

## 커피박 열분해유를 연료로 사용하는 디젤 발전기의 연소 및 배출물 특성에 관한 연구

박준하<sup>1</sup> · 이석환<sup>2</sup> · 강건용<sup>2</sup> · 이진욱<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>송실대학교 기계공학과, <sup>2</sup>한국기계연구원 그린동력연구실

### A Study on Combustion and Emission Characteristics of Diesel Generator Fuelled with Coffee Ground Pyrolysis Oil

JUNHA PARK<sup>1</sup>, SEOKHWAN LEE<sup>2</sup>, KERNYONG KANG<sup>2</sup>, JINWOOK LEE<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, 369 Sando-ro, Seoul 06978, Korea

<sup>2</sup>Engine Research Team, Korea Institute of Machinery and Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

†Corresponding author :  
immanuel@ssu.ac.kr

Received 4 September, 2019  
Revised 28 November, 2019  
Accepted 30 December, 2019

**Abstract >>** Due to the depletion of fossil fuels and environmental pollution, demand for alternative energy is gradually increasing. Among the various methods, a method to convert biomass into alternative fuel has been proposed. The bio-fuel obtained from biomass through pyrolysis process is called pyrolysis oil (PO) or bio-oil. Because PO is difficult to use directly in conventional engines due to its poor fuel properties, various methods have been proposed to upgrade pyrolysis-oil. The simplest approach is to mix it with conventional fossil fuels. However, due to their different polarity of PO and fossil fuel, direct mixing is impossible. To resolve this problem, emulsification of two fuels with a proper surfactant was proposed, but it costs additional time and cost. Alternatively, the use of alcohol fuels as an organic solvent significantly improve the fuel properties such as fuel stability, calorific value and viscosity. In this study, blends of diesel, n-butanol, and coffee ground pyrolysis oil (CGPO) which is one of the promising PO, was applied to diesel generator. Combustion and emissions characteristics of blended fuels were investigated under the entire load range. Experimental results show that ignition delay is similar to that of diesel at high load. Although, hydrocarbon and carbon monoxide emissions are comparable to diesel, significant reduction of nitrogen oxides and particulate matter emissions were observed.

**Key words :** Pyrolysis oil(열분해유), Coffee ground(커피박), Fast pyrolysis(급속 열분해), Biomass(바이오매스), N-butanol(노멀 부탄올), Diesel generator(디젤 발전기)

## 1. 서론

화석연료는 높은 에너지 밀도, 수송과 운반 편의성 등 에너지원으로서 많은 장점을 갖고 있다. 2017년 기준 세계 에너지 사용량 중 81%가 화석연료를 통해 생산된 에너지이다<sup>1)</sup>. 하지만 화석연료의 사용으로 발생하는 이산화탄소와 여러 유해 배출가스들은 지구온난화와 대기오염 등 여러 환경문제의 원인이 된다. 또한 화석연료는 인공적인 생산이 불가하기 때문에 증가하는 에너지 사용량에 따른 에너지 고갈 문제 역시 존재한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 화석연료의 대체 에너지원을 찾기 위한 다양한 연구와 노력이 이어지고 있다. 그 중 식물계 바이오매스를 연료로 전환하는 방법이 제안되고 있다. 식물계 바이오매스는 셀룰로오스(cellulose), 헤미셀룰로오스(hemicellulose), 리그닌(lignin) 등 천연 고분자가 주 성분인 바이오매스로 자원을 재활용할 수 있을 뿐만 아니라 식물의 성장을 통한 이산화탄소 저감효과까지 얻을 수 있는 이점이 있다. 대표적인 공급 원료로는 목재부산물, 볏짚이나 옥수수 대와 같은 농업부산물 또는 폐지와 같은 도시 폐 바이오매스 등이 있다.

식물계 바이오매스를 연료로 전환하기 위해서는 탄소, 수소, 산소로 이루어진 고분자 결합을 열을 가해 끊어야 하는데, 필요한 산화제의 양에 따라 직접 연소, 가스화, 열분해 등으로 나눌 수 있다. 이중 열분해는 무산소 상태에서 수초 내에 고열을 가하여 액상의 유도체와 기상 연료를 생산하는 방법이다. 이때 생산된 액상의 유도체를 열분해유(pyrolysis oil, PO) 혹은 바이오 원유(bio-oil)라고 부른다. 열분해는 직접 연소, 가스화 같은 다른 연료 전환 방법들과 비교하였을 때 최대 75%의 수율을 얻을 정도로 생산성이 높고 다른 고체, 기체상의 연료에 비해 높은 에너지 밀도를 갖고 있다. 그리고 액체 연료를 사용하는 엔진이나 발전기에 적용성이 높은 장점을 갖고 있다. 하지만 열분해유는 다음과 같은 공통적인 문제점들을 가지고 있다. 우선 열분해유는 다량의 산소 성분을 포함하고 있는데 이로 인하여 기존 화석연료와 비교했을 때 1/3 수준의 발열량과 낮은 착화성을 보

인다. 뿐만 아니라 상온에서 산소를 이용한 중합반응(polymerization)이나 응축반응(condensation)이 발생하기 때문에 시간이 지날수록 점도와 수분이 증가하여 저장 안정성이 매우 낮다. 또한 열분해유의 높은 수분 함유량은 낮은 에너지 밀도, 착화 어려움, 분사 문제들로 이어진다. 그 밖에도 산성(pH 2-3)으로 인한 부식 문제, 재(ash)와 칩(char)로 인한 인젝터 막힘 문제 등이 존재한다<sup>2,3)</sup>. 이러한 특성들은 열분해유를 엔진에 적용하였을 때 정상적인 작동을 어렵게 한다.

열분해유를 엔진에 사용하기 위하여 연료를 고급화하는 다양한 방법들이 제안되었다<sup>3)</sup>. 그중 가장 대표적인 방법은 디젤과 같은 기존 화석 연료와 혼합하여 열분해유의 낮은 세탄가와 발열량을 개선하는 방법이다. 하지만 두 연료의 극성차이로 인하여 상분리 현상이 발생하는데 이를 막기 위하여 계면활성화제(surfactant)를 이용한 유상액(emulsion) 형태로 제조하거나 알코올계 연료를 유기용매로 이용하여 혼합하는 방법이 사용된다. 유상액으로 제조하는 경우 유화(emulsification)라는 추가적인 절차를 필요로 하는데 계면활성화제 첨가 후 열을 가하여 교반하는 과정으로 시간과 비용이 추가적으로 소요된다. 뿐만 아니라 유상액 상태로 엔진에 적용한다고 하더라도 여전히 부식성이 증가하는 것이 보고되었으며 중합반응으로 인하여 연료 공급 시스템이 막히는 문제가 존재한다<sup>4,5)</sup>.

이와 비교하여 알코올계 연료를 유기용매로 사용하여 디젤, 열분해유와 직접 혼합하는 방법은 여러 장점을 갖고 있다. 알코올계 연료를 첨가하는 경우 점도, 밀도, 인화점 등이 감소하며 연료 안정성, 발열량 역시 높일 수 있다. 유기용매로 사용하는 알코올계 연료는 메탄올부터 부탄올까지 사용할 수 있는데 전반적으로 탄소 사슬 길이가 길수록 혼합연료의 세탄가, 발열량, 증발 잠열 같은 물성치들이 엔진 적용에 적합해진다<sup>6)</sup>. 선행연구에 따르면 에탄올을 사용하였을 때 점성은 빠르게 감소하지만 혼합연료의 상이 안정적으로 존재하는 영역이 좁고 에탄올의 낮은 인화점으로 인하여 자발화가 발생할 위험이 있다. 하지만 그에 비해 부탄올을 사용하는 경우에는 발열량

과 에너지 밀도가 에탄올에 비해 높아지고 혼합 영역이 넓어 안정적인 혼합이 가능함을 확인할 수 있었다<sup>7)</sup>. 바이오 오일의 혼합연료 제작과정을 도식도를 Fig. 1에 나타내었다. 디젤-알코올-열분해유 혼합연료는 여전히 자발화 성능이 낮아서 압축착화 엔진에 직접 적용할 수 없다. 이를 보완하기 위하여 2-ethyl hexyl nitrate (EHN), diglyme, polyethylene glycol (PEG)-400과 같은 세탄가 향상제를 추가적으로 혼합해 사용하여야 한다<sup>7,8)</sup>. 세탄가 향상제가 추가된 혼합연료를 디젤 엔진에 적용하는 경우 별다른 엔진 개조 없이 안정적인 연소가 발생하였으며 디젤과 비슷한 수준의 연소가 발생한다고 보고되었다. 혼합연료를 사용하였을 때 질소산화물과 입자상 물질의 저감을 확인한 연구도 발표되었으며 장시간 운전이 가능한 연구결과도 보고되었다<sup>9,10)</sup>.

본 연구에서는 커피박을 원료로 열분해하여 제조된 커피박 바이오 원유(coffee ground pyrolysis oil, CGPO)를 디젤엔진에 적용하고자 하였다. 디젤-부탄올-CGPO가 포함된 혼합연료의 적절한 혼합 비율을 평가하기 위해 디젤, 부탄올, CGPO를 여러 비율로 혼합한 샘플 연료를 다양하게 제조하여 Ternary Plot을 작성하였으며 상분리 없이 안정적으로 혼합되는 영역을 찾았다. CGPO가 포함되지 않은 부탄올 65%, 디젤 30%, 2-EHN 5%가 포함된 연료를 기본연료로 정하였다. 기본연료의 부탄올 비율을 줄이고 CGPO 비율을 늘리는 방식으로 CGPO의 비율을 0%에서 15%까지 5%씩 증가시킨 혼합연료를 제조하였으며

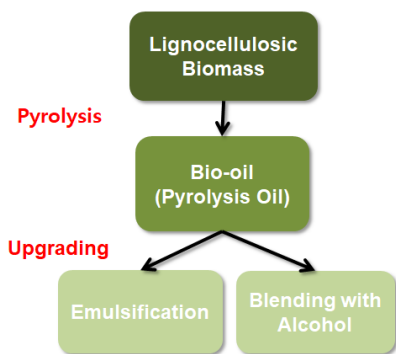


Fig. 1. Schematic diagram of blends production process

발전용 디젤 엔진에 적용하였다. 발전기의 부하는 0-25.5 kW<sub>e</sub>의 모든 부하 영역에서 실험하였으며 여러 계측장비를 통하여 연소 및 배출 특성에 대한 연구를 실시하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 연료

실험에 사용된 열분해유는 커피를 짜고 남은 찌꺼기인 커피박을 원료로 급속 열분해 방식을 이용하여 제조되었다. 2017년 국제커피협회(International coffee organization, ICO)의 통계에 따르면 우리나라는 1년 동안 290만 포대(60 kg 1 포대)의 커피를 수입하였으며 이는 커피 수입 국가 중 7위에 해당하는 양이다<sup>11)</sup>. 하지만 커피 생두는 0.2 wt%만이 커피를 추출하기 위해 사용되고 나머지는 모두 커피박으로 버려지며 하루에 발생하는 커피박은 210톤 정도 된다. 최근 버려지는 커피박을 비료로 사용하려는 시도가 있으나 여전히 일반용 쓰레기로 버려지는 커피박이 대다수이다. 따라서 커피박을 열분해유로 제작할 경우 원료의 안정적인 공급하에 적은 비용으로 연료 생산이 가능하다. 그 뿐만 아니라 다른 식물계 바이오매스인 목질계로 제작한 열분해유에 비해 발열량이 높아 연료 소비율 측면에서 강점을 갖는다.

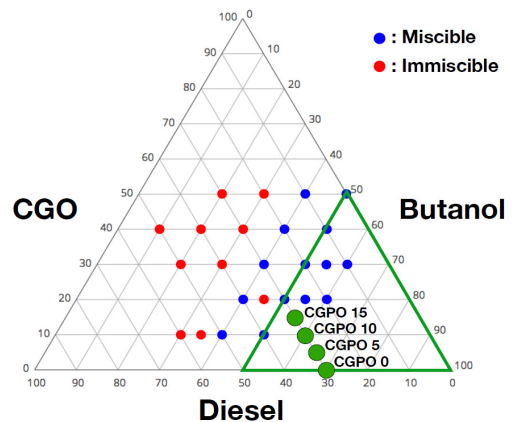


Fig. 2. Ternary plot

먼저 혼합 연료를 엔진에 사용하기 위해선 기본적으로 구성 연료들 간에 적절한 혼합성(miscibility)을 파악하여야 한다. 구성 연료 비율에 따른 혼합성을 파악하고 적절한 혼합영역을 찾기 위해 여러 비율로 섞은 연료 샘플을 만들어 Fig. 2와 같은 CGPO, 부탄올, 디젤의 혼합비율에 따른 Ternary Plot을 작성했다. Ternary Plot은 합이 일정한 3개의 변수들을 동시에 나타낼 수 있는 삼각형 모양의 그래프로 각 점이 세 변수의 비율을 나타낸다. 혼합 정도에 따라 혼합 불가(immiscible), 혼합 가능(miscible)으로 나누어 표현하였다.

육안으로 상의 분리 정도를 파악하였기 때문에 정량적인 비교가 불가능하지만 비율에 따른 혼합도 경향을 파악할 수 있었다. 예상한 것처럼 무극성인 디젤의 비율이나 CGPO의 비율이 상대적으로 증가할수록 혼합연료의 상이 불안정해져 상분리가 발생하였고 두 연료의 유기 용매 역할을 하는 부탄올 양이 증가할수록 안정적인 상을 보였다. 혼합연료가 안정적으로 존재하는 영역은 붉은색 영역으로 도시하였다. 부탄올이 50% 이상 포함된 영역에서 혼합연료의 상이 안정적으로 존재하는 것을 확인할 수 있었다. Ternary Plot을 바탕으로 커피박 열분해유의 비율을 0-15%까지 포함된 상이 안정적인 혼합연료를 실험에 사용하였다. 구성연료와 혼합연료의 물성치를 공인 분석기관인 한국석유품질관리원에 의뢰해 분석하였으며 이를 Table 1에 나타내었다.

기본 연료는 부탄올, 디젤, 2-EHN을 65:30:5의 비율로 혼합하여 제조하였다. CGPO는 기본 연료에 5, 10 및 15 wt%의 비율로 혼합되었으며 CGPO의 비율

이 증가함에 따라 부탄올의 비율을 감소시켰다. 또한 연료 분사기 및 펌프의 기계적 마모를 방지하기 위하여 500 ppmv의 윤활성 향상제(Lubricant, Lubrizol, USA)를 각 혼합연료에 첨가하였다.

## 2.2 실험 방법

본 연구에 사용된 엔진과 계측장치의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 실험은 기계식 연료공급계가 장착된 간접 분사 방식의 디젤 엔진에서 수행되었다.

커먼레일 방식의 고압 연료 공급 시스템을 사용하는 경우 열분해유에 포함된 타르, 촉에 의한 연료공급계막힘 현상이나 카본 퇴적물 발생으로 인한 연료공급계 파손 같은 문제가 단시간에 발생하기 때문에 상대적으로 연료의 특성에 강인한 기계식 분사 방식의 엔진을 사용하였다. 엔진의 세부 사양은 Table 2에 나타내었다.

본 연구에 사용된 계측장치는 다음과 같다. 우선 연료소모량을 계산하기 위해 초음파 방식의 연료유량계(Micro Motion CMFS010, Emerson, USA)를 사용하였다. 흡기 공기량은 흡기구에 Laminar flow meter (Z50MY15, Meriam, USA)를 장착하고 차압을 마노미터(FCO510, Furness Controls, USA)를 이용하여 측정 후 흡기 온도를 고려하여 계산하였다. 실린더 내 압력은 글로우 플러그를 제거하고 그 자리에 글로우 플러그 어댑터(6542Q600, Kistler, Switzerland)와 압전식 압력센서(6056A, Kistler)를 장착하여 측정하였다. 압력센서에서 발생한 신호는 Charge Amplifier (5018A, Kistler)에서 증폭된 후 연소해석

Table 1. Fuel properties of test fuels

Fuel	Viscosity (sST at 40°C)	LHV (MJ/kg)	Water (%)	C (wt%)	H (wt%)	O (wt%)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Cetane number
Diesel	2.7	42.6	-	86.1	13.9	-	821.0	52.6
CGPO (coffee graound pyrolysis oil)	9.2	18.5	41.5	45.0	11.3	43.5	1,011.0	-
n-Butanol	2.2	33.1	-	64.8	13.6	21.6	810.0	25
2-EHN (2-ethyl hexyl nitrate)	1.8	28.5	0.5	54.9	9.7	27.4	963.0	-

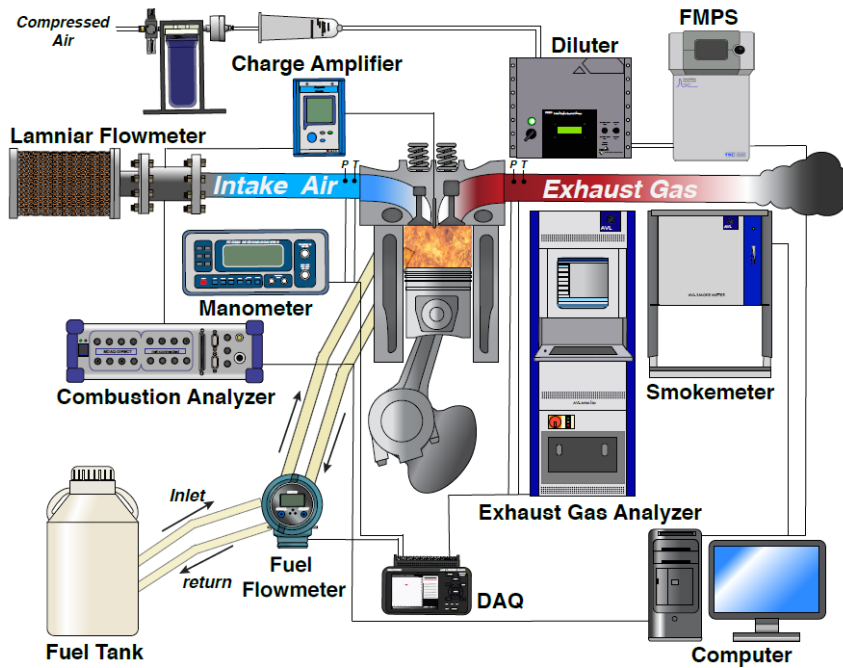


Fig. 3. Schematic diagram of experimental setup

기(DEWE-211, Dewetron, Austria)로 전송되었고 엔진 크랭크에 설치된 엔코더와 연동되어 열방출율, 도시유효압력(indicated mean efficient pressure, IMEP) 및 연소안정성(coefficient of variation in IMEP,  $COV_{imep}$ )을 계산하였다. 배출가스에 포함된 가스 상 배출물질인 미연탄화수소(total hydrocarbon, THC), 일산화탄소(carbon monoxide, CO), 질소산화물(nitrogen oxides, NO<sub>x</sub>)은 배출가스 분석계(AMA I-60; AVL, Austria)를 통해 분석하였다. 또한 배기가스에 포함되어 있는 입자상 물질(particulate matter, PM)의 질량농도를 측정하기 위하여 Smoke meter (415S, AVL)를 사용하였다. 입자상 물질의 입경별 수농도 분포는 5.6-560 nm 범위 안의 크기를 가지는 초미세 입자들을 초당 1번 측정할 수 있는 FMPS (3091, TSI, USA)를 이용하여 측정하였다. 배출가스에 포함된 수분 및 휘발성 물질을 제거하고 장비에 사용할 수 있는 수준의 농도로 희석하기 위하여 희석기(DEED-10, Dekati, Finland)를 사용하여 100:1 수준으로 배출가스를 희석하였다.

Table 2. Engine specifications

Specifications	Resources
Model (Manufacturer)	D4BB-G (Hyundai)
Displacement (cc)	2,607
Cylinders	4
Intake system	Turbocharged
Bore (mm)×Stroke (mm)	91.1×100
Compression ratio	22.1
Rated Power (ps/rpm)	60/1,800

모든 테스트는 5.1 kW<sub>e</sub> 간격으로 0-25.5 kW<sub>e</sub>의 발전기 출력에서 1,800 rpm의 고정 엔진 속도로 수행되었다. 실험 전 엔진을 10분 동안 디젤 연료로 작동시켜 예열하였으며 시험 연료는 연료를 전환하기 전에 연료 펌프 및 분사기 내부에 남아있는 연료를 완전히 제거함으로써 잔류 연료와 혼합되는 것을 방지하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 연소 특성

혼합연료의 연소 특성을 확인하기 위하여 저부하와 고부하를 대표하는 5.1 kW<sub>e</sub>, 20.6 kW<sub>e</sub>의 출력 조건에서 실린더 압력과 열방출율을 측정 후 Fig. 4와 5에 나타내었다. 열방출율은 크랭크 각당 방출 부피당 열량으로 점화 지연과 같은 연소 특성을 분석하는데 유용한 변수이다. 열방출율은 식 (1)과 같이 실린더 압력과 비열비 $\gamma$ 를 이용하여 계산한다.

$$\frac{dQ_n}{dt} = \frac{\gamma}{\gamma-1} p \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dp}{dt} \quad (1)$$

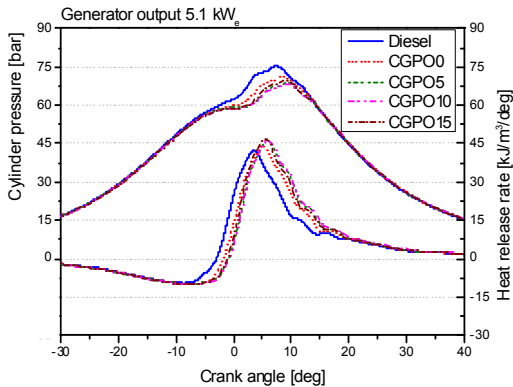


Fig. 4. Cylinder pressure & heat release rate at 5.1 kW<sub>e</sub>

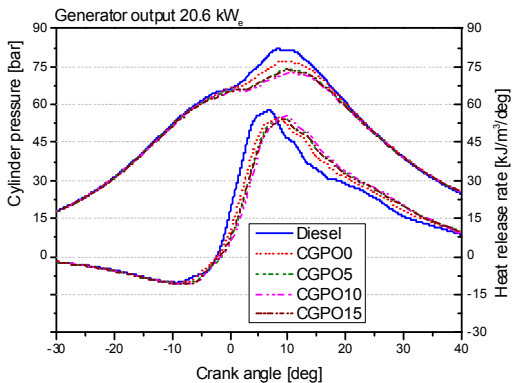


Fig. 5. Cylinder pressure & heat release rate at 20.6 kW<sub>e</sub>

실린더 압력의 경우 두 부하 모두 디젤에 비해 혼합연료 사용 시 최고 연소 압력이 감소하는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 혼합연료의 낮은 발열량과 높은 수분 함유량으로 인하여 연소 온도가 상대적으로 낮아져 연소압력 역시 감소한 것으로 판단된다. 열방출율을 보면 5.1 kW<sub>e</sub> 조건에서 디젤에 비하여 혼합연료의 점화지연 기간이 상대적으로 길지만 고부하인 20.6 kW<sub>e</sub> 조건에서는 디젤과 비슷한 점화지연 기간을 보였다. 또한 혼합연료의 경우 낮은 발열량으로 인해 디젤에 비하여 연소기간은 증가한 것으로 확인되었다.

엔진의 연소안정성을 평가하기 위하여 COV<sub>imep</sub>를 이용하여 혼합연료 적용에 따른 연소안정성을 평가한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. COV<sub>imep</sub>는 연속적인 200 사이클에서 측정된 IMEP값의 표준편차와 평균값의 비로 구할 수 있는데 일반적으로 COV<sub>imep</sub>값이 5% 이내인 경우 안정적인 연소가 발생한다고 인식된다. 결과를 살펴보면 무부하 조건인 0 kW<sub>e</sub>를 제외하고는 모든 연료에서 COV<sub>imep</sub> 값이 5% 이내로 측정되었으며 이는 연소가 안정적으로 발생하고 있다는 것을 의미한다. 발전기부하가 증가할수록 엔진 부하도 증가하여 실린더 내의 압력과 온도도 증가하므로 더욱 안정적인 연소가 발생하고 있음을 알 수 있다. 혼합연료의 경우 디젤에 비하여 동등 수준이거나 약간 더 우수한 연소 안정성을 나타내었는데 이는 혼

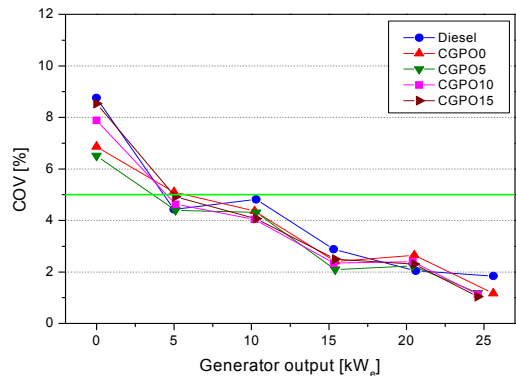


Fig. 6. Coefficient of variance in indicated mean effective of test fuels according to generator output

합연료의 최고 연소압이 디젤보다 낮아 사이클 간 연소압 변화가 상대적으로 작고 이것이 우수한 연소 안정성으로 이어지게 되는 것이다.

### 3.2 연료 소비율 및 효율

Fig. 7에서는 발전기 출력에 따른 도시연료 소비율을 나타내었다. Table 1에서 확인할 수 있는 것처럼 혼합연료는 디젤에 비하여 낮은 발열량을 갖고 있기 때문에 동일 부하를 얻기 위해서는 디젤보다 더 많은 연료 분사가 필요하며 이는 상대적으로 높은 연료 소비율로 이어진다. 이러한 경향은 모든 혼합연료에서 확인 가능하며 CGPO가 부탄올에 비해 발열량이 상대적으로 낮기 때문에 CGPO 비율이 증가할수록 동일 출력을 내기 위한 연료량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 8은 부하에 따른 연료별 도시 열효율을 나타낸 그래프다. 디젤은 혼합 연료에 비해 15 kW<sub>e</sub> 이상의 고부하 조건에서는 엔진 효율이 약간 더 높은 경향을 보이지만 그 아래 부하 조건에서는 동등한 수준의 열효율을 보이고 있다. CGPO를 첨가할수록 열효율이 약간 감소하는 경향을 보이지만 이는 열분해유에 포함된 수분 성분이 증발하면서 에너지를 소모하기 때문인 것으로 판단되는 것이다.

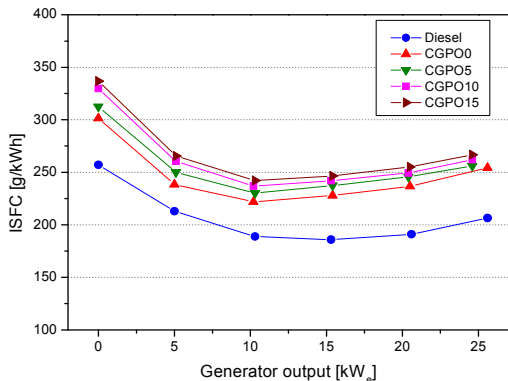


Fig. 7. Indicated specific fuel consumption of test fuels according to generator output

### 3.3 배출 특성

#### 3.3.1 미연탄화수소(total hydrocarbon)

Fig. 9에서는 발전기 출력에 따른 도시 미연탄화수소 배출량을 연료별로 나타내었다. 압축착화 엔진에서 THC는 연료가 적절히 혼합되지 않는 경우 또는 벽면소염(wall-quenching) 등에 의해 발생한다. 연료의 혼합도에 의해서 발생하는 THC의 경우 점화 지연의 영향을 받는다. 점화지연에 의해 예혼합 연소 단계에서 연소되는 혼합기의 당량비가 결정되기 때문이다<sup>12)</sup>. 앞서 말한 것처럼 저부하 영역에서 혼합연료는 디젤에 비하여 점화지연이 상대적으로 길다. 긴 점화지연으로 인해 과혼합된 혼합기가 증가해 THC가 증가한다. 그 뿐만 아니라 혼합연료의 낮은 발열

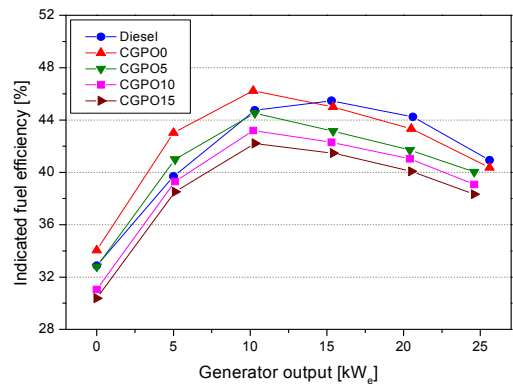


Fig. 8. Indicated fuel efficiency of test fuels according to generator output

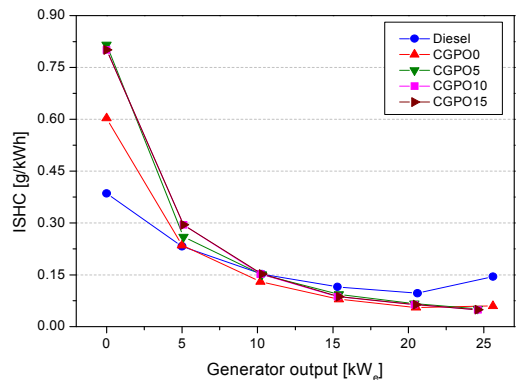


Fig. 9. Indicated specific hydrocarbon of test fuels according to generator output

량으로 인하여 동일 출력을 내기 위하여 더 많은 연료를 분사해야 하는데 이 과정에서 연소실 벽면을 적시는 Wall-wetting 현상으로 인해 THC가 증가한 것으로 보인다. 한편 부하가 증가할수록 THC 발생량이 감소하는데 이는 부하 증가에 따라 연소실 온도가 증가하고 점화지연이 개선되어 THC의 발생량도 감소하는 것으로 보인다. 20 kWe 이상의 고부하 조건에서는 혼합연료가 더 적은 THC 배출량을 보이는데 이는 혼합연료의 개선된 점화지연과 혼합연료를 구성하고 있는 부탄올과 CGPO에 포함된 산소가 THC를 추가적으로 산화시키기 때문이다.

### 3.3.2 일산화탄소(carbon monoxide)

Fig. 10은 발전기 출력에 따른 연료별 도시 일산화탄소 배출량을 나타낸 그래프이다. CO의 배출은 THC와 비슷한 경향을 보여준다. 부하가 증가할수록 배출량은 급감하고 중부하, 고부하 영역에서는 모든 연료가 동등 수준의 배출량을 보인다. CO는 일반적으로 연료가 충분히 산화되지 못할 정도로 희박 또는 농후하거나 연소 온도가 충분히 높지 않을 때 발생한다. 디젤에 비해 혼합연료가 더 많은 CO 배출량을 보이는데 이는 혼합연료의 높은 점도로 인하여 미립화 특성이 저하되고 수분함량으로 인하여 연소 온도가 상대적으로 감소하여 연료 내에 산소를 포함하였음에도 CO를 충분히 산화시키지 못하였기 때문

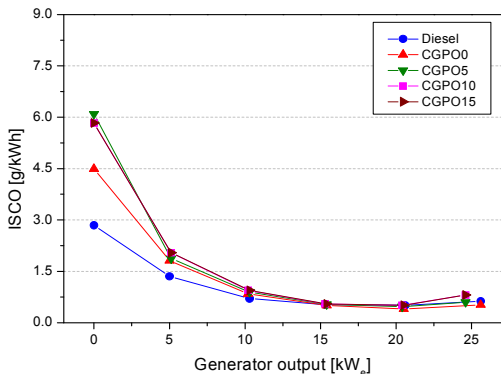


Fig. 10. Indicated specific carbon monoxide of test fuels according to generator output

이다.

### 3.3.3 질소산화물(nitrogen oxides)

Fig. 11에서는 발전기 출력에 따른 도시 질소산화물 배출량을 연료별로 나타내었다. 모든 부하조건에서 혼합연료가 디젤보다 NOx 배출량이 낮다. NOx 배출량은 연소실 내부 온도, 압력과 연료 내의 산소 함유량에 좌우되는데 연소실 피크 온도가 높을수록, 연료 내 산소 함유량이 높을수록 발생량이 증가한다<sup>12)</sup>. CGPO 비율이 증가할수록 혼합연료의 수분과 산소 함유량이 모두 증가하는데 수분에 의해 연소실 온도가 디젤에 비해 상대적으로 낮아져 NOx 감소 효과와 증가한 산소 함유량으로 인한 NOx 증가 효과가 동시에 작용한다. 실험결과로 미루어보아 수분함유로 인한 NOx 감소 효과가 산소 함유로 인한 NOx 증가 효과를 상쇄시켜 결과적으로 더 낮은 NOx 배출을 보이는 것으로 추정할 수 있다.

### 3.3.4 입자상물질(particulate matter)

Fig. 12, 13은 발전기 출력에 따른 각 연료별 입자상물질의 도시 중량농도와 도시 수 농도를 나타낸 그래프이다. PM의 중량농도를 나타낸 Fig. 12를 보면 모든 부하 영역에서 디젤에 비해 혼합연료가 매우 낮은 배출량을 보일뿐만 아니라 혼합연료의 CGPO 함량이 증가할수록 중량 농도가 감소한다. 수

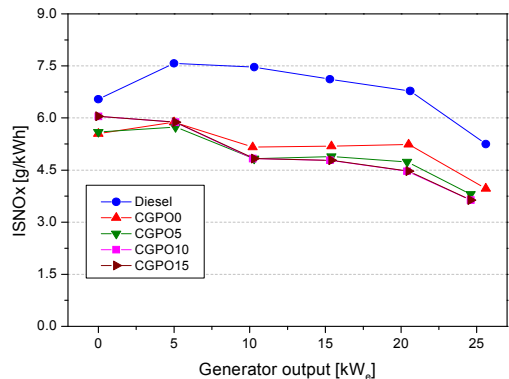


Fig. 11. Indicated specific NOx of test fuels according to generator output



농도를 나타낸 Fig. 13을 보면 디젤을 제외한 모든 연료가 부하가 증가할수록 입자의 수가 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 연료별로 보면 고부하 영역을 제외하고는 CGPO 비율이 증가할수록 수농도가 증가한다. 압축 착화 엔진에서 입자상 물질은 연소로 인해 발생한 방향족 탄화수소나 아세틸렌 같은 불포화 탄화수소가 입자상 물질의 전구체로서 역할을 하고 전구체를 중심으로 응집을 통해 성장하는 것으로 알려져 있다<sup>13)</sup>. 기존 연구에 따르면 산소와 결합하는 탄소 즉 C-O 결합은 Soot의 전구체 생성과정에 참여하지 않는 것으로 알려져 있다<sup>14)</sup>. 이러한 점을 미루어 보아 산소와 결합된 탄소 원자들이 Soot 생성과정에 참여하지 않고 질량에 영향을 주지 않는 작은 입경의 입자들로 배출되는 것임을 추론할

수 있다. 이를 확인하기 위하여 Fig 14, 15에 각각 저부하, 고부하일 때 입자상 물질의 수농도를 모드별로 나타내었다. 입경 크기 기준으로 50 nm 이하의 크기를 가지는 핵모드(nuclei mode)와 50-1,000 nm 범위의 입경을 가지는 축척모드(accumulation) 영역으로 나누었고 핵모드 영역의 입자를 현재 디젤 엔진 배출가스 규제법에 명시된 입경 기준인 23 nm을 기준으로 다시 구분하였다. 부하별 특징을 보면 모든 연료에 대해 고부하에서 PM의 중량농도를 결정하는 축척모드 영역에 속하는 입자들의 비중이 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 고부하를 만족시키기 위해 더 많은 연료가 분사되고 이로 인해 연료가 농후한 영역이 증가하여 PM 형성과정에 참여하는 탄소량이 증가한 것으로 보인다.

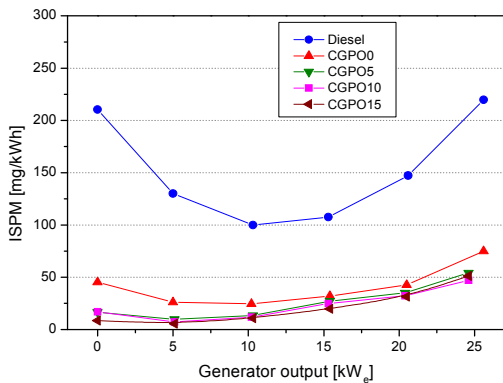


Fig. 12. Indicated specific particulate mass of test fuels according to generator output

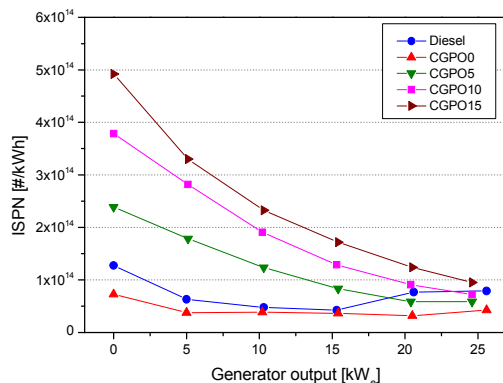


Fig. 13. Indicated specific particulate number of test fuels according to generator output

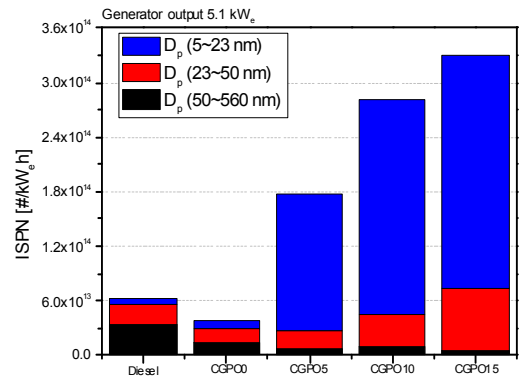


Fig. 14. Indicated specific particle number of test fuels at generator output of 5.1 kW<sub>e</sub>

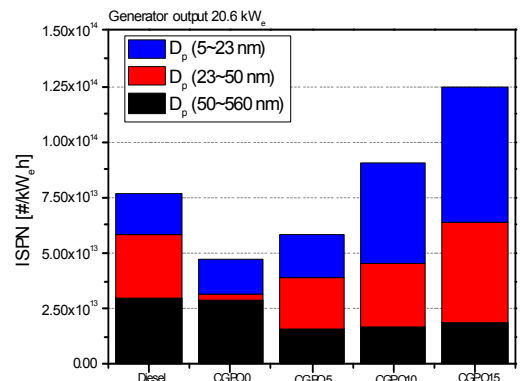


Fig. 15. Indicated specific particle number of test fuels at generator output of 20.6 kW<sub>e</sub>

한편 연료별 특징으로는 부하와 관계없이 CGPO 0 연료가 가장 적은 수농도를 보이고 CGPO의 함량이 증가할수록 전체 수농도가 증가하는 경향을 보인다. 이는 핵모드 영역에 속하는 입자들의 수농도가 증가하고 축척모드 영역에서의 수농도가 감소하기 때문이다. 만약 입자상 물질의 밀도가 동일하다면 상대적으로 큰 입경을 가지는 입자를 많이 배출하는 연료를 사용할 때 PM 중량 농도 역시 높음을 추론할 수 있다. 이는 CGPO와 부탄올에 포함된 C-O 결합이 Soot 전구체 형성을 억제하여 상대적으로 작은 입자들이 발생한다는 이전의 추론이 타당함을 보여준다.

#### 4. 결론

커피박 바이오 원유를 디젤 엔진에 적용하기 위하여 디젤, 부탄올, 세탄가 향상제와 혼합한 혼합연료를 제조하여 엔진의 연소 및 배기 특성을 평가하였다. 혼합연료들의 혼합비율에 대한 Ternary Plot을 작성하였으며 적절한 혼합영역을 확인한 후 그 중 임의의 연료 비율을 선택하여 기본 연료로 사용하였다. 기본연료에서 CGPO의 비율을 증가시키고 동시에 부탄올의 비율을 감소시켜 4종의 혼합연료를 제작하였으며 이를 간접 분사 방식의 디젤엔진에 적용하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 무부하 조건을 제외하고는 연료에 관계없이  $COV_{imep}$ 가 5% 이내의 안정적인 연소를 보였다. 혼합연료의 경우 낮은 발열량과 수분으로 인하여 디젤보다 낮은 연소압을 나타내었다. 열방출율의 경우 저부하에서는 자발화 성능이 낮은 혼합연료의 점화 지연이 길었으나 이는 부하가 증가하면서 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

2) 연료 소비율의 경우 발열량이 상대적으로 낮은 CGPO의 비율이 증가하면서 동일 부하에서 필요한 연료량이 증가하는 것을 확인하였으며 연료효율의 경우 디젤과 비슷한 수준이었으나 CGPO 비율이 증가하면서 효율이 약간 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

3) 미연탄화수소와 일산화탄소는 모든 연료에서

비슷한 경향을 보여주었는데 저부하에서는 디젤보다 약간 많은 배출량을 보이다가 부하가 증가하면서 점차 디젤과 비슷하거나 더 낮은 수준의 배출을 보였다. 질소산화물은 혼합연료가 디젤보다 낮은 배출을 보였고 이는 상대적으로 낮은 연소압 및 CGPO에 포함된 수분의 효과로 파악된다.

4) 혼합연료의 PM 질량농도는 디젤과 비교하였을 때 매우 낮은 수준의 배출을 보였지만 수농도의 경우 더 높은 배출농도를 나타내었다. 입경 크기를 기준으로 모드를 나누어 분석한 결과 CGPO의 비율이 증가할수록 연료 내 산소 함유량이 증가하여 입자상 물질의 전구체 역할을 하는 불포화 탄화수소나 PAH의 형성하는 것을 억제해 질량에 영향을 미치는 축척모드영역에서의 수농도가 급증하는 것을 확인할 수 있었다. 핵모드 영역에서의 수농도가 급증하는 것을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 한국기계연구원의 창의형융합사업인 “안정화공정이 결합된 급속열분해를 통한 바이오원유 제조와 초임계유체를 이용한 바이오원유의 촉매 탈산소 기술개발”사업의 연구비로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 포함한다.

#### References

1. J. F. Nicole, “World Energy Outlook 2018”, IEA Publications, 2018.
2. D. Chiamonti, M. Bonini, E. Fratini, G. Tonfi, K. Gartner, A. V. Bridgwater, H. P. Grimm, I. Soldaini, A. Webster and P. Baglioni, “Development of emulsions from biomass pyrolysis liquid and diesel and their use in engines - Part 2: Tests in diesel engines”, *Biomass & Bioenergy*, Vol. 25, No.1, 2003, pp.101-111, doi: [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00184-8as](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00184-8as).
3. A. V. Bridgwater, “Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading”, *Biomass & Bioenergy*, Vol. 38, 2012, pp.68-94, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>.
4. M. Ikura, M. Stanculescu and E. Hogan, “Emulsification of Pyrolysis Derived Bio-oil in Diesel Fuel”, *Biomass & Bioenergy*, Vol. 24, No. 3, 2003, pp. 221-232, doi: [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00131-9](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00131-9).

5. D. Mohan, C. U. Pittman, and P. H. Steele, "Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review", *Energy & Fuels*, Vol. 20, No. 3, 2006, pp. 848-889, doi: <https://doi.org/10.1021/ef0502397>.
6. A. Oasmaa, E. Kuoppala, J. Selin, S. Gust, and Y. Solantausta, "Fast Pyrolysis of Forestry Residue and Pine. 4. Improvement of the Product Quality by Solvent Addition", *Energy & Fuels*, Vol. 18, No. 5, 2004, pp. 1578-1583, doi: <https://doi.org/10.1021/ef040038n>.
7. P. Weerachanchai, C. Tangsathitkulchai, and M. Tangsathitkulchai, "Phase behaviors and fuel properties of bio-oil-diesel alcohol blends", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 56, 2009, pp. 387-393, doi: <https://doi.org/10.1021/ef501176z>.
8. T. Y. Kim, and S. H. Lee, "Combustion and emission characteristics of wood pyrolysis oil-butanol blended fuels in a DI diesel engine", *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 16, No. 6, 2015, pp.903-912, doi: <https://doi.org/10.1007/s12239-015-0092-4>.
9. C. Bertoli, J. D'Alessio, N. Del Giacomo, M. Lazzaro, P. Massoli, and V. Moccia, "Running Light-duty DI Diesel Engines with Wood Pyrolysis Oil", *SAE Technical Papers*, 2000, doi: <https://doi.org/10.4271/2000-01-2975>.
10. S. Lee, K. Kang, M. Kim, and J. Lim, "Performance and Emission Characteristics of an IDI Diesel Generator Fueled with Wood Pyrolysis Oil/Butanol Blended Fuels", *Transactions of KSAE*, Vol. 25, No. 3, 2017, pp.380-388, doi: <https://doi.org/10.7467/KSAE.2017.25.3.380>.
11. International Coffee Organization, "Imports by all importing non- member countries", 2018, retrieved from <http://www.ico.org/Market-Report-17-18-e.asp>.
12. J. B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw Hill, USA, 1988.
13. Z. A. Mansurov, "Soot Formation in Combustion Process", *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 41, No. 6, 2005, pp.727-744, doi: <https://doi.org/10.1007/s10573-005-0083-2>.
14. C. K. Westbrook, W. J. Pitz, and H. J. Curran, "Chemical Kinetic Modeling Study of the Effects of Oxygenated Hydrocarbons on Soot Emissions from Diesel Engines", *J. Phys. Chem*, Vol. 110, No. 21, 2006, pp.6912-6922, doi: <https://doi.org/10.1021/jp056362g>.