

디젤기관의 바이오연료 혼합율 및 바이오 온도변화 대한 배출가스 특성 연구

A Study on the Characteristics of Exhaust Gas Emission by Changing in Biofuel Ratio and Biofuel Temperature in Diesel Engine

최재훈* · 조상곤*†

Jae-Hoon Choi* and Sang-Gon Cho*†

(Received 18 February 2020, Revision received 06 April 2020, Accepted 06 April 2020)

Abstract : Biofuels are a form of renewable energy and vigorously require research to cope with the changes in international energy supply and demand. Although they only account for a few percent of the world's transport fuel to date, they are increasingly popular due to higher oil prices and an increasing concern with global warming and investments into them are therefore growing each year. Biofuels are renewable energy and need to be continuously researched to deal with changes in international energy. Therefore, the authors intended to investigate varying biodiesel fuel ratios and biodiesel fuel temperatures to present various uses for biofuels. Engine experiments were conducted with fixed fuel injection timing of BTDC 22°CA using a four-stroke six-cylinder in a direct injection diesel engine. The results of this study demonstrated that as the biodiesel fuel mixture increased, fuel consumption increased slightly, NOx increased, CO decreased slightly, and PM decreased significantly. When the biofuel temperature changed, NOx and PM increased slightly, brake specific fuel oil consumption increased and CO did not change significantly.

Key Words : Bio diesel fuel, Brake specific fuel oil consumption, NOx, CO, PM

1. 서 론

바이오연료 재생에너지 산업은 최근 국제에너지 변화에 직면하고 있어서 어려움을 겪고 있다. 지구의 온난화현상이 기후변화에 의해서 빠르게

진행하고 있어서 대기오염에 대한 규제가 새로운 에너지 필요성으로 변환되어 바이오연료에 대한 관심이 멀어지고 있다. 또한 산유국의 생산성 향상으로 인한 저유가 시대와 셰일오일의 채굴방식이 개발되어 화석에너지의 공급이 원활하여 바이

*† 조상곤(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-1937-8674) : 교수, 군산대학교 해양산업·운송과학기술학부 마린엔지니어링전공

E-mail: haerimho@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1845

*최재훈(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-1923-6449) : 학생, 군산대학교 해양산업·운송과학기술학부 마린엔지니어링전공 대학원

*† Sang-Gon Cho(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-1937-8674) : Professor, Marine Engineering Major, Division of Marine Industry Transportation Science and Technology Marine Production System, Kunsan National University.

E-mail : harimho@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1845

*Jae-Hoon Choi(ORCID:http://orcid.org/0000-0002-1923-6449) : Graduate Student, Kunsan National University.

오 대체에너지 개발 필요성을 저하시켰다. 그리고 각국의 에너지 안보에 대한 경각심도 낮아지고 있으며, 농산물 에너지원에 대한 식량부족과 가격 불안의 변동 문제 등도 바이오 대체에너지 개발을 둔화시키는 원인이 되고 있다. 하지만 바이오연료 재생에너지는 현재 대체 가능 에너지원으로 역할을 하고 있다. 특히 바이오연료는 지구 온난화 문제로 기후변화에 대한 글로벌 대응전략으로 탄소세 확보가 가능하고, 특히 우리나라는 원유의 전량을 수입에 의존하고 있기에 국가 에너지 비축량 확보를 지속 가능하기 위한 국가 에너지 전략에도 그 필요성이 있다고 생각한다.

현재 새로운 에너지원이 완벽하게 개발되기까지는 바이오연료로 그 역할을 지속 가능하도록 하며, 이는 오염물질 배출이 적은 신재생에너지 원으로 생각된다. 최근 국가정책 주도하에 에너지 개발에 인기 높은 태양광, 풍력은 선박이나, 운송수단에 사용하기는 아직 기술개발이 필요하다. 또한 바이오연료의 여러 문제점으로는 생산비용 단가가 높고 에너지 효율성이 바이오연료 혼합비율 그리고 저온 시동성 운전이 걸림돌로 작용하고 있지만 기술개발로 극복되리라 생각한다. 그래서 많은 연구자들에 의해 사용 가능하다고 하였으나, 바이오연료 비율과 저온 시동운전성을 극복하기 위한 바이오연료 온도를 상승시켜 배출특성을 연구하고자 한다.

전 세계적으로 탄소세 협약에 따라 기후변화^{1),2)}에 대한 저탄소 녹색성장을 추진하고 있으며, 탄소배출권제도 통해서 국제사회 협력을 위한 적극적인 활동을 하고 있다. 하지만 각국은 정치적인 문제를 최우선으로 하고 환경문제를 소홀히 하고 있어서, 급변하는 기후변화에 대한 환경문제 인식이 매우 중요하다고 생각한다. 따라서 날씨 변화에 대한 우리생활 주변에 발생하는 항만시설에서도 배출가스 연구³⁾에 의해서 항만시설에도 육상전원 공급설비(Alternative Maritime Power)등 단계적으로 도입되고 있다. 최근에 풍력발전이⁴⁾ 자연에서 만들 수 있는 에너지로 성장하고 있으며, 또한 태양광발전⁵⁾이 우리 생활주변에 많이 설치하고 있다. 그리고 운송수단에 직접적인 사용이 가

능한 바이오연료^{6,7)}도 국내에서 연구하고 있지만 국외에서 더 많은 활용을 하고 있다고 보고되어 있다. 이에 따라 우리 일상생활에서 많이 사용되는 기관에 대한 연구가 필요하였고, Kim⁸⁾, Cho⁹⁾는 연료온도에 대하여 연구하였다. 또한 Yoon¹⁰⁾은 배기배출물에 대한 바이오디젤유의 영향에 대하여 연구하였고, Lim¹¹⁾은 기관의 습도특성에 대하여 연구하였다. 그리고 소형 선박용 디젤엔진에서 엔진조기화 세팅을 통한 연소성능 및 배기배출물 개선에 관한 연구 등 있다.¹²⁾

본 연구는 디젤기관에 바이오연료 혼합율과 바이오연료 온도를 변화시켜서 기관의 배기배출물 특성에 미치는 영향을 분석·고찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 기관 실험장치

직접분사식 디젤기관의 실린더 연소실 압력측정은 첫 번째 실린더에 압전식(Piezo-electric type) 압력변환기를 설치하였으며, 압력증폭기를 통해 데이터 취득 장치로 모니터링 하여 저장 취득하였다. 연료소비율은 용적식 유량계를 사용하였다. 기관에 공급하는 흡입공기량의 계측은 오리피스식 공기유량계를 사용하였고, 가열기를 Fig. 1과

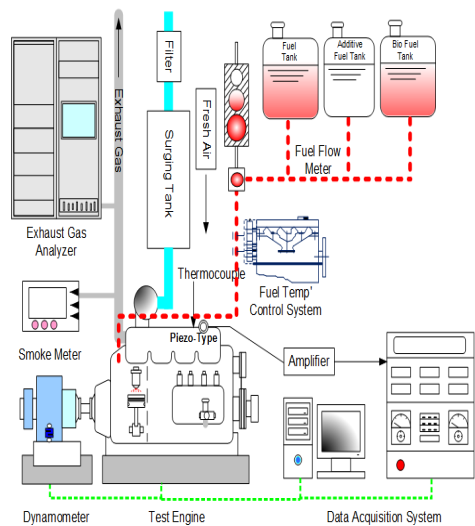


Fig 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Specification of test engine

Item	Specification
Cylinder number	6
Cooling type	Water-cooled
Cycle	4
Injection type	Direct injection
Bore×Stroke (mm)	102 × 100
Piston displacement	5,393(cc)
Max. output	145PS / 3,200 rpm (35kgm / 2,000 rpm)
Test engine condition	110PS / 1800 rpm
Compression ratio	17.5 : 1
Fuel injection timing	BTDC 22°CA
Fire order	1-5-3 - 6-2-4
Injection nozzle	Multi(4-φ 0.32mm)
Injection pressure	195kg/cm ²

Table 2 Korea Petroleum quality

Item	Test fuels	
	Diesel fuel	Bio fuel 100
Specific gravity(15/4℃)	0.8342	0.8752
Kinematic viscosity (cSt@40℃)	2.67	3.754
Flash point(℃)	75℃	128℃
Sulfur(%)	0.04	0
Water(%)	0	0.1387
Lower heating value(MJ/kg)	42.8	36.76
Carbon(wt.%)	85.83	77.29
Hydrogen (wt.%)	13.82	12.68
Nitrogen (wt.%)	0.16	0.08
Oxygen(wt.%)	0	9.7
Cetane number	51.4	58.67

같이 설치하여 일정하게 공급하였다. 그리고 기관의 흡입 측에 서지탱크(Surge tank)를 설치하여 흡입의 흐름이 균일하도록 하였다. 또한 기관에서 배출되는 배기가스는 배기가스 라인 가장 가까운 위치에 온도를 유지하도록 보온 설치하여 배기 배출물 분석기를 사용하였고, 기관의 출력은 와류형 전기동력계를 사용하여 로드셀 센서에 의해 부하별로 측정하였다. 본 실험기관은 직접 분사식 디젤기관으로 실험장치도는 Fig. 1에, 주요 제원은 Table 1에 각각 나타내었다.

2.2 실험방법

바이오연료 온도를 일정하게 조절하기 위한 기관의 회전수와 부하상태를 고려하여 적절한 온도 조절장치가 연료의 가열 및 냉각시스템을 조절하도록 구성하였다. 디젤연료 및 바이오연료가 연료 시스템으로 공급 후에 연료펌프에서 분사하여 남은 연료를 재순환하는 장치를 구성하였으며, 냉각장치는 1차, 2차 관을 통하여 기관으로 공급하였다. 또한 가열기를 설치하여 온도를 일정하게 유지하여 오차가 발생하지 않도록 정밀 가열시스템 및 냉각시스템을 구성하였다. 바이오연료 온도 조

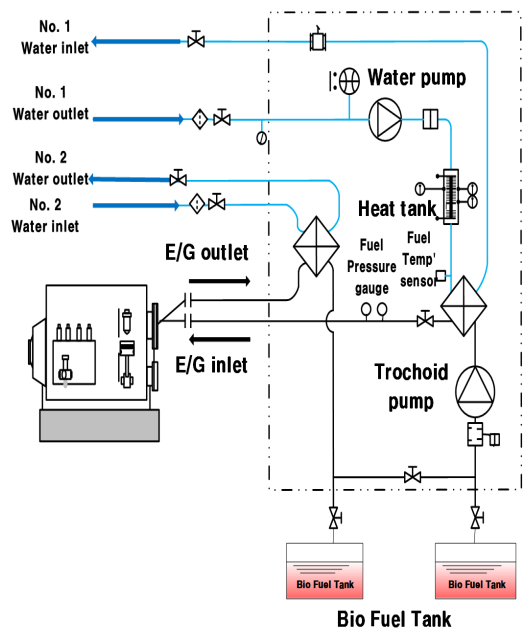


Fig. 2 Schematic diagram of bio fuel temperature control system

절장치는 Fig 2, 디젤기관 실험연료는 Table 2에 구성하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연료소비율

Fig. 3은 실험엔진 회전수 1,800 rpm에서 바이오연료비율과 바이오연료 온도변화에 따른 연료 소비율을 나타낸 그래프이다. 연료소비율은 Fig. 3 x축에는 (a), (b), (c) 및 (d)에 보면, 동일한 연료유

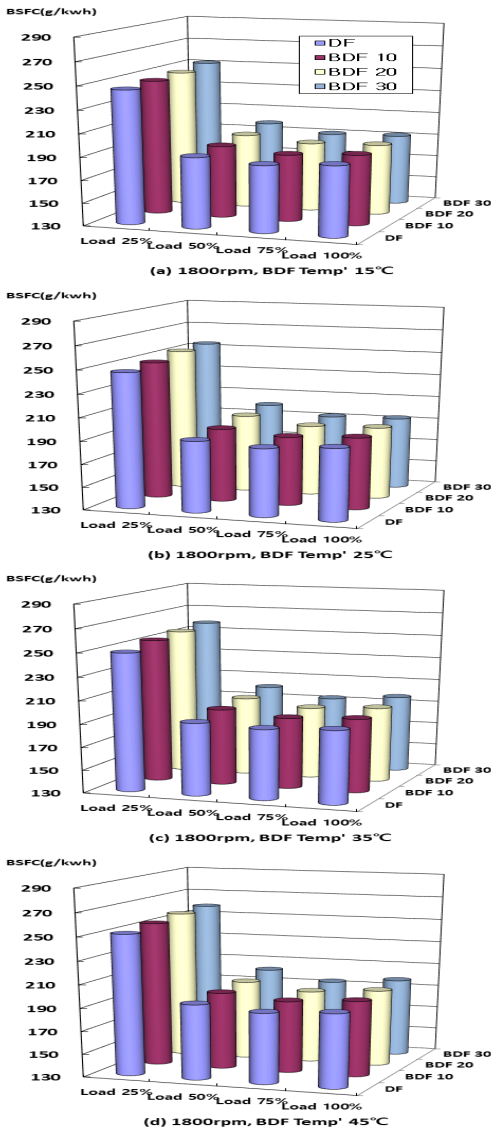


Fig. 3 Brake specific fuel consumption on bio fuel temperature and bio fuel ratio at 1,800 rpm

혼합비율과 온도 하에서 부하가 증가할수록 엔진 출력당 연료소비율은 일정하게 감소하는 경향을 나타내고 있으며, Fig. 3 z축에는 바이오연료 온도 변화가 15°C에서 25°C, 35°C, 45°C로 증가하면서는 약간씩 증가하였다. Fig. 3(d) 부하 100%에서 z축에 바이오연료 비율에 대한 DF 온도 기준으로 평균증가율을 살펴보면, 15°C 0.24%, 25°C 0.26%, 35°C 1.19%, 45°C 1.44% 증가하는 경향을 알 수 있었다. Fig. 3(d) 부하 100%에서 z축에 바이오연료 15°C 온도에 대한 기준으로 평균증가율을 살펴보면, 25°C 0.61%, 35°C 1.71%, 45°C 2.27%로 증가하는 경향을 알 수 있었다. 바이오연료 비율 증가로 인한 연료소모율은 약간씩 증가하였으며, 또한 바이오연료 온도가 증가함에 따라서 약간 증가하였는데, 그 이유는 Table 2에 저위발열량 및 탄소량 그리고 산소함유량과 세탄지수에 의한 영향이며, 특히 디젤연료에 비하여 바이오연료의 발열량이 약 14% 낮음으로 인하여 증가하였다고 생각된다. 전체적인 바이오연료 비율과 온도 상승 비율이 연료소비율에 큰 영향이 없이 사용 가능함을 알 수 있었으며, 바이오연료에 대한 무더운 여름 및 추운 겨울에도 적절한 바이오연료 온도를 조절하여 산업용 및 비상용 발전기에 적용하여 배기가스 대기오염 저감뿐만 아니라 탄소배출권 확보에도 좋은 장점이 되리라 생각된다.

3.2 질소산화물(NOx)

Fig. 4는 NOx 배기배출물 그래프이며, 기관회전수 1,800 rpm에서 Fig.4 (a), (b), (c), (d) 바이오연료 온도가 상승하면서 부하 0~100%로 증가하면서 많이 증가하였고, 바이오연료 온도가 상승하면 증가하는 것을 알 수 있었다. Fig. 4 (a), (b), (c) (d)에는 바이오연료 온도변화가 15°C에서 25°C, 35°C, 45°C로 증가하면서는 약간씩 증가하였다. Fig. 4(a)~(d) 부하 100%에서 바이오연료 15°C 온도에 대한 기준으로 평균증가율을 살펴보면, 25°C 3.16%, 35°C 12.61%, 45°C 13.56%로 많이 증가하는 경향을 알 수 있었다. 질소산화물특성은 흡입공기와 연료가 혼합 고온 반응하여 생성하는데,

3.3 일산화탄소(CO)

Fig. 5는 일산화탄소 그래프이며, 기관회전수 1,800 rpm에서 Fig. 5 (a), (b), (c) (d) 부하 0~100%로 증가하면서 따라 25% 증가, 50%, 75% 감소하였다가 다시 100%에서 증가하였다. 바이오연료 혼합비율도 비슷한 경향을 알 수 있었으며, 바이오연료 온도가 상승하였을 때도 부하에 따라 비

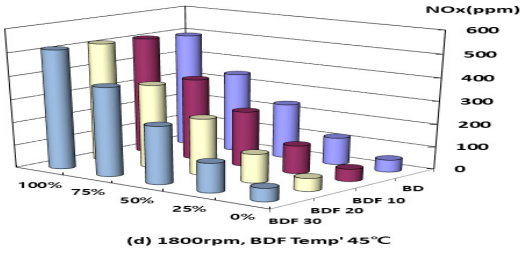
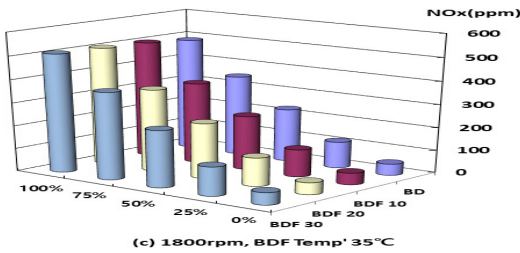
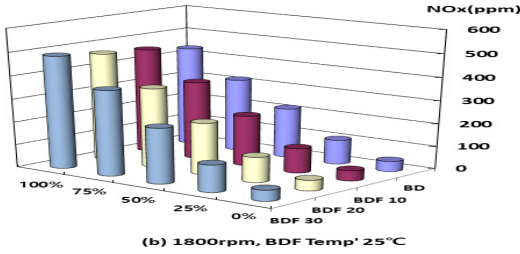
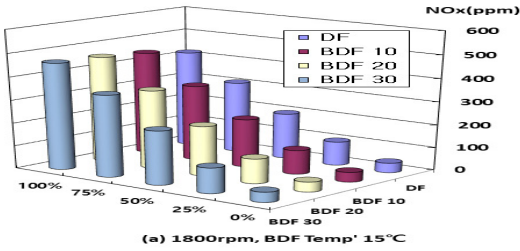


Fig. 4 NOx emission characteristics of bio fuel temperature and bio fuel ratio at 1,800 rpm

저부하보다 고부하 상태에서는 분사되는 연료가 많이 배출되는 특성이 있어서 바이오연료 온도의 증가로 인한 실린더 내의 화염평균온도가 상승하므로 발생이 촉진되었다고 판단된다. 또한 바이오연료 비율 증가로 약간 증가하는 경향은 연소속진으로 연소실 온도 증가로 인한 영향으로 생각된다.

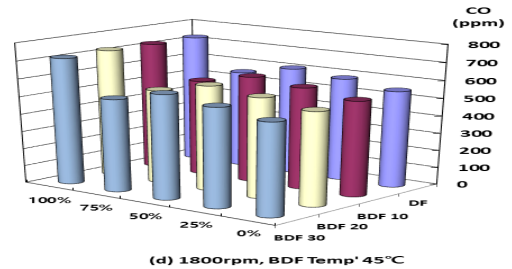
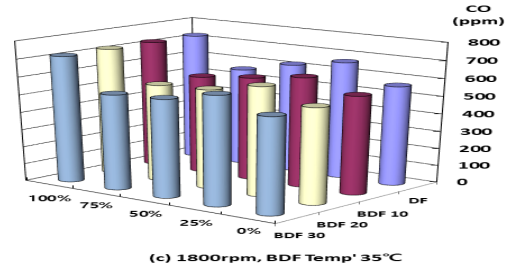
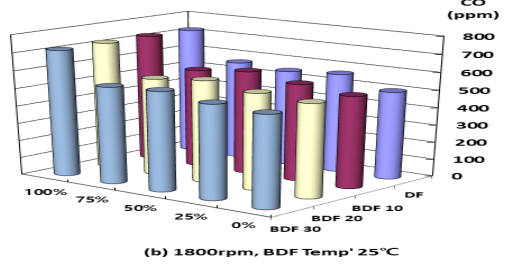
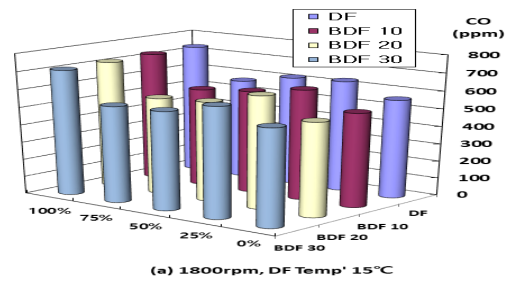


Fig. 5 CO emission characteristics of bio fuel temperature and bio fuel ratio at 1,800 rpm

슷한 경향을 확인할 수 있었다.

Fig. 5 부하 100%에서 z축에 바이오연료 비율에 대한 온도 기준으로 평균증가율을 살펴보면, (a) 15°C 2.09%, (b) 25°C 0.28%, (c) 35°C 0.71%, (d) 45°C -0.69% 약간씩 감소하였으나, Fig. 5(a)~(d) 부하 100%에서 바이오연료 15°C 온도에 대한 기준으로 평균율을 살펴보면, 25°C -0.26%, 35°C -0.03%, 45°C 0.12%로 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 일산화탄소는 탄화수소계 연료의 불완전 연소로 인하여 연소의 중간 단계에서 많이 생성하는 화합물질로서 압축연소에서는 생성되는 양은 공기 과잉율과 연소온도 그리고 연소실 형성에 따른 연료와 공기의 균질성에 의한 종합적인 함수 관계가 있다. 직접분사식 압축기관에서 초기 분무연소 기간 동안에 비 희박 화염 영역과 희박화염 영역 공간 사이에서 생성된다.

그 이유는 연소실 연소온도에 따라 국부적인 온도가 충분이 높지 않으므로 산화반응이 거의 발생하지 않기 때문으로 생각된다. 그리고 희박화염에서 중간 생성물로 발생하는 일산화탄소는 산소농도와 가스농도가 충분하기 때문에 바로 산화되어지나 분무의 중심과 실린더 벽면 근처에서는 국부적인 산소농도와 연료 및 공기의 혼합조건 그리고 국부적인 가스온도로 일산화탄소를 완전히 산화시킬 수 없는 상태가 되어서 많이 발생된다. 그 이유는 일산화탄소 배출가스는 연소상태가 불완전한 연소로 인하여 생성되는데, 부하 100%에서 급증하고, 부분부하에서도 증가하였는데 이것은 산소과잉 상태일지라도 부분 화산연소가 좋지 않으므로 인한 불완전 연소로 연소가스 온도가 낮아지기 때문으로 생각된다.

3.4 이산화탄소(CO₂)

Fig. 6은 이산화탄소 배출물 그래프이며, 기관 회전수 1,800 rpm에서 Fig.4 (a), (b), (c) (d) 부하 0~100%로 증가하면서 따라 크게 증가하였고, 바이오연료 혼합비율이 증가하면서도 증가하였다. 그리고 바이오연료 온도가 상승하면서도 증가하는 것을 알 수 있었다.

이산화탄소는 연소실에 흡입공기와 분사된 연료

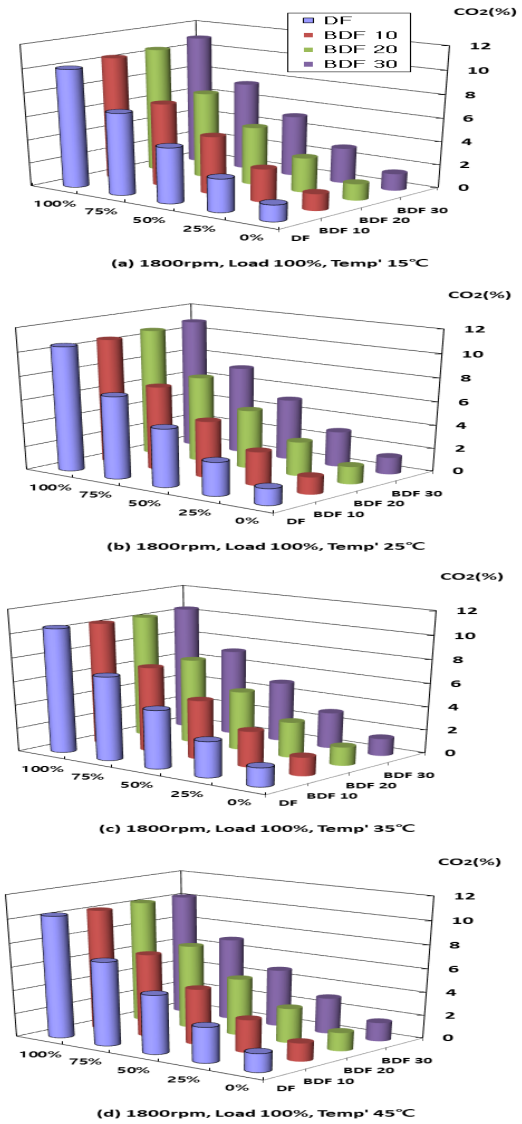


Fig. 6 CO₂ emission characteristics of bio fuel temperature and bio fuel ratio at 1,800 rpm

중의 탄소와 화합하여 연소함으로써 발생되는 생성물질로 연료의 연소효율에 의해서 많은 영향이 미치므로 연소되는 연료의 양이 많을수록 배출되는 배출가스는 증가된다. 그러므로 부하영역에 따라서 소모되는 연료량에 의한 최대로 발생된다. 그러므로 엔진에 따라서 연소가 가능한 영역 내에서 완전히 형성된다고 할 수 있다. Fig. 6 (a),

(b), (c), (d)에는 바이오연료 온도변화가 15℃에서 25℃, 35℃, 45℃로 증가하면서도 비슷한 경향을 파악할 수 있었다. 이산화탄소는 모든 영역에서 부하가 증가하면서 많이 배출되었는데, 그 원인은 부하가 증가하면 할수록 연료소비량이 증가하였고 또한 불완전연소가 증가하여 발생된다고 생각된다. 하지만 Fig. 6 (c), (d)에서는 바이오연료 온도가 증가하면서도 이산화탄소 배출물이 약간 감소하였는데, 이것은 바이오연료 비율이 연료온도 상승으로 인한 세탄값 그리고 함산소성분의 영향으로 인한 연소실의 연소조건이 상대적으로 양호하여 감소하였다고 생각된다.

3.5 입자상 물질(PM)

Fig. 7 (a), (b), (c) 및 (d)에서, 부하가 0~100%로 증가하면서 많이 증가하였고, Fig. 7 x축을 보면 BDF 10, BDF 20 및 BDF 30으로 바이오 혼합 비율이 증가하면서 매연미립자가 감소하였고, Fig. 7 부하 100%에서 z축에 바이오연료 비율에 대한 온도 기준으로 평균감소율을 살펴보면, (a) 15℃ 3.95%, (b) 25℃ 3.39%, (c) 35℃ 2.99%, (d) 45℃ 2.28% 감소하였으며, 바이오연료 온도가 상승하면서 감소율이 감소하였다. Fig. 7(a)~(d) 부하 100%에서 바이오연료 15℃ 온도에 대한 기준으로 평균증가율을 살펴보면 25℃ 4.34%, 35℃ 10.21%, 45℃ 15.35%로 많이 증가하는 경향을 알 수 있었다. 바이오연료 온도 증가로 인한 매연미립자는 증가되었다. 하지만 바이오연료 혼합율이 상승하면 기존 디젤연료에 비하여 탄화수소량은 적고, 산소함유량은 10%로 증가하여 연소실 연료입자는 완전연소 활성화로 인한 매연미립자가 감소되었다. 그 이유는 연소실 완전 연소활성화를 촉진하여 저감하였다고 생각된다.

4. 결론

최근 기후변화로 인한 우리 생활환경에 적용 가능하고 저탄소 및 탄소배출권에 대한 가능성을 제시하고자 하며, 디젤기관에 바이오연료 비율 및 온도변화에 대한 어떤 영향이 있는지 연구하였으며,

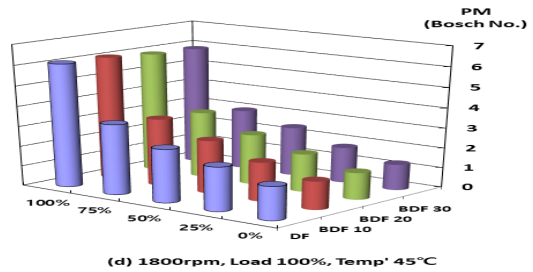
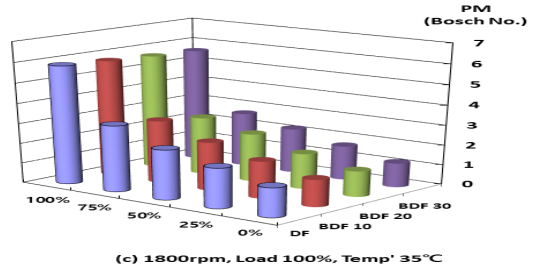
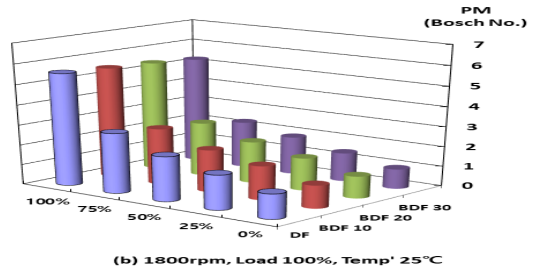
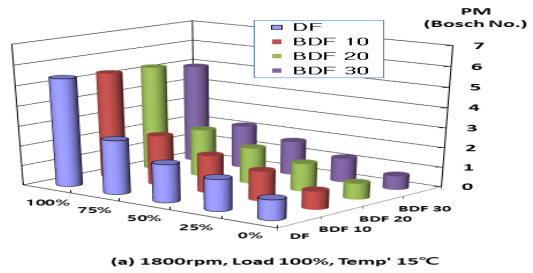


Fig. 7 PM emission characteristics by bio fuel temperature and bio fuel ratio at 1,800 rpm

연구결과는 다음과 같다.

- 1) 연료소비율은 부하가 증가하면서 엔진 출력당 연료소비율은 일정하게 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 바이오연료에 대한 온도 기준으로 평균증가율은 바이오연료 15℃ 온도에 대한 기준으로 25℃ 0.61%, 35℃ 1.71%, 45℃ 2.27%로 증가하였다.

2) 질소산화물의 배기배출물은 부하 100%에서 바이오연료 15℃ 온도에 대한 기준으로 평균증가율은 25℃ 3.16%, 35℃ 12.61%, 45℃ 13.56%로 많이 증가하였다.

3) 일산화탄소는 부하 100%에서 바이오연료 15℃ 온도에 대한 기준으로 평균증가율은 25℃ -0.26%, 35℃ -0.03%, 45℃ 0.12%로 큰 영향이 없다.

4) 이산화탄소는 모든 영역에서 부하가 증가하면서 많이 배출되었는데, 그 원인은 부하가 증가하면 할수록 연료소비량이 많아져 불완전연소가 증가하여 발생되었다.

5) 입자상 물질은 부하 100%에서 바이오연료 15℃ 온도에 대한 기준으로 평균증가율은 25℃ 4.34%, 35℃ 10.21%, 45℃ 15.35%로 많이 증가하였다.

Author contributions

J. H. Choi; Funding acquisition, Methodology, Resources, Visualization. S. G. Cho; Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Project administration, Supervision, Validation, Writing - original draft, Writing - review & editing.

References

1. Intergovernmental panel on climate change, 2015.
2. Y. H. Park, S. Y. Chung, Y. H. Son and W. K. Lee, 2010, "Investigation on Enhancing Efficiency in International Cooperation for Climate Change Adaptation of Republic of Korea", Journal of Climate Change Research, Vol. 1, No. 2, pp. 179-188. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2017.21.6.110>)
3. S. C. Yang, C. J. Moon, Y. H. Chang, S. Y. Soh, J. Y. Chung and E. S. Kim, 2006, "Internet Monitoring of Wind-photovoltaic Hybrid Generation System", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation

Engineers, Vol. 20, No. 4, pp. 43-48. (<https://doi.org/10.5207/JIEIE.2006.20.4.043>)

4. J. W. Park, C. U. Shin, G. D. Kim and J. H. Yoon, 2013, "A Study on Generation Characteristic of Building Integrated Photovoltaic System", Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 33, No. 3, pp. 75-81. (<https://doi.org/10.7836/kses.2013.33.3.075>)
5. K. H. Park, J. Y. Kim, C. J. Kim, J. H. Ko and H. I. Park, 2012, "The Effect of Bio-diesel Fuel on Industrial Diesel Engine", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 36, No. 1, pp. 72-77. (<https://doi.org/10.5916/jkosme.2012.36.1.72>)
6. J. K. Kim, G. Ainll, K. K. Song, J. Y. Jung and H. G. Kim, 2011, "An Experimental Study on Spray Characteristics of Diesel and Bio-diesel Fuel", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 35, No. 1, pp. 53-59. (<https://doi.org/10.5916/jkosme.2011.35.1.053>)
7. D. Y. Kim, I. E. Cho, S. W. Lee and S. I. Oh, 2007, "A Study on Spray and Combustion Characteristics Affected by Temperature of Bio-diesel Fuel", Journal of the Korea Society of Automotive Engineers, 07-S0082, pp. 533-538.
8. S. G. Cho, 2017, "A Study on the Characteristics of Combustion and Performance by Changing Temperature in Diesel Fuel", Journal of the Korea Society for Power System Engineering, Vol. 21, No. 6, pp. 110-116. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2017.21.6.110>)
9. S. K. Yoon, M. S. Kim and N. J. Choi, 2014, "Characteristics of Canola Biodiesel Fuel Blended with Diesel on the Combustion and Exhaust Gas Emissions in a Compression Ignition Diesel Engine", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 38, No. 9, pp. 1081-1086. (<https://doi.org/10.5916/jkosme.2014.38.9.1081>)
10. J. K. Lim and D. H. Kim, 2000, "Effects of Suction Air Humidity on the Combustion and

- Exhaust Emissions Characteristics in Diesel Engine", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 24, No. 4, pp. 421-426.
11. Y. H. Ryu, K. S. Jung and J. G. Nam, 2019, "Improvement of Combustion Performance and Exhaust Emissions Through Engine Initialization in Small Marine Diesel Engine", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 43, No. 7, pp. 504-510.
(<https://doi.org/10.5916/jkosme.2019.43.7.504>)
12. S, C, Kwon, Y. U. Yu, J. M. Park and Y. S. Lee, 2019, "A Basic Study on the Demand Analysis of Waiting Anchorage Using Anchorage Capacity Index", *Journal of the Korea Society of Marine Environment & Safety*, Vol 25, No. 5, pp. 519-526.
(<https://doi.org/10.7837/kosomes.2019.25.5.519>)