

바이오디젤유를 사용하는 직접분사식 디젤기관의 내구특성

유 경 현* · 오 영 택

전북대학교 기계공학과

Durability Test of a Direct Injection Diesel Engine Using Biodiesel Fuel

Kyunghyun Ryu* · Youngtaig Oh

Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, Chonbuk 561-756, Korea

(Received 30 October 2003 / Accepted 7 November 2003)

Abstract : To evaluate the durability of direct injection diesel engine using biodiesel fuel, a small D. I. diesel engine was operated on a blend(BDF 20) of 20% biodiesel fuel and 80% diesel fuel for 200 hours. Engine dynamometer test was performed at a load of 90% and a speed of 1900 rpm to monitor the engine performance and exhaust emissions. Engine performance parameters and exhaust emissions were sampled at 1 hour interval for analysis. The combustion maximum pressure and the crank angle at this maximum pressure as a combustion variation factor were considered to study the combustion characteristics of BDF 20 in diesel engine during durability test.

As the results, the standard deviations and errors of combustion variation factors on BDF 20 were very little and combustion characteristics were very stable during the durability test. BDF 20 resulted in lower emissions of carbon monoxide, carbon dioxide, and smoke emissions with special increase of nitrogen oxides compared to diesel fuel. There was no also unusual change in engine oil composition from using BDF 20. Most of engine parts were clean and showed little wear, but soots were detected around the hole of fuel injector when BDF 20 was used in direct injection diesel engine for 200 hours.

Key words : Diesel engine(디젤기관), Biodiesel fuel(바이오디젤유), Exhaust emissions(배기배출물), Smoke(매연), Durability(내구성), NOx(질소산화물)

Nomenclature

- P_{max} : combustion maximum pressure, bar
- dP_{max} : maximum pressure rise rate, bar/°CA
- θ_{Pmax} : crank angle at combustion maximum pressure, °CA
- θ_{dPmax} : crank angle at maximum pressure rise rate, °CA

1. 서론

최근 석유에너지의 수급 불안으로 석유에너지를 대체할 대체에너지에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있는 실정이다. 이러한 대체에너지 중에서도 바이오디젤유는 재생가능한 연료로서 전세계 어느 곳에서든지 지역의 풍토에 맞는 농업생산물을 이용하여 생산이 가능하다는 장점이 있어 많은 관심을 가져왔다. 현재까지 연구결과들을 살펴보면 각국의 지역 농산물의 생산품에 따라서 채종유, 대두유, 팜유 등을 이용한 각기 다른 바이오디젤유들이 연구되어 왔다.¹⁻⁹⁾

*To whom correspondence should be addressed.
khryu87@hotmail.com

국내에서는 1990년대 중반부터 연구가 활발히 이루어져, 현재는 국가 정책차원에서 대체에너지의 실용화 평가사업으로까지 진행되고 있는 실정이지만, 아직도 에너지에 대한 석유의존도가 높은 국내의 현실을 감안한다면 많은 투자가 필요한 실정이다.

국내에서 생산되는 바이오디젤유는 국내 주요 농산물의 하나인 쌀의 가공부산물인 쌀겨와 수입산 대두유로부터 주로 생산되고 있다. 이 중에서도 대두유로부터 생산되는 바이오디젤유에 대한 연구는 많이 진행되어 왔으나 쌀겨로부터 생산되는 바이오디젤유에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

바이오디젤유는 디젤기관에 적용될 경우 경유와 성상이 비슷하여 기관의 특별한 변경없이 적용가능하고, 연료속에 다량의 산소를 함유하고 있어 매연저감에 효과적인 장점을 갖고 있다. 하지만, 점도가 경유의 경우보다 약간 높고 저온유동점이 높기 때문에 순수 바이오디젤유를 동절기와 같은 저온에서 사용하는 데는 어려움을 갖고 있다. 따라서, 바이오디젤유를 이용하기 위한 방법으로 경유 80%와 바이오디젤유 20%(추후 BDF 20으로 표기)를 혼합하여 적용하고 있고, 그에 따른 기관성능 평가도 완료되어 긍정적인 평가를 받고 있다.¹⁰⁻¹²⁾ 그러나, 쌀겨로부터 생산된 바이오디젤유에 대한 장기간 운전시의 내구성 평가가 이루어지지 않은 상태이다.

따라서, 본 연구에서는 바이오디젤유를 직접분사식 디젤기관에 장시간 적용할 경우 바이오디젤유에 대한 기관 성능 특성 및 배기배출물 특성을 파악하여 바이오디젤유에 대한 장시간 운전시의 대두되는 내구성을 평가하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치 및 연료

실험에 사용된 기관은 수냉식, 단기통, 4행정, 직접분사식 디젤기관이며, 시동모터에 의해서 시동이 되고 기관부하와 기관 회전속도는 엔진 동력계에 의해 임의로 조정할 수 있도록 하였다. 실험에 사용된 기관의 주요 사양을 Table 1에 나타내었다.

Table 2¹³⁾는 실험에 사용된 연료의 물성치를 나타낸 것으로, 바이오디젤유는 경유에 비해 낮은 발열

량을 갖고 있지만, 경유보다 세탄가가 높고 인화점도 높아 사용하기에 안전한 특성을 갖고 있다. 또한, 바이오디젤유는 탄소함량이 경유보다 적고, 경유가 갖고 있지 않은 산소를 약 1.61% 함유하고 있다.

Table 1 Specifications of test engine

Item	Specification
Engine model	ND130DIE
Number of cylinder	1
Bore × stroke	95 × 95(mm)
Displacement	673 (cm ³)
Compression ratio	18
Combustion chamber	Toroidal
Injection timing	BTDC 23°C
Coolant temperature	80±2°C
Injection type	Direct injection
Rated power	13PS/2400rpm

Table 2 Properties of test fuels

Item	Test results	
	Diesel fuel	BDF 20
Sulfur(wt. %)	0.031	0.025
Ash(wt. %)	<0.01	<0.01
Flash point(PM, °C)	74	78
Specific gravity(15/4 °C)	0.8373	0.8464
Pour point(°C)	-20.0	-12.5
Viscosity(50°C, cSt)	3.0	3.2
LHV(MJ/kg)	45.88	44.5366
Cetane number	51.4	53.6
CFPP(°C)	-20	-9
Carbon(wt. %)	85.83	84.63
Hydrogen(wt. %)	13.82	13.54
Nitrogen(wt. %)	0.16	0.18
Oxygen(wt. %)	0	1.61

2.2 실험 방법

실험에 사용된 연료는 상용연료인 경유 80%와 바이오디젤유 20%를 체적비율로 혼합한 BDF 20을 이용하였다. 장시간의 내구성 시험을 위해 엔진 동력계에 장착된 단기통 직접분사식 디젤기관을 이용하여 워밍업이 끝난 상태에서 기관의 최대 토크가 발생하는 기관회전속도 1900rpm에서 90% 부하로 200시간 이상 BDF 20으로 운전하였다. 각종 기관 성능 및 배기 배출물은 1시간 간격으로 취득하였

으며, 실험시의 냉각수 온도는 $80 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하였다.

또한, BDF 20이 배기가스 배출특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여, NO_x , CO , O_2 및 CO_2 는 전기화학적셀 방식의 배기가스분석기(Greenline MK 2)를 이용하여 측정하였으며, 배기가스 분석기 샘플링 중간에 필터를 장착하고 매연 입자를 여과한 후 측정하였고, 실험시간의 진행에 따라 새로운 필터로 교체하여 샘플링 값의 측정오차를 줄였다. 또한, 매연은 배기다기관으로부터 300mm 하류에 설치된 Bosch 타입의 매연측정기(HBN 1500)를 이용하여 1시간 간격으로 3회 반복 측정하였다. Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

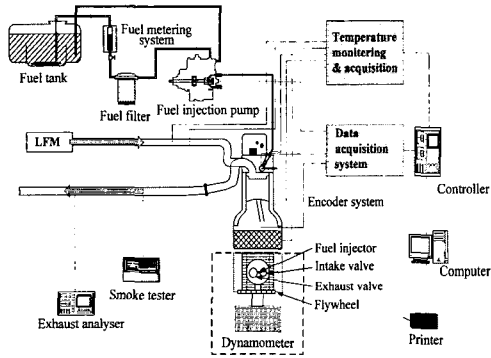


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 연소 특성과 제동연료소비율

Fig. 2는 1900rpm, 90%부하에서 BDF 20을 사용할 경우 연소변동특성을 파악하기 위하여 운전시간에 따른 연소실내 최고압력의 변화율을 나타낸 것이다. 최고 연소압력은 BDF 20을 사용할 경우가 경유만을 사용하는 경우보다 약간 높게 나타났으며, 200시간 이상 운전하여도 최대오차가 0.0663으로 내구성실험 초기시의 압력과 비슷하게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 3은 Fig. 1과 동일한 조건에서 운전시간에 따라 최고 연소피크압력이 발생할 때의 크랭크각도를 나타낸 것으로, 최대 압력이 발생하는 크랭크각도는 BDF 20을 사용할 경우가 경유만을 사용하는 경우보다 약간 낮게 나타났다. 이는 BDF 20의 세탄가

가 높기 때문에 착화지연기간을 단축시켰기 때문으로 생각된다. 또한, 장시간 BDF 20으로 운전하여도 최고 연소피크압력이 발생하는 크랭크각도에 대한 최대오차가 0.0317로 실험 초기와 거의 동일하게 나타났다.

Fig. 4와 Fig. 5는 Fig. 1과 동일한 조건에서 취득한 압력에 대한 압력상승율의 최대 압력상승을 값과 최대 압력상승을 값이 발생한 크랭크 각을 운전시간대별로 각각 나타낸 것이다. 최대 압력상승율도 최대압력에서처럼 경우만을 사용하는 경우보다 BDF 20을 사용하는 경우가 크게 나타났으며, 이에 대한 표준편차와 최대오차가 0.2402와 0.0137로 나타났다. 또한, 최대 압력상승율이 발생하는 크랭크 각도는 경우만을 사용하는 것과 비교하여 약간 낮게 나타났으며, 이에 대한 표준편차와 최대오차는 각각 0.5115과 0.0292로 나타났다.

이처럼 대체연료를 사용할 경우의 연소특성을 살펴볼 수 있는 연소변동인자인 최고 연소압력, 최대

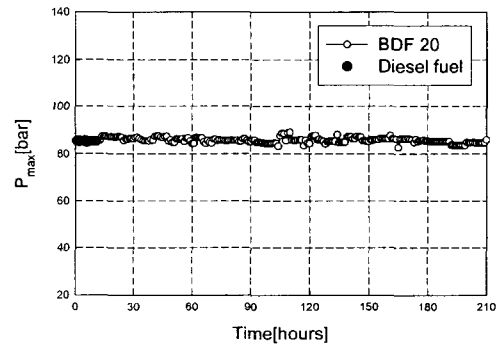


Fig. 2 Maximum pressure versus time variation with BDF 20

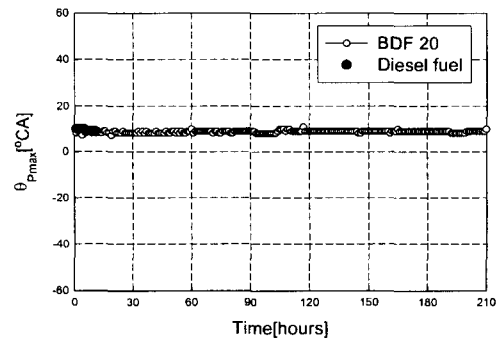


Fig. 3 Crank angle at maximum pressure versus time variation with BDF 20

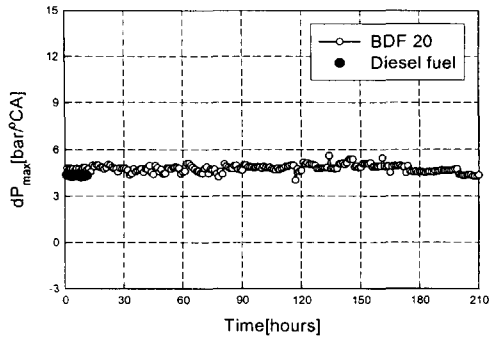


Fig. 4 Maximum pressure rise rate versus time variation with BDF 20

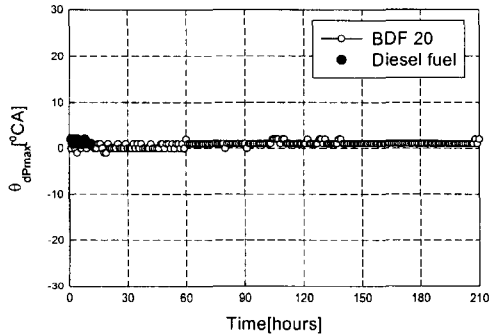


Fig. 5 Crank angle at maximum pressure rise rate versus time variation with BDF 20

압력상승율, 최고 연소압력이 발생하는 크랭크 각, 그리고 최대 압력상승율이 발생하는 크랭크 각이 매우 작은 표준편차와 오차를 가지고 있음을 알 수 있어, 직접분사식 디젤기관에 BDF 20을 장시간 사용하더라도 특별한 연소 변동없이 매우 안정적인 연소특성을 갖는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 1900rpm, 90%부하로 BDF 20을 사용하여 운전할 경우 운전시간에 따른 에너지소비율을 BDF 20으로 실험하기 전에 얻은 경유만을 사용한 경우의 데이터와 비교하여 나타낸 것으로, 경유만을 사용한 경우와 BDF 20의 에너지소비율이 비슷하였으나 운전시간이 증가함에 따라 약간씩 에너지소비율이 감소하는 특성을 나타내었다. 이는 Table 2에서 살펴볼 수 있는 것처럼 BDF 20의 발열량이 경유만의 것보다 약간 작음에도 불구하고 Fig. 2나 Fig. 3에서 볼 수 있는 것처럼 활발한 연소로 인하여 최대압력과 최대 압력상승율이 높게 나타났기 때문으로 생각된다.

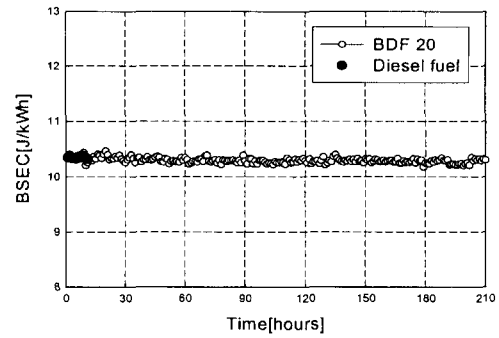


Fig. 6 BSEC versus time variation with BDF 20

3.2 배기 배출물 특성

Fig. 7은 1900rpm, 90% 부하로 BDF 20을 사용하여 장시간 운전할 경우 운전시간에 따른 매연의 배출농도를 나타낸 것이다. 전체적으로 경유만을 사용한 경우보다 BDF 20을 사용하였을 때 40% 정도의 매연이 저감하였으며, 운전시간이 증가함에 따라서 매연의 농도가 증가하지 않고 특별한 변동없이 일정한 값으로 배출되는 특성을 나타내었다. 이는 BDF 20을 사용할 경우 연료속의 산소함량으로 인하여 연소가 활발히 촉진되어 매연의 농도를 경유만을 사용하는 경우보다 저감시킨 것으로 사료되며, BDF 20의 점도가 경유의 경우보다 약간 높지만 매연 배출농도의 변화가 없는 것으로 보아 장시간 운전시에도 연료분사기의 막힘이나 연료분무의 악화가 초래되지 않은 것으로 생각된다.

Fig. 8은 Fig. 7과 동일한 조건에서 BDF 20을 사용한 경우 운전시간에 따른 NOx의 배출특성을 나타낸 것이다. BDF 20을 사용할 경우 경유만을 사용한 경우보다는 전체적으로 약간 더 높은 NOx 배출특

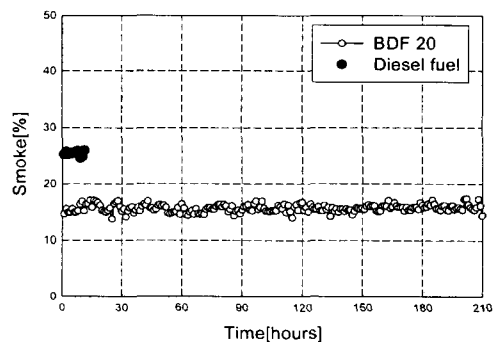


Fig. 7 Smoke versus time variation with BDF 20

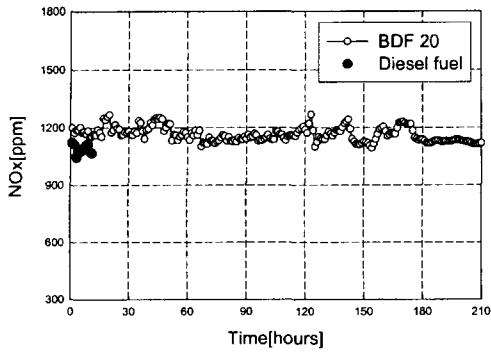


Fig. 8 NOx versus time variation with BDF 20

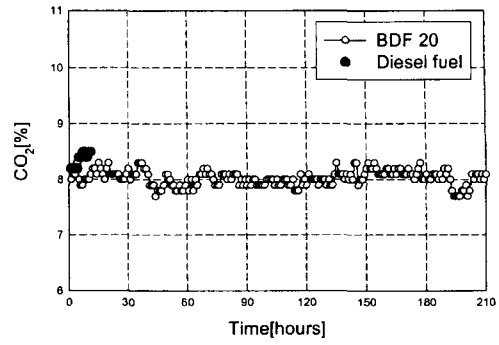


Fig. 10 CO₂ versus time variation with BDF 20

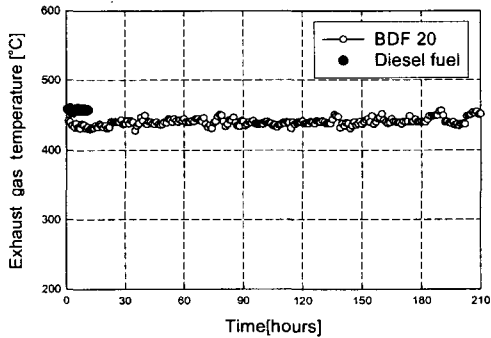


Fig. 9 Exhaust gas temperature versus time variation with BDF 20

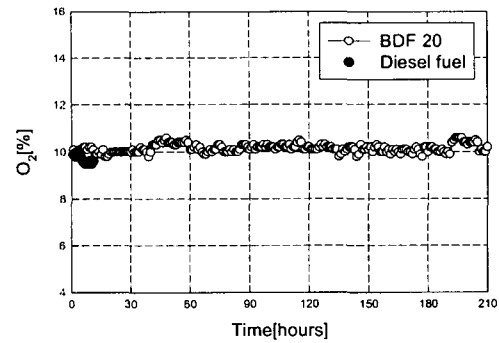


Fig. 11 O₂ versus time variation with BDF 20

성을 보였으며, 운전시간이 증가하면서 약간의 변동은 있었으나 악화되지는 않았다. 이는 Fig. 2와 Fig. 4에서 살펴본 것처럼 활발한 연소로 인하여 NOx의 배출이 증가한 것으로 사료된다.

Fig. 9는 BDF 20을 사용할 경우 운전시간에 따른 배기 대기관에서의 배기가스 온도를 나타낸 것이다. 경유만을 사용한 경우보다 BDF 20의 경우에 배기가스 온도가 더 낮게 나타났다. 이는 BDF 20의 세탄가가 높아 연소개시시기가 진각되고, 매연이 주로 생성되는 연소 후반부의 연소를 BDF 20이 함유한 산소가 촉진시킴에 따라 연소가 일찍 종료되어 경유만을 사용한 경우보다 배기가스 온도가 낮게 나타난 것으로 생각되며, 이러한 결과로 Fig. 7에서 매연의 배출 농도가 작게 나타난 것으로 생각된다.

Fig. 10은 BDF 20을 사용할 경우 운전시간에 따라 배기 배출물 중 CO₂의 배출 특성을 나타낸 것이다. BDF 20을 사용한 경우가 경유만을 사용한 경우보다 CO₂의 배출량이 적게 나타났다. 이는 BDF 20의

탄소함유량이 경유의 경우보다 작기 때문에 나타난 것으로 사료된다. 또한, 운전시간이 증가함에 따라 CO₂ 배출 특성에 약간의 변동은 있었으나 경유만을 사용하는 경우보다 저감함을 보여 장시간 BDF 20을 사용하는 것이 경유만을 사용한 경우보다 CO₂의 배출량을 감소시킬 수 있어 지구온난화현상 방지에도 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 11은 BDF 20을 사용할 경우 운전시간의 변화에 따른 O₂의 배출 특성을 나타낸 것이다. BDF 20속에 함유한 산소의 영향으로 배기가스내의 잔존 산소함유량도 경유만을 사용하는 경우보다 더 크게 나타남을 알 수 있고, 운전시간의 증가에 따라 특별한 변동없이 경유만을 사용하는 경우보다 비슷하거나 증가하는 특성을 보였다.

3.3 기관 부품 및 윤활유 특성 변화

Fig. 12는 BDF 20로 장시간 운전한 후 기관의 부품 특성들을 파악하기 위하여 기관을 분해하여 촬영한 실린더와 실린더 헤드의 사진을 나타낸 것이

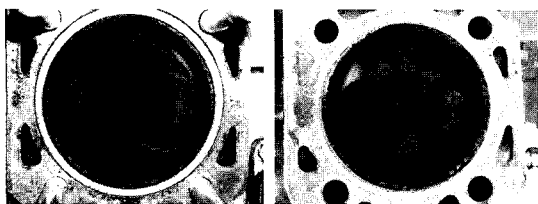


Fig. 12 Photography of cylinder and valves

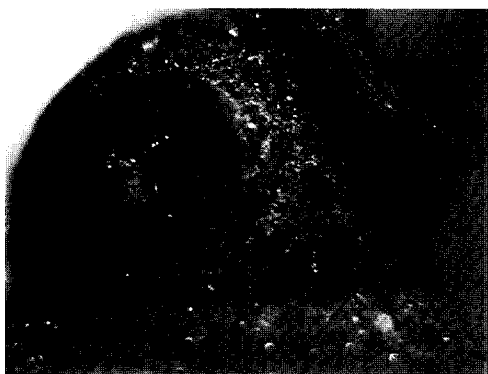


Fig. 13 Photography of fuel injector tip

Table 3 Properties of engine oil sampled from the diesel engine operated on BDF 20

Item		Test results ¹⁴⁾	Standard (SAE 15W)
Water content(Vol.%)		< 0.05	-
Flash point(COC, °C)		252	> 175
Kinematic viscosity(cSt)	40°C	83.43	-
	100°C	11.62	> 5.6
Viscosity index		131	> 85
Oxidation stability	Viscosity ratio	1.02	< 1.5
	Lacquer	No detect	< thin
Apparent viscosity(-20°C, P)		4.65	< 35.0
Pour point(°C)		-37.5	< -22.5

다. 실린더와 피스톤을 비롯한 각 밸브들을 조사하여 본 결과 기관의 마모나 카본 퇴적과 같은 현상이 나타나지 않았다.

Fig. 13은 BDF 20으로 장시간 운전한 후 연료분사기의 상태를 파악하기 위하여 연료의 분사기를 분해하여 연료 배출구멍이 위치한 연료분사기의 상단부를 50배 확대하여 촬영한 사진을 나타낸 것이다. BDF 20를 사용한 경우, 그림에서처럼 연료 배출 구

멍 주위로 약간의 카본이 부착되어 있는 것을 알 수 있었으나 고착된 현상은 없었으며 기관 성능 및 배기 배출물에 악영향을 줄 정도로 연료 배출구멍의 막힘 현상 등은 발생하지 않았다.

Table 3은 BDF 20으로 장시간 운전한 후 연료의 변화로 인한 윤활유의 특성 변화를 파악하고자 엔진오일을 샘플링하여 분석한 것이다. BDF 20으로 장시간 운전하였어도 윤활유의 특성이 악화되지 않고 동점도를 비롯한 산화안정도가 매우 양호하게 나타났다. 이는 바이오디젤유가 연료 자체에 윤활 특성을 갖고 있기 때문에 엔진 오일의 특성을 악화시키지 않았기 때문으로 생각된다.

4. 결론

디젤기관의 대체연료로서 BDF 20을 단기통 직접 분사식 디젤기관에 장시간 적용하였을 경우 기관 성능 및 배기가스 배출특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) BDF 20에 대한 연소변동인자로 선택된 최고 연소압력, 최대 압력상승율, 최고 연소압력에서의 크랭크 각, 최대 압력상승율이 발생하는 크랭크 각 들의 표준편차와 오차한계가 안정적으로 나타남을 알 수 있어 장기간 운전시에도 연소변동이 없이 안정적인 연소특성을 나타냄을 알 수 있었다. 또한, 제동연료소비율은 BDF 20을 사용할 경우 경유만의 경우보다 약간 증가함을 알 수 있었으나, 장시간 운전시에도 일정하게 나타남을 알 수 있었다.
- 2) 직접분사식 디젤기관에 BDF 20을 사용할 경우 매연이 경유의 경우보다 40%정도 감소함을 알 수 있었으며, 장시간 운전하여도 매연의 배출특성은 변화하지 않았다.
- 3) BDF 20에 대한 NOx의 배출특성은 전체적으로 경유의 경우보다 증가하였으며, 운전시간이 증가함에 따라 NOx 배출특성에 약간의 변동은 있었으나 악화되지 않았다. 배기가스속의 잔류 산소 농도는 BDF 20의 영향으로 경유만의 경우보다는 약간 증가하였다. 그러나, 배기가스 온도와 CO₂는 전 운전영역에서 경유의 경우보다 감소하였고, 운전시간의 증가에 영향을 받지 않았다.

- 4) BDF 20로 장시간 운전할 경우 윤활유와 기관 각 부품들에는 이상이 없었으나, 연료 분사기의 연료 배출 구멍 주위로는 약간의 카본이 부착됨을 알 수 있었다.

이상에서와 같이 BDF 20을 장시간 직접분사식 디젤기관에 적용할 경우 안정된 연소특성을 갖고 배기 배출물을 악화시키지 않으면서 운전이 가능함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부산하 에너지관리공단에서 시행하고 있는 대체에너지 실증연구사업과 농림부 농림기술개발사업(첨단기술개발사업)의 지원에 의해 이루어진 것으로 관계 기관에 감사를 드립니다.

References

- 1) K. W. Scholl, S. C. Sorenson, "Combustion of Soybean Oil Methyl Ester in a Direct Injection Diesel Engine," SAE 930934, 1993.
- 2) <http://www.biodiesel.org/default2.htm>.
- 3) M. Ziejewski, K. R. Kaufman, A. W. Schwab, E. H. Pryde, "Diesel Engine Evaluation of a Nonionic Sunflower Oil-Aqueous Ethanol Microemulsion," Journal of the American Oil Chemists Society. Vol.61, No.10, pp.1620-1626, 1984.
- 4) L. G. Schumacher, W. G. Hires, S. C. Borgelt, "Fueling a Diesel Engine with Methyl ester Soybean Oil," Liquid Fuels From Renewable Resources-Proceedings of an Alternative Energy Conference, 1992.
- 5) L. G. Schumacher, S. C. Borgelt, W. G. Hires, "Soydiesel/Biodiesel Blend Research," ASAE 93- 6523, 1993.
- 6) D. L. Reece, C. L. Peterson, "A Report on the Idaho on-road Vehicle Test with RME and Neat Rapeseed Oil as an Alternative to Diesel Fuel," ASAE 93-5018, 1993.
- 7) W. F. Marshall, "Effects of Methyl Esters of Tallow and Grease on Exhaust Emissions and Performance of a Cummins L10 Engine," Itt Research Institute, National Institute for Petroleum and Energy Research, 1993.
- 8) M. E. Feldman, C. L. Peterson, "Fuel Injector Timing and Pressure Optimization on a DI Diesel Engine for Operation on Biodiesel," Liquid Fuels from Renewable Resources-Proceeding of an Alternative Energy Conference, ASAE, 1992.
- 9) Y. T. Oh, "Vegetable Oils for Diesel Fuel Substitutes", Journal of KSAE, Vol.18, No.2, pp.72-92, 1996.
- 10) K. H. Ryu, Y. J. Yun, Y. T. Oh, "A Study on the Usability of Biodiesel Fuel as an Alternative Fuel for IDI Diesel Engine," Proceedings of the KSME 2002 Spring Annual Meeting, pp.2025-2030, 2002.
- 11) K. H. Ryu, Y. J. Yun, Y. T. Oh, "The Characteristics of Performance and Emissions of Agricultural Diesel Engine using Biodiesel Fuel," Proceeding of the KSAE Gwangju·Honam Branch 2002 Spring Conference, pp.9-16, 2002.
- 12) K. H. Ryu, Y. J. Yun, Y. T. Oh, "The Combustion Characteristics of Agricultural Diesel Engine using Biodiesel Fuel(Ester of Rice Bran Oil)," Transactions of the KSME, Vol.27, No.2, pp.181-187, 2003.
- 13) Korea Petroleum Quality Inspection Institute, Requested Test Results, No.17(Chonbuk 28450-36), 2002.
- 14) Korea Petroleum Quality Inspection Institute Young-Nam Branch, Requested Test Results, No.196, 2003.