목질계 열분해유-바이오 디젤 유상액을 사용하는 직접분사식 디젤 엔진의 엔진성능 및 배기특성에 관한 연구

이석환^{*†}

Performance and Emission Studies in a DI Diesel Engine Using Wood Pyrolysis Oil-Bio Diesel Emulsion

Seokhwan Lee

Key Words: Fast pyrolysis(급속 열분해), Wood pyrolysis oil(목질계 열분해유), Biomass(바이오매스), Diesel engine(디젤엔진), Bio crude oil(바이오원유), Alternative fuel(대체연료)

Abstract

The vast stores of biomass available in the worldwide have the potential to displace significant amounts of fuels that are currently derived from petroleum sources. Fast pyrolysis of biomass is one of possible paths by which we can convert biomass to higher value products. The wood pyrolysis oil (WPO), also known as the bio crude oil (BCO), has been regarded as an alternative fuel for petroleum fuels to be used in diesel engine. However, the use of WPO in a diesel engine requires modifications due to low energy density, high water contents, low acidity, and high viscosity of the WPO. One of the easiest way to adopt WPO to diesel engine without modifications is emulsification of WPO with diesel or bio diesel. In this study, a DI diesel engine operated with diesel, bio diesel (BD), WPO/BD emulsion was experimentally investigated. Performance and gaseous & particle emission characteristics of a diesel engine fuelled by WPO/BD emulsion were examined. Results showed that stable engine operation was possible with emulsion and engine output power was comparable to diesel and bio diesel operation.

1. 서 론

지구 온난화의 주범인 화석 연료의 사용을 대체하기 위한 재생 가능한 에너지원 (renewable energy)에 대한 중요성이 부각되고 있는데 이 중에서 목재 등의 바이오매스를 이용하여 액체, 고체, 기체상의 연료를 제조하는 기술들이 근래에 연구되고 있다⁽¹⁾. 특히 목재가 풍부한 나라들을 중심으로 목재를 원료로 생산되는 열분해유를

적용한 열병합 발전소가 건설되고 있으며, 가스터빈⁽²⁾ 및 디젤엔진을 사용하여 발전하는 기술들이 많이 연구되었다⁽³⁾. 또한, 열분해유를 수송용 디젤엔진의 연료로 직접 적용하고자 하는 연구들도 근래에 진행되고 있는데 열분해유와 디젤연료의 연소특성 및 배출가스 배출 특성을 비교하는 연구들이 수행되었으며⁽⁴⁾, 열분해유를 디젤 엔진에 적용하기 위하여 세탄향상제를 첨가한 연료를 사용하여 디젤 동등 수준의 연소 성능을 확보하였다는 연구결과⁽⁵⁾ 및 열분해유를 최대 30%까지 디젤과 혼합한 혼합연료를 디젤엔진에 적용한 결과 배출가스 중에 THC, CO는 약간 증가하지만 NOx가 저감되었다는 연구결과들이 발표되었다^(6,7). 하지만, 열분해유는 디젤 엔진에 적합하지 않은 연료 물성치를 가지며⁽⁸⁾, 열분해유를 이용하여 엔진 연소는 가능하지만 연료공급계가

(2012년 10월 22일 접수 ~ 2012년 11월 22일 심사완료, 2012년 11월 27일 게재확정)

^{*}한국기계연구원 그린동력연구실

[†]책임저자, 회원, 한국기계연구원 그린동력연구실

E-mail : shlee@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7050 FAX : (042)868-7380

단시간에 파손되는 결과들이 보고되었다⁽⁹⁾.

열분해유의 물성치는 원료가 되는 바이오매스의 종류 및 생산 공정에 따라서 큰 차이를 보이는데 보통 18-30%의 수분이 포함되어 있으며 화석계 연료에 비하여 연료 내에 산소 성분이 많이 포함되어 있다. 본 연구에서 사용된 열분해유의 경우에는 톱밥을 재료로 급속 열분해 반응을 통하여 생산된 것이다⁽¹⁰⁾. 생산된 열분해유는 특유의 짙은 검갈색을 지니고 있으며 탄 냄새가 심하게 난다. 이와 같이 디젤연료와는 물성치가 매우 상이하므로 연료미립화, 점화 및 연소 특성, 배출가스의 특성도 다르다. 열분해유가 가지는 특성들을 요약하면 다음과 같다⁽¹¹⁾.

- 열분해유는 낮은 세탄가로 인하여 단독으로 사용시 자발화되지 않으므로 과일릿 분사나 세탄가가 높은 연료와 혼합하여 사용하여야 한다. 하지만 흡기온도를 200°C 이상으로 가열하여 열분해유 단독으로 연소시키기도 하였다⁽¹²⁾.
- 열분해유의 구성 성분 중 산소 성분은 42-50%를 이루고 있으며 탄소 성분이 비율이 석유계 연료에 비해서 낮으므로 에너지 함유량도 낮다.
- 열분해유의 점도는 중유와 경유의 중간 정도에 위치하는데 열분해유의 원재료와 공정에 따라서 차이가 나며 열분해유 내의 수분함유량 및 연료의 온도에 의해서 큰 차이가 난다. 점도가 디젤유에 비하여 높기 때문에 연료의 미립화 특성이 저하된다. 이로 인하여 CO의 배출량이 증가한다^(6, 13).
- 열분해유는 산성 (pH 2-3)의 성질을 가지고 있으므로 오랜 시간 운전을 하는 경우 분사계가 부식될 수 있으며 연료 내의 높은 수분함유량 또한 분사계 손상의 요인이다⁽⁹⁾.
- 열분해유에는 타르가 포함되어 있는데 중합 작용 (polymerization)에 의해서 점착성의 물질로 변환된다. 중합작용은 실온에서도 일어나며 특히 90°C가 넘는 고온에서 매우 빠르게 일어난다. 이로 인하여 발생하는 중합체 (polymer), 타르, 고체입자 등은 분사계에 퇴적되어 성능을 저하시키게 된다. 또한, 열분해유가 연소되면 탄소계 퇴적물이 생성되어 분사계 뿐만 아니라 연소실, 배기밸브, 피스톤 등에 퇴적되어 성능 저하를 일으킨다⁽²⁾.

위에서 언급한 열분해유의 특성을 고려할 때 열분해유를 단독으로 사용하기 위해서는 연료공급계를 이루고 있는 소재 교환, 분사기 분공 확장 등의 개조를 거쳐야

한다^(2, 3). 연료공급계의 개조 없이 이용하기 위해서는 열분해유에 디젤유 혹은 바이오디젤유를 적정량 유화한 유상액을 적용하는 것이 가장 쉬운 방법이다^(14, 15). 탄소계 연료들의 경우 대부분 서로 잘 혼합되는 반면에 바이오매스에서 생산되는 열분해유는 화석계 연료와 극성 (polarity)이 달라서 혼합되지 않고 층이 지게 된다. 따라서 바이오매스 연료와 화석연료를 혼합하기 위해서는 적절한 계면활성제를 사용하여 유화시켜야 한다.

국내에서는 목질계 열분해유를 디젤 엔진에 적용한 연구가 거의 진행된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 목재에서 생산된 열분해유를 디젤 엔진에 적용함에 있어서 바이오디젤과 유화 (Emulsification)하여 얻어진 유상액을 직접분사식 디젤 엔진에 적용하여 연소성능 및 배출가스 특성을 파악하고자 하였다. 이를 토대로 향후 열분해유를 사용하는 디젤 엔진의 최적화 연구에 기초 데이터로 제공이 가능하리라 사료된다.

2. 실험장치 및 구성

2.1 실험연료

열분해유를 디젤엔진에 적용하기 위하여 100% 콩으로 제조된 바이오디젤유와 유화하여 유상액을 제조하였는데 제조 과정은 다음과 같다. 질량 기준으로 바이오디젤유 60%에 열분해유 40%를 혼합한 뒤 계면활성제인 Octanol을 4% 첨가하고 교반기를 사용하여 30°C, 1,200 rpm 모터 회전수 조건에서 15분간 교반을 하였다⁽¹⁴⁾. 교반한 후 24시간 동안 혼합연료를 방치하게 되면 Fig. 1과 같이 두 연료로 층이 나누어지는데 상층 연료인 유

Fig. 1 WPO/Bio diesel emulsion

Table 1 Base diesel engine specifications

Type	LHV (kJ/g)	Water (%)	C (%)	H (%)	O (%)	Viscosity (mm ² /s at 40)	Density (kg/m ³)
Diesel	45.8	-	85.0	12.6	-	2.7	821.0
BD	39.5	0.14	77.4	12.1	10.1	5.0	833.3
WPO	15.9	33.62	41.0	10.1	48.8	9.5	1193.5
Emulsion	38.6	0.38	76.4	12.1	11.5	5.4	905.3

상액을 얻을 수 있다. 하층 연료는 열분해유에서 무거운 성분인 리그닌(lignin)이 많이 포함되어 있으며 가벼운 성분의 경우 바이오디젤유 대비 12% 정도의 혼합비로 바이오디젤유와 유화되어 유상액이 만들어졌다. 바이오디젤유와 열분해유의 가벼운 성분이 섞여 있는 유상액은 Char 등의 입자들도 거의 없으며 점도도 높지 않아서 그대로 디젤 엔진에 적용이 가능하다.

디젤유, 바이오디젤유, 열분해유, 유상액에 대하여 물성치를 측정하여 비교한 결과를 Table 1에 나타내었다. 본 물성치는 공인분석기관인 한국석유관리원에 의뢰하여 분석한 결과이다. 열분해유는 디젤 대비 저위발열량(LHV; Lower Heating Value) 값이 1/3로 이는 단위 중량당 에너지 함유량이 1/3밖에 되지 않는다는 의미이다. 또한 열분해유는 수분함유율이 33%에 달해 내연기관에 사용하기에는 적합하지 않은 연료라고 할 수 있다. 이에 비해서 유상액의 경우 바이오디젤유에 비해서 에너지 함유량도 거의 동일하며 수분 함유율도 1% 내로 매우 낮게 측정되어서 바이오디젤유와 거의 동일한 성능을 나타낼 것으로 예측된다.

2.2 실험방법

실험에 사용된 엔진 시스템의 제원을 Table 2에 나타내었다. 엔진은 배기량 1,858cc, 압축비 17.1인 직접분사식(DI; Direct Injection) 단기통 디젤엔진을 사용하였으며, 분사 시스템은 1,500 bar 이상의 고압 분사가 가능

Table 2 Base diesel engine specifications

Specifications	Resources
Displacement	1,858 cc
Cylinders	1
Intake system	Natural aspiration
Bore Stroke	130 140 mm
Compression ratio	17.1

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

한 커먼레일 분사시스템을 사용하였다. Fig. 2는 실험 장치의 개략도를 나타내고 있다. 단기통 디젤엔진의 동력 특성 제어를 위하여 100 kW급 DC 동력계를 사용하였으며, 연소 특성 분석을 위하여 실린더의 글로우 플러그 위치에 압력 센서(Kistler, 6052C)와 이의 설치를 위한 어댑터(Kistler 6542Q27)를 장착하여 엔코더 신호와 동기시켜 연소실 압력을 크랭크각 1도 단위로 측정하였으며, 이를 바탕으로 열방출율 곡선을 계산하였다. 흡입 공기량 측정을 위해 흡기 레저버(reservoir)의 상단에 층류 유량계(Meriam Inst. Co.)를 설치하였으며 공연비의 경우 광대역 공연비 센서(ETAS, LA4)를 이용하여 측정하였다. 가스상 배기배출물 분석을 위하여 배기가스 분석기(AVL, AMA i-60)를 사용하였으며, 검댕(Soot)을 측정하기 위해서는 광투과 방식의 매연측정장치인 Opacimeter(AVL)을 사용하였다. 입자상 배출가스의 개수농도 및 입경별 개수 농도를 측정하기 위해 DMA(Dynamic mobility analyzer)와 응축 입자 계수기(Condensation particle counter)로 구성된 Grimm사의 SMPS(Scanning mobility particle sizer)를 이용하였다.

실험은 디젤유, 바이오디젤유 및 유상액에 대하여 분사압을 120 MPa로 고정한 후 부하 변화(IMEP 0.2~0.8 MPa)에 따라서 수행되었으며 연소 특성, 배출가스의 배

출특성을 측정하였다. 본 연구에서는 배기량이 1,858 cc 인 대형 디젤 단기통 엔진을 사용하였으므로 대형 디젤 엔진의 일반적인 운전 조건인 1,000 rpm의 엔진 회전수 조건에서 실험을 수행하였다. 안정적인 실험을 위하여 각 연료의 연소 특성 및 배출가스 특성을 살펴보기 위해 연료 교체 시 연료 분사계 및 연료라인에 남아 있는 연료들을 완전히 제거하여 엔진 내에 남아있는 잔류 연료들과의 혼합을 방지하였다.

3. 실험결과

3.1 엔진 연소 특성

엔진회전속도 1,000 rpm, 엔진부하 IMEP 0.4 MPa 조건에서 디젤유, 바이오디젤유, 유상액을 사용하는 경우 연소실 압력과 열방출율 곡선을 Fig. 3에 나타내었다. 연료 분사시기는 엔진이 최대 출력을 가지는 지점으로 정하였으며 디젤유 BTDC 12°CA, 바이오디젤유 BTDC 11°CA, 유상액 BTDC 10°CA로 고정하였다. 다른 부하 조건에서는 각 부하별로 최적의 시점을 찾아서 실험을 수행하였다.

연소실 압력 선도를 살펴보면 디젤유, 바이오디젤유, 유상액을 사용하는 경우에는 연소압의 최대값이 거의 동일함을 알 수 있다. 열방출율 계산 결과를 살펴보면 점화시기는 디젤: BTDC 7°CA, BD:BTDC 6°CA, 혼합유:BTDC 4°CA로 연료 분사시기를 고려하면 모든 연료에서 점화 지연 기간은 거의 동일하다. 유상액의 경우 세탄가가 낮은 열분해유가 혼합되어 있으므로 타 연료에 비해서 세탄가가 낮지만 연소 성능에 별다른 영향을

Fig. 3 Cylinder pressure & heat release rate according to test fuels at 1,000 rpm, IMEP 0.4 MPa)

Fig. 4 Combustion duration of test fuels according to engine loads

주지 않은 것으로 판단된다.

연료의 10% 에너지 발산점을 지칭하는 MFB10 (Mass fraction burned) 시점과 MFB 90 시점 사이의 시간을 나타내는 전체적인 연소시간(Combustion duration)을 측정한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 유상액의 경우 바이오디젤유에 바이오원유가 12% 정도 혼합되어 있지만 바이오디젤유 대비 발열량 및 원소 성분의 차이가 거의 없으므로 총 연소 기간도 거의 비슷한 수준으로 측정되었다.

엔진의 안정적인 연소 성능을 판단할 수 있는 도시평균 유효압력 변동계수(Coefficient of variance in Indicated Mean Effective Pressure)를 측정한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 부하의 증가에 따라서 연소는 더욱 안정적인 경향을 나타내고 있으며 모든 연료에 대하여 변동

Fig. 5 Coefficient of variance in indicated mean effective pressure of test fuels according to engine loads

Fig. 6 Indicated specific fuel consumption of test fuels according to engine loads

Fig. 8 Indicated specific THC emission of test fuels according to engine loads

Fig. 7 Fuel conversion efficiency of test fuels according to engine loads

Fig. 9 Indicated specific CO emission of test fuels according to engine loads

계수는 거의 동일하게 측정되었다.

도시연료소비율(Indicated specific fuel consumption)과 연료 전환 효율(Fuel conversion efficiency)을 Fig. 6과 7에 나타내었다. Table 1에서 살펴본 바와 같이, 디젤유에 비해서 바이오디젤유 및 바이오원유의 저위발열량은 낮다. 따라서 바이오디젤유 및 유상액의 경우 동일한 속도와 부하 조건을 충족시키기 위해서 더 많은 연료가 공급되어야 한다. 도시연료소비율과 저위발열량과의 비로 계산할 수 있는 연료 전환 효율은 모든 시험 연료에 대하여 30~50% 수준으로 동등하게 측정되었다. 디젤유에 비해서 저위발열량이 낮은 유상액의 경우에도 연소 성능이 동일하므로 공급된 연료에 대해서는 동일한 수준의 효율을 가지고 출력을 내는 것으로 측정되었다.

3.2 가스상 배출가스 측정 결과

사용 연료에 따른 단위 출력당 미연탄화수소 (THC), 일산화탄소 (CO), 질소산화물 (NOx) 및 검댕 (soot)의 배출량 결과를 Fig. 8~11에 나타내었다. 디젤연료의 THC 배출물 특성과 비교한 결과 모든 연료에서 부하의 증가에 따라서 연소실 내의 압력 및 온도의 증가로 연료의 증발 및 자발화 특성이 좋아져서 THC이 감소하는 경향을 보인다. 또한 바이오디젤 및 유상액의 경우 합산소 연료 효과로 인하여 디젤유에 비하여 THC 발생량이 약간 낮은 경향을 보였다. IMEP 0.7 MPa 이상의 고부하 조건에서는 공기과잉률이 1.5 이하로 매우 농후한 조건이 생성되므로 미연되는 연료들이 증가하여 THC가 증가한다.

CO의 경우에는 IMEP 0.2 MPa 조건 외에는 모든 연료에서 배출량이 거의 비슷한 수준으로 측정되었다. CO의 주된 발생요인 중 하나로 엔진 연소실로 분사된 연료의 미립화 성능이 있는데 유상액의 경우 점도가 약간 높으며 고분자 물질들이 포함되어 있으므로 연료의 미립화 성능이 좋지 않아서 저부하시 CO의 발생량이 타 연료에 비해서 약간 높은 것으로 판단된다^(5,13).

NOx의 경우, 디젤유에 비하여 바이오디젤 및 유상액은 연료 내의 산소 함유로 인하여 연소실 내에서의 NOx 형성을 촉진되므로 NOx 배출량이 5~10% 증가하는 경향을 보였으며 바이오디젤유 및 유상액은 서로 동등한 경향을 보였다. 열분해유를 직접 사용하는 경우 연료 내의 높은 수분함유량에 의해서 연소온도가 낮아지

므로 NOx가 감소하는 효과가 있지만 유상액의 경우 수분함유가 거의 없으므로 NOx 저감효과는 없었다.

Fig. 11에서는 광투과식 매연측정기로 측정한 시험연료에 따른 검댕의 배출량을 나타내고 있다. 검댕의 경우 디젤유 이외의 연료는 C-C 결합 사이에 O 분자가 다량 포함되어 있으므로 검댕의 배출량은 디젤유 대비하여 낮게 측정되었으며 유상액의 경우 산소성분이 가장 많이 포함되어 있으므로 검댕의 배출량이 가장 낮았다.

3.3 입자상 배출가스 측정 결과

시험연료에 따른 미세입자의 개수농도 측정 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 광투과식 매연측정기로 측정한 검댕 배출결과에서는 합산소 연료인 바이오디젤과 유상액을 사용하는 경우 연료 내에 포함된 산소 성분이 검댕의 산화를 촉진시켜서 검댕의 배출이 감소하는 경향을 보였다. 하지만 미세입자의 개수농도는 합산소 연료를 사용하는 경우 미세입자의 개수농도가 증가하는 경향을 보여주었다. 이는 바이오디젤 및 유상액의 경우 휘발성이 낮으므로 입경 크기가 50 nm 이하인 핵생성 모드 영역(Nucleation mode)에서 미세입자들의 발생량이 많아지게 된다⁽¹⁶⁾. 특히, 유상액을 사용하는 경우 미세입자의 발생량이 가장 많았는데 이는 열분해유가 고분자 물질로 이루어져 있으므로 핵생성 모드 영역의 입자들이 많이 발생하는 것이다⁽¹⁷⁾.

Fig. 13은 엔진회전수 1,000 rpm 조건에서 저부하 조건인 IMEP 0.3 MPa과 고부하 조건인 IMEP 0.8 MPa 조건에서 측정한 미세입자의 입경별 개수농도 분포를 나타낸 그래프이다. IMEP 0.3 MPa 조건에서 측정한 결

Fig. 10 Indicated specific NOx emission of test fuels according to engine loads

Fig. 11 Engine out soot emission of test fuels according to engine loads

Fig. 12 Particle number concentration of test fuels according to engine loads

(a) IMEP 0.3 MPa

(b) IMEP 0.8 MPa

Fig. 13 Particle number size distribution of test fuels at IMEP 0.3 & 0.8 MPa

과를 살펴보면 바이오디젤유 및 유상액의 경우 핵생성 모드 영역에서 디젤유에 비하여 미세입자의 배출량이 많다. 특히 바이오원유가 포함된 유상액의 경우 연료의 휘발성이 낮고 고분자 물질이 많이 포함되어 있어서 핵생성 영역에서의 미세입자 발생량이 많았다. 하지만 실제로 검댕이 생성되는 입경영역인 50 nm 이상의 축적모드(Accumulation mode) 영역에서는 디젤유를 사용하는 경우 미세입자의 배출량이 많으며 바이오디젤 및 유상액의 경우 농도가 낮았다. 따라서 바이오디젤 및 유상액을 사용하면 검댕의 발생량은 낮으며 이 결과는 Fig. 11에서 측정 한 검댕 측정결과와 일치한다.

고부하 조건인 IMEP 0.8 MPa에서의 실험결과를 살펴보면 부하의 증가로 인하여 50 nm 이상의 영역에서 발생하는 입자의 농도가 증가한 것을 알 수 있다. 50

nm 이상의 입경을 가지는 입자들은 검댕을 생성하게 되므로 부하의 증가에 따라서 검댕의 농도가 증가하는 것이다. 유상액의 경우 검댕을 생성하는 입자들이 존재하는 50 nm 이상의 입경 영역에서의 농도는 가장 낮았으며 50 nm 이하의 핵생성 모드 영역에서는 농도가 가장 높게 측정되어서 미세입자의 총 수농도는 디젤 및 바이오디젤을 사용하는 경우와 동일하게 측정되었다.

4. 결 론

디젤유의 대체연료로써 근래에 연구가 진행되고 있는 목재 열분해유를 바이오디젤과 유화시켜서 얻은 유상액을 사용하여 디젤엔진에서 엔진의 연소성능 및 배출가스 배출량을 측정하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 연소압 및 열방출율 곡선을 측정한 결과 디젤유, 바이오디젤유, 유상액을 사용하는 경우 동일한 수준의 연소 성능을 얻을 수 있었다.
2. 동일한 출력을 내기 위해서는 에너지밀도가 높은 연료의 연료소모율이 낮으므로 디젤유가 타 연료에 비해서 도시연료소모율이 낮게 측정되었으며 유상액을 사용하는 경우 가장 높게 측정되었다.
3. 바이오디젤 및 유상액은 합산소 연료이므로 디젤유에 비하여 THC 배출량이 낮게 측정되었으며 CO의 경우 모든 연료에서 배출량이 비슷한 수준이었다.
4. 디젤유에 비하여 바이오디젤유 및 유상액을 사용하는 경우 연료에 포함된 산소성분으로 인하여 NOx의 배출량이 5~10% 높게 측정되었다. 바이오디젤 및 유상액에 포함된 산소성분이 검댕의 산화를 촉진시켜주므로 디젤을 사용하는 경우에 비해서 검댕의 배출량은 낮게 측정되었다.
5. 미세입자 수농도를 측정한 결과 유상액을 사용하는 경우 연료의 휘발성이 낮으며 고분자물질이 많이 포함되어 있으므로 핵생성 모드 영역의 미세입자들이 많이 배출되었다. 하지만 검댕이 생성되는 영역인 50 nm 이상의 영역에서는 입자의 수농도가 낮아서 디젤에 비하여 검댕이 적게 배출된다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원의 일반사업인 “미활용에

너지 청정 고밀도화 기계기술 기반구축” 사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) Ringer, M., Putsche, V. and Scahill, J., “Large-Scale Pyrolysis Oil Production: A Technology Assessment and Economic Analysis”, *Technical Report, NREL/TP-510-37777*, 2006.
- (2) Chiaramonti, D., Oasmaa, A. and Solantausta, Y., “Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass”, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11, pp. 1056~1086, 2007.
- (3) Solantausta, Y., Nylund, N., Westerholm, M., Koljonen, T. and Oasmaa, A., “Wood-Pyrolysis Oil as Fuel in a Diesel-Power Plant”, *Bioresource Technology*, Vol. 46, pp. 177~188, 1993.
- (4) Bertoli, C., D'Alessio, J., Giacomo, N., Lazzaro, M., Massoli, P. and Moccia, V., “Running Light-Duty DI Diesel Engines with Wood Pyrolysis Oil”, *SAE paper 2000-01-2975*, 2000.
- (5) Prakash, R., Singh, R. and Murugan, S., “Performance and Emission Studies in a Diesel Engine Using Bio Oil-Diesel Blend”, *2011 2nd International Conference on Environmental Science and Technology*, Vol. 6, pp. 428~433, 2011.
- (6) Shihadeh, A. and Hochgreb, S., “Diesel Engine Combustion of Biomass Pyrolysis Oils”, *Energy & Fuels*, Vol. 14, pp. 260~274, 2000.
- (7) Lee, S., Park, J., Lim, G., Choi, Y., Woo, S. and Kang, K., “Feasibility Study of Using Wood Pyrolysis Oil in a Diesel Engine”, *Journal of Illass-Korea*, Vol. 16, pp. 151~158, 2011.
- (8) Frigo, S., Gentili, R., Tognotti, L., Zanforlin, S. and Benelli, G., “Feasibility of Using Wood Flash-Pyrolysis Oil in Diesel Engines”, *SAE paper 982529*, 1998.
- (9) Chiaramonti, D., Bonini, M., Fratini, E., Tondi, G., Gartner, K., Bridgwater, A., Grimm, H., Soldaini, I., Webster, A. and Baglioni, P., “Development of emulsions from biomass pyrolysis liquid and diesel and their use in engines-Part 2: tests in diesel engines”, *Biomass & Bioenergy*, Vol. 25, pp. 101~111, 2003.
- (10) Choi, H., Choi, Y. and Park, H., “The influence of fast pyrolysis condition on biocrude-oil yield and homogeneity”, *Korean J. Chem. Eng.*, Vol. 27, pp. 1165~1169, 2010.
- (11) Qiang, L., Wen-Zhi, L. and Xi-Feng, Z., “Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, pp. 1376~1383, 2009.
- (12) Beld, B., Holle, E., and Florjin J., “An experimental study on the use of pyrolysis oil in diesel engines for CHP applications”, *19th European Biomass Conference and Exhibition*, 6-10 June 2011, pp. 1181~1187.
- (13) Chiaramonti, D., Riccio, G., Baglioni, P., Bonini, M., Milani, S., Soldaini, I., Calabria, R., and Massoli, P., “Sprays of biomass pyrolysis oil emulsions: Modelling and experimental investigation. Preliminary results on modelling”, *14th European Biomass Conference and Exhibition*, 17-21 October 2005.
- (14) Jiang, X. and Ellis, N., “Upgrading Bio-oil through Emulsification with Biodiesel: Mixture Production”, *Energy & Fuels*, Vol. 24, pp. 1358~1364, 2010.
- (15) Ikura, M., Stanculescu, M. and Hogan, E., “Emulsification of pyrolysis derived bio-oil in diesel fuel”, *Biomass & Bioenergy*, Vol. 24, pp. 221~232, 2003.
- (16) Tan, P., Hu, Z., Lou, D., and Li, B., “Particle Number and Size Distribution from a Diesel Engine with Jatropha Biodiesel Fuel”, *SAE Technical Paper*, 2009-01-2726, 2009.
- (17) Schonbon, A., Ladomatos, N., Williams, R., Allan, R., and Rogerson, J., “The influence of molecular structure of fatty acid monoalkyl ester on diesel combustion”, *Combustion and Flame*, Vol. 156, pp. 1396~1412, 2009.