

# SEOUL-10 모드에서 바이오디젤유 (5%) 적용시 커먼레일 디젤기관의 배기배출물 및 내구 특성

최승훈 오영택 김건희

## Characteristics of Durability and Emission with Biodiesel Fuel (5%) in a Common Rail Direct Injection Diesel Engine at SEOUL-10 Mode

S. H. Choi Y. T. Oh G. H. KIM

### Abstract

A CRDI diesel engine used to commercial vehicle was fueled with diesel fuel and 5% biodiesel blended fuel (BDF 5%) and tested at the Seoul-10 mode for 150 hours. Engine dynamometer testing was completed at regularly scheduled intervals to monitor the engine performance and exhaust emissions. To check the engine parts (valve, injector), the engine was inspected after 150 hours running test. It was concluded that there was no unusual deterioration of the engine, or the changes in engine power (below 2.6%), smoke (below 6.2%), NOx (below 2%) and durability characteristics in spite of operation of 150 hours run with BDF 5%. The difference of kinetic viscosity for engine oil (before and after durability testing) was below 0.36%

**Keywords :** Biodiesel fuel, Common rail direct injection, Diesel engine, Durability

### 1. 서 론

최근 유가 상승과 맞물려 전세계적으로 각 국가의 에너지 수급 대책으로서 석유계 에너지를 대체할 대체에너지에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다(May 등, 2005). 이러한 대체 에너지 중 바이오디젤유(Choi 등, 2002; Oh 등, 2002)는 자연 친화적이며, 재생가능한 연료로서 전세계 어느 곳에서든지 지역의 풍토에 맞는 농업 생산물을 이용하여 생산이 가능하다는 장점이 있어 많은 관심의 대상이 되어왔다. 현재까지 연구결과들을 살펴보면 각국의 지역 농산물의 생산품에 따라서 대두유, 채종유, 코코넛유, 팜유 등을 이용한 바이오디젤유의 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 국내에서 생산되는 바이오디젤유는 국내 주요 농산물인 쌀의 가공부산물인 쌀겨와

대량수입가능한 대두유로부터 주로 생산되고 있다. 또한, 바이오디젤의 원료인 바이오매스계 연료는 재배시 태양광을 받아 광합성작용을 통한 CO<sub>2</sub>의 저감을 이룰 수 있기 때문에 (Crookes, 2006; 최 등, 2006) 교토기후협약에서 제안하는 지구온난화현상 방지에도 큰 효과를 기대할 수 있는 대체에너지원으로 생각된다. 국내에서는 1990년대 중반부터 바이오디젤유의 생산 및 적용에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 현재 기계적 분사방식 디젤기관에서는 거의 실용화 단계에 있다. 바이오디젤유는 경유와 성상이 비슷하며, 연료 자체에 다량의 산소를 함유하고 있어 특히, 고부하 및 고회전 속도 영역에서 매연저감에 효과적인 장점을 갖고 있다(Sheet, 1992). 하지만, 점도가 경유의 경우보다 약간 높고 저온유동점이 높기 때문에 순수 바이오디젤유를 국내 동절기와 같은

The article was submitted for publication in February 2007, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in April 2007. The author are Seung Hun Choi, Researcher, KSAM member, Young Taig Oh, Professor, The Research Institute of Industrial Technology at CBNU, Dept. of mechanical Engineering, Chonbuk National University, Jeonju, Korea, and Gun Hoi Kim, Professor, Dept. of Manufacturing and Design Engineering, Jeonju University, Jeonju, Korea. Corresponding author: Y. T. Oh, Professor, Dept. of mechanical Engineering, Chonbuk National University, Jeonju, 664-14, Korea; Fax: +82-63-220-2718; E-mail: <ohyt@chonbuk.ac.kr>.

저온 상태에서 사용하는 데는 어려움이 있다. 따라서 상용 경유와 바이오디젤유를 혼합하여 사용하는 방법을 선택하고 있으며, 기계적인 분사방식 디젤기관에서는 바이오디젤유 20% 이하의 적용이 안정적이라고 보고되고 있다(Choi 등, 2002).

그러나, 최근 연비개선과 배기배출물 저감측면에서 세계적으로 큰 수요를 보이고 있는 커먼레일(Common rail direct injection) 방식의 디젤기관에 대해서는 바이오디젤유의 적용에 대한 연구가 초기단계에 머물러 있다. 특히, 커먼레일 방식 디젤기관의 주요부품 제조사인 BOSCH사 및 DELPHI사 등에서는 5vol-% 이상의 바이오디젤유를 커먼레일 방식 디젤기관에 적용한 경우 자사제품에 대한 신뢰성을 보장할 수 없다는 제한 조건을 제시하고 있으며(최 등, 2006), 이는 소비자에게 신뢰성을 줄 수 있는 선행연구들이 적기 때문으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 상용화된 커먼레일 방식 디젤기관에 대두유를 원료로 국내에서 제조한 바이오디젤유 5%를 체적비율로 경유와 혼합하여 바이오디젤유 5% 혼합연료(이하 BDF 5%)를 장시간 적용하였을 경우 BDF 5%에 대한 기관 내구성 및 배기배출물 변화 특성을 파악하고 BDF 5%를 장시간 운전시에 대두될 수 있는 문제점을 고찰하고자 하였으며, 바이오디젤유의 커먼레일 기관에 대한 안정성을 시험하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

실험에 사용된 기관은 수냉식, 4기통, 4행정, 상용 커먼레일 방식의 디젤기관이며, 기관부하와 기관 회전속도는 엔진 동력계에 의해 임의로 조정할 수 있도록 하였다. 실험에 사용된 기관의 제원은 표 1에 나타내었다.

표 2는 실험에 사용된 연료의 특성을 경유와 비교하여 나타낸 것이며, 표 3은 바이오디젤유의 지방산 구성을 나타낸 것이다(최 와 오 등, 2005). 표에 나타난 바와 같이 바이오디젤유는 탄소함량이 경유보다 적어 발열량이 약간 저하되지만, 세탄가는 경유보다 높다. 또한 바이오디젤유는 경유자체에 내포하고 있지 않은 산소를 약 11% 함유하고 있다. 실험에 사용

Table 1 Specification of test engine

Item	Specification
Number of cylinder	4
Bore×stroke (mm)	83×92
Displacement (cc)	1991
Compression ratio	17
Combustion chamber	Toroidal
Injection type	CRDI
Inj. pressure (Max.) (bar)	1350

된 연료는 디젤기관의 상용연료인 경유와 바이오디젤유 5%를 체적비율로 혼합한 BDF 5%를 이용하였다.

그림 1은 전체적인 실험장치의 전체적인 계략도이다. 그림 2는 본 실험의 운전모드인 Seoul-10모드를 나타낸 것이며, 실험 수행시 한국에너지기술연구원의 자문을 받은 것이다.

Table 2 Properties of test fuels

	Diesel fuel	BDF
Calorific value [MJ/kg]	43.96	39.17
Cetane number	51.4	57.9
Sulfur (wt%)	0.05	0
Carbon (wt%)	85.83	76.22
Hydrogen (wt%)	13.82	12.38
Oxygen (wt%)	0	11.26

Table 3 Fatty acid composition of BDF

Fatty acid	Contents (%)
Palmitic acid	17.0~18.0
Stearic acid	1.7~2.1
Oleic acid	39.0~42.0
Linoleic acid	37.0~39.0
Linolenic acid	1.0~2.0
Etc.	below 1.0

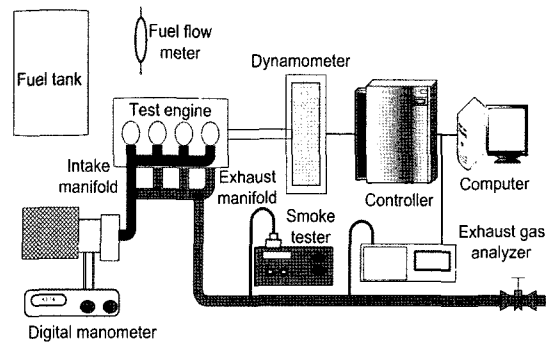


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

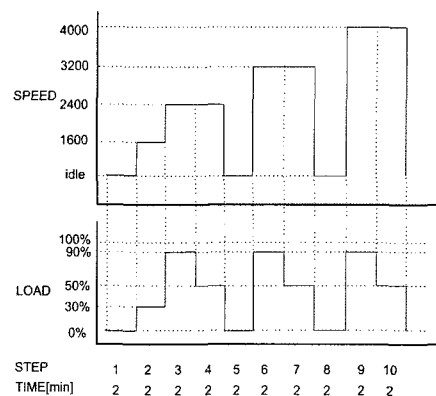


Fig. 2 Engine operating condition of the Seoul-10 mode.

150시간의 장시간 내구성을 시험하기 위하여 기관 동력계에 장착된 실험용 기관을 이용하여 워밍업이 끝난 상태에서 그림에 나타난 Seoul-10모드를 적용하여, 150시간 BDF 5%를 적용하여 운전하였으며, 기관성능 및 배기배출물을 측정하였다. BDF 5%를 커먼레일 방식 디젤기관에 적용시에 배출가스 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 배기다기관으로부터 300 mm 하류에 매연측정 장치(HBN-1500, Korea)를 사용하여 매연의 농도를 매 1시간마다 3회 반복 측정하여 평균값을 취하였으며, CO<sub>2</sub>(Carbon dioxide) 및 NO<sub>x</sub>(Nitrogen Oxides)의 측정은 배기 매니폴드로부터 약 400 mm 하류에서 전기화학적 셀 방식의 배기가스 분석기(Greenline MK 2, Italy)로 일정량의 배기가스를 흡입하여 측정하였다. 또한, 기관이 150 cc의 연료를 소모하는 시간을 측정하여 동일 일에 대한 에너지의 소비율을 알아보기 위하여 단위시간당의 에너지소비율(MJ/kWh)로 계산하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 기관성능 비교

그림 3은 커먼레일 방식 디젤기관에 BDF 5%를 실험연료로 이용하고 Seoul-10모드로 운전하는 동안 출력특성을 파악하기 위하여 기관 운전 시간대별로 나타낸 것이다. 기관을 150시간 이상 장시간 운전하여도 동일 회전속도 및 부하조건에서 출력은 2.6%미만의 변화율을 보이고 있다.

그림 4는 그림 3과 동일한 조건에서 에너지소비율을 시간대별로 나타낸 것이다. 각 회전속도 및 부하조건에서 장시간 운전하여도 출력 특성과 같이 에너지소비율 또한 2.3% 미만의 변화율을 유지하고 있음을 알 수 있다. 디젤기관은 고온으로 압축된 공기에 연료를 분사하여 자기 착화하는 연소방식

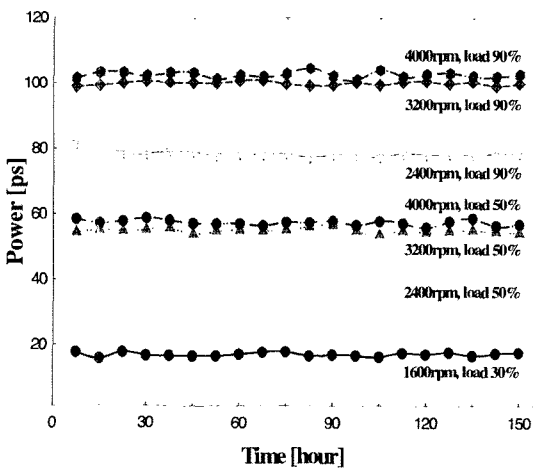


Fig. 3 Engine power versus engine speeds and loads.

으로 연료의 분무거동과 미립화가 매우 중요한 인자이다. 바이오디젤은 동점도가 경유보다 높아 일정 혼합비 이상에서는 연료와 노즐 표면의 마찰력이 증가하여 분사속도가 낮아지고, 분무 도달 거리가 짧아지며 연료의 미립화에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 즉, 이는 미립화의 악영향에 기초한 출력과 에너지소비율의 악화를 의미한다. 그러나, 본 실험에서는 그림 3과 그림 4에 나타난 바와 같이 BDF 5%를 적용하여 장시간 운전하여도 출력과 에너지소비율 모두 3%미만의 변화율을 보여 BDF 5%가 커먼레일방식 디젤기관의 연료 분사 악영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다.

#### 나. 배기배출물 비교

그림 5는 BDF 5%를 사용할 경우 매연의 배출 농도를 시간대별로 나타낸 것이다. Seoul-10모드를 사용하여 150시간 장시간 운전할 경우 50%이하의 저부하영역에서는 운전시간 전 영역에서 7%미만의 매연 배출 특성을 보이고 있으며, 90%의 고부하영역에서는 매연배출량이 증가됨을 알 수 있다. 또한, 4000 rpm, 90%의 고부하영역에서는 150시간의 운전기

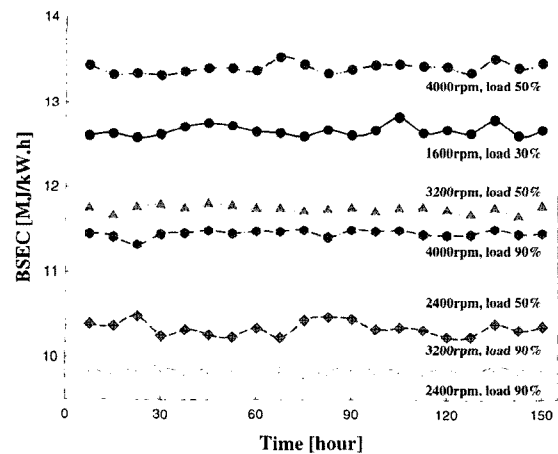


Fig. 4 BSEC versus engine speeds and loads.

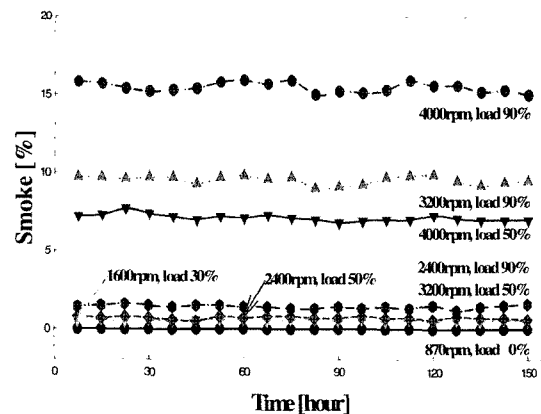


Fig. 5 Smoke versus engine speeds and loads.

간 동안 평균 매연배출량에 대하여 최대 6.2%미만의 변화율을 나타내고 있으며, 50%이하의 저부하영역에서는 1.6%미만의 안정적인 변화율을 나타내고 있다.

그림 6은 동일 실험 조건에서 BDF 5%를 연료로 사용한 경우 NOx의 배출 농도를 운전 시간대별로 타낸 것이다. 매연의 배출 특성과 같이 운전시간 전 운전영역에서 일정한 NOx의 배출 특성을 나타내고 있다.

전에 언급한 바와 같이 바이오디젤 혼합연료는 연료와 노즐의 마찰력 증대로 인해 연료 분사속도가 저하되고, Weber 수가 감소하게 되어 미립화 및 분무에 악영향을 미치고, 이는 장시간 운전시 노즐 팁이 마모되는 현상이 발생되어 기관의 출력 및 배기 배출물의 특성을 우려하지 않을 수 없다. 그러나 그림 5와 그림 6에 나타난 바와 같이 기관실험결과 커먼레일 방식 디젤기관에 BDF 5%를 적용한 경우 매연과 NOx의 배출 특성이 평균배출량과 비교하여 고부하영역에서 매연은 최대 6.2%, NOx는 1.9% 미만의 적은 변화율을 보이고, 저부하영역에서는 매연과 NOx 모두 2%미만의 변화율을 보이는 점으로 미루어 상기와 같은 문제점은 발생하지 않은 것으로 생각된다.

**다. 기관부품 및 윤활유의 변화 비교**

그림 7은 BDF 5%로 150시간 운전한 후 인젝터 팁의 상태를 파악하기 위하여 실험을 종료한 후 분사노즐을 분리하여 인젝터 팁 상단부를 50배 확대하여 찍은 사진을 사용하지 않은 인젝터 팁과 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 것과 같이 BDF 5%를 사용한 결과 인젝터 팁의 막힘 현상은 없었다. 따라서, BDF 5%로 장시간 운전하여도 전체적으로 기관 출력은 2.6%미만의 변화율을 보이고, NOx 배출특성은 2% 미만의 변화율을 나타내는 것으로 보아 통상 인젝터 팁 부분에 형성되는 카본의 양이 크지 않아 분무의 미립화에 영향을 미치지 않았기 때문으로 생각된다.

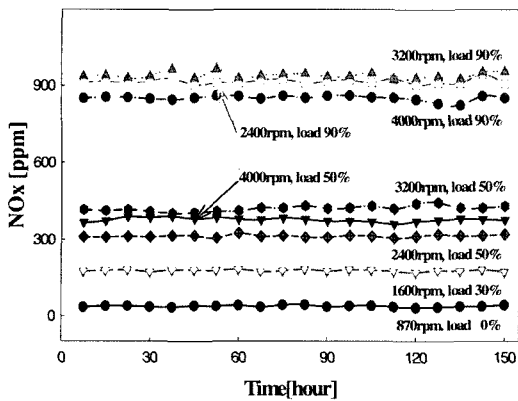


Fig. 6 NOx versus engine speeds and loads.

그림 8은 기관의 부품 특성을 파악하기 위하여 기관을 분해 후 촬영한 밸브와 실린더 헤드 사진을 나타낸 것이다. 실린더와 피스톤을 비롯한 각 밸브들을 조사하여 본 결과 연소 상태는 양호하였으며, 연소실내에는 전반적으로 카본의 퇴적 현상은 나타나지 않았다.

표 4는 실험에 사용된 인젝터의 실험전과 후의 분사특성을 분석하기위해 실험기관에 장착된 인젝터의 제조사에 의뢰하여 분석한 결과이다. 바이오디젤 혼합연료는 상용 경유에 비해 점도가 높아 장시간 운전시 인젝터 팁의 마모를 야기할 수 있고, 이는 분사량에 영향을 미칠 수 있다. 그러나 BDF 5%를 적용하여 150시간의 내구성 시험 후, 실험에 사용된 인젝터를 분석한 결과 본 실험에 적용된 최대분사압력인 1350bar에서 분사량 측정시 내구성 실험 전·후의 차이가 0.5%에 불과하여 분사량의 변화는 거의 없었다.

표 5는 실험 후의 윤활유의 특성 변화를 파악하고자 실험

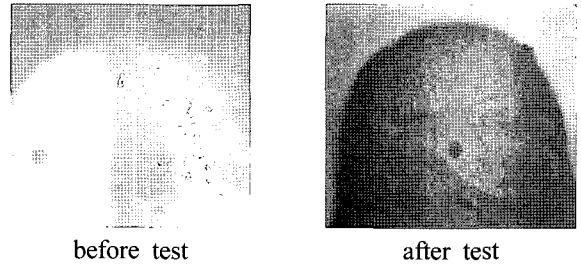


Fig. 7 Comparison of injector tip before and after durability test.



Fig. 8 Photographies of cylinder and valves after durability test.

Table 4 Injector test results

Injector Number 0059						
Rail pressure (bar)		1350	800	800	250	
ET (μs)		850	600	160	600	
Injection Quantity (mm <sup>3</sup> /st)	Before test	1	61.06	23.68	1.22	3.52
		2	60.83	23.67	1.20	3.53
		3	61.19	23.66	1.18	3.49
		Average	61.03	23.67	1.20	3.51
Injection Quantity (mm <sup>3</sup> /st)	After test	1	60.76	23.73	1.02	3.49
		2	60.73	23.69	1.02	3.45
		3	60.66	23.68	1.00	3.46
		Average	60.72	23.70	1.01	3.47

**Table 5** Properties of engine oil

Index	New engine oil	Used engine oil
Water content (vol%)	0.18924	0.28797
Flash point, COC (°C)	220.0	224.0
Kinetic viscosity (mm <sup>2</sup> /s)	40°C	68.03
	100°C	10.96
Viscosity index	152	154
Viscosity ratio	0.98	1.00
Apparent viscosity, 20°C (P)	30.70	30.70
Pour point (°C)	-30.0	-33.0

후 엔진 오일을 샘플링하여 한국석유품질검사소에 의뢰, 분석하여, 사용하지 않은 윤활유와 비교하여 나타낸 것이다. BDF 5%를 실험연료로 사용하여 장시간 운전하여도 윤활유의 특성이 악화되지 않고, 내구시험 전·후의 동점도차이가 0.36%로 나타나 산화안정도가 영향을 받지 않은 것으로 나타났다. 이는 바이오디젤유가 연료 자체에 윤활특성을 갖고 있기 때문에 블로바이가스량이 적고, 따라서 윤활유와 희석량이 적으며, 희석된다고 하더라도 윤활유의 특성을 악화시키지 않기 때문으로 생각된다.

#### 4. 결론

디젤기관의 대체연료로서 바이오디젤유 5%를 상용경유와 혼합하여 상용 커먼레일 방식의 디젤기관의 연료로 적용하고, Seoul-10모드를 이용하여 150시간 이상 장시간 운전하였을 경우 기관성능 및 배기가스 배출특성, 기관부품의 변화 상태, 윤활유의 특성을 조사한 결과는 다음과 같다.

- 1) BDF 5%를 사용하여 장시간 운전한 결과 출력은 최대 2.6%, 에너지소비율은 최대 2.3%의 변화율을 보이고 있으며, 배기배출물 중 매연은 6.2%, NOx는 최대 2% 미만의 변화율을 보여 동일 회전속도 및 부하조건에서 디젤기관의 대체연료로서 가능성을 확인할 수 있다.
- 2) BDF 5%를 사용하여 장시간 운전하여도 연소실내 카본의

퇴적현상 등이 나타나지 않아 커먼레일 방식 디젤기관에 대하여 BDF 5%의 적용이 가능함을 알 수 있다.

- 3) BDF 5%를 사용하여 장시간 운전한 후 엔진 오일을 분석한 결과 동점도의 변화율이 0.36%로 나타나는 등 윤활유의 특성이 악화되지 않았다.

이상에서와 같이 BDF 5%를 상용 커먼레일 방식 디젤기관에 적용할 경우 기관 성능 및 배기배출물에 큰 영향을 미치지 않고 사용 가능한 대체연료로서의 실용 가능성을 확인할 수 있었다.

#### REFERENCES

1. Choi, B. C., C. H. Lee and H. J. Park. 2002. Power and emission characteristics of DI diesel engine with a soybean bio-diesel fuel. *Journal of Korea Society for Power System Engineering* 6(3):11-16.
2. Choi, S. H. and Y. T. Oh. 2005. Experimental study on emission characteristics and analysis by various oxygenated fuels in a DI diesel engine. *Transaction of International Journal of Automotive Technology* 6(3):197-203.
3. Crookes, R. J. 2006. Comparative bio-fuel performance in internal combustion engines. *Biomass & Bioenergy* 30:461-468.
4. May, C. Y., Y. C. Liang, C. S. Foon, M. A. Ngan, C. C. Hook and Y. Basiron. 2005. Key fuel properties of palm oil alkyl esters. *Fuel* 84:1717-1720.
5. Oh, Y. T. and S. H. Choi. 2002. A study on characteristics of rice bran oil as an alternative fuel in diesel engine (II). *Transaction of Korea Society of Automotive Engineers* 10(3):8-17.
6. Sheet, F. 1992. Effects of rapeseed methyl esters on diesel engine pollution-A review. *SAE Technical paper Series No. 920446*.
7. 박성욱, 서현규, 권상일, 성기안, 이창식. 2004. 바이오 디젤의 연료 혼합비가 분무 거동 및 미립화에 미치는 영향. *한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집* 1:556-561.
8. 최승훈, 오영택. 2005. 직접분사식 디젤기관에서 바이오디젤유 적용 시 매연과 NOx의 동시저감. *한국자동차공학회논문집* 13(2):65-71.
9. 최승훈, 오영택, 서정덕. 2006. 농업용 디젤기관의 대체연료로서 바이오디젤유와 합산소제 적용시의 배기배출물 특성. *바이오시스템공학* 31(6):457-462.