

구동방식이 다른 서보유압형 인젝터의 분사응답성 연구

권지원* · 정명철* · 이진욱**†

Study on Injection Response of Servo-Hydraulic Injector with Different Actuation Method

J. W. Kwon, M. C. Jeong and J. W. Lee

Key Words: Servo Hydraulic Injector(서보 유압 인젝터), CRDi(커먼레일 직접분사), High speed camera(고속 카메라), Spray visualization(분무 가시화), Spray velocity(분무 속도)

Abstract

In this paper, high-pressure injection characteristic of servo hydraulic injector as the key component of diesel CRDi system, which is driven by solenoid and piezo-actuator were examined by experimental analysis. High-pressure injection characteristic of standard diesel fuel injected at high pressure up to 160 MPa was investigated at high-pressure chamber by using a high-speed camera for spray visualization and quantitative analysis. By this study, we found that the piezo-driven injector has better performances in controlling the fuel injection with the high pressure, including fuel quantity, spray penetration length and spray velocity, than that of a solenoid-driven injector. In particular, the needle response time for start of injection in piezo-driven injector was faster of about 125 μ s than that of solenoid-driven injector. Consequently, it is known that the piezo-driven injector has more degrees of freedom in controlling the fuel injection with the high pressure than solenoid-driven injector.

1. 서 론

지구기후변화 협약 이후, 자동차 배출가스 중에서 이산화탄소(CO₂) 배출허용기준을 유럽연합에서는 2015년에 130 g/km으로, 2020년에 95 g/km으로 설정하였으며, 이는 자동차 산업에 있어 새로운 무역장벽으로 부각되고 있다. 따라서 국내의 유럽수출 자동차도 2009년부터 140 g/km을 적용받게 되어 있어, 향후 국내 자동차 산

업에도 지대한 영향을 미칠 것으로 예상된다. 특히 자동차 산업에 있어서, 이러한 이산화탄소 저감은 연비저감 기술이 핵심이기 때문에 연소 효율이 우수한 디젤엔진이 주종으로 사용되어 향후 클린디젤자동차의 급속한 증가가 예상된다⁽¹⁾.

직접분사식 디젤엔진은 엔진 연소실내에 고압상태의 연료를 직접 분사함으로써 기존의 예연소실을 가지는 간접 분사식과 구분되며, 다양한 엔진의 운전 조건에 따라 최적의 연소 조건을 형성함으로써, 간접 분사식 디젤엔진에 비해 상대적으로 높은 출력과 양호한 연료 소비율을 구현시키는 특징을 갖는다. 반면에, 피스톤 상부에 직접 분사된 연료는 매우 짧은 시간 내 흡기포트로부터 유입된 공기와의 최적 혼합을 위하여 높은 분사압력으로 분사되어야 한다. 연료분사시스템(fuel injection equipment, FIE) 기술은 직접 분사식 디젤 엔진의 핵심 기술 중의 하나이다.

(2013년 2월 12일 접수 ~ 2013년 3월 4일 심사완료, 2013년 4월 18일 게재확정)

*충실대학교 대학원 기계공학과

**충실대학교 기계공학과

†책임저자, 종신회원, 한국액체미립화학회

E-mail : immanuel@ssu.ac.kr

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

이의 핵심 기술중 하나로 커먼레일 연료분사시스템 기술을 들 수 있으며, 최근에는 고압으로 분사되는 연료의 응답성과 정확성 향상을 위해 피에조 액추에이터를 사용한 서보 유압방식 인젝터가 점차 적용되고 있다⁽²⁾. 더욱이 점점 더 엄격해지는 배기규제에 대한 대응으로 초고압 연료분사 뿐만 아니라 연료의 다단 분사가 예상되는 초 정확성 연료분사기술에 대한 연구가 수행되고 있다⁽³⁾. 이를 통해 보다 더 낮은 NOx 및 PM 저감 실현과 함께 더 높은 에너지밀도를 목표로 하는 서보유압형 인젝터 기술 향상이 요구되며, 이러한 고압 전자식 제어 연료분사시스템은 새로운 성능과 배출 목표를 달성하는데 매우 중요한 역할을 할 것으로 판단된다⁽⁴⁾.

즉, 인젝터의 작동 반응도의 고속화를 통해 다단 분사 실현 및 연소실내 유동 조절을 통해 연료-공기 혼합을 최적 조절하여 질소산화물의 저감을 도모함에 있어서, 고압의 고반응 인젝터에 대한 분사율 조절 기능이 향상된 CRDi 시스템 확립이 필요하게 된다⁽⁵⁻⁶⁾.

이미 기술한 바대로 최근에는 고성능 서보유압방식 솔레노이드 인젝터 뿐만 아니라 피에조 인젝터도 많이 적용되고 있는데, 피에조 인젝터가 연료 분사를 수행함에 있어서, 새로운 인젝터 구동방식에 따른 제어 시스템의 개발이 필요하며, 특히 피에조 소자의 동적 부하 응답성 향상을 통해 짧은 분무의 제어를 실현할 수 있어야 한다. 또한 새로운 인젝터 구동방식에 의한 인젝터의 구동 특성과 실제 고압 분사시, 분무 인자들 사이의 상관관계 해석이 필수적이다⁽⁷⁾.

따라서 본 연구에서는 구동방식이 서로 다른 서보유압형 피에조 인젝터와 솔레노이드 인젝터의 분사 응답성 비교를 위해 고압 분무 실험을 수행하였다. 이를 위해 서보유압형 솔레노이드 인젝터와 피에조 인젝터를 커먼레일 연료분사시스템에 장착하여, 일정한 체적을 가지는 분무실에서 실제 엔진데이터를 바탕으로 고압 분무 정량화를 통해 분사 응답성을 비교하였다.

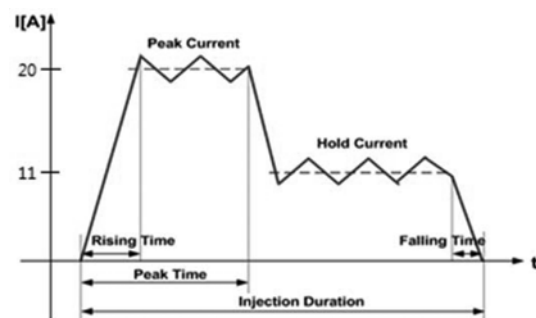
2. 실험조건

본 연구의 실험 조건은 서보 유압방식 솔레노이드 인젝터와 피에조 인젝터의 구동제어성에 대해 구체적으로 비교 분석하기 위해 실제 직접 분사식 디젤엔진의 분사 펌을 기준으로 분사시간과 커먼레일 압력의 실험조건으로 설정하여 분무영상을 획득하여 분사응답성을 정량적으로 비교 분석하였다.

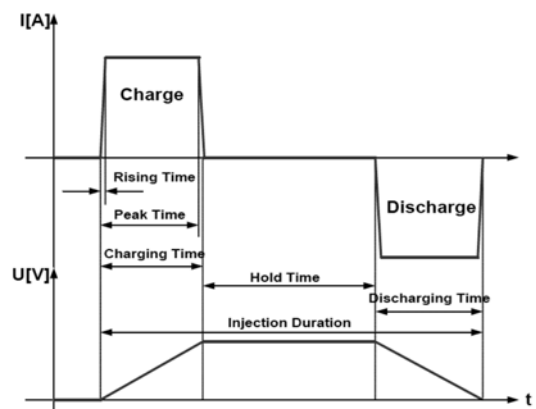
본 연구에 사용된 커먼레일 분사방식용 서보 유압방식 인젝터는 솔레노이드 코일과 피에조 스택에 의하여 Needle 밸브를 개폐하는 방식이며, 일반 기술된 인젝터와 달리 구동 전류가 크다. 구동전류 파형은 Fig. 1에 나타내었다.

서보 유압방식 솔레노이드 인젝터는 피크-홀드 방식으로 전류를 제어하고 있으며, 일반적으로 솔레노이드 인젝터를 구동하기 위해서는 차량 전원에서 공급되는 12 V의 전압만으로는 100 μ s 이내에서 20 A 까지 구동 전류를 상승시키는 것은 불가능하기 때문에, 더 높은 전압을 인가하여 솔레노이드의 전류를 증가시키고 전류 상승 시간을 줄여야 한다. 따라서 초기 상승전류를 높이기 위한 별도의 고압 전원장치가 필요하게 된다⁽⁸⁾.

유압 서보방식 피에조 인젝터는 전기적 충전과 방전 방식으로 전류 구동을 하고 있다. 역 압전 효과를 이용한 피에조 인젝터의 작동 과정으로는 전자제어유닛에서 발생한 전압이 피에조 액추에이터에 가해지면 피에조



(a) In case of solenoid-driven injector



(b) In case of piezo-driven injector

Fig. 1 Driving current wave of servo hydraulic injector

Table 1 Norminal spray and CR pressure of actual engine driving condition

Engine Speed (rpm)	1000		2000		3000	
Engine Load (%)	Spray duration (μs)	CR pressure (MPa)	Spray duration (μs)	CR pressure (MPa)	Spray duration (μs)	CR pressure (MPa)
25	1000	43	650	50	390	60
50	1050	69	760	98.5	675	100
75	1300	75.6	970	110	820	122
100	1500	75.9	1170	113	1075	129.4

스택의 상하방향 길이가 증가하여 출구 오리피스가 열리게 된다. 이 때 압력제어실의 압력이 감소되어 축압실과 압력제어실의 압력차에 의해 Needle 밸브가 열리면서 분사가 개시되는 방식이다. 전류 충전기간 동안에 분사가 이루어지는 방식이기에, 솔레노이드 인젝터와는 전혀 다른 대조를 이룬다⁽⁹⁾.

실험 조건은 2.0 L 디젤 승용 차량의 실제 직접 분사식 디젤 엔진 데이터를 근거로 하여 설정하였다. 분사기간은 390 μs에서부터 1,500 μs까지 광범위하게 구성되어 있으며, 분사압력 또한 43 MPa에서 130 MPa까지 분포되었다. 이러한 실제 디젤 엔진을 통한 분사 데이터에 대한 분석은 인젝터 성능 비교에 있어서 필수적이며, 특히 본 연구와 같이 인젝터의 구동방식이 서로 다른 경우에 대한 고압 분무 특성 해석시, 이 특성 조건들은 필히 반영되어야 한다. 실제 직접 분사식 디젤엔진의 분사압을 기준으로 서보 유압방식 솔레노이드 및 피에조 인젝터의 엔진 회전수 1000, 2000, 3000 rpm 구간 엔진 부하 조건(25, 50, 75, 100%)의 분사기간과 커먼레일 압력을 Table 1에 나타내었다. 엔진 부하가 커질수록 분사기간과 커먼레일 압력이 커지는 것을 볼 수 있다.

3. 실험장치

3.1 연료분사 및 분무가시화 장치

Fig. 2와 같이 실험 장치는 크게 고압 연료 분사시스템, 고압 분무 가시화 시스템, 그리고 일정 체적을 가지는 고압 정적분무실로 구성된다.

커먼레일내 고압연료를 저장하기 위해서 먼저, 연료를 가압할 수 있는 고압 분사펌프를 설치하였다. 이 고압 분사펌프는 최대 200 MPa까지 가압할 수 있는데, 이

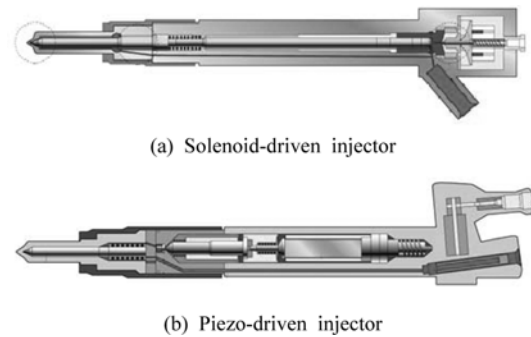


Fig. 2 Schematic diagram of servo hydraulic injector

미 실제 직접분사식 디젤엔진에 적용된 시스템과 동일 사양이다. 본 연구에서는 이를 최대 1.5 kW(60 Hz, 1140 rpm) 출력을 발생시키는 DC 모터와 타이밍 벨트로 연결하였다. 이렇게 생성 및 저장되는 고압연료는 인젝터를 통해 분사되는데, 분사기간 및 분사압력, 엔진회전수는 별도의 엔진컨트롤러(ZB-9013P)를 사용하여 제어되고 각각의 솔레노이드 인젝터 드라이버(ZB-5100)와 피에조 인젝터 드라이버(ZB-6200)를 통해 인젝터를 제어하였다. 이 후, 분무실내 분사된 연료는 진공펌프(100 L/min)를 통해 분무실을 빠져 나간다.

고속 분무 영상을 획득하기 위한 가시화 방법으로, 분무에 의한 Mie 산란광을 촬영하는 후방 조명에 의한 직접 사진법을 적용하였다. 이를 위해 고속 카메라(Phantom V7.3)와 적절한 광원인 80 W LED를 사용하였다. 고압 분사와 카메라 촬영의 동기화를 위해 TTL Signal을 이용하여 인젝터에 구동신호가 인가됨과 동시에 촬영시작된다.

3.2 분사량 측정장치

분무연구에 있어서 필수적인 분사량 측정은 인젝터

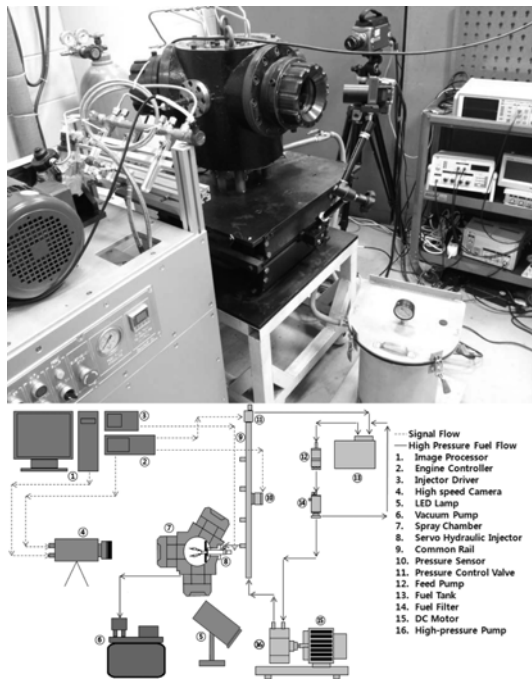


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

어댑터 끝단에 분사된 연료를 저장할 수 있는 알루미늄 용기를 부착하여 기밀성을 유지한 채 1000 회 분사하여 측정된 양을 1000으로 나누어 한 번 분사시의 분사량을 분석하였다. 총 3회 반복하여 평균값을 내었다. 정밀한 측정을 위해 최소 표시 0.01 g인 고정밀 전자저울(GF-4000, AND)를 이용해 스트로크당 연료 분사량을 측정하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 분사량 비교

실제 직접 분사식 디젤엔진의 분사맵을 기준으로 서보 유압방식 솔레노이드 및 피에조 인젝터의 분사량을 측정한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이러한 동일 조건에 따른 서보 유압방식 인젝터들의 분사량 측정결과를 보면, 저압영역(100 MPa이하)에서 분사기간 1300 μ s이상일 때, 그리고 고압영역(100 MPa이상)에서는 분사기간 1100 μ s이상일 때 솔레노이드 인젝터의 분사량이 더 많아짐을 알 수 있었다. 이는 길어진 분사기간에 따라 인젝터 내부 유압회로의 제어 측면에서 볼 때 피에조 인젝터가 노즐 팁으로부터 분사 시작이 되는 Needle On

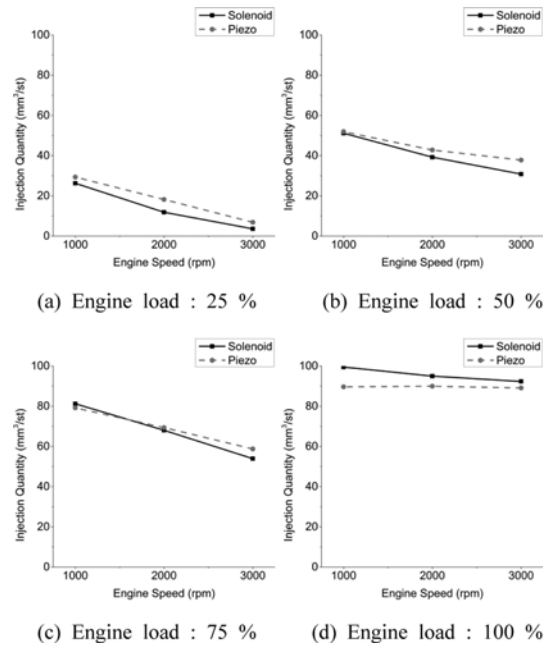


Fig. 4 Injection quantity of servo hydraulic solenoid injector and piezo injector

시간이 더 빠르며, 노즐 팁에서의 분사가 종료되는 Needle Off 또한 더 빠른 시간대에 수행되기 때문에 솔레노이드 인젝터보다 피에조 인젝터가 제어성이 향상됨을 의미한다. 엔진 부하 100% 조건에서 솔레노이드 인젝터의 분사량이 더 큰 것을 알 수 있다. 이는 연료 공급 압력에 따라, 솔레노이드 인젝터는 분사기간이 길어지고 그만큼 압력변동 기간도 증가하여, 피에조 인젝터에 비해 초기 구동시 압력 강하의 크기가 상대적으로 큼을 알 수 있다. 이를 통해 피에조 인젝터의 니들 구동 응답성이 솔레노이드 인젝터보다 빨라져서 궁극적으로 고압으로 구동되는 인젝터 니들 제어에 유리한 것으로 판단된다.

4.2 분사 응답성 비교

서보 유압방식 솔레노이드 및 피에조 인젝터의 고압 분무 현상을 고속카메라의 노출시간을 38 μ s로, 허용 영상 취득 시간 간격을 40 μ s로 분무영상(320×320 pixel, 25,000 fps)을 획득하여 분사용답성을 해석하였다.

고속카메라는 엔진컨트롤러에서 인젝터별 드라이버에 전달됨과 동시에 TTL Signal을 입력받아 촬영을 시작한다. 그렇기 때문에 인젝터별로 구동신호를 받은 후

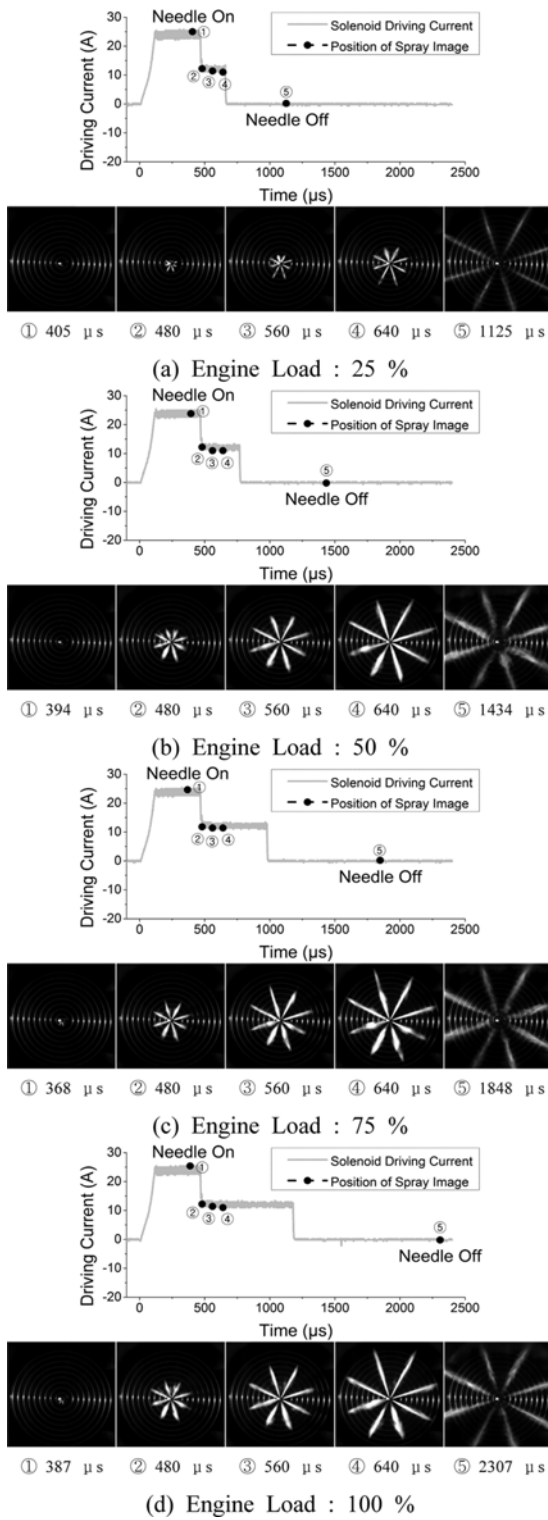


Fig. 5 Mie-spray patterns of servo hydraulic solenoid injector at engine speed of 2000 rpm

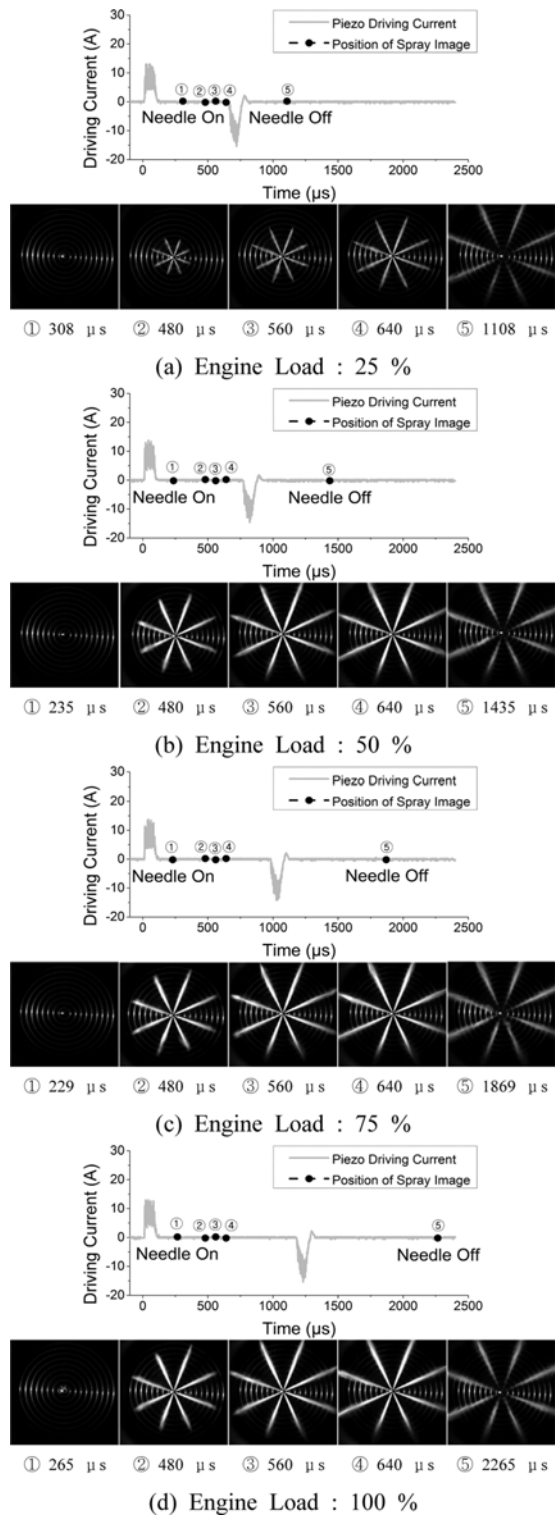


Fig. 6 Mie-spray patterns of servo hydraulic piezo injector at engine speed of 2000 rpm

Needle On이 되어 노즐 팁에서부터 연료 분사가 시작되기까지의 시간과 Needle Off가 되면서 노즐 팁에서의 분사가 종료되는 시간을 측정하여 인젝터별로 반응성에 대하여 비교할 수 있었다.

솔레노이드 및 피에조 인젝터의 구동전류를 오실로스코프(TDS2014C, Tektronix)를 통해 데이터를 전달받아 분무 해석 지점을 포함한 촬영 결과를 Fig. 5-6에 나타내었다. 해석결과 중에서 제일 늦은 Needle On 시간과 제일 이른 Needle Off의 시간을 파악하여, 이 두 지점 범위안의 480, 560, 640 μ s로 해석지점을 지정하여 촬영 결과를 해석하였다. 해석결과 피에조 인젝터가 솔레노이드 인젝터보다 Needle On시간이 감소하는 경향을 볼 수 있다. 또한, 분무 관통길이가 거시적으로도 유압 서보방식 솔레노이드 인젝터에 비해 피에조 인젝터가 증가한 것을 볼 수 있었고, 그럼에 따라 분무 속도도 향상될 것이라 예측할 수 있었다.

실제 엔진 구동조건 경우의 구동방식별 서보 유압 인젝터의 Needle On, Off에 대한 해석결과를 Fig. 7에 나타내었다. 해석결과 유압 서보방식 피에조 인젝터가 솔레노이드 인젝터보다 Needle On시간이 평균 125 μ s정도 감소했음을 확인할 수 있었다.

유압 서보방식 인젝터의 Needle의 열리는 시간(Needle Off시간과 Needle On시간의 차)을 해석한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 해석결과를 보면 엔진회전수와 엔진부하가 높을 때, 피에조 인젝터Needle의 열리는 시간이 더 길어진 것을 볼 수 있다. 이는 길어진 분사기간과 높아진 커먼레일 압력으로 인한 결과로, 초고압의 분사압력의 제어에는 유압 서보방식 피에조 인젝터가 더 적

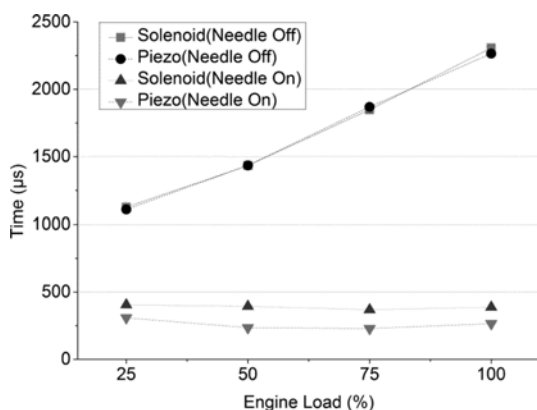


Fig. 7 Comparison time of needle on, off between servo hydraulic solenoid injector and piezo injector at engine speed of 2000 rpm

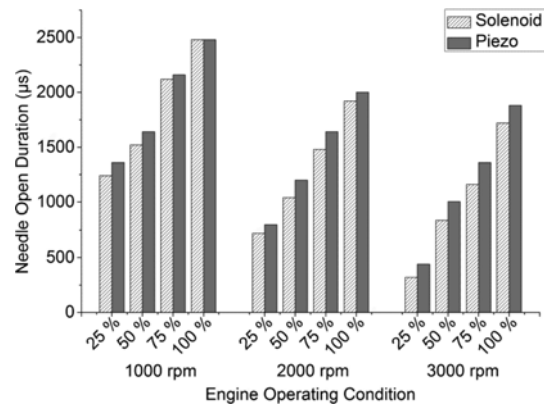


Fig. 8 Comparison time of needle open duration servo hydraulic solenoid injector and piezo injector

합하다는 것을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 직접 분사식 디젤엔진용 서보 유압방식 솔레노이드 및 피에조 인젝터의 고압 분사 시, 분무 인자들 사이의 상관관계를 실험적 연구로 수행하였다. 일정한 체적을 가지는 분무실에서 고압 분무를 고속 카메라를 사용하여 가시화하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 실제 직접 분사식 디젤엔진의 분사맵을 조건으로 솔레노이드 및 피에조 구동방식 인젝터의 분사량을 측정해본 결과 저압영역(100 MPa이하)에서 분사기간 1.3 ms이상일 때, 그리고 고압영역(100 MPa이상)에서는 분사기간 1.1 ms이상일 때 유압 서보방식 솔레노이드 인젝터의 분사량이 더 많아지는 것을 알 수 있었다. 이는 길어진 분사기간에 따라 인젝터 내부 유압회로의 제어 측면에서 볼 때 제어성이 더 좋은 유압 서보방식 피에조 인젝터의 영향인 것을 알 수 있었다.

2) 서보방식 솔레노이드 및 피에조 인젝터의 Needle On, Off에 대해 연구한 결과, 유압 서보방식 피에조 인젝터의 Needle On시간이 솔레노이드의 Needle On시간에 비해 125 μ s정도 감소되는 것을 알 수 있었고, 연료가 노즐 팁을 통해 조건에 따라 분사된 후 Needle Off가 되는 시간이 피에조 구동방식 인젝터가 더 빠르고 안정적인 것을 알 수 있었다. 특히 초고압의 분사의 제어에 있어서 유압 서보방식 피에조 인젝터가 더 뛰어난 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 환경부 Global-Top Project 친환경자동차기술개발사업단의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) J. W. Lee, G. B. Cho, H. S. Kim, Y. I. Jeong, "A Study on PM Regeneration Characteristics of Diesel Passenger Vehicle with Passive Regeneration DPF System", Transactions of KSAE, Vol. 31, No. 2, pp. 88-194, 2007.
- (2) Akira Kato, Katsuya Matsuura, Takazo Hakozaki, Osamu Suzuki, Shigenori Haraguchi, Yasuhiro Yoshimi, Takahiro Katano and Tomoyuki Hashimoto, "Influence of a Fast Injection Rate Common Rail Injector for the Spray and Combustion Characteristics of Diesel Engine", SAE Paper No. 2011-01-0687, 2011.
- (3) Rickard Ehleskog, Valeri Golovitchev, Ingemar Denbratt and Sven Andersson, Carlo Alberto Rinaldini., "Experimental and Numerical Investigation of Split Injections at Low Load in an HDDI Diesel Engine Equipped with a Piezo Injector", SAE Paper No. 2006-01-3433, 2006.
- (4) Catania A.E., d'Ambrosio S., Ferrari A., Finesso R., Spessa E., Avolio G., Rampino V, "Experimental Analysis of Combustion Processes and Emissions in a 2.0L Multi-Cylinder Diesel Engine Featuring a New Generation Piezo-Driven Injector", SAE Paper No. 2009-24-0040, 2009.
- (5) C. H. Kim, Automobile of Diesel Engine, pp. 143- 147 GoldenBell, 2009.
- (6) Y. I. Jeong, J. W. Lee, G. B. Cho, and H. S. Kim, 2010, Automotive & Environment, Soongsil University, pp.107-112, pp. 239-242, 2010.
- (7) Jinwook, Lee, "A Study on Driving Performance, Spray Characteristics and Cavitation Flow of a Piezo-driven Diesel Injector", Ph. D. Dissertation, Seoul National University, 2005.
- (8) J. W. Lee, J. H. Lee, M. S. Kim, "Analysis of Hydraulic Characteristics of Two Solenoid-driven Injectors for CRDi System", Transactions of KSAE, Vol. 19, No. 6, pp. 140-147, 2011.
- (9) A. Arpaia, A. E. Catania, A. Ferrari and E. Spessa. "Development and Application of an Advanced Numerical Model for CR Piezo Indirect Acting Injection Systems", SAE Paper No. 2010-01-1503, 2010.