

분위기압력에 따른 CRDI 분사계의 분무특성 연구

A Study on the Spray Characteristics of CRDI System with Ambient Pressure

김상암* · 왕우경**†

Sang-Am Kim* and Woo-Gyeong Wang**†

(접수일 : 2014년 07월 17일, 수정일 : 2014년 09월 30일, 채택확정 : 2014년 09월 30일)

Abstract: The studies of the spray characteristics for a CRDI engine had been advancing by many researchers, because the performance and exhaust emission were significantly affected with the spray characteristics. But most experiments of the studies would be done at low ambient pressure conditions under 2MPa. In this study, injection rates were measured with Zeuch's method at various ambient pressures to 5MPa and a constant injection pressure of 130MPa. On the same conditions, 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. The initial injection rate, penetration, angle, velocity and breakup of the spray were practically affected with a variation of the ambient pressure, but the injection start time and injection period were scarcely affected. As the ambient pressure was higher, the breakup of a high density droplet region in the spray was happened slowly and the main position of breakup was shifted from a front of the spray to a upstream around a nozzle. 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 a CRDI.

Key Words : Injection Rate, Zeuch's Method, Non-evaporating Spray, Macroscopic Characteristics, Breakup Process

1. 서 론

CRDI 시스템은 커먼레일에 저장된 고압의 연료를 인젝터를 통해 연소실로 직접 분사시키는 방식으로, 전자제어를 통해 연료의 분사압력, 시기 및 양을 정밀하게 제어함으로써 연비향상과 유해배기가스 저감 등에 있어서 많은 장점을 가

지고 있다. 특히 배기가스 규제기준의 상향조정과 연료의 경제성 등으로 인해 CRDI 디젤기관이 승용차용 기관으로 주목을 받고 있으므로 기관의 성능, 배기가스 저감 등의 여러 연구가 진행되고 있다.

디젤기관의 연소특성과 배기특성은 실린더 내에서 분사되는 연료와 공기의 혼합에 의해 주로 지

**† 왕우경(교신저자) : 전남대학교 해양기술학부

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

*김상암 : 전남대학교 대학원

**† 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.

배되며, 그 혼합과정은 분무특성, 공기유동 및 연소실 형상 등에 의해 좌우된다. 그 중 분무특성^{1,2)}은 분무도달거리(spray tip penetration), 분무각(spray cone angle) 등의 거시적 특성과 액적입径의 크기(droplet size) 및 분포(distribution)와 같은 미시적 특성이 있으며 연소효율 및 유해배기가스 배출에 직접적인 영향을 미치는 주요인자로 작용하고 있다. 그리고 시간에 따른 분사량인 분사율 또한 기관성능을 좌우하는 중요한 인자의 하나로 분사압력과 연소실 분위기압력에 영향을 받으며 분무특성에 큰 영향을 미친다³⁾. 또한 분사율의 형태 및 실제 배압상태에서의 분사량은 연료와 공기의 혼합비를 결정한다는 점에서 매우 중요하다.

지금까지 CRDI 분사계의 분사율 및 분무특성 등에 관한 연구는 여러 연구자들에 의해 보고되고 있으나, 분사압력은 실제기관의 분사압력에 접근하였으나, 분사시간이 길고 분위기압력이 낮은 상태에서 얻은 실험결과들¹⁻³⁾이다. 그러므로 CRDI 시스템을 실제기관과 같은 조건에서 구동하여 얻은 분사율 및 분무특성과는 차이가 있다고 생각한다.

따라서 본 연구에서는 CRDI 디젤기관의 운전 조건에 상당하는 분사압력과 분위기압력 하에서 분사율 측정과 분무영상을 취득하였다. 분사율은 분동식 표준압력계를 응용하여 분위기압력 조절과 분사량 측정이 가능한 Zeuch식 분사율 측정장치를 통해 측정되었으며, 동일한 분사압력 하에서 분위기압력이 분사율에 미치는 영향을 조사하였다. 분무영상은 시간적 공간적 분해능이 우수한 고속카메라를 이용한 가시화장치를 통해 촬영되었으며, 분위기압력에 따른 분무의 발달과정을 가시화하고 영상처리하여 거시적 분무특성과 분무 내부의 고밀도 액적영역의 분열과정⁴⁾들을 분석하였다. 본 연구의 결과들은 CRDI 분사계의 분무 특성을 연구하는데 필요한 자료들을 제공할 수 있으리라 생각된다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 분사율 실험

분사율 실험장치는 Zeuch식 분사율 측정원리^{5,6)}

를 응용한 것으로, 분사율 측정장치, 연료분사장치 및 데이터 처리장치로 구성되어 있다. Fig. 1은 본 연구에서 이용한 분사율 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 측정용기(measuring chamber)는 직사각형 형상이며, 내부용적은 약 15cc이다. 그리고 측정용기에는 인젝터(injector), 압력변환기(pressure transducer, Kistler 6061B) 및 공기배출밸브(air vent valve)가 설치되어 있으며, 정확한 분위기압력 조절과 분사량을 측정하기 위해 이용된 분동식 표준압력계와 연결되어 있다. 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, 785cc)에 저장되고 인젝터(DLLA150 P1011)를 통해 분사된다. 그리고 고압축압기로부터 재순환되는 연료유는 공랭식 열교환기를 통해 냉각 후 탱크로 유입되도록 하였다. 인젝터는 자체 제작한 인젝터 드라이버⁷⁾(common rail injector driver, CB280 module)에 의해 작동되며, 인젝터 S.V의 여자시간을 조정하여 분사시간을 0.5~수ms 까지 조절할 수 있다.

실험시에 사용한 연료는 상용디젤유(S.G. 0.85)이고, 분사시의 연료유 온도는 35±2℃를 유지하였으며 분사시간은 약 1.125~1.2ms로 설정하였다. 분사압력은 130MPa로 일정하게 하고 분위기압력은 분동식 표준압력계를 이용하여 1MPa에서 5MPa까지 1MPa 씩 변화시켜가며 실험하였다. Table 1은 인젝터의 사양을 나타낸다. 분사율을 구하기 위해, 분사시간 동안 측정용기 내의 압력을 압력변환기와 증폭기(Kistler 5011)를 통해 2μs 간격으로 디지털 오실로스코프(Tektronix TDS 2014)에 입력시켜 컴퓨터에 저장하였으며, 그 압력을 FFT 필터로 처리한 후 미분한 값을 분사율 계산에 이용하였다.

분사량 측정은 각 실험조건에서 분사량에 대한 분동식 표준압력계의 피스톤 변위만큼 오리피스 를 통해 연료를 유출시켜 정밀한 전자저울로 중량을 측정하였으며, 100회의 평균분사량을 취하였다. 그리고 분사율 계산에는 각 배압에 따른 분사

량의 차이가 작으므로 그들의 평균값을 이용하였다. Table 2는 각 실험조건에서 측정된 분사량을 나타낸 것이다.

Table 1 Specification of injector for experiment

Injection system	Common- rail
Injector type	Solenoid-driven type d=0.168mm, 5 holes

Table 2 Injection quantity at experimental conditions

$P_{inj.}$ \ $P_{amb.}$	1	2	3	4	5 MPa
130 MPa	37.2	37.3	37.0	36.5	36.7 mg

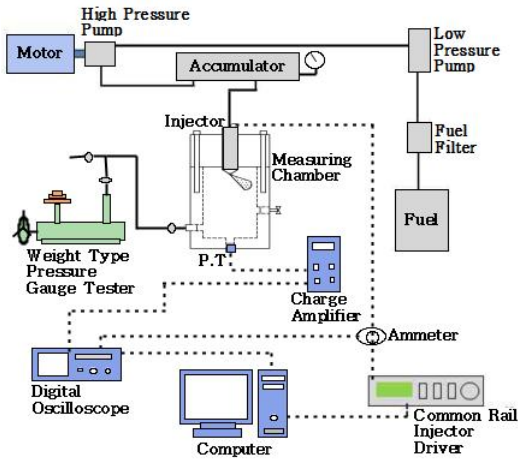


Fig. 1 Schematic diagram of injection rate measuring system

2.2 분무가시화 실험

분무가시화 실험장치는 가시화 고압용기, 연료 분사장치, 영상취득장치 및 영상처리장치로 구성되어 있으며 실험장치의 개략도는 Fig. 2에 나타내었다. 가시화 고압용기는 정방형에 가까운 형상(210×210×215mm)으로 내부용적은 약 3.78ℓ 이고 3개의 석영광학창(d20×t25mm)이 장착되어 있으며, 내부압력을 측정하기 위해 피에조 압력계(Druck, DCR 4010)가 설치되어 있다. 그리고 촬영에 사용된 고속카메라(FASTCAM-ultima APX)는 최대

1024×1024 해상도를 지원하고 최대 120,000fps로 촬영할 수 있다.

분무가시화 실험조건은 분사를 측정시와 동일하며, 가시화 고압용기의 분위기압력은 질소가스(N₂)를 이용하여 조정하였다. 분무가시화 촬영은 인젝터의 S.V에 전류가 인가되는 시점을 시작점으로 하여 8,000fps(1fps=125μs), 해상도 256×512로 촬영하였다. 조명(light source)은 할로겐램프(1kW) 2개를 석영광학창 양측에 설치하여 측면산란광 방법³⁾으로 조명하였으며, 촬영 시에만 한시조명하여 광원에 의해 가시화 고압용기의 내부온도가 상승하는 것을 방지하였다.

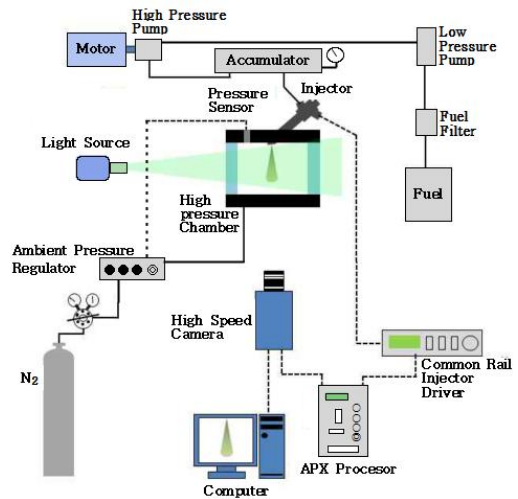


Fig. 2 Schematic diagram of spray visualization system

3. 결과 및 고찰

3.1 분사울에 의한 분사특성

Fig. 3은 분사압력 130MPa에서 분위기압력에 따른 분사울을 나타낸 것이다. 분사울 형상을 보면, 분위기압력이 상승할수록 분사초기에 분사울 상승 기울기가 감소되었으며 최대분사울의 위치도 분사초기에서 분사후기로 이동함을 알 수 있었다.

Fig. 4는 분사시작점에서 분사울의 1차 변곡점까지의 기간과 그때의 분사울을 나타낸 것이다. 분위기압력이 증가할수록 그 기간은 길어지고 분

사율이 낮아지므로, 초기분사율의 기울기가 작아진다⁸⁾.

일정한 압력하의 용기 속으로 분사된 연료에 의해 증가되는 압력(Δp)은 체적변화율($\frac{\Delta V}{V}$)과 체적탄성계수(B , bulk modulus of elasticity)의 곱, 즉 $\Delta p = B \frac{\Delta V}{V}$ 로 나타낼 수 있다. Takamura⁵⁾의 실험에 의하면, 경유의 체적탄성계수는 분위기압력에 비례하고 온도에 반비례하며, 그 실험값은 1%/MPa(실험범위 1~5MPa) 및 -0.6%/K(298~313K) 정도이다. 그러므로 작은 노즐 구멍을 통해 일정한 양의 연료가 정압하의 측정용기에 분사될 때, 특히 유체가 정지되어 있는 분사초기에는 마찰저항이 크므로, 분위기압력 상승의 영향보다 마찰저항에 의한 온도상승의 영향이 체적탄성계수에 크게 미치므로 인해 체적탄성계수가 작아진다. 그 결과 분위기압력이 높을수록 용기내의 압력상승이 작아져 초기분사율이 낮게 된다고 생각된다.

Fig. 5는 분위기압력에 따른 분사시작점과 분사시간을 나타낸 것이다. 분사시작점은 인젝터 S.V의 여자전류 상승시작점을 기준으로 하여 연료분사 시작점까지의 시간을 뜻한다. 분사시간은 분사율선도에서 구하였다. 그림에서 보면, 분사시작점은 0.454~0.47ms 이고, 분사시간은 1.148~1.162ms이다. 분위기압력 변화에 따른 분사시작점의 차이는 16 μ s, 분사시간의 차이는 14 μ s 정도이고 분위기압력 변화에 따른 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 그러므로 인젝터 S.V의 동작과 내부의 기계적인 순간동작의 차이에 기인한 것으로 볼 수 있으며, 분위기압력 변화가 분사시작점 및 분사시간에 영향을 거의 미치지 않는다고 생각된다.

3.2 가시화에 의한 분무특성

Fig. 6은 본 연구에서 측정된 분무도달거리와 분무각(θ_s)의 측정 개략도를 나타낸 것으로, Adobe Photoshop CS3를 이용하여 분무도달거리와 분무각을 측정하였다. 분무도달거리는 노즐끝단부터 분무선단 경계까지의 거리 중 최대값으로, 분무각은 노즐끝단과 분무측면 경계를 연결한 두 직선 사이의 각으로 정의하였다.

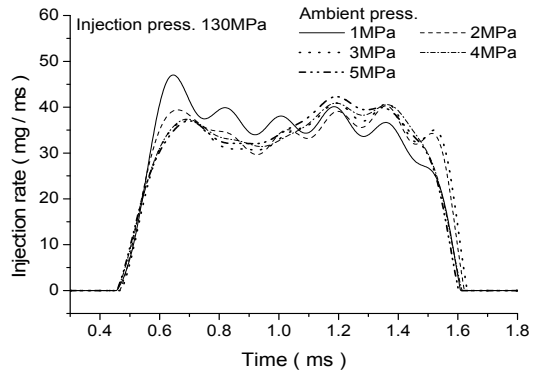


Fig. 3 Injection rate profiles at different P_{amb}

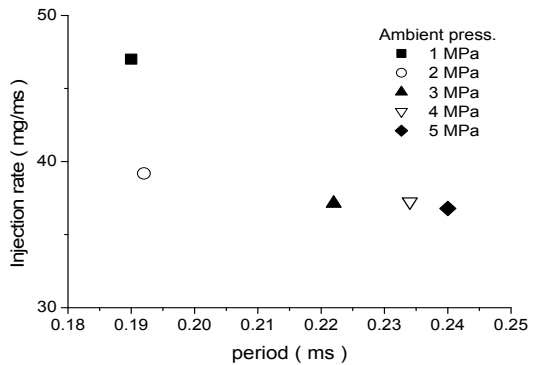


Fig. 4 Period & injection rate of 1st inflect point at different P_{amb}

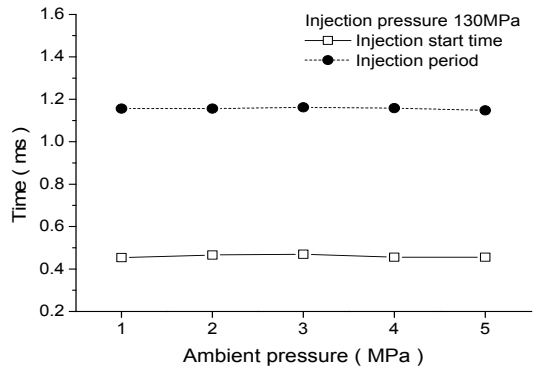


Fig. 5 Injection start time & injection period at different P_{amb}

Fig. 7은 분위기압력에 따른 분무도달거리를 시간에 따라 나타낸 것이다. 동일한 시간에서는 분

위기압력이 증가할수록 분무도달거리가 짧아지며, 시간이 경과함에 따라 완만하게 증가함을 알 수 있다. 이는 분위기압력 즉, 분위기밀도가 증가할수록 주위기체와 분무액적 간의 상대속도의 감소와 분무의 발달로 인한 분무선단의 면적증가로 인한 저항의 증가 때문이라 생각된다.

Fig. 8은 분위기압력에 따른 분무각을 나타낸 것이다. 분무가 발달한 후에는 분위기압력이 증가할수록 분무각이 크게 되었으나, 분사초기에는 분위기압력에 따른 경향이 뚜렷하지 않았다. 이는 분위기압력의 상승으로 인한 주위기체밀도의 상승은 액적의 저항을 증가시켜 분무선단의 면적이 증가하기 때문으로 생각되며, 분사초기에는 분무의 체적이 작기 때문에 공기의 저항이 작으므로 분위기압력의 영향을 크게 받지 않고 인젝터의 순간적인 분사특성의 변화에 기인한 것으로 판단된다. 그리고 분사초기에는 분무각이 크게 되었으나 시간의 경과에 따라 작아지면서 0.5ms 이후에는 분무각이 일정하게 수렴하였다.

Fig. 9는 분위기압력 변화에 따른 분무선단속도를 나타낸 것이다. 분위기압력이 낮을수록 분무선단속도가 빠르게 되었고, 각 분위기압력 하에서는 시간이 경과할수록 분무선단속도가 감소되었다. 이는 Fig. 3의 분사울선도에서 나타나듯이 분위기압력이 낮을수록 초기분사율이 높게 되며, 분무초기에 분출되는 분무줄기(jet stream)와 주위공기와의 상대속도가 더욱 커지므로 분무선단속도가 빠르게 된다. 그리고 시간경과에 따라 분무의 미립화가 촉진되어 액적의 직경이 작아져 액적이 갖고 있는 운동량이 보다 빨리 감쇄되기 때문에 분무선단속도가 감소된다고 생각된다.

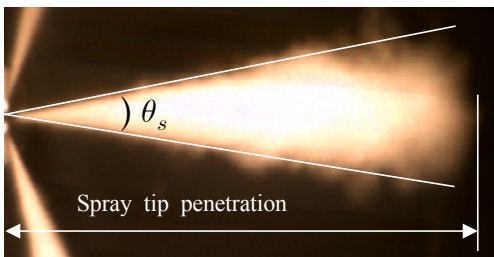


Fig. 6 Measurement of spray characteristics

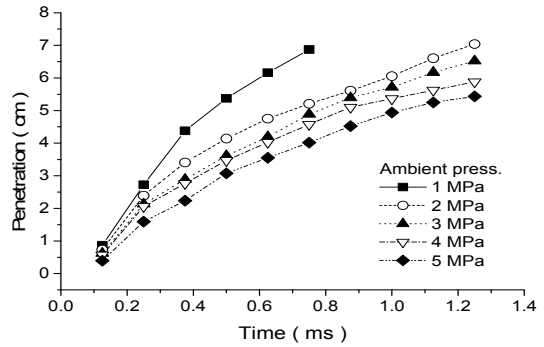


Fig. 7 Effect of P_{amb} on spray tip penetration

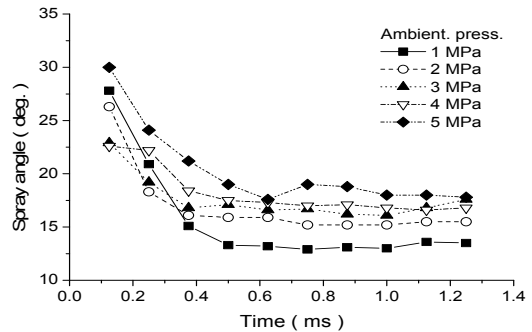


Fig. 8 Effect of P_{amb} on spray angle

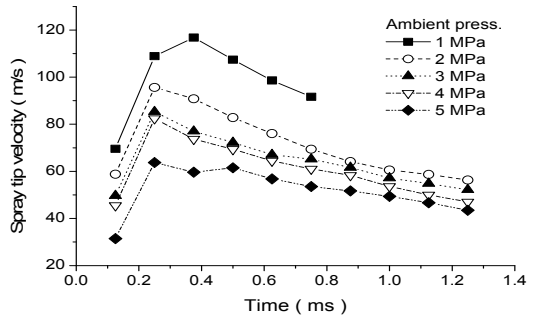


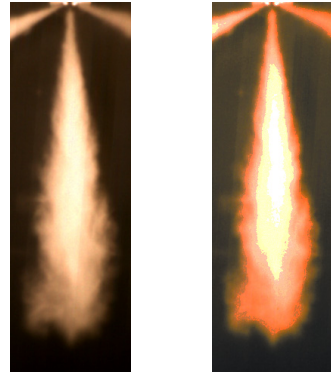
Fig. 9 Effect of P_{amb} on spray tip velocity

3.3 영상처리에 의한 분무분석

Fig. 10은 분무내부의 액적의 밀도분포를 뚜렷하게 하기 위해 Adobe Photoshop CS3를 이용하여 원본사진의 이미지 모드, 명도와 대비를 조정하여 영상처리한 것을 원본과 비교한 것이다. Yeh⁹⁾에 의하면 산란광의 강도는 액적의 표면적에 비례하므로, 산란광의 강도가 높을수록 액적들의 밀도가

높은 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. 따라서 Adobe Photoshop CS3를 이용함으로써 원본사진의 형상과 크기를 거의 변형시키지 않고 분무의 산란광 강도로서 액적의 고밀도 영역과 미립화된 영역을 확인할 수 있었다.

Fig. 11은 분사압력 130 MPa, 분위기압력 1, 3 및 5 MPa 하에서 시간에 따른 분무거동을 각각 나타낸다. 내부의 액적 밀도가 높은 영역을 분위기압력에 따라 각각 분석해 보면, 분위기압력 1 MPa 하에서는 가늘고 긴 형상을 하고 있으며 분무시작



(a) original (b) adjustment

Fig. 10 Comparison of a original with a adjustment picture.

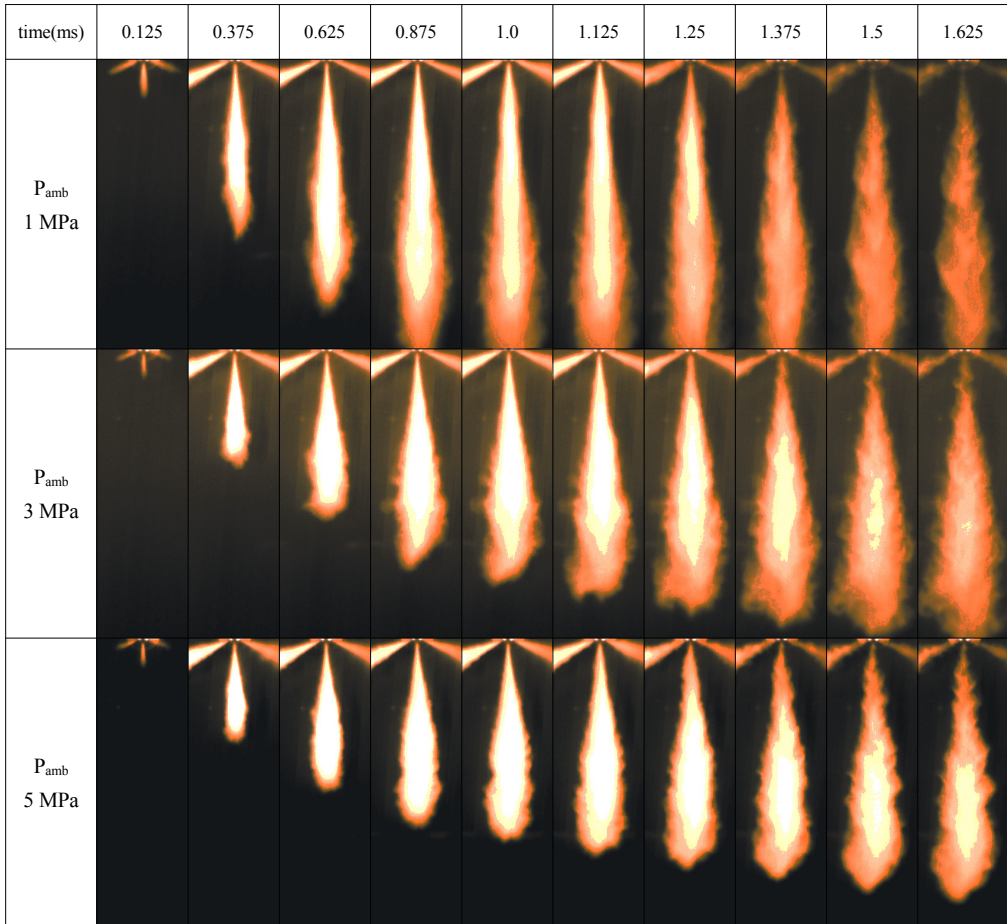


Fig. 11 Comparison of spray behaviors with ambient pressure

작 0.875ms 이후에는 분무의 하류부근에서 부터 분열이 일어나기 시작하여 분사가 종료된 직후 (1.25ms)에는 0.125ms 동안 액적의 고밀도 영역이 1/3 이하로 작아지며 분열이 활발하게 됨을 알 수 있었다. 분위기압력 3 MPa하에서는 분사가 종료된 직후부터 고밀도 영역에서 분열이 일어나기 시작하며 시간경과에 따라 분무의 하류와 상류부근에서 동시에 진행함을 알 수 있었다. 분위기압력 5 MPa하에서도 분사가 종료된 직후부터 고밀도 영역에서 분열이 일어나기 시작하나 분무의 상류부근에서 분열이 먼저 일어남을 알 수 있었다. 이는 분위기압력이 낮으면 공기의 저항이 작아 분무선단속도가 빠르게 되어 주위공기와의 상대속도가 더욱 커지므로 분열이 분무의 하류부근에서 진행되는 가운데 상류의 노즐에서는 분사가 계속되기 때문이라 생각된다. 또한 분위기압력이 높아짐에 따라 공기의 밀도가 높고 저항이 커지므로 분무선단의 연료는 운동량을 잃고, 계속 분사되는 큰 운동량을 가진 연료에 의해 분무가 반경방향으로 확산되나 공기의 저항이 크기 때문에 분무의 선단에서 분열이 억제된다. 그리고 분사가 끝나는 시점에서 노즐부근의 상류에서 생성된 와동¹⁰⁾(vortex)에 의해 상류부근에서 분열이 오히려 활발하게 된다고 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 CRDI 디젤기관의 운전조건에 상당하는 130 MPa의 분사압력과 1 MPa~5 MPa의 분위기압력 하에서 분사율과 분무거동에 관한 자료들을 수집하고, 그 자료들을 분석하여 얻은 거시적 분무특성과 분무 내의 고밀도 액적영역의 분열과정들에 대한 결과들은 다음과 같다.

1. 분위기압력이 낮을수록 초기분사율이 높게 되었다.
2. 분위기압력 변화가 분사시작점 및 분사기간에 미치는 영향은 뚜렷하지 않았다.
3. 분위기압력이 높을수록 분무도달거리가 짧아지고, 분무각이 크게 되었다.
4. 분위기압력이 높을수록 분무 내의 고밀도 액

적영역의 분열이 늦게 일어나고, 그 위치도 분무 선단부근에서 노즐부근의 상류측으로 변화되었다.

참고문헌

1. C. H. Jeon et al, 2010, "A Study on the Non-evaporating Diesel Spray Characteristics as a Function of Ambient Pressure in Constant Volume Combustion Chamber", Journal of KSME, Vol. 34, No. 5, pp. 645-652.
2. J. G. Hong et al, 2012, "Spray Characteristics of CRDI for injection and ambient pressure", KSAE12-G0011, pp. 56-60.
3. J. S. Kang, W. Choi and C. S. Bae, 2004, "Analysis of Transient Diesel Spray with Visualization and Injection Rate Measurement", Transactions of KSAE, Vol. 12, No. 5, pp. 12-18.
4. Y. H. Won and W. T. Kim, 2004, "Visualization of Breakup and Atomization Processes in Non-evaporating Diesel Sprays", Transactions of KSAE, Vol. 12, No. 1, pp. 25-31.
5. A. Takamura et al, 1989, "Development of a New Measurement Tool for Fuel Injection Rate in Diesel Engines", SAE 890317.
6. G. R. Bower and D. E. Foster, 1991, "A Comparison of the Bosch and Zeuch Rate of Injection Meters", SAE 910724.
7. S. A. Kim and W. G. Wang, 2013, "The Fabrication and Trial Performance of Injector Driver for CRDI", Journal of KSPME, Vol. 17, No. 2, pp. 38-45.
8. H. M. Kim, J. W. Chung, K. H. Lee, 2007, "A Study on the Characteristics of Injection-rate at Different Injection Conditions in a Common-rail Diesel Injector", Journal of ILASS-KOREA, Vol. 12, No. 3, pp. 166-171.
9. C. N. Yeh, H. Kosaka, T. Kamimoto, 1993, "Fluorescence/Scattering Image Technique for

Particle Sizing in Unsteady Diesel Spray",
Transactions of JSME (B), No. 499, pp.
4008-4013.

10. J. K. Yeom and S. S. Chung, 2005, "Effect of the Change in Ambient Gas Density on the Mixture Formation Process in Evaporative Free Diesel Spray", Journal of KSPME, Vol. 9, No. 4, pp. 209-213.