

미세조류 유래 바이오디젤 품질 특성 및 차량 저온 성능평가 연구

전철환^{1,2} · 박천규¹ · 임재혁¹ · 류영진³ · 양지현³ · 심상혁³ · 조용희³ · 김기현³ · 박한울³ · 김준호³ · 박재훈³ · 정인재³ · 강성모³ · 신동우³ · 임상민³ · 이철균^{3,†} · 나병기^{2,†}

¹한국석유관리원 석유기술연구소, ²충북대학교 화학공학과, ³인하대학교 생명공학과

A Study on the Fuel Quality Characteristics and Cold Weather Performance Test for Biodiesel Derived from Microalgae

CHEOL-HWAN JEON^{1,2}, CHEON-KYU PARK¹, JAE-HYUK LIM¹, YOUNG-JIN RYU³, JI-HYUN YANG³, SANG-HYEOK SHIM³, YONG-HEE CHO³, KI-HYUN KIM³, HANWOOL PARK³, JUN-HO KIM³, JAEHOON PARK³, INJAE JUNG³, SUNG-MO KANG³, DONG-WOO SHIN³, SANG-MIN LIM³, CHOUL-GYUN LEE^{3,†}, BYUNG-KI NA^{2,†}

¹Korea Petroleum Quality & Distribution Authority, 33 Yangcheong 3-gil, Ochang-eup, Cheongwon-gu, Cheongju 28115, Korea

²Department of Chemical Engineering, Chungbuk National University, 1 Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju 28644, Korea

³Department of Biological Engineering, Inha University, 100 Inha-ro, Nam-gu, Incheon 22212, Korea

†Corresponding author :

nabk@chungbuk.ac.kr
leecg@inha.ac.kr

Received 1 September, 2017

Revised 27 September, 2017

Accepted 30 October, 2017

Abstract >> Microalgae can offer an attractive way of generating renewable and sustainable biodiesel. Biodiesel derived from microalgae can have lower impact on the environment and food supply than biodiesel produced from crops. But biodiesel derived from microalgae have poor fuel properties at low temperature depending on their species. In this study, it was investigated that fuel characteristics of biodiesel derived from *Tetraselmis* sp. and cold weather performance of biodiesel blend (BD3, 3 vol.% biodiesel – 97 vol.% diesel). The startability and operability of the passenger car in BD3 was good at -20°C .

Key words : Microalgae(미세조류), Biodiesel(바이오디젤), Fuel properties(연료 물성), Cold weather performance test(저온 성능평가), Cold weather startability(저온 시동성), Cold weather operability(저온 주행성능)

1. 서론

한정된 에너지원인 화석연료의 지속적인 사용에 따라 화석연료 고갈에 대비하기 위하여 세계 여러 나라에서 에너지 안보 차원에서 에너지원 다양화를 위한 정책을 추진하고 있다. 우리나라는

「저탄소 녹색성장 기본법」에 따라 2014년 1월에 ‘제2차 에너지기본계획’을 발표하여 2035년까지 신·재생에너지 보급 목표를 11%로 정하였으며, 2014년 9월에 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법」에 따라 ‘제4차 신·재생에너지 기본 계획’을 발표하여 수송부문에 신·재생에너지 연료

혼합 의무화제도를 도입하였다^{1,2)}.

신재생에너지 중 현재 국내 수송부문에 상용화된 바이오에너지는 바이오디젤과 바이오가스이며, 바이오디젤은 2002년 5월 수도권매립지를 대상 지역으로 ‘시범보급사업’을 시작하여 2006년 7월부터는 자동차용 경유에 0.5% 혼합되어 전국적으로 보급되었다. 현재는 「석유 및 석유대체연료 사업법」 및 「신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법」에 따라 바이오디젤 혼합 비율이 2.5%까지 증가되었고, 2018년부터는 3.0%까지 상향 조절될 전망이다³⁾.

바이오디젤은 법적으로 식물성유·동물성유를 사용하여 제조한 연료로 정의되며⁴⁾, 촉매 존재 하에 유지와 알코올이 반응하여 생성된 지방산메틸 에스테르(fatty acid methyl ester, FAME)를 의미한다. 바이오디젤 합성에 사용되는 촉매는 원료의 산가(acid value) 등과 같은 특성에 따라 염기 촉매, 산 촉매 및 생촉매 등이 사용되며 다양한 방법으로 합성된다⁵⁻¹⁰⁾.

바이오디젤 제조에 사용되는 원료는 대두유, 유채유, 팜유 및 폐식용유 등이 사용되며, 세계적으로 각 지역별 기후에 적합한 원료가 사용된다. 북미 지역은 대두유, 동남아 지역은 팜유, 유럽은 유채유가 주원료로 사용되며 부족분은 자국의 폐식용유와 동남아시아의 팜유를 수입하여 사용한다. 우리나라는 바이오디젤 도입 초기에 대두유를 주원료로 사용하였으나 바이오디젤 소비량이 증가하면서 가격경쟁력이 우수한 폐식용유와 동남아시아에서 수입된 팜유, 팜 부산물 등의 사용이 증가하였다. 2015년 기준 바이오디젤 원료의 비율은 수입 원료가 약 60%, 국내 폐식용유가 약 40% 정도이다¹¹⁾.

바이오디젤 원료로 사용되는 식물성 유지는 대부분 식용이 가능한 원료로서 식량 자원의 가격 상승을 유발하며, 관련 작물의 재배 면적을 넓히기 위해 산림을 훼손하여 지구온난화를 가속시킨다는 문제가 제기되었다¹²⁾. 또한 우리나라 경우 바이오디젤 원료의 절반 이상을 수입에 의존하고

있기 때문에 석유 자원과 마찬가지로 대외 환경에 따라 가격 및 수급 상황이 크게 영향을 받는 실정이다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 식량 문제에 영향을 주지 않으며 국내에서 재배가 가능한 바이오디젤 원료의 개발이 필요한 상황이다.

미세조류는 성장 속도가 빠르며, 지질 함량이 높아 이러한 문제를 해결할 수 있는 차세대 바이오디젤의 원료로서 많은 연구가 진행되고 있다¹³⁻¹⁶⁾. 미세조류는 광합성을 통해 지질을 생산하며, 광합성은 햇빛, 이산화탄소 및 물만 있다면 가능하기 때문에 육상 연못(pond) 및 바다 등에서 배양이 가능하다. 또한 지질 함량이 높기 때문에 단위 재배 면적당 오일 생산량은 미세조류 종에 따라 팜유보다 약 10배 이상 높아 1 ha 당 최대 58,700 L의 바이오디젤을 생산할 수 있다⁸⁾.

하지만 미세조류로부터 유래된 바이오디젤은 미세조류 종에 따라 차이가 있으나 바이오디젤을 구성하는 성분 중 저온 연료 물성이 열악한 palmitic acid methyl ester (C16:0 FAME) 성분이 가장 많이 함유되어 있다. 따라서 겨울철에 차량 연료로 사용되었을 때 시동성 및 주행성능에 악영향을 미칠 수 있으나 이에 대한 연구 결과가 보고되지 않았다.

본 연구에서는 해양에서 배양된 미세조류로부터 지질을 추출하여 합성한 바이오디젤과 이를 자동차용 경유에 혼합한 연료의 품질 특성 및 차량 저온 시동성 및 주행성능을 연구하였다.

2. 실험

2.1 평가용 연료

실험에 사용된 바이오디젤은 우리나라 서해안 영흥도 인근 해양에서 배양된 미세조류(*Tetraselmis* sp.)로부터 회수한 세포를 동결 건조시킨 후 동결 건조 균체 5 kg에 메탄올 50 L와 진한 황산 800 mL를 넣고 가열하여 6시간 동안 환류 교반한 후

Table 1. The fuel quality standards and test method of BD100 and diesel

BD100				Diesel		
Property (unit)	Specification	Test method	Property (unit)	Specification	Test method	
FAME content (wt.%)	Min. 96.5	EN 14103	Pour Point (°C)	M0 (winter: max. -18)	KS M ISO 3016	
Flash point (°C)	Min. 120	KS M ISO 2719	Flash point (°C)	Min. 40	KS M ISO 2719	
Kinematic viscosity (40°C, mm ² /s)	1.9-5.0	KS M ISO 3104	Kinematic viscosity (40°C, mm ² /s)	1.9-5.5	KS M ISO 3104	
Carbon residue (wt.%)	Max. 0.1	KS M ISO 10370	Distillation (90%) (°C)	Max. 360	ASTM D86	
Sulfur content (mg/kg)	Max. 10	KS M 2027	10% carbon residue (wt.%)	Max. 0.15	KS M ISO 10370	
Ash content (wt.%)	Max. 0.01	KS M ISO 6245	Water and Sediment (vol.%)	Max. 0.02	KS M 2115	
Copper strip corrosion (50°C, 3h)	Max. 1	KS M ISO 2160	Sulfur content (mg/kg)	Max. 10	KS M 2027	
Cold Filter Plugging Point (°C)	Max. 0	KS M 2411	Ash content (wt.%)	Max. 0.02	KS M ISO 6245	
Density (15°C, kg/m ³)	860-900	KS M 2002	Cetane number	Min. 52	KS M ISO 5165	
Water content (wt.%)	Max. 0.05	KS M ISO 12937	Copper strip corrosion (100°C, 3h)	Max. 1	KS M ISO 2160	
Total contamination (mg/kg)	Max. 24	EN 12662	Cold Filter Plugging Point (°C)	Max. -18	KS M 2411	
Acid value (mg KOH/g)	Max. 0.50	KS M ISO 6618	Lubricity (HFRR) (μm)	Max. 400	KS R ISO 12156-1	
Total glycerol (wt.%)	Max. 0.24	KS M 2412	Density (15°C, kg/m ³)	815-835	KS M 2002	
Monoglyceride content (wt.%)	Max. 0.80	KS M 2412	Polycyclic aromatic hydrocarbons (wt.%)	Max. 5	KS M 2456	
Diglyceride content (wt.%)	Max. 0.20	KS M 2412	Aromatic hydrocarbons (wt.%)	Max. 30	KS M 2456	
Triglyceride content (wt.%)	Max. 0.20	KS M 2412	Biodiesel content (vol.%)	2-5	KS M 2964	
Free glycerol (wt.%)	Max. 0.02	KS M 2412	Cloud point (°C)	-	EN 23015	
Methanol content (wt.%)	Max. 0.2	EN 14110				
Alkaline metals (mg/kg)	(Na + K)	Max. 5	EN 14108 EN 14109			
	(Ca + Mg)	Max. 5	EN 14538			
Phosphorus content (mg/kg)	Max. 10	EN 14107				

냉각하고 여과한 여액을 *n*-헥산 50 L로 3회 추출한 후 *n*-헥산 층을 농축하여 얻은 조바이오디젤을 고진공 하에서 증류한 것으로 인하대학교로부터 제공받았으며, Table 1에 나타난 시험방법에 따라 바이오디젤 품질기준 항목을 분석하였다.

현재 국내 주유소에서 유통되는 자동차용 경유에는 다양한 원료로부터 만들어진 바이오디젤이 혼합되어 유통되고 있으므로 순수한 미세조류 바

이오디젤(BD100)만이 혼합된 시료를 조제하기 위해 국내 정유사로부터 바이오디젤이 혼합되어 있지 않은 자동차용 경유(BD0)를 제공받았다. 차량 저온 시동성 및 주행성능을 평가하기 위해 BD0는 겨울용 품질기준을 만족시키는 제품을 공급받았다.

차량 저온 시동성 및 주행성능 평가에 사용된 연료의 바이오디젤 혼합 비율은 향후 바이오디젤 혼합 비율이 증가될 수 있는 것을 고려하여(현재

2.5 vol.% 혼합) 3 vol.%로 하였으며(자동차용 경유 97 부피%-바이오디젤 3 부피%, BD3), 비교를 위해 BD0에 대한 차량 저온 시동성 및 주행성능 평가를 수행하였다. BD0와 BD3는 Table 1에 나타난 시험방법에 따라 자동차용 경유 품질기준 항목을 분석하였으며, 저온 시동성 및 주행성능을 평가하기 위해 담점(cloud point)을 추가로 분석하였다.

2.2 차량 저온 시동성 및 주행성능 평가 시스템

BD0와 BD3에 대한 차량 저온 시동성 및 주행성능을 평가하기 위하여 차대동력계(chassis dynamometer) 시스템을 이용하였다. 차대동력계 시스템은 자동차가 실제 도로를 주행할 때 차량이 받는 부하를 시험실에서 동일하게 구현해 주는 장비로서 정속, 가속 및 감속시 받는 부하를 전기 모터를 이용하여 구현해 준다. 본 연구에 사용된 차대동력계는 AC 동력계로서 관성중량(inertia weight), 동력흡수계(power absorption unit), 제어기(controller) 등으로 구성되어 있으며 $-40\sim 60^{\circ}\text{C}$ 사이의 온도 조절이 가능하고, 상대습도 40-60%를 유지할 수 있는 챔버(chamber) 내에 설치되어 있다. Table 2에 본 연구에 사용된 차대동력계 제원을 나타내었다.

차량 저온 시동성 및 주행성능을 평가에 사용된 차량은 배기량이 1,995 cc이며 정격출력이 184 PS (@4,000 rpm)인 산타페(2015년식)를 이용하였다(Fig. 1).

시험용 차량은 차대동력계에서 실제 도로 상황과 동일한 부하 조건을 설정하기 위하여 주행저항을 측정(coast-down)한 후 시험을 실시하였다.

2.3 차량 저온 시동성 및 주행성능 평가 방법

차량 저온 시동성 및 주행성능 시험 온도는 국내 자동차용 경유의 유동점과 필터막힘점 품질기준 온도인 -18°C 와 기상청 자료로부터 최근 5년 동안 북부 지방의 일별 최저 평균 온도가 -18.9°C



Fig. 1. Test vehicle in cold chamber

Table 2. Specifications of chassis dynamometer

	Specification
Roller	Single Roll 114 cm
Inert weight	456-680 kg
Motor	AC motor
Max. speed	200 km/h
Speed error	$\pm 0.01\%$
Torque error	$\pm 0.1\%$
Blower capacity	63,000 ft^3/min
Coast down	< 1 s

인 점을 고려하여 보다 가혹한 조건인 -20°C 로 정하였다.

차량 연료에 대한 저온 시동성 및 주행성능 시험 절차 등을 규정하는 시험방법이 국내에 마련되어 있지 않기 때문에 유럽에서 사용되고 있는 CEC M-11-T-91¹⁷⁾ 시험방법을 준용하여 다음과 같은 절차로 진행하였다.

평가용 차량의 연료 탱크 내에 있는 연료를 모두 비우고 평가 대상 연료 40 L를 주입한 후 연료 라인 계통에 존재할 수 있는 이전 연료를 제거하기 위해 연료 탱크 전단의 연료 리턴 라인에서 연료 1 L를 빼냈다. 연료 필터 및 엔진 오일(Shell, 0W-30)을 교체하고 차량 시동을 건 후 고속으로 주행하여 연료 라인 계통의 이상 유무를 확인하였다. 시동을 끈 후 완전히 충전된 배터리로 교체하고 차량을 시험용 챔버(Fig. 1)에 넣고 시험 연료의 담점보다 5°C 높은 온도에서 2시간 동안 유지한 후 12시간 이후에 시험 온도인 -20°C 에 도달

하도록 챔버 온도를 선형적으로 내리고 4시간 동안 유지하였다(Fig. 2).

차량 저온 시동성을 평가하기 위해 차량의 가속 페달을 완전히 밟은 상태에서 시동 스위치를 작동시켰으며, 차량의 시동이 걸리면 가속 페달을 떼고 30초간 대기하였다가 전조등, 라디오, 히터 및 시트 열선 등 모든 전기 장치를 켜고 35초 이내에 60 km/h까지 가속을 하고 3분 동안 60 km/h의 속력으로 주행하였다. 이후 25초 이내에 110 km/h까지 가속하고 30분 동안 110 km/h의 속력으로 차량을 주행하였다(Fig. 3). 차량의 주행 동안에는 차량 속도에 따라 가변형 송풍기로 바람을 불어 주어 실제 도로 주행 조건을 모사하였다.

차량 저온 시동성은 차량의 시동 키를 작동시킨 후 엔진 스스로가 동작할 수 있을 때까지 걸린 시간으로 평가하였으며, 차량의 운행기록 자가 진단장치(on-board diagnostics, OBD)에 기록된 가속 페달 위치(accelerator pedal position) 값을 읽어 시동 키 조작 후 가속 페달을 완전히 떼었을 때까지

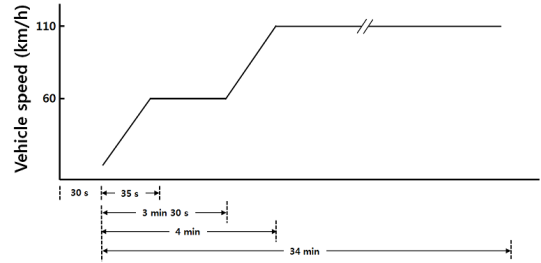


Fig. 3. Vehicle speed profile for cold weather drivability test according to CEC M-11-T91 test method

걸린 시간으로 하였다.

저온 주행성능 평가는 Fig. 3과 같이 규정된 속도로 차량을 주행하면서 차량의 속도가 규정된 속도를 따라가지 못하는 현상(surge), 연료가 실린더에서 연소되지 못하고 그대로 배출되는 현상(misfire) 및 surge 현상 발생시 규정된 속도를 유지하기 위한 가속 페달 조작(pedal adjust) 발생 횟수를 분 단위로 기록하여 평가하였다. Surge 현상은 OBD에 기록된 차량 속도로 확인하였고, misfire 현상은 엔진 배기매니폴드에 실린더별로 온도계(K-type)를 설치하여 확인하였으며, pedal adjust 현상은 시험 중 운전자가 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조류 유래 바이오디젤 품질 특성

미세조류 *Tetraselmis* sp.로부터 유래된 BD100에 대한 물리화학적 분석 결과를 Table 3에 나타내었다.

대두유, 폐식용유, 유채유, 면실유, 팜유 및 자트로파유 등으로부터 유래한 바이오디젤¹⁸⁾과 비교할 때 미세조류로부터 유래한 바이오디젤이 연료적 특성에서의 가장 큰 차이를 보이는 것은 유동점, 저온 필터 막힘점 등과 같은 저온 연료 특성으로 나타났다. 바이오디젤의 저온 연료 특성은 바이오디젤을 구성하는 FAME의 탄소 사슬 길이와 탄소-탄소 간 이중 결합 함량에 영향을 받는다.

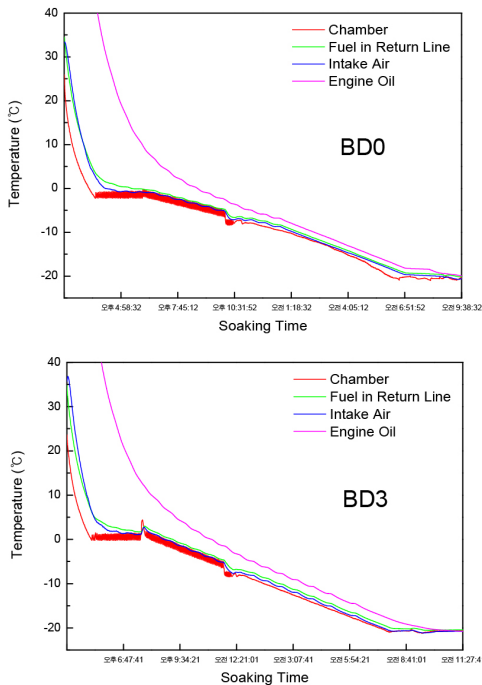


Fig. 2. Temperature profiles during soaking in the cold chamber

일반적으로 바이오디젤을 구성하는 성분의 탄소가 감소할수록, 탄소 수가 같을 때는 이중 결합 성분의 함량이 증가할수록 저온 연료 특성이 개선된다¹⁴⁾.

미세조류 유래 바이오디젤을 구성하고 있는 개별 FAME 조성을 알아보기 위하여 Agilent 7890 Series gas chromatograph를 이용하여 분석하였으며(Fig. 4), 개별 FAME 조성을 Table 4에 나타내

Table 3. The physicochemical characteristics of biodiesel derived from microalgae (*Tetraselmis* sp.)

Item	Value	
FAME content (wt.%)	98.1	
Flash point (°C)	174	
Kinematic viscosity (40°C, mm ² /s)	3.769	
Carbon residue (wt.%)	0.024	
Sulfur content (mg/kg)	9.92	
Ash content (wt.%)	0.001	
Copper strip corrosion (50°C, 3 h)	1a	
Cold Filter Plugging Point (°C)	7.0	
Density (15°C, kg/m ³)	884.0	
Water content (wt.%)	0.013	
Total contamination (mg/kg)	6.7	
Acid value (mg KOH/g)	0.316	
Total glycerol (wt.%)	0.032	
Monoglyceride content (wt.%)	0.071	
Diglyceride content (wt.%)	0.01 ↓	
Triglyceride content (wt.%)	0.01 ↓	
Free glycerol (wt.%)	0.013	
Oxidation stability (110°C, h)	16.38	
Methanol content (wt.%)	0.01 ↓	
Alkaline metals (mg/kg)	(Na + K)	0.1 ↓
	(Ca + Mg)	1.53
Phosphorus content (mg/kg)	0.1 ↓	

었다.

Table 4에서 보는 바와 같이 미세조류 유래 바이오디젤은 저온 연료 특성이 열악한 palmitic acid methyl ester (C16:0 FAME)의 함량이 약 27 wt.%로 가장 높았고, oleic acid methyl ester (C18:1 FAME), linoleic acid methyl ester (C18:2 FAME), linolenic acid methyl ester (C18:3 FAME)의 순으로 함량이 높았으며 이들 주요 4가지 성분이 약 76 wt.%를 차지하였다.

Palmitic acid methyl ester의 함량이 가장 높기 때문에 저온 연료 특성인 저온 필터 막힘점은 7°C로 분석되어, 유채유, 대두유 유래 바이오디젤보다는 높고, 면실유 유래 바이오디젤과 비슷한 수준이며 팜유유래 바이오디젤보다는 낮은 특성을 나타내었다.

또한 미세조류 유래 바이오디젤은 이들 주요 4종의 FAME 성분 외에 15종의 FAME 성분을 확인하였고, 일반적으로 약 13종의 FAME 성분으로 구성되는 대두유, 유채유 및 팜유 유래 바이오디젤과 비교하여 다양한 성분으로 구성되어 있음을 확인하였다. 또한 FAME 표준물질로 확인되지 않은 미지 성분이 약 15 wt.% 정도로 확인되었다.

동식물성에서 유래한 바이오디젤과 미세조류로부터 유래한 바이오디젤의 조성 중 특이할 만한 사항은 미세조류 유래 바이오디젤에 γ -linolenic acid methyl ester (C18:3n6 FAME)가 존재할 수 있다는 점이다¹³⁾. 본 연구에 사용된 *Tetraselmis* sp.

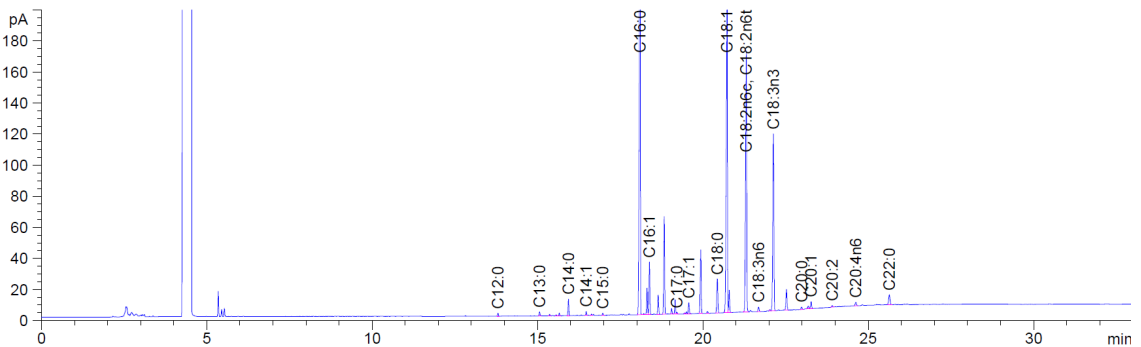


Fig. 4. Composition distribution of fatty acid methyl ester in biodiesel derived from microalgae (*Tetraselmis* sp.)

Table 4. Analytical information of GC analysis for BD100

Retention time (min)	Types of FAME	Peak area (pA·s)	Content (wt.%)
13.801	C12:0	2.88224	0.12
15.058	C13:0	4.55590	0.20
15.930	C14:0	17.00692	0.74
16.468	C14:1	3.78210	0.16
16.967	C15:0	2.10354	0.09
18.095	C16:0	621.43915	26.86
18.381	C16:1	60.94116	2.63
19.211	C17:0	2.09717	0.09
19.571	C17:1	14.13990	0.61
20.432	C18:0	48.74155	2.11
20.725	C18:1	477.46808	20.64
21.308	C18:2	390.14697	16.86
21.680	C18:3n6	6.32499	0.27
22.128	C18:3n3	265.92026	11.49
22.979	C20:0	3.68972	0.16
23.269	C20:1	10.48944	0.45
23.907	C20:2	2.01085	0.09
24.619	C20:4	5.66142	0.24
25.634	C22:0	19.40301	0.84
-	Not identified	354.96874	15.35
Total		2,313.77311	100.00

유래 바이오디젤에는 약 0.27 wt.%의 γ -linolenic acid methyl ester가 함유되어 있음이 확인되었다.

3.2 미세조류 유래 바이오디젤 혼합연료의 연료 특성

미세조류 유래 바이오디젤이 혼합된 자동차용 경유의 차량 저온 시동성 및 주행성능을 평가하기 위한 BD3 및 대조군으로 사용된 BD0의 연료 물성을 Table 5에 나타내었다. Table 5에서 보는 바와 같이 몇 가지 항목을 제외하고 BD0와 BD3의 연료 물성은 거의 비슷한 수준으로 분석되었다. BD0와 비교하여 BD3는 저온 연료 특성인 유동점, 담점 및 저온 필터 막힘점이 다소 떨어지는 것으로 분석되었으며, 연소 특성을 나타내는 세탄가와 율활 특성을 나타내는 율활성은 다소 개선된 것으로 분석되었다.

Table 5. Fuel quality characteristics of BD0 and BD3

Item	BD0	BD3
Pour point (°C)	-31.0	-28.0
Cloud point (°C)	-6.0	-4.0
Flash point (°C)	66.0	66.0
Kinematic viscosity (40°C, mm ² /s)	2.76	2.77
Distillation (90%) (°C)	330.3	332.4
10% carbon residue (wt.%)	0.012	0.012
Water and sediment (vol.%)	0.01 ↓	0.01 ↓
Sulfur content (mg/kg)	5.22	5.43
Ash content (wt.%)	0.002	0.004
Cetane number	57.9	58.6
Copper strip corrosion (100°C, 3 h)	1	1
Cold Filter Plugging Point (°C)	-24.0	-21.0
Lubricity (HFRR) (μm)	348	312
Density (15°C, kg/m ³)	823.1	824.7
Polycyclic aromatic hydrocarbons (wt.%)	1.69	1.61
Aromatic hydrocarbons (wt.%)	19.97	19.36
Biodiesel content (vol.%)	0.0	3.02

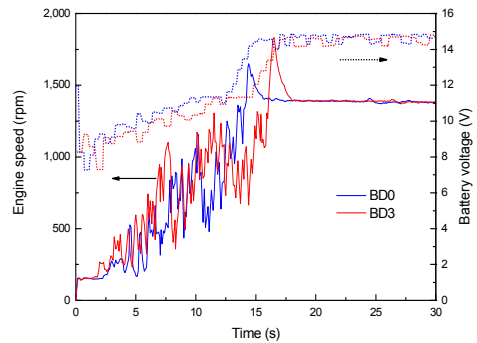


Fig. 5. Engine speed and vehicle battery voltage for BD0 and BD3 during cold weather startability test at -20°C

3.3 차량 저온 시동성 평가 결과

미세조류 유래 바이오디젤 함량에 따른 -20°C에서의 차량 저온 시동성 평가시 엔진 시동 후 시간 경과에 따른 엔진 회전수와 배터리 전압 변화 추이를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 엔진 시동 후 엔진 회전수는 BD0가 BD3보다 빠르게 증가하였으며, 차량의 배터리 전압은 BD0, BD3 모두 시동 초기 8 V 이하로 떨어졌다가 엔진 시동 후 15 V까지 회복되는 것을 알 수 있었다. 전압 회복 속도는 BD0가 BD3보다 빨라 BD0의 시동성이 더 우수한 것을 알 수 있었다.

차량 저온 시동성의 평가는 시동 스위치 조작 후 엔진 스스로 공회전이 가능한 시간으로 평가하였으며, 각 연료별 저온 시동성은 BD0와 BD3에 대하여 각각 12.8초, 16.3초로 평가되어 바이오디젤이 혼합됨에 따라 시동성이 다소 떨어졌으며, 이는 BD3가 BD0에 비해 유동점, 저온 필터 막힘점이 높기 때문으로 판단된다.

3.4 차량 저온 주행성능 평가 결과

BD0와 BD3에 대한 -20°C에서의 차량 저온 주행성능 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 BD0, BD3 모두 차량을 규정된 속도에 따라 운전하면서 차속이 감소되는 현상(surge)이 나타나지 않았으며, 따라서 pedal adjust 동작 또한 발생하지 않았다.

또한 차량 저온 주행성능 평가 항목 중 misfire 현상을 확인하기 위하여 배기매니폴드에 장착된 온도계를 통해 각 연소 실린더로부터 배출되는 배출가스 온도를 측정하였다(Fig. 7). 각 연소 실린더별로 배출가스 온도는 다소 차이가 났으나, 평가 연료에 따른 연소 실린더별 배출가스 온도 변화는 비슷한 양상을 나타냈으며 misfire 현상은 나타나지 않았다. 매니폴드 #1, #4의 온도가 #2, #3의 온도에 비해 낮은 경향을 나타냈는데 이는 엔진 연소 실린더 #1, #4의 위치가 #2, #3보다 바깥쪽에 위치하여 챔버 온도(-20°C)에 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 우리나라 서해안에서 배양된 해양 미세조류의 한 종인 *Tetraselmis sp.*로부터 지질을 추출하여 합성된 바이오디젤에 대한 연료 품질 특성과 차량 연료로서 경유와 혼합되었을 때 저온에서의 시동성 및 주행성능을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) *Tetraselmis sp.* 유래 미세조류 바이오디젤 품

질 분석 결과, 국내 바이오디젤 품질기준을 모두 만족하였으며 기존 대두유, 폐식용유 및 유채유 유래 바이오디젤보다 유동점, 필터 막힘점이 높아 저온 연료 품질 특성이 떨어지지만, 현재 국내에서 가장 많이 생산되는 팜유 유래 바이오디젤보다는 우수한 저온 연료 품질 특성을 나타내었다.

- 2) *Tetraselmis sp.* 유래 미세조류 바이오디젤을

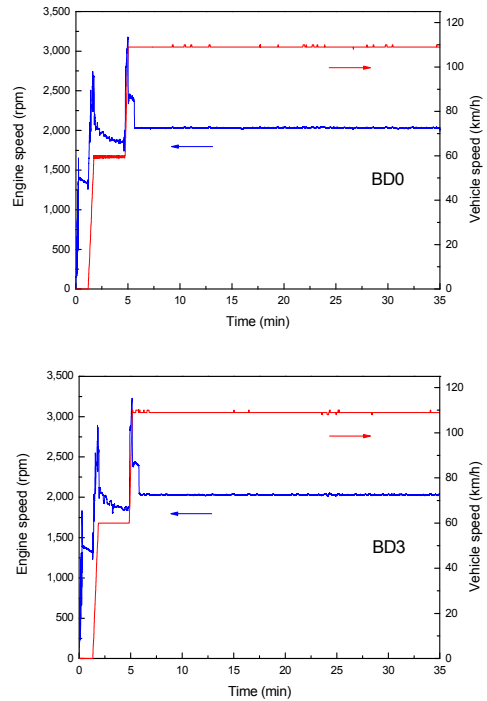


Fig. 6. Vehicle speed for BD0 and BD3 during cold weather operability test at -20°C

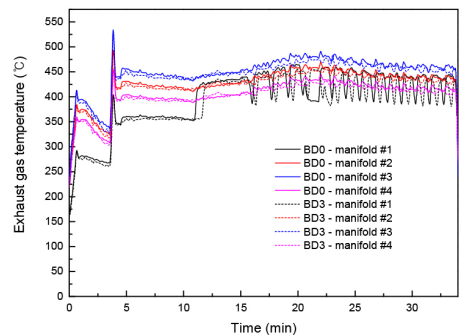


Fig. 7. Exhaust gas temperature in exhaust manifold for BD0 and BD3 during cold weather operability test at -20°C

자동차용 경유에 3% 혼합한 BD3는 -20°C에서 양호한 차량 저온 시동성과 주행성능을 나타내었다.

이상의 결과로 석유대체연료인 바이오디젤로서의 미세조류 활용 가능성을 확인할 수 있었으며, 상용 보급 기반 마련을 위해 차량 연료로서 장기간 차량 내구 성능평가와 상용 보급 기반 마련을 위한 관련 법령 검토가 필요하다.

후 기

본 논문은 정부(해양수산부)의 ‘해양미세조류 이용 바이오디젤 생산기술개발’ 연구의 지원을 받아 수행하였으며 이에 감사드립니다.

References

1. “The 2nd Basic Energy Plan”, 2014, Ministry of Trade, Industry & Energy.
2. “The 4th Basic New and Renewable Energy Plan”, 2014, Ministry of Trade, Industry & Energy.
3. “Act on the Promotion of the Development, Use and Diffusion of New and Renewable Energy”, Enforced Date 23, September, 2016, No. 14079.
4. “Petroleum and Petroleum Substitute Fuel Business Act”, Enforced Date 28, March, 2017, No. 14476.
5. D. D. Bala, K. de Souza, M. Misra, and D. Chidambaram, “Conversion of a variety of high free acid containing feed stock to biodiesel using solid acid supported catalyst”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 104, 2015, pp. 273-281.
6. D. L. Manuale, G. C. Torres, C. R. Vera, and J. C. Yori, “Study of an energy-integrated biodiesel production process using supercritical methanol and low-cost feedstock”, *Fuel Processing Technology*, Vol. 140, 2015, pp. 252-261.
7. G. Baskar and R. Aiswarya, “Trends in catalytic production of biodiesel from various feedstocks”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 57, 2016, pp. 496-504.
8. J. Y. Park, J. K. Kim, and C. K. Park, “A review of Biofuels Production Technologies from Microalgae”, *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 27. No. 4, 2016, pp. 386-403.
9. J. K. Poppe, R. Fernandez-Lafuente, R. C. Rodrigues, and M. A. Z. Ayub, “Enzyme reactors for biodiesel synthesis: Present status and future prospects”, *Biotechnology Advances*, Vol. 33, 2015, pp. 511-525.
10. A. Canet, K. Bonet-Ragel, M. D. Benaiges, and F. Valero, “Lipase-catalysed transesterification: Viewpoint of the mechanism and influence of free fatty acids”, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 85, 2016, pp. 94-99.
11. K. I. Min, C. K. Park, J. K. Kim, and B. K. Na, “Study on Potential Feedstock Amount Analysis of Biodiesel in Korea”, *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 27, No. 4, 2016, pp. 447-461.
12. S. M. Kim, D. K. Kim, J. S. Lee, S. C. Park, and Y. W. Rhee, “Esterification Reaction of Animal Fat for Bio-diesel Production”, *Clean Technology*, Vol. 18, No. 1, 2012, pp. 102-110.
13. R. Akgül, B. Kizilkaya, F. Akgül, and H. Erduğan, “Total Lipid and Fatty Acid Composition of Twelve Algae from Çanakkale (Turkey)”, *Indian Journal of Geo-Marine Science*, Vol. 44, No. 4, 2015, pp. 495-500.
14. N. Kokkinos, A. Lazaridou, N. Stamatis, S. Orfanidis, A. Ch. Mitropoulos, A. Christoforidis, and N. Nikolaou, “Biodiesel Production from Selected Microalgae Strains and Determination of its Properties and Combustion Specific Characteristics”, *Journal of Engineering Science and Technology Review*, Vol. 8, No. 4, 2015, pp. 1-6.
15. R. Piloto-Rodríguez, Y. Sánchez-Borroto, and E. A. Melo-Espinosa, “Assessment of diesel engine performance when fueled with biodiesel from algae and microalgae: An review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 69, 2017, pp. 833-842.
16. D. W. Shin, J. H. Bae, Y. Cho, Y. J. Ryu, Z. H. Kim, S. M. Lim, and C. G. Lee, “Isolation of New Microalgae, *Tetraselmis* sp. KCTC12236BP, and Biodiesel Production using Its Biomass”, *Journal of Marine Bioscience and Biotechnology*, Vol. 8, No. 1, 2016, pp. 39-44.
17. Co-ordinating European Council for the Development of Performance Test for Lubricants and Engine Fuel (CEC), “Cold Weather Performance Test Procedure for Diesel Vehicles”, CEC M-11-T-91.
18. J. K. Kim, E. S. Yim, C. H. Jeon, C. S. Jung, and B. H. Han, “Cold Performance of Various Biodiesel Fuel Blends at Low Temperature”, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 13, No. 2, 2012, pp. 293-300.