

## 디젤기관에서 경유/부탄올 혼합연료의 기관성능 및 연소특성 해석

김상암 · 왕우경\*

전남대학교 실습선 기관장, 전남대학교 해양기술학부 교수\*

### Analysis of performance and combustion characteristics of D.O./butanol blended fuels in a diesel engine

Sang-Am KIM and Woo-Gyeong WANG\*

*Chief engineer, Training ship, Chonnam National University, Chonnam 59626, Korea*

*Professor, Faculty of Marine Technology, Chonnam National University, Chonnam 59626, Korea*

In this study, to investigate the effect of physical and chemical properties of butanol on the engine performance and combustion characteristics, the coefficient of variations of IMEP (indicated mean effective pressure) and fuel conversion efficiency were obtained by measuring the combustion pressure and the fuel consumption quantity according to the engine load and the mixing ratio of diesel oil and butanol. In addition, the combustion pressure was analyzed to obtain the pressure increasing rate and heat release rate, and then the combustion temperature was calculated using a single zone combustion model. The experimental and analysis results of butanol blending oil were compared with the those of diesel oil under the similar operation conditions to determine the performance of the engine and combustion characteristics. As a result, the combustion stabilities of D.O. and butanol blending oil were good in this experimental range, and the indicated fuel conversion efficiency of butanol blending oil was slightly higher at low load but that of D.O. was higher above medium load. The premixed combustion period of D.O. was almost constant regardless of the load. As the load was lower and the butanol blending ratio was higher, the premixed combustion period of butanol blending oil was longer and the premixed combustion period was almost constant at high load regardless of butanol blending ratio. The average heat release rate was higher with increasing loads; especially as butanol blending ratio was increased at high load, the average heat release rate of butanol blending oil was higher than that of D.O. In addition, the calculated maximum combustion temperature of butanol blending oil was higher than that of D.O. at all loads.

Keywords : Latent heat of vaporization, Combustion quality, Coefficient of variations of IMEP, Fuel conversion efficiency, Single zone combustion model

#### 서론

화석연료의 매장량 한계, 연소가스에 의한 지구 온난

화 문제 및 대기오염 등으로 인해 자동차 및 선박의 석유계 대체연료에 관한 연구가 계속되어 왔다. 특히 자동차

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

및 선박용 기관의 석유계 대체연료는 성능, 경제성 및 배기가스 규제를 모두 만족시킬 수 있어야 하므로, 이런 관점에서 알코올계 연료들이 연구대상이 되고 있다. 알코올은 석유화학공정과 생물학적공정으로 제조되고 있으며, 특히 바이오매스(bio-mass)를 이용해 생물학적 공정으로부터 만들어지는 바이오에탄올(bio-ethanol), 바이오메탄올(bio-methanol) 및 바이오부탄올(bio-butanol) 등은 탄소 중립(carbon neutral)이란 측면에서 이산화탄소의 순 배출량이 거의 없고 지속적으로 공급이 가능한 에너지원으로서 주목받고 있으며, 그중 바이오에탄올은 가솔린의 대체연료로서 상용화 되고 있다. 부탄올은 에탄올 및 메탄올과는 달리 증발잠열이 작아 착화성을 개선할 수 있고, 발열량이 많고 비중이 높기 때문에 연료탱크의 용적을 줄일 수 있는 이점이 있다. 또한 연료 속의 수분이 존재하여도 상분리를 방지하는 효과가 있으므로 가솔린 또는 경유와의 혼합성이 우수하고 연료계통의 부식을 줄일 수 있으며(Kim, 2010), 동점도와 비중이 경유와 비슷하므로 인해 분사 및 분무특성이 거의 유사한 장점이 있다(Jeong et al., 2017). 따라서 기관의 연료 공급계통을 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 있는 잠재력을 가지고 있다. 그러나 부탄올은 에탄올에 비해 제조 단가가 높아 상용화되지 못하다가 최근 생산 공정 기술의 개발로 인해 부탄올이 저렴한 제조단가로 생산될 가능성이 점차 높아지고 있다. 그러므로 최근에는 디젤기관의 연료유로서 부탄올의 적용 가능성에 대한 연구들이 진행되고 있으며, 연소 및 배기 배출물에 관한 연구결과들이 발표되고 있다(Yun et al., 2015; Jiang et al., 2014; Kim et al., 2014). 그러나 아직도 디젤기관에 부탄올을 적용하기 위한 연소특성 및 배기특성에 관한 자료들이 실험용 기관의 사양 및 실험조건에 따라 많은 차이를 보이고 있으므로, 일관성 있는 자료 도출을 위해서는 보다 많은 실험자료들이 필요하다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 다른 알코올계 연료에 비해 부탄올이 가지고 있는 물리적·화학적 특성이 기관성능 및 연소특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 기관의 부하와 경유와 부탄올의 혼합비율에 따라 연소압력, 배기 가스온도 및 연료소비량을 측정하여 도시평균유효압력

의 변동계수와 도시연료변환효율 등의 기관성능을 구하였다. 또한 연소특성으로는 연소압력을 분석하여 압력 상승률과 열발생률을 구하고, 이들 자료를 이용하여 연소온도를 계산하였으며, 동일한 운전조건에서 부탄올 혼합비율에 따른 실험결과들을 경유의 자료와 비교하여 디젤기관에서의 부탄올 사용에 관한 기관성능과 연소특성을 해석하였다.

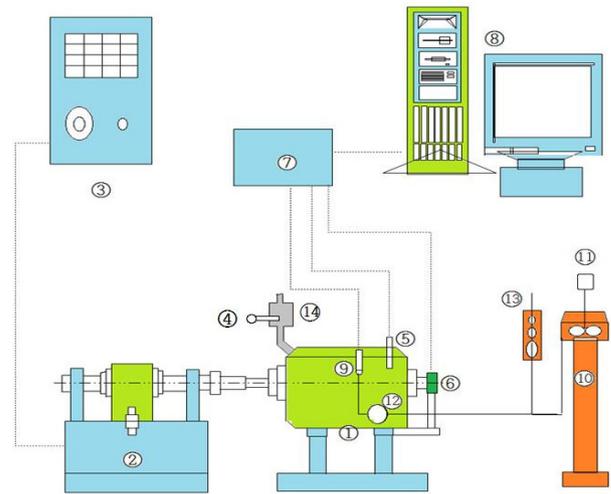
## 장치 및 방법

### 실험장치

실험장치는 ①실험용 기관(광양 안마 2TD), 기관의 회전수와 토크를 제어하여 제동마력을 측정하기 위한

Table 1. Specification of test engine

Type	Naturally - aspirated, 4 stroke DI diesel engine water cooling type
Number of cylinder	2
Bore × Stroke	100 × 115 mm
Compression ratio	17
Injection pressure	20 MPa
Injection nozzle	Multi-hole nozzle (5 holes, φ 0.28 mm)
Power	19 kW ( 2100 rpm )



- ① Engine
- ⑧ Computer
- ② Dynamometer
- ⑨ Needle lift sensor
- ③ Dynamometer controller
- ⑩ Fuel tank
- ④ Thermocouple
- ⑪ Agitator
- ⑤ Pressure transducer
- ⑫ F.O boost pump
- ⑥ Rotary encoder
- ⑬ Fuel flow meter
- ⑦ A/D board
- ⑭ Exhaust gas pipe

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

②와전류식 동력계와 ③콘트롤러, 배기가스 온도 측정용 ④열전대, 연소실 압력 측정을 위한 ⑤압력변환기 (Kistler 6061-B)와 데이터 수집장치(⑦, ⑧), 분사시기와 분사기간을 측정하는 ⑨니들리프트 센서(AVL-423), 연료공급장치 및 연료소비량 측정장치(⑩, ⑪, ⑫, ⑬) 등으로 구성되어 있으며, Table 1과 Fig. 1은 실험용 기관의 주요제원 및 실험장치의 개략도를 각각 나타낸다.

**실험방법**

실험에 사용한 연료유는 경유와 경유에 부탄올을 각각 10% 및 20%의 질량비율로 혼합한 혼합유를 사용하였으며, Table 2는 연료유의 특성을 나타낸다.

기관 운전조건은 실험기관의 제동연속최대출력(2100 rpm, 86.5 N-m, 19 kW)을 4/4부하로 하여 고정피치프로펠러법칙(Technical paper, 2008)에 따라 각 부하에서의 회전수와 토크를 결정하였으며, 고부하(3/4 부하), 중부하(2/4 부하) 및 저부하(1/4 부하)에서 실험을 행하였다. Table 3은 부하에 따른 한 실린더의 도시평균유효압력 (IMEP)과 도시마력(IHP)을 나타낸다. 실험시의 냉각수 출구온도는 60±5℃로 유지하였으며, 연료유 온도는 연료분사밸브 입구에서 45±3℃, 실내온도는 12℃로 측정

**Table 2. Properties of test fuels**

Fuel	Diesel oil	n-Butanol
Density (kg/m <sup>3</sup> at 20℃)	835	812
Kinematic viscosity (cSt at 20℃)	5	3.64
Vapour pressure (mmHg at 25℃)	1	6.7
Flash point (℃)	45	29
Auto ignition point (℃)	210	340
Heat of vaporization (MJ/kg)	0.23	0.43
Specific heat (J/g·K)	1.84	2.39
Energy density (MJ/kg)	43	36

**Table 3. IMEP & IHP of one cylinder at various loads**

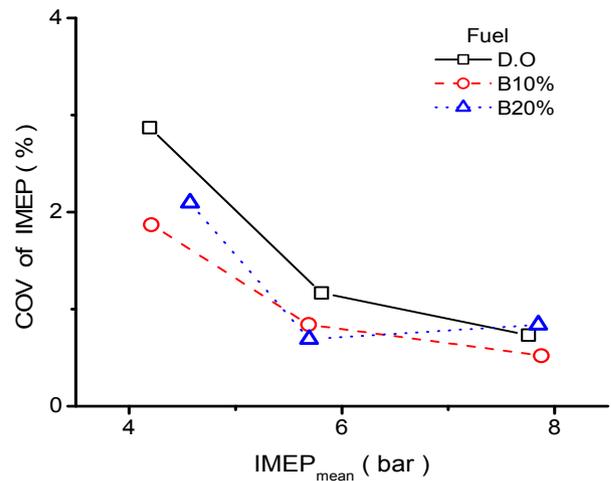
Fuel	Load	IMEP (bar) IHP (kW)		
		Low (1/4)	Medium (2/4)	High (3/4)
D.O.	4.19	5.81	7.75 bar	
	4.21	7.25	11.09 kW	
B 10%	4.21	5.69	7.87 bar	
	4.24	7.12	11.28 kW	
B 20%	4.57	5.69	7.85 bar	
	4.59	7.14	11.22 kW	

되었다. 측정값들은 크랭크 각 1 deg.마다 1사이클에 720개씩 10사이클씩 연속 수집되었으며, 5회 측정하여 그 평균값을 취하여 기관성능과 연소특성을 해석하는데 이용하였다.

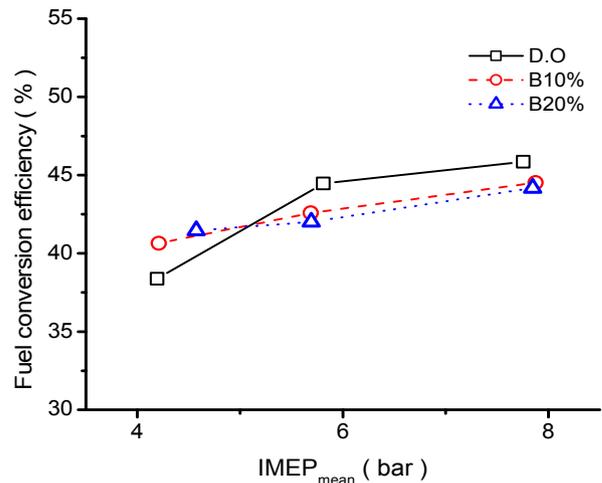
**결과 및 고찰**

**연소안정성 및 기관성능**

Fig. 2는 기관부하와 부탄올 혼합비율에 따른 도시평균유효압력의 변동계수(COV<sub>IMEP</sub> ; coefficient of variation of indicated mean effective pressure)를 나타낸다. COV<sub>IMEP</sub>는 사이클당 도시일의 주기적 변동성을 나타내며 연소안정성의 척도가 된다. 그리고 COV<sub>IMEP</sub>가



**Fig. 2. Coefficient of variation of IMEP of fuels at various loads.**



**Fig. 3. Indicated fuel conversion efficiency of fuels at various loads.**

10%를 초과하면 기관의 운전에 문제를 일으키며 (Heywood, 1988), 일반적으로 5% 이하일 때 안정적인 연소상태로 판단되고 있다(Lee et al., 2017). 그림에서 보면, 부하가 증가할수록 모든 연료유의  $COV_{IMEP}$ 가 작아졌다. 그리고 비슷한 부하에서는 경유보다 부탄올 혼합유의  $COV_{IMEP}$ 가 작게 되었으며, 20% 부탄올 혼합유가 부하에 따른 변화의 경향이 조금 일정하지 못했으나 실험범위에서의 모든 연료유에 대해  $COV_{IMEP}$ 가 3% 미만의 값을 나타내었다. 따라서 실험범위에서 경유 및 부탄올 혼합유의 연소안정성은 양호하다고 생각된다. 한편, 20% 부탄올 혼합유의 경우  $COV_{IMEP}$ 의 변화정도가 일정하지 못한 것은, 1사이클 당 분사되는 연료에 포함된 부탄올의 증발잠열이 경유나 10% 부탄올 혼합유에 비해 크므로 착화시점에서의 연소실 분위기에 보다 많은 영향을 미치기 때문이라 생각된다.

Fig. 3은 기관부하와 부탄올 혼합비율에 따른 도시연료변환효율(indicated fuel conversion efficiency)을 나타낸다. 도시연료변환효율은 1 사이클 당 도시일과 공급된 연료의 열량과의 비율로서 나타내며, 도시일은 평균유효압력에 비례한다. 그림에서 보면, 저부하에서는 부탄올 혼합유의 효율이 높게 나타났으나, 중부하 이상에서는 부탄올 혼합유의 경우가 도시연료변환효율이 약간 낮게 됨을 알 수 있다. 이는 저부하에서는 부탄올의 혼합에 따른 착화지연으로 인한 연소과정이 평균유효압력을 상승시키는 효과를 나타내고, 중부하 이상에서는 부탄올의 혼합에 따라 착화지연이 다소 길어져 평균유효압력을 오히려 감소시키기 때문이라 생각된다.

Fig. 4는 저부하에서의 P-V 형태로 도식화 한 실린더 압력과 압력상승률을 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이, 압축행정 말기의 압력상승률이 증가하는 위치가 경유의 경우에는 상사점전(BTDC) 6도 정도이며 10% 및 20% 부탄올 혼합유는 BTDC 5도 정도로서 경유에 비해 부탄올 혼합유의 압력상승률 증가위치가 지연되었으며, 이후 압력상승의 기울기도 부탄올 혼합유가 다소 작았으나 최고압력은 높게 나타났다. 10% 및 20% 혼합유를 비교하면, 착화 후의 압력형상이 상사점후(ATDC) 1도 까지는 그 모양이 유사했으며, 이후에는 20% 혼합유의 경우가 압력이 다소 높았다. 그리고 실험시의 부하의 오차는 약간 있을지라도, 저부하에서는 부탄올의 혼합비가 증가할수록 압축행정 말기의 압력은 낮고 팽창행

정 초기의 압력은 높게 나타나므로 인해 유효일이 많으므로 평균유효압력도 높아진다고 생각된다. 팽창행정 초기에 압력상승률이 0이 되는 크랭크 각은 ATDC 4도 부근으로 경유, 10% 및 20% 부탄올 혼합유가 거의 같았으며, 그 위치에서 최고압력을 나타내었다. 그리고 경유의 최고압력상승률은 BTDC 2도에서 0.8456 MPa, 10% 혼합유는 BTDC 1도에서 0.7191 MPa 및 20% 혼합유는 BTDC 1도에서 0.707 MPa 정도이며, 경유의 최고압력상승률이 높고 그 위치도 빨랐다. 한편 압력상승률이 증가하는 위치에서부터 최고압력점까지의 평균압력상

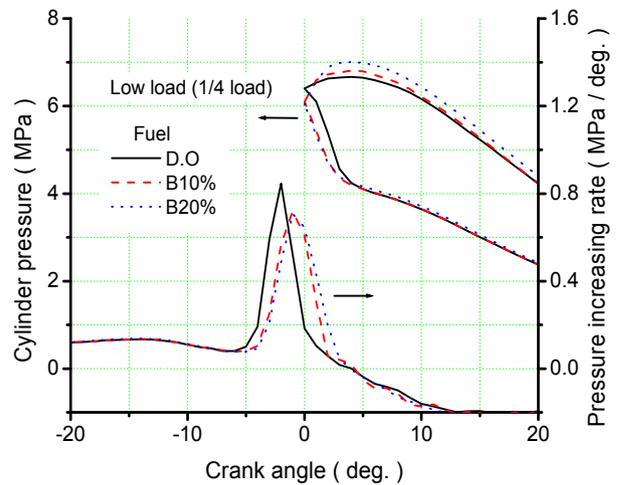


Fig. 4. Cylinder pressure and pressure increasing rate of fuels versus crank angle at low load.

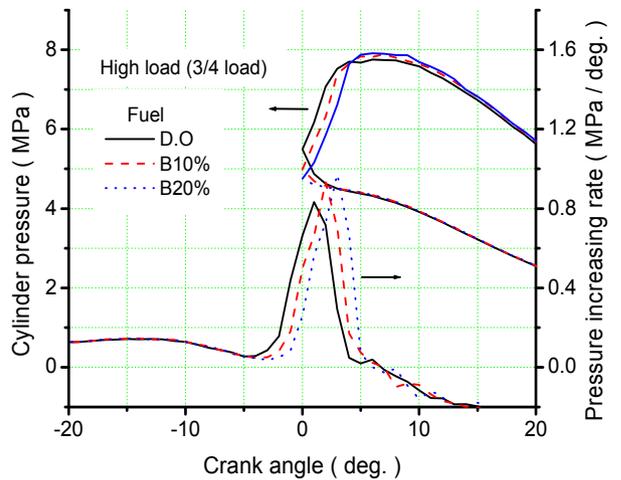


Fig. 5. Cylinder pressure and pressure increasing rate of fuels versus crank angle at high load.

승률은 경유가 0.24485 MPa/deg., 10% 부탄올 혼합유가 0.27524 MPa/deg. 및 20% 혼합유는 0.28825 MPa/deg. 로서 부탄올 혼합비가 증가할수록 평균압력상승률이 약간 증가하였다.

Fig. 5는 고부하에서의 P-V 형태로 도식화 한 실린더 압력과 압력상승률을 나타낸다. 그림에서 보면, 압축행정 말기의 압력상승률이 증가하는 위치가 경유의 경우에는 BTDC 4도 정도이며 10% 및 20% 부탄올 혼합유는 BTDC 3 및 2도 정도로서 부탄올 혼합비율이 증가할수록 압력상승률 증가위치가 지연되었으며, 이후 압력상승의 기울기도 다소 크고 최고압력도 높게 나타났다. 그리고 고부하에서는 부탄올의 혼합비가 증가할수록 착화가 지연되므로 인해 팽창행정 초기의 압력이 낮게 되었으며, 따라서 경유의 경우가 유효일의 면적이 크게 나타났다. 팽창행정 초기에 압력상승률이 0이 되는 크랭크 각은 경유가 ATDC 6도, 10% 부탄올 혼합유가 ATDC 7도 부근이며, 20% 부탄올 혼합유는 ATDC 6도 정도이나 그 위치 부근에서 압력변동이 일어나는 것을 알 수 있었다. 그리고 경유의 최고압력상승률은 ATDC 1도에서 0.8323 MPa, 10% 혼합유는 ATDC 2도에서 0.9342 MPa 및 20% 혼합유는 ATDC 3도에서 0.972 MPa 정도이며, 부탄올 혼합비가 클수록 최고압력상승률이 높고 그 위치가 늦어졌다. 또한 압력상승률이 증가하는 위치에서부터 최고압력점까지의 평균압력상승률은 경유가 0.32923 MPa/deg., 10% 부탄올 혼합유가 0.33316 MPa/deg. 및 20% 혼합유는 0.41859 MPa/deg. 로서 부탄올 혼합비가 증가할수록 평균압력상승률이 약간 증가하였으며, 20% 부탄올 혼합유의 평균압력상승률이 높게 나타났다.

**연소특성**

Fig. 6은 저부하시의 부탄올 혼합비율에 따른 근사적 열발생률(Heywood, 1988)과 연료분사 시 분사밸브의 니들양정을 나타낸다. 분사시작점은 연료유의 종류에 관계없이 BTDC 15도 정도로 거의 비슷하나, 분사끝점은 경유, 10% 및 20% 부탄올 혼합유의 순서로 ATDC 2~4도로서 분사끝점의 구분이 명확하지 못하였다. 그리고 부탄올 혼합유의 경우에는 분사초기에 니들양정이 낮고 분사후기에는 양정이 경유에 비해 높게 나타났다. 이는 저부하에서 기관회전수가 낮고 분사량이 작은 상

태에서 연료유 점도의 영향이 분사특성에 영향을 미치기 때문이라 생각된다.

열발생률을 보면, 부탄올 혼합비율이 증가할수록 착화시기가 약간 지연되고 최고열발생률의 위치도 지연되며 그 값도 작았다. 여기서 착화시기는 열발생률이 음의 값에서 양의 값이 되는 직전의 크랭크각으로 간주하였다. 경유, 10% 및 20% 부탄올 혼합유의 착화점은 각각 BTDC 6도, BTDC 5도 및 BTDC 5도이며, 착화지연기간은 경유가 9도, 10% 및 20% 부탄올 혼합유가 10도로 거의 비슷하였다. 그리고 예혼합연소의 끝점은 TDC, ATDC 2도 및 ATDC 3도로서 예혼합연소기간은 크랭크각도로 경유가 6도, 10% 혼합유가 7도 및 20% 혼합유가 8도 정도이며 그 기간 중에 열발생량은 각각 349.89 J, 406.21 J 및 452.85 J로서, 저부하에서는 부탄올 혼합비가 높을수록 예혼합연소기간이 길고 그 기간 중의 열발생량이 많았다. 이는 증발잠열과 비열이 작고 자발화점이 낮은 경유의 경우에는 분무의 증발과정 중에 형성된 가연혼합기가 착화점에 빨리 도달하므로 인해 착화지연이 짧을 뿐만 아니라 그 기간 중의 가연혼합기량도 작아지기 때문이라 생각된다. 부탄올 혼합유의 경우에는 분사된 연료 중에 증발잠열과 비열이 크고 자발화온도가 높은 부탄올 성분으로 인해 착화지연이 길어지고(Kim, 2018), 증발된 경유 성분의 가연혼합기에서 먼저 착화하여 연소하면서 부탄올 성분이 보다 낮은 연소율로 연속으로 연소하기 때문에 예혼합연소기간이 길어

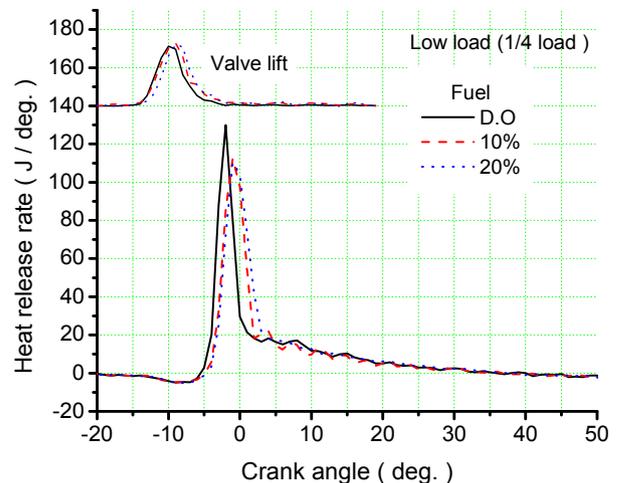


Fig. 6. Heat release rate and fuel valve lift of fuels versus crank angle at low load.

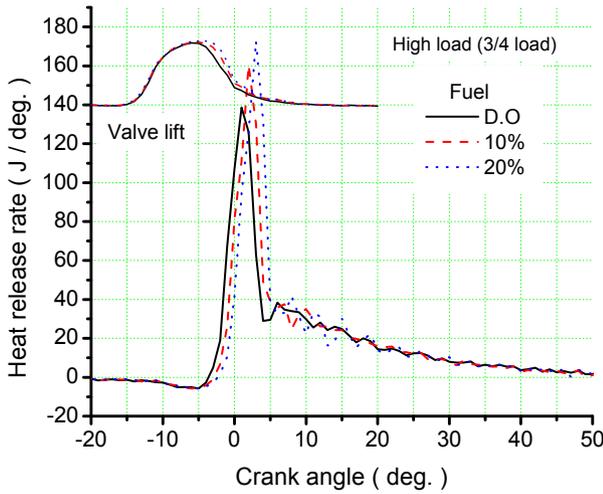


Fig. 7. Heat release rate and fuel valve lift of fuels versus crank angle at high load.

지고 그 기간 중의 열발생량도 많아진다고 생각된다.

Fig. 7은 고부하시의 부탄을 혼합비율에 따른 열발생률과 연료분사 시 분사밸브의 니들양정을 나타낸다. 분사밸브의 니들양정을 보면 경유보다 10% 및 20% 혼합유의 양정이 분사 후반부에 약간 높게 되었으며, 분사시 작점은 BTDC 16도 정도이며 분사끝점은 상사점후 10도 정도로서 분사기간은 크랭크각으로 26도 정도로 거의 비슷하였다.

열발생률을 보면, 부탄올의 혼합비율이 증가할수록 착화시기 및 최고열발생률의 위치가 지연되나, 최고열발생률의 값은 오히려 높게 되었다. 경유, 10% 및 20% 부탄올 혼합유의 착화점은 각각 BTDC 4도, BTDC 3도 및 BTDC 3도이며, 착화지연기간은 경유가 12도, 10% 및 20% 부탄올 혼합유가 각각 13도로 거의 비슷하였다. 그리고 예혼합연소의 끝점은 ATDC 4도, ATDC 5도 및 ATDC 5도로서 예혼합연소기간은 크랭크각도로 경유가 8도, 10% 혼합유가 8도 및 20% 혼합유가 8도 정도이며 그 기간 중의 열발생량은 각각 555.11 J, 603.26 J 및 617.63 J로서, 고부하에서는 부탄올 혼합비가 증가하여도 예혼합연소기간은 거의 일정했으며 그 기간 중의 열발생량은 경유에 비해 부탄올 혼합유가 많았다. 이는 증발잠열이 크고 자발화점이 높은 부탄올의 영향으로 인해 부탄올 혼합유의 착화지연기간이 경유에 비해 길어져 가연혼합기가 좀 더 많이 형성되며, 고부하에서는 연소실의 온도가 높아 예혼합연소기간 중에 부탄올에

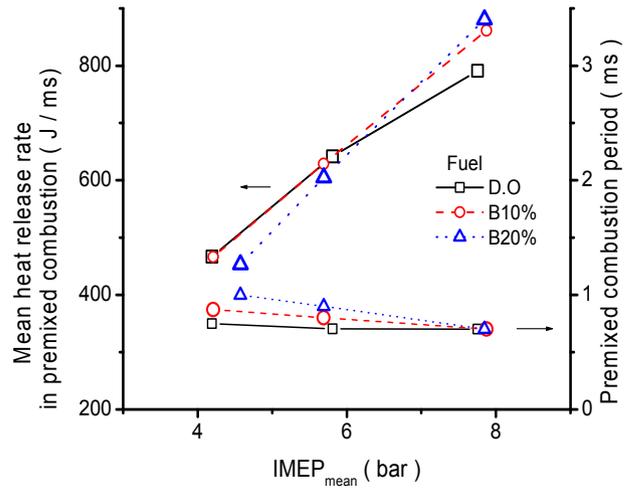


Fig. 8. Mean heat release rate in premixed combustion and premixed combustion period of fuels at various loads.

함유된 산소가 연소를 촉진하므로 인해 높은 연소율로 연소하기 때문이라 생각된다.

Fig. 8은 기관부하와 부탄올 혼합비율에 따른 예혼합연소기간 중의 평균 열발생률과 예혼합연소기간을 나타낸다. 예혼합연소기간을 보면, 경유의 경우에는 기관부하에 관계없이 예혼합연소기간이 거의 일정하였고 부탄올 혼합유는 부하가 낮고 혼합비가 증가할수록 이 기간이 길어졌으며, 고부하에서는 부탄올 혼합비에 관계없이 예혼합연소기간이 거의 일정하였다. 예혼합연소기간 중의 평균 열발생률은 부하가 증가할수록 높았으며, 특히 고부하에서는 경유에 비해 부탄올 혼합비가 증가할수록 평균 열발생률이 높았다. 이는 연료의 총괄반응식(Choi, 2016)에서 다른 조건이 동일하다면 반응속도는 산소의 농도에 비례한다는 것을 알 수 있으며, 또한 노말데케인과 에탄올 혼합연료의 연구(Oh et al., 2017)에서 알 수 있듯이 일부 고온의 영역에서는 에탄올 혼합비율이 증가할수록 연소 반응성이 크게 증가된다고 나타내었다. 따라서 합산소 연료인 부탄올의 혼합비가 증가할수록 반응성이 증가하여 예혼합연소기간 중의 평균 열발생률이 증가한다고 생각된다. Table 4는 부하 및 부탄올 혼합비율에 따른 예혼합연소기간과 그 기간 중의 평균 열발생량을 요약한 것이다.

Fig. 9는 연돌의 소음기에서 측정한 배기가스온도와 배기밸브 열림 시에 계산된 배기가스온도의 계산값을 나타낸다. 계산은 연소압력과 열발생률을 입력으로 한

Table 4. Premixed combustion period and mean heat release rate

Load	Fuel	Period (ms)	Mean release rate (J/ms)
1/4	D.O.	0.7491	466.82
	10%	0.8714	466.18
	20%	0.9995	453.07
2/4	D.O.	0.7033	641.61
	10%	0.8013	628.53
	20%	0.8994	604.48
3/4	D.O.	0.7018	790.99
	10%	0.7003	861.44
	20%	0.7014	880.62

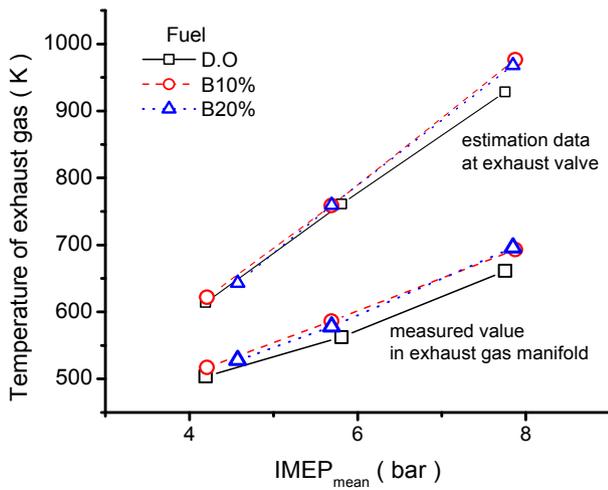


Fig. 9. Measured value and estimation data of exhaust gas of fuels at various loads.

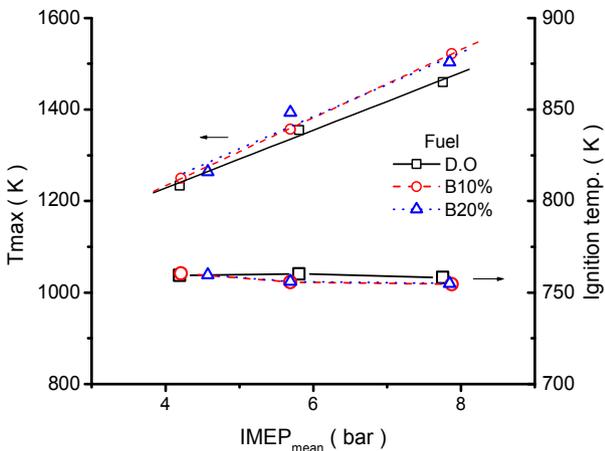


Fig. 10. Max. combustion temperature & ignition temperature of fuels at various loads.

단일영역연소모델(Romas, 1989)을 이용하였으며, 계산 구간은 압축행정 시작부터 배기밸브가 열릴 때까지의 닫힘기간 동안이다. 계산 시작점에서의 실린더 내 공기 온도는 298 K, 압력은 각 실린더 압력 자료의 하사점부터 흡기밸브 닫힘 시까지의 실린더 평균압력을 입력자료로 이용하였다. 그림에서 보면, 경유의 측정값은 저부하, 중부하 및 고부하에서 각각 503.85 K, 562.45 K 및 661.35 K이며 계산값은 614.11 K, 761.24 K 및 928.41 K 정도였다. 10% 부탄올 혼합유의 측정값은 517.17 K, 586.15 K 및 692.97 K, 계산값은 621.79 K, 758.89 K 및 976.57 K, 그리고 20% 부탄올 혼합유의 측정값은 527.98 K, 578.12 K 및 696.10 K이며 계산값은 643.11 K, 759.46 K 및 968.07 K 정도였다. 따라서 측정값과 계산값의 차이는 약 100~200 K 정도로서 부하에 따라 차이가 있지만, 모든 부하에서 측정값과 계산값의 경향이 아주 유사하였으며, 경유에 비해 부탄올 혼합유의 배기가스온도가 높게 나타났다. 계산값과 측정값과의 차이가 큰 이유는 측정용 열전대가 배기밸브로부터 약 50 cm 떨어진 소음기에 설치되어 있어 배기밸브로부터 나온 배기가스의 팽창과 배기가스 매니폴드로의 열전달에 의한 것으로 생각되며, 본 연구에서 계산된 닫힘기간 중의 연소가스 계산값은 연료유의 특성에 따른 연소가스온도의 경향을 파악하기에는 유효할 것으로 생각된다.

Fig. 10은 기관부하와 부탄올 혼합비율에 따른 착화온도와 연소최고온도의 계산값을 나타낸다. 그림에서 보면, 경유는 부하에 따른 착화온도의 변화는 작았으며 저부하, 중부하 및 고부하에서 각각 759.37 K, 760.13 K 및 758.18 K 정도였다. 10% 부탄올 혼합유의 착화온도는 760.49 K, 755.65 K 및 754.57 K, 그리고 20% 부탄올 혼합유는 759.64 K, 756.02 K 및 754.96 K 정도로서 부하가 증가할수록 부탄올 혼합유의 착화온도가 경유에 비해 약간 낮아지는 경향을 보였으며, 10% 및 20% 부탄올 혼합유의 경향은 비슷하였다. 한편 연소실 내로 분사된 연료는 고온의 분위기에서 증발하여 주위 공기로 확산하며 혼합기를 형성하여 가연조건을 만들어 가며, 이 조건 중에서 가장 낮은 최저착화온도를 갖는 혼합비에서 착화한다. 그리고 이는 연료의 특성, 혼합기의 당량비, 분위기 압력과 온도 및 유속 등에 따라 변화한다고 알려져 있다(Choi, 2016). 따라서 경유는 최저착화온도를 갖는 혼합비가 부하에 관계없이 거의 일정하

나, 부탄올은 경유에 비해 단위질량당 증발잠열 및 비열이 큰 반면에 증발속도가 빠르기 때문에 부하가 증가할수록 고온의 분위기에서 부탄올이 함유한 -OH기의 영향으로 반응성이 촉진(Oh et al., 2017)되므로 인해 착화온도가 낮아진다고 생각된다.

### 결론

경유에 부탄올을 질량비로 10% 및 20% 혼합한 부탄올 혼합유를 기존의 직분식 디젤기관의 연료유로 사용하여 기관성능과 연소특성을 조사한 결과는 다음과 같다.

1. 실험범위에서 경유와 부탄올 혼합유의 COV<sub>IMEP</sub>는 3% 미만으로 나타났으므로 경유와 부탄올 혼합유의 연소안정성은 양호하였다.
2. 저부하에서는 부탄올 혼합유의 도시연료변환효율이 약간 높았으나, 중부하 이상에서는 경유의 도시연료변환효율이 높았다.
3. 부탄올 혼합비율이 증가할수록 압력상승이 지연되고 최고압력이 높게 되었으며, 고부하에서는 20% 부탄올 혼합유의 최고압력상승률이 경유에 비해 높았다.
4. 경유의 경우에는 기관부하에 관계없이 예혼합연소기간이 거의 일정하였고 부탄올 혼합유는 부하가 낮고 혼합비가 증가할수록 이 기간이 길어졌으며, 고부하에서는 부탄올 혼합비에 관계없이 예혼합연소기간이 거의 일정하였다. 예혼합연소기간 중의 평균 열발생률은 부하가 증가할수록 높았으며, 특히 고부하에서는 경유에 비해 부탄올 혼합비가 증가할수록 평균 열발생률이 높았다.
5. 경유는 부하에 따른 계산된 착화온도의 변화가 작았고, 부하가 증가할수록 부탄올 혼합유의 착화온도가 경유에 비해 약간 낮아지는 경향을 보였으며, 10% 및 20% 부탄올 혼합유의 경향은 비슷하였다.
6. 동일한 부하에서 계산된 연소최고온도는 경유에 비해 부탄올 혼합유가 높게 나타났다.

### References

Choi BC. 2016. Combustion engineering. Munundang, Seoul, 125, 146.  
 J. B. Heywood. 1988. Internal combustion engine fundamentals.

McGraw-Hill, New York, U.S.A., 417, 509-511.  
 J. I. Romas. 1989. Internal combustion engine modeling. Hemisphere Publishing Corporation, New York, U.S.A., 98-100.  
 Jeong TS, Wang WG and Kim SA. 2017. An experimental study on the injection and spray characteristics of butanol. J Korean Soc Fish Technol 53, 89-97. (DOI:10.3796/KSFT.2017.53.1.089).  
 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 2014 Conference Proceeding, 249-250.  
 Kim DH. 2010. The status and outlook for biobutanol technology. Auto Journal\_2010.8, 36-44.  
 Kim HM. 2018. Autoignition phenomena of a single diesel/1-butanol mixture droplet. JILASSKR 23, 90-95. (DOI:10.15435/JILASSKR.2018.23.2.90).  
 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, 116-125. (DOI:10.7467/KSAE.2014.22.5.116).  
 Lee SH, Kang KY, Kim MJ and Lim JH. 2017. Performance and emission characteristics of an IDI diesel generator fueled with wood pyrolysis oil / butanol blended fuels. KSAE 25, 380-388. (DOI:10.7467/KSAE.2017.25.3.380).  
 Oh CH, Kang KJ and Choi GM. 2017. Effects of fuel blending ratio and oxygen concentration on auto-ignition characteristics of n-decane/ethanol blended fuels. KSME-B 41, 749-757. (DOI:10.3795/KSME-B.2017.41.11.749).  
 Technical paper. 2008. Basic principles of ship propulsion. MAN Marine Engines & Systems, Copenhagen, Denmark, 20.  
 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.

2019. 10. 14 Received  
 2019. 11. 02 Revised  
 2019. 11. 07 Accepted