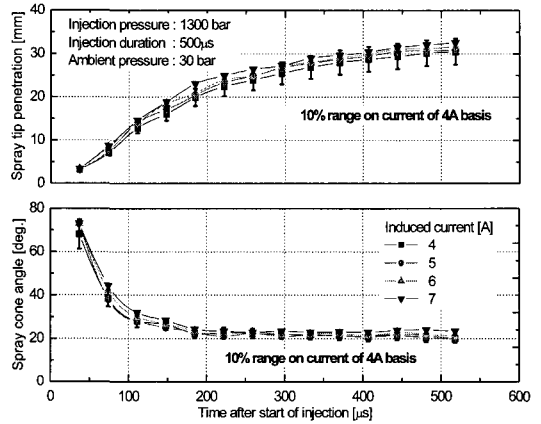


Fig. 7 Effect of induced currents on spray cone angle and spray tip penetration for piezo-driven injector

Fig. 7은 분사 압력 1300bar, 분위기 압력 30bar 그리고 분사 기간 500 μ s인 경우, 피에조 인젝터의 구동 전류의 변화에 따른 분무 선단 관통거리 및 분무각의 영향을 나타낸 것이다. 그럼에도 구동 입력 전류 4A인 경우에 측정된 값의 10% 편차를 별도로 표시하였다. 피에조 인젝터의 피에조 스택에 공급되는 전류의 값이 증가함에 따라 분무 선단 관통거리는 커짐을 알 수 있다. 특히 구동 입력 전류 7A인 경우, 초기 분무 생성구간(200 μ s 이내)에서의 분무 선단 관통거리는 구동 입력 전류 4A인 경우에 비해 약 10% 이상 증가함을 알 수 있다. 분무각의 경우, 구동 입력 전류가 증가할수록 더 넓은 분무각을 형성하지만, 전체적으로 구동 입력 전류 4A인 경우에 측정된 값의 10% 편차내에 존재함을 알 수 있다. 이로부터 빠른 분무 형성은 피에조 인젝터의 경우, 구동 입력 전류를 변경함으로써 조절 가능하며, 결국 다양한 분사율 제어를 실현할 수 있음을 유추할 수 있었다.

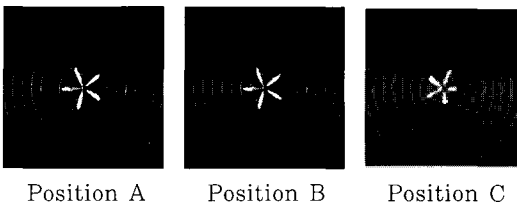
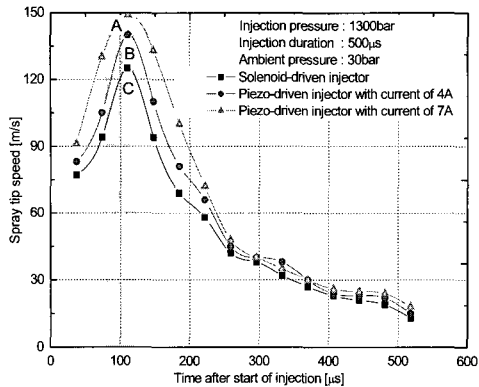


Fig. 8 Comparison of spray tip speed distribution for solenoid and piezo injector

Fig. 8은 분사 압력 1300bar, 분위기 압력 30bar, 그리고 분사기간 $500\mu s$ 인 경우, 구동 입력 전류 4A와 7A의 구동 조건을 갖는 피에조 인젝터와 솔레노이드 인젝터에 대하여 구한 분무 선단속도의 변화를 나타낸 것이다. 분무 선단속도는 분사 압력이 증가함에 따라 급격히 증가하며, 피에조 인젝터의 경우, 솔레노이드 인젝터에 비해 더 빠른 연료의 운동량 때문에 상대적으로 빠른 분무 선단 속도를 보였다.

5. 결 론

서로 다른 인젝터 니들 구동방식을 가지는 커먼레일 분사시스템 디젤엔진용 고압 인젝터의 거시적 분무 특성을 실험적으로 상대 비교·분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 솔레노이드 구동 인젝터의 경우, 솔레노이드 코일의 전기적인 특성에 따라 초기 구동전류를 다양하게 제어할 수 있는데, 이 전류의 크기에 따라 거시적 분무의 초기 생성 특성은 영향을 받게 된다. 솔레노이드 B 인젝터의 전류상승시간이 솔레노이드

드 A 인젝터보다 길지만, 초기 발생하는 최대 전류의 크기가 약 20% 상대적으로 더 높기 때문에, 실험을 통해 생성된 거시적 분무의 발달과정을 분석한 결과, 솔레노이드 B 인젝터가 초기 니들 구동 응답성에 있어서 보다 유리함을 알 수 있었다.

(2) 전기적 충·방전방식에 따라 구동되는 피에조 인젝터는 솔레노이드 인젝터에 비해 빠른 분무 생성을 보였으며, 이는 전기적인 응답성의 차이에 비롯됨을 알 수 있었다. 특히, 구동 전류에 따라 다양한 분무의 생성을 제어할 수 있음을 알 수 있었으며, 최대 1300bar까지의 고압 영역에서도 별 문제 없이 안정적인 분무를 실행함을 알 수 있었다.

(3) 인젝터 니들의 구동에 있어서 초기 구동 전류와 전류상승시간에 있어서 피에조 인젝터는 상대적으로 훨씬 짧은 전류상승시간의 영향으로 니들의 응답성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실사업(NRL과제)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] M. Jansons, S. Lin, D. S. Choi, S. Campbell and K. T. Rhee, "Study of High-Pressure Injection DI Diesel Engine", SAE Paper 1999-01-3494, 1999.
- [2] H. Y. Kim, J. Y. Koo, H. K. Na and C. S. Kim, "Simulation of High Pressure Common-rail Fuel Injection System", SAE Paper 98370111, 1998.
- [3] Shuji Kimura, Osamu Aoki, Hiroshi Ogawa, Shigeo Muranaka and Yoshiteru Enomoto, "New Combustion Concept for Ultra-Clean and High-Efficiency Small DI Diesel Engines", SAE Paper 1999-01-3669, 1999.
- [4] 성경훈, 박승범, 선우명호, 나형규, "HSDI

Common-rail 인젝터 모델링 및 니들 변위 추정에 관한 연구”, 한국자동차공학회지, 제 10권, 제1호, pp.59-61, 2002.

- [5] C. Pettes and A. Leipertz, "Potentials of a Piezo-Driven Passenger car Common Rail System to meet Future Emission Legislation - An Evaluation by Meas of In-Cylinder Analysis of Injection and Combustion", SAE Paper 2001-01-3499, 2001.

저 자 소 개



이진욱 (李進旭)

1968년 6월생, 2005년 서울대학교 졸업 (공학박사), 현 한국기계연구원 친환경 엔진연구센터 선임연구원, 주요연구분야 차세대 디젤분사시스템, 디젤 매연 저감기술, 디젤 나노PM 측정 및 해석



민경덕 (閔庚德)

1963년 12월생, 1994년 미국 MIT졸업 (공학박사), 현 서울대학교 기계항공공학부 부교수, 주요연구분야 엔진 해석 및 실험, 연료전지 실험 및 해석, 차량 연비 분석 및 실험