

## 목본계 바이오매스오일의 에멀전 연료화 연구

김문찬<sup>†</sup>

청주대학교 환경공학과

(2016년 9월 26일 접수; 2016년 12월 28일 수정; 2016년 12월 29일 채택)

### A Study of Emulsion Fuel of Cellulosic Biomass Oil

Moon-Chan Kim<sup>†</sup>

*Department of Environmental Engineering, Cheongju University*

*(Received September 26, 2016; Revised December 28, 2016; Accepted December 29, 2016)*

**요약** : 본 연구는 바이오매스를 열분해하여 생성된 수상오일(water soluble oil)을 얻었다. MDO (Marine Diesel Oil)와 수상오일을 유화시켜 생성된 에멀전 연료의 특성과 배출가스를 연구 하였다. 바이오매스로는 톱밥을 사용하였고 500 °C에서 열분해하여 생성된 물과 탄화수소를 응축시켜서 수상오일을 얻었다. 수상오일을 MDO에 10~20% 까지 혼합 후 유화시켜 에멀전 연료를 만들었다. 엔진 배출가스 측정엔 엔진 dynamometer로 실시하였다. 유화연료는 연소실내에서 미세폭발을 일으켜 연료를 잘게 쪼개어 주어 smoke를 감소시킨다. 그리고 물이 연소실내의 기화열을 빼앗아 연소실 내부의 온도를 낮추어 NO<sub>x</sub> 생성을 억제하는 효과를 갖는다. ND-13모드의 각 모드별 배출가스온도가 MDO에 비해 유화연료를 사용했을 때 낮게 나온 것으로 뒷받침 될 수 있었다.

유화연료의 함수율이 증가함에 따라 NO<sub>x</sub>와 smoke의 배출량은 줄어들었으며, 출력도 함수율 증가에 따라 유화연료 자체의 발열량 감소로 인하여 줄어든 것으로 판단된다.

ND-13모드에서 MDO 유화연료를 시험한 결과 바이오매스오일 함유량 20%인 유화연료의 NO<sub>x</sub> 감소량은 약 25%, smoke의 총감소량은 약 60%, 그리고 약 15%의 출력손실을 확인하였다.

**주제어** : MDO, 유화, 유화연료, 질소화합물, 매연

**Abstract** : Water soluble oil was obtained by pyrolysis of biomass. The characteristics of emulsified fuel by mixing water soluble oil and MDO(marine diesel oil) and engine emissions were studied with engine dynamometer. Saw dust was used as biomass. Water soluble oil was obtained by condensing of water and carbon content with pyrolysis of saw dust at 500°C. Emulsion fuel was obtained by emulsifying MDO and water soluble oil by the water soluble oil mixing ratio of 10 to 20% of MDO. Exhaust gas detection was performed with engine dynamometer. While combustion, micro-explosion took place in the combustion chamber by water in the emulsion fuel, emulsion fuel scattered to micro particles and it caused to smoke reduction. The heat produced

<sup>†</sup>Corresponding author  
(E-mail: mckim@cju.ac.kr)

from water vapour reduce the temperature of internal combustion chamber and it caused to inhibition of NO<sub>x</sub> production. It can be verified by the lower exhaust temperature of each ND-13 mode using emulsion fuel than that of MDO fuel. The NO<sub>x</sub> and smoke concentration were reduced by increasing water soluble oil content in the emulsion fuel. The power also decreased according to the increment of water soluble oil content of emulsion fuel because emulsion fuel has low calorific value due to high water content than MDO. As a result of ND-13 mode test with 20% bio oil content, it was achieved 25% reduction in NO<sub>x</sub> production, 60% reduction in smoke density, and 15% reduction in power loss.

*Keywords* : MDO, biomass oil, emulsion, emulsified fuel, NO<sub>x</sub>, smoke

## 1. 서론

바이오매스의 에너지 활용기술은 1990년대에 지구온난화, 대기오염 등 환경문제가 범지구적 이슈가 되면서 청정 바이오에너지의 보급 필요성과 상용화 연구가 진행되기 시작하였고, 2000년대 들어 다시 고유가가 지속되고 온실가스의 저감 필요성 때문에 미국과 EU를 중심으로 바이오에탄올, 바이오디젤 등 바이오연료의 생산과 보급이 활발히 전개되어 왔다.

바이오매스 연료의 이용수요는 선진국과 개발도상국을 포함하여 꾸준히 있어 왔으며 그동안 석유가격의 급격한 상승이 있을 때마다 다른 신재생에너지원과 함께 관련 시장의 수동적인 변화가 있어 왔다. 그리고 최근 온실가스로 인한 지구온난화 문제, 신재생에너지 사용 촉진을 새로운 경제동력 창출의 주요 수단으로 인식함에 따라 바이오매스를 이용한 에너지 생산에 대한 시장의 수요는 지속적으로 증가하고 있다.

국제에너지기구인 IEA(International Energy Agency)의 통계에 따르면 최근에도 바이오매스는 전 세계 에너지원의 4% 이상을 담당하고 있으며 IEA의 Blue map 시나리오에 따르면 2050년에는 바이오매스(폐기물 포함)의 사용량이 석탄, 오일, 천연가스 각각의 사용량을 넘어설 것으로 전망된다.

### 1.1. 해외 시장현황 및 전망

최근 중국의 급격한 성장에 따른 전 세계 에너지 선점 경쟁, 중동의 불안으로 인한 석유공급 불안정과 국가의 에너지 믹스에 대한 다양화 및 녹색에너지의 개발 필요성이 대두됨에 따라서 바이오매스 에너지화 기술의 중요성이 전 세계적으로

로 급속히 부각되고 있다.

바이오매스 및 폐기물의 생산량은 2000년 이후 지속적으로 증가하여 왔으며, 이러한 증가세는 앞으로도 계속될 것으로 전망되며, 북미시장의 경우, 바이오매스 가스화 기술은 2011년 이후 연평균 17.7% 성장세를 나타내서 2017년에 약 10억 달러 규모의 매출이 있을 것으로 예상되고, 바이오매스 열분해 기술의 경우, 2011년 이후 연평균 8.8%의 성장률을 나타내서 2017년에는 약 60억 달러 규모의 매출이 전망되고 있다[1].

Fig. 1은 미국의 발전부분에 있어 신재생에너지 Mix를 나타낸 것으로 이미 그 활용이 포화된 수력을 제외하고 나면 바이오매스의 비율이 급격히 증가해 2030년에는 31.7%로 가장 큰 부분을 담당하는 것으로 예측되고 있다. 따라서 바이오매스 연료 관련 시장의 급격한 성장이 예상되며, 특히 고에너지밀도를 가지는 바이오매스 연료가 보다 높은 경제성을 가지므로 이와 관련된 시장이 크게 확대될 것으로 예상된다[2].

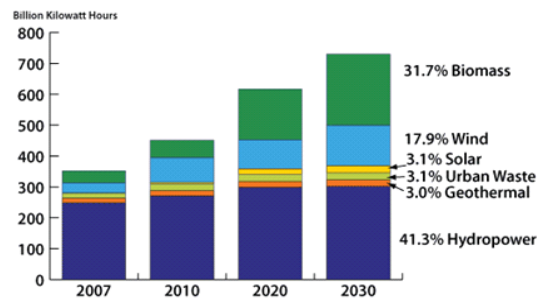


Fig. 1. Renewable energy mix for power generation in U.S.A.

그동안 상업적인 바이오오일 생산은 주로 미

국, 캐나다 등의 북미와 영국, 네덜란드, 독일 등의 유럽 지역을 중심으로 이루어져 왔으며 관련 핵심 기술을 보유한 기업도 북미와 유럽을 중심으로 분포하고, 아시아 지역에서는 최근 에너지 수요가 크게 증가하고 있는 중국이 활발한 연구 투자를 지속하고 있다.

최근 유럽에서 건설되고 있는 바이오오일 생산 설비는 생성된 바이오오일을 연소시켜 발전과 열 공급을 동시에 수행할 수 있는 설비를 갖추고 있으며, 바이오오일 개질을 포함한 미래 응용기술 개발 연구는 많은 대학 및 연구소를 중심으로 수행되고 있다.

고체 연료 부분을 살펴보면, 목질계 바이오매스를 이용한 펠릿 생산이 국내외적으로 상용화 되어 있고, 전 세계적으로 2010년 기준 펠릿 생산량은 약 1,600만 톤으로 추정되며, 스웨덴, 오스트리아, 독일 등을 중심으로 한 유럽지역에서 전체 생산량의 67%(약 1,072만 톤), 캐나다를 중심으로 한 북미지역에서 30%(480만 톤), 기타 아시아를 중심으로 3% 정도를 차지하고 있다[3].

**1.2. 국내 시장현황 및 전망**

국가 에너지기본계획(2008.8)에 따르면 2030년 까지 석유 의존도 33%, 신재생에너지 보급률 11% 목표를 수립하고 이를 달성하기 위한 에너지 정책을 추진하고 있으며, 지식경제부가 발표한 제3차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본 계획(2009~2030)에 의한 신·재생에너지 공급 목표상의 바이오에너지는 2008년부터 2030년 까지 기간 중 연평균 증가율 14.6%를 적용하여, 2030년도에는 기준년도인 2008년도 대비 2000% 증가한 10,357천 toe를 공급할 계획에 있다. Table 1에 3차 기본 계획에 의한 신·재생에너지 공급 목표를 나타내었다[4].

2012년 시작된 신재생에너지 의무 사용제(RPS, Renewable Portfolio Standards)에 따르면 에너지 공급/판매 사업자의 총 공급/판매량의 일정비율을 신·재생에너지로 공급/판매하도록 의무화 하도록 하고 있으며 에너지 공급/판매 사업자는 신·재생 에너지를 자체생산하거나, 다른 신·재생에너지 공급자로부터 구매하여 의무를 이행하고, 공급/판매비용에 전가하여 비용을 회수하게 되어있다.

Table 1. Supply goal of renewable energy by 3rd basic plan

(Unit : 1,000 TOE)

Contents	2008	2010	2015	2020	2030	Increasing rate
Bio	518 (8.1)	987 (13.0)	2,210 (18.8)	4,211 (24.0)	10,357 (31.4)	(14.6)
Waste	4,688 (73.7)	5,097 (67.4)	6,316 (53.8)	7,764 (44.3)	11,021 (33.4)	(4.0)
1st energy (Mil. TOE)	247	253	270	287	300	(0.9)
Percentage	2.58%	2.98%	4.33%	6.08%	11.0%	

Table 2. Weight of RPS in Korea

RPS contents	Weight	RPS energy and basic install type
Renewable energy	0.25	IGCC, Artificial gas
	0.5	Waste, Landfill gas
	1.0	Hydraulic, Overland wind power, Bio energy, RDF power plant Waste gasification power plant, Tidal power plant(with seawall)
	1.5	Cellulosic biomass power plant, Offshore wind power(connection distance below 5km)
	2.0	Offshore wind power(connection distance over 5km), Tidal power plant(without seawall), Fuel cell

Table 2의 RPS 적용 가중치에 따르면 목질계 바이오매스 전소 발전이 1.5의 가중치를 받는 것으로 나타나 있다.

이와 같이 목질계 바이오매스 이용 발전은 RPS 가중치 1.5로 해상풍력, 조력 및 연료전지 등을 제외하고 가장 큰 가중치를 가지고 있으며 이에 따라 국내 RPS 대상기업들의 바이오매스 연료에 대한 관심이 매우 높아지고 있는 현실이다.

## 1.2. 기술현황 및 전망

바이오매스 자원을 열화학적 공정에 의해 화석 연료를 대체할 에너지로 변환시키는 기술에는 처리온도 및 발생하는 에너지 형태에 따라 크게 직접연소법(direct combustion), 열분해법(pyrolysis), 가스화 공정(gasification)과 BTL(Biomass to Liquid) 공정으로 구분된다.

이 중 열분해 공정은 산소가 없는 상태에서 바이오매스 자원을 열로 분해하여 가스, 액상의 바이오오일, 그리고 고형분인 차(char)로 변환시켜 주는 공정을 말하며, 주로 액상의 바이오오일 생산을 목적으로 설계되었다.

열분해공정은 1990년대 유럽의 국가들을 중심으로 연구가 꾸준히 진행되어왔으며, 현재 북미 지역, 브라질, 동남아시아와 남아프리카 공화국 등 바이오매스 생산량이 높은 국가를 중심으로 급속열분해 공정의 상용화를 시도하고 있으며, 최근 중국이 산업 분야에서 열분해공정을 통하여 바이오오일을 생산하고 있다.

2000년대 이후 바이오매스 열분해 관련된 사업은 꾸준한 성장을 보여 왔으며, 최근 유럽에서 건설되고 있는 바이오오일 생산설비는 원천기술을 보유한 여러 기업들의 설비가 증가하고 있으며, 향후 바이오오일 이용 시장이 크게 확대될 것으로 전망된다.

바이오매스 열분해로 생성된 바이오오일은 수분함량이 많고 그대로 연소할 경우 연소가 어려우며 매연 증가 등 배출가스의 증가로 이것에 대한 해결방법으로 유화연료로 만들어 배출가스를 줄이고자 시도하였다.

본 연구에서는 바이오매스로 톱밥을 사용하고 이것을 열분해하여 생성된 바이오오일을 MDO(Marine Diesel Oil)과 유화시켜 유화연료로 만들어 연소하면서 연소특성과 배출가스 특성을 연구하였다.

배출가스의 제거 방법은 크게 2가지로 분류가

된다. 연료를 사용하기 전에 일정 처리를 거쳐 황 성분이나 인체에 해로운 배출가스를 배출하는 금속분 등의 제거, 연소설비 개선, 연료분사시기 지연, 연소실 형상 개조, 연료분사계 개선, 배기 재순환, 물 분사법, 디젤유-물의 유화를 이용한 유화연료사용 등의 전처리방법과 배출가스 중에 포함된 NOx를 제거하는 후처리방법으로서 촉매 분해, 촉매환원, 흡수, 흡착 등의 후처리방법이 있다.

후처리 방법 중 가장 많이 사용되어지고 있는 SCR(Selective Catalytic Reduction)과 같은 후처리장치를 사용하여 질소산화물을 줄이고자 하여도 선박유의 경우 높은 황화합물로 인하여 배출가스 중에 매연과 황산화물질과 질소산화물질이 다량 배출되기 때문에 SCR의 내구성이 현저히 떨어지게 되므로 연료의 전처리 과정이 필요하다 [5].

반면, 대체연료 기술은 기존 엔진에 적용하기 위하여 출력저하, 부식성, 연료 점도 등과 같은 단점을 개선시키기 위한 연구가 활발하게 진행 중이다. 대체연료 기술 중 에멀전 연료는 경유와 같은 기존 연료로부터 손쉽게 구할 수 있고, 풍부한 water와 emulsifier(유화제)를 일정 비율로 첨가 및 혼합한 연료이다. 또한 함수 연료로서 연소과정 중 water의 기화에 기인한 증발 잠열 흡수로 인하여 연소실내 연소온도 저하와 급격한 증발에 의한 미소폭발(micro-explosion)로 인하여 연료의 미립화를 도모할 수 있다. 이에 따라 NOx, SO<sub>2</sub>, Soot을 동시에 저감할 수 있다. 이 외에도 기존의 엔진 기술, 엔진 신 연소 기술 및 후처리 기술과 달리 추가적인 장치가 필요하지 않으며, 별도의 개조 없이 기존 엔진에 사용이 가능한 장점도 있으므로 이에 관한 연구가 주목 받고 있다[5-6].

본 연구는 선박유로 사용되는 MDO를, 유화제를 이용하여 에멀전 연료로 개선하여 사용하였을 경우, 에멀전 연료의 연소 특성과 출력에 대하여 알아보았다. 엔진동력계를 사용하여 출력을 측정하였으며, 엔진동력계 사진을 Fig. 1에 나타내었다. 또한 엔진연소 실험을 통하여 배출되는 NOx는 AVL사의 SESAM FT-IR을 사용하였고, smoke는 diaphragm pump를 사용한 여지반사식 smoke meter(MODEL : AVL415)를 사용하여 각각 측정하였으며, 장치의 계략도를 Fig. 2에 나타내었다.

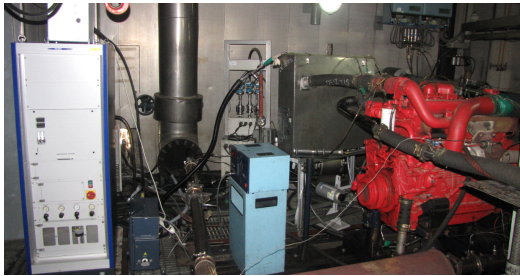


Fig. 1. Photograph of engine dynamo.

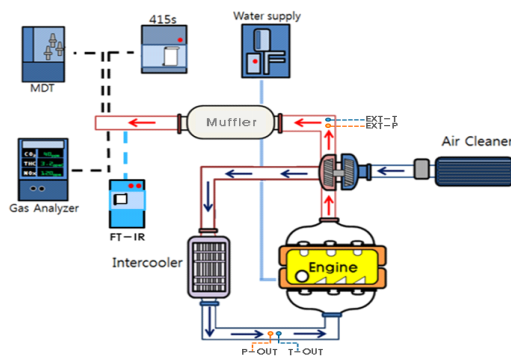


Fig. 2. Schematic of experiment systems.

**1.3. 바이오매스 열분해**

바이오매스는 매우 큰 잠재력을 가지고 있는 신재생에너지로서 생성물로는 수상생성물(water soluble product)과 차(char), 기상생성물로 탄소 3개 이하의 탄화수소류와 일산화탄소, 수소등이 있다[1-4]. 열분해 반응은 산소가 없는 상태에서 진행되며 보통 500℃ 전후의 온도에서 진행되고 기체상태의 생성물을 응축시킨 후에는 갈색 또는 짙은 회색의 수상생성물이 얻어진다. 수상생성물의 높은 수율을 얻기 위해서는 바이오매스를 빨리 일정온도 이상 도달하게 하여야 하며, 짧은 접촉시간과 차(char)의 빠른 분리와 기상생성물의 완벽한 응축이 필요하다. 유동층 반응기는 빠른 열전달을 가능하게 한다. 따라서 급속 열분해 반응기로 버블유동층 반응기와 순환유동층 반응기가 사용된다. 열분해된 액상생성물은 물에 녹는 수상생성물(water soluble product)과 물에 녹지 않는 비수상생성물(water insoluble product)로 구분되며, 주로 리그닌 물질이 여기에 속하며, 물에 녹지 않는 물질은 디클로로메탄(dichloromethane)으로 추출할 수 있다. 물에 녹는 수상생성물(water soluble product)은 물과

sugar type compound, 산, 알데히드류, 케톤류, 파이란(pyran)과 퓨란(furan)등이다[7].

**1.4 유화연료 제조방법**

어떤 액체 속에 그것과 잘 섞이지 않는 다른 액체를 작은 낱알로 분산시켜 젓 모양의 액체로 만드는 일, 또는 분산된 그 상태를 유화(乳化, emulsion)라 한다.

일반적으로 유화를 큰 분류로 나누게 되면 2가지 형태로 분류가 되며, 유화의 형을 결정하는 것은 유화제의 종류로서, 친수성 유화제는 수상이 분산매가 되는 O/W 에멀전이, 친유성 유화제는 유상이 분산매가 되는 W/O 에멀전이 만들어진다[8-10].

일반적인 유화의 제조방법은 2분류로 나누어지며, 첫 번째는 물리적 방법이며, 두 번째는 화학적 방법이다.

물리적 방법으로는 제조 시에 교반, 난류혼합, 진동, 초음파, 분사, 충격등의 방법을 사용한다. 계면활성제를 사용하지 않기 때문에 제조단가가 저렴하다. 또한 쉽게 제조가 가능하다는 장점이 있다. 이로 인해 대량제조에 용의하나, 쉽게 응집되어 분리가 일어난다.

화학적 방법의 경우 계면활성제를 사용하는 방법으로 HLB(Hydrophilic Lipophilic Balance)가 맞을 경우 쉽게 유화가 가능하지만 적당한 계면활성제 제조와 대량제조에 어려움이 많다. 물리적 방법과 화학적 방법을 병행하는 것이 단일 방법으로 제조하였을 시 보다 유화연료의 전체적인 미립화와 안정성을 더 높게 만들 수 있다 [11-12]. 한편 화학적 방법에 의한 에멀전을 만들 경우 오일의 극성에 따라 에멀전의 점도가 변하게 되는데 에멀전의 점도는 에멀전의 상의 유지에도 영향을 끼치는 것으로 보고되고 있다[13].

**2. 실험**

**2.1 바이오 오일의 제조**

본 연구에서는 바이오매스 재료로 톱밥을 사용하여 Fig. 3의 열분해장치에서 반응시켜 수상생성물인 바이오오일을 얻었다. 톱밥이 스크류를 통하여 분당 100g의 속도로 열분해 반응기로 투입되면 열분해 반응기에서 산소가 없는 상태에서 50 0℃에서 열분해가 일어나며, 기화된 수증기와 탄화수소 성분중에 탄소 4개 이상의 물질들이 응축

기를 통하면서 응축되어 수상생성물인 바이오오일이 생성된다.



Fig. 3. Biomass pyrolysis system.

**2.2. 유화연료의 제조**

본 연구에서는 유화연료의 제조방법은 물리·화학적 방법을 이용하여 연료를 제조하였다. 선박유에 유화제를 첨가하여 용해시킨 후 물을 첨가하여, 교반기를 통하여 3~5분 동안 교반을 실시하였다. 그 후 homogenizer를 통하여 균일혼합을 이룬 후에 ultrasonic generator를 이용하여 유화연료를 제조하였다.

제조 시 사용되어진 원료로는 선박유, 바이오오일 외에 유화제가 사용되어졌다. 사용되어진 유화제의 경우 3600(Sorbitan monostearate), 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 단일 또는 2가지 이상의 유화제를 혼합하여 유화제를 사용하였다.

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

제조방법은 Fig. 4에 나타내었으며, MDO 연료의 물성성분은 Table 3에 나타내었다.

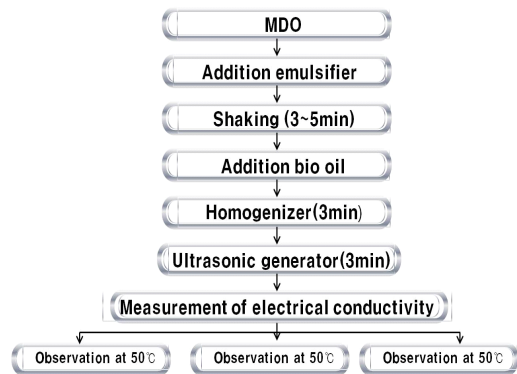


Fig. 4. Preparation process of emulsified fuel.

Table 3. 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 <sup>3</sup>	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

### 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 4와 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.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. MDO 유화연료의 연소실험

유화연료의 연소실험은 전부하 영역 및 ND-13모드에서 실험을 진행하였고, 전부하 영역에서 rpm은 1500rpm, 2000rpm이며, 부하영역은 10%, 25%, 50%, 75% 100%이며, ND-13 모드에서의 rpm은 아이들링, 회전수 A, 회전수 B, 회전수 C로 이루어지며, 여기서 회전수 A, B, C는 ND-13모드의 원동기 회전수 설정치가 된다. 부하영역은 10%, 25%, 50%, 75% 100%이었다.

### 3.2. NOx 배출량 저감 효과

Fig. 5에 1,500rpm에 부하에 따른 NOx의 농도를 나타내었다. 부하가 증가함에 따라 NOx의 농도는 증가하며 1,500rpm에서 100% 부하일 경우 MDO 연료를 사용했을 때 약 860ppm 가량

까지 상승하는 것으로 나타났다. 한편 바이오오일이 10% 함유된 에멀전 연료와 바이오오일이 20% 함유된 에멀전 연료 모두 MDO 연료보다 NOx 배출량이 적었으며, 바이오오일이 20% 함유된 에멀전 연료가 바이오오일이 10% 함유된 에멀전 연료보다 NOx 배출량이 조금 더 적게 나타났다. Fig. 6은 2,000rpm에서 부하에 따른 NOx 농도를 나타낸 것인데, 부하가 증가할수록 NOx의 배출농도가 증가하는 것으로 나타났으나 Fig. 5에 비해서는 부하에 따른 NOx 증가율이 낮게 나타났다. 2,000rpm에서 100% 부하일 경우 MDO 연료를 사용했을 때 약 500ppm 가량으로 Fig. 5의 1,500rpm에서 100% 부하일 때 860 ppm 보다는 확연히 줄어든 수치를 나타내었다. Fig. 7에 에멀전 연료 사용에 의한 질소산화물 저감율을 나타내었다. Fig. 7에서 보는 것과 같이 1500rpm에서 바이오오일 함유량 10% 및 20%의 경우 저부하 영역인 10%, 25% 부하에서 40% 이상의 NOx 배출량 감소율을 보이고 있으나, 50% 이상 부하 영역에서는 감소율이 줄어드는 것으로 나타났다. 그러나 전체 NOx 감소량은 부하가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 또한 2,000rpm에서 바이오오일 함유량 10%와 20%의 경우 50% 이상의 부하에서 15% 미만의 작은 감소율을 보였지만 저부하 영역인 10%, 25% 부하에서 20% 이상의 높은 NOx 배출량 감소율을 보였다. 1,500rpm에서와 마찬가지로 전체 NOx 감소량은 부하가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다.

저부하 영역인 10%, 25% 부하에서 NOx 배출량 감소율은 높지만 NOx 배출량 자체가 작아 ND-13모드 전체를 놓고 볼때 영향은 작은 것으로 판단된다.

Table 4. 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

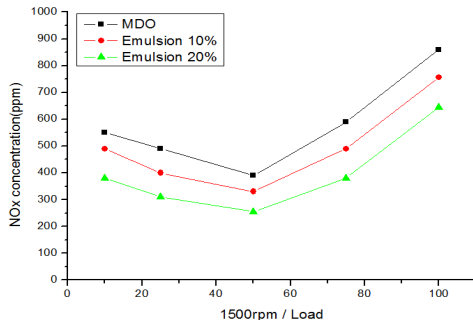


Fig. 5. NOx concentration on the load of 1500rpm.

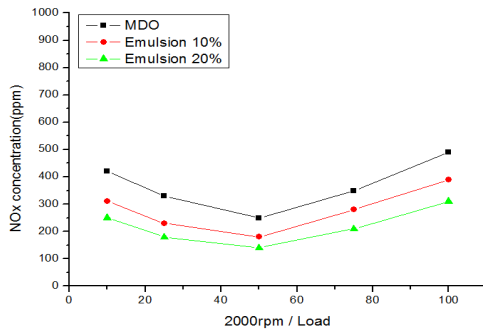


Fig. 6. NOx concentration on the load of 2000rpm.

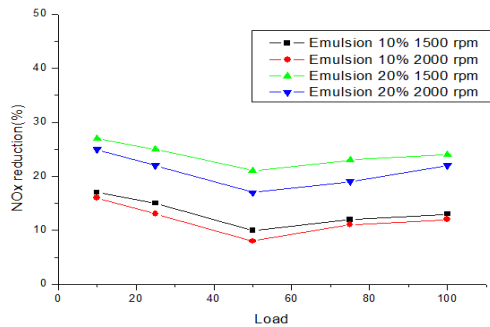


Fig. 7. NOx reduction on each load.

3.3 유화연료와 MDO의 연료사용량 비교

Fig. 8은 바이오오일 함유량 20%의 유화연료를 1,500rpm과 2,000rpm에서 각 부하별 총 연료 소비량을 MDO만을 사용했을 때와 비교한 것이다. 바이오오일 함유량 20%의 유화연료가 MDO보다 1,500rpm에서 동일한 부하 조건에서 약 5% 더 소모 되었으며, 2,000rpm에서는 동일한 부하 조건에서 약 3% 더 소모되었다. 따라서 유화연료의 전체사용량은 MDO보다 평균 4% 더

소모된 것으로 나타났다.

Fig. 9는 Fig. 8의 결과를 바탕으로 바이오오일 함유량 20% 유화연료에서 물 함량(10%)을 제외한 순수한 MDO량으로 환산한 결과를 나타낸 것이다. 바이오오일 함유량 20%의 유화연료가 MDO보다 1,500rpm에서 동일한 부하 조건에서 순수한 MDO 소모량을 계산하면 약 5% 덜 소모 되었으며, 2,000rpm에서는 동일한 부하 조건에서 순수한 MDO 소모량을 계산하면 약 6% 덜 소모되었다. 따라서 바이오오일 함유량 20%의 유화연료 중 순수한 MDO 연료의 사용량은 동일 부하 조건에서 MDO보다 평균 5.5% 덜 소모되어 그만큼의 MDO가 절약된 것으로 나타났다.

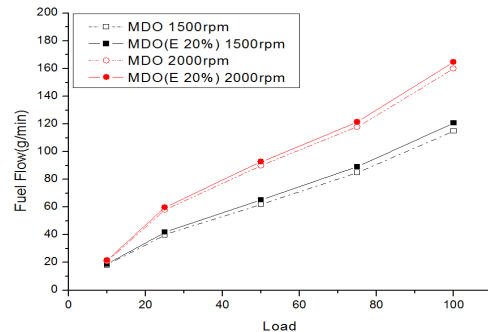


Fig. 8. Total fuel consumption of emulsion fuel of 20% bio oil content on each load.

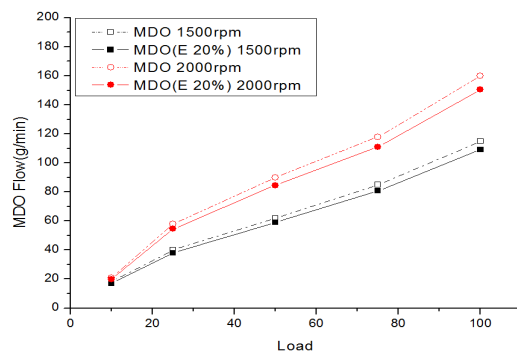


Fig. 9. NOx reduction of emulsion fuel of 20% water content on each load.

3.4 유화연료와 MDO의 연소온도 및 질소산화물 감소량 비교

Fig. 10은 ND-13 각 모드별 MDO와 유화연



료의 배출가스 온도를 측정된 결과이다. 공회전 모드인 1, 7, 13번 모드에서는 약 10°C~20°C 정도 차이가 나는 반면 부하가 있는 모드에서는 20°C~105°C 정도 유화연료를 사용한 경우가 MDO 사용한 경우 보다 더 낮게 나타났다. 이것은 유화연료를 사용하면 유화연료 내 바이오오일에 함유된 수분의 기화에 의해 기화잠열을 빼앗아 가기 때문인 것으로 판단된다. 유화연료를 사용하였을 경우 배출가스 온도가 낮아지므로 질소산화물 배출도 줄어들 것으로 예상된다.

Fig. 11은 ND-13 모드에서 바이오오일 함유량 20%의 유화연료의 NOx 배출량을 측정된 결과이다. MDO와 비교하였을 1, 7, 9, 11, 13의 저부하 영역에서는 고부하 영역인 2, 3, 4, 5, 6, 8, 12에 비하여 NOx 배출량의 감소가 적으나, 전체적으로 전 영역에서 NOx의 감소를 확인 할 수 있었으며, 총 25%의 NOx 배출량 감소를 확인하였다. Fig. 10의 배출가스 온도와 비교해 볼 때 유화연료를 사용하였을 경우 배출가스 온도가 낮아져서 질소산화물 배출도 줄어드는 것으로 판단된다.

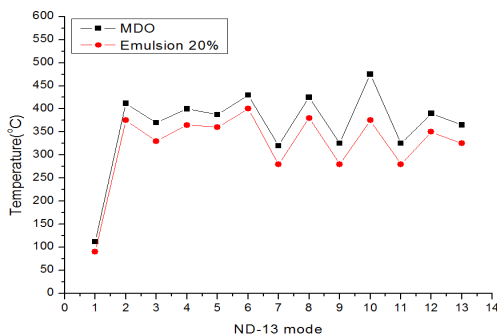


Fig. 10. Temperature changes on each ND-13 mode.

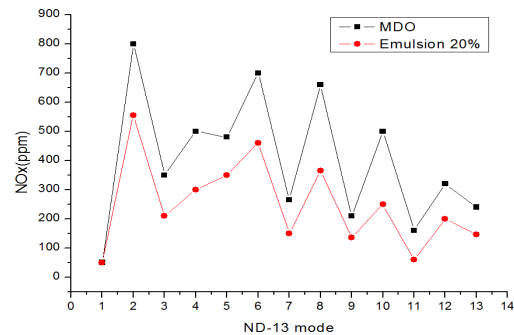


Fig. 11. NOx concentration on ND-13 mode.

3.5. 출력 및 Smoke 저감 효과

Table 5에는 2000rpm의 전부하 영역에서 smoke와 출력을 측정된 결과를 나타내었다.

Fig. 12에는 Table 5를 바탕으로 매연 발생량을 나타내었다. 바이오오일 함유량이 높을수록 부하가 커질수록 매연 발생량이 줄어드는 것으로 나타났다. 특이한 것은 10% 부하에서 바이오오일이 함유된 에멀전 연료의 매연 배출량이 더 높았는데, 이것은 너무 낮은 온도에서 연소가 충분히 이루어지지 못했기 때문으로 판단된다.

바이오오일 함유량이 높을수록 smoke의 발생량이 줄어들며, 또한 출력도 함수율이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 바이오오일 함유량 증가에 따른 전체 발열량이 줄어들면서 나타나는 결과로 판단된다. ND-13모드에서 MDO 유화연료를 시험결과 바이오오일 함유량 10% 유화연료의 smoke 감소량은 약 50%, 그리고 약 12%의 출력손실을 확인하였다. 바이오오일 함유량 10%, 20%에 대한 NOx, smoke, 출력에 대한 감소율을 Fig. 13에 나타내었다. 바이오오일 함유량 10%에 비하여 바이오오일 함유량

Table 5. The effects of exhaust gas and power on emulsion fuel

2000rpm	MDO		Emulsion 10%		Emulsion 20%	
	SMOKE (FSN)	PWR_PS(PS) *K_ISO	SMOKE (FSN)	PWR_PS(PS) *K_ISO	SMOKE (FSN)	PWR_PS(PS) *K_ISO
10%	0.62	30.252	0.82	29.975	0.91	29.413
25%	0.81	75.987	0.65	75.457	0.58	74.798
50%	0.72	151.459	0.37	150.971	0.32	149.876
75%	0.95	226.523	0.38	225.154	0.31	224.357
100%(Full)	0.81	317.668	0.35	282.341	0.32	267.565

20%인 유화연료에서 NOx, 출력, smoke가 더 감소하였으며 특히 smoke 감소가 두드러지게 나타났다. Fig. 14에는 각 유화연료별 매연, NOx, 출력저감을 나타내었다.

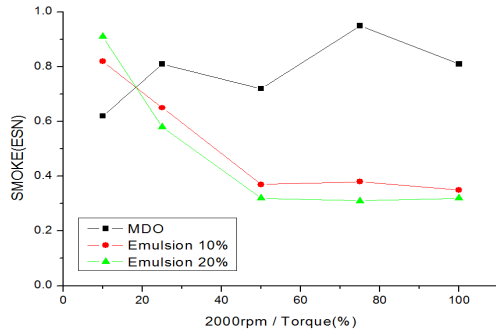


Fig. 12. Smoke emission of each fuel.

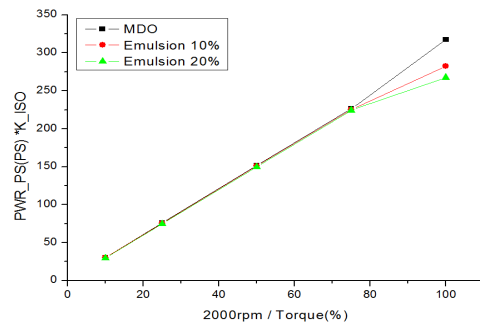


Fig. 13. Power reduction of each fuel.

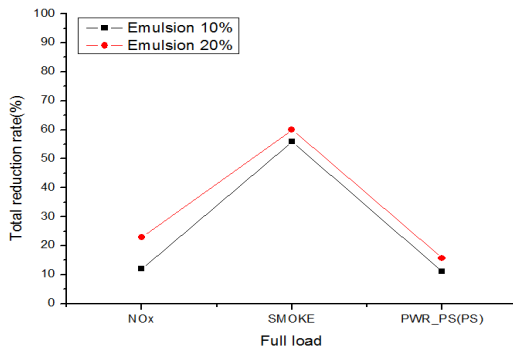


Fig. 14. Total reduction rate on each emulsion fuel.

### 3.6. 유화연료 사용 효과

Fig. 10의 각 모드별 배출가스온도가 MDO에 비해 유화연료를 사용했을 때 낮게 나온 것으로부터 W/O형 유화연료내의 수분에 의한 기화열로 연소실내의 온도를 낮추어 준다는 것을 확인하였다. 그리고 W/O형 유화연료는 수분이 분산 질료써 기름이 수분을 감싸고 있는 형태인데, 이러한 W/O형 유화연료는 연소실내에서 미세폭발을 일으켜 연료를 잘게 쪼개어 주어 완전연소에 가깝게 하여 smoke를 감소시키게 되는데, Fig. 12에서 보는 것과 같이 25% 이상의 부하에 대해서 매연 발생이 줄었으며 특히 50% 부하 이상에서는 50% 이상의 매연 저감 효과를 나타내어 수분의 미세폭발에 의한 매연 저감으로 판단이 가능하다.

또한 유화연료는 바이오오일 함유량이 증가할수록 smoke가 감소하는데, NOx와 동일하게 저부하보다, 고 부하에서 더 많이 감소되는 것을 알 수 있었다.

바이오오일 함유량이 증가함에 따라 smoke가 줄어드는 것은 연소온도의 저하, 유화연료중 수분의 미세폭발로 인한 액적의 표면적 증가로 인해 공기와 연료의 혼합 촉진, 수증기 농도의 증가, 수증기 증가로 인한 착화 지연 등에 의한 효과 때문으로 판단된다.

바이오매스로부터 연료를 만드는 공정들은 많이 개발되어 오고 있으나 경유나 휘발유를 만들기 위해서는 수분을 분리해야 하고, 또 이렇게 분리된 수분에는 탄화수소가 함유되어 있어서 별도의 수처리를 해야 가능하다. 그러나 본 연구처럼 수상오일 형태로 예멸전 연료화를 하게 되면 수처리 문제도 해결되고 저렴한 방법에 의하여 친환경 연료를 만들 수 있을 것으로 판단 된다.

한편, 2016년부터 적용되는 Tier 3 규제에 대응하기 위하여 질소산화물을 Tier 2 보다 80% 더 저감하여야 하는데, 그러기 위해서는 SCR (Selective Catalytic Reduction) 설비를 적용하여 질소산화물을 제거하여야 한다. 그러나 선박용 연료는 MDO, Bunker-A 등 중질유를 사용하므로 중질유 사용에 따른 가시매연(smoke)를 제거해야만 SCR 촉매의 내구성이 유지되므로 본 연구에서는 결과를 보면 이러한 단점도 극복이 가능하여 선박용 연료로도 사용이 가능한 것으로 판단 된다.

#### 4. 결론

본 연구에서 MDO와 바이오오일이 첨가된 MDO 유화연료를 디젤엔진에서 연소하여 배출가스와 출력에 미치는 영향에 대해 살펴보았으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 유화연료의 바이오오일 함유량이 증가함에 따라 전체적으로 NO<sub>x</sub>, smoke의 배출량이 감소하는 경향을 보였으며, 출력도 함께 감소하는 것으로 나타났다.
- 2) NO<sub>x</sub>의 배출량 감소는 바이오오일에 함유된 수분의 기화열로 연소실 내부의 온도를 낮추어 발생하는 것으로 판단되며, smoke 배출량 감소는 바이오오일에 함유된 수분의 미세폭발로 판단된다. 한편 출력의 감소는 유화연료의 바이오오일 중에 함유된 수분의 증가로 인하여 엔진연소 시 발열량 부족에 의해 출력이 감소된 것으로 판단된다.
- 3) 바이오오일중 함유된 수분의 증가에 따라 기화 잠열의 증가로 인하여 유화연료의 연소시 배출가스의 온도가 감소되는 것으로 나타났다.
- 4) 전 부하 영역에서 실험결과 바이오오일 함유량 10%의 경우 NO<sub>x</sub>의 총 감소량은 약 15%, smoke의 총 감소량은 약 50%, 그리고 약 12%의 출력손실을 확인하였다.
- 5) 전 부하 영역에서 실험결과 바이오오일 함유량 20%의 경우 NO<sub>x</sub>의 총 감소량은 약 25%, smoke의 총 감소량은 약 60%, 그리고 약 15%의 출력손실을 확인하였다.
- 6) 바이오오일 함유량 20%의 유화연료 중 순수한 MDO 연료의 사용량은 2000 rpm에서 동일 부하 조건에서 MDO보다 평균 6% 덜 소모되어 약 6%의 연료가 절약된 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

본 논문은 2015년도 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었습니다.

#### References

1. *World Energy Outlook 2011(IEA)*, Frost & Sullivan, (2011).
2. *World Energy Outlook 2010(IEA)*, Frost & Sullivan, (2010).
3. Ministry of Knowledge Economy, "Biomass Strategy Roadmap," (2012).
4. Ministry of Knowledge Economy, "The 3rd Renewable Energy Technology Development and Utilization. Supply Master Plan," (2013).
5. 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," 2003-01-3146.
6. Hironori, S., Koji, U., "Feasibility Study on the Utilization of Water-in-Oil Type Emulsified Fuels to Small DI Diesel Engines," 2011-9602.
7. Anja Oasmaa and Cordner Peacocke, "Properties and Fuel use of Biomass derived Fast Pyrolysis Liquids," Cordner Peacocke Conversion and Resource Evaluation Ltd., vtt publication 731, ISBN 978-951-38-7384-4.
8. J. T. Davies. E. K. Rideal : *Interfacial Phenomena* 2nd. ed., 371, Academic Press, New York, (1963).
9. C. G. Jo, etc., "The Impact on the Flow Characteristics of the Higher Alcohol and a Higher Fatty Acid O/W Emulsion," *Journal of the Society of Cosmetic Scientists*, 35(2), 103-104, (2009).
10. S. M. Oh, "low-emission Diesel Engines using Fuel Emulsion Technology", *Machinery and Materials*, 12th ed., vol II, 47-50, (2000).
11. P. Becher, "Emulsions : Theory and Practice, Reinhold Publishing", 267, New York(1965).
12. P. Becher et al, "Encyclopedia of Emulsion Technology", vol. I, M. Dekker Inc., 94-127, (1983).

13. 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, 623-627, (2014).