

바이오디젤유를 사용한 직접분사식 디젤엔진의 출력성능 및 배출가스 특성

Power and Emission Characteristics of DI Diesel Engine with a Soybean Bio-diesel Fuel

최병철 · 이준희 · 박희주

B. C. Choi, C. H. Lee and H. J. Park

Key Words : Diesel Engine(디젤엔진), Alternative fuel(대체연료), Bio diesel Fuel(바이오디젤유), Power(출력), Emissions(에미션), Soybean oil(식용유)

Abstract : This paper describes the power performance and emission characteristics of the high speed direct injection diesel engine (2.9 liter displacements) driven by soybean oil as known a bio diesel fuel. The results were compared to diesel fuel with blending bio diesel fuels. The soybean bio diesel fuel was added in the diesel fuel in concentration varying from 25% to 75% volume rates. We measured the emissions according to ECE 13 mode and full load, fixed engine speed. When the 25% bio diesel fuel was used, NOx emission at the ECE 13 mode test slightly decreased compared with diesel base engine. Over engine speed of 2000 rpm, the level of unburned hydrocarbon(HC) and carbon monoxide(CO) were the same to the diesel engine. Smoke emission decreased as the blending bio diesel fuel rate increased.

1. 서 론

디젤엔진은 내구성이거나 신뢰성이 우수하고, 열효율이 높아 연료소비량과 CO₂ 배출량이 적어, 지구온난화에의 기여도가 낮다. 디젤엔진에 있어서 문제점은 확산연소의 특성인 공기이용율의 저하로 매연의 발생이 많고 국부적인 고온의 발생으로 대도시의 대기오염원인 NOx의 배출이 문제가 되고 있다. 최근들어 디젤엔진의 배기농도 저감을 위해 NOx와 PM, THC 및 CO의 trade off 관계를 극복하고, 동시에 CO₂를 저감을 위하여 엔진 연료분사 압력의 고압화와 분사시기의 전자제어기술을 응용한 커먼레일 방식의 엔진이 실용화되고 있다.

디젤연료의 개선 측면에서는 1970년 후반부터 화석연료의 대체연료로써 식물유를 정제한 후 자동차용 연료로 사용하려는 노력이 있었다. 이는 디젤엔진에서 배출되어 대도시 환경문제를 유발하는 매연과 같은 입자상물질을 줄일 수 있을 뿐만 아

니라 고갈되어 가는 화석연료의 사용을 줄일 수 있기 때문이었다.

일반적으로 바이오디젤유는 상용 디젤유에 가까운 세탄가와 높은 산소를 함유하고 있는데, 이것은 엔진성능과 배출가스 특성에 영향을 미치게 된다.^{1,3,5)} 이전 연구 보고서들에 의하면 대부분 바이오디젤유를 사용하므로써 출력은 디젤유에 비해 동등 이하이며, 매연은 현저하게 감소하는 것으로 보고되고 있다. 또한 미연탄화수소(THC)와 일산화탄소(CO) 및 입자상물질(PM)의 배출량이 디젤유에 비해 감소하며 NOx는 미량 감소하거나 증가한다고 밝히고 있다²⁻⁵⁾. 바이오디젤유의 실차실험 결과 디젤차량과 동등한 동특성이 얻어져 디젤엔진의 대체연료로서 사용 가능성이 비교적 높은 것으로 나타나고 있다⁴⁾.

그러나 대부분의 이 연구들은 단기통 엔진과 저속 디젤엔진에 의해서 이루어져 현재 상용엔진으로 사용되고 있는 고속디젤엔진의 동특성과 배출가스 특성을 이해하는 데 부족한 점이 있다.

본 연구에서는 최근 자동차의 연비향상과 CO₂ 배출문제 해결책으로 제안되고 있는 직접분사방식 고속디젤엔진에 있어서 바이오디젤유의 저공해 및

접수일 : 2002년 6월 5일

최병철 : 전남대학교 기계시스템공학부, 자동차연구소
이준희, 박희주 : 전남대학교 대학원

대체연료로서의 가능성을 검토하였다. 시험 항목은 엔진 출력성능 및 배출가스 배출 특성이며, 시험에 사용한 인자는 바이오디젤유와 상용 디젤유의 혼합비율이다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용한 주요기기는 Fig.1에 나타낸 것처럼 동력계(Fuchino, ESF 600), 배기분석기(Horiba, MEXA 9100DEGR), 매연측정기(World Env., AFT 2000)등이다. 동력계는 최고성능 440kW/ 4000rpm의 와전류형(eddy current)이다. 배기분석기는 질소산화물(NOx), 탄화수소(THC), 일산화탄소(CO), 이산화탄소, 산소농도를 측정할 수 있다. 배기 농도측정에 있어서 NOx는 CLD (chemiluminescence)법, THC는 FID (flame ionization detector)법, CO는 NDIR (non dispersive infrared analyzer)법을 각각 채택하고 있다⁶⁾. 그리고 매연(smoke)계측에는 여과지 샘플링 광반사식인 Bosch 방식을 채택하고 있다.

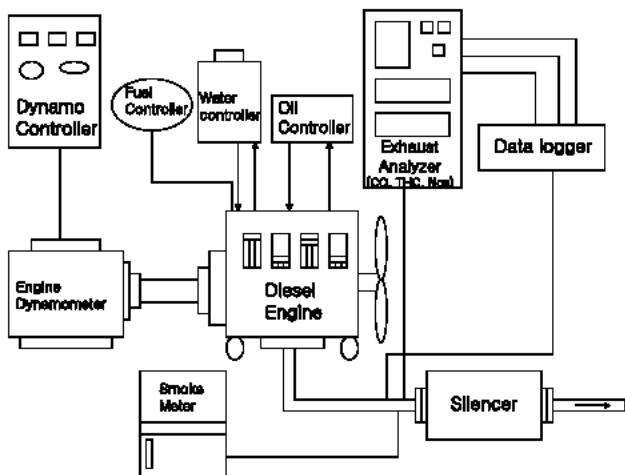


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

실험에 사용한 엔진은 Table 1에 나타낸 것처럼 직접분사식 고속디젤엔진이다. 이 디젤엔진은 레저 차량용으로 실제 사용하고 있으며, 본 실험에서는 디젤엔진을 그대로 사용하여 바이오디젤유의 성능 및 배기특성 시험을 행하였다.

실험에 사용한 연료는 디젤유의 경우 0.05% 유황분을 포함하고 있는 상용디젤유이며, 바이오디젤유는 에스테르화법으로 정제한 것으로 물성치는 Table 2와 같다. 바이오디젤유는 함산소연료로 연

Table 1 Specifications of the engine

Parameter	Specification
Engine Type	4 stroke/DI
Rated Speed(rpm)	3800
Power output(ps/rpm)	120/3800
Peak Torque(kg.m/rom)	34/1800
Air Charging	Turbo Aftercooled
Bore×Stroke(mm)	97.1×98
Displacement(cc)	2903

Table 2 Specifications of the bio diesel fuel

Test	Result	Test method
인화점(PM, °C)	21.0	KS M2010 99
유동점(°C)	0.0	KS M2016 95
회분(무게%)	0.06	KS M2044 95
황분(무게%)	0.0	KS M2027 98
동점도(40°C, cSt)	3.141	KS M2014 99
동판부식(100°C, 3hr)	1	KS M2018 97
필터막힘점(°C)	2	KS M2411 96
세탄지수		KS M2610 96
전환율(%)	64	

$$\text{※ 전환율}(\%) = \frac{\text{실제 생성된 글리세롤양}}{\text{이론적인 생성 글리세롤양}} \times 100$$

료계 부품을 장시간 노출시킬 경우 산화할 우려가 있다. 따라서, 연료계통은 고무, 나일론, 폴리프로파렌 재질보다 테플론이나 바이톤 재질을 선정할 필요가 있다.

실험에 사용한 연료는 디젤유, 디젤유에 바이오디젤유를 25%, 50%, 75%씩 각각 혼합한 것을 사용하여 엔진의 출력성능과 배출가스 배출특성을 관찰하였다. 실험은 전부하 시험과 D 13 모드시험법을 사용하였다. 전부하 실험은 1000~3800rpm 구간에서 200rpm 간격으로 운전하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 엔진동력성능

디젤연료(D100B0)와 디젤연료에 바이오디젤유를 25%(D75B25), 50%(D50B50), 75%(D25B75)씩 혼합한 연료 및 바이오디젤유(D0B100) 연료를 각각 사용하였을 경우 동력특성을 Fig. 2에 나타내었다. 저속구간 1200rpm까지는 연료혼합비율에 따른 출력변화가 거의 없지만, 1200rpm 이후 바이오디젤

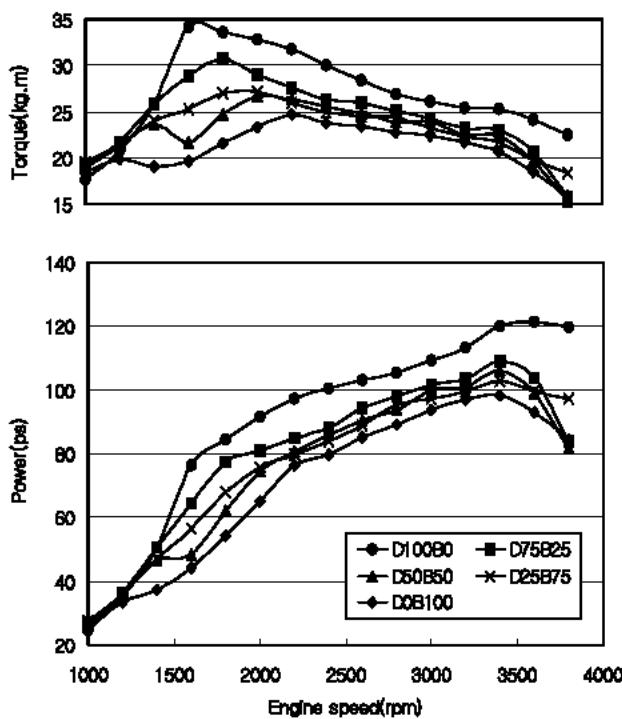


Fig. 2 Engine power performance at the full load

유량이 증가함에 따라 출력 및 토크가 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다. 디젤유와 바이오디젤유만을 사용한 경우의 출력 및 토크를 비교하면 1400rpm 이후에서 15~40%의 출력감소 현상을 보이고 있다. 1600rpm 이상에서 출력 및 토크저하폭이 커지는 이유는 바이오디젤유의 혼합비 증가에 따라 연료의 점도(viscosity)가 증가하기 때문이다. 즉 연료의 점도 증가로 인한 연료분사사의 불균형으로 발생되는 문제로 추측된다. 이러한 현상은 엔진속도가 증가함에 따라 점차로 감소하여 2400rpm 이상에서는 감소폭이 줄어들고 있다. 그러나 3400rpm 이후에는 동력 및 토크가 급격히 저하하고 있다.

Fig. 3은 전부하 실험에 있어서 각 연료의 체적 소모량을 나타내고 있다. Fig. 2의 동력특성 결과에서 나타난 것과 같이 연료의 소모량은 1400rpm 까지는 유사하지만, 그 이후 2400rpm 까지는 디젤연료에 비하여 바이오디젤유의 혼합비가 큰 경우가 연료 소모량이 줄어들고 있다.

본 연구에서는 시험 중 연료온도를 제어하지 않은 상태이기 때문에 엔진을 연속적으로 운전할 경우 고온의 리턴(return)연료의 영향으로 연료온도가 점차로 상승하게 된다. Fig. 4에 전부하 운전 시 엔진회전수에 따른 연료분사펌프의 입구 연료온도를 나타내고 있다. 연료의 온도는 rpm이 증가함에 따라 거의 선형적으로 상승하고 있다. 연료의 온도

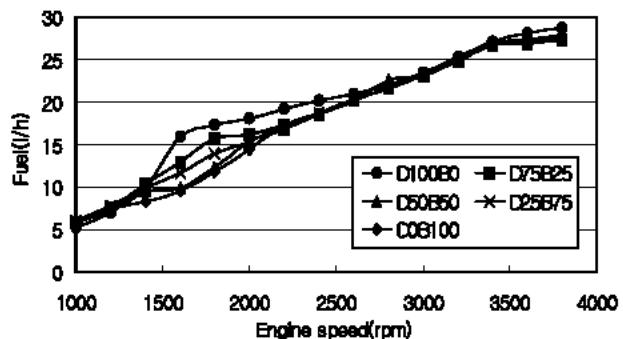


Fig. 3 Volumetric fuel consumption for each fuels

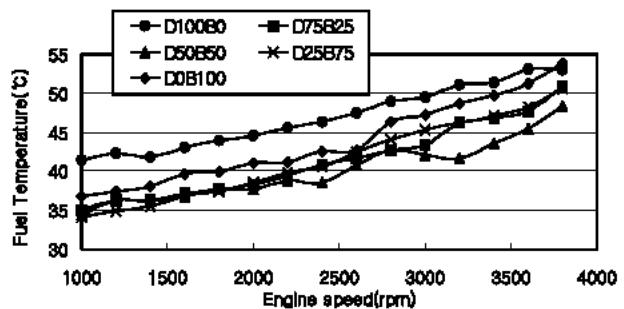


Fig. 4 Fuel temperature at entrance of fuel injection pump

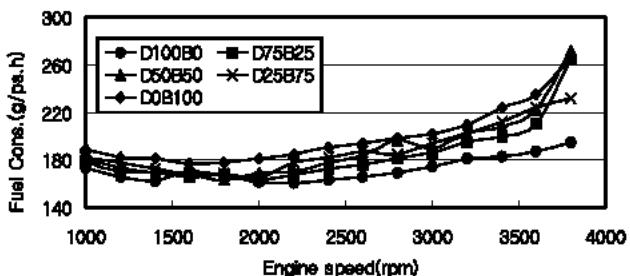


Fig. 5 Specific fuel consumption for each fuels

가 높아짐에 따라 연료의 점도는 점차로 낮아진다. Fig. 3에서 디젤유에 비해 바이오디젤유 혼합연료의 연료소모량이 낮은 현상은 2600rpm 이상에서 연료온도가 40~43°C에 도달함으로서 없어지고 있다. 실제로 이 온도 이상에서 바이오디젤 혼합연료의 경우 연료내의 산소가 기포형태로 발생하여 배출되는 현상이 관찰되었다. 이러한 연료의 점도 변화 및 연료내 기포발생현상이 바이오디젤연료 사용 엔진의 출력 및 토크저하의 원인이 될 것이다.

일반적으로 바이오디젤유의 점도는 30°C에서 6cSt로 디젤의 3cSt의 2배로 높다^{1,3,5)}. Fig. 5는 단위 출력당 연료소비량을 나타내고 있다. 연료소모량은 디젤유만의 경우와 비교하여 바이오디젤유량이 증가함에 따라 점차 증가하는 경향을 보이고

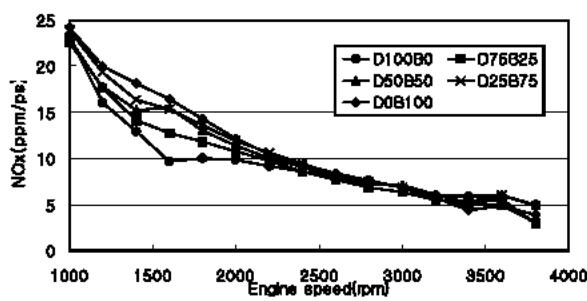


Fig. 6 NOx concentration a unit power

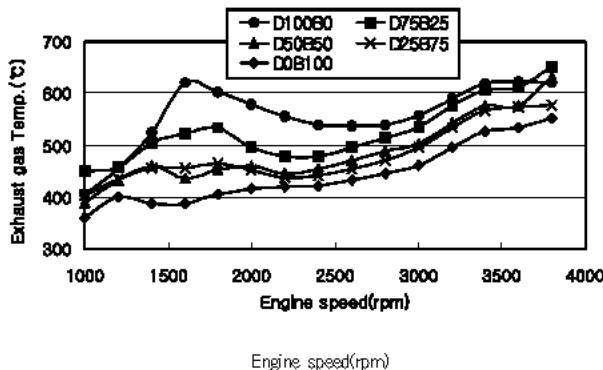


Fig. 7 Exhaust gas temperature

있다. 이와 같이 연료소모량이 많음에도 불구하고 Fig. 2의 결과와 같이 동력성능이 낮은 이유는 앞에서 논한 연료의 점도와 기포발생현상 이외에 디젤유에 비해 약 11% 정도의 낮은 발열량 때문이다. 디젤유의 저위열량은 약 43,000kJ/kg, 바이오디젤유의 저위열량은 약 38,000kJ/kg이다^[3].

3.2 배출가스 특성

바이오디젤유의 혼합비율에 따른 각 연료의 전부하에서 단위 출력당 NOx 배출량은 Fig. 6과 같다. 2400rpm 이하 저속구간에서 바이오디젤유의 혼합비가 높아질수록 NOx의 배출량이 약간 증가한다. 특히 1600rpm에서 큰 차이가 발생하지만, 2400rpm 이상에서는 바이오디젤 혼합유와 디젤유의 NOx 배출특성은 거의 동등하다.

디젤엔진에서 NOx의 배출은 연소온도와 관계가 있는데 서로 다른 연료분사량과 이종연료가 혼합된 연료의 NOx 배출량을 직접비교하기란 어렵다. Fig. 7과 같이 각 연료 조건에서 배출가스의 온도를 살펴보면, 바이오디젤유량이 많아질수록 배출가스의 온도는 낮다. 이와 같이 배기온도가 낮음에도 불구하고 저속영역에서 NOx 배출농도가 높은 것은 연료의 불균일한 혼합으로 국부적인 고온영역이 발생하기 때문인 것으로 생각된다.

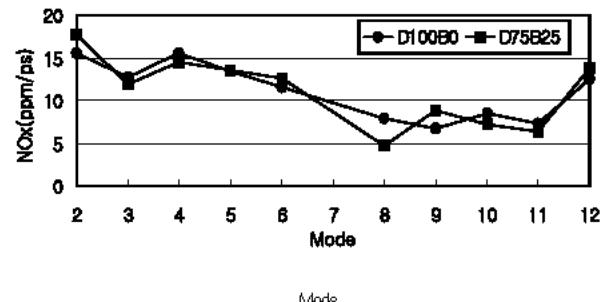


Fig. 8 NOx concentration a unit power in D 13 mode

일반적으로 동일조건에서 디젤엔진의 연료를 대체할 경우 10% 이상의 출력저하가 발생하면 동일 용도의 자동차용으로 사용하기에는 어렵다. 본 연구에서 바이오디젤유의 최적 혼합비율은 전체 엔진속도, 전부하 구간에서 출력저하가 10% 이하이고 배출가스 배출악화가 미약한 25%가 가장 적정한 것으로 판단된다.

D 13모드^[6]에서 2~6모드는 엔진의 중간속도 2000rpm으로 모드가 증가할수록 25%씩 부하가 증가되어 운전되고, 8~12모드는 최고출력이 발생하는 엔진속도 3400rpm으로 모드가 증가할수록 25%씩 부하가 감소하게 된다. Fig. 8은 디젤유 100%와 디젤유에 바이오디젤유 25%를 혼합한 연료의 D 13모드, 즉 부분부하 특성에서 NOx 발생농도를 비교한 결과이다. 1, 7, 13모드의 아이들상태에서 NOx의 배출은 두 연료에서 차이가 없고 단위 출력당 농도는 표시가 불가능하므로 나타내지 않았다. 중간속도 2000rpm, 6모드에서는 바이오디젤유 혼합연료가 약간 많은 양의 NOx를 배출하지만, 그 외의 모드에서는 전반적으로 바이오디젤 혼합유가 적은양의 NOx를 배출하고 있다. 전부하 저속운전영역에서 NOx의 배출량은 바이오디젤유의 혼합연료가 디젤유에 비해 약간 높은 특성이 있었으나, 실제 운전양상을 모사한 D 13 모드시험에서 NOx 배출량이 약간 줄어들고 있다.

탄화수소(THC)와 일산화탄소(CO)의 배출특성은 엔진의 연소상태를 파악할 수 있는 아주 중요한 인자이다. Fig. 9와 Fig. 10은 전부하와 D 13 모드에서 단위 출력당 배출하는 THC 농도를 나타내고 있다. Fig. 9의 전부하 운전조건에서는, 2000rpm 이하에서 바이오디젤유 혼합연료의 THC 배출량이 높게 나타나지만, 그 이상에서는 디젤유와 동등한 배출량을 보이고 있다. 2000rpm 이하의 저속에서는 바이오디젤유를 혼합함으로써 연소특성이 약간 악화하는 경향을 나타내고 있다. 이는 앞에서도

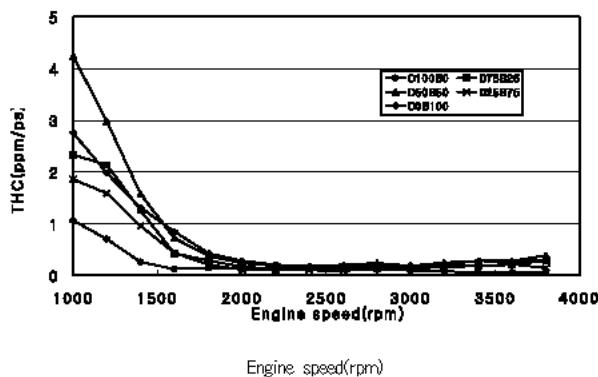


Fig. 9 THC concentration a unit power at full load

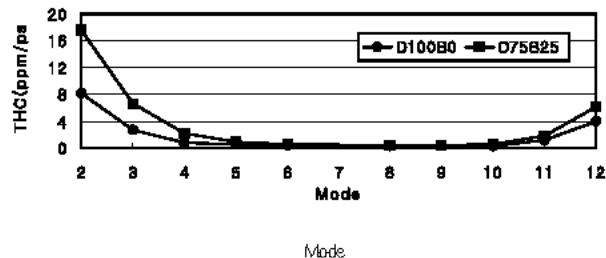


Fig. 10 THC concentration a unit power in D 13 mode

논한 바와 같이 연료 점도의 증가로 연료의 분무 특성이 나빠지기 때문으로 추측할 수 있다.

Fig. 10에 D 13 모드에서 THC의 농도 배출특성을 나타내고 있다. THC 배출농도는 부분부하, 저속영역의 모드에서 바이오디젤유를 혼합한 연료가 디젤유에 비교하여 높게 나타나고 있다. 이 현상도 앞의 전부하와 동일한 현상 때문에 발생하는 불완전연소에 기인한다고 볼 수 있다.

본 연구에 사용된 엔진은 디젤유 전용으로 연료분사계통, 연소계통 등이 바이오디젤유를 위해 최적화되지 않은 상태이기 때문에 저속 운전영역에서 연료분사계의 불균형이 발생되는 것으로 보인다.

Fig. 11과 Fig. 12는 전부하와 D 13 모드에서 단위 출력당 배출하는 CO농도이다. 배출특성은 THC와 비슷한 양상을 보이고 있다. 2000rpm 이하의 저속구간에서 CO의 배출농도는 디젤유 100% 사용 연료에 비해 바이오디젤유량을 증가시키면 약간 증가하는 경향이 있다. 그러나 2000rpm 이상 고속구간에서는 거의 동등수준이다.

Fig. 12의 D 13모드 시험결과에서도 CO의 배출농도는 부분부하 영역인 2~4모드 및 11, 12모드에서 바이오디젤 혼합유가 많이 배출되고 있다. 이와 같이 저부하 운전영역에서 CO의 배출 농도도 불완전연소에 기인한다고 볼 수 있다.

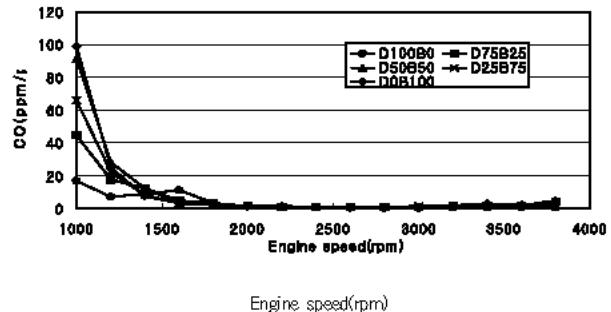


Fig. 11 CO concentration a unit power at full load

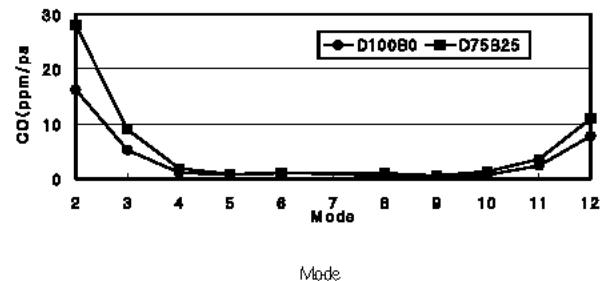


Fig. 12 CO concentration a unit power in D 13 mode

THC 및 CO 배출농도가 바이오디젤유 혼합유의 경우가 고농도로 배출되는 것은 연료계통의 최적화에도 문제가 있지만, 고속, 고부하 운전상태에서 연료분사펌프 입구의 연료온도가 40°C 이상이 되면서 연료 중의 산소가 기포형태로 배출되어 함산소연료의 연소특성을 충분히 살리지 못한 점도 들 수 있다.

디젤유 대체 자동차연료로서 바이오디젤유는 디젤유와 동등한 세탄가, 비중을 가지고 있으면서도 연료내에 유황성분을 거의 포함하지 않고 있으며, 연료내에 산소를 포함하고 있으므로 완전연소를 촉진한다고 알려져 있다.

Fig. 13 및 Fig. 14는 전부하 및 D 13모드에서의 바이오디젤유 혼합비율에 따른 매연배출농도(BSN)를 나타내고 있다. 바이오디젤유의 혼합비율을 증가시킴으로써 매연 배출농도가 획기적으로 저감하고 있다.

Fig. 13에서 디젤유의 경우 매연 배출특성이 100rpm에서 최고 43%이며, rpm이 증가할수록 낮아져 2500rpm에서 최적 14%를 나타내고, 그 이후에 다시 약간 증가하는 경향을 보이고 있다. 디젤유에 바이오디젤유량의 혼합비를 증가시킬수록 매연은 현저히 감소한다. 전부하 운전상태에서 바이오디젤유만을 사용했을 경우 매연 배출농도는 최고 15%이며, 특히 연료 중 산소의 기포로 발생하지 않는 운전영역 1600~3000rpm에서 매연은 0%

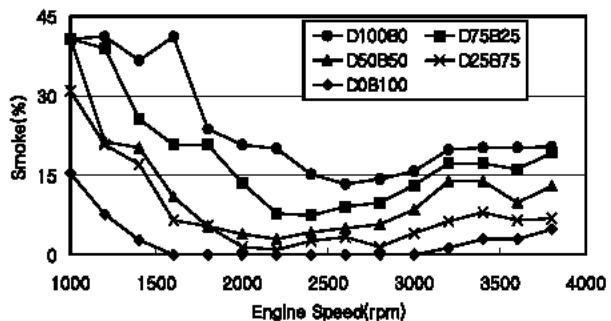


Fig. 13 Smoke concentration at the full load

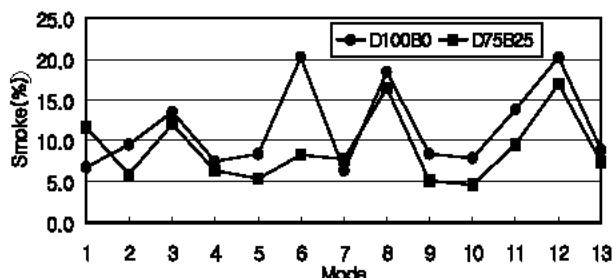


Fig. 14 BSN smoke concentration in D 13 mode

이다.

Fig. 14는 D 13모드의 부분부하에서 디젤유와 25% 바이오디젤유 혼합연료의 매연배출농도를 나타내고 있다. 각 모드별 바이오디젤 혼합유의 매연 배출농도는 디젤유에 비해 평균 약 20% 감소하고 있다.

디젤유와 바이오디젤유의 세탄가, 비중 등의 물성이 비슷함에도 불구하고 연료내에 산소의 함유 정도와 식물유를 정제한 바이오디젤유의 연료특성 자체가 매연발생에 큰 영향을 주는 것으로 판단할 수 있다.

4. 결 론

승용차용 직접분사식 고속디젤엔진에 있어서 디젤유와 바이오디젤유를 소정의 비율로 혼합하여 사용할 경우 엔진 출력성능과 배출가스 특성을 비교, 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 바이오디젤유와 디젤유의 최적의 혼합비율은 엔진출력이 10%이하의 감소가 있는 25% 부근 이 실제 사용 가능하다.
- 2) 전부하 저속운전영역에서 NOx의 배출량은 바이오디젤유의 혼합연료가 디젤유에 비해 약간 높은 특성이 있었으나, 실제 운전양상을 모사한 D 13 모드시험에서는 NOx 배출량이 약간 줄

어들었다.

- 3) THC와 CO의 배출농도는 저속구간에서 디젤유에 비하여 혼합유의 바이오디젤유 혼합비를 증가시키면 증가하는 경향이 있으나, 2000rpm 이상 고속구간에서는 동등하다.
- 4) 매연은 혼합연료 중 바이오디젤유 혼합비가 증가할수록 낮게 배출되었으며, D 13 모드에서 25% 바이오디젤 혼합유의 경우 평균 20%의 저감효과가 있었다.

바이오디젤유를 디젤유로 대체하여 사용할 경우 엔진 연료분사계의 최적화가 요구되며, 식용유의 에스테르화에 의한 연료의 전환율을 높여 장기간 엔진에 사용하여도 오일자체의 부식이나 산화를 방지할 수 있는 대응책이 필요하다.

후 기

본 연구는 BK21 사업단의 RA 지원 프로그램에 의해 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. D. Y. Z. Chang, J. H. V. Gerpen, "Fuel Properties and Engine Performance for Biodiesel Prepared from Modified Feedstocks", SAE Paper 971684, 1997
2. M.B. Sirman, E.C. Owens and K.A. Whitney, "Emissions Comparison of Alternative Fuels in an Advanced Automotive Diesel Engine", SAE Paper 2000 01 2048, 2000
3. T. Bouche, M. Hinz and R. Pittermann, Martin Herrmann, "Optimising Tractor CI Engines for Biodiesel Operation", SAE Paper 2000 01 1969, 2000
4. J. Schramm, I. Foldager and N. Olsen, L. Gratz, "Emissions from a Diesel Vehicle Operated on Diesel and Alternative Fuels in Copenhagen", SAE Paper 1999 01 3603, 1999
5. Y. Yoshimoto, M. Onodera and H. Tamaki, "Reduction of NOx, Smoke, and BSFC in a Diesel Engine Fueled by Biodiesel Emulsion with Used Frying Oil", SAE Paper 1999 01 3598, 1999
6. 최병철, "배기후처리공학", 도서출판바로, pp.21 9~254, 2001