

바이오디젤유를 사용하는 간접분사식 디젤기관의 내구 특성

유 경 현¹⁾ · 오 영 택²⁾

군산대학교 기계공학부¹⁾ · 전북대학교 기계공학과²⁾

Durability Characteristics of an IDI Diesel Engine Using Biodiesel Fuel

Kyunghyun Ryu¹⁾ · Youngtaig Oh²⁾

¹⁾School of Mechanical Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk 573-701, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, Jeonbuk 561-756, Korea

(Received 20 May 2005 / Accepted 13 July 2005)

Abstract : An IDI diesel engine used to agricultural tractors was fueled with 20% biodiesel fuel(BDF 20) in excess of 300 hours. Engine dynamometer testing was completed at regularly scheduled intervals to monitor the engine performance and exhaust emissions. The engine performance and exhaust emissions were sampled at 1 hour interval for analysis.

The combustion variation such as the combustion maximum pressure and the crank angle at this maximum pressure was not appeared during long-time dynamometer testing. Also, BSFC with BDF 20 resulted in lower than with diesel fuel. Since the biodiesel fuel used in this study includes oxygen of about 11%, it could influence the combustion process strongly. So, BDF 20 resulted in lower emissions of carbon monoxide, carbon dioxide, and smoke emissions without special increase of oxides of nitrogen than diesel fuel. It was concluded that there was no unusual deterioration of the engine, or any unusual change in exhaust emissions from using the BDF 20.

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

Nomenclature

- P_{max} : 최고 연소압력[bar]
- dP_{max} : 최대 압력상승율[bar/°CA]
- $\theta_{P_{max}}$: 최고 연소압력이 발생하는 크랭크각[°CA]

1. 서론

전 세계에 불어 닥친 에너지 수급의 불안정으로 석유에너지를 대체할 대체에너지에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있는 실정이다. 많은 대체에너지

들 중에서도 바이오디젤유는 재생가능한 연료이면서, 전 세계 어느 곳에서든지 지역의 풍토에 맞는 농업생산물을 이용하여 생산이 가능하고 현재의 상용 디젤기관의 변경없이 적용이 가능하다는 장점때문에 많은 관심을 받아, 현재까지 각국의 지역 농산물의 생산품에 따라서 채종유, 대두유, 팥유 등을 이용한 각기 다른 바이오디젤유들이 연구되어 왔다.¹⁻⁸⁾

국내에서도 1990년대 중반부터 바이오디젤유에 대한 연구가 활발히 이루어져, 현재는 국가 정책차원에서 대체에너지의 실용화 평가사업으로까지 진행되고 있는 실정이지만, 아직도 에너지에 대한 석유의존도가 높은 국내의 현실을 감안한다면 그 투

*To whom correspondence should be addressed.
khryu@kunsan.ac.kr

자가 아주 미흡한 실정이다.

바이오디젤유는 경유와 성상이 비슷하여 디젤기관에 적용될 경우 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 사용하는데 불리한 특징을 갖고 있다. 따라서, 바이오디젤유를 경유와 혼합하여 사용하는 방법이 고려되고 있는데 현재까지는 경유 80%와 바이오디젤유 20%를 혼합(이하 BDF 20으로 표기)하여 적용하는 것이 안정적이라고 평가받고 있다. 국내에서도 BDF 20에 대한 기관성능 평가는 완료되어 긍정적인 평가를 받고 있으나⁹⁻¹¹⁾, 아직까지 BDF 20에 대한 장기간 운전시의 내구성 평가가 이루어지지 않은 상태이다.

따라서, 본 연구에서는 BDF 20을 간접분사식 농업용 디젤기관에 장시간 적용할 경우 기관의 연소 변동, 연료소비율 및 배기배출물 특성 변화를 파악하여 BDF 20에 대한 디젤기관의 내구특성을 고찰하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치 및 연료

실험에 사용된 기관은 트랙터에 사용되고 있는 수냉식, 4기통, 4행정, 간접분사식 농업용 디젤기관이며, 시동모터에 의해서 시동이 되고, 기관부하와 기관 회전속도는 엔진 동력계에 의해 임의로 조절할 수 있도록 하였다. 실험에 사용된 기관의 주요 사양을 Table 1에 나타내었다.

실험에 사용된 바이오디젤유는 국내에서 주로 생산되고 있는 쌀의 부산물인 쌀겨로부터 추출하여 생산된 것으로, 바이오디젤유는 경유에 비해 낮은 발열량을 갖고 있지만, 경유보다 세탄가가 높으면서 인화점도 높아 사용하기에 안전한 특성을 갖고 있다. 또한, 바이오디젤유는 탄소함량이 경유보다 적고, 경유가 갖고 있지 않은 산소를 약 11.24% 함유하고 있다. Table 2¹²⁾는 실험에 사용된 BDF 20의 물성치를 나타낸 것이다.

Table 1 Specifications of test engine

Item	Specification
Engine model	TD1700
Number of cylinder	4
Bore × stroke	82 × 82(mm)
Displacement	1732 (cm ³)
Compression ratio	21
Combustion chamber	Swirl chamber
Injection timing	BTDC 25°CA
Coolant temperature	80±2°C
Injection type	In-direct injection
Rated power	35PS/2800rpm

Table 2 Properties of test fuels

Item	Test results		
	Diesel fuel	BDF 20	Neat BDF
Sulfur(wt. %)	0.031	0.025	0.008
Ash(wt. %)	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Flash point(PM, °C)	74	78	168
Specific gravity(15/4°C)	0.8373	0.8464	0.8796
Pour point(°C)	-20.0	-12.5	5.0
Viscosity(50°C, cSt)	3.0	3.2	4.2
LHV(MJ/kg)	45.88	44.5366	39.163
Cetane number	51.4	53.6	57.9
CFPP(°C)	-20	-9	8
Carbon(wt. %)	85.83	84.63	76.22
Hydrogen(wt. %)	13.82	13.54	12.38
Nitrogen(wt. %)	0.16	0.18	0.14
Oxygen(wt. %)	0	1.61	11.24

2.2 실험 방법

실험에 사용된 연료는 상용연료인 경유 80%와 바이오디젤유 20%를 체적비율로 혼합한 BDF 20을 이용하였다. 장시간의 내구성을 시험하기 위하여 엔진 동력계에 장착된 실험용 엔진을 이용하여 워밍업이 끝난 상태에서 엔진의 최대 토오크가 발생하는 기관회전속도 1800rpm에서 90% 부하로 300시간동안 BDF 20으로 운전하였다. 각종 측정 데이터는 1시간 간격으로 취득하였으며, 실험시 기관의 냉각수 온도는 80±2°C로 일정하게 유지하였다. Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

또한, 대체연료를 사용할 경우 대체연료에 대한 연소변동 특성을 파악하기 위해, 실린더의 연소압력을 1회 측정시 200사이클을 취득하여 그 평균값을 얻음으로써 실린더내 최고 연소압력(Pmax), 최

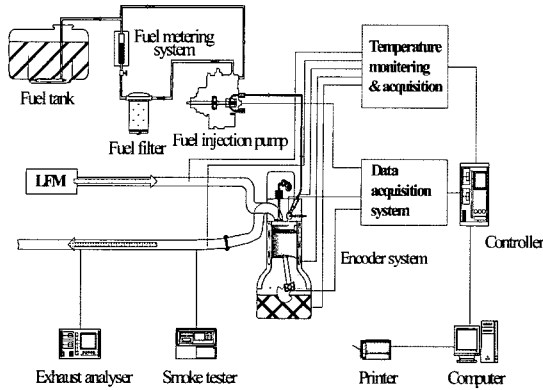


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

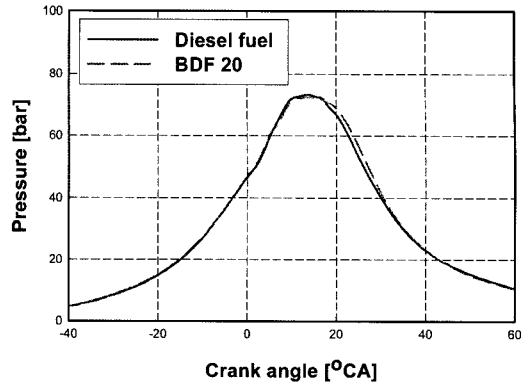


Fig. 2 Pressure versus crank angle at 1800rpm and 90% load

대 압력상승률(dp_{max}), 최고 연소압력이 발생하는 크랭크 각도(Θ_{Pmax})를 계산하여 연소 변동을 해석하였다.

그리고, BDF 20이 배기가스 배출특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 매연은 배기다기관으로부터 300mm 하류에 설치된 Bosch 타입의 매연측정기(HBN 1500)를 이용하여 1시간 간격으로 3회 반복 측정하였으며, NOx, CO, O₂ 및 CO₂는 전기화학적 셀 방식의 배기가스분석기(Greenline MK 2)를 이용하여 측정하였다. 배기가스 분석의 오차를 줄이기 위해 배기가스 분석기의 샘플링 중간에 필터를 장착하고 매연 입자를 여과한 후 측정하였으며, 실험시간의 진행에 따라 새로운 필터로 교체하여 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 연소 변동 및 연료소비율

Fig. 2는 1800rpm, 90%부하에서 BDF 20에 대한 내구시험시 연소압력을 경유와 비교하여 나타낸 것으로, BDF 20과 경유의 압력특성이 매우 유사하게 나타나고 있지만, 연소후반부의 압력이 BDF 20을 사용한 경유가 약간 더 높게 나타나고 있어 연소후반부에 BDF 20이 더 활발한 연소를 일으켰음을 알 수 있다.

Fig. 3과 Fig. 4는 1800rpm, 90%부하에서 BDF 20을 사용할 경우 연소변동특성을 파악하기 위하여 운전시간에 따른 연소실내 최고 연소압력(P_{max})과 최대 압력상승률(dp_{max})의 변화율을 나타낸 것이다.

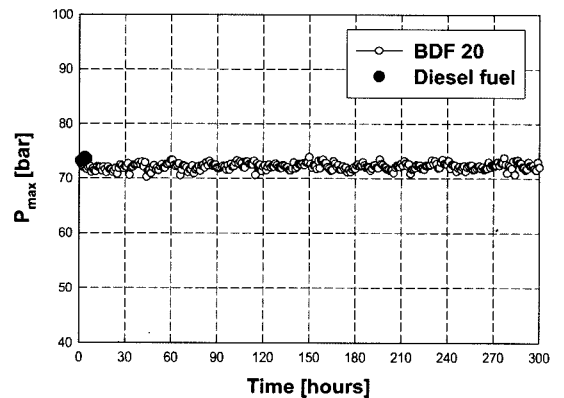


Fig. 3 Maximum pressure versus time variation

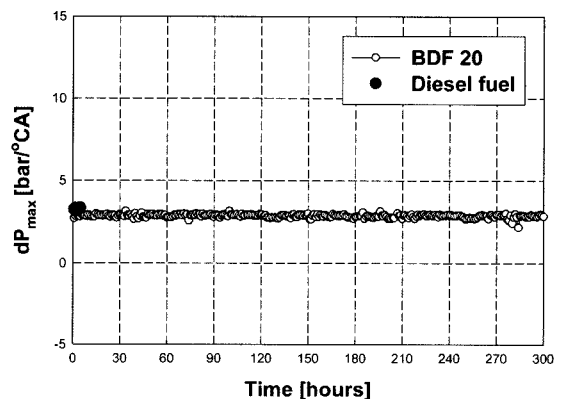


Fig. 4 Maximum pressure rise rate versus time variation

BDF 20으로 운전한 경우 최고 연소압력과 최대 압력상승율은 경유의 경우보다 약간 낮게 나타났으나, BDF 20으로 300시간정도 운전하여도 내구성 실험 초기시의 값들과 비교하여 특별한 변동없이 일

정한 값을 유지하였다.

Fig. 5는 Fig. 3과 동일한 조건에서 운전시간에 따른 최고 연소압력이 발생할 때의 크랭크각도(θ_{pmax})를 나타낸 것으로, BDF 20으로 운전하여도 최고 연소압력이 발생하는 크랭크각도에 대한 표준편차가 1.05로 BDF 20으로의 실험 초기시 뿐만 아니라 경유의 경우와 거의 동일하게 나타났다. 이처럼 연소 변동인자로서 최고 연소압력, 최대 압력상승율, 그리고 최고 연소압력이 발생하는 크랭크각도의 변화가 BDF 20으로 300시간이상 운전하여도 특별한 변동없이 안정적으로 일정하게 나타난다는 것은 BDF 20이 디젤기관의 연료로 이용 가능함을 확증하는 것으로 생각된다.

Fig. 6은 연료유의 윤활성 평가 시험기로 실험한 경유에 대한 바이오디젤유의 혼합 농도에 따른 마모 흠 직경(wear scar diameter)을 나타낸 것이다. 국내의 경유에 대한 마모 흠 직경은 유럽의 기준치보다 작게 나타났으며, 디젤유에 대한 바이오디젤유의 혼합농도가 커짐에 따라 마모 흠 직경도 작아짐을 알 수 있다. 이는 바이오디젤유의 윤활성이 좋기 때문에 마모를 저감시킨 것으로, 바이오디젤유를 사용하면 마찰 손실이 저감됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 BDF 20을 사용할 경우 운전시간에 따른 제동연료소비율을 나타낸 것으로, 실험 초기에는 경유만을 사용한 경우와 비슷한 특성을 보였으나 운전 시간이 경과할수록 약간씩 감소하는 특성을 보였다. 이는 Table 2에서 살펴본 것처럼 BDF 20의 발열량이 경유만의 것보다 작음에도 불구하고 바이

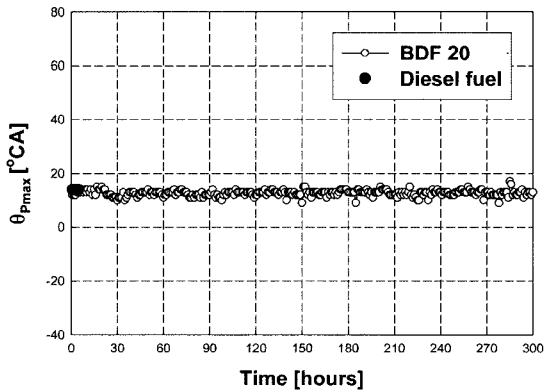


Fig. 5 Crank angle at maximum pressure versus time variation

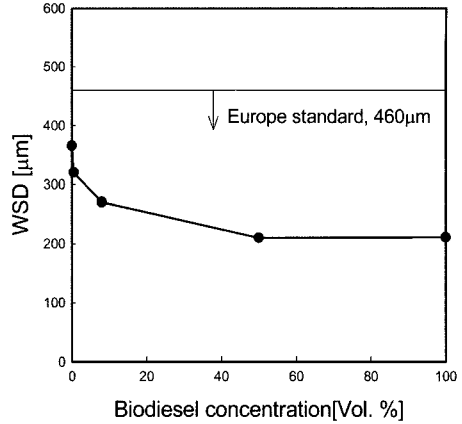


Fig. 6 Lubricity test versus biodiesel concentration

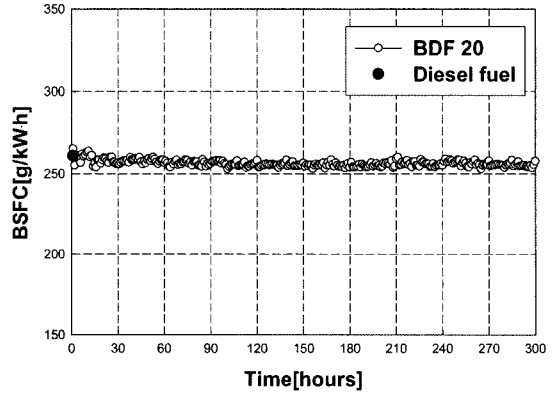


Fig. 7 BSFC versus time variation with BDF 20 and diesel fuel

오디젤유가 함유하고 있는 산소량으로 인하여 완전 연소가 촉진되어 기관성능이 향상되었고, 동시에 윤활성의 향상으로 마찰손실이 저감되어 제동연료 소비율이 감소한 것으로 생각된다.

3.2 배기 배출물 특성

Fig. 8은 BDF 20을 사용할 경우 운전시간에 따른 매연의 배출농도를 나타낸 것이다. 전체적으로 경유만을 사용한 경우보다 매연농도가 작게 나타남을 알 수 있으며, 장시간 BDF 20을 사용하여 운전하여도 매연의 농도가 일정하였다. 이는 BDF 20을 사용할 경우 연료속의 산소함량으로 인하여 활발한 연소가 촉진되어 매연의 농도를 경유만을 사용하는 경우보다 저감시킨 것으로 사료되며, BDF 20의 점도가 경유의 경우보다 약간 높지만 장시간 운전시

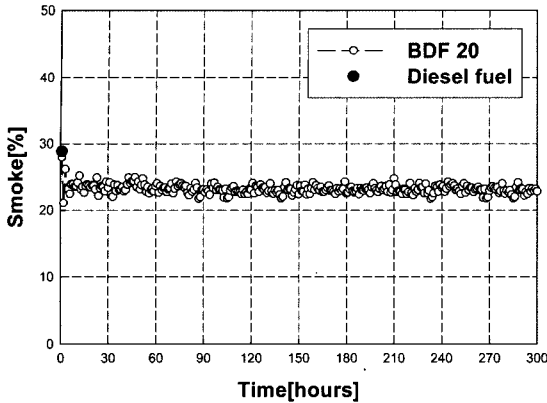


Fig. 8 Smoke versus time variation with BDF 20

에도 연료분사기의 막힘이나 연료분무의 악화를 초래하지 않은 것으로 사료된다.

Fig. 9는 BDF 20을 사용한 경우 운전시간에 따른 NOx의 배출특성을 나타낸 것이다. BDF 20을 사용할 경우 경유만을 사용한 경우보다는 전체적으로 약간 더 높은 NOx 배출특성을 보였으나 큰 차이는 나타나지 않았다. 이는 BDF 20의 산소함유량에 의해 나타난 활발한 연소로 NOx의 생성이 촉진되었기 때문으로 생각되나, 실험에 사용된 기관이 간접분사식 디젤기관이기 때문에 직접분사식 디젤기관에서처럼¹³⁾ 매연과의 상관관계가 크게 나타나지 않은 것으로 생각된다.

Fig. 10은 BDF 20을 사용할 경우 운전시간에 따른 CO의 배출 특성을 나타낸 것이다. 경유만을 사용한 경우보다 CO의 배출 값이 현저하게 저감되는 것을 알 수 있다. 이는 BDF 20이 경유만의 것보다 적은 탄

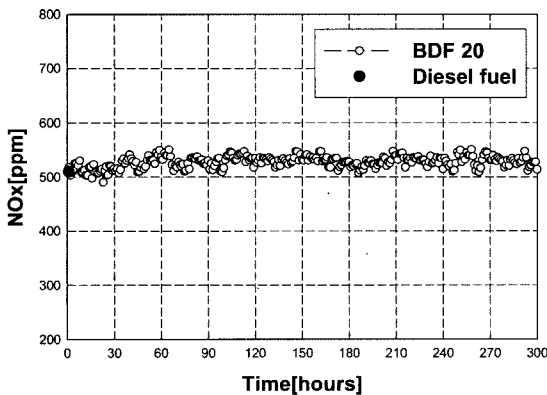


Fig. 9 NOx versus time variation with BDF 20

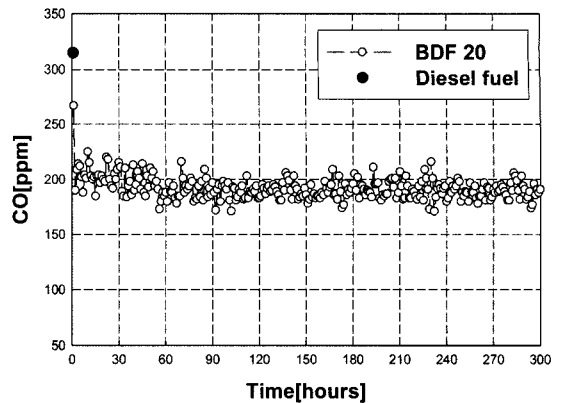


Fig. 10 CO versus time variation with BDF 20

소함유량을 갖고 있고 연소시 경유보다 더욱 활발한 연소로 완전연소를 하였기 때문으로 사료된다.

Fig. 11은 BDF 20을 사용할 경우 운전시간에 따른 배기 배출물 중 CO₂의 배출 특성을 나타낸 것으로, 경유만을 사용한 경우보다 CO₂의 배출량이 적게 나타남을 알 수 있다. 이는 CO의 경우와 같이 BDF 20의 탄소함유량이 경유의 경우보다 작기 때문에 나타난 것으로 사료된다. 또한, 장시간 BDF 20으로 운전하여도 CO₂ 배출 특성이 일정하게 나타남을 알 수 있어 BDF 20을 사용하면 경유만을 사용한 경우보다 전체적인 CO₂의 배출량을 감소시킬 수 있어 지구온난화현상 방지에 큰 역할을 할 것으로 생각된다.

Fig. 12는 BDF 20을 사용할 경우 운전시간에 따른 O₂의 배출 특성을 나타낸 것이다. BDF 20속에 함유한 산소의 영향으로 배기가스내의 잔존 산소함유량

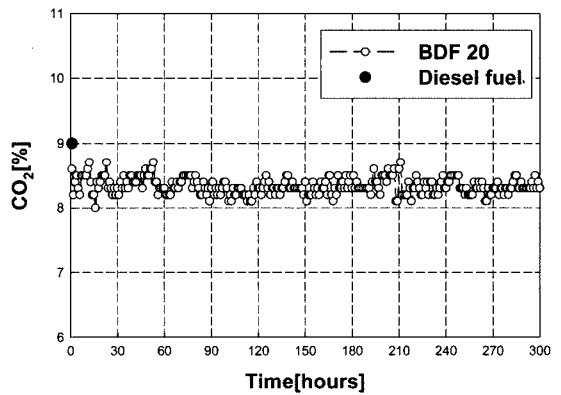


Fig. 11 CO₂ versus time variation with BDF 20

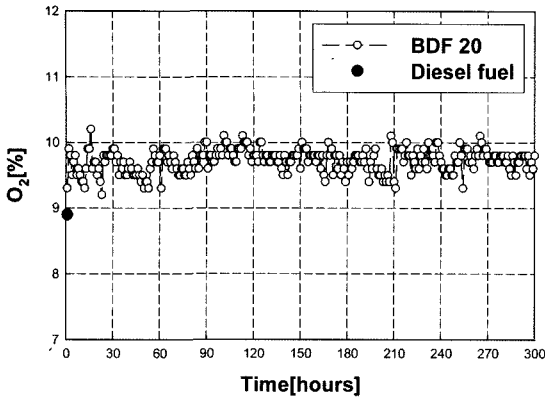


Fig. 12 O₂ versus time variation with BDF 20

도 경유만을 사용하는 경우보다 더 크게 나타남을 알 수 있고, 장시간 BDF 20으로 운전하여도 특별한 문제가 나타나지 않음을 알 수 있다.

이상과 같이 배기배출물 특성을 종합하여 보면, BDF 20을 사용할 경우 경유만을 사용한 경우보다 NO_x를 제외한 다른 배기배출물들이 감소하고, 운전시간이 증가하여도 배기배출물의 배출 특성에 변화가 나타나지 않음을 알 수 있어, BDF 20을 간접분사식 디젤기관에 장시간 사용하더라도 배기배출물에는 악영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

3.3 윤활유 특성 및 기관 부품 변화

Table 3¹⁴⁾은 BDF 20으로 장시간 운전한 후 연료의 변화로 인한 윤활유의 특성 변화를 파악하고자 엔진 오일을 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 엔진오일과 희석된다고 하더라도 윤활유의 특성을 악화시키지 않기 때문으로 사료된다.

Fig. 13은 300시간동안 BDF 20으로 운전한 후 기관의 각 부품에 대한 이상 유무를 파악하기 위하여 기관을 분해하여 촬영한 사진들이다.

Fig. 13(a)와 Fig. 13(b)는 피스톤과 흡·배기 밸브들을 나타낸 것으로, 피스톤 상부나 밸브에 카본이 형성되거나 피스톤이 굵힌 흔적을 찾아볼 수 없었다. 또한, Fig. 13(c)와 Fig. 13(d)는 연료분사기의 노

Table 3 Properties of engine oil in the IDI agricultural diesel engine operated on BDF 20

Item	Test results ⁽¹⁴⁾	Standard (SAE 15W)
Water content (Vol.%)	< 0.05	-
Flash point (COC, °C)	226	> 175
Kinematic viscosity(cSt)	40°C	77.14
	100°C	11.77
Viscosity index	147	> 85
Oxidation stability	Viscosity ratio	0.99
	Lacquer	Not detect
Apparent viscosity (-20°C, P)	35.0	< 35.0
Pour point(°C)	-37.5	< -22.5

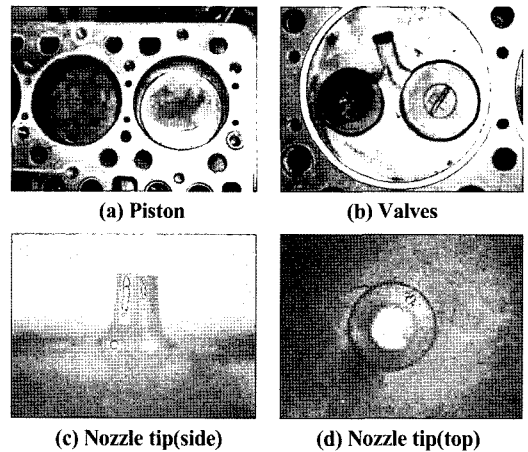


Fig. 13 Photography of engine parts in the IDI agricultural diesel engine operated on BDF 20

즐을 옆면과 윗면에서 살펴본 것으로, 노즐 팁이나 노즐 주변에 카본이 형성되지 않음을 알 수 있어, 간접분사식 디젤기관에 BDF 20을 사용하여도 연소실 내부에 카본퇴적 현상이 발생하지 않고 연료분사기를 비롯한 연료공급계통에 카본 생성이나 막힘 현상 등이 존재하지 않는다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

디젤기관의 대체연료로서 BDF 20을 300시간동안 간접분사식 농업용 디젤기관에 적용하였을 경우 기관의 연료소비율, 배기가스 배출특성 및 기관 부

품에 대한 내구특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) BDF 20에 대한 연소변동인자로 선택된 최고 연소압력, 최대 압력상승률 및 최고 연소압력에서의 크랭크 각도의 변화가 장시간 사용하여도 특별한 변동없이 초기 사용시와 동일하게 일정하게 나타남을 알 수 있었다. 또한, 제동연료소비율은 BDF 20을 사용할 경우가 경유의 경우보다 동일하거나 약간 감소함을 알 수 있었다.
 - 2) 바이오디젤유를 사용할 경우 매연이 경유의 경우보다 감소함을 알 수 있었으며, 장시간 운행하여도 매연의 증가현상은 나타나지 않았다.
 - 3) 바이오디젤유에 대한 NO_x의 배출특성은 전체적으로 경유의 경우와 비슷하였으나, CO 및 CO₂는 전 운전시간동안에서 경유의 경우보다 감소하였다.
 - 4) BDF 20으로 장시간 운전한 경우, 기관의 부품들의 손상을 조사한 결과 연소실 내부나 연료분사기에 카본이 생성되지 않았으며, 윤활유 또한 윤활 특성이 변화되지 않았다.
- 이상에서와 같은 내구성실험을 통하여 간접분사식 농업용 디젤기관에 BDF 20을 장시간 적용하여도 기관부품들의 마모와 연소실 주변의 카본퇴적현상, 연소변동 등이 발생하지 않고 배기배출물도 경유만을 사용하는 경우보다 저감됨을 알 수 있어, BDF 20은 간접분사식 농업용 디젤기관에 장시간 사용 가능함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 농림부 농림기술개발사업(첨단기술개발과제)의 지원에 의해 이루어진 것으로 관계기관에 감사를 드립니다.

References

- 1) W. S. Kyle and C. S. Spencer, "Combustion of Soybean Oil Methyl Ester in a Direct Injection Diesel Engine," SAE 930934, 1993.
- 2) M. Ziejewski, K. R. Kaufman, A. W. Schwab and E. H. Pryde, "Diesel Engine Evaluation of an Nonionic Sunflower Oil-Aqueous Ethanol Microemulsion," Journal of the American Oil Chemists Society, Vol.61, No.10, pp.1620-1626, 1984.
- 3) L. G. Schumacher, W. G. Hires and S. C. Borgelt, "Fueling a Diesel Engine with Methyl Ester Soybean Oil," Liquid Fuels From Renewable Resources-Proceedings of an Alternative Energy Conference, 1992.
- 4) L. G. Schumacher, S. C. Borgelt and W. G. Hires, "Soydiesel/Biodiesel Blend Research," ASAE Paper, No.93-6523, 1993.
- 5) D. L. Reece and 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 Paper, No.93-5018, 1993.
- 6) 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.
- 7) M. E. Feldman and 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.
- 8) Y. T. Oh, "Vegetable Oils for Diesel Fuel Substitutes," Journal of KSAE, Vol.18, No.2, pp.72-92, 1996.
- 9) K. H. Ryu, Y. J. Yun and 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.
- 10) K. H. Ryu, Y. J. Yun and 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.
- 11) K. H. Ryu, Y. J. Yun and Y. T. Oh, "The Combustion Characteristics of Agricultural Diesel Engine using Biodiesel Fuel(Ester of Rice Bran Oil)," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineer, Vol.27, No.2,

Durability Characteristics of an IDI Diesel Engine Using Biodiesel Fuel

- pp.181-187, 2003.
- 12) Korea Petroleum Quality Inspection Institute, Requested Test Results, No.17(Chonbuk 28450-36), 2002.
- 13) K. H. Ryu and Y. T. Oh, "Durability Test of a Direct Injection Diesel Engine Using Biodiesel Fuel," Transactions of KSAE, Vol.12, No.1, pp.32-38, 2004.
- 14) Korea Petroleum Quality Inspection Institute, Requested Test Results, No.10(Chonbuk 28450-282), 2003.