

커먼레일 디젤기관에서 바이오디젤 혼합 연료와 EGR율이 연소 및 배기특성에 미치는 영향

윤삼기¹, 최낙정^{2*}

¹한국지엠, ²전북대학교 기계설계공학부

Effects of the Combustion and Emission Characteristics in a CRDI Engine Biodiesel Blended Fuel with and EGR rate

Sam-Ki Yoon¹, Nag-Jung Choi^{2*}

¹GM Korea Company

²Division of Mechanical Design Engineering, Chonbuk National University

요약 본 연구는 4실린더 커먼레일 디젤 기관에서 바이오디젤 혼합 연료와 순수한 디젤연료를 사용하여 EGR율을 변화시켰을 때 연소 및 배기 특성을 디젤 연료만을 사용하였을 경우와 비교하기 위하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 일반적으로 많이 사용되고 있는 기관 회전 속도 2,000rpm에서 바이오디젤 혼합율 20%의 연료와 디젤 연료를 사용하여, EGR율이 다양하게 변화를 주어 실험을 하였다. 실험결과, 연소압력은 바이오디젤 혼합 연료와 디젤 연료 모두 EGR율이 증가할수록 감소하였으며, 도시 평균유효 압력은, 디젤 연료에 비하여 바이오디젤 혼합 연료가 더 높게 나타났다. 배출가스의 경우에, NOx는 EGR율이 증가할수록 디젤 연료에 비하여 바이오디젤 혼합 연료가 더 많이 배출되었다. 또한 NOx는 바이오디젤 혼합 연료와 디젤연료 모두 EGR율이 증가할수록 감소되었다. CO와 Soot, CO₂는 EGR율이 증가 할수록 증가하였으며, CO, Soot은 디젤 연료에 비해 바이오디젤 혼합 연료에서 더 작게 배출되었지만 CO₂는 더 많이 배출되었다.

Abstract An experimental study was performed to compare the characteristics of the combustion pressure and exhaust emissions in the case of using pure diesel when the EGR rate was changed in a CRDI 4-cylinder diesel engine with those using biodiesel blended and pure diesel fuel. In this study, the EGR rate variation were conducted at an engine speed of 2000rpm with fuel with a biodiesel blended rate of 20%. The combustion pressure of the biodiesel blended rate 20% and pure diesel fuels decreased with increasing EGR rate. The IMEP of biodiesel was higher than that of ULSD (Ultra low sulfur diesel). The emission results showed that the NOx emission of biodiesel blended fuel with increasing EGR rate was higher than that of ULSD. In addition, the NOx emission of biodiesel blended and diesel fuel decreased with increasing EGR rate. The CO and soot, CO₂ emissions increased with increasing EGR rate, and the CO and soot emissions from the biodiesel blended fuel were lower than that of ULSD but the CO₂ emissions were higher.

Key Words : Bio-diesel blended fuel, Combustion pressure, EGR, Exhaust emission, Indicated mean effective pressure(IMEP)

1. 서론

최근 지구 온난화 현상으로 심각한 사회문제가 대두

되고 있다. 온난화 현상의 주범인 온실가스의 영향으로 홍수, 폭우, 폭염, 태풍을 동반한 기후 이상 변화 현상이 나타나고 있으며, 온난화를 일으키는 주요인은 이산화탄

*Corresponding Author : Nag-Jung Choi(Chonbuk National Univ.)

Tel: +82-63-270-4765 email: njchoi@jbnu.ac.kr

Received February 6, 2014

Revised February 27, 2014

Accepted June 12, 2014

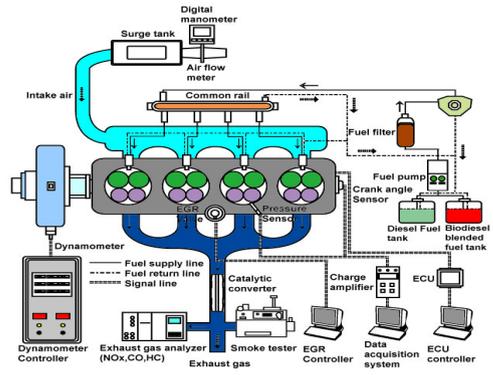
소로 알려져 있으며 저감하기 위한 연구를 진행하고 있다[1]. 또한 세계 각국은 자동차 배출가스의 대기 환경오염을 방지하기 위하여, 미국, 유럽 등 선진국에서는 Tier-II, EURO-V 등과 같은 배기가스 규제를 두고 있다. 이와 같이 자동차 배출가스 규제가 강화됨에 따라 기관 내부 구조를 변경하거나, 배기가스 후 처리 장치인 SCR (Selective Catalytic Reduction), DPF (Diesel Particulate Filter)등을 이용하여 배출가스를 최소화 하고 있으며[2], 또한 배출가스 발생을 원천적으로 줄이기 위하여 바이오 디젤(Biodiesel)유와 같은 대체 연료를 사용하여 디젤기관에 적용하는 연구를 진행하고 있다[3]. 특히 내연기관 중 디젤기관의 경우 가솔린기관 보다 연비가 우수하며, 일산화탄소 배출량이 현저히 적기 때문에 최근 디젤기관에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [4]. 그러나 디젤기관은 가솔린기관에 비하여 배기 배출물 중 입자상물질과 질소산화물 배출량이 상대적으로 많이 배출되는 단점이 있다. 따라서 입자상물질과 배기 배출 물을 저감하기 위한 여러 가지 방법 등이 모색되고 있으며[5], 그 방법의 하나로 식물성 바이오 연료와 기존의 디젤 연료를 혼합하여 사용하는 방법이 고려될 수 있다. 바이오 디젤유는 디젤연료와 물성치가 비슷하면서, 독성이 없고, 생 분해도가 높으며, 저유황 디젤 연료에 비하여 세탄가가 높은 장점을 가지고 있을 뿐만 아니라, 분자 구조 내에 산소를 포함하고 있어 배기 배출량을 저감 할 수 있다고 알려져 있다[6]. 그러나 바이오디젤유는 위와 같은 여러 가지 장점을 가지고 있음에도 불구하고, 디젤 기관에 적용하기 위해서는 해결해야 할 몇 가지 문제점을 가지고 있다. 그 예를 보게 되면 바이오디젤유의 발열량은 기존 디젤연료보다 7~12% 가량 낮고[7] 바이오디젤유를 사용할 경우 질소 산화물의 생성이 약 2~5% 증가된다고 보고되어지고 있다[8]. 따라서 본 연구에서는 위와 같은 문제의 해결 방법을 모색하기 위하여, 커먼레일 4행정 사이클 4실린더 디젤 기관에서 바이오 디젤 혼합 연료를 사용하여, EGR율을 변화시켰을 때, 연소 및 배기 오염 물질 배출 특성을 실험적으로 규명하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서는 4실린더 커먼레일 디젤 기관에서 EGR

율에 변화를 주었을 때 연소 및 배출가스 특성을 알아보기 위해 Fig. 1과 같은 실험 장치를 구성 하였다. 실험 장치는 터보차저가 장착된 4실린더 전자 제어식 커먼레일 디젤기관과 220V 전원에 의해서 구동되는 연료 펌프를 장착한 연료 공급 장치, 배기가스 성분 분석을 위한 배기가스 분석 시스템, 기관 동력의 제어를 위한 와전류 타입의 EC 동력계(DY-230KW) 등으로 구성하였다. 실험용 기관의 연소 압력은 예열 플러그가 장착된 자리에 압전 소자 방식의 압력 센서(Kistler, 6056a)를 장착하여 데이터를 DAQ보드(NI, PCI 6040E)모델을 사용하여 취득하였으며, 실린더 내 연소 압력은 연소 해석 장치를 사용하여 분석하였다. EGR은 배기가스가 수냉식 냉각기를 통하여 흡기로 들어가도록 하였으며, 재순환되는 가스 유량은 EGR제어 밸브를 컴퓨터로 듀티 제어하였다. 또한 배기가스 성분 분석을 위해서 그린라인(MK2)의 배기가스 측정 장비를 설치하였으며, 매연 검출을 위하여 부분 유량 채취 방식인 광투과 방식 매연 측정기(OPA-102)를 사용하여 측정하였다.



[Fig. 1] Schematic diagram of experimental apparatus

실험에 사용된 4실린더 커먼레일 디젤기관의 주요 제원은 Table 1과 같다.

[Table 1] Specification of test engine

Item	Specification
Engine type	4-Cylinder turbo DI
Bore×Stroke(mm)	81×96
Displacement(cc)	1979
Injection Procedure	1-3-4-2
Compression Ratio	17.7 : 1
Max.Power(kw/rpm)	82/4000
Max.Torque(Nm/rpm)	260/2000
Max.Speed(rpm)	4500
Fuel injection timing	ECU Control
Fuel pressure(MPa)	145

2.2 실험 방법

본 실험에서 식물성 바이오 연료인 카놀라(Canola)유와 디젤 연료를 2:8 체적비로 혼합하여 사용하였을 때 연소 및 배기 배출에 미치는 영향을 알아보기 위하여 EGR율을 제어 할 수 있는 EGR 제어 장치를 설치하였다. 본 실험에 적용된 기관 회전 속도는 일반적으로 사용 빈도가 높은 중속 구간인 2000rpm(부하30Nm)을 선정 하였으며, 실험의 신뢰도를 확보하기 위해서 기관 냉각수 온도는 343±3K, 흡입 공기 온도는 293±3K로 유지 하면서 실험을 수행 하였다. EGR율의 변화는 EGR프로그램을 제어하는 EGR제어용 컴퓨터에서 주어졌으며, EGR율은 0, 10, 20, 30%로 10%씩 변화를 주었다. EGR율 변화는 배기가스 분석기를 통하여 NOx 배출 값으로 실시간 확인 하였다. 그리고 연소 특성인 연소 압력과 열 발생율은 연소 해석 장치를 통하여 200cycle의 평균값을 취득하였으며, 배기 배출물 성분 분석을 위해서 연소 안정화를 기다린 후 그린라인(MK2)의 배기가스 분석기를 통하여 NOx 배출 값을 실시간 확인 하였다.

또한 매연은 부분유량 채취 방식인 광투과식 매연 측정기(OPA-102)를 사용하여 측정하였다.

[Table 2] Property of diesel and biodiesel fuel

Characteristics	Diesel fuel	Biodiesel
Flash point(K)	342~361	455
Kinetic viscosity (mm ² /s@313K)	2.8517	4.29
Pour point(K)	-296	-284
Sulfur(%)	0.005	0.001
Specific gravity(288K)	0.8269	0.88
Calorific value(MJ/Kg)	43.96	39.17
Oxygen(wt%)	0	11.02

[Table 3] Experimental and operating conditions

Engine speed(rpm)	2000	
Torque(Nm)	30	
Injection timing	ECU control	
Cooling water temp(K)	343±3	
Intake air temp(K)	293±3	
BD20	Diesel(%)	80
	Biodiesel(%)	20

Table 2는 본 연구를 수행하는데 사용된 디젤 연료와

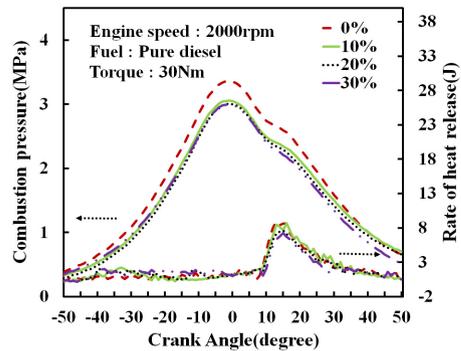
바이오 디젤의 물리적 특성을 비교한 것이고, Table 3은 실험에 대한 상세 내용을 나타내었다.

3. 실험 결과 및 고찰

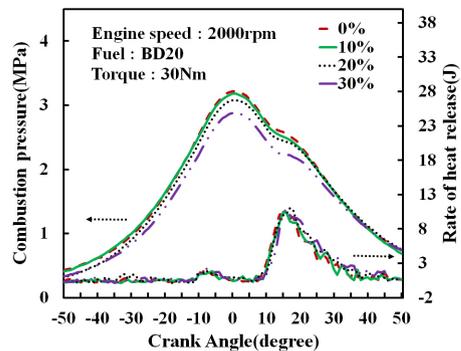
3.1 사용 연료에 따른 연소 특성

Fig. 2는 바이오디젤 혼합유 BD20과 디젤 연료 사용시 EGR율에 따른 연소 압력과 열 발생율을 나타낸 그림이다. Fig. 2(a)에서 디젤 연료의 연소 압력을 보게 되면 EGR율이 증가 할수록 감소되는 경향을 나타내고 있다. EGR율 10, 20, 30(%)일 때 각각 9.1, 10.6, 10.9(%)의 감소율을 보여 주고 있다.

Fig. 2(b)에서 BD20의 연소 압력은 Fig. 2(a)와 마찬가지로 EGR율이 증가 할수록 연소 압력은 낮아지고 있으며, EGR율 10, 20, 30(%)일 때 각각 1.2, 4.3, 10.2(%)의 감소율을 나타내고 있다.



(a) Pure diesel

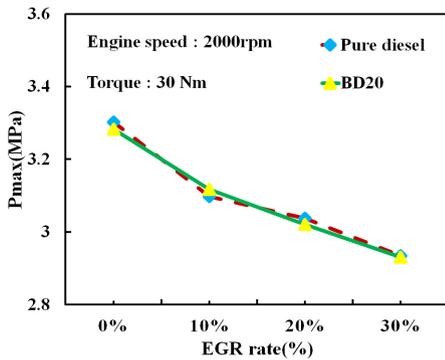


(b) Biodiesel 20%

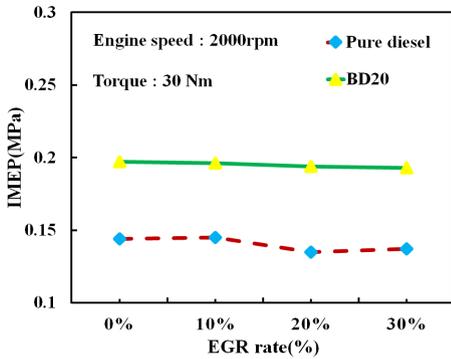
[Fig. 2] Effect of fuel used and EGR rate on the combustion characteristics (a) Pure diesel, (b) BD20

이때 디젤 연료와 BD20의 연소압력 감소율을 보면 디젤 연료 에서 감소율이 더 큰 것을 알 수 있다.

이와 같은 결과는 바이오디젤 혼합유 자체 내에 함산소를 포함하고 있고, 또한 세탄가가 디젤 연료보다 높기 때문에 배기가스를 재 순환 하여도 배기가스에 의한 연소 확산 저하 현상이 디젤 연료보다 작은 것을 확인 할 수 있다. 또한 Fig. 2(a)에서 열 발생율을 보면 EGR율이 증가 할수록 EGR 10, 20, 30(%)일 때 각각 0.9%증가 12, 15.7(%) 감소하는 경향을 보여 주고 있다. Fig. 2(b)에서는 EGR 10, 20, 30(%)일 때 각각 3.1, 5.5 8.3(%) 증가하고 있다. 이와 같이 BD20에서 열발생율이 증가하는 이유는 착화 지연에 의해서 열 발생율이 증가한 것으로 보인다.



(a) Peak combustion pressure



(b) IMEP

[Fig. 3] Effect of fuel used and EGR rate on the (a) Pmax and (b)IMEP

Fig. 3은 디젤 연료와 BD20의 EGR율에 따른 연소 최고 압력과 도시평균 유효 압력을 나타낸 그림이다. Fig. 3(a)의 연소 최고 압력을 보면 디젤 연료와 BD20 모두 EGR율이 증가 할수록 비슷한 경향을 나타내고 있으

며, 연소 최고 압력은 EGR율이 증가 할수록 감소하고 있다. 이는 EGR율이 증가 할수록 배기가스 재순환에 의한 연소실 내부 환경이 연소 확산 저하 현상으로 인하여 연소 압력이 떨어지는 것으로 판단된다. Fig. 3(b)는 EGR율에 따른 도시 평균 유효 압력을 나타낸 것으로, 그림에서 보는 바와 같이 EGR율이 증가 할수록 BD20은 변동율이 미미하나, 디젤 연료에서는 다소 낮아지는 경향을 보이고 있다.

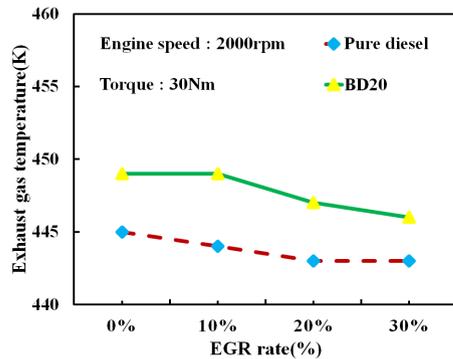
또한 디젤 연료와 BD20의 EGR율에 따른 결과 값은 BD20이 디젤 연료에 비해 평균 39% 정도 높게 나타나는 것을 알 수 있는데 이는 바이오 디젤유 자체 내에 포함되어 있는 함산소 영향으로 신기에 배기가스 혼합율이 증가하여도 연소 확산 현상에 미치는 영향이 디젤 연료에 비해 작기 때문인 것으로 보인다.

3.2 사용연료에 따른 배기 특성

Fig. 4는 디젤 연료와 바이오디젤 혼합유 BD20을 각각 사용하여 EGR율에 변화를 주었을 때 배기가스 온도 특성을 나타낸 그래프이다.

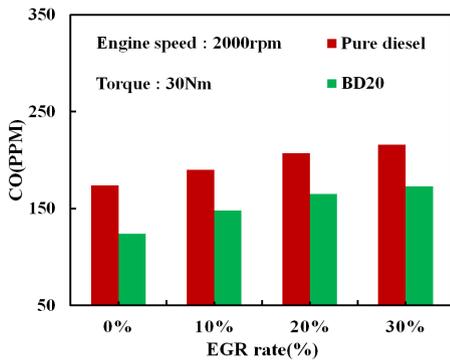
그래프에서 보는 바와 같이 두 연료 모두 EGR율이 증가 할수록 감소되는 경향을 나타내고 있다.

디젤 연료는 EGR율이 10, 20, 30(%) 증가할 때 각각 0.2, 0.4, 0.4(%)감소하고 바이오디젤 혼합유 BD20은 EGR율이 10, 20, 30(%) 증가할 때 각각 0, 0.4, 0.6(%) 감소하는 것으로 나타났다. 또한 바이오디젤 혼합유 BD20이 디젤 연료에 비해 높게 나타나고 있는데 이것은 함산소와 세탄가 영향에 의한 것으로 보인다.

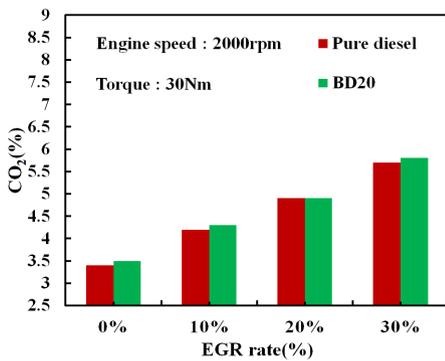


[Fig. 4] Effect of fuel used and EGR rate on the exhaust gas temperature

Fig. 5(a)는 일산화탄소 배출가스 특성을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 보면 EGR율이 증가 할수록 디젤 연료와 BD20 두 연료 모두 일산화탄소 배출량이 증가한 것으로 나타났다. 디젤 연료에서 EGR율이 10,20,30(%)로 증가할 때, 각각 9.1, 18.9, 24.1(%)증가하였으며, BD20에서는 EGR율이 10, 20, 30(%)로 증가할 때, 각각 19.3, 33, 39.5(%)증가하였다. 이와 같은 결과로 보아 배기가스가 재순환 하면서 혼합가스가 농후해져 배출량이 증가한 것으로 보이며 상대적으로 함산소가 포함된 BD20은 디젤 연료에 비해 배출량이 작은 것으로 보인다. Fig. 5(b)는 이산화탄소 배출가스 특성을 나타낸 그래프이며, 그래프에서 보면 두 연료 모두 EGR율이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났으며, EGR율 0, 10, 20, 30(%)로 증가할 때 BD20에서 2.9, 2.3, 0, 1.7(%) 더 높게 배출되었다. 이는 배기가스 재순환으로 인해 즉 이산화탄소 함량의 증가로 인해 증가하는 것으로 판단된다.



(a) CO Emission



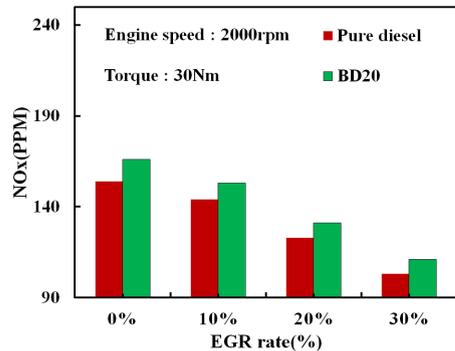
(b) CO₂ Emission

[Fig. 5] Effect of various pilot injection timing with EGR rate on the (a)CO and (b)CO₂ emissions

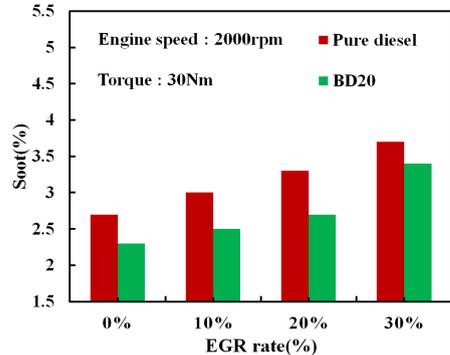
Fig. 6(a)는 질소산화물 배출가스 특성을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 보는 바와 같이 디젤 연료와 BD20 두 연료 모두 EGR율이 증가 할수록 배출량이 감소하는 경향을 나타낸다. 디젤 연료와 BD20의 배출량을 비교해 보면 EGR 0, 10, 20, 30(%)에서 각각 BD20인 경우 7.7, 6.25, 6.5, 7.7(%) 더 많게 배출된 것으로 보아 고온 고압 조건에서 질소 산화물 생성 조건에 더 부합된 것으로 판단된다.

Fig. 6(b)는 매연 배출가스 특성을 나타낸 그래프로서 EGR율이 증가 할수록 디젤 연료와 BD20 모두 증가하는 것으로 나타났다.

디젤 연료와 BD20의 배출량을 비교해 보면 EGR 0, 10, 20, 30(%)에서 각각 BD20인 경우 14.8, 16.6, 18.2, 8.1(%) 디젤 연료에 비해 작게 배출된 것으로 나타났다. 이것은 연료 자체 내에 함산소가 포함된 BD20이 확산 연소시의 산화 조건이 디젤 연료에 비해 더 좋기 때문에 배출량이 작은 것으로 생각된다.



(a) NOx Emission



(b) Soot Emission

[Fig. 6] Effect of various pilot injection timing with EGR rate on the (a)NOx and (b)Soot emissions

4. 결론

본 연구는 4행정 사이클 4실린더 커먼레일식 디젤 기관에서 바이오 디젤 혼합 연료에 EGR율의 변화가 기관의 연소 특성 및 배기 배출량에 미치는 영향을 조사하기 위하여 실험을 수행 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 연소 압력은 EGR율이 10, 20, 30(%)로 증가 할수록 디젤 연료에서는 9.1, 10.6 10.9(%) BD20에서는 1.2, 4.3, 10.2(%) 감소하였으며, 열 발생율은 디젤 연료에서 0.9%증가 12, 15.7(%) 감소하고 BD20에서는 3.1, 5.5, 8.3(%)증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 연소 최고압력은 EGR율이 증가할수록 디젤 연료와 BD20 모두 감소하는 경향을 보였으며 도시 평균 유효 압력은 디젤 연료에 비해 BD20에서 평균 39%정도 높게 나타났다.
- 3) 일산화탄소 배출 특성은 EGR율이 증가할수록 증가하는 경향을 나타냈으며, 디젤 연료에 비해 BD20의 배출량이 상대적으로 작았다. 이산화탄소 배출 특성은 EGR율이 증가 할수록 증가 하였으며, 디젤 연료에 비해 BD20에서 조금 높게 배출되었다.
- 4) 질소 산화물 배출 특성은 EGR율이 증가할수록 배출량이 낮아졌으며 디젤 연료에 비해 BD20의 배출량이 상대적으로 다소 높게 배출되었다.
매연 배출가스 특성을 보면 EGR율이 증가할수록 높게 배출되었으며 BD20에서 디젤 연료에 비해 낮게 배출되었다.

References

- [1] J.A Lim, Y.I Yoon, S.C Nam, S.K Jeong "Post-combustion CO₂ Capture with Potassium L-lysine", KAIS Vol. 14, No. 9, pp. 4635-4642, 2013
- [2] H. Yongsheng, B.B. David, L. Shuguang, J.P. Micheal and L. Jianwen, "Opportunities and Challenges for Clended 2-Way SCR/DPF After-treatment Technologies," SAE2009-01-0274, 2009
- [3] Young Taek Seo, Hyun Kyu Suh, Chang Sik Lee, "Spray and Combustion Characteristics on Biodiesel Blends with Diesel Fuel according to Split Injection System", 2007 KSAE fall Conference proceeding, pp. 638-643, 2007
- [4] S.K Yoon and N.J Choi, "The effects of partially premixed pilot injection timing on the combustion and emission

characteristics in a common rail diesel engine", KSPSE Vol. 17 No. 6, pp18~24, 2013.

- [5] S.C. Kim, "A Study on the Characteristics of Fuel Consumption and Emissions of Diesel Vehicles Using Engine Coolant Flow Rate On/Off Control", KAIS Vol. 14, No. 5 pp. 2069-2074, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.5.2069>
- [6] D.Y. Chang, J.H. Van Gerpen, "Determination of particulate and unburned hydrocarbon emissions from diesel engines fueled with biodiesel"SAE paper, 982527, 1998.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/982527>
- [7] A. Demirbas, "Relationships derived from Physical Properties of Vegetable Oil and Biodiesel Fuels", Fuel, Vo. 87, pp. 1734-1748, 2008
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2007.08.007>
- [8] C.S. Lee, S.W. Park, and S.I. Kwon, "An Experimental Study on the Atomization and Combustion Characteristics of Biodiesel-Blended Fuels", Energy&Fuels, Vol. 19, pp. 2201-2208, 2005
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ef050026h>

윤 삼 기(Sam-Ki Yoon)

[정회원]



- 2005년 8월 : 군산대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 ~ 현재 : 한국지엠

<관심분야>

자동차 내연기관 성능 개발 및 대체연료

최 낙 정(Nag-Jung Choi)

[정회원]



- 1995년 8월 : 한양대학교 기계공학 (공학박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 기계설계공학부

<관심분야>

자동차 내연기관 성능 개발 및 대체연료