

CRDI용 인젝터 드라이버 제작과 성능시험 The Fabrication and Trial Performance of Injector Driver for CRDI

김상암* · 왕우경***† · 김 온***

Sang-Am Kim*, Woo-Gyeong Wang***† and On Kim***

(접수일 : 2013년 02월 26일, 수정일 : 2013년 03월 21일, 채택확정 : 2013년 03월 25일)

Abstract: In this study, for carrying out the spray and combustion experiment using a Common Rail Direct Injection(CRDI) system, the controller was fabricated to drive a high speed camera, a injector and a laser beam sequentially at a low cost. CB280 module of one-chip micro processor was used for the controller. In order to confirm responsibility and utility of the controller, the current drive performance, the spray behavior and the injection rate were tested and analyzed under various experimental conditions. As this research results, we found that the fabricated controller was able to control the devices for the spray experiment precisely with the input value in program and it had the dynamic load responsibility and repetition. Also, we found that the injection rates of our experimental results were higher than those of others at the same injection pressure and the controller connected with the laser system and the data acquisition system had validity for carrying out the spray visualization experiment.

Key Words : CRDI, Current drive performance, Spray visualization, Dynamic load responsibility

1. 서 론

오늘날 디젤기관의 저연비, 고출력 및 오염물질 배출 저감을 위해 전자제어장치가 장착된 커먼레일 분사시스템이 상용화되어 주로 R.V.(Recreational Vehicle)에 이용되어 왔으며, 최근에는 고유가로 인해 디젤 승용차에 많이 장착¹⁾되고 있다. 그러므로 많은 연구자들이 커먼레일 분사시스템을 이용하여 디젤기관의 성능향상과 배기배출물의 저감을 동시에 실현할 수 있는 연구^{2,3)}를

활발하게 진행하고 있다.

이 시스템의 주요 특징은 엔진회전수와 부하에 관계없이 분사압력, 분사시기 및 분사기간을 자유롭게 제어할 수 있을 뿐만 아니라, 매우 짧은 분사기간 내에 고압분사 제어를 통해 다단분사도 수행할 수 있는 것이다. 이러한 분사특성을 제공하기 위해 유압서보 시스템과 전기적 솔레노이드 밸브가 조합된 인젝터가 커먼레일 시스템에 적용되고 있으며, 인젝터를 제어하는 제어장치에서 출력되는 전류의 특성은 인젝터의 분사특성을 결정

*** 왕우경(교신저자) : 전남대학교 해양기술학부

E-mail : wangwk@jnu.ac.kr, Tel : 061-659-7136

*김상암 : 전남대학교 대학원

***김 온 : 전남대학교 해양기술학부

***† Woo-Gyeong Wang(corresponding author) : Faculty of Marine Technology, ChonNam University.

E-mail : wangwk@jnu.ac.kr, Tel : 061-659-7136

*Sang-Am Kim : Graduate School, ChonNam University.

***On Kim : Faculty of Marine Technology, ChonNam University.

하므로 제어장치의 역할은 중요하다.

그러나 인젝터와 압력제어밸브를 구동하기 위한 제어장치가 외국기업인 Bosch, Delphi 사에 의해 자동차용으로만 제품화 되어 있고, 기초연구와 실험의 목적으로 국내의 한 연구업체에서 고가로 주문 제작^{4,5)}해 왔으나 현재에는 제작하지 않으므로 제어장치를 확보하기가 힘든 상태이다.

따라서 본 연구에서는 커먼레일 분사시스템을 이용한 분사 및 연소실험을 수행하기 위한 인젝터, 고속카메라(FASTCAM ultima APX) 및 레이저빔(Pulsed Nd-Yag laser) 등을 동시에 구동할 수 있는 제어장치를 저렴한 비용으로 제작 하고, 현재 상용화된 솔레노이드 인젝터에 적용하여 전류구동 성능시험을 통해 동적 부하 응답성을 확인하였다. 그리고 고속카메라와 분사율 측정장치를 이용하여 분사압력 및 전류특성에 따른 분무거동과 분사율 특성들을 분석하여 제작된 제어장치의 유용성을 검토하였다.

2. 실험용 제어장치의 설계

설계 제작된 제어장치는 주제어장치(main controller), 전원공급장치(power supply), 인젝터 드라이버단(injector driver)으로 구성되어 있으며, Fig. 1 은 회로도를 나타낸다.

2.1 주제어장치

시스템 제어를 위해 원칩 마이크로프로세서인 CB280 모듈⁶⁾을 사용하였으며, Bosch사의 솔레노이드 타입 인젝터를 고속으로 작동할 수 있다. CB280 모듈은 인젝터 작동을 위한 Power MOSFET를 μs 단위로 조정할 수 있으며, 인젝터 드라이버에서 제어에 필요한 데이터를 교환하고 인젝터를 작동한다. CB280 모듈은 인젝터를 정밀 제어하면서 순차적으로 고속 카메라와 레이저빔을 작동하기 위한 목적으로 사용하였다. 인젝터의 작동 전원은 +12V이고 고속 카메라는 제어 전원이 +5V, 레이저빔은 +15V로 서로 달라서 전원단을 분리하여 동작하도록 하였다. 그리고 포토커플러 및 릴레이 작동을 위한 전원 24V를 별도의 전

원으로 공급하였으며 외부 트리거 스위치를 시작 신호로 하여 고속카메라, 인젝터 및 레이저빔을 순차적으로 빠르게 작동시켜 단발분사제어를 가능하게 하였다.

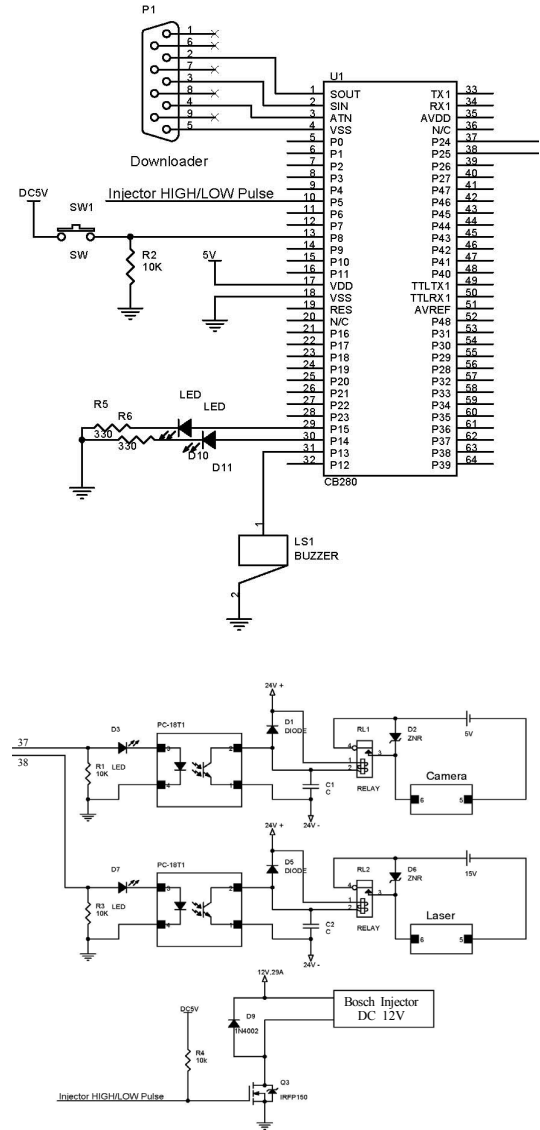


Fig. 1 Circuit diagram

2.2 전원공급장치

전원공급장치(power supply)는 A.C 220V를 이용하여 시스템 제어회로에 필요한 D.C 5V, 12V,

15V 및 24V로 변환하였다. 5V는 메인 컨트롤러의 디지털 제어회로와 고속카메라의 제어전원, 12V는 인젝터 제어회로, 15V는 레이저빔의 제어전원, 24V는 고속카메라와 레이저빔 작동을 위한 릴레이 구동회로의 전원으로 사용된다.

인젝터는 전원의 영향을 크게 받으며 안정적인 전원 공급이 이루어지지 않을 때는 열림 지연시간이 늘어나며 정확한 분사기간 또한 영향을 받을 수밖에 없기 때문에 전원공급장치의 용량을 인젝터의 소비전류보다 큰 것으로 설계하여 공급하였다.

마이크로프로세서에서 μs 로 제어를 한다고 해도 실제 인젝터는 전원이 인가되는 마그네틱 전자력의 힘에 의해 인젝터가 열리기 시작하는 시점을 결정하기 때문에 반복 분사시에 전원의 영향에 의해 오동작이 일어나지 않도록 정전압 회로를 제작하였다.

2.3 인젝터 드라이버단

원칩 마이크로프로세서에서 나오는 디지털신호로 Power MOSFET를 제어하여 인젝터 드라이버를 작동할 수 있도록 제작하였다. 인젝터를 작동시키는 솔레노이드는 코일로 제작되어 있으며 코일에 전압이 인가될 때 전류가 시간이 지날수록 증가하는 특성⁷⁾을 가지고 있다. 커먼레일 인젝터는 응답성이 빨라야 하므로 초기 구동 시 높은 전류로 구동되어야 하고 종료 시에는 하강시간을 최소화하여 빠르게 닫아야 한다⁸⁾. 따라서 프로그램으로 분사기간과 전류 상승시간을 정밀 제어하여 인젝터의 응답성을 향상시킬 수 있도록 하였다. 또한 인젝터의 열림량 보정을 위하여 전류의 통전시간을 조정할 수 있도록 마이크로프로세서에 입력되어 있으며, 따라서 분사시기와 분사량을 쉽게 제어할 수 있다.

마이크로프로세서에서 발생한 제어신호는 솔레노이드 인젝터를 구동하는 데 필요한 전류를 제공하기 위한 Power MOSFET를 직접 제어하며 주변 회로에 영향을 최소화하며 정밀한 제어가 가능하도록 하였다.

3. 동작실험

3.1 동작신호

외부 트리거에 의해 순차적으로 고속카메라, 인젝터 및 레이저빔이 작동되며, 각 장치들이 프로그램에 의해 지연동작을 할 수 있도록 되어 있다. Fig. 2는 각 장치를 작동하는 신호의 time chart를 나타낸다.

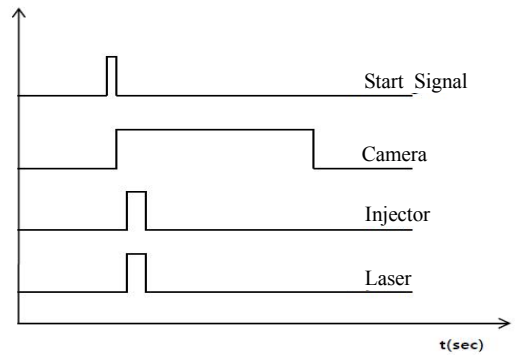


Fig. 2 Time chart of signal

3.2 인젝터 구동신호와 전류특성

Fig. 3은 인젝터를 여자 시키기 위한 프로그램 입력값에 대한 FET 구동펄스(drive pulse)의 신호기간을 나타낸다. 그림에서 보면, 입력값 10 unit에 대해 구동펄스는 약 $256\mu s$ 의 신호기간을 나타내었으며, 그 후에는 입력값 10 unit의 증가에 따라 약 $180\mu s$ 의 선형적인 증가를 보였다.

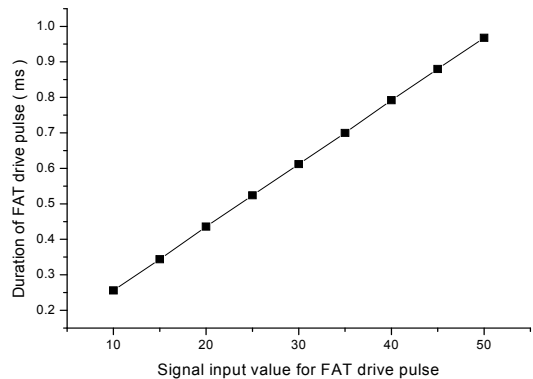


Fig. 3 Pulse durations of FET with respect to signal input value in program

Fig. 4는 FET 구동펄스의 전압파형과 인젝터의 여자전류파형을 나타낸다. 마이크로프로세서에서 출력되는 FET 구동신호는 single pulse이며, 인젝터 드라이브의 구동전류특성을 확인하기 위하여 디지털 메모리 오실로스코프와 전류프로브를 이용하였다. 그림에 나타난 바와 같이, FET 구동펄스의 전압은 5V로 일정하였으며, 구동전류는 구동펄스기간 동안만 상승하는 것을 알 수 있었다. 그러나 기존의 상용화된 인젝터 드라이브의 피크 전류(Peak-current)가 약 20~25A이고 피크전류에 도달하는 시간이 약 0.1~0.2ms인 것^{5,9)}을 감안할 때, 본 실험에서 제작된 인젝터 드라이버의 피크 전류가 낮고 전류의 상승시간이 길었다.

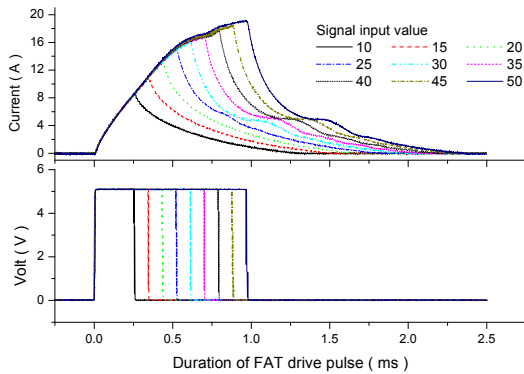


Fig. 4 Injector current and pulse volt with respect to duration of FET drive pulse

3.3 인젝터의 작동원리

Fig. 5는 실험에 이용된 솔레노이드 인젝터의 내부 구조를 나타내며, 그 작동원리¹⁰⁾는 다음과 같다. 먼저, 공급 오리피스(feed orifice)를 통해 제어 챔버에 채워진 고압연료가 유압 피스톤의 역할을 하여 니들(needle)밸브를 누르므로 연료 분사가 되지 않는 상태에서, 솔레노이드가 작동하여 제어 챔버 상부의 밸브 볼이 들리면 배출 오리피스(bleed orifice)를 통해 연료가 나간다. 따라서 챔버의 압력이 하강하여 힘의 평형이 깨지면서 니들 밸브가 열리게 된다. 즉, 솔레노이드 구동 플런저의 변위, 그리고 플런저 변위에 따른 두 개의 오리피스 부근의 압력 변화에 의해 니들의 변위가 일어나서 분사를 하게 된다.

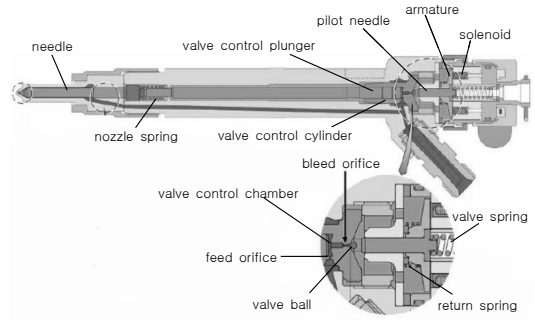


Fig. 5 Schematic of the electro-hydraulic injector

3.4 제어장치의 성능

제작된 제어장치의 성능을 확인하기 위해 CRDI 분무가시화 실험장치에 설치하여 분무실험을 행하였다. 실험 시 분위기 압력은 2MPa로 일정하게 하고 분사압력은 100MPa와 130MPa로 하였다. 인젝터를 구동하기 위한 프로그램 입력값을 10~50 unit로 하여 고속카메라로 분무거동을 촬영하였다. 촬영 시 frame rate는 8000f/s, shutter speed는 1/frame sec 및 조리개 값(F-number)은 1.2로 설정하였으며, 조명은 할로겐 광원(1kW×2)을 이용하였다.

		Time(ms)										
		0.125	0.25	0.5	0.75	1.0	1.125	1.25	1.375	1.5		
Frame No.	100MPa	23	24	26	28	30	31	32	33	34		
	130MPa	22	23	25	27	29	30	31	32	33		
Signal input value	100 MPa	[Spray images]										
	30 unit	[Spray images]										
Signal input value	100 MPa	[Spray images]										
	40 unit	[Spray images]										
Signal input value	130 MPa	[Spray images]										
	130 MPa	[Spray images]										

Fig. 6 Spray behavior with injection pressure and signal input value

Fig. 6은 프로그램 입력값 30과 40에서 분사압력변화에 따른 분무거동을 나타낸다. 그림에 나타낸 바와 같이, 동일한 구동펄스 입력값에서 분사압력이 높은 130MPa에서 1 frame(125 μ s) 앞서 분사되었으며, 분사기간도 1frame 길게 나타났다. 그리고 동일한 분사압력에서는 구동펄스 입력값이 큰 40unit에서 분사기간이 길게 나타났다. 한편, shutter speed가 125 μ s이므로 분사시작점에서는 1frame의 후반부 화상만 기록될 수 있고, 분사끝점에서는 1frame의 후반부에 분사가 종료되었음에도 앞부분의 화상이 기록되어 있으므로 분사가 진행 중인 것으로 나타난다. 따라서 화상분석으로는 1 frame 정도의 시간적 오차가 있을 수 있다고 생각된다.

Fig. 7은 인젝터의 솔레노이드를 여자하기 위한 FET 구동펄스(drive pulse)의 신호기간에 대한 분사기간을 나타내며, 분사기간은 고속화상을 분석한 자료이다. 그림에서 보면, 인젝터 솔레노이드의 구동펄스기간이 약 0.348ms(input value 15 unit, 피크전류 약 11A)에서는 분사압력이 100MPa의 경우 분사가 되지 않았으며, 구동펄스기간이 0.436(20 unit, 피크전류 약 13A)에서 0.616ms(30 unit, 피크전류 약 17A)까지는 100MPa와 130MPa 모두 분사가 되었으나 130MPa의 경우가 분사기간이 125 μ s~375 μ s 정도 길게 나타났다. 이는 구동펄스기간이 짧은 경우에는 피크전류가 낮아 솔레노이드의 흡인력이 작아지므로 밸브 불이 작게 들리고 출구통로의 면적이 좁은 상태에서 배출 오리피스를 통해 빠져 나가는 제어챔버의 유량이 압력에 영향을 보다 많이 받기 때문이라 생각된다. 따라서 100MPa의 경우에는 130MPa에 비해 제어챔버의 압력강하가 상대적으로 적어 니들변위가 작게 되어 분사기간이 짧아진다. 그리고 구동펄스기간이 0.796ms(40 unit, 피크전류 약 18A)부터는 100MPa와 130MPa의 분사압력에서 분사기간이 거의 같게 되었다. 이는 피크전류가 높아 솔레노이드의 흡인력이 크게 되므로 밸브 불이 완전히 들린 상태에서 배출통로의 면적이 넓어 오리피스를 통해 빠져 나가는 제어챔버의 유량이 압력에 영향을 적게 받기 때문이라 생각된다.

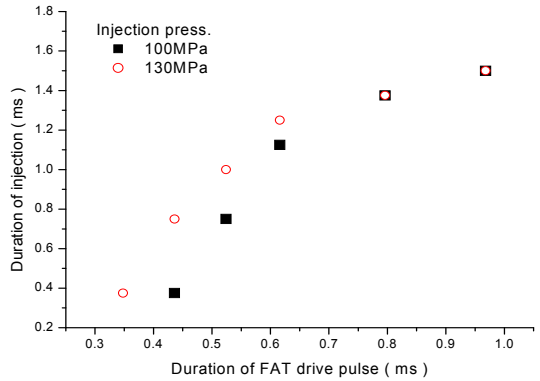


Fig. 7 Injection period versus exciting period of S.V

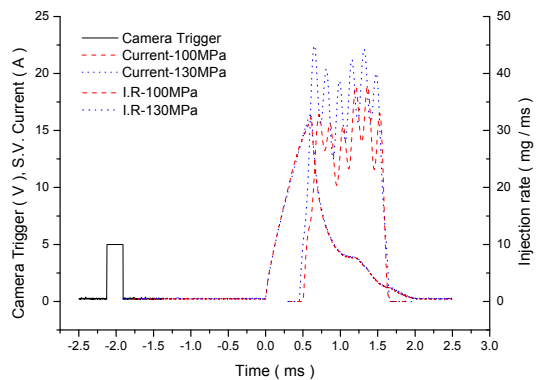


Fig. 8 Configuration of camera trigger, S.V current and injection rate versus time

Fig. 8은 분사압력 100MPa와 130MPa일 때, FET 구동펄스의 신호기간이 0.616ms(30 unit)에서 측정된 솔레노이드의 전류와 분사율을 각각 나타낸다. 분사율은 Zeuch식 분사율 측정장치를 통해 분위기 압력을 2MPa로 하여 측정하였다. 그림에서 보면, 전류의 파형과 피크값은 분사압력에 관계없이 거의 같았으며 분사율 선도의 분사기간은 1.15ms와 1.204ms로서 고속카메라의 화상을 분석한 1.125ms와 1.25ms와 거의 비슷한 분사기간을 나타내었다. 분사량 측정은 분사율 측정시와 동일한 조건하에서 Zeuch식 분사율 측정장치에 연결된 분동식 표준 압력계의 피스톤 변위만큼 분사된 연료를 유출시켜 측정하였으며, 100회의 분사량을 평균하였다. 1회 분사량은 분사압력 100MPa에서 29.3mg(S.G 0.85), 130MPa에서 37.3mg으로 측

정되었다. 그리고 분사압력 130MPa의 경우가 분사시간이 길고 분사량이 많게 나타났으므로 분사시간과 분사량은 분사압력의 영향을 받는 것으로 생각된다.

Fig. 9는 본 실험에서 구한 분사율과 다른 연구자들의 실험 및 수치 해석적 방법에 의해 구한 분사율들을 분사압력에 따라 나타낸 것으로, 동일한 형식의 인젝터를 사용한 결과들이다. 그림에 서 알 수 있듯이, 본 실험에서 구한 분사율은 100MPa에서 25.48mg/ms, 130MPa에서 31.08mg/ms 정도였다. 다른 연구자들의 실험결과^{11,12}를 보면, 분사압력 130MPa 부근에서 약 25.5~30.0mg/ms (S.G 0.85)의 분사율을 나타내었으며, 분사압력 80~110MPa에서는 약 22.5~23.0mg/ms 정도였다. 한편, 수치 해석적 방법으로 계산된 결과⁹)는 100~150MPa에서 32.5~39.5mg/ms로서 실험값들보다 높게 나타났다. 분사율은 곧 분사장치의 성능과 직결되며, 본 실험에서 구한 분사율의 결과가 기존의 실험결과보다 높게 나타났으므로 본 실험에서 개발된 인젝터 드라이버가 유용성이 있다고 판단된다.

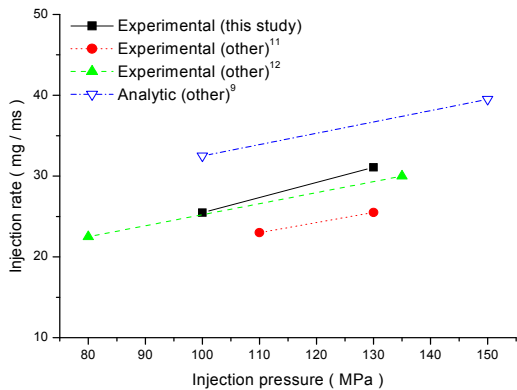


Fig. 9 Comparison between our and others results of injection rate with injection pressures

Table 1은 카메라 트리거시점에서 분사시작점까지의 분사지연시간을, Fig. 6의 고속화상과 Fig. 8의 분사율 선도를 분석하여, 나타낸 것이다. Table을 보면, 두 장치에 의해 나타난 분사지연시간은 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 고속카메

라와 분사율 측정장치에 의한 실험결과들이 거의 일치함을 알 수 있으므로, 본 실험에서 제작된 제어장치가 동적 부하 응답성과 재현성이 있다고 생각된다.

Table 1 Injection delay time from camera trigger to injection start

Equip. Inj. press.	High speed image		Injection rate		
	False image (No.)	Delay time (ms)	Trigger time (ms)	Start time (ms)	Delay time (ms)
100MPa	22	2.75	-2.214	0.504	2.718
130MPa	21	2.625	-2.214	0.452	2.666

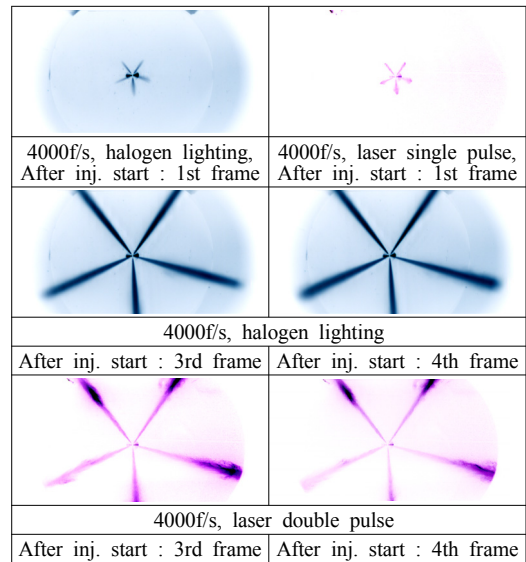


Fig. 10 Spray image using laser beam

한편, 고속카메라와 레이저빔의 동기화를 확인하기 위해, 분사압력 70MPa 및 분위기 압력 대기압 하에서 레이저 빔을 이용하여 분무의 순간을 촬영하였다. 촬영 조건은 조리개 값 8.0, frame rate 4000f/s로 하였으며, single pulse와 double pulse의 레이저빔을 광원으로 사용하였다. 레이저 빔의 발광지원은 프로그램 또는 레이저 시스템을 통해 조절이 가능하며, 레이저 빔의 파장(wavelength)은 532nm, 펄스기간(pulse duration)은 8

ns이다. 그리고 double pulse의 펄스 간격은 $2\mu\text{s} \sim 1\text{ms}$ 의 범위에서 조정할 수 있으며, 본 촬영에서는 4000f/s의 1frame의 시간에 해당하는 약 $250\mu\text{s}$ 로 조정하였다.

Fig. 10은 동일한 분사조건에서 조리개 값 1.2, frame rate 4000f/s 및 할로겐 조명을 이용하여 촬영한 분무화상과 레이저 빔을 이용한 분무화상을 나타낸 것이다. 그림에서 보면, 동일한 시간대에 레이저 빔을 이용하여 촬영한 분무의 단면을 통해 미세한 액적들을 관찰할 수 있다. 따라서 본 실험장치를 이용하여 필요한 시간에 분무의 단면을 촬영하여 분무의 미시적 관찰이 가능할 것으로 생각된다.

4. 결 론

커먼레일 분사시스템을 이용한 분사 및 연소실험을 수행하기 위해 고속카메라, 인젝터 및 레이저빔 등을 동시에 구동할 수 있는 제어장치를 CB280 모듈을 사용하여 저렴한 비용으로 제작하고, 전류구동 성능시험과 분사압력 및 전류특성에 따른 분무거동과 분사율 등의 측정을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제작된 제어장치는 프로그램 입력값에 따라 고속카메라, 인젝터 및 레이저빔을 정상적으로 동작시켰다.

2. 동일한 분사압력에서 측정된 분사율이 기존의 실험결과보다 높게 나타났다.

3. 고속카메라와 분사율 측정장치에 의한 실험 결과들이 시간적으로 거의 일치하므로, 제작된 제어장치가 동적 부하 응답성과 재현성이 있었다.

4. 제작된 제어장치는 레이저 시스템 및 데이터 수집장치와 연동하여 분무가시화 실험을 수행하는데 유효했다.

참고문헌

1. H. G. Roh, H. S. Jeon and C. S. Lee, 2007, "Effect of multiple injection and injection pressure on the combustion and emission

characteristics in a passenger car CRDI diesel engine", Spring conference proceeding, KSAE, pp. 352-357.

2. H. N. Kim et al., 2008, "Characteristics of Exhaust Emissions and Particle Size Distribution using Biofuel Blended Diesel Fuel in CRDI Diesel Engine with CPF", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 12, No. 1, pp. 5-12.
3. J. S. Kim et al., 2011, "Effects of the Fuel Injection Timing on the Combustion Characteristics in CRDI Diesel Engine", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 10-15.
4. TEMS R&D Center, 2001, "TDA-3200H Universal Common Rail Injector Driver User's Manual Rev. 1.4", TEMS Co., Ltd.
5. TEMS R&D Center, 2003, "TDA-1100 Common Rail Pressure Controller User's Manual", TEMS Co., Ltd.
6. COMFILE TECHNOLOGY, 2009, "CUBLOC MANUAL", COMFILE TECHNOLOGY CO., Ltd. pp. 344-351.
7. Y. H. Roh et al., 2003, "A Study on the Development of Injector Driver and Pressure Controller for Common Rail Diesel Engine", Spring conference proceeding, KSAE, pp. 386-391.
8. Y. H. Roh and K. H. Cho, 2004, "Development of Multi-channel Common Rail Diesel Injector Driver", Fall conference proceeding, KSAE, pp. 274-279.
9. J. W. Lee, J. H. Lee and M. S. Kim, 2011, "Analysis of Hydraulic Characteristics of Two Solenoid-driven Injectors for CRDI System", Transactions of KSAE, Vol. 19, No. 6, pp. 140-147.
10. J. S. Jang and Y. H. Yoon, 2009, "Analysis Model Development for Component Design of the Fuel Injection System for CRDI Engines",

Transactions of KSAE, Vol. 17, No. 3, pp. 117-126.

11. J. S. Sa, N. H. Chung and M. H. Sunwoo, 2007, "A Study on the Injection Rate Observer of the Piezo-actuated and Solenoid-operated Injectors for CRDI Diesel Engines", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 9, pp. 52-59.
12. C. S. Lee, S. W. Park and M. S. Chon, 2004, "Effect of Nozzle Geometry on the Injection Characteristics and Spray Behavior", Journal of ILASS-KOREA, Vol. 9, No. 1, pp. 1-7.