

바이오디젤 구성성분 합성 및 연료특성 분석

임영관[†] · 정충섭 · 한관욱 · 도진우

한국석유관리원 석유기술연구소

Synthesis of Biodiesel Components and Analysis of Their Fuel Characters

Young-Kwan Lim[†], Choong-Sub Jeong, Kwan-Wook Han and Jin-Woo Do

Fuel Technology R&D Center, Korea Petroleum Quality & Distribution Authority,
Chung-buk 363-883, Korea

(Received October 15, 2013 ; Revised November 14, 2013 ; Accepted November 21, 2013)

Abstract – Because food crops serve as the raw materials for biodiesel, the increasing use of biodiesel as an alternative fuel can lead to adverse effects such as food price inflation and may contribute to global starvation. To solve these problems, efforts are being made to explore various nonedible raw materials for producing biodiesel. Different raw materials impart different fuel characteristics to biodiesel. In this study, we synthesized pure fatty acid methyl ester (FAME), which is a biodiesel component, and then analyzed its fuel properties. The fuel properties of pure FAME would be useful in producing biodiesel from various new raw materials.

Keywords – biodiesel (바이오디젤), fatty acid (지방산), fatty acid methyl ester (지방산 메틸에스테르), fuel properties (연료특성)

1. 서 론

최근 국제유가 상승으로 인해 많은 국가와 연구기관들이 석유의존도 탈피를 위해 노력하고 있다. 그 중 하나가 기존 석유를 대체할 수 있는 신재생에너지의 개발 및 사용 활성화이다. 현재까지 석유의 사용처 중 가장 큰 비중을 차지하고 있는 자동차연료 역시 신재생 에너지를 이용한 노력으로 전기자동차, 수소자동차, 태양광전지를 이용한 자동차의 개발이 이루어지고 있지만, 이는 아직 상용화 단계에 이르기까지 충분한 시간과 기술이 요구되며, 현실적으로 실용화되고 있는 것은 석유를 대체할 수 있는 석유대체연료로서 바이오디젤, 바이오에탄올, 바이오가스 등이다[1-3].

바이오디젤은 식물성기름 또는 동물성지방을 이용해

전이 에스테르화반응(transesterification)을 통해 얻어진 합성연료로서 기존 석유디젤과 연료적 특성이 매우 유사하여 특별한 차량부품의 변화없이 경유자동차의 연료로 사용 가능한 바이오연료이다[4].

이러한 바이오디젤은 수송용 연료로 사용했을 시, 기존 석유디젤에 비해 독성 배출가스와 분진(particulate matter) 형성이 낮으며, 유류 누출사고 시 미생물에 의한 생분해성(biodegradability)이 높기 때문에 친환경적인 연료로 각광받고 있다[5,6]. 또한 유가의 지속적 상승은 바이오디젤의 사용 증가를 가져오고 있으며, 이러한 이유로 현재 국내에서 바이오디젤이 차량용 경유 연료에 일정 비율(2013년도 기준 2.0%)로 혼합하여 사용하고 있으며, 앞으로 바이오디젤 혼합비율증가와 함께 원료 다양화가 될 전망이다[7].

최근 우리 연구팀에서는 동물성지방과 식물성기름으로부터 합성된 바이오디젤은 서로 상이한 연료특성을 보이며, 이는 이들 바이오디젤을 구성하고 있는 분자의

[†]Corresponding author : yklim92001@yahoo.co.kr

©이 논문은 한국유활학회 2013년도 추계 학술대회(2013. 10. 16~18/여수) 발표논문임.

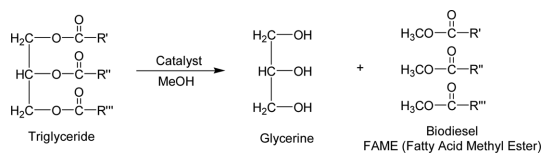


Fig. 1. Synthetic method of biodiesel from triglyceride.

구성비율이 Table 1에서 보는 것과 같이 다르기 때문 이라고 보고한 바가 있다[8].

앞서 설명한 바이오디젤의 많은 장점에도 불구하고 우리나라는 외국의 상황과 다르기 때문에 바이오디젤 의 원료를 대부분 해외로부터 수입에 의존하고 있으며, 실제로 바이오디젤이나 바이오연료가 지구온난화를 저 감시킨다는 논쟁은 아직까지 끊임없이 제기되어지고 있다[8]. 뿐만 아니라 바이오연료 증가에 따른 부작용 으로서 곡물가 인상과 사료값 인상 등은 현재 진행형으 로 우리 실 생활에 피부로 느껴질 수 있을 정도로 대 두되어지고 있다[9].

이러한 문제점을 해결하기 위해 자트로파유(jatropha oil)나 피마자유(castor oil)와 같은 비식용작물로부터의 바이오디젤 생산[10], 동물 도축과정에서 얻어지는 지방부산물 을 이용해 바이오디젤을 생산이 이루어지고 있다. 또한 해양조류로부터의 바이오디젤과 생활폐수

로부터 바이오디젤 생산 등의 접근이 이루어 지고 있 는데, 이는 바이오디젤의 생산원가가 원유생산 원가보 다 훨씬 높기 때문에 현재까지는 비이상적인 것으로 판단되어진다.

본 논문에서는 바이오디젤의 장단점의 논쟁에서 벗 어나 바이오디젤 원료물질의 다양성에서 발생될 수 있 는 바이오디젤의 물성차이를 예측하기 위해서 바이오디 젤 구성분자, 즉 지방산 메틸에스테르(fatty acid methyl ester)를 합성하고, 이에 대한 연료적 특성을 분석하였 다. 이는 새로운 형태의 원료물질로부터 생산된 바이 오디젤의 성분비 분석만으로도 다양한 연료특성을 유 추할 수 있을 것이라 판단된다.

2. 실험

2-1. 시약 및 구조분석

바이오디젤 구성성분을 합성하기 위한 원료물질로서 지방산(fatty acid), KOH, 메탄올은 TCI사 제품을 이 용하였으며, 컬럼크로마토그래피에 필요한 실리카겔은 merck사의 silica 60(230-400 mesh)을 사용하였다. 합 성된 바이오디젤 구성분자는 Varian사의 400 MHz Varian Inova NMR을 이용했으며, tetramethylsilane (Me₄Si)이 0.5 vol% 함유된 CDCl₃에 녹여 분석하

Table 1. Determination of fatty acid methyl ester component in biodiesel by GC-Mass

Biodiesel	Soybean BD	Palm BD	Perilla BD	Beef tallow BD	Fork lard BD
Methyl dodecanoate (C12:0)	-	1.3	-	0.3	-
Methyl myristate (C14:0)	trace	2.7	-	5.8	4.1
Methyl pentadecanoate (C15:0)	-	-	-	1.0	trace
Methyl palmitate (C16:0)	17.1	35.3	15.0	21.4	24.1
Methyl palmitoleate (C16:1)	trace	0.3	-	5	5.1
Methyl heptadecanoate (C17:0)	-	-	-	0.6	1.0
Methyl <i>cis</i> -10-heptadecenoate (C17:1)	-	-	-	3	1.3
Methyl Stearate (C18:0)	13	12	1.1	17.2	16.2
Methyl oleate (C18:1)	16.9	38	12	37.6	42.9
Methyl linoleate (C18:2)	39	8	19	1.6	trace
Methyl linolenate (C18:3)	7.5	-	51	-	-
Methyl <i>cis</i> -10- nonadecenoate (C19:1)	-	-	-	0.6	0.4
Methyl arachidate (C20:0)	-	1	-	0.4	0.6
Methyl <i>cis</i> -11-eicosenoate (C20:1)	trace	trace	trace	0.9	2.3

였다.

2-2. 바이오디젤의 합성

실온에서 100 mL-round bottom flask에 myristic acid 10 g(0.44 mol), 메탄올 1 L, 촉매인 KOH를 5 g (0.09 mol) 넣은 후, magnetic bar와 reflux condenser를 장착한 뒤, 반응혼합물을 stirring 시키면서 80°C에서 reflux시켰다. 4시간의 반응과정 후, 반응혼합물을 실온으로 냉각한 뒤, 반응혼합물에 300 mL의 물을 넣고, diethyl ether를 이용해 3번의 추출과정을 수행하였다. 바이오디젤 구성성분이 포함되어있는 유기용매층을 무수 $MgSO_4$ 를 넣어 수분을 제거하고, $MgSO_4$ 수화물은 필터를 통해 제거하였다. 유기용매를 rotary vacuum evaporator를 통해 농축시킨 뒤, 실리카겔이 충전된 컬럼크로마토그래피(Hexane:EtOAc=95:5)를 이용해 바이오디젤을 정제한 결과 96%의 수율로 102 g의 methyl myristate를 얻었다.

1H NMR (400 MHz, $CDCl_3$); 3.67 (s, 3H), 2.30 (t, $J=7.2$ Hz, 2H), 1.62-1.58 (t, $J=6.4$ Hz, 2H), 1.28-1.21 (m, 20H), 0.88 (t, $J=6.4$ Hz, 3H).

2-3. 동점도, 운점, 유동점 측정

동점도는 Cannon Instrument Company사의 CAV 2000 Series의 Cannon 1257 유리제 모세관식 튜브를 이용하여 40°C에서 ASTM D 445 방법에 따라 측정하였다[11]. 모세관식 튜브에는 3개의 벌브(bulb)로 구성되어 있으며, 벌브사이에 온도센서가 있어 시료 약 15 mL를 흡입 상승시킨 뒤, 시료가 하강하는 시간을 온도센서로 감지함으로써 동점도가 측정된다.

운점(Cloud point)과 유동점(Pour point)은 ASTM D 2500 방법에 의해 TANAKA사의 MPC-602를 이용하여 측정하였다[12]. 4 mL의 시료를 용기에 채운 뒤, 45°C로 가온한 후, 분당 1°C의 속도로 냉각하면서 시료내에 파라핀 왁스와 고체상이 형성되기 시작하는 운점을 측정한 뒤, 온도를 더 낮추어 시료가 유동하지 않는 유동점을 측정하였다.

2-4. 윤활성 및 산화안정도 측정

윤활성은 PCS Instruments사의 HFRR(High frequency reciprocating rig)를 사용하였으며, ISO 12156 방법에 준하여 수행하였다[13]. 시료 2 mL를 60°C에서 75분 동안 50 Hz의 주파수와 200 g의 하중을 이용해 금속 원판(PCS Instrument사의 지름 1 cm 원판)과 시험구

(PCS Instrument사의 외경 6 mm 금속구)를 왕복마찰 시킴으로 시험구에 생성된 마모흔(MWSD; mean wear scar diameter)을 현미경(MEIJ TECHNO사의 Infinity 1)을 이용하여 측정하였다. 습도에 의해 마모흔 생성정도가 다를 수 있으므로, K_2CO_3 를 이용하여 HFRR 분석케비넷 내의 습도를 ISO 표준방법에서 정하는 30% -50%가 유지되도록 조절하였다. 마모흔은 시험구와 금속원판의 마찰로 생긴 흔적으로 그 크기가 클수록 시료의 윤활성이 떨어지는 것을 의미하며, 관찰된 마모흔으로부터 분석 시 습도와 온도인자가 고려된 보정 마모흔은 Antoine equation에 의해 자동적으로 계산되었다.

산화안정도는 Methrom사의 Rancimat 743을 이용하였으며, EN 14112 방법에 준하여 산화안정도를 측정하였다[14]. 깨끗하게 세정된 시료용기에 분석시료를 3.0 g 넣은 뒤, 150°C로 가열하였다. 이 시료용기에 10 L/h의 속도로 공기를 불어넣어 시료를 강제적으로 산화시켰으며, 시료와 접촉된 공기는 통기관으로 연결되어 증류수 50 mL가 채워진 용기를 통과시킴으로써, 실제적으로 증류수 내에 있는 전극으로부터 증류수의 전기전도도 변화를 측정함으로써 시료의 산화되는 시간을 측정하였다.

2-5. 유도세탄가 측정

유도세탄가(Derived Cetane Number; DCN)는 SETA사의 IQT-LM을 이용하였으며, ASTM D 6890 방법에 준하여 유도세탄가를 측정하였다[15]. 580°C로 유지된 챔버에 일정량(0.0985 g/inj)의 연료를 분사한 뒤, 연료가 연소되는 시간을 측정하여 유추하는 방법으로, 연료를 15번 분사, 연소시킴으로 연료라인과 챔버내에 잔류하고 있는 불순물과 전시료를 제거시킴과 동시에 분석장비의 안정화를 시킨 뒤, 16번째부터 47번째(총 32번)까지 연료분사를 통해 측정된 유도세탄가의 평균을 구함으로 재현성과 반복성을 높였다. Fig. 3은 IQT(Ignition quality tester)를 이용해 연료의 유도세탄가를 측정하는 원리를 그래프를 통해 표현하였다. 연소챔버 내에 연료가 분사됨으로 인해 압력변화가 일어나며, 연료의 발화로 인해 또 다른 압력증가가 일어난다. 이 두 압력변화 시간, 즉 연소지연시간(Ignition delay time; ID)을 측정함으로써 식 (1)을 통해 유도세탄가가 계산된다. 본 식은 ASTM D 6890에 표현된 식으로, 세탄가가 다른 표준연료들을 실제 엔진과 IQT를 이용해 비교 실험함으로써 유도된 경험식이다.

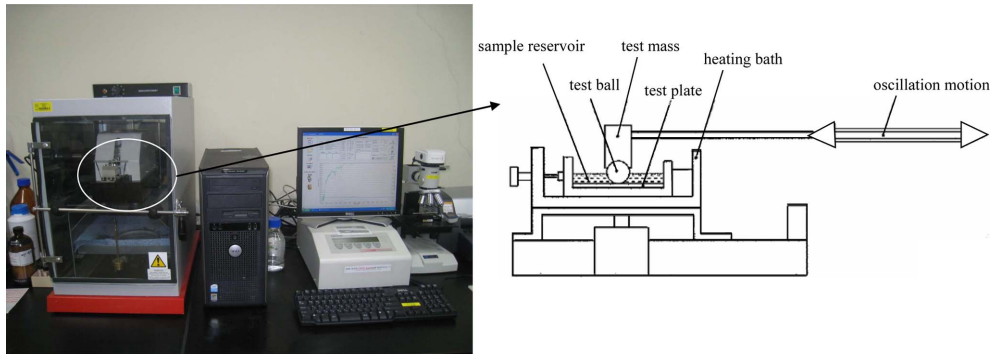


Fig. 2. HFRF instrument and microscope.

$$DCN = 4.460 + 186.6/ID \quad (1)$$

3. 결과 및 고찰

3-1. 바이오디젤 구성성분 합성

바이오디젤의 구성성분에 대한 연료적 특성을 알아보기 위해 순수한 지방산(fatty acid)으로부터 Fischer esterification을 통해 바이오디젤 구성성분인 지방산 메틸에스테르(fatty acid methyl ester)를 합성하였다. 정제된 수율은 Table 2에서와 같이 92~98%를 보였으며, 바이오디젤 구성성분인 지방산 메틸에스테르는 투명한 액체 또는 흰색 고체의 형태를 지녔다.

Fig. 4는 합성된 바이오디젤 구성분자의 ¹H-NMR 분석결과를 보여주고 있으며, 3.67 ppm에서 methoxy 그룹이 분석됨으로써 carboxylic acid가 모두 methyl ester로 전환되었음을 알 수 있었다.

3-2. 바이오디젤 구성분자의 연료특성 분석

합성된 바이오디젤의 구성성분에 대한 연료적 특성 중 동점도를 40°C, 50°C, 100°C에서 분석하였다(Table 3). 바이오디젤 구성성분은 석유디젤보다 동점도가 높게 측정되었으며, 분자의 길이가 길수록 올레핀 함량이 낮을수록 동점도가 증가하는 것으로 분석되었다. 또

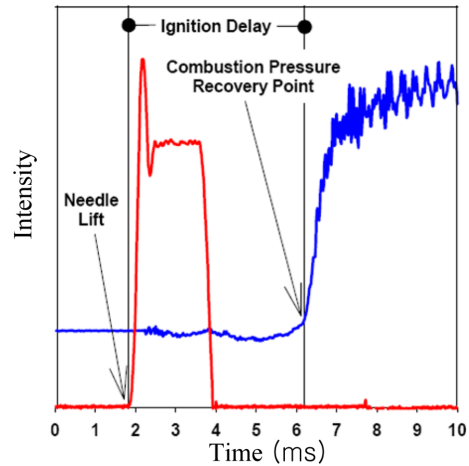


Fig. 3. Analyzed of derived cetane number using IQT (ignition quality tester).

한 분자길이가 길고 포화탄화수소 형태인 methyl arachidate와 methyl behenate는 40°C, 50°C에서 고체 상태를 보여 동점도를 측정할 수 없었다. 또한 이들 온도에서 측정된 동점도로는 점도지수 측정영역에서 벗어나 점도지수를 계산하지 못하였다.

저온에서 차량의 연료로서 요구되어지는 연료특성을 알아보기 위해 운점과 유동점을 측정하였다. 운점은 운

Table 2. Synthesis of fatty acid methyl ester as biodiesel components

Biodiesel	Yield	Biodiesel	Yield
Methyl myristate(C14:0)	96	Methyl linoleate(C18:2)	95
Methyl palmitate(C16:0)	95	Methyl linolenate(C18:3)	92
Methyl stearate(C18:0)	98	Methyl arachidate(C20:0)	94
Methyl oleate(C18:1)	96	Methyl behenate(C22:0)	96

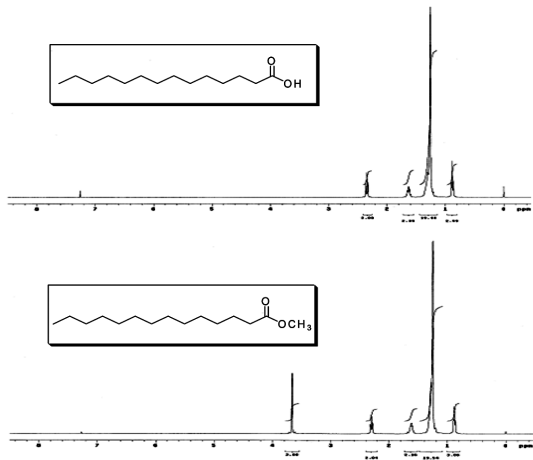


Fig. 4. $^1\text{H-NMR}$ spectrum of myristic acid and synthesized methyl myristate in CDCl_3 .

Table 3. Determination of Kinematic Viscosity

Biodiesel	40°C	50°C	100°C
Petrodiesel	1.994	1.695	0.8992
Methyl myristate	3.288	2.713	1.317
Methyl palmitate	4.374	3.544	1.631
Methyl stearate	4.561	4.561	1.993
Methyl oleate	4.451	3.706	1.707
Methyl linoleate	3.740	3.123	1.551
Methyl linolenate	3.467	2.928	1.497
Methyl arachidate	nd	5.741	2.386
Methyl behenate	nd	nd	2.815

도를 낮추었을 때, 고체상(solid phase)이 형성되는 온도를 의미하며, 운점 이하로 온도를 낮추었을 때 액체

Table 4. Determination of cold fuel properties

Biodiesel	Cloud point (°C)	Pour point (°C)
Petrodiesel	-10	-22
Methyl myristate	17	17
Methyl palmitate	28	26
Methyl stearate	36	34
Methyl oleate	-16	-18
Methyl linoleate	-46	< -55
Methyl linolenate	-51	< -55
Methyl arachidate	nd	44
Methyl behenate	50	nd

상이 흐르지 않는 온도, 즉 유동하지 않는 온도를 유동점이라 말하며, 이들은 저온에서의 중요한 연료특성이다. 운점과 유동점을 측정된 결과 바이오디젤 구성 성분은 석유디젤의 운점과 유동점이 -10°C , -22°C 로 측정된 것보다 높은 분석값을 보였으며, 올레핀 함량이 낮은 즉 포화탄화수소 형태인 바이오디젤 구성분자들은 높은 온도의 운점과 유동점이 관측되었다. 하지만 올레핀 함량이 많은 methyl linoleate와 methyl linolenate는 운점이 각각 -45°C , -51°C , 유동점이 모두 -55°C 이하로 분석됨으로써 저온특성이 매우 우수한 것을 알 수 있었다.

세탄가는 디젤연료의 착화성을 나타내는 연료품질의 하나로 세탄가가 높으면 연료의 연비, 출력, 배출가스 저감 등에 영향을 미친다[16]. 바이오디젤 구성분자와 석유디젤의 유도세탄가를 측정된 결과 석유디젤은 48.91를 보인 반면, 바이오디젤의 유도세탄가는 석유디

Table 5. Determination of derived cetane number

Biodiesel	20% ^a	40%	60%	80%	100%
Methyl myristate	55.05	58.26	61.84	65.28	70.03
Methyl palmitate	56.72	60.88	66.44	nd	nd
Methyl stearate	58.64	63.42	71.82	nd	nd
Methyl oleate	56.54	58.34	59.43	62.66	65.07
Methyl linoleate	51.74	50.14	50.87	51.23	51.16
Methyl linolenate	49.52	46.74	45.12	43.68	42.71
Methyl arachidate	61.88	65.24	nd	nd	nd
Methyl behenate	62.81	67.28	nd	nd	nd

a : biodiesel blended ratio in petrodiesel

Table 6. Analysis of Lubricity and Oxidation Stability

Biodiesel	Lubricity (μm)	Oxidation stability(h)
Petrodiesel	518	>3 days
Methyl myristate(C14:0)	224	>3 days
Methyl palmitate (C16:0)	218	70.15
Methyl stearate (C18:0)	213	71.16
Methyl oleate (C18:1)	211	17.97
Methyl linoleate (C18:2)	175	1.24
Methyl linolenate (C18:3)	141	0.30
Methyl arachidate (C20:0)	205	71.26
Methyl behenate (C22:0)	202	63.81

젤에 비해 높은 값을 보였다. 분석결과, 바이오디젤 구성성분 중, 분자길이가 길수록, 올레핀 함량이 낮을수록 높은 유도세탄가를 지니는 것으로 분석되었다. 하지만 올레핀을 3개 함유하고 있는 methyl linolenate는 유도세탄가가 석유디젤보다 낮아, 혼합비율이 높을수록 유도세탄가가 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 바이오디젤 구성성분이 포화탄화수소인 경우, 상온에서 고체상이기 때문에 석유디젤에 일정비율로 혼합하여 분석하였으며, 몇몇 포화 지방산에스테르의 경우, 혼합비율이 커질수록 고체화되는 경향이 높아 유도세탄가를 측정할 수 없었다.

Table 6은 HFRR(High frequency reciprocating rig)을 이용하여 석유디젤과 바이오디젤 성분의 윤활성을 보여준다. 윤활성향상제와 바이오디젤이 포함되지 않은 석유디젤은 마모흔이 518 μm로 낮은 윤활성을 보인 반면, 바이오디젤 구성성분은 우수한 윤활성을 보였다. 특히 methyl linolenate는 139 μm로 가장 우수한 윤활성을 보였다, 산화안정도를 측정한 결과, 석유디젤과 포화지방산에스테르는 산화될 수 있는 작용기인 올레핀이 없어 산화에 안정하였지만, 불포화지방산에스테르인 methyl oleate, methyl linoleate, methyl linolenate는 monol, diol, epoxide 등의 형태로 전환될 수 있는 올레핀을 포함하고 있어 낮은 산화안정성을 보였다.

Fig. 5는 바이오디젤 구성성분 중 올레핀의 함량에 의해 윤활성에 차이를 보이고 있음을 보여주고 있다. 즉 올레핀 함량이 많을수록 윤활성 향상을 보였는데, 이는 극성인 올레핀이 두 금속표면에 효과적

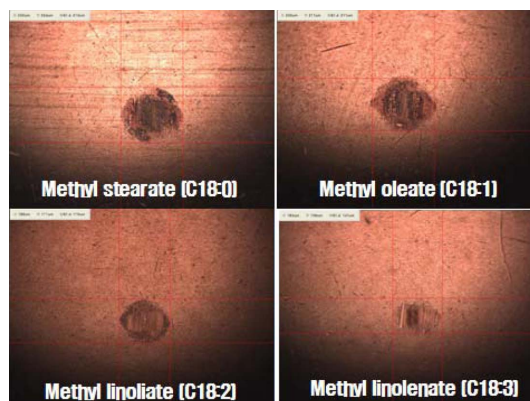


Fig. 5. Compare to the Lubricity of fatty acid methyl ester.

으로 흡착[17], 또는 올레핀이 고리화 반응(Diels-Alder reaction)을 통해 형성된 분자크기가 큰 분자들의 효율적 흡착으로 윤활효과가 상승한 것으로 판단된다.

4. 결 론

석유의 고갈로 인해 석유대체연료에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있는 가운데, 바이오디젤의 안정적 공급을 위해 바이오디젤 원료 다양화에 대한 노력이 이루어지고 있다. 하지만 원료 다양화는 바이오디젤 구성성분 변화에 따른 상이한 연료적 특성을 발생하게 된다. 본 연구에서는 간단한 크로마토그래피를 이용해 새로운 형태의 바이오디젤 구성성분비만 분석하여도 이들 바이오디젤의 연료적 특성을 유추하기 위해 바이오디젤을 구성하고 있는 바이오디젤 구성분자를 합성한 뒤, 이들의 연료적 특성을 분석하였다.

분석결과, 연료의 저온특성인 윤점과 유동점은 바이오디젤의 구성분자의 길이가 길수록, 올레핀 함량이 낮을수록 높은 값(열악한 성능)을 보였으며, 유도세탄가는 구성분자의 길이가 길수록, 올레핀 함량이 낮을수록 높은 값(우수한 성능)을 보였다. 윤활성은 분자의 길이가 길수록, 올레핀 함량이 많을수록 우수한 성능을 보인 반면, 산화안정도는 올레핀 함량이 높을수록 열악한 성능을 보였다.

본 연구결과를 토대로 추후 새로운 형태의 원료물질로부터 바이오디젤을 생산할 경우, 바이오디젤의 구성성분을 분석하면, 이들의 다양한 연료적 특성까지 유추 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] Omer, A. M., "Energy, Environment and Sustainable Development," *Renew. Sust. Energy Rev.*, Vol. 12, pp. 2265-2300, 2008.
- [2] Lotero, E., Liu, Y., Lopez, D. E., Suwannakarn, K., Bruce, D. A. and Goodwin Jr, J. G., "Synthesis of Biodiesel via Acid Catalysis," *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 44, pp. 5353-5363, 2005.
- [3] Lim, Y. K. and Lee, C. H., "The Lubricity of Biodiesel as Alternative Fuel," *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 26, pp. 73-82, 2010.
- [4] Meneghetti, S. M. P., Meneghetti, M. R., Serra, T. M., Barbosa, D. C., and Wolf, C. R., "Biodiesel Production from Vegetable Oil Mixture: Cottonseed, Soybean, and Castor Oils," *Energy & Fuels*, Vol. 21, pp. 3746-3747, 2007.
- [5] Bajpai, D., and Tyagi, V. K., "Biodiesel: Source, Production, Composition, Properties and Its Benefits," *J. Oleo. Sci.*, Vol. 55, pp. 487-502, 2006.
- [6] Muncrief, R. L., Roofs, C. W., Cruz, M., and Harold, M. P., "Combining Biodiesel and Exhaust Gas Recirculation for Reduction in NOx and Particulate Emissions," *Energy & Fuels*, Vol. 22, pp. 1285-1296, 2008.
- [7] Korea Institute Economics Institute, "The Status of World Renewable Energy Market and Policy," 2013.
- [8] Justine S. Baker, Brian C. Murray, Bruce A. McCarl, Steven K. Rose, and Joshua Schneck, "Greenhouse Gas Emissions and Nitrogen Use in U.S. Agriculture Historic Trends, Future Projections, and Biofuel Policy Impacts," Nicholas Instituted for Environmental Policy Solutions Report, NI R 11-09, October, 2011.
- [9] Wilfried Bommert, "Kein Brot Für Die Welt".
- [10] D. P. Prafulla, G. G. Veera, and D. Shuguang, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 49, 10850 (2009).
- [11] ASTM D445, "Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity)".
- [12] ASTM D 2500, "Standard Test Method for Cloud Point of Petroleum Products".
- [13] ISO 12156-1, "Diesel Fuel-Assessment of Lubricity using the high-frequency reciprocating rig (HFRR)".
- [14] BS EN 14112, "Fat and Oil Derivatives, Fatty Acid Methyl Esters (FAME). Determination of Oxidation Stability (Accelerated Oxidation Test)".
- [15] ASTM D 6890, "Standard Test Method for Determination of Ignition Delay and Derived Cetane Number (DCN) of Diesel Fuel Oils by Combustion in Constant Volume Chamber".
- [16] Santana, R. C., Do, P. T., Santikunaporn, M., Alvarez, W. E., Taylor, J. D., Sughrue E. L., and Resasco, D. E., "Evaluation of different reaction strategies for the improvement of cetane number in diesel fuels," *Fuel*, Vol. 85, pp. 643-656, 2006.
- [17] Lim, Y. K., Park, S. R., Kim, J. R., Yim, E. S., and Jung, C. S., "The Effect of Lubricity Improvement by Biodiesel Components," *Appl. Chem. Eng.*, Vol. 21, pp. 684-688, 2010.