

커먼레일 디젤기관에서 BDF 20%에 대한 내구특성

최 승 훈¹⁾ · 오 영 택²⁾

전북대학교 기계공학과¹⁾ · 전북대학교 기계공학과 공학연구원 공업기술연구센터²⁾

The Durability Characteristics for BDF 20% in a Common Rail Diesel Engine

Seunghun Choi¹⁾ · Youngtaig Oh²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, Jeonbuk 561-756, Korea

²⁾Research Center of Industrial Technology, Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, Jeonbuk 561-756, Korea

(Received 24 May 2010 / Accepted 30 December 2010)

Abstract : Biodiesel fuel is already remarkable alternative fuel in many countries. So, many studies are performed on the environmental or economic effects as well as the characteristics of diesel engine fueled biodiesel in combustion and emission. In this study, an CRDI diesel engine used to commercial vehicle was fueled with diesel fuel and 20% biodiesel blended fuel (BDF 20%) with city mode 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. To check the engine parts (valve and injector), the engine was inspected after test. It was concluded that there were no unusual deteriorations of the engine, or any unusual changes in engine power and exhaust emissions in spite of operation of 300 hours with BDF 20%.

Key words : CRDI diesel engine(커먼레일 디젤기관), Biodiesel fuel(바이오디젤유), BSEC(Brake Specific Energy Consumption; 에너지소비율), Emission(배기배출물), Durability(내구성)

1. 서론

전 세계적으로 화석연료의 사용을 줄이기 위해 노력하기 있지만 갈수록 증가하는 CO₂의 영향 및 지구 온난화로 인한 각종 이상기후 현상이 날로 증가하고 있다. 또한 대기오염의 주범으로 인식되는 자동차로부터 연소과정 중에 필연적으로 발생하는 각종 배기배출물로 인하여 환경오염이 날로 증가하는 추세이다. 이러한 화석연료에서 발생하는 배기배출물을 줄이기 위하여 각국은 각종 규제를 만들고 이 규제들로 인하여 관련 학계와 기업체에서는 많은 연구와 노력이 이루어지고 있다.

이러한 규제 중에서 대표적이라 할 수 있는 것이 2005년 2월 16에 발효된 교토의정서이다. 교토의정서는 온실가스의 배출을 감축하는 것이 가장 주라 할 수 있다. 감축 대상 가스는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 불화탄소(PFC), 수소화 불화탄소(HFC), 불화유황(SF₆) 등의 여섯 가지이다. 당사국은 온실가스 감축을 위한 정책과 조치를 취해야 하며, 그 분야는 에너지효율향상, 온실가스의 흡수원 및 저장원 보호, 신·재생에너지 개발·연구 등도 포함된다. 이러한 노력의 일부로서 연구되고 있는 바이오연료(bio-fuel)는 자연계에 있는 동식물, 미생물 등의 바이오매스(biomass)로 만들어진 지속 가능한 에너지를 말한다. 이중 차량용 연료로 사

*Corresponding author, E-mail: ohyt@chonbuk.ac.kr

용이 가능한 것은 바이오디젤유(biodiesel fuel, BDF), 바이오에탄올(bioethanol)이 있으며 바이오디젤유는 경유 차량에 대체가 가능하다.¹⁾

특히, 바이오디젤유에 관련한 다양한 실증연구^{2,3)}는 많이 이루어지고 있으며 분무특성연구, 연소, 배기 분석 등 디젤엔진에 관련된 실험적연구^{4,6)}가 많이 이루어지고 있다. 바이오디젤유는 경유와 성상이 비슷하며, 연료 자체의 합산소 성분으로 인해 고부하 및 고회전 속도 영역에서 매연저감에 효과적인 장점⁷⁾을 갖고 있다. 하지만, 점도가 경유의 경우보다 약간 높고 저온유동점이 높기 때문에 순수 바이오디젤유를 국내 동절기와 같은 저온 상태에서 사용하는데는 어려움⁸⁾이 있다. 따라서 상용 경유와 바이오디젤유를 혼합하여 사용하는 방법을 선택하고 있으며, 기계적인 분사방식 디젤기관에서는 바이오디젤유 20%이하의 적용이 안정적이라고 보고되고 있다.⁹⁾

그러나, 최근 디젤기관의 대표적인 흐름은 커먼레일(CRDI ; Common Rail Direct Injection) 방식이다. 커먼레일 방식 디젤기관의 주요 부품을 제공하는 B사, D사, S사 등에서는 5vol.% 이상의 바이오디젤유를 커먼레일 방식 디젤기관에 적용한 경우 자사 제품에 대한 신뢰성을 보장할 수 없다는 제한 조건을 제시하고 있다.¹⁰⁾

본 연구에서는 S사의 2,000cc급, 커먼레일 방식 디젤기관에 대두유 계열의 바이오디젤유 20%를 혼합한 연료(이하 BDF 20%)를 장시간 적용하였을 경우, 기관 성능 및 배기배출물 변화 특성을 파악하여 커먼레일 디젤기관에 대한 BDF 20%의 적용가능성을 알아보려고 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 연료

실험에 사용된 기관은 수냉식, 4기통, 4행정, 커먼레일 방식의 디젤기관이며, 내구성 시험에 적용된 기관부하와 기관 회전속도는 모드자동조절장치에 의해 임의로 조절할 수 있도록 하였다. 실험에 사용된 기관의 사양은 Table 1에 나타내었다.

Table 2는 실험에 사용된 연료의 특성을 경유와 비교하여 나타낸 것이다. 본 실험에 사용된 바이오

Table 1 Specification of test engine

Item	Specification
Engine model	D20DT
Number of cylinder	4
Bore × Stroke (mm)	86.2 × 85.6
Effect. displacement (cm ³)	1,998
Max power (kW/rpm)	108/4,000
Injection type	Common rail direct injection
Injection pressure (bar)	1600

Table 2 Properties of test fuel

	Diesel fuel	BDF
Calorific value [MJ/kg]	43.96	39.17
Cetane number	51.4	57.9
Sulfur (wt%)	0.05	-
Carbon (wt%)	85.83	76.22
Hydrogen (wt%)	13.82	12.38
Oxygen (wt%)	0	11.03

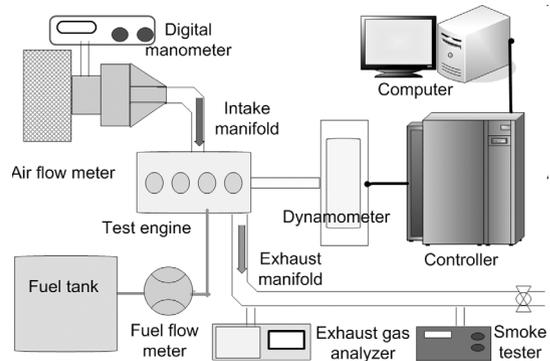


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

디젤유는 국내의 바이오디젤유 생산업체인 H사에서 생산된 완제품을 공급받아 실험에 사용하였다. 바이오디젤유는 탄소함량이 경유보다 적어 발열량이 약간 저하되지만, 세탄가는 경유보다 높다. 또한 바이오디젤유는 경유자체에 내포하고 있지 않은 산소를 약 11% 함유하고 있다. 실험에 사용된 연료는 상용연료인 경유 80%와 바이오디젤유 20%를 체적 비율로 혼합한 BDF 20%를 이용하였다.

2.2 실험 방법

장시간 내구성을 시험하기 위하여 기관 동력계에 장착된 실험용 기관을 이용하여 워밍업이 끝난 상태에서 city 모드를 적용하여, 300시간이상 BDF

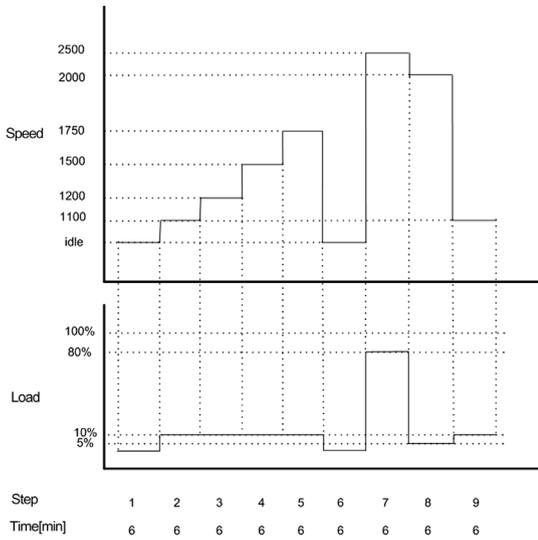


Fig. 2 Engine operating condition of test mode

20%를 적용하여 운전하였으며, 기관성능 및 배기배출물을 1시간 간격으로 측정하였다. 실험시 냉각수 온도는 $80\pm 2^{\circ}\text{C}$ 로 일정하게 유지하였다. 또한 BDF 20%가 배기가스 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 배기다기관으로부터 400mm 하류에 매연측정장치(HBN-1500; Korea)를 사용하여 매연의 농도를 매 1시간마다 3회 반복 측정하여 평균값을 취하였으며 CO_2 , O_2 , 및 NO_x 의 측정은 배기 매니폴드로부터 약 300mm 하류에서 전기화학적 셀 방식의 배기가스 분석기(Greenline MK 2; Italy)로 일정량의 배기가스를 흡입하여 측정하였다. 또한, 기관이 일정량의 연료를 소모하는 시간을 측정하여 단위시간당의 에너지소비율($\text{MJ}/\text{kW}\cdot\text{h}$)로 계산하였다. Fig. 1은 전체적인 실험장치의 계략도를 나타내고 있으며, Fig. 2는 실험에 사용한 내구시험 모드를 나타내고 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기관성능 비교

Fig. 3은 커먼레일 방식 디젤기관에 바이오디젤 유 20vol-%를 혼합하여 일정 모드로 운전하는 동안 출력특성을 파악하기 위하여 기관 운전 시간대별로 나타낸 것이다. 기관을 300시간이상 장시간 운전하여도 출력은 변화되는 경향을 보이지 않고 있으며, 동일 회전수 및 부하조건에서 거의 일정한 경향을

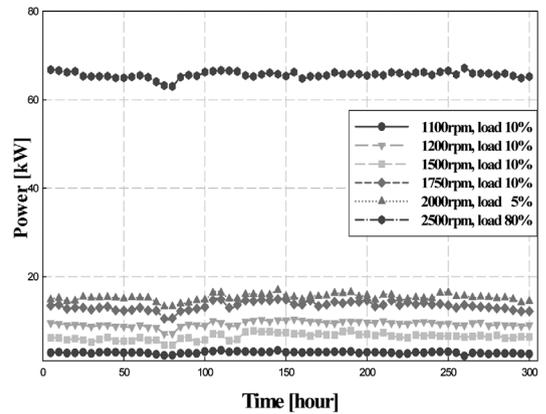


Fig. 3 Engine power versus engine speeds and loads

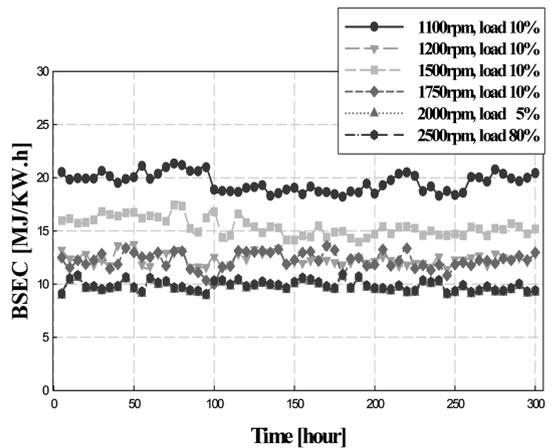


Fig. 4 BSEC versus engine speeds and loads

보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 Fig. 3과 동일한 조건에서 에너지소비율을 시간대별로 나타낸 것이다. 각 회전수 및 부하조건에서 장시간 운전하여도 출력 특성과 같이 에너지소비율 또한 일정한 패턴을 유지하고 있음을 알 수 있다. 디젤기관은 고온으로 압축된 공기에 연료를 분사하여 자기 착화하는 연소방식으로 연료의 분무거동과 미립화가 매우 중요한 인자이다. 그러나 바이오디젤유는 동점도가 경유의 것보다 높아 일정 혼합비 이상에서는 연료와 노즐 표면의 마찰력이 증가하여 분사속도가 낮아지고, 분무 도달 거리가 짧아지며 연료의 미립화에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다.¹¹⁾ 그러나 Fig. 3과 Fig. 4에 나타난 바와 같이 BDF 20%를 300시간이상 운전하여도

상기에서와 같은 문제점이 발생되지 않음을 확인할 수 있다.

3.2 배기배출물 비교

Fig. 5는 BDF 20%를 사용할 경우 매연의 배출 농도를 시간대별로 나타낸 것이다. city 모드를 사용하여 300시간이상 장시간 운전하여도 운전시간 전 영역에서 거의 일정한 매연 배출 특성을 보이고 있으며, 고부하영역에서 매연배출량이 증가됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 동일 실험 조건에서 BDF 20%를 연료로 사용한 경우 NO_x의 배출 농도를 운전 시간대별로 나타낸 것이다. 매연의 배출 특성과 같이 전 운전영역에서 일정한 NO_x의 배출 경향을 나타내고 있으며, 고회전속도 및 고부하영역에서 타 운전영역에 비하여 NO_x의 배출이 증가되는 것을 알 수 있다. 단, 실험 시작 후 100시간 정도까지 NO_x의 배출량이 저감되었다가 100시간 이후 어느 정도 안정화를 이룬 것은 연료펌프를 통한 연료 공급시 BDF와 경유의 혼합문제에 의해 발생한 것으로 사료된다.

Fig. 7은 BDF 20%를 사용하여 운전한 경우 CO₂의 배출특성을 시간대별로 나타낸 것이다. 각 회전속도 및 부하 조건에서 배출 특성이 일정한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 전에 언급한 바와 같이

일정 혼합비 이상의 바이오디젤 혼합유는 연료와 노즐 표면의 마찰력 증대로 인해 분무에 악영향을 미치고, 또한 장시간 운전시 노즐 팁이 마모되는 현상이 발생되어 기관의 출력 및 배기 배출물의 특성을 우려하지 않을 수 없다. 그러나 Fig. 5~7에 나타난 바와 같이 기관실험결과 커먼레일 방식 디젤기관에 BDF 20%를 적용한 경우 매연, NO_x 및 CO₂의 배출 경향이 일정한 점으로 미루어 상기와 같은 문제점은 발생하지 않은 것으로 생각된다.

바이오디젤유는 경유와 비교하여 탄소의 함유량이 적어 연소시 CO₂의 배출량이 적게 나타나고,¹²⁾ 바이오디젤유의 원료인 바이오매스계 연료는 재배시 식물의 광합성작용을 통한 CO₂의 저감을 이룰 수 있기 때문에 교토기후협약에서 제안하는 지구온난화현상 방지에도 큰 효과를 기대할 수 있는 대체 에너지원으로 생각된다.

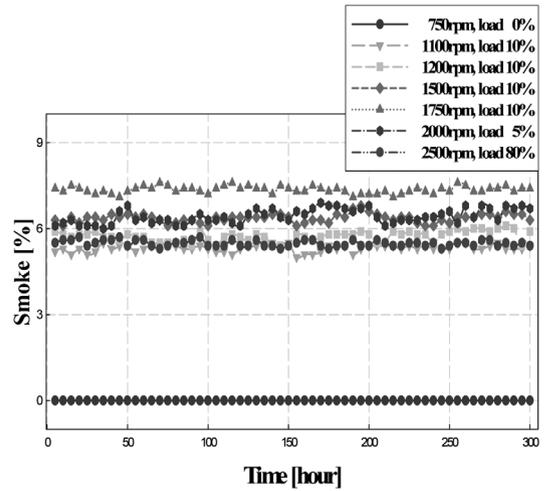


Fig. 5 Smoke versus engine speeds and loads

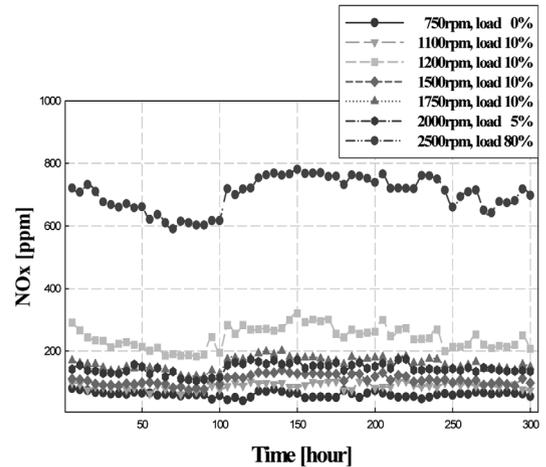


Fig. 6 NOx versus engine speeds and loads

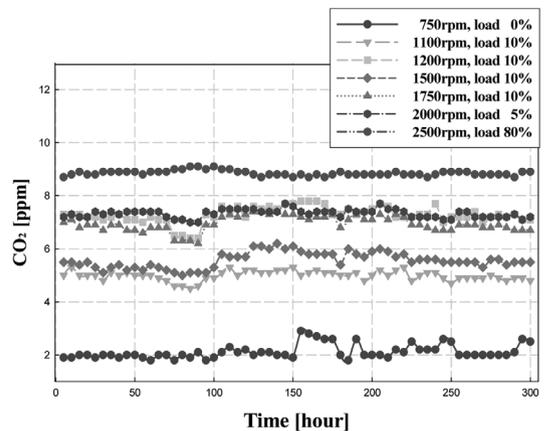


Fig. 7 CO₂ versus engine speeds and loads

3.3 기관 부품 및 윤활유의 변화

Fig. 8은 BDF 20%로 300시간을 운전한 후 인젝터 팁의 상태를 파악하기 위하여 실험을 종료 직후, 분사노즐을 분리하여 인젝터 팁 상단부를 50배 확대하여 찍은 사진을 나타낸 것이다. 사진에서 나타난 것과 같이 BDF 20%를 사용한 결과 인젝터 팁주위에 카본의 고착현상은 거의 없었다. 따라서, 기관 출력 및 배기가스 배출 특성이 BDF 20%로 장시간 운전하여도 전체적으로 균일하고, 유사한 경향을 보인 것은 통상 인젝터 팁 부분에 형성되는 카본의 양이 적어 분무의 미립화에 영향을 미치지 않았기 때문으로 생각된다.

Fig. 9는 동일한 조건에서 기관의 부품 특성을 파악하기 위하여 기관을 분해 후 촬영한 밸브와 실린더 헤드 사진을 나타낸 것이다. 실린더와 피스톤을 비롯한 각 밸브들을 조사하여 본 결과 연소상태는 양호하였으며, 연소실내에는 전반적으로 카본의 퇴적현상은 나타나지 않았음을 확인하였다.

Table 3은 실험 후의 윤활유의 특성변화를 파악하고자 실험 후 엔진 오일을 샘플링하여 분석하여, 신유와 비교하여 나타낸 것이다. 샘플링시간은 매 50시간마다 채취하였으며, 엔진오일의 교환은 150시간마다 교체를 하였다. 점도는 신유와 비교하여 약간 저하된 것을 알 수 있는데, 이와 같은 저감하는 현상은 오일을 구성하고 있는 탄화수소 분자나 첨가제들이 기관 작동중에 온도 상승으로 인해 열화되고 상호간에 화학반응을 하고 있는 것으로 생각된다.¹³⁾ 이와 같이 BDF 20%를 실험연료로 사용하여 커먼레일 기관에 대해 장시간 운전하여도 윤활유의

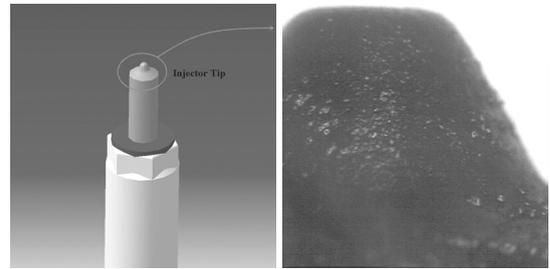


Fig. 8 Photographies of injector tip after durability test

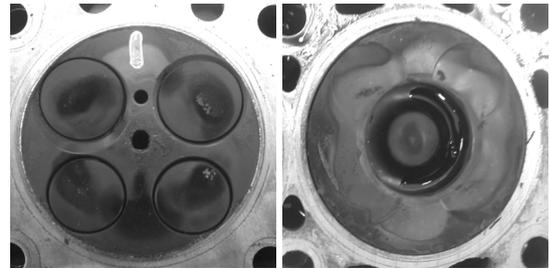


Fig. 9 Photographies of cylinder and valves after durability test

특성이 크게 악화되지 않고 동점도를 비롯한산화안정도가 비교적 양호하게 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 20%를 상용경유와 혼합하여 커먼레일 방식의 디젤기관의

Table 3 Properties of engine oil

Item	Unit	New oil	50hrs	100hrs	150hrs	200hrs	250hrs	300hrs
Density@15°C	g/ml	0.8587	0.8697	0.8703	0.871	.08711	0.8717	0.8723
Flash point	°C	228	226	226	226	226	226	226
Viscosity index	-	157	149	149	147	152	150	149
Evaporative loss	wt%	-						
TAN	mgKOH/g	2.88	2.58	2.63	2.80	2.77	2.72	2.87
TBN	mgKOH/g	9.34	8.95	8.77	9.16	9.12	8.89	8.88
			-4%	-6%	-2%	-2%	-5%	-5%
Kinematic@40°C	mm ² /s	97.4	83.43	81.27	79.13	86.19	82.95	81.38
			-14%	-17%	-19%	-12%	-15%	-16%
Viscosity@100°C	mm ² /s	14.67	12.62	12.38	12.03	13.09	12.60	12.36
			-14%	-16%	-18%	-11%	-14%	-16%

연료로 적용하고, 시험 모드를 이용하여 300시간 운전하였을 경우 기관성능 및 배기가스 배출특성, 기관부품의 변화 상태, 윤활유의 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- 1) BDF 20%를 사용하여 300시간의 내구시험을 수행한 결과 출력, 에너지소비율, 배기배출물이 동일 회전수 및 부하조건에서 일정한 경향을 보여 디젤기관의 대체연료로서 가능성을 확인할 수 있다.
- 2) BDF 20%를 사용하여 300시간 운전하여도 기관 부품에 큰 영향을 미치지 않아 기관에 대한 연료의 신뢰성을 확인할 수 있다.
- 3) BDF 20%를 사용하여 300시간 운전한 후 엔진 오일을 분석한 결과 바이오디젤유의 윤활특성이 양호한 관계로 윤활유의 특성이 악화되지 않음을 확인할 수 있다.

References

- 1) K. M. Park, J. H. Lee, B. D. So, S. J. Yoo, H. G. Lee and C. H. Kim, "Influence Evaluation of Biodiesel Fuel on Diesel SUVs," Fall Conference Proceedings, KSAE, KSAE06-F0079, pp.509-515, 2006.
- 2) W. Korbitz, "Biodiesel Production in Europe and North America, an Encouraging Prospect," Renewable Energy, Vol.16, pp.1079-1083, 1999.
- 3) C. A. Sharp, S. A. Howell and J. Jobe, "The Effect of Biodiesel Fuels on Transient Emissions from Modern Diesel Engine, Part I Regulated Emissions and Performance," SAE 2000-01-1967, 2000.
- 4) C. H. Hong, W. Choi, B. C. Choi and G. Y. Lee, "Characteristics of High Pressure Biodiesel Fuel Spray," Transactions of KSAE, Vol. 11, No.2, pp.56-65, 2003.
- 5) S. H. Yoon, S. G. An, M. Y. Kim, S. I. Kwon and G. S. Lee, "Combustion Characteristics of Biodiesel Fuel in a DI Diesel Engine," Fall Conference Proceedings, KSAE, KSAE05-F0110, pp.698-704, 2005.
- 6) Y. T. Oh and S. H. Choi, "A Study on Characteristics of Rice Bran Oil as an Alternative Fuel in Diesel Engine(I)," Transactions of KSAE, Vol.10, No.2, pp.15-22, 2002.
- 7) W. F. Marshall, "Effects of Methyl Esters of Tallow and Grease on Exhaust Emissions and Performance of a Cummins L 10 Engine," Report Prepared for the Fats and Proteins Research Foundation by the National Institute for Petroleum and Energy Research (NIPER), No. B08861, Sept. 16, 1993.
- 8) 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.
- 9) Y. T. Oh, N. H. Kim, S. H. Choi and G. H. Kim, "A Characteristics for Durability with Biodiesel Fuel of 5% in a CRDI Diesel Engine at Seoul-10 mode," Fall Conference Proceedings, KSAE, KSAE06-F0099, pp.636-641, 2006.
- 10) Fatty Acid Methyl Ester Fuels - Joint FIE Manufacturers Statement, Issued June 2004.
- 11) S. W. Lee, H. K. Suh, K. A. Sung and C. S. Lee, "Effect of Mixing Ratio of Bio-diesel Fuels on the Spray Behavior and Atomization Characteristics," Spring Conference Proceedings, KSAE, Vol. I, pp.556-561, 2004.
- 12) S. H. Choi and Y. T. Oh, "Combustion Characteristics of Esterified Rice Bran Oil as an Alternative Fuel in a Diesel Engine," Int. J. Automotive Technology, Vol.7, No.4, pp.399-406, 2005.
- 13) S. C. Kang, "The Study of Physical and Chemical Changes during Field Test of the New Formulated Diesel Engine Oil," Theses Collection, Vol.15, pp.549-557, 1997.