

바이오에멀전 연료의 연소 특성

김문찬[†]

청주대학교 환경공학과
(2018년 9월 5일 접수: 2018년 12월 21일 수정: 2018년 12월 21일 채택)

Combustion Characteristics of Bio Emulsion Fuel

Moon-Chan Kim[†]

Department of Environmental Engineering, Cheongju University
(Received September 5, 2018; Revised December 21, 2018; Accepted December 21, 2018)

요약 : 본 연구에서는 바이오매스로서 코코넛 폐기물을 600°C에서 열분해하여 생성된 수상오일(water soluble oil)을 얻었다. 선박유로 사용되는 MDO(Marine Diesel Oil)와 바이오매스로서 코코넛 폐기물을 열분해하여 생성된 수상오일을 MDO에 15~20% 까지 혼합 후 유화시켜 제조된 바이오에멀전 연료의 연소 특성에 대하여 연구 하였다. 엔진 배출가스 및 온도, 출력을 측정하기 위하여 엔진 다이 나모미터를 사용하였다. 바이오에멀전 연료는 수분이 함유되어 있어서 연소실내의 기화잠열을 빼앗아가 배출가스의 온도를 낮춰주는 것으로 나타났다. 바이오에멀전 연료에 함유된 수분이 연소실내에서 미세폭 발을 일으켜 연료를 잘게 쪼개어 주어 매연을 감소시키는 것으로 나타났다. 바이오에멀전 연료의 사용으로 연소실내의 온도 감소는 질소산화물 배출을 저감하는 것으로 나타났다. 바이오오일 함유량이 증가 하면 수분함량도 증가하여 전체 발열량이 줄어들게 된다. 따라서 출력이 바이오에멀전 연료 사용량에 비례 하여 감소하는 특성을 나타내었다.

선박용 연료로 사용되는 중질유는 매연과 질소산화물을 많이 배출한다. 선박용 연료로 바이오에멀전 연료를 사용하면 매연과 질소산화물 배출을 줄여줄 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : MDO, 유화, 바이오에멀전 연료, 질소화합물, 매연

Abstract : Water soluble oil was obtained from the pyrolysis of coconut waste as a biomass at 600°C. It was studied that the combustion characteristics of bio-emulsion fuel by mixing and emulsifying 15~20% of water soluble oil which obtained from pyrolysis of coconut waste as a biomass and MDO(marine diesel oil) as a marine fuel. Engine dynamometer was used for detecting emissions, temperature, and power. The temperature of combustion chamber was decreased because the moisture in bio-emulsion fuel deprived of heat of evaporation in combustion chamber. While combustion, micro-explosion took place in the combustion chamber by water in the bio-emulsion fuel, MDO fuel scattered to micro particles and it caused to smoke reduction. The temperature

[†]Corresponding author
(E-mail: mckim@cju.ac.kr)

reduction of combustion chamber by using bio-emulsion fuel reduced the NOx emission. The increasing of bio-oil content caused increasing water content in bio-emulsion fuel so total calorific value was reduced. So the characteristics of power was decreased in proportion to using the increasing amount of bio-emulsion fuel. Heavy oil as a marine fuel exhausts a lot of smoke and NOx. We expect that we can reduce the exhaust gas of marine engine such as smoke and NOx by using of bio-emulsion fuel as a marine fuel.

Keywords : MDO, emulsion, bio-emulsion fuel, NOx, smoke

1. 서론

최근 친환경연료 및 대체연료의 보급이 활발해지고 있으며, 여기에 발맞추어 바이오매스로부터 얻어지는 바이오연료가 화석 및 석유계 연료를 대체해 나가고 있다. 특히 바이오에탄올 및 바이오디젤은 등은 이미 여러 나라에서 활발하게 석유계 연료와 혼합하여 사용되고 있다.

한편 이동원에서 배출되는 오염물질이 전체 대기오염물질의 약 70%를 차지하고 있어서 이동원에서 배출되는 배출가스에 대한 규제가 점점 강화되고 있으며, 현재 선박에서는 Tier-3 규제가 2016년 부터 , 자동차에서는 Euro-6 규제가 시행되고 있는 실정이다[1-2].

현재 자동차 메이커에서는 친환경 자동차로 하이브리드 자동차, 수소연료전지 자동차, 전기자동차 등이 활발하게 보급준비를 하고 있으며, 향후 자동차 산업에 혁신적인 대체로 자리매김할 것으로 판단된다.

그러나 향후 20-30년간은 기존의 석유계 연료에 의한 내연기관이 함께 지속적으로 사용될 예정이다며 기존의 석유계 연료를 대체할 대체에너지로서 천연가스, 알코올, 바이오디젤, 수소, DME (Di methyl ether) 등이 있으며, 온실가스 및 이산화탄소 발생을 억제할 수 있는 대체 연료로 각광받고 있다.

1990년대부터 대기오염과 지구온난화 등의 환경문제가 나타나면서 청정 바이오에너지에 대한 상용화 연구가 본격화되고 보급 필요성이 증가하면서 바이오매스의 에너지 활용기술은 은 바이오에탄올, 바이오디젤 등 바이오연료의 활발한 생산과 보급과 함께 신재생 에너지로서 인식되며 수요가 지속적으로 증가하는 추세이다.

국제에너지기구인 IEA(International Energy Agency)의 통계에서도 바이오매스가 담당하는 에

너지 비율은 전 세계 에너지원의 4% 이상이며, 2050년에는 폐기물을 포함한 바이오매스 사용량이 기존의 석유계 연료의 사용량을 추월할 것으로 전망하고 있다[3-5].

본 연구에서는 코코넛 폐기물을 열분해한 후 얻어진 바이오오일을 MDO(Marine Diesel Oil)와 15-20 % 비율로 혼합한 후 유화시켜 만들어진 바이오에멀전 연료의 연소특성을 알아보려고 하였다.

1.1. 코코넛 폐기물의 열분해

코코넛 폐기물이란 코코넛 열매로부터 내부의 수액을 제거한 코코넛열매 껍질을 말한다. 코코넛 폐기물은 신재생에너지원으로 사용되는 매우 큰 잠재력을 가지고 있는 바이오매스로서, 일반적인 바이오매스의 생성물과 동일한 수상생성물(water soluble product)과 차(char), 기상생성물로 탄소 3개 이하의 탄화수소류와 일산화탄소, 수소 등으로 이루어져 있다[6]. 본 연구에서는 코코넛 폐기물을 급속열분해 시켰는데, 일반적으로 급속열분해 반응은 600°C 전후의 온도에서 무산소 상태에서 반응을 진행시키며, 생성되는 기체 상태의 생성물을 응축시켜 수상생성물 형태로 바이오오일을 얻게 된다. 수상생성물 상태의 바이오오일의 수율을 높이기 위해서는 접촉시간을 최대한 짧게 유지하여 투입되는 코코넛 폐기물의 온도를 최대한 빠른 시간내에 600°C 까지 승온시켜야 한다. 위와 같은 조건을 만족시키기 위해서는 접촉시간을 짧게 유지하는 것 이외에 유동층 반응기를 사용하여 빠른 열전달을 유도하며, 또한 생성된 차(char)를 빨리 분리시켜 원료물질과 열전달을 원활하게 하여야 한다. 급속열분해되어 응축된 액상생성물은 물에 녹는지의 여부에 따라 두 가지로 구분되는데, 물에 녹지 않는 비수상생성물(water insoluble product)과 물에 녹는 수상

생성물(water soluble product)로 구분되며, 물에 녹지 않는 비수상생성물은 디클로로메탄(dichloromethane)으로 추출할 수 있으며 주로 리그닌 물질이 비수상생성물에 속한다. 물에 녹는 수상생성물(water soluble product)은 물과 알데히드류, 케톤류, 파이란(pyran), 퓨란(furan), sugar type compound, 산 등이 이에 속한다[7]. 코코넛 껍질(Coconut shell)의 급속열분해 반응 생성물은 Phenol, Syringol, o-,m-,p-Cresol, Guaiacol 등이다. 코코넛 폐기물을 열분해하여 생성된 수상생성물인 바이오오일은 수분 함량이 많아서 그대로 연소할 경우 연소가 어렵고 열량이 부족한 단점이 있다. 따라서 이러한 바이오오일의 단점을 해결하기 위하여 열량이 풍부하고 기존에 사용하던 연료인 MDO(Marine Diesel Oil)와 일정한 비율로 혼합한 후 유화제를 첨가하여 유화시켜 만들어진 바이오에틸렌 연료를 사용하여 배출가스를 줄이고자 한다.

1.2. 유화연료

유화연료는 오일과 물 또는 수상성분을 물리적인 방법 또는 화학적인 방법을 통하여 수상이 분산매가 되든지 아니면 유상이 분산매가 되도록 하여 유화시킨 연료를 말한다. 수상이 분산매가 되려면 친수성 유화제를 사용하여 O/W(Oil in Water) 에멀전이 만들어지며, 유상이 분산매가 되려면 친유성 유화제를 사용하여 W/O(Water in Oil) 에멀전이 만들어진다[8-11]. 이와 같은 방법이 일반적으로 유화를 분산상에 따라 나누는 방법인데 본 연구에서는 HLB(Hydrophilic Lipophilic Balance) 비를 조절한 친유성 유화제를 사용하여 W/O(Water in Oil) 에멀전을 만들어 사용하였다.

유화연료를 제조할 때 초음파나 기계적인 방법의 물리적 방법과 유화제를 사용하는 화학적 방법을 병행하는 것이 한가지 방법만으로 유화연료를 제조하는 것 보다 유화연료를 더 미립화 시키고 유화연료의 저장 안정성을 극대화 할 수 있다[12-13]. 그리고 유화제를 사용한 화학적 방법에서의 에멀전을 만들 경우 오일의 극성을 고려해야 하는데 에멀전의 극성에 따라 점도 변화가 나타나며 이것은 에멀전의 저장 안정성에도 영향을 미치게 된다[14].

1.3 배출가스 저감 방법

엔진에서 배출되는 배출가스를 제거하는 방법

은 연소전에 처리하거나 연료를 처리하는 방법과 배출가스를 처리하는 방법에 따라 두 가지 방법으로 분류가 된다. 연료를 사용하기 전에 원천탈황방법 등의 처리를 거쳐 황 성분을 제거하는 연료 개선 방법이 있고, 연소 전처리 방법으로 연소실 형상 개선, 배기 재순환, 연료 분사계 개선, 연료분사시기 지연, 연소실 형상 개조, 연소설비 개선 등이 있으며, 연소 후처리 방법으로는 배출가스 중에 포함된 아황산가스와 질소산화물(NOx)를 제거하기 위하여 스크러버를 사용한 흡수, 흡착, 촉매환원, 등의 방법이 있다.

자동차에서 배출되는 배출가스를 줄이는 규제에는 제작차 배출가스 규제 기준이 많이 적용되고 있는데 우리가 잘 알고 있는 EURO 기준이 그것이다. 한편, 선박에서도 배출가스를 줄이고자 하는 규제가 시행되고 있는데, 국제해사기구인 IMO(International Marine Organization)에서는 2016년부터 TIER 3 배출가스 규제를 적용하기로 하였으며 이것은 이전의 Tier 2 규제 기준에 비해 질소산화물을 80% 이상 저감해야만 한다[3-4].

TIER 3 배출가스 규제를 만족하기 위하여 질소산화물을 저감하여야 하는데, 암모니아나 요소를 환원제로 사용하여 SCR(Selective Catalytic Reduction) 촉매상에서 질소산화물을 질소로 환원시켜 제거하는 SCR(Selective Catalytic Reduction) 방법이 주로 사용되고 있다[15-17]. 선박유는 중질유분을 사용하는데, 중질유가 연소되면서 다량의 매연이 배출되며 또한 중질유분에는 황화합물의 함량이 높아 배출가스중 아황산가스의 농도가 매우 높게 된다. 따라서 SCR(Selective Catalytic Reduction) 후처리 장치를 사용하여 질소산화물을 줄이고자 하여도 고농도의 매연과 황산화물로 인하여 SCR 촉매 표면이 오염되어 SCR 촉매의 성능을 떨어뜨리게 되며 SCR 장치의 내구성을 현저히 떨어뜨리게 된다. 따라서 이와같은 단점을 극복하기 위하여 전처리 시스템으로 에멀전 연료를 사용하면 매연과 질소산화물을 낮추어 SCR 장치의 내구성을 증가시키고 질소산화물의 부하량도 줄여주는 일석이조의 효과를 거둘 수 있다[18-20].

2. 실험

2.1 바이오 오일의 제조

본 연구에서는 급속열분해 장치에서 분당 100g의 속도로 코코넛 폐기물을 급속열분해 반응기로 투입하여 산소가 없는 상태에서 600°C에서 급속열분해 시켜 생성된 탄화수소류와 수증기 등을 응축기를 통하여 응축시켜 수상생성물인 바이오 오일을 얻었다. 급속열분해 장치의 그림을 Fig. 1에 나타내었다.



Fig. 1. Biomass pyrolysis system.

2.2 유화연료의 제조

유화연료의 제조방법으로 본 연구에서는 물리적인 방법과 유화제를 사용한 화학적 방법을 사용하여 유화연료를 제조하였다. 선박유인 MDO

에 유화제를 첨가하여 용해시킨 후 수상생성물 상태의 바이오오일을 첨가하여, 교반기를 통하여 3~5분 동안 교반을 실시하였다. 그 후 균일한 혼합을 위하여 homogenizer를 사용하였으며 ultrasonic generator를 5분간 사용하여 W/O상의 바이오에멀전 연료를 제조하였다.

유화제로 사용된 물질은 다음과 같다. 3600 (Sorbitan monostearate, IC Chemical), SP80(Sorbitan monooleate, Dongnam Chemical Ind. Ltd), SP85(Sorbitan trioleate, Dongnam Chemical Ind. Ltd, IC Chemical), NP~NP4(Polyoxyethylene nonylphenol ether, ether derivatives, derivatives, IC Chemical)를 사용하였으며 2가지 이상의 유화제를 혼합하여 유화제를 사용하였다.

유화연료 제조에 사용된 기기로는 가열식 교반기, homogenizer(model: IKA Ultra-Turrax® T 18 basic)와 ultrasonic generator(model: Jeil Ultrasonic Co. Ltd JIW-1500T)이다.

제조방법은 Fig. 2에 나타내었으며, MDO 연료의 물성성분은 Table 1에 나타내었다. 그리고 유화연료의 물성을 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Property of marine diesel oil(MDO)

Test item	Unit	Property	Method
Net calorific value	J/g	41,060	KS M 2057:2006
Gross calorific value	J/g	43,670	KS M 2057:2006
Element analysis (H)	Weight %	11.51	ASTM D 5291:2010
Water (Distillationmethod)	Volume %	0.5	KS M ISO 3733:2008
Sulfur (High temperature method)	Weight %	0.15	KS M 2414:2006
Ash	Weight %	0.012	KS M ISO 6245:2003
Density(15°C)	Kg/m ³	923.6	KS M 2002:2006
Sediment	Weight %	0.06	KS M ISO 3755:2003
Copperplatecorrosion (100°C, 3h)	-	1	KS M 2018:2007
Flash point(Cleveland Open CupTester)	°C	104	KS M ISO 2592:2007

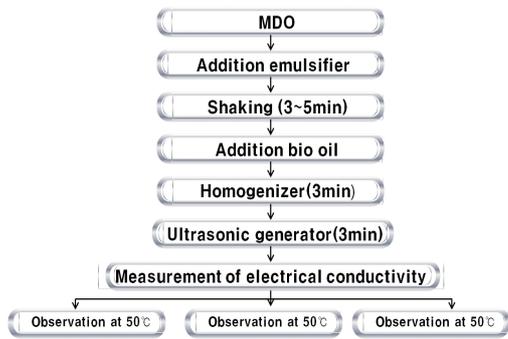


Fig. 2. Preparation process of emulsified fuel.

유화연료의 분산안정성에 대해서는 Tubiscan 장비를 사용하는데, 처음 3일 동안은 매 1시간 간격으로 back scattering을 스캐닝하고 다음 7일 동안은 매 6시간동안 back scattering을 스캐닝하여 10일동안의 분산 안정성을 측정하며 시료의 높이(X축)에 대해 각 스캔 시간에 따른 back scattering profile의 변화(Y축)를 reference mode의 그래프로 나타낸다. 여기서 reference mode란 첫 번째 BS(back scattering)(%) profile을 기준으로 하여 이때 얻어진 BS(%) profile을 0% back scattering으로 잡고 나머지 profile들의 변화를 상대적으로 이동시켜 나타낸 결과를 말한다. BS는 다음과 같이 (1)식과 (2)식에 의하여 구할 수

있다.

$$BS \approx \left[\frac{1}{l^*} \right]^2 \dots\dots\dots (1)$$

$$l^* = \left[\frac{2d}{3\Phi(1-g)Q_s} \right] \dots\dots\dots (2)$$

여기서, *BS* : Back Scattering,
*l** : Photon transport mean free path
g : asymmetry factor, Φ : concentration
Q_s : scattering effic, *d* : diameter

일반적으로 X축의 Bottom-Middle-Top의 범위는 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다.

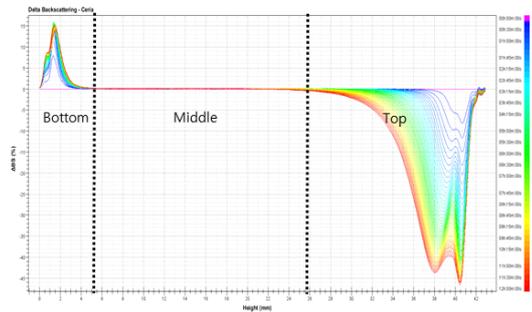


Fig. 3. Destabilization phenomena.

Table 2. Property of emulsion fuel

Test item	Unit	MDO-15	MDO-20	Method
Net calorific value	J/g	34,150	32,990	KS M 2057:2006
Gross calorific value	J/g	38,5770	36,050	KS M 2057:2006
Element analysis (H)	Weight %	11.62	11.66	ASTM D 5291:2010
Water (Distillationmethod)	Volume %	13.4	16.8	KS M ISO 3733:2008
Sulfur (High temperature method)	Weight %	0.11	0.10	KS M 2414:2006
Ash	Weight %	0.006	0.007	KS M ISO 6245:2003
Density(15°C)	Kg/m ³	927.1	929.7	KS M 2002:2006
Sediment	Weight %	0.06	0.07	KS M ISO 3755:2003
Copperplatecorrosion (100°C, 3h)	-	1	1	KS M 2018:2007
Flash point(Cleveland Open CupTester)	°C	84	86	KS M ISO 2592:2007

즉 불안정성 그래프로부터 시료를 넣은 앰플의 아랫부분의 BS를 그림에서 Bottom 부분으로 나타내고 앰플의 중간부분을 Middle로 나타내고, 앰플의 윗부분을 Top으로 표시하였다.

한편 수분을 함유한 에멀전연료는 연소시 배출 가스중 질소산화물을 줄여줄 수 있는데, 에멀전 연료가 매연과 질소산화물을 줄여주는 원리는 W/O(Water in Oil) 에멀전의 경우 물입자를 싸고 있는 기름입자가 연소실내에서 100℃ 이상이 되면 물이 기화하면서 부피가 팽창하여 물을 싸고 있던 기름입자를 미세하게 쪼개주어 연소를 활발하게 하여 매연을 줄여주게 되는데 이것을 미세폭발(micro explosion)이라 한다. 또한 물이 기화하면서 기화열을 빼앗아가므로 연소실 내의 온도를 낮추어 질소산화물 생성을 억제하여 질소산화물 배출을 감소시키게 된다[10-11]. 본 연구에서는 코코넛 폐기물을 열분해한 후 얻어진 바이오오일을 MDO(Marine Diesel Oil)와 15-20% 비율로 혼합한 후 유화시켜 만들어진 바이오에멀전 연료를 연소시켜 바이오에멀전 연료속에 W/O 형태로 에멀전화 시켜 바이오오일속의 수분이 기화하면서 연소실내의 기화열을 빼앗아가 연소온도를 낮춰줌으로써 질소산화물을 저감할 수 있도록 하였다.

2.3 유화연료의 연소 장비 및 분석기기

연소 장비로는 버스용 엔진에 MDO와 MDO + 바이오오일로 만든 유화연료를 연소하였으며, 11,000cc급 대형버스 엔진에 실시하였으며, 사용되어진 엔진 제원은 Table 3와 같다.

연소 장비의 제어장치는 engine dynamometer로 하였으며, 유화연료의 연소 시 배출되는 배출가스의 경우 FT-IR(Jasco Co.) 및 diaphragm pump를 사용하여 분석하였으며, FT-IR은 분해능 0.5~1cm, S/N Ratio는 30,000 : 1, high

intensity ceramic light source를 가진 제품이였다. 선박엔진의 매연은 디젤자동차의 입자상물질로 PM을 측정하는 것과는 달리 가시매연으로 smoke를 측정하므로 diaphragm pump를 사용한 여지반사식 smoke meter (MODEL : AVL415)를 사용하였다.

본 연구에서는 코코넛 폐기물을 열분해하여 얻은 수상생성물과 선박유로서 MDO를 유화제를 사용하여 유화시켜 바이오에멀전 연료로 만든 후 이 바이오에멀전 연료의 연소 특성에 대하여 알아보았다. 엔진동력계를 사용하여 출력과 rpm을 조절하면서 실험하였으며, 엔진동력계 사진은 Fig. 4에 나타내었다. 또한 엔진내에서 사용된 에멀전 연료의 배출가스를 측정하였다. 질소산화물은 AVL사의 SESAM FT-IR을 사용하였고, 매연은 diaphragm pump를 사용한 여지반사식 smoke meter(MODEL : AVL415)를 사용하여 측정하였다. 배출가스 측정 장치의 계략도를 Fig. 5에 나타내었다.



Fig. 4. Photograph of engine dynamo.

유화연료의 연소실험은 엔진다이내모미터로 전부하 영역 및 ND-13모드에서 실험을 진행하였고, 전부하 영역에서 rpm은 1500rpm, 2000rpm이며, 부하영역은 10%, 25%, 50%, 75% 100%이며, ND-13 모드에서의 rpm은 아이들링, 회전

Table 3. Specification of test engine

ITEMS	Specification
Fuel supply system	DI-injection(in-line)
Max power	240kW (340PS)
Max torque	1421N.m(145kg.m)
Fuel consumption	186g/kW.h (143g/PS.h)
Bore x Stroke	123(4.84) x 155(6.10)mm(in.)
Displacement	11.051 ℓ
Cylinders	6

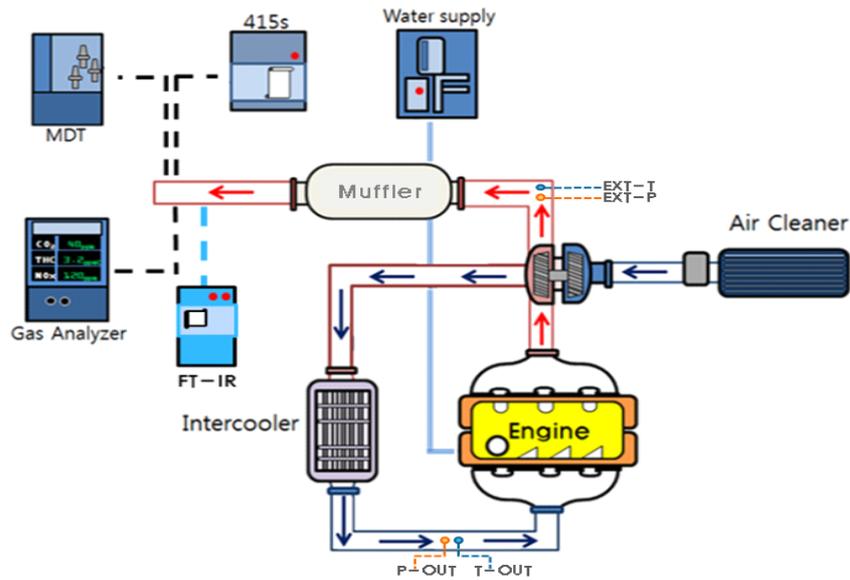


Fig. 5. Schematic of experiment systems.

수 A, 회전수 B, 회전수 C로 이루어지며, 여기서 회전수 A, B, C는 ND-13모드의 원동기 회전수 설정치가 된다. 부하영역은 10%, 25%, 50%, 75% 100%이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 MDO 유화연료의 안정성 실험

다음은 코코넛 폐기물에서 얻은 바이오오일을 각각 15, 20%를 MDO와 유화시킨 바이오에틸렌 연료의 안정성에 대하여 Turbiscan을 가지고 분석하였으며 30°C의 온도에서 각각 유화 안정성에 대하여 분석하였다. Fig. 6와 Fig. 7은 30°C에서 바이오오일 15%와 MDO를 유화시킨 시료 MDO-15와 바이오오일 20%와 MDO를 유화시킨 시료 MDO-20을 매 1시간 간격으로 Backscattering을 Scanning하여 3일 동안과 매 6시간 간격으로 7일간 총 10일간의 분산안정성의 변화를 분석한 그래프이다. 이 그래프는 X축을 시료의 높이로 나타내고 X축에 대해 Y축을 각 Scan 시간에 따른 Backscattering 구배의 변화를 -1% ~ 55%의 동일한 Scale로 나타내었다.

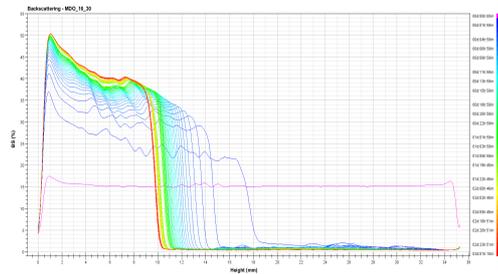


Fig. 6. Stability curve of MDO-15 at 30°C.

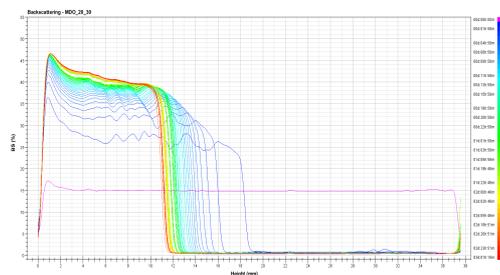


Fig. 7. Stability curve of MDO-20 at 30°C.

Fig. 6과 Fig. 7의 그래프에서 X축 높이를 Bottom - Middle -Top의 세부분으로 나누어 분석해 보면, Fig. 6과 Fig. 7 모두 Bottom 부분이 초기보다 상대적으로 농도가 증가하고 이 부분의

Back Scattering(%)이 증가하며 그래프의 Top 부분은 초기보다 상대적으로 농도가 감소하여 Back Scattering(%) 감소하는 것을 볼 수 있다.

응집현상은 기본적으로 시료 전체 높이에서 일어나므로 시료높이와 평행하게 BS가 증가 또는 감소하게 된다. 특히 Middle 부분에서 BS가 중첩이 일어나지 않아 폭이 넓은 그래프의 모습을 보여주게 된다. Fig. 6과 Fig. 7의 그래프에서 모두 Middle 부분의 중첩이 일어나 폭이 좁게 나타난 것으로 보아 침전에 의해 BS의 중첩이 생기지 않은 것을 보여준다. 따라서 이것은 침전 현상을 보여 주고 있다. 물의 비중이 MDO의 비중보다 높아 서서히 침전하는 것으로 볼 수 있다. Fig. 6과 Fig. 7 그래프의 Middle 부분에서는 입자가 침전되고 또 그 위에 침전되어 내려오는 입자가 있으므로 변화가 없이 시간에 따른 Profile이 중첩되었다. 응집(Aggregation) 현상이 일어나게 되면 그래프의 Bottom - Middle -Top 전체 부분에서 일어나므로 그래프의 Middle 부분에서 Back Scattering(%)의 변화가 크게 일어난다. Fig. 6과 Fig. 7 모두에서 Middle 부분에서 Back Scattering(%)의 변화가 없이 모두 중첩되기 때문에 응집에 의한 영향은 없는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 제조된 바이오에멀전 연료의 안정성 감소는 침전현상에 의해서 나타나는 것으로 볼 수 있다.

3.2 NOx 배출량 저감 효과

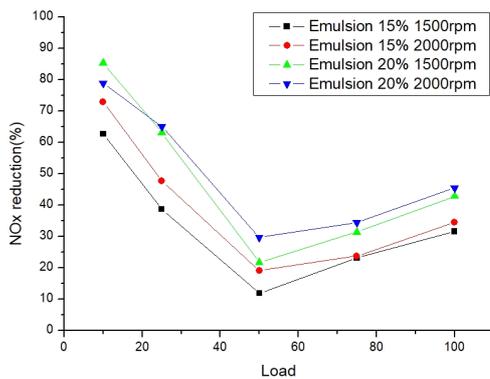


Fig. 8. NOx reduction on each load.

Fig. 8에 1,500rpm 및 2,000rpm 상태에서 부하를 변화시키며 이에 따른 NOx의 농도 저감율을 나타내었다. Fig. 8에서 보는 것과 같이

1500rpm에서 바이오오일 함유량 15% 및 20%의 경우 저부하 영역인 10%, 25% 부하에서는 높은 NOx 배출량 감소율을 보이고 있으나, 50% 이상 부하 영역에서는 감소율이 줄어드는 것으로 나타났다. 이것은 저부하 영역인 10%, 25% 부하에서는 NOx 배출량 감소율은 높지만 NOx 배출량 자체가 작아 ND-13모드 전체를 놓고 볼때 영향은 작은 것으로 판단된다. 그리고 엔진이 1,500rpm일 때 보다 2,000rpm인 경우가 NOx의 제거율이 높은 것으로 나타났다.

3.3 유화연료와 MDO의 연소온도 및 질소산화물 감소량 비교

Fig. 9과 Fig. 10은 각 부하영역별로 MDO와 바이오에멀전 연료의 배출가스 온도를 각각 1,500rpm과 2,000rpm에서 측정된 결과이다. 저부하 영역인 10% 부하영역에서는 1,500rpm에서 15%바이오에멀전 연료와 20% 바이오에멀전 연료에서 각각 28°C, 11°C과 2,000rpm에서는 15% 바이오에멀전 연료와 20% 바이오에멀전 연료에서 각각 35°C, 20°C 차이가 나며, 25% 부하영역에서는 15%바이오에멀전 연료와 20% 바이오에멀전 연료에서 각각 9°C, 10°C과 2,000rpm에서는 15%바이오에멀전 연료와 20% 바이오에멀전 연료에서 각각 10°C, 18°C 배출가스 온도 차이가 발생하여 바이오에멀전 연료를 사용한 경우가 MDO 사용한 경우 보다 더 낮게 나타났으며 이것은 Fig. 8에서 보는 것과 같이 높은 NOx 제거율을 나타냈다. 그리고 50% 부하영역에서는 배출가스의 온도차이가 거의 없었는데, Fig. 8에서 보는 것과 같이 제일 낮은 NOx 제거율을 보여주었다. 한편 고부하 영역에서는 15%바이오에멀전 연료와 20% 바이오에멀전 연료에서 각각 28°C, 11°C과 2,000rpm에서는 15%바이오에멀전 연료와 20% 바이오에멀전 연료에서 각각 35°C, 20°C 차이가 나며 이것은 바이오에멀전 연료를 사용하면바이오에멀전 연료 내 바이오오일에 함유된 수분이 100°C 이상에서 기화하면서 기화잠열을 빼앗아 가기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 9과 Fig. 10의 부하별 온도 그래프와 Fig. 8의 부하별 질소산화물 제거율 그래프를 비교해보면 바이오에멀전 연료를 사용하였을 경우 배출가스 온도가 낮아지므로 질소산화물의 평형농도가 낮아져 질소산화물 배출도 줄어드는 것으로 판단된다.

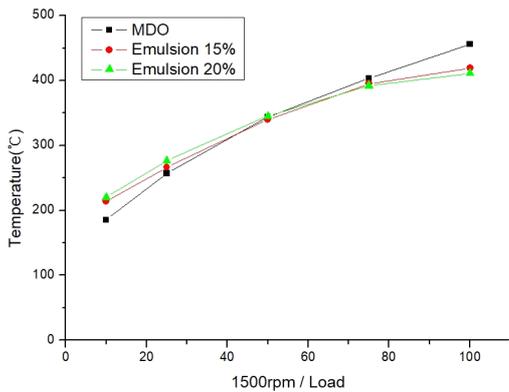


Fig. 9. Temperature changes on each ND-13 mode of 1,500rpm.

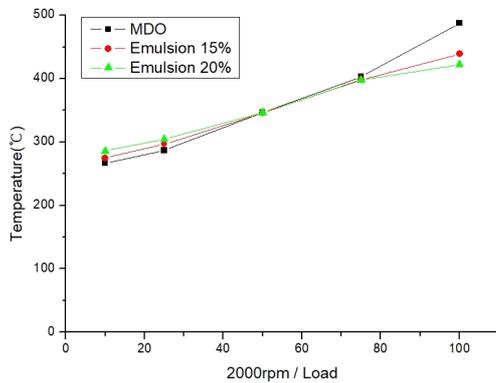


Fig. 10. Temperature changes on each ND-13 mode of 2,000rpm.

3.4 매연 저감 효과

Fig. 11에는 1,500rpm에서 부하별 매연 저감량을 나타내었다. 부하가 10%인 저 부하에서 MDO만 사용했을 때 보다 바이오에멀전 연료를 사용하였을 때에 오히려 매연 발생량이 많아졌다. 이것은 매우 낮은 저부하 영역에서 낮은 온도로 인하여 연소가 충분히 이루어지지 못했기 때문으로 판단된다. 그러나 25% 이상의 부하에서는 MDO만 사용했을 때에 부하 증가에 따라 매연 발생량이 감소하였으며 바이오에멀전 연료를 사용하였을 때 부하 증가에 따른 매연발생량이 더 감소함을 볼 수 있었다. 또한 바이오에멀전 연료 함유량이 높을수록 매연발생량은 더 감소함을 나타내는데, 이것은 바이오에멀전 연료 중에 포함된 수분이 100°C 이상에서 기화하면서 미세폭발하여 수분이 함유된 바이오오일을 감싸고 있는 MDO

입자를 잘게 쪼개어 주어 연소를 활발하게 도와 주어 매연발생량이 줄어든 것으로 판단된다.

Fig. 12에는 2,000rpm에서 부하별 매연 저감량을 나타내었다. 부하가 10%인 저 부하에서 MDO만 사용했을 때 보다 바이오에멀전 연료를 사용하였을 때에 Fig. 12와 동일하게 오히려 매연 발생량이 많아졌다. 이것은 Fig. 11에서와 같이 매우 낮은 저부하 영역에서 낮은 온도로 인하여 연소가 충분히 이루어지지 못했기 때문으로 판단된다. 그러나 25% 이상의 부하에서는 Fig. 11과 같이 MDO만 사용했을 때에 부하 증가에 따라 매연 발생량이 감소하였으며 바이오에멀전 연료를 사용하였을 때 부하 증가에 따른 매연발생량이 더 감소함을 볼 수 있었다. 또한 바이오에멀전 연료 함유량이 높을수록 매연발생량은 더 감소함을 나타내는데, 이것은 Fig. 11에서와 같이 유화연료 중에 포함된 수분이 100°C 이상에서 기화하면서 미세폭발하여 수분이 함유된 바이오오일을 감싸고 있는 MDO 입자를 잘게 쪼개어 주어 연소를 활발하게 도와주어 매연발생량이 줄어든 것으로 판단된다.

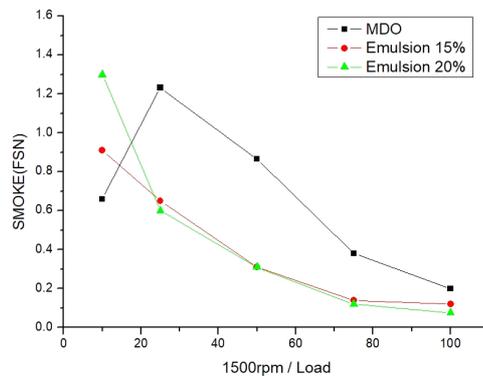


Fig. 11. Smoke emission of each fuel of 1,500rpm.

Fig. 13에는 100% 부하 영역에서 질소산화물과 매연, 출력의 저감율을 비교하여 나타내었다. 바이오오일 함유량이 높을수록 매연의 저감율이 높아지며 질소산화물의 저감율도 높아지는 것으로 나타났다. 이것은 바이오오일의 함량이 높을수록 바이오오일에 함유된 수분 함량도 높아져서 수분이 기화하면서 기화잠열을 빼앗아 가서 연소실내의 온도를 낮추어 질소산화물 배출을 억제한 것으로 판단되며, 바이오오일중에 포함된 수분의

미세폭발로 MDO를 작은 입자로 쪼개어 연소활동을 도와 매연발생량이 줄어드는 것으로 판단된다. 2,000rpm에서 100% 부하일때에 바이오오일이 20% 함유된 유화연료의 매연저감율은 74%로 매우 높은 매연 저감율을 나타내었다. 유화연료의 출력력을 보면 바이오오일의 함유량이 높은 바이오에멀전 연료에서 출력 저하가 더 크게 나타났는데, 이것은 바이오오일 함유량 증가에 따라 수분함량도 증가하여 전체 발열량이 줄어들면서 출력이 감소하는 것으로 나타났으며 바이오에멀전 연료 사용량에 비례하여 출력 감소가 나타났다.

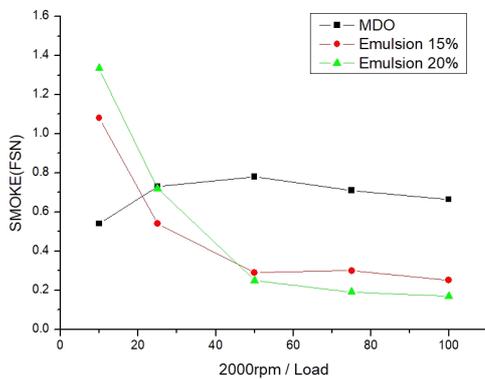


Fig. 12. Smoke emission of each fuel of 2,000rpm.

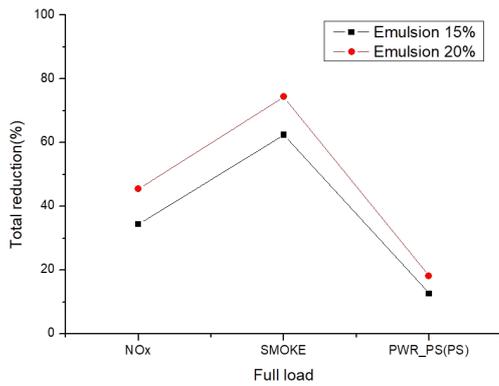


Fig. 13. Total reduction rate on each emulsion fuel.

3.5 유화연료의 연소 특성

코코넛 폐기물로부터 얻은 바이오오일을 MDO와 유화시켜 유화연료를 연소시키면서 나타나는 여러 가지 특성들을 분석하였다. 바이오에멀전 연

료를 연소시키면 연소실내의 온도와 배출가스 그리고 출력에 영향을 주는 것으로 나타났다. Fig. 9와 Fig. 10에서 보듯이 부하의 변동에 의한 배출가스의 온도를 보면 MDO에 비해 바이오에멀전 연료를 사용했을 때 배출가스가 낮아지는 것을 알 수 있었으며, 이것은 바이오오일중에 함유된 수분이 기화하면서 기화잠열을 빼앗아가 연소실내의 온도를 낮추어 준다는 것을 확인 하였다.

한편 배출가스중 질소산화물에 대하여서는 Fig. 8에서 나타낸 것과 같이 바이오에멀전 연료를 사용했을 때 질소 산화물 배출이 줄어들었는데 이것은 Fig. 9와 Fig. 10과 관련이 있으며 유화연료에 함유된 수분의 영향으로 연소실내의 온도가 낮아져 질소산화물의 생성을 억제하는 것으로 나타났다.

배출가스중 매연에 대하여 살펴보면 Fig. 11와 Fig. 12에서 보여주듯이 아주 낮은 10% 부하 영역을 제외하고는 부하가 증가함에 따라 바이오에멀전 연료의 매연 발생량이 감소함을 확인할 수 있었다. 이것은 본 실험에서 제조한 W/O형태의 유화연료에 있던 수분이 연소실내에서 미세폭발을 일으켜 감싸고 있던 MDO 연료를 잘게 쪼개어 주어 활발한 연소를 도와주어 매연을 감소시키는 것으로 판단되는데, 부하가 50% 이상에서는 50% 이상의 우수한 매연 저감 효과를 나타내어 대기질 개선에 상당한 도움을 줄 것으로 예상된다.

바이오에멀전 연료 연소가 출력에 미치는 영향은 Fig. 13에 나타내었는데, 바이오오일 함유량이 증가 하면 수분함량도 증가하여 전체 발열량이 줄어들게 되므로 출력이 바이오에멀전 연료 사용량에 비례하여 감소하는 특성을 나타내었다.

코코넛 폐기물을 비롯한 많은 종류의 바이오매스로부터 연료를 만드는 공정들이 지속적으로 개발되어 오고 있는데, 직접 사용한 연료를 만들기 위해서는 수분을 최대한 제거해야 하고 이렇게 제거된 수분은 기화시켜 공기 중으로 날려 보내거나 수처리를 하여야 하는데 그 과정에서 많은 비용이 들게 된다. 따라서 본 연구에서는 바이오오일을 수상오일 형태로 만들어 수분을 제거하지 않고 기존의 중질유분과 유화시켜 바이오에멀전 연료로 사용하면 많은 비용을 들이지 않고 경제적으로 처리할 수 있으며 또한 배출가스도 줄어들게 되므로 바이오매스를 처리하는 하나의 대안이 될 수 있을 것으로 기대된다.

또한, 선박에 적용되는 Tier 3 규제 등 더 강

화되는 환경규제에 대응하기 위한 대안으로 가능성이 있는 것으로 사료된다. 특히 선박용 연료로 사용되는 중질유에서 배출되는 매연과 질소산화물을 제거하는데 도움을 줄 수 있어서 선박용 연료로 바이오에멀전 연료를 사용하는 것도 가능할 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서 MDO와 코코넛 폐기물로부터 얻은 바이오오일을 유화시켜 제조된 바이오에멀전 연료의 연소특성을 알아보기 위하여 디젤엔진에서 연소하여 배출가스와 출력에 미치는 영향 등을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제조된 바이오에멀전 연료는 유중수적형(W/O)이었으며 유화연료의 안정성은 침전에 의해서 영향을 받는 것으로 나타났다.
2. 바이오에멀전 연료에 함유된 수분의 영향으로 연소실내의 온도가 낮아져 질소산화물의 생성을 억제하는 것으로 나타났다.
3. 본 실험에서 제조된 W/O형태의 바이오에멀전 연료에 있던 수분이 연소실내에서 미세폭발을 일으켜 감싸고 있던 MDO 연료를 잘게 쪼개어 주어 활발한 연소를 도와주어 매연을 감소시키는 것으로 나타났다.
4. 바이오에멀전 연료에 함유된 수분의 영향으로 수분이 기화하면서 기화잠열을 빼앗아가서 연소실내의 온도가 낮아져 질소산화물의 생성을 억제하는 것으로 나타났다.
5. 바이오오일 함유량이 증가 하면 수분함량도 증가하여 전체 발열량이 줄어들게 되므로 출력이 바이오에멀전 연료 사용량에 비례하여 감소하는 특성을 나타내었다.

이상의 결과들을 고찰해 볼 때 선박용 연료로 사용되는 중질유에서 배출되는 매연과 질소산화물을 제거하는데 도움을 줄 수 있어서 선박용 연료로 바이오에멀전 연료를 사용하는 것도 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 2017년도 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었습니다.

References

1. U.S. Environmental Protection Agency, Assessments and Standard Division, "In-Use Testing Program for Heavy-Duty Diesel Engine and Vehicles—Technical Support Document; EPA 420-R-05-006," U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA, (2005).
2. Herdzyk, J. Emissions from marine engines versus IMO certification and requirements of Tier 3. *J. KONES*, Vol.18, p.161-167, (2011).
3. A.U. Zaman, "Comparative Study of Municipal Solid Waste Treatment Technologies Using Life Cycle Assessment Methods," *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, Vol.7, No.2, p.225-234, Springer, (2010).
4. Jeon E., Han S., "Analysis of Bio Energy & Strategy," Vol.1, No.2, August, (2014).
5. REN21, "Renewables 2013 Global Status Report," (2013).
6. Ministry of Knowledge Economy, "Biomass Strategy Roadmap," (2012).
7. Ministry of Knowledge Economy, "The 3rd Renewable Energy Technology Development and Utilization. Supply Master Plan," (2013).
8. Andrea, B., Renxian, L., Konstantinos, B., "Influence of Water-Diesel Fuel Emulsions and EGR on Combustion and Exhaust Emissions of Heavy Duty Diesel Engines Equipped with Common-Rail Injection System," p.3146, Elsevier, (2003).
9. S. Hironori, U. Koji, "Feasibility Study on the Utilization of Water-in-Oil Type Emulsified Fuels to Small DI Diesel Engines," p.9602, Elsevier, (2011).

10. M. Kim, "A Study of Emulsion Fuel of Cellulosic Biomass Oil," *J. Korean Oil Chem. Soc.*, Vol.33, No.4, December, p.836-847, (2016).
11. M. Kim, J. Oh, C. Lee, "Study on Combustion and Emission Characteristics of Marine Diesel Oil and Water-In-Oil Emulsified Marine Diesel Oil," *Energies*, Vol.11, No.7, (2018).
12. S. M. Oh, "low-emission Diesel Engines using Fuel Emulsion Technology," *Machinery and Material*, 12th ed., Vol.2, p.47-50, (2000).
13. P. Becher, "Encyclopedia of Emulsion Technology", Vol.1, p.94-127, M. Dekker Inc, (1983).
14. J. Kim and H. Kim, "Emulsion Viscosity with Oil Polarity and Interpretation by Organic Conceptual Diagram," *J. Korean Oil Chem. Soc.*, Vol.31, No.4, December, p.623-627, (2014).
15. M. Koebel, M. Elsener, M. Kleemann, "Urea-SCR: A promising technique to reduce NO_x emissions from automotive diesel engines," *Catal. Today*, Vol.59, p.335-346, (2000).
16. F. Birkhold, U. Meingast, P. Wassermann, O. Deutschmann, "Analysis of the Injection of Urea-Water-Solution for Automotive SCR DeNO_x-System; Modeling of Two-Phase Flow and Spray/Wall-Interaction," SAE Technical Paper 2006-01-0643, SAE International, Warrendale, PA, USA, (2006).
17. F. Birkhold, U. Meingast, P. Wassermann, O. Deutschmann, "Modeling and simulation of the injection of urea-water-solution for automotive SCR DeNO_x-system," *Appl. Catal. B*, Vol.70, p.119-127, (2007).
18. A. Lif, K. Holmberg, "Water-in-diesel emulsions and related systems," *Adv. Colloid Interface Sci.*, Vol.1, p.123-126, (2006).
19. W.B. Fu, I. Y. Hou, L. Wang, F. A. Ma, "A unified model for the micro-explosion of emulsified droplets of oil and water," *Fuel Process. Technol.*, Vol.79, p.107-119, (2002).
20. H. Watanabe, Y. Matsushita, H. Aoki, T. Miura, "Numerical simulation of emulsified fuel spray combustion with puffing and micro-explosion," *Combust. Flame*, Vol.1, p.839-852, (2010).