

분사압력에 따른 CRDI 분사계의 분무특성에 관한 연구

김상암 · 왕우경^{1*} · 양정규¹

전남대학교 동력시스템공학과, ¹전남대학교 해양기술학부

A study on the spray characteristics of CRDI system with injection pressure

Sang-Am KIM, Woo-Gyeong WANG^{1*} and Jung-Kyu YANG¹

Department of Power System Engineering, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

¹Faculty of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

Injection rate, injection quantity and injection timing of fuel are controlled precisely by electric control in CRDI system. Particularly, injection rate being influenced with injection pressure affects to spray characteristics and fuel-air ratio, so it is a very important factor in diesel combustion. In this study, injection rates in accordance with injection pressure at a constant ambient pressure were measured with Zeuch's method. Under the same condition, non-evaporating spray images were taken with a high speed camera and analyzed carefully with Adobe Photoshop CS3. Macroscopic spray characteristics and breakup processes in the spray could be found from the examined and analyzed data. Injection start time and injection period were practically affected with injection pressure. Also, initial injection rate, spray penetration, spray angle and breakup of high density droplets region in the spray were affected with injection pressure. The results and techniques of spray visualization and injection rate measurement in this study would be practically effective to study a high pressure diesel spray for common rail direct injection system.

Keywords : Injection rate, Penetration, Spray angle, Breakup, High density droplet area

서론

디젤기관의 연소특성과 배기특성은 실린더 내에 분사되는 연료와 공기와의 혼합에 의해 주로 지배되며, 그 혼합과정은 분사특성, 공기유동 및 분무특성 등에 의해 좌우된다. 특히 연료분사는 연료 자체가 혼합을 촉진하는 운동량과 운동에너지를 가지고 있으므로 연

소를 제어하는 가장 중요한 요소라 할 수 있다. 그러므로 디젤기관의 성능향상과 배기 배출물의 저감을 위한 기술개발의 한 부분으로 연료분사장치의 고압화 및 전자제어에 관한 연구가 활발하게 진행되어 왔으며, 현재에는 연료와 공기와의 혼합을 최적으로 제어할 수 있는 CRDI 시스템이 개발되어 디젤기관에 적용되고 있다.

*Corresponding author: wangwk@jnu.ac.kr, Tel: +82-61-659-7136, Fax: +82-61-659-7139

CRDI 시스템의 주요 특징은 기관의 운전조건에 따라 인젝터의 솔레노이드 밸브와 커먼레일의 압력을 전기적으로 제어하여 분사시기, 분사량, 분사율 및 분사 압력 등을 정밀하게 제어함으로써 연소제어가 가능한 것이다. 그중에서도 시간에 따른 분사량인 분사율은 연소에 중요한 영향을 미치는 인자로서 분사압력과 분위기 압력의 영향을 받으며, 분무특성과 연료와 공기의 혼합비 등에 영향을 미치므로 매우 중요하다 (Kang et al., 2004).

CRDI 시스템의 분사특성에 관한 연구로는 분사압력과 분위기압력이 분사율 (Kim et al., 2007) 및 분무특성 (Hong et al., 2012)에 미치는 영향에 관한 연구들과 파일럿 분사와 다단분사에 의한 분사율의 형상변화 (Suh et al., 2003; Seo et al., 2007)가 분무특성에 미치는 영향에 관한 연구들이 진행되어 왔으며, 분사율, 분무도달거리, 분무각 등의 거시적 분무특성 및 액적입경분포와 분열과정 (Won and Kim, 2004) 등의 미시적 분무특성을 파악하여 분사계를 통한 디젤기관의 성능개선에 역할을 하고 있다. 그러나 CRDI 시스템은 분사압력의 증가와 함께 분사율 형상의 정교한 제어가 필요하므로 정밀도와 신뢰성이 높은 분사율 측정장치가 요구되며, 또한 고압분사에 의한 분무의 거동과 구조를 파악하기 위해서는 시간적, 공간적으로 높은 분해능의 가시화 장치가 필요하지만, 측정장비들이 비싸고 측정방법이 복잡하므로 실험을 수행하는데 어려움이 많다.

따라서 본 연구에서는 분동식 표준 압력계를 응용한 분위기 조절이 자유로운 Zeuch법 분사율 측정장치와 커먼레일 분사시스템을 직접 제작하여 분사압력의 변화가 분사율에 미치는 영향을 조사하였다. 그리고 동일한 실험조건으로 시간적 공간적 분해능이 우수한 고속 카메라를 이용한 가시화장치를 통해 분무의 발달과정을 가시화하고 분석하여 분무도달거리, 분무각 및 분무 선단속도 등의 거시적 분무특성과 분무 중심부의 고밀도 액적영역의 분열과정 등을 파악하였다. 본 연구의 결과들은 CRDI 분사계의 분무특성을 연구하는데 기초 자료로서 활용될 수 있으리라 생각된다.

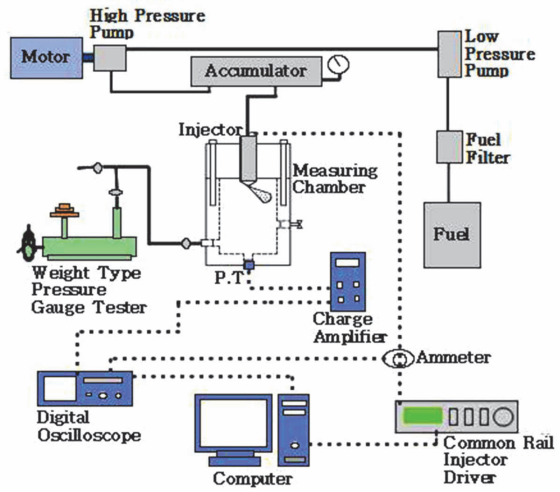
실험장치 및 방법

실험장치

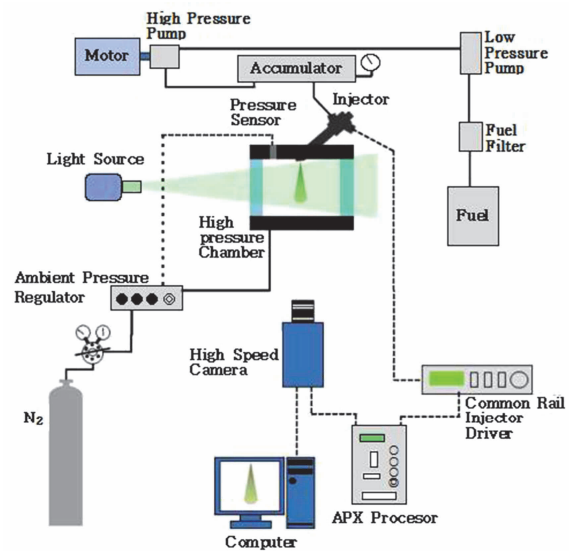
실험장치는 크게 분사율 측정장치, 연료분사장치, 고

압 가시화 정용용기, 영상취득장치 및 데이터 처리장치로 구성되어 있으며 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다.

분사율 측정장치로 사용된 측정용기 (measuring chamber)는 직사각형의 형상을 가지고 있으며, 내부의 용적은 약 15 cc이다. 또한 정확한 분위기압력 조정과 분사량을 측정하기 위하여 분동식 압력계 (weight type pressure gauge tester)를 이용하였다.



(a) Injection rate measuring system



(b) Spray visualization system

Fig. 1. Schematic diagram of experimental set up for injection rate measurement and spray visualization.

연료분사장치는 기본적으로 커먼레일 (common rail) 방식을 기반으로 하고 있으며, 연료유탱크에 저장된 연료유는 저압펌프 (low pressure pump) 및 고압펌프 (high pressure pump, CP 1K3)에서 가압되어 고압축압기 (accumulator, 785 cm³)에 저장되고 인젝터 (injector, DLLA150 P1011)를 통해 분사된다. 그리고 고압축압기로부터 재순환되는 연료유는 공냉식 열교환기를 통해 냉각 후 탱크로 유입되도록 하였다. CB280 모듈을 이용하여 자체 제작한 분사제어기 (injector driver)는 인젝터를 작동시키고 영상취득장치 및 데이터 처리장치를 위한 트리거 신호를 출력한다. 그리고 인젝터 솔레노이드 밸브 (S.V)의 여자시간을 조절하여 분사기간을 0.5 ~ 수 ms까지 조절할 수 있다. 고압 가시화 정용용기 (high pressure chamber)는 정방형에 가까운 형상 (210 mm×210 mm×215 mm)으로 내부용적은 약 3.78 L이다. 그리고 내부를 관찰할 수 있는 3개의 석영 광학창 (120 mm(d)×25 mm(t))이 장착되어 있으며, 내부압력을 측정하기 위해 고압 피에조 압력계 (DCR 4010, Druck)가 설치되어 있다. 고속카메라 (high speed camera, FASTCAM-ultima APX)는 최대 1024×1024 해상도를 지원하고 최대 120,000 fps로 촬영할 수 있다. 데이터 처리장치는 압력변환기 (pressure transducer, Kistler 6061B), 증폭기 (charge amplifier, Kistler 5011), 디지털 오실로스코프 (digital oscilloscope, TDS2014) 및 컴퓨터 (computer)로 구성되어 있다.

실험방법

실험에 사용한 연료는 상용디젤유이고, 분사시의 연료유 온도는 35±2℃를 유지했으며, 인젝터 솔레노이드 밸브의 여자시간은 분사압력에 관계없이 약 1.125~1.2 ms로 설정하였다. 분위기압력은 분동식 압력계를 이용하여 2 MPa로 일정하게 하고, 분사압력은 70, 100 및 130 MPa로 변화시켜 가며 실험하였다. 분사율 측정시의 실험조건과 인젝터 사양은 Table 1에 나타내었다. 분사율을 구하기 위해, 분사기간 동안 측정용기 내의 압력을 압력변환기와 증폭기 (Kistler 5011)를 통해 2 μs 간격으로 디지털 오실로스코프에 입력시켜 컴퓨터에 저장하였으며, 그 압력을 FFT 필터로 처리한 후 미분한 값을 분사율 계산에 이용하였다.

분사량 측정은 각 실험조건에서 분사량에 대한 분동

Table 1. Specification and conditions for experiment

Injection system	Common- rail		
Injector type	Solenoid-driven type d=0.168 mm, 5 holes		
Injection pressure (P _{inj})	70	100	130 MPa
Injection quantity (mg)	16.3	27.8	34.7
Ambient pressure (P _{amb})	2 MPa		
Injection duration (T _d)	0.9~1.25 ms		
Fuel, density (kg/m ³)	Diesel oil, 825		

식 표준압력계의 피스톤 변위만큼 오리피스스를 통해 연료를 유출시켜 정밀한 전자저울로 중량을 측정하였으며, 100회의 평균분사량을 취하였다.

분무 가시화 실험조건은 분사율 측정시와 같고, 고압 가시화 정용용기의 분위기압력은 질소 가스를 이용하여 조정하였다. 분무 가시화 촬영은 인젝터의 S.V에 전류가 인가되는 시점을 시작점으로 하여 8,000 fps (1 fps=125 μs)로 촬영하였다. 조명은 할로겐 램프 (1 kW)를 이용하여 측면산란광 방법으로 조명하였으며, 촬영시 해상도는 256×512이다.

실험결과 및 고찰

분사압력에 따른 분사율의 변화

Fig. 2는 인젝터 S.V의 여자시간을 일정하게 하고, 분위기압력 2 MPa하에서 분사압력을 70, 100 및 130 MPa로 변화시켜 측정한 분사율을 나타낸다. 인젝터 S.V의 여자 시작시간을 0으로 하여 압력에 따른 분사시작점을 보면 분사압력이 높을수록 분사시작이 빨라졌으며, 분사기간도 0.966 ms, 1.146 ms, 1.168 ms로 길어졌다. Table 1에서 알 수 있듯이 분사량도 증가하였으며, 평균분사율은 70 MPa에서 18.95 mg/ms, 100 MPa에서 25.52 mg/ms 및 130 MPa에서 31.88 mg/ms 정도였다. 그리고 분사압력 130 MPa의 경우 분사시작점에서 최대 분사율을 나타낼 때까지 소요되는 시간이 약 0.188 ms 정도였으나 70 MPa의 경우에는 약 0.398 ms로 길어졌다. 따라서 분사압력이 높을수록 분사기간이 길고 분사량이 많아지므로 분사압력이 니들 개폐에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 실험시의 인젝터 S.V의 여자시간 및 전류파형은 분사압력에 관계없이 동일하나, 인젝터 S.V의 흡인력으로 제어챔버 상부의

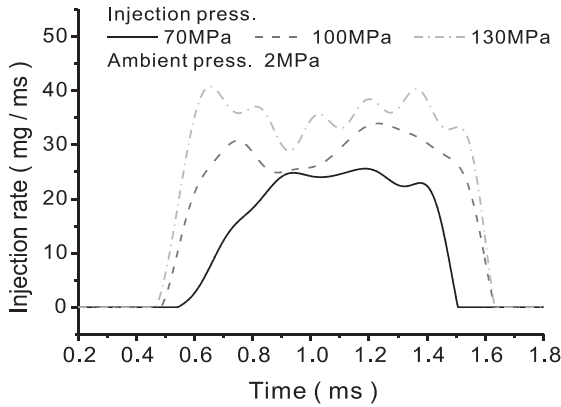


Fig. 2. Injection rate profiles at different P_{inj} .

밸브 볼 (ball)이 열리는 분사초기와 밸브 스프링에 의해 밸브 볼이 닫히는 분사말기에 분사압력이 밸브 볼의 동작시기와 양정 (lift)에 영향을 미쳐 니들 (needle)의 개폐시기와 열림의 정도가 달라지기 때문이라 생각된다 (Kim et al., 2013).

분사압력에 따른 분무의 거시적 특성

Fig. 3은 분무도달거리와 분무각 (θ_s)의 측정 개략도를 나타낸 것으로, Adobe Photoshop CS3를 이용하여 분무도달거리와 분무각을 측정하였다. 각 분사압력에서 분무가 시작되는 시점부터 일정한 시간간격 (0.125 ms)으로 측정한 분무도달거리는 노즐끝단부터 분무선단 경계까지의 거리 중 최대값으로, 분무각은 노즐끝단과 분무측면 경계를 연결한 두 직선 사이의 각으로 정의하였다.

Fig. 4는 분사압력 변화에 따른 분무도달거리를 나타낸다. 동일한 시간에서 분사압력이 높을수록 분무도달거리가 길어지고 있으며, 분무가 완전하게 발달한 영역 (0.875 ms)에서 130 MPa의 분무도달거리가 70 MPa의 경우보다 약 9 mm 길어졌다. 이는 동일한 분위기압력에서 분사압력이 높을수록 분무의 운동량이 크기 때문

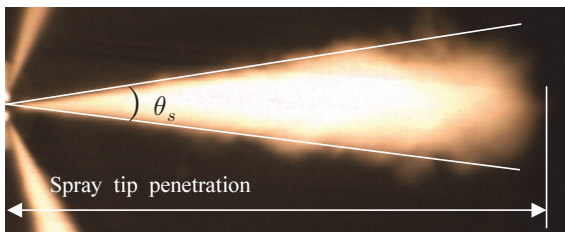


Fig. 3. Measurement of spray characteristics.

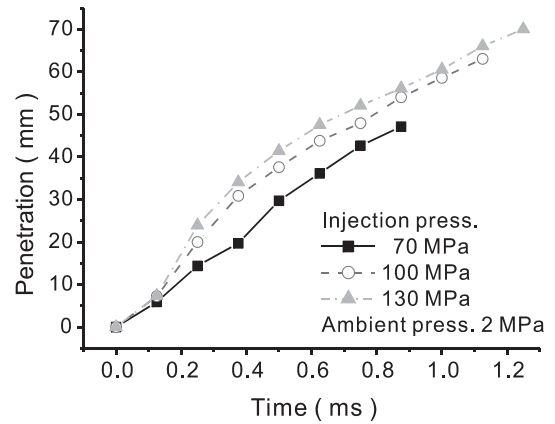


Fig. 4. Effect of P_{inj} on spray tip penetration.

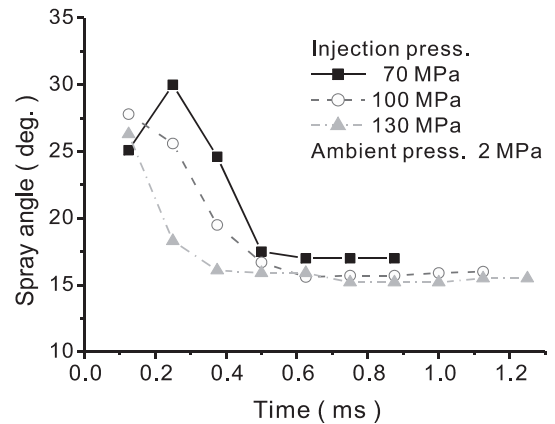


Fig. 5. Effect of P_{inj} on spray angle.

이라 생각된다.

Fig. 5는 분사압력 변화에 따른 분무각을 나타낸다. 분사직후를 제외하고는, 분사압력 변화에 따른 분무각의 변화는 분사압력이 낮을수록 분무각이 약간 크게 되는 경향을 보이고 있으며, 시간경과에 따라 분무각이 수렴하는 것을 알 수 있었다. 분사직후 분사압력이 70 MPa일 때의 분무각이 작게 나타난 것은 Fig. 2의 분사율선도에서 알 수 있듯이, 분출속도 (jet velocity)가 낮아 초기분사율이 작기 때문이라 생각된다. 그리고 분사 초기에는 일정한 분위기압력 하에서 분사압력이 높을수록 분무액적의 운동량이 커서 공기와의 상대속도가 빠르므로 분무의 반경방향속도에 대한 분무선단속도의 비가 크기 때문에 분무각이 작아지고, 시간의 경과에 따라 공기저항의 증가로 액적의 운동량이 감소하면서 그 비율이 일정하게 되므로 인해 분무각이 수렴한다고 생각된다.

Fig. 6은 분사압력 변화에 따른 분무선단속도 (spray tip velocity)를 나타낸다. 분사압력이 높을수록 초기 분무속도가 빨라졌으며, 시간이 경과함에 따라 일정한 기울기로 분무속도가 느려지는 경향을 보였다. 이는 분사압력이 높을수록 노즐 공 (hole)에서의 분출속도가 빠르기 때문에 초기 분무속도가 빠르게 되나, 시간의 경과에 따라 미립화의 촉진으로 인한 분무체적 상승으로 공기저항을 많이 받게 되어 분무속도가 느려진다고 생각된다 (Wakuri et al, 1960). 분사압력 70 MPa의 분무선단속도가 느려졌다 다시 빨라지는 것은 분사울신도에서 알 수 있듯이 분사개시 후 0.4 ms 부근에서 분사울의 기울기가 감소했다 다시 증가하기 때문이라 생각된다.

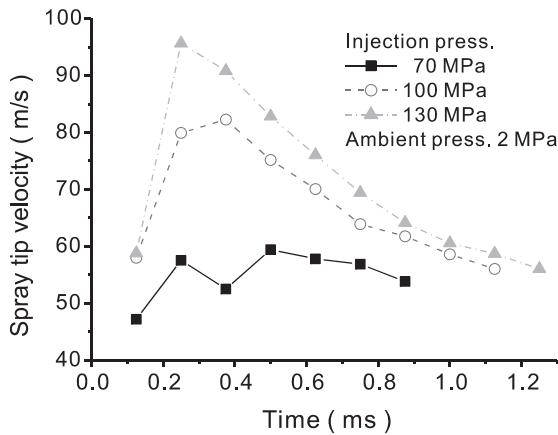
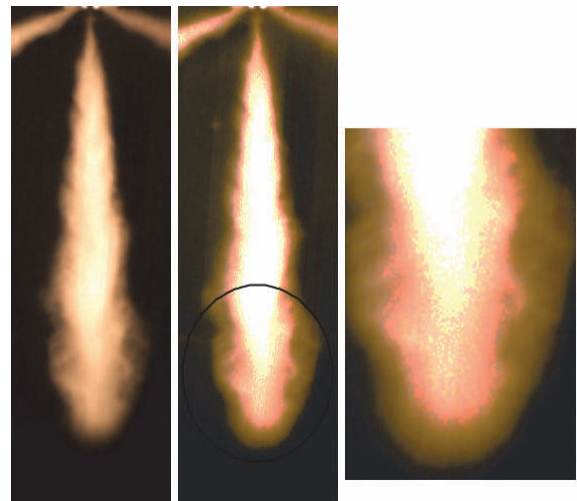


Fig. 6. Effect of P_{inj} on spray tip velocity.

분사압력에 따른 분무거동의 분석

Fig. 7은 분무내부의 액적의 밀도분포를 뚜렷하게 하기 위해 Adobe Photoshop CS3를 이용하여 원본사진의 이미지 모드, 명도와 대비를 조정하여 영상처리한 것을 원본과 비교한 것이다. Yeh et al. (1993)에 의하면 산란광의 강도는 액적들의 표면적에 비례하므로 산란광의 강도가 약할수록 미립화가 잘 이루어진 영역이라 할 수 있다. 그림에서 보면, 분무내의 액적의 밀도가 높을수록 산란광의 강도가 크게 되어 밝게 나타나고 있으며, 명도가 같은 영역이 뚜렷하게 구분됨을 알 수 있었다. 그리고 분무선단의 고밀도 액적영역의 가장자리에서 분열되는 액적군들을 확인할 수 있었다. 따라서 Adobe Photoshop CS3를 이용함으로써 원본사진의 형상과 크기를 거의 변형시키지 않고 분무의 산란광 강도로서 액적의 고밀도영역과 미립화된 영역의 구분과 액



(a) original (b) adjustment (c) magnification

Fig. 7. Comparison of a original with a adjustment picture.

적군들의 분열과정을 확인할 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 8은 분위기압력 2 MPa에서 분사압력 변화에 따른 분무의 발달 형상을 보여준다. Kang and Bae (2003)의 연구에 의하면, 분사압력 40 MPa의 경우에는 분사 후 약 180 μs 후에 미립화영역에 도달하고 분무의 중심부는 액사 (liquid ligament)와 액적 (liquid droplet)들로 얽혀 있으며, 112 MPa 이상의 고압디젤분무에서는 분사 후 약 45 μs 후의 짧은 시간에 미립화영역에 도달하며 분무의 중심부는 미세한 액적들로 채워져 있다고 하였다. 또한 다른 연구에서도 고압디젤분무는 작은 액적으로 이루어진 가스제트 (gas jet)에 가깝다고 설명하고 있다 (Borman GL and Ragland KW. 1998). 그러므로 분사초기를 제외한 고압분사의 분무중심부는 작은 액적들의 수밀도가 아주 높은 영역으로 생각되며, 본 연구에서는 내부 중심부의 액적 수밀도가 높은 영역의 형상이 전형적 분무형상인, 각 분사압력에서 0.5 ms 사진의 밝은 부분처럼, 상류층의 cone형과 하류층의 cup형을 유지하고 있을 때는 고밀도 영역의 액적분열이 활발하지 않는 것으로 간주하였다. 그리고 분사압력에 따른 고밀도 액적영역의 거시적인 분열과정을 시간경과에 따라 고찰해 보면 다음과 같다. 분사압력 70 MPa의 경우는 0.75 ms에서 고밀도 액적영역의 선단이 분열되기 시작하였으며, 분사가 끝난 직후 (1.0 ms)에는 고밀도 액적영역의 형상도 많이 변형되었다. 그리고 분사 후 1.375 ms에는 주위공기가 분무속으로 많이 도입되

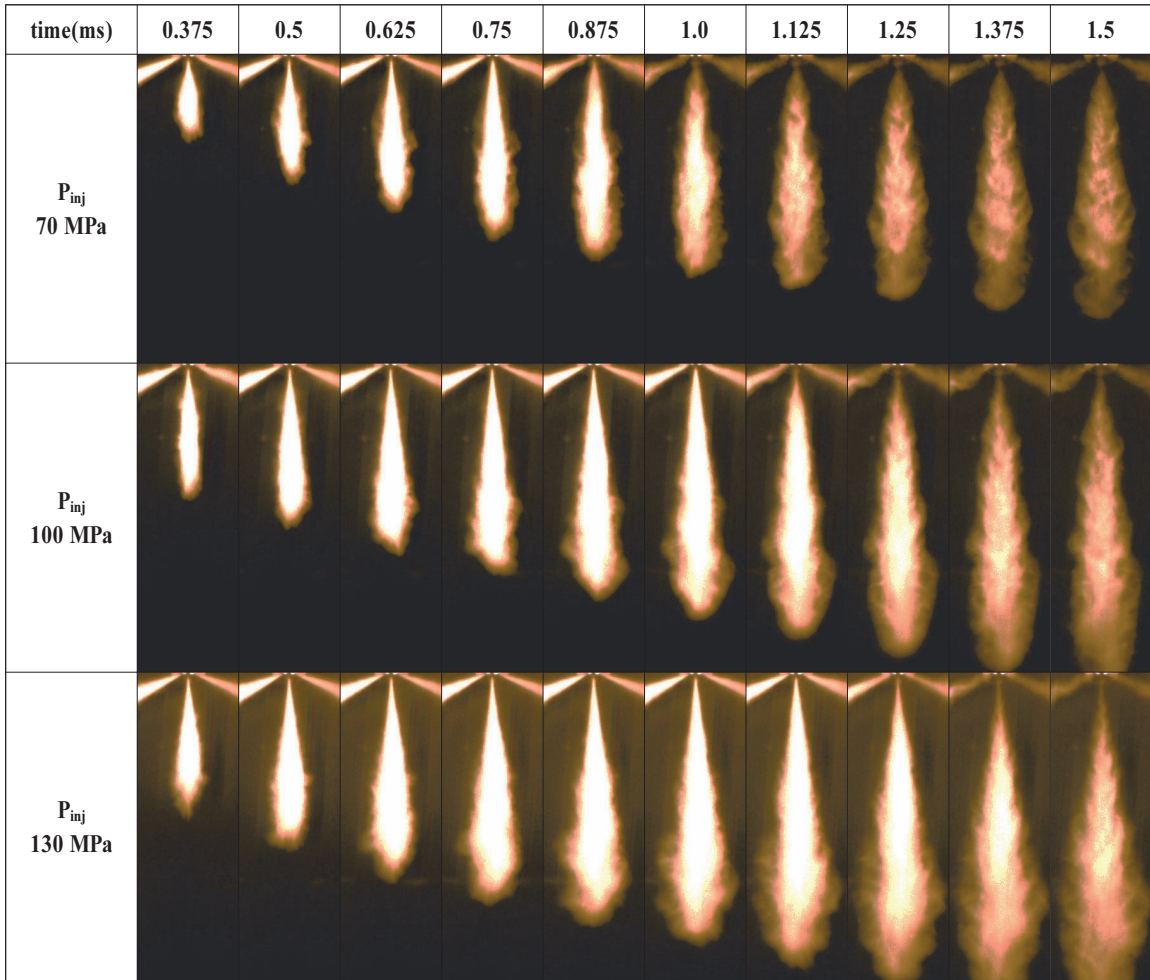


Fig. 8. Spray development at different P_{inj} , $P_{amb}=2MPa$.

어 고밀도 액적영역이 거의 사라진 것을 알 수 있었다. 100 MPa의 경우, 분사가 진행 중인 0.75 ms부터 분무 선단에서 분열이 일어나기 시작하여 분사가 끝난 직후 (1.125 ms)에는 분열로 인해 고밀도 액적영역의 형상도 변화하였으며, 1.5 ms에서는 고밀도 액적영역이 거의 사라졌으나 분무중심부에는 아직 공기만의 영역이 보이지 않았다. 130 MPa의 경우, 분사가 진행 중인 0.75 ms부터 분사가 끝나는 1.25 ms까지는 주로 분무의 고밀도 액적영역 선단에서 분열이 일어나고 있으며, 그 후로는 고밀도 액적영역의 가장자리에서도 분열이 일어났으며 1.5 ms까지도 분무의 중심부에 고밀도 액적영역이 약간 존재하고 있음을 알 수 있었다. 한편 분무화상으로 구한 분사기간은 분사압력 70 MPa에서 1.0 ms, 100 MPa에서 1.125 ms 및 130 MPa에서 1.25 ms 정도로서,

Fig. 3의 분사율선도에서 구한 분사기간과 비교하면 최대 80 μs 의 차이가 있었다. 이는 분사율을 계산하기 위해 압력을 FFT 필터로 처리하는 과정에서의 발생한 오차라고 생각된다.

결론

본 연구에서는 자체 제작한 Zeuch법 분사율 측정장치를 이용하여 일정한 분위기압력 하에서 분사압력에 따른 분사율을 측정하고, 동일한 실험조건으로 분무 가시화장치를 통해 분무의 발달과정을 가시화하여 분석한 결과는 다음과 같다. 인젝터 솔레노이드 밸브의 여자조건이 거의 동일한 상태에서, 분사압력 70 MPa에 비해 분사압력 130 MPa일 때의 분사기간이 약 0.2 ms 길어졌고 평균분사율이 약 12.9 mg/ms 증가되었다. 따

라서 분사압력이 니들의 개폐에 상당한 영향을 미치는 것을 확인하였다. 그리고 분사압력이 높을수록 분무도달거리가 길어졌으며, 분무가 완전하게 발달한 영역 (0.875 ms)에서 130 MPa의 분무도달거리가 70 MPa의 경우보다 약 9 mm 길게 되었다. 또한 분무각의 변화는 분사압력이 낮을수록 분무각이 약간 크게 되는 경향을 보였으며, 분사초기의 분무속도는 분사압력이 상승할수록 크게 되었다. 또한 적용된 가시화방법과 분무거동 분석법으로 액적의 고밀도영역과 미립화된 영역의 구분과 액적군들의 분열과정을 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과들과 적용 기술들은 고압디젤분무의 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Borman GL and Ragland KW. 1998. Combustion Engineering. McGraw-Hill, Singapore, 311.
- Hong JG, Ku KW, Kim JH and Lee CW. 2012. Spray Characteristics of CRDI for injection and ambient pressure. KSAE12-G0011, 56-60.
- Kang JS and Bae CS. 2003. The Structure of Break-up Zone of Diesel Spray from a VCO Nozzle. Spring conference proceeding of KSAE, 168-173.
- Kang JS, Choi W and Bae CS. 2004. Analysis of Transient Diesel Spray with Visualization and Injection Rate Measurement. KSAE, 12(5), 12-18
- Kim HM, Chung JW and Lee KH. 2007. A Study on the Characteristics of Injection-rate at Different Injection Conditions in a Common-rail Diesel Injector. Journal of ILASS-KOREA, 12(3), 166-171.
- Kim SA and Wang WG. 2013. The Fabrication and Trial Performance of Injector Driver for CRDI. Journal of KSPME, 17(2), 38-45.
- Marcic M. 2006. Sensors for Injection Rate Measurements. Sensors. MDPI, Maribor. 1367-1382.
- Seo YT, Suh HK and Lee CS. 2007. Spray and Combustion Characteristics on Biodiesel Blends with Diesel Fuel according to Split Injection System. Spring conference proceeding, KSAE, 638-643.
- Suh HK, Seo SH, Park SW, Chun MS and Lee CS. 2003. Atomization characteristics of high-pressure diesel spray with pilot injection. Fall conference proceeding, KSAE, 378-384.
- Wakuri Y, Fujii M, Amitani T and Tsuneya R. 1960. Studies on the Penetration of Fuel Spray in a Diesel Engine. Bulletin of JSME 3(9), 123-130.
- Won YH and Kim WT. 2004. Visualization of Breakup and Atomization Processes in Non-evaporating Diesel Sprays. KSAE 12(1), 25-31.
- Yeh CN, Kosaka H, Kamimoto T. 1993. Fluorescence/Scattering Image Technique for Particle Sizing in Unsteady Diesel Spray. Transactions of JSME (B 499), 4008-4013.

2016. 01. 07 Received

2016. 01. 18 Revised

2016. 01. 19 Accepted