

## BDF 20을 사용하는 디젤기관들의 연소 및 내구특성

유경현<sup>\*1)</sup> · 오영택<sup>2)</sup>

군산대학교 기계공학부<sup>1)</sup> · 전북대학교 기계공학과<sup>2)</sup>

### Combustion Characteristics and Durability of Diesel Engines Burning BDF 20

Kyunghyun Ryu<sup>\*1)</sup> · Youngtaig Oh<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>School of Mechanical Engineering, Kunsan National University, Cheonbuk 573-701, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, Cheonbuk 561-756, Korea

(Received 28 June 2006 / Accepted 19 September 2006)

**Abstract** : Three diesel engines were fueled with BDF 20, a blend of 80% diesel fuel and 20% biodiesel fuel by volume, and run in excess of 200 h to evaluate their combustion characteristics and durability. The engines used for this study were a 4-cylinder 2476-cc displacement IDI diesel engine(Engine 1), a 4-cylinder 1732-cc displacement IDI diesel engine(Engine 2), and a single cylinder 673-cc displacement DI diesel engine(Engine 3). Engine dynamometer testing was performed on each engine at regularly scheduled intervals to monitor the performance and exhaust emissions, which were sampled at 1 h intervals for analysis. The peak combustion pressure with BDF 20 increased in Engines 1 and 3 over that measured when burning pure diesel fuel, but that in Engine 2 remained constant. Combustion parameters, such as the maximum combustion pressure and corresponding crank angle, did not change over the long-term dynamometer testing. The BSFC with BDF 20 in Engine 1 was less than that measured with pure diesel fuel. The amount of smoke produced with BDF 20 was less for all engines ; the greatest reduction was observed for Engine 3. The NO<sub>x</sub> emissions were lower in the IDI engines than the DI engine. The traditional trade-off between smoke and NO<sub>x</sub> emissions was maintained for BDF 20 fuel for Engines 1 and 3. There was not a big difference in the CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> emissions for BDF 20, as compared to pure diesel fuel, but more CO<sub>2</sub> was exhausted by Engine 1 than by Engines 2 or 3 and less O<sub>2</sub> was exhausted by Engine 1 than by Engines 2 or 3. The engine parts remained clean, except for some carbon attached to the area surrounding the nozzle hole of the DI diesel engine.

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

#### Nomenclature

BDF 20 : a blend fuel of 80% diesel fuel and 20%  
biodiesel fuel by volume  
CFPP : cold filter plugging point  
DF : diesel fuel

$dP_{max}$  : maximum pressure rise rate, bar/°CA  
 $P_{max}$  : combustion maximum pressure, bar  
 $\Theta_{Pmax}$  : crank angle at which combustion maximum  
pressure occurs, °CA

#### 1. 서론

석유 연료를 사용하는 자동차의 유해 배출물로

\*Corresponding author, E-mail: khryu@kunsan.ac.kr

인해 지구 환경오염의 가속화가 초래되고 화석연료의 고갈에 대한 염려와 세계 국제정세의 불안으로 유가가 급등함에 따라 석유연료를 대체할 수 있는 저공해 대체연료의 개발 및 보급에 대한 연구가 많은 관심의 대상이 되고 있다. 많은 대체에너지들 중에서도 바이오디젤유는 재생가능한 연료이면서, 전 세계 어느 곳에서든지 지역의 풍토에 맞는 농업생산물을 이용하여 생산이 가능하고 현재의 상용 디젤기관의 변경없이 적용이 가능하다는 장점때문에 많은 연구가 시도되고 있으며, 현재까지 각국의 지역 농산물의 생산품에 따라서 채종유, 대두유, 팜유 등을 이용한 바이오디젤유들이 연구되어 왔다.<sup>1-9)</sup>

바이오디젤유는 경유와 연료 성상이 비슷하면서도 연료속에 10~15% 정도의 산소를 함유하고 있어 매연의 저감에 효과적인 장점을 갖고 있지만, 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.

바이오디젤유의 내구시험을 통한 성능 및 연소특성에 관한 연구로서 Feldman 등<sup>7)</sup>은 2°C의 진각된 분사시기를 적용하여 직접분사식(DI) 디젤엔진에서 200시간동안 운전하였을 경우 출력의 증가 특성을 관찰했다고 보고하였고, Peterson 등<sup>10)</sup>은 채종유로 만든 바이오디젤유를 5.9L DI 디젤엔진에 10만 마일동안 적용하였을 경우 BDF 100을 사용할 경우에는 경유를 사용하는 경우보다 출력이 약 5%정도 감소하고 매연농도는 32% 감소하였으나, BDF 20을 사용할 경우에는 출력이 약 1.5% 정도 감소하고 매연농도는 6.6% 높게 배출되었다고 보고하였다. 한편, Pischinger 등<sup>11)</sup>은 1.6L IDI 디젤엔진에 대두유 바이오디젤유를 적용하여 1,418시간동안 운전하였을 경우 출력, 토크, 및 매연 농도가 정상적인 범위내에 존재했다고 보고하였다.

국내에서도 BDF 20에 대한 기관성능 평가는 완료되어 긍정적인 평가를 받고 있으나,<sup>12-14)</sup> 아직까지 BDF 20에 대한 장기간 운전시의 내구성 평가<sup>13)</sup>가

미흡한 실정이며, 디젤기관의 연료공급방식 및 연소방식에 따라 바이오디젤유의 연소특성 및 배기배출물의 양상이 다르게 나타나고 있어 이에 대한 고찰이 더욱 필요한 실정이다.

본 연구에서는 국내에서 사용되고 있는 디젤기관들에 BDF 20을 장시간 적용할 경우 기관의 연소특성 및 변동, 연료소비율 및 배기배출물 특성 변화를 고찰하고, 장시간 BDF 20을 적용할 경우 연료공급방식 및 엔진 유형에 따라 기관 성능 및 배기배출물 특성에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 엔진 및 연료

본 연구에서는 BDF 20의 연소특성 및 내구성을 파악하기 위하여 3개의 디젤기관을 사용하였다. Table 1은 실험에 사용된 기관들의 주요 사양을 나타낸 것으로, Engine 1은 자동차에 사용되고 있는 4기통, 4행정, 간접분사식 디젤기관으로 엔진의 회전속도에 의해 연료공급압력의 변화면 연료의 분사시기가 가변되도록 조정해 주는 타이머가 부착된 분배형 분사펌프를 사용하고 있다. Engine 2는 농업용 트랙터에 사용되고 있는 4기통 4행정 간접분사식 디젤기관이며, Engine 3은 구멍형 노즐의 연료인젝터가 장착된 단기통, 4행정, 직접분사식 농업용 디젤기관이다. Engine 2와 3은 분사시기가 일정하게 고정되어 있는 독립형 분사펌프를 사용하고 있다.

Table 1 Specifications of test engines

Item	Specification		
	Engine 1	Engine 2	Engine 3
Engine model	HD D4BA	TD1700	ND130DIE
Number of cylinder	4	4	1
Bore × stroke (mm)	91.1 × 95	82 × 82	95 × 95
Displacement (cc)	2476	1732	673
Compression ratio	21	21	18
Injection type	IDI	IDI	DI
Combustion chamber	Swirl	Swirl	Toroidal
Injection timing (°CA)	ATDC 4	BTDC 20	BTDC 22
Injection pressure (bar)	135	145	220
Coolant temperature	80±2 °C	80±2 °C	80±2 °C
Rated power (PS/rpm)	80/3800	35/2800	13/2400
Rated torque (kg · m/rpm)	15.4/2000	9.2/1800	4.2/1900

시험에 사용된 엔진들은 시동모터에 의해서 시동이 되고, 기관부하와 기관 회전속도는 와전류형 엔진 동력계(HW 130kW)에 의해 임의로 조정할 수 있도록 하였다.

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 2<sup>16)</sup>는 실험에 사용된 BDF 20의 물성치를 나타낸 것이다.

한편, Fig. 1은 본 연구에 사용된 바이오디젤유의 윤활특성을 알아보기 위해 연료유의 윤활성 평가 시험기로 경유에 대한 바이오디젤유의 혼합 농도에 따른 마멸 흠 직경(wear scar diameter)을 측정하여 나타낸 것이다. 국내의 경유에 대한 마멸 흠 직경은 유럽의 기준치보다 작게 나타났으며, 경유에 대한 바이오디젤유의 혼합농도가 커짐에 따라 더욱 작아짐을 알 수 있었다. 이는 바이오디젤유의 윤활성이 좋다는 것을 의미하며, 장시간 바이오디젤유로 운전할 경우 기관 부품의 마찰 손실을 비롯하여 마멸이 저감될 것으로 판단된다.

또한, Table 2에서 알 수 있는 바와 같이 BDF 20의 유동점(PP)과 저온필터막힘점(CFPP)이 경유보다도

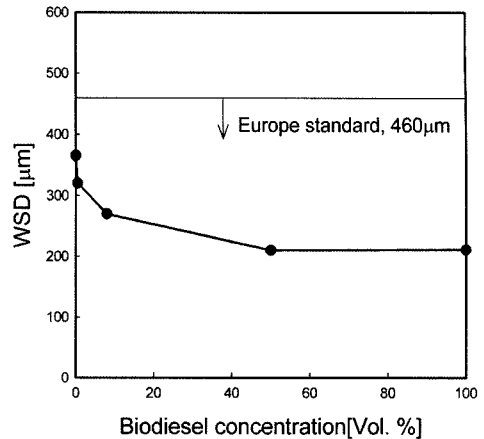


Fig. 1 Lubricity test versus biodiesel fuel concentration

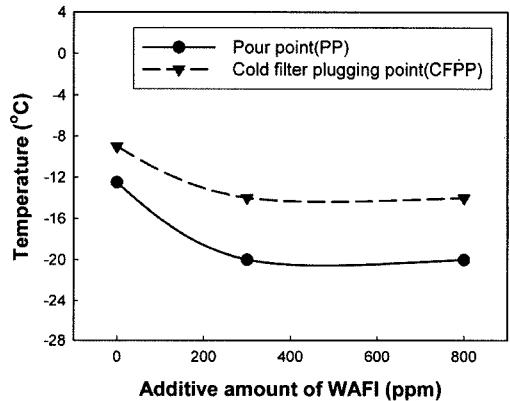


Fig. 2 Pour point and CFPP of BDF 20 versus additive amount of WAFI

Table 2 Properties of test fuels

Item	Test result		
	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

높음을 알 수 있다. 이는 BDF 20을 겨울철에 사용할 경우 한계가 있으며 온도가 급강하할 경우 연료관이 막히는 문제가 발생할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 2는 BDF 20에 대한 유동점(PP)과 저온필터막힘점(CFPP)을 개선하기 위하여 국내에서 일반적으로 사용하고 있는 경유의 저온유동성향상제(wax anti-settling flow improver, WAFI)를 사용하였을 경우 유동점 및 저온필터막힘점의 변화 특성을 나타낸 것이다. WAFI(Infineum, R-749)의 첨가량이 증가할수록 유동점 및 저온필터막힘점은 감소함을 알 수 있고 경유에 일반적으로 사용하고 있는 WAFI의 함량인 300ppm만 사용하여도 저온시에 발생할 수 있는 BDF 20의 유동점 및 저온필터막힘점 문제도 쉽게 해결될 수 있으리라 판단된다.

## 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 엔진들을 이용하여 워밍업이 끝난 상태에서 Table 1에서 나타낸 바와 같이 각 엔진의 최대 토오크가 발생하는 기관회전 속도에서 90% 부하로 경유만을 가지고 약 2-10시간 정도 운전하여 기본 데이터를 취득한 후 BDF 20으로 210시간동안 운전하였다. 각종 측정 데이터는 1시간 간격으로 취득하였으며, 실험시 기관의 냉각수 온도는  $80 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하였다. Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

또한, 대체연료를 사용할 경우 대체연료에 대한 연소변동 특성을 파악하기 위해, 실린더의 연소 압력을 1회 측정시 200사이클을 취득하여 그 평균값을 얻음으로써 실린더내 연소 최고압력( $P_{max}$ ), 최대 압력상승률( $dP_{max}$ ), 최고 연소압력이 발생하는 크랭크 각도( $\Theta_{Pmax}$ )를 계산하여 연소 변동을 해석하였다.

그리고, BDF 20이 배기가스 배출특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 매연은 배기다기관으로부터 300 mm 하류에 설치된 Bosch 타입의 매연측정기(HBN 1500)를 이용하여 1시간 간격으로 3회 반복 측정하였으며, NOx, CO, O<sub>2</sub> 및 CO<sub>2</sub>는 전기화학적셀 방식의 배기가스분석기(Eurotron 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 특성 및 엔진 성능

Fig. 4 각 엔진의 최대 토오크가 발생하는 회전속도와 90%부하에서 경유와 BDF 20을 사용하였을 경우의 연소압력과 압력상승율을 나타낸 것이다.

Fig. 4(a)에서 알 수 있는 것처럼 자동차용 4기통 간접분사식 디젤기관(Engine 1)에서는 BDF 20을 사용할 경우가 경유만을 사용한 경우보다 확산연소가 크고 연소 최고압력도 크게 나타남을 알 수 있으며 연소가 일찍 종결되는 것을 알 수 있다. 또한, 압력상승율 변화도 경유만을 사용하는 경우보다 진각되어 나타났다. 이는 선행연구들<sup>12,13)</sup>에서처럼 바이오디젤유가 산소를 함유하고 있어 연소를 활발하게 하는 역할을 했을 것으로 판단된다. 한편, 농업용 4기통 간접분사식 디젤기관(Fig. 4(b))에서 BDF 20을 사용할 경우 압력선도 후반부에서 약간의 증가현상을 보일뿐 대부분의 압력과 압력상승율 그래프가 경유만을 사용할 경우와 비교하여 특별한 차이를 보이지 않았다.

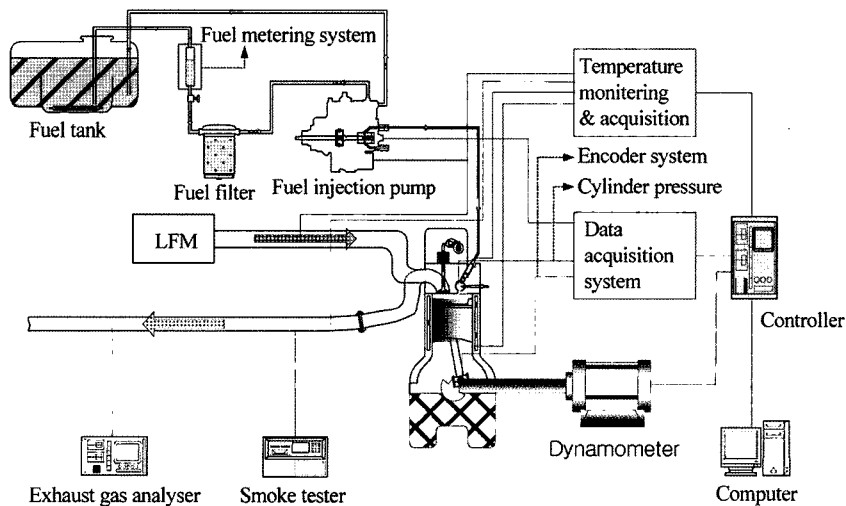
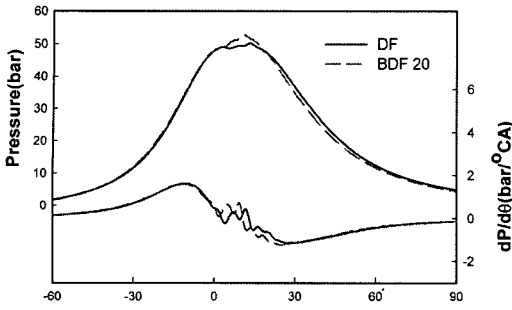
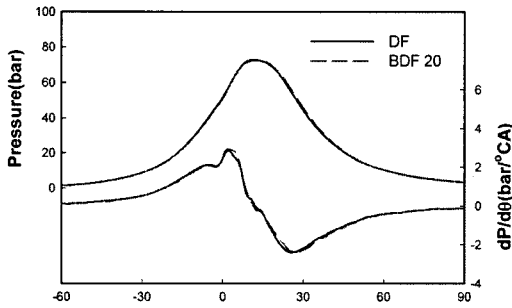


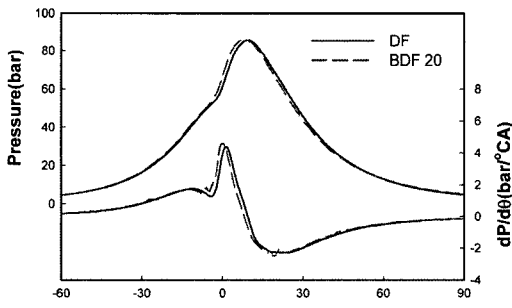
Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus



(a) Engine 1



(b) Engine 2



(c) Engine 3

Fig. 4 Pressure and pressure rise rate

반면, 단기통 직접분사식 디젤기관의 경우(Fig. 4(c))에서는 압력과 압력상승율의 상승곡선이 경유만을 사용하는 경우보다 BDF 20을 사용하는 경우가 진각되어 나타났고 간접분사식 농업용 디젤기관(Engine 2)과 비교하여 진각되어 나타났다. 이는 바이오디젤유의 세탄가가 높기 때문에 착화지연기관이 짧아져 나타난 것으로 보이며, 간접분사식 디젤기관에서보다 직접분사식 디젤기관에서 그 영향이 크게 나타난 것으로 판단된다.

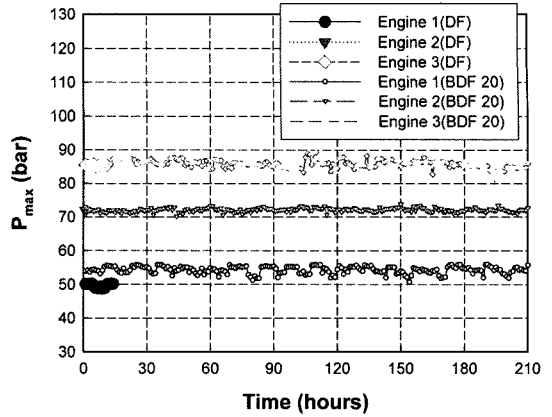


Fig. 5 Maximum pressure versus time variation

Fig. 5는 각 엔진의 최대 토크가 발생하는 회전 속도와 90%부하에서 BDF 20을 사용할 경우 연소변동특성을 파악하기 위하여 운전시간에 따른 연소실내 최고압력( $P_{max}$ )의 변화율을 나타낸 것이다. 전체적으로 장시간 운전하여도 실험에 사용된 엔진들에 있어서 연소 최고압력의 변동은 타이머가 장착된 연료분사펌프를 사용하고 있는 자동차용 엔진을 사용하는 엔진(Engine 1)이 그렇지 않은 엔진들(Engine 2와 3)보다 약간 크게 나타났으나, 210시간 가까이 운전하여도 Engine 1 엔진의 최고압력 표준편차가 1.0384로 나타날 정도로 연소 최고압력의 변동이 크지는 않았다. 한편, 연소 최고압력의 크기는 Fig. 4에서 살펴본 것처럼 BDF 20을 사용할 경우 4기통 간접분사식 자동차용 엔진(Engine 1)에서는 경유만을 사용하는 경우보다 약간 높게 나타났으나, 4기통 간접분사식 농업용 엔진(Engine 2)과 단기통 직접분사식 농업용 엔진(Engine 3)에서는 비슷한 크기를 나타냈다. 이는 Engine 1에는 엔진의 회전속도에 의해 연료의 공급압력이 변하면 연료의 분사시기가 가변될 수 있게 해주는 타이머가 장착된 연료분사펌프를 사용하기 때문에 이 타이머의 영향을 받아 연료 분사시기가 변동되어 나타난 것으로 판단되나, 명확한 결론을 위해서는 구체적인 연구가 필요하리라 생각된다.

Fig. 6은 Fig. 5와 동일한 조건하에서 경유와 BDF 20을 사용한 경우 각 엔진의 운전시간에 따른 최대 압력상승율( $dP_{max}$ )을 나타낸 것이다. 최대 압력상승율의 크기는 직접분사식 디젤엔진인 Engine 3에서

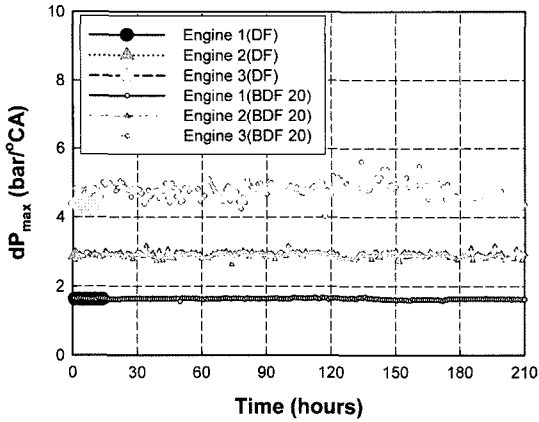


Fig. 6 Maximum pressure rise rate versus time variation

가장 크게 나타났으며, 자동차용 간접분사식 디젤기관(Engine 1)이 가장 낮게 나타났다. 이는 직접 분사식 디젤기관의 경우 간접분사식 디젤기관에 비하여 연료의 착화지연기간이 길기 때문에 예혼합연소량이 커짐에 따라 압력상승율이 크게 나타난 것으로 판단된다. BDF 20을 사용한 경우와 경유만을 사용한 경우의 최대 압력상승율을 비교해 보면, 간접분사식 디젤기관들(Engine 1과 2)에 있어서는 비슷한 경향을 보였으나, 직접분사식 디젤기관(Engine 3)에서는 최대 압력상승율이 경유만을 사용하는 경우보다 BDF 20을 사용하는 경우가 더 높게 나타났다.

한편, 장시간 BDF 20을 적용할 경우에 대한 최대 압력상승율의 변동은 단기통인 직접분사식 디젤기관(Engine 3)에서 약간 나타났으며, Engine 1과 2에서는 최대 압력상승율의 표준편차가 각각 0.0199와 0.0888로 나타날 정도로 시간이 지남에 따라서도 특별한 변동을 보이지는 않았다.

Fig. 7은 각 엔진에 대한 연소 최고압력이 발생할 때의 크랭크각도를 운전시간에 따라 나타낸 것으로, 대부분 ATDC  $10 \pm 2^\circ\text{CA}$  에서 연소 최고압력이 발생하였음을 알 수 있다. BDF 20을 사용할 경우 단기통 직접분사식 엔진(Engine 3)과 4기통 간접분사식 엔진(Engine 1)에서는 경유만을 사용하는 경우보다 연소 최고압력의 발생위치가 진각됨을 알 수 있었으나, Engine 2에서는 경유와 BDF 20을 사용하였을 경우에 특별한 차이를 발견하지 못했다. 이는 Engine 1과 3에서 BDF 20의 연소가 더 빠르고 활발하게 이루어졌기 때문으로 사료된다. 한편, BDF 20

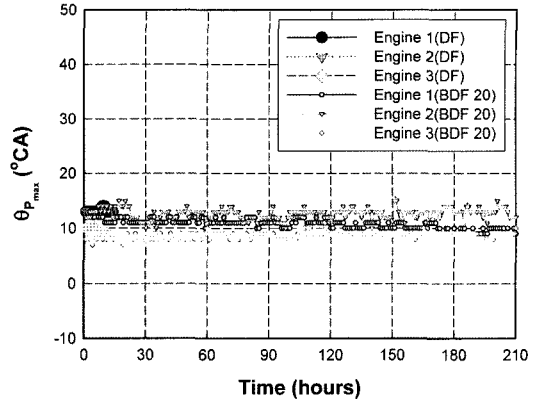


Fig. 7 Crank angle at maximum pressure versus time variation

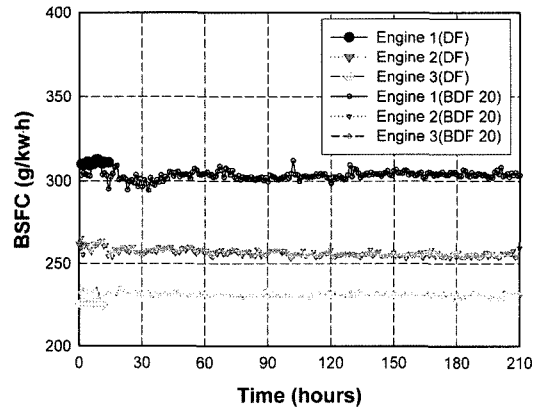


Fig. 8 BSFC versus time variation with BDF 20 and diesel fuel

을 장시간 사용할 경우 연소 최고압력이 발생하는 크랭크각도( $\theta_{P_{max}}$ )의 표준편차는 Engine 1, 2, 3에서 각각 1.0255, 1.0875, 0.5552로 나타나 단기통임에도 불구하고 Engine 3이 가장 안정적으로 나타났으며, Engine 1에서는 시간이 지남에 따라 약간씩 진각됨을 알 수 있었는데, 이는 분사펌프의 영향으로 판단되나 명확한 결론을 얻기 위해서는 구체적인 연구가 필요하리라 생각된다.

Fig. 8은 BDF 20을 사용할 경우 운전시간에 따른 각 엔진들의 제동연료소비율을 나타낸 것으로, Engine 3의 단기통엔진에서 가장 낮게 나타났으며, Engine 1에서 가장 높게 나타났다. BDF 20을 사용할 경우와 경유만을 사용한 경우와 비교하여 보았을 때 Engine 1에서는 평균 2.3% 낮게 나타나고 Engine 2에서는 큰 차이를 보이지 않았으며 Engine 3에서는

평균 2.3% 높게 나타났다. 이는 BDF 20을 사용할 경우 연료 자체에 함유한 산소가 활발한 연소를 촉진시켜 기관성능이 향상되었기 때문으로 생각되나, 단기통 직접분사식 디젤기관에서는 Fig. 5에서 볼 수 있는바와 같이 최대 압력이 경유에 비하여 크게 높지 않음을 알 수 있어 기관성능 개선이 발열량의 차이를 극복하지 못하여 나타난 것으로 사료된다.

한편, 운전시간이 증가함에 따라서는 초기에 약간의 변동이 발생했을 뿐 210시간동안 제동연료소비율의 큰 변동은 나타나지 않았다.

### 3.2 배기 배출물 특성

Fig. 9는 각 엔진들에 있어서 BDF 20을 사용할 경우 운전시간에 따른 매연의 배출농도를 나타낸 것이다. 전체적으로 모든 엔진에 있어서 BDF 20을 사용할 경우가 경유만을 사용한 경우보다 매연농도가 감소함을 알 수 있으며, 매연의 평균 감소율이 Engine 1에서는 17.5%, Engine 2에서는 19.6%, Engine 3에서는 38.4%로 나타나 직접분사식 디젤기관을 사용하는 엔진에서 감소율이 크게 나타났다. 이는 Table 2에서 볼 수 있는 바와 같이 BDF 20속에 포함된 산소가 연소를 촉진하고 매연의 주요 성분인 탄소성분을 BDF 20이 경유보다 적게 함유하고 있어 매연이 발생할 요건이 감소하였으며, 초기 착화특성에서 불리한 직접분사식 디젤기관에서 BDF 20의 산소성분이 연소를 활발하게 촉진하였기 때문에 감소율이 더욱 크게 나타난 것으로 사료된다. 한편 장시간 BDF 20을 사용하여도 모든 엔진에서 매

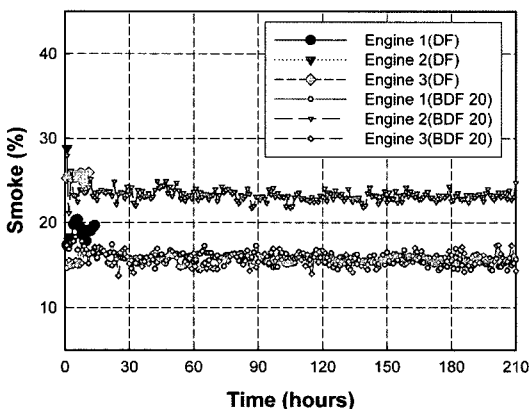


Fig. 9 Smoke versus time variation with BDF 20

연의 배출특성이 증가하지 않았으며, 절대적인 배출량에 있어서는 분사시기가 고정된 간접분사식 농업용 디젤기관인 Engine 2에서 Engine 1과 3에서보다 높게 나타남을 알 수 있어 Engine 2의 특성상 기본적으로 불완전연소 요인이 있는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 각 엔진들에 있어서 BDF 20을 사용한 경우 운전시간에 따른 NOx의 배출특성을 나타낸 것이다. 간접분사식 디젤기관(Engine 1과 2)에서보다 직접분사식 디젤기관(Engine 3)에서 NOx의 배출량이 크게 나타났으며, BDF 20을 사용한 경우 경유만을 사용한 경우보다 NOx의 배출량이 Engine 1과 3에서는 평균적으로 각각 약 17% 와 7.1% 증가하는 전형적인 매연과의 상반(trade-off)관계를 보였으나 Engine 2에서는 차이를 보이지 않았다. 이는 분배형 분사펌프의 영향과 BDF 20의 산소함유량에 의해 나타난 연소후반부의 활발한 연소로 NOx의 생성이 촉진되었기 때문으로 생각된다.

한편, 운전시간이 증가함에 따라 BDF 20을 사용할 경우 Engine 1과 3에서 약간의 변동이 있었으나 경유만을 사용하는 경우보다는 더 높게 배출되었으며, Engine 2에서는 초기 값과 큰 차이를 보이지 않았다.

Fig. 11은 각 엔진에 있어서 BDF 20을 사용할 경우 운전시간에 따른 CO의 배출 특성을 나타낸 것이다. 전체적으로 BDF 20을 사용할 경우가 경유만을 사용한 경우보다 CO의 배출 값이 저감됨을 알 수 있는데, Engine 2에서는 39.1%가 저감되어 가장 큰 저감율을 보였으며 Engine 1과 3에서는 각각 5.2%와

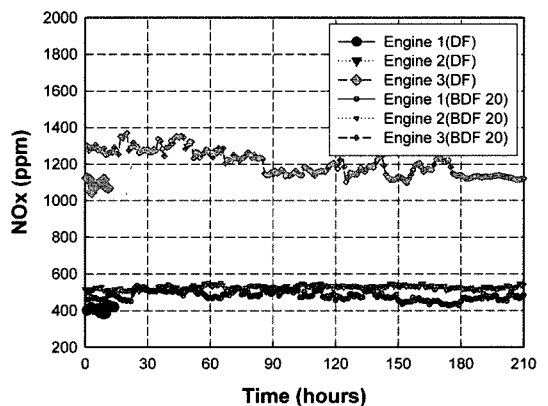


Fig. 10 NOx versus time variation with BDF 20

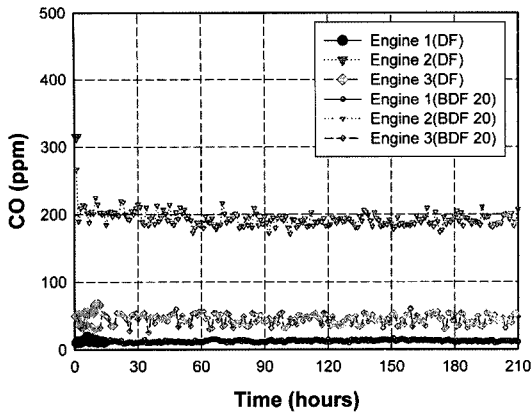


Fig. 11 CO versus time variation with BDF 20

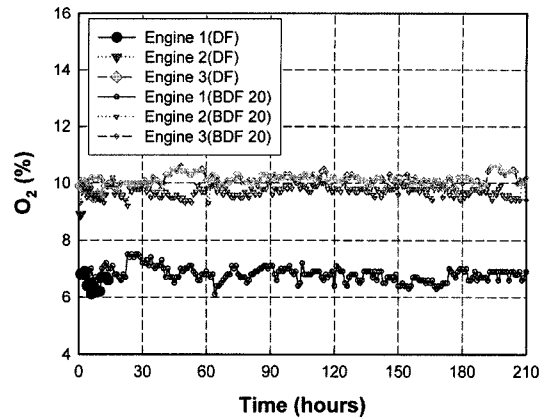


Fig. 13 O<sub>2</sub> versus time variation with BDF 20

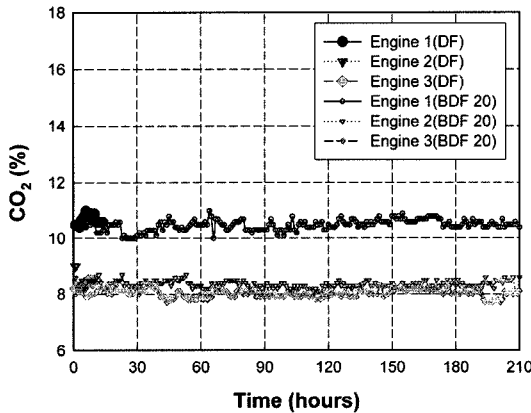


Fig. 12 CO<sub>2</sub> versus time variation with BDF 20

15.5%가 저감되었다. 이는 BDF 20이 경유보다 더욱 활발한 연소를 하였기 때문으로 사료되나, 분사시기가 일정하게 고정되어 있는 간접분사식 농업용 디젤기관(Engine 2)에서의 절대적인 CO 배출량이 Fig. 9에 나타난 매연의 경우에서처럼 다른 엔진들(Engine 1과 3)보다 두 연료에서 모두 크게 나타남을 알 수 있어 Engine 2는 엔진 특성상으로 불완전연소요인이 많은 것으로 판단된다.

Fig. 12와 13은 각 엔진에 있어서 BDF 20을 사용할 경우 배기 배출물 중 CO<sub>2</sub>와 O<sub>2</sub>의 배출 특성을 운전시간대별로 각각 나타낸 것이다. CO<sub>2</sub>의 경우 모든 엔진에 있어서 BDF 20을 사용한 경우가 경유의 경우와 비슷하거나 약간 적게 나타났다. 이는 BDF 20이 경유보다 활발한 연소를 하였음에도 불구하고 BDF 20의 탄소함유량이 경유의 경우보다 작기 때

문에 나타난 것으로 사료된다. 또한, 자동차용 디젤기관인 Engine 1이 농업용 디젤기관들(Engine 2와 3)과 비교하여 CO<sub>2</sub>의 배출량이 크게 나타났다. 이는 Fig. 11의 CO에서처럼 자동차용 엔진이 농업용 엔진에서보다 더욱 완전 연소를 이루었기 때문으로 분석된다. 한편, 전체적으로 운전시간이 증가함에 따라서는 약간의 배출 변동을 발생하였으나 큰 폭의 변동특성이 나타나지 않았다.

O<sub>2</sub>의 배출 특성은 CO<sub>2</sub>의 배출 특성과는 상반된 결과를 보여 주고 있다. BDF 20속에 함유한 산소의 영향으로 배기가스내의 잔존 산소함유량은 모든 엔진에 있어서 경유만의 경우와 비슷하거나 약간 높게 나타나는 경향을 보였다. 또한, 자동차용 디젤기관(Engine 1)이 농업용 디젤기관(Engine 2와 3)과 비교하여 O<sub>2</sub>의 배출량을 낮게 나타남을 알 수 있어 CO<sub>2</sub>의 경우에서처럼 자동차용 엔진이 더욱 완전연소를 이루었기 때문으로 판단된다.

### 3.3 기관부품 및 윤활유에 미치는 영향

Table 3은 BDF 20으로 내구성 실험을 마친 후 엔진 오일을 샘플링하여 오일의 특성을 분석한 것이다. 육상 3종 내연기관용 표준치와 비교하였을 때 내구성실험을 마친 엔진 오일의 상태는 매우 양호하게 나타남을 알 수 있어, BDF 20으로 장시간 디젤기관에 적용할 경우에도 윤활유의 악화현상은 나타나지 않음을 알 수 있다. 이는 Fig. 1에서 살펴본 것처럼 바이오디젤유의 윤활성이 양호하여 엔진 오일의 특성을 악화시키지 않았기 때문으로 사료된다.



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

Item	Standard (SAE 15W)	Test results			
		Engine 1 <sup>(17)</sup>	Engine 2 <sup>(18)</sup>	Engine 3 <sup>(19)</sup>	
Water content (Vol.%)	-	< 0.025	< 0.05	< 0.05	
Flash point (COC, °C)	> 175	244	226	252	
Kinematic viscosity (cSt)	40°C	122.1	77.14	83.43	
	100°C	16.72	11.77	11.62	
Viscosity index	> 85	149	147	131	
Oxidation stability	Viscosity ratio	< 1.5	0.96	0.99	1.02
	Lacquer	< thin	Not detect	Not detect	Not detect
Apparent viscosity (-20°C, P)	< 35.0	5.90	35.0	4.65	
Pour point (°C)	< -22.5	-32.5	-37.5	-37.5	

Fig. 14는 BDF 20에 대한 내구시험을 완료한 후 기관들의 각 부품의 변화 특성을 파악하기 위하여 기관을 분해하여 촬영한 실린더와 실린더 헤드의

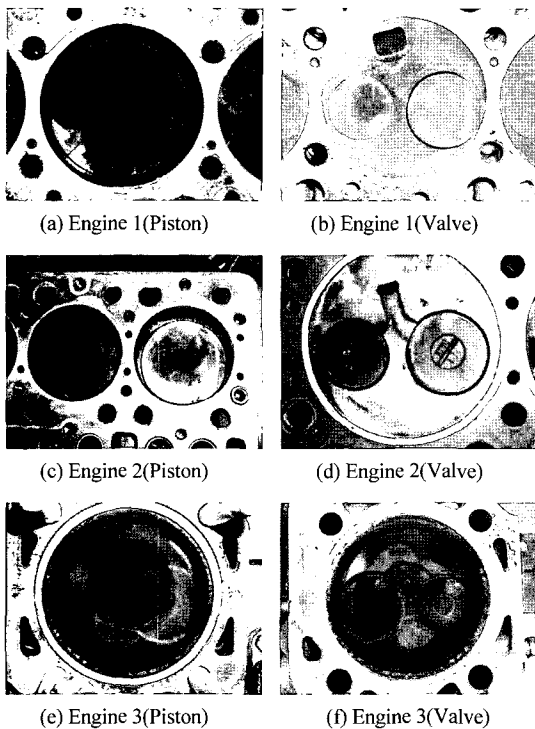


Fig. 14 Photography of piston head and valves in 3 engines operated on BDF 20

사진을 나타낸 것이다. Fig. 14(a)~(d)의 사진에서 볼 수 있는 것처럼 간접분사식 디젤엔진인 Engine 1에서 2번과 4번 실린더 상부의 부연소실과 연결되는 부분에 약간의 카본이 부착된 것과, Engine 2에서 밸브에 약간의 카본이 발견되는 현상을 제외하고는 실린더와 밸브들을 조사한 결과 기관 부품의 마멸이나 큰 카본 퇴적 등의 현상은 나타나지 않았다.

Fig. 15는 BDF 20으로 장시간 운전한 후 연료분사기의 노즐의 변화 상태를 파악하기 위해 연료분사기의 노즐 니들 팁(needle tip)과 인젝터 팁(injector tip)을 50배 확대하여 촬영한 사진을 나타낸 것이다. 교축 밸브(throttle valve)를 사용하는 간접분사식 디젤기관의 연료분사기 노즐들(Fig. 15(a)~(d))에서는 약간의 카본이 부착되어 있으나 연료분사기의 막힘이나 연료 분사 불균일을 초래할 정도의 니들 밸브의 고착이나 마멸 현상은 발생하지 않았다. 한편, 구멍형 노즐을 사용하는 직접분사식 디젤기관의 연료분사기에서는 Fig. 15(e)와 (f)에서 볼 수 있는 바와 같이 연료 배출구멍 주위로 카본이 고착된 현상은 없었으나 상당량의 카본이 부착되어 있었다.

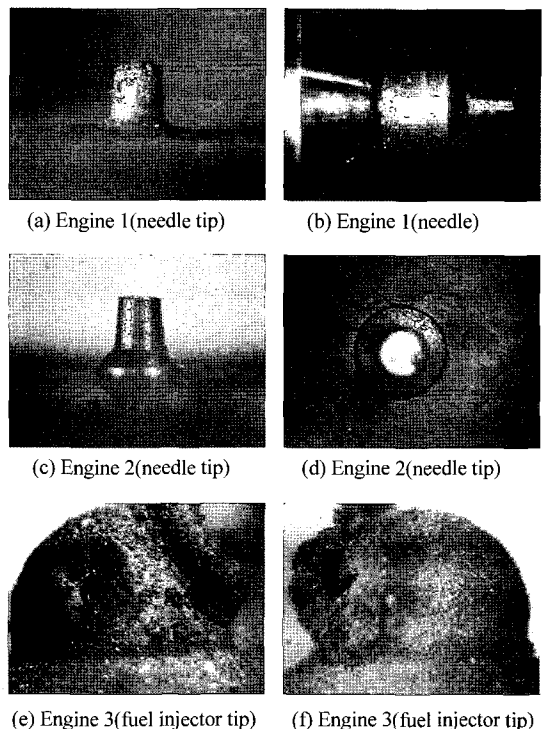


Fig. 15 Photography of fuel injector tip and nozzle tips in 3 engines operated on BDF 20

BDF 20으로 200시간의 내구성 실험에서는 기관 성능 및 배기 배출물에 악영향을 줄 정도로 연료 배출 구멍의 막힘 현상 등은 발견되지 않았지만, 일정한 시간동안 더 사용할 경우 연료 배출구멍을 막아 연료분사의 불균일을 초래할 가능성은 있다고 판단된다. 따라서, 구멍형 노즐을 사용하는 경우 일정 시간이 지나면 노즐 구멍을 막힘을 고려하여 BDF 20을 사용할 경우 주기적(약 1회/년)인 청소가 필요할 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

디젤기관의 대체연료로서 BDF 20을 210시간동안 최대 토크가 발생하는 회전수와 90% 부하에서 간접분사식 및 직접분사식 디젤기관들에 적용하였을 경우 기관의 연소특성, 배기배출물 특성 및 기관 부품들에 대한 내구특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) BDF 20을 사용할 경우 타이머가 장착된 분배형 분사펌프를 사용하는 간접분사식 4기통 디젤기관(Engine 1)과 직접분사식 단기통 디젤기관(Engine 3)에서는 연소가 활발하게 진행하여 연소 최고압력이 높게 나타났으나, 분사시기가 고정된 간접분사식 농업용 디젤기관(Engine 2)에서는 경유만을 사용한 경우와 특별한 차이를 나타내지 않았다.
- 2) 연소변동인자로 선택된 연소 최고압력, 최대 압력상승율 및 연소 최고압력이 발생하는 크랭크 각도들의 표준편차가 실험에 사용된 모든 엔진에서 낮게 나타남을 알 수 있어 BDF 20을 장시간 사용하여도 특별한 연소변동없이 연소특성이 안정적임을 알 수 있었다. 또한, 제동연료소비율의 경우 Engine 1에서는 BDF 20을 사용할 경우가 경유만을 사용하는 경우보다 약 2.3% 개선되었으나 Engine 2에서는 특별한 차이를 보이지 않았고, Engine 3에서는 약 2.3% 악화되는 특성을 보임을 알 수 있었다.
- 3) 매연의 경우 BDF 20을 사용하는 경우가 경유의 경우보다 모든 엔진에서 감소함을 알 수 있었으나, 매연의 평균 감소율이 Engine 1에서는 17.5%, Engine 2에서는 19.6%, Engine 3에서는 38.4%로

나타나 직접분사식 디젤기관을 사용하는 엔진에서 감소율이 크게 나타났다.

- 4) BDF 20에 대한 NO<sub>x</sub>의 배출특성은 간접분사식 디젤기관(Engine 1과 2)보다 직접분사식 디젤기관(Engine 3)에서 크게 나타났으며, 경유의 경우와 비교하여 볼 때 Engine 1과 Engine 3에서는 각각 17%와 7.1%가 증가하여 매연과의 전형적인 상반관계(trade-off relationship)를 보였으나 Engine 2에서는 특별한 차이를 보이지 않았다.
- 5) CO의 경우 BDF 20을 사용하는 경우가 경유를 사용하는 경우보다 Engine 1, 2, 3에서 각각 5.2%, 39.1%, 15.5%가 저감되어 절대적인 배출량이 다른 엔진보다 월등히 높은 Engine 2에서 가장 큰 감소율을 보였다.
- 6) CO<sub>2</sub>의 배출 특성은 모든 엔진에서 BDF 20을 사용한 경우와 경유를 사용한 경우가 비슷하거나 약간 적게 나타났으나, 배출가스내 잔존 산소함유량(O<sub>2</sub>)의 배출 특성은 모든 엔진에 있어서 연료속에 산소를 함유한 BDF 20을 사용한 경우가 경유만의 경우와 비슷하거나 약간 높게 나타났다.
- 7) BDF 20으로 장시간 운전한 경우 실험에 사용된 모든 엔진에서 연료로 인한 윤활유의 변질은 나타나지 않았으며, 연소실 및 기관 부품들의 마멸이나 큰 카본 퇴적 현상 등은 나타나지 않았다. 그러나 다공형 분사기(hole type injector)를 사용하는 직접분사식 디젤기관(Engine 3)의 연료분사기 배출 구멍 주위로 약간의 카본이 부착됨을 알 수 있었다.

#### 후 기

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

#### References

- 1) K. W. Scholl and S. C. Sorenson, "Combustion of Soybean Oil Methyl Ester in a Direct Injection Diesel Engine," SAE 930934, 1993.
- 2) M. Ziejewski, K. R. Kaufman, A. W. Schwab,

- E. H. and 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 93-6523*, 1993.
  - 5) Reece, D. L. 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 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) L. Schumacher, S. C. Borgelt, W. G. Hires, W. Wetherell, and A. Nevils, "100,000 Miles of Fueling 5.9L Cummins Engines with 100% Biodiesel," *SAE 962233*, 1996.
  - 9) Y. T. Oh, "Vegetable Oils for Diesel Fuel Substitutes," *Journal of KSAE*, Vol.18, No.2, pp.72-92, 1996.
  - 10) C. L. Peterson, J. C. Thompson, J. S. Taberski, D. L. Reece and G. Fleischman, "Long-Range On-Road Test with Twenty-Percent Rapeseed Biodiesel," *ASAE*, Vol.15, No.2, pp.91-101, 1999.
  - 11) Pischinger, G. H. R. W. Siekmann, A. M. Falcon and F. R. Fernandes, "Results of Engine and Vehicle Tests with Methyl Esters of Plant Oils as Alternative Diesel Fuels," Paper presented at 5th Int. Symposium on Alcohol Fuel Technology, Auckland, New Zealand, 1982.
  - 12) K. H. Ryu and Y. T. Oh, "A Study on the Usability of Biodiesel Fuel Derived from Rice Bran Oil as an Alternative Fuel for IDI Diesel Engine," *KSME International Journal*, Vol.17, No.2, pp.310-317, 2003.
  - 13) K. H. Ryu, Y. J. Yun and Y. T. Oh, "The Combustion Characteristics of Biodiesel Fuel as an Alternative Fuel for IDI Diesel Engine," *Transactions of KSAE*, Vol.11, No.1, pp.72-78, 2003.
  - 14) K. H. Ryu and Y. T. Oh, "Effect of Fuel Injection Timing on the Performance and Exhaust Emissions in IDI Diesel Engine Using Biodiesel Fuel," *Transactions of KSAE*, Vol. 12, No.2, pp.76-82, 2004.
  - 15) 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.
  - 16) Korea Petroleum Quality Inspection Institute, Requested Test Results, No.17(Chonbuk 28450-36), 2002.
  - 17) Korea Petroleum Quality Inspection Institute, Young-Nam Branch, Requested Test Results, No.258, 2003.
  - 18) Korea Petroleum Quality Inspection Institute, Requested Test Results, No.10(Chonbuk 28450-282), 2003.
  - 19) Korea Petroleum Quality Inspection Institute, Young-Nam Branch, Requested Test Results, No.196, 2003.