

## 부탄올의 분사 및 분무특성에 관한 실험적 연구

정탁수 · 왕우경<sup>1\*</sup> · 김상암<sup>2</sup>

해양경비안전교육원, <sup>1</sup>전남대학교 해양기술학부, <sup>2</sup>전남대학교 공학대학

### An experimental study on the injection and spray characteristics of butanol

Tak-Su JEONG, Woo-Gyeong WANG<sup>1\*</sup> and Sang-Am KIM<sup>2</sup>

*Korea Coast Guard Academy, Yeosu 59621, Korea*

<sup>1</sup>*Faculty of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea*

<sup>2</sup>*College of Engineering Sciences, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea*

Butanol has an ability to improve the ignition quality due to its lower latent heat of vaporization; it has an advantage to reduce a volume of a fuel tank because its energy density is higher than that of ethanol. Also, butanol-diesel oil blending quality is good because butanol has an effect to prevent the phase-separation between two fuels. Even if the blended oil contains water, it can reduce the corrosion of the fuel line. Thus, it is possible to use butanol-diesel oil blended fuel in diesel engine without modification, and it may reduce the environment pollution due to NO<sub>x</sub> and particulate and the consumption of diesel oil. Therefore, some studies are being advanced whether butanol is adequate as an alternative fuel for diesel engines, and the results of the combustion and exhaust gas emission characteristics are being presented. Though the injection and spray characteristics of butanol are more important in diesel combustion, the has not yet dealt with the matter. In this study, the influence in which differences of physical properties between butanol and diesel oil may affect the injection and spray characteristics such as injection rate, penetration, spray cone angle, spray velocity and process of spray development were examined by using CRDI system, injection rate measuring device and spray visualization system. The results exhibited that the injection and macroscopic spray characteristics of two fuels were nearly the same.

Keywords : Injection rate, Penetration, Spray angle, Spray velocity, Process of spray development

#### 서론

화석연료 (fossil fuel)의 연소에서 발생하는 환경오염 물질과 지속적인 사용증대로 인한 화석연료의 고갈 위기 등으로 인해, 저공해 대체연료 (alternative fuel)에 관한 연구들이 진행되고 있다. 연구 대상이 되는 대체

연료들 중에서 알코올 연료 (alcohol fuel)는 지구의 온난화와 유해 배기 배출물을 줄일 수 있는 잠재력을 가지고 있다 (Kamimoto and Kobayashi, 1991). 알코올의 생산은 석유화학공정과 생물학적공정으로 제조되고 있으며, 특히 바이오매스 (bio-mass)를 이용해 생물학적

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

공정으로부터 만들어지는 바이오에탄올 (bio-ethanol), 바이오메탄올 (bio-methanol) 및 바이오부탄올 (bio-butanol) 등은 carbon-neutral이란 관점에서 이산화탄소의 순 배출량이 거의 없으며, 지속적으로 공급이 가능한 에너지원으로 주목받고 있으나, 독성이 있는 프롭 알데히드의 배출이 문제된다. 바이오에탄올은 옥탄가가 높아 노킹을 방지할 수 있으나 증발잠열이 크고 에너지 밀도 (energy density)가 낮으며, 수분 흡수에 의한 상분리 (phase-separation) 및 연료계통의 부식 등이 문제되고 있다 (Ko JS and Lee CS, 2014). 바이오부탄올은 에탄올과는 달리 증발잠열이 작고 발열량이 높아 착화성을 개선할 수 있으며, 연료탱크의 용적을 줄일 수 있는 이점이 있다. 또한 연료 속의 수분이 존재하여도 상분리를 방지하는 효과가 있으므로 가솔린 (gasoline) 또는 경유 (diesel oil)와의 혼합성이 우수하고 연료계통의 부식을 줄일 수 있으며 (Kim, 2010), 점도 (viscosity)와 비중이 경유와 비슷한 장점이 있다. 따라서 기관을 개조하지 않고 경유와 혼합하여 디젤기관에 사용할 수 있으므로 디젤기관의 유해 배출물인 질소산화물 (NOx)과 미립자 (particulate)의 배출을 줄여 환경오염을 감소하고 화석연료의 소비를 줄일 수 있다.

그 중 에탄올은 비교적 가격 경쟁력이 있고 대량 생산이 되므로 가솔린과 혼합하여 자동차용 연료로 사용되고 있으나, 부탄올은 제조단가가 높아 상용화 되지 못하고 있다. 그러나 최근 생산 공정기술의 개발로 인해 부탄올이 저렴한 제조단가로 생산될 가능성이 점차 높아지고 있으므로 대체연료로서의 잠재력이 있다. 그러므로 최근에는 디젤기관의 연료유로서 부탄올의 적용 가능성에 대한 연구들이 진행되고 있으며, 연소 및 배기 배출물에 관한 연구결과들이 발표되고 있다 (Yun et al., 2015; Kang et al., 2014; Kim et al., 2014). 그러나 디젤연소에 중요한 영향을 미치는 분사 및 분무특성에 관한 연구는 전혀 발표되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 CRDI 분사장치와 분사율 측정장치, 분무가시화 장치를 이용하여 상온의 분위기압력 3 MPa 하에서 100, 130 MPa의 분사압력으로 경유와 부탄올을 분사하여 실험하였다. 그리고 실험자료를 이용하여 분사특성인 분사율 및 분사시작점과 분사기간, 분무의 거시적 특성인 분무도달거리, 분무각, 분무

속도 등과 분무의 발달 형태와 고밀도 액적영역의 분열과정 등을 분석하여 경유와 부탄올의 물리적 특성 차이가 비증발 분사특성과 분무특성에 미치는 영향을 조사하였다. 본 연구 결과는 디젤기관의 대체연료로서의 부탄올 사용에 관한 기초 자료를 제공할 수 있을 것으로 생각된다.

## 실험장치 및 방법

### 실험장치

실험장치는 크게 분사율 측정장치, 연료분사장치, 고압 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.

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 cm<sup>3</sup>)에 저장되고 인젝터 (injector, DLLA150 P1011)를 통해 분사된다. 그리고 고압축압기로부터 재순환되는 연료유는 공랭식 열교환기를 통해 냉각 후 탱크로 유입되도록 하였다.

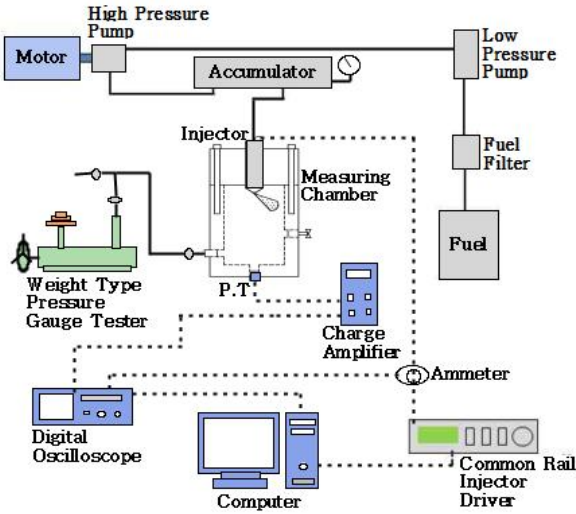
CB280 모듈을 이용하여 자체 제작한 분사제어기 (injector driver)는 인젝터를 작동시키고 영상취득장치 및 데이터 처리장치를 위한 트리거 신호를 출력한다. 그리고 인젝터 솔레노이드 밸브 (Solenoid valve, S.V)의 여자기간을 조절하여 분사기간을 0.5~수 ms까지 조절할 수 있다.

고압 가시화 정용용기 (high pressure chamber)는 정방형에 가까운 형상 (210 mm×210 mm×215 mm)으로 내부용적은 약 3.78 l이다. 3개의 석영광학창 (120 mm(d)×25(t))이 장착되어 있으며, 내부압력을 측정하기 위해 고압 피에조 압력계 (DCR 4010, Druck)가 설치되어 있다.

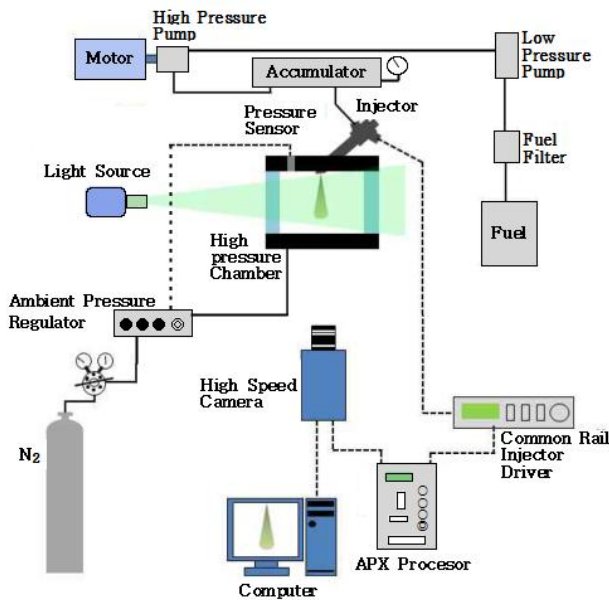
고속카메라 (high speed camera, FASTCAM-ultima APX)는 최대 1024×1024 해상도를 지원하고 최대

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.



(a) Injection rate measuring system



(b) Spray visualization system

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

### 실험방법

분사율 측정시에 사용한 연료는 상용디젤유와 n-부탄올(normal-butanol)이며, Table 1은 경유, n-부탄올 및 에탄올의 물리적 특성을 나타낸다. 분사시의 연료유 온도는  $29 \pm 1^\circ\text{C}$ 를 유지했으며, 인젝터 S.V의 여자기간은 약 1.125~1.2 ms로 설정하였다. 분위기압력은 분동식 압력계를 이용하여 3 MPa로 일정하게 하고, 분사압력을 100 및 130 MPa로 변화시켜 실험하였다. 분사율 측정시의 실험조건은 Table 2에 나타내었다.

분사율을 구하기 위해, 분사기간 동안 측정용기 내의 압력을 압력변환기와 증폭기 (Kistler 5011)를 통해  $2 \mu\text{s}$  간격으로 디지털 오실로스코프에 입력시켜 컴퓨터에 저장하였으며, 그 압력을 FFT 필터로 처리한 후 미분한 값을 분사율 계산에 이용하였다.

분사량 측정은 대기압 (0.1 MPa) 하에서 분사압력 100 및 130 MPa로 연료를 분사시켜 100회의 평균 분사량을 취하였으며, 분사량은 일정한 분사압력에서 분위기압력의 영향을 받지 않는다고 가정하여 분사율 계산에 이용하였다. Table 3은 각 실험조건에서 측정된 분사량을 나타낸 것이다.

분무 가시화 실험조건은 분사율 실험조건과 같고, 고압 가시화 정용용기의 분위기압력은 질소 가스를 이용하여 조정하였다. 분무 가시화 촬영은 인젝터의 S.V에 전류가 인가되는 시점을 시작점으로 하여 8,000 fps ( $1 \text{ fps} = 125 \mu\text{s}$ )로 촬영하였다. 조명은 할로겐 램프 (1 kW)를 이용하여 측면산란광 방법으로 조명하였으며, 촬영시 해상도는  $256 \times 512$ 이다.

Table 1. The physical property of diesel oil, butanol and ethanol

Fuel	Diesel oil	n-Butanol	Ethanol
Density ( $\text{kg/m}^3$ at $20^\circ\text{C}$ )	835	812	789
Kinematic viscosity (cSt at $20^\circ\text{C}$ )	5	3.64	1.52
Vapour pressure (mmHg at $25^\circ\text{C}$ )	1	6.7	45
Flash point ( $^\circ\text{C}$ )	45	29	17
Auto ignition point ( $^\circ\text{C}$ )	210	340	363
Heat of vaporization (MJ/kg)	0.23	0.43	0.92
Energy density (MJ/kg)	43	36	26.9

**Table 2. The experimental conditions of Injection rate measurement and spray visualization**

Injection system	Common- rail
Injector type	Solenoid-driven type d=0.168 mm, 5 holes
Injection pressure ( $P_{inj}$ )	100, 130 MPa
Ambient pressure( $P_{amb}$ )	3 MPa
Injection duration ( $T_b$ )	1.125~1.2 ms
Fuel, density(kg/m <sup>3</sup> )	Diesel oil, 835 Butanol, 812

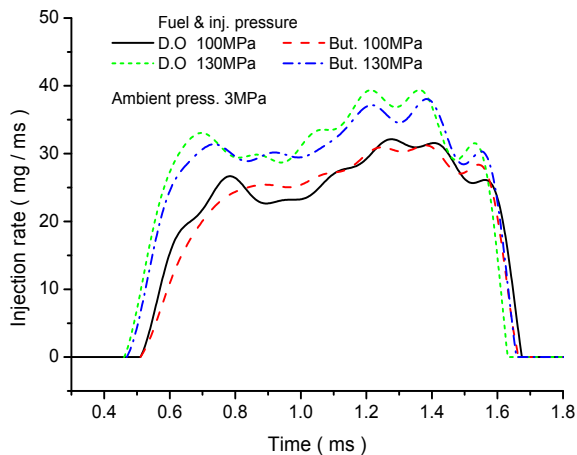
**Table 3. Injection quantity at experimental conditions**

$P_{inj}$	100 MPa		130 MPa	
	Diesel oil	Butanol	Diesel oil	Butanol
$P_{amb}$				
0.1 MPa	27.8	27.1	34.77	33.93 mg

**실험결과 및 고찰**

**분사압력에 따른 경유 및 부탄올의 분사율의 변화**

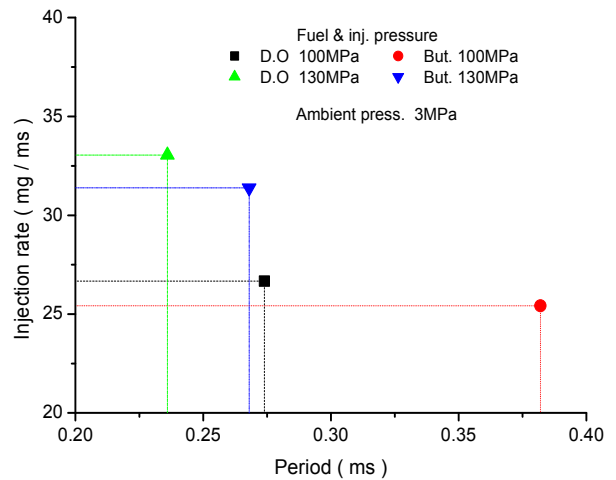
Fig. 2는 인젝터 S.V의 여자시간을 일정하게 하고, 분위기압력 3 MPa 하에서 분사압력을 100 MPa 및 130 MPa로 분사했을 때 경유와 부탄올의 분사율을 각각 나타낸다. 그림에서 보면, 연료유에 상관없이 분사압력이 높을 때에 분사시기가 45  $\mu$ s 정도 빠르고, 분사기간 동안의 분사율도 높게 나타났다. 분사기간도 분사압력 130 MPa에서 약 20  $\mu$ s 정도 길게 되었으며, Table 3에서 알 수 있듯이 분사량도 증가하였다.



**Fig. 2. Injection rate profiles of D.O and n-B at different  $P_{inj}$ . and a constant  $P_{amb}$ .**

따라서 분사압력이 높을수록 분사기간이 길고 분사량이 많아지므로 분사기간과 분사량은 분사압력의 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 실험시의 인젝터 S.V의 여자시간 및 전류파형은 분사압력에 관계없이 동일하나, 인젝터 S.V의 흡인력으로 제어챔버 상부의 밸브 볼 (ball)이 열리는 분사초기와 밸브 스프링에 의해 밸브 볼이 닫히는 분사말기에 분사압력이 밸브 볼의 동작 시기와 양정 (lift)에 영향을 미쳐 니들 (needle)의 개폐 시기와 열림의 정도가 달라지기 때문이라 생각된다 (Kim and Wang, 2013). 동일 분사압력에서 경유와 부탄올의 분사율을 비교해 보면, 경유가 부탄올 보다 조금 빨리 분사되는 경향을 보였으나 그 시간차이는 미미하였으며, 전반적인 분사율의 형상과 분사기간 및 분사량은 거의 유사하였다.

Fig. 3은 분사시작점에서 1차 변곡점까지의 분사율인 초기 분사율을 나타낸다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 연료유에 관계없이 분사압력이 높을수록 1차 변곡점까지의 길이가 짧고 초기 분사량도 높게 되었다. 동일 분사압력에서 경유와 부탄올을 비교해 보면, 경유가 1차 변곡점까지의 기간이 짧고 초기분사율이 높게 되었으며 그 기울기도 가파르게 나타났다. 이는 분사직전에 경유가 부탄올보다 압축률이 작아 압력이 빠르게 상승하여 밸브 볼이 빨리 열리나 분사와 동시에 내부 압력 강하가 크게 일어나 분사율이 부탄올에 비해 빠르게 작아진다고 생각된다.



**Fig. 3. Injection periods and injection rates at 1st inflect points of D.O and n-B at experimental conditions.**

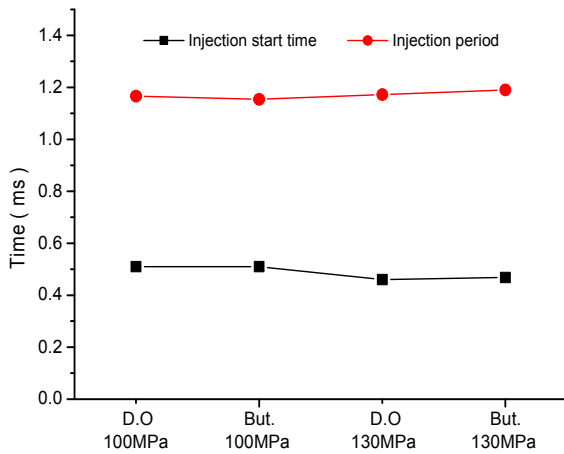


Fig. 4. The injection start time and injection period for different injection pressures and fuels in the same exciting period of solenoid valve of a injector.

Fig. 4는 분사압력과 연료유에 따른 분사시작점과 분사시간을 나타낸다. 그림에서 나타나듯이 분사압력 100 MPa에서 경유의 분사시작점 및 분사시간은 0.51 ms, 1.166 ms이고, 부탄올의 경우에는 0.51 ms, 1.154 ms 정도였다. 또한 분사압력 130 MPa에서 경유의 분사시작점 및 분사시간은 0.46 ms, 1.172 ms이고, 부탄올의 경우에는 0.468 ms, 1.19 ms 정도였다.

따라서 분사압력이 높을수록 분사시작점이 빠르고 분사시간이 길어졌으나, 동일 분사압력에서 연료유에 따른 분사시작점과 분사시간은 거의 유사하였다.

#### 분사압력에 따른 분무의 거시적 특성

Fig. 5는 분사압력 및 연료유의 종류에 따른 분무도달거리를 나타낸다. 실험조건은 분위기압력 3 MPa 하에서 분사압력 100 및 130 MPa이다. 시간에 따른 분무도달거리를 보면, 분사압력이 130 MPa일 때 분무도달거리가 6~10 mm 정도 길게 나타났으며 시간이 경과할수록 그 차이가 컸다. 이는 동일한 분위기압력에서 분사압력이 높을수록 분무의 운동량이 크기 때문이라 생각된다. 동일 분사압력에서 경유와 부탄올의 분무도달거리를 비교해 보면, 분사 초기에는 경유가 부탄올보다 분무도달거리가 길게 되었으나, 시간이 경과함에 따라 경유와 부탄올은 서로 번갈아 가면서 길게 되고 짧게 되었다가 분사 끝점에서는 분무도달거리가 거의 일치하였다. 분사

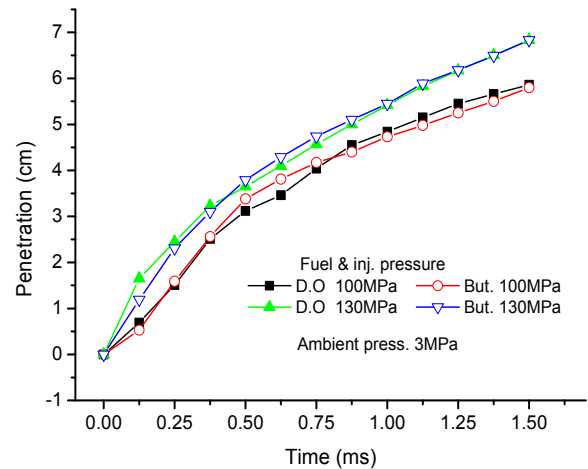


Fig. 5. Spray tip penetration of D.O and n-B at experimental conditions.

초기에 경유의 분무도달거리가 길게 나타나는 것은 부탄올에 비해 경유의 초기 분사속이 약간 높게 나타났기 때문으로 생각되며, 시간 경과에 따라 분무의 평균 운동량 (Wakuri et al., 1960)이 비슷해지므로 분사끝점에서의 분무도달거리가 거의 같아진다고 생각된다.

Fig. 6은 분사압력 변화 및 연료유의 종류에 따른 분무각을 나타낸다. 분사직후를 제외하고는 분사압력에 따른 분무각의 변화는 분사압력이 낮을수록 분무각이 약간 크게 되는 경향을 보이고 있으며, 시간경과에 따라 분무각이 수렴하는 것을 알 수 있었다. 이는 일정한 분위기압력 하에서 분사압력이 높을수록 분무액적의 운동량이 커서 공기와의 상대속도가 빠르므로 분무의 반경방향속도에 대한 분무선단속도의 비가 크기 때문에 분무각이 작아지고, 시간의 경과에 따라 액적의 운동량이 감소하면서 그 비율이 일정하게 되어 분무각이 수렴한다고 생각된다.

같은 분사압력 하에서 경유와 부탄올의 시간 경과에 따른 분무각의 경향을 보면, 두 연료유에 따른 분무각의 변화는 뚜렷하지 않았다. Reitz and Bracco (1979)의 이론에 의하면 분무각은 분위기 밀도와 연료의 밀도, 연료의 Renold수 및 Wave수의 함수로 나타내고 있으므로, 경유와 부탄올의 물리적 성질이 유사한 관계로 인해 분무각의 크기가 거의 비슷한 것으로 생각된다.



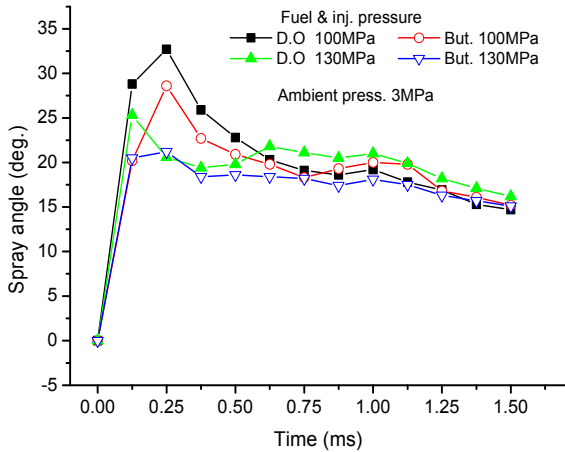


Fig. 6. Spray angle of D.O and n-B at experimental conditions.

Fig. 7은 분사압력 변화 및 연료유의 종류에 따른 분무선단속도를 나타낸다. 분사압력이 높을수록 초기 분무속도가 빨라졌으며, 시간이 경과함에 따라 일정한 기울기로 분무속도가 느려지는 경향을 보였다. 이는 분사압력이 높을수록 분출속도와 운동량이 크기 때문에 초기 분무속도가 빠르게 되나, 시간의 경과에 따라 미립화의 촉진으로 인한 분무체적 상승으로 공기저항을 많이 받게 되어 분무속도가 느려진다고 생각된다. 동일한 분사압력에서 경유와 부탄올의 분무선단속도를 보면 분사직후에는 경유가 높았으나, 시간경과에 따라 경유와 부탄올의 분무속도가 서로 변갈아 가면서 빨라지거나 늦어졌으며 분사끝점에서는 거의 일치하였다.

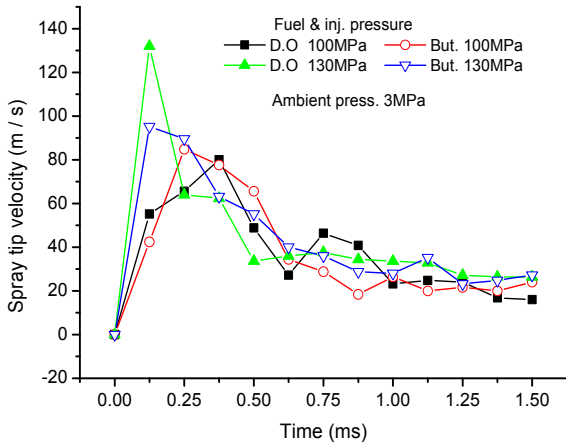
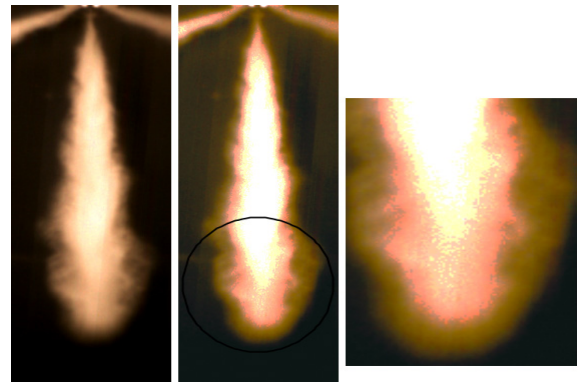


Fig. 7. Spray tip velocity of D.O and n-B at experimental conditions.

분사압력에 따른 경유와 부탄올의 분무거동 분석

Fig. 8은 분무 내부의 액적의 밀도분포를 뚜렷하게 나타내기 위해 Adobe Photoshop CS3를 이용하여 원본 사진의 이미지 모드, 명도와 대비를 조정하여 영상처리한 것을 원본과 비교한 것이다. Yeh et al. (1993)에 의하면, 산란광의 강도는 액적의 표면적에 비례하므로 산란광의 강도가 약할수록 미립화가 잘 이루어진 영역이라 할 수 있다. 그림에서 보면, 분무 내에는 직경이 큰 액적들이 밀집해 있는 고밀도 영역이므로 산란광의 강도가 크게 되어 밝게 나타나고 있으며, 분무의 가장자리는 미립화된 액적이 증발된 증기영역으로서 명도가 같은 영역들이 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 액적군들의 분열과정을 확인할 수 있었다.



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

Fig. 8. Comparison of a original with a adjustment picture.

Fig. 9, 10은 분위기압력 3 MPa에서 경유와 부탄올을 각각 100 MPa 및 130 MPa의 분사압력으로 분사시켜 시간의 경과에 따라 촬영한 분무의 형상을 보여준다. Kang and Bae (2003)의 연구에 의하면, 분사압력 40 MPa의 경우에는 분사 후 약 180 μs 후에 미립화 영역에 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 미립화 영역에 도달하며 분무의 중심부는 미세한

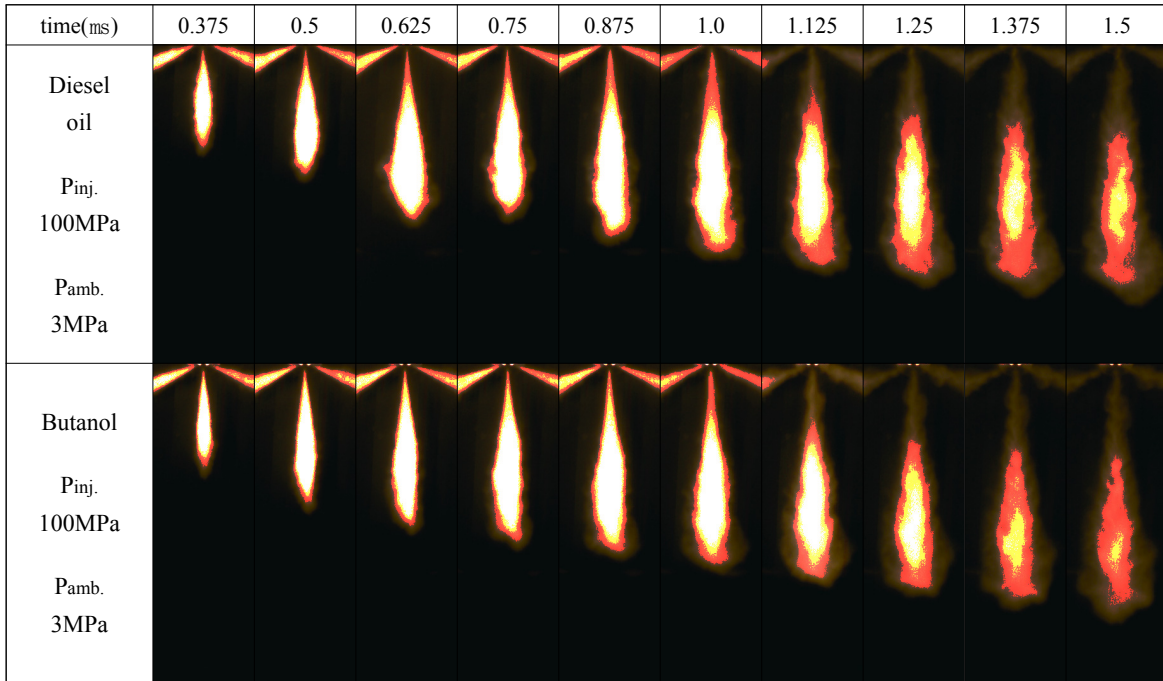


Fig. 9. Spray behaviors of D.O and n-B at Pinj. 100 MPa and Pamb. 3 MPa.

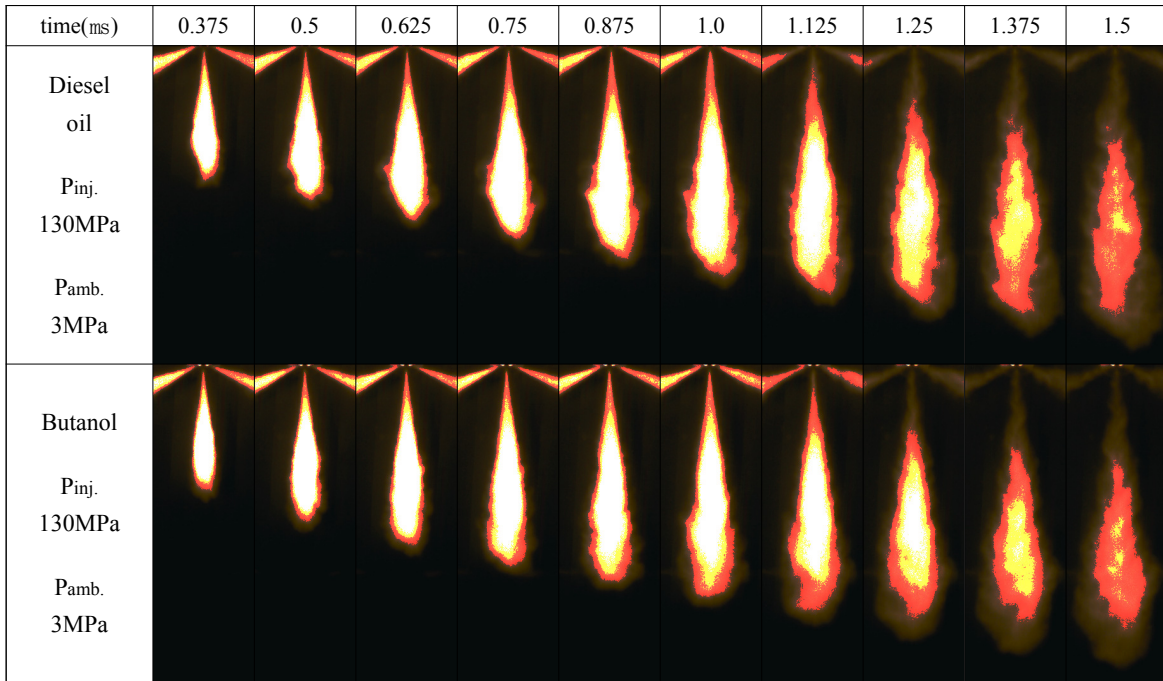


Fig. 10. Spray behaviors of D.O and n-B at Pinj. 130 MPa and Pamb. 3 MPa.

액적들로 채워져 있다고 하였다. 또한 다른 연구에서도 고압디젤분무는 작은 액적으로 이루어진 가스제트 (gas jet)에 가깝다고 설명하고 있다 (Borman and Ragland,

1998). 그러므로 경유와 부탄올의 분사초기를 제외한 고압분사의 분무중심부는 작은 액적들의 수밀도가 높은 고밀도 영역으로서 0.5 ms 사진의 밝은 부분처럼

상류층의 원뿔 (cone)형과 하류층의 컵 (cup)형을 유지하고 있는 전형적인 분무형상을 하고 있으며, 이 고밀도 영역에서는 액적분열이 활발하지 않는 것으로 간주하여 분사압력에 따른 고밀도 액적영역의 거시적인 분열과정을 시간경과에 따라 고찰해 보면 다음과 같다.

분사압력 100 MPa일 때 경유와 부탄올 분무 형상을 보면, 0.875 ms 부근에서 고밀도 액적영역의 선단이 분열되기 시작하였으며, 분사가 끝난 직후 1.125 ms부터는 고밀도 액적영역의 형상도 많이 변형되었다. 그리고 1.5 ms에서 경유와 부탄올의 고밀도 액적영역을 비교해 보면, 부탄올의 경우가 그 영역이 작게 되었으므로 부탄올이 경유보다 분열이 조금 빠르다고 생각된다. 분사압력 130 MPa에서 경유와 부탄올을 보면, 100 MPa의 경우와 마찬가지로 0.875 ms 정도에서 고밀도 액적영역의 선단이 분열되기 시작하였으며, 분사가 끝난 직후 1.125 ms부터는 고밀도 액적영역의 형상도 많이 변형되었다. 그리고 1.5 ms에서 경유와 부탄올의 고밀도 액적영역을 비교해 보면, 경유와 부탄올의 고밀도 액적영역이 거의 비슷하게 되었으므로 두 연료의 분열이 유사하다고 생각된다.

## 결론

본 연구에서는 자체 제작한 Zeuch법 분사율 측정장치와 고압분무 가시화 실험장치를 이용하여, 상온의 분위압력 3 MPa 하에서 100, 130 MPa의 분사압력으로, 경유와 부탄올을 분사하여 분사특성인 분사율 및 분사시작점과 분사시간, 분무의 거시적 특성인 분무도달거리, 분무각, 분무속도 등과 분무의 발달 형태와 고밀도 액적영역의 분열과정을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 동일 분사압력의 경우, 경유가 부탄올보다 분사시점이 조금 빠르고 초기분사율이 약간 높은 경향을 보였으나 그 차이는 미미하였고, 전반적인 분사율의 형상과 분사시간 및 분사량은 거의 유사하였다.
2. 동일 분사압력 하에서 분사초기에는 경유가 부탄올보다 분무도달거리가 길게 되었으나 시간 경과 후의 분사 끝점에서는 분무도달거리가 거의 일치하였다.
3. 같은 분사압력 하에서 두 연료유의 시간 경과에 따른 분무각의 차이는 뚜렷하지 않았다.
4. 같은 분사압력 하에서 분무선단속도를 보면 분사

직후에는 경유가 빨랐으나 시간 경과 후의 분사끝점에 서는 거의 동일하였다.

5. 분사압력 100 MPa의 경우, 분사종료 직후의 고밀도 액적영역에서의 액적분열은 경유보다 부탄올이 약간 빨리 분열되었으나, 시간에 따른 분무형상의 변화와 분열과정은 거의 유사하였다.

이상의 결론을 종합해 보면, 경유와 부탄올은 비중과 점도가 약간 차이가 있었으나 두 연료의 분사특성과 거시적 분무특성은 거의 유사하였다.

## References

- Kamimoto T and Kobayashi H. 1991. Combustion Processes in Diesel Engines. Prog. Energy Combustion Science 17, 163-189.
- Ko JS and Lee CS. 2014. Combustion and Emission Characteristics of Bioethanol and Biobutanol in a Gasoline Direct Injection Engine. KSAE 2014 Conference Proceeding, 295-297.
- Kim DH. 2010. The Status and Outlook for Biobutanol Technology. Auto Journal\_2010.8, 36-44.
- Yun HT, Choi KB and Lee CS. 2015. Effect of pilot injection on combustion and emission characteristics in a direct injection diesel engine fueled with biobutanol blended diesel fuels. KSAE 2015 Conference Proceeding, 205-208.
- Jiang XL, Choi BC, Lee CH and Lee CH. 2014. Particulate matter Exhaust Emission Characteristics of CRDI Diesel Engine with Butanol-Diesel Blended Fuel. KSAE 2015 Conference Proceeding, 249-250.
- Kim HS, Jang YG, Lee SH, Kim TY, Kang KY and Yoon JK. 2014. A Feasibility Study of Using Diesel/Biodiesel-Pyrolysis Oil-Butanol Blends in a Diesel Engine. Transactions of KSAE 22(5), 116-125. (DOI:10.7467/KSAE.2014.22.5.116)
- Kim SA and Wang WG. 2013. The Fabrication and Trial Performance of Injector Driver For CRDI. Journal of KSPME 17(2), 38-45. (DOI:10.9726/kspse.2013.17.2.038)
- 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.
- Reitz RD and Bracco FD. 1979. On the Dependence of Spray Angle and other Spray Parameters on Nozzle Design and Operating Conditions. SAE paper, 790494.



Yeh CN, Kosaka H and Kamimoto T. 1993. Fluorescence/Scattering Image Technique for Particle Sizing in Unsteady Diesel Spray. Transactions of JSME (B 499), 4008-4013.

Kang JS and Bae CS. 2003. The Structure of Break-up Zone of Diesel Spray from a VCO Nozzle. KSAE conference proceeding, 168-173.

Borman GL and Ragland KW. 1998. Combustion Engineering. McGraw-Hill, Singapore, 311.

---

2016. 12. 28 Received

2017. 01. 25 Revised

2017. 01. 26 Accepted