

## CRDI 방식 디젤기관에서 바이오디젤유 적용시 매연과 NOx의 동시저감에 관한 실험적 연구

최 승 훈<sup>1)</sup> · 오 영 택<sup>2)</sup>

전주대학교 AMTI사업단<sup>1)</sup> · 전북대학교 기계항공시스템공학부, 공학연구원 공업기술연구센터<sup>2)</sup>

### An Experimental Study on Simultaneous Reduction of Smoke and NOx with Biodiesel Fuel in a CRDI Type Diesel Engine

Seunghun Choi<sup>1)</sup> · Youngtaig Oh<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Cooperation of AMTI, Jeonju University, Jeonbuk 560-759, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, The Research Institute of Industrial Technology, Engineering Research Institute, Jeonbuk 561-756, Korea

(Received 13 June 2006 / Accepted 22 August 2006)

**Abstract** : Our environment is faced with serious problems related to the air pollution from automobiles in these days. In particular, the exhaust emissions of diesel engine are recognized main cause which influenced environment strong. In this study, the potential possibility of biodiesel fuel was investigated as an alternative fuel for a naturally aspirated common rail diesel engine. The smoke emission of biodiesel fuel 5vol-%(min. content) was reduced in comparison with diesel fuel, that is, it was reduced approximately 60% at 4000rpm, full load. But, power, torque and brake specific energy consumption didn't have no large differences. But, NOx emission of biodiesel fuel was increased compared with a commercial diesel fuel. Also, the effects of exhaust gas recirculation(EGR) on the characteristics of NOx emission has been investigated. It was found that simultaneous reduction of smoke and NOx was achieved with biodiesel fuel(5vol-%) and cooled EGR method(5 ~ 10%) in a common rail diesel engine.

**Key words** : Biodiesel fuel(바이오디젤유), Common rail type diesel engine(커먼레일 방식 디젤기관), Exhaust gas recirculation(배기가스재순환), Smoke(매연), NOx(질소산화물)

### 1. 서 론

환경문제로 인해 더욱 엄격해지는 배기가스규제와 매장량의 한계에 접한 석유계 에너지원의 대체 연료로 디젤기관에 기관자체의 개조나 수정과정을 거치지 않고 적용가능한 바이오디젤유<sup>1,2)</sup>에 대한 관심이 고조되고 있다. 바이오디젤유는 식물성 및 동물성 기름을 화학처리하여 디젤기관으로 대표되는 압축착화기관의 연료로 사용가능하도록 한 것이다.

국내에서 전체차량의 15%이상을 차지하는 경유차량이 내뿜는 오염물질이 차량 전체배출량의 70%를 차지하고 있는 문제점으로 인해 환경오염부분에 대한 인식이 바뀌면서 바이오디젤유가 환경부와 산업자원부의 적극적인 지원을 받아서 기계적 분사방식의 디젤기관에 적용가능한 실용화 초반 단계에 이르게 되었다. 이미 선진 유럽에서는 1990년대 중반부터 바이오디젤유를 경유에 혼합하여 사용하였으며 현재 경유대비 1.0%미만인 보급률을 2010년까지 12%까지 보급 및 확대하는 것을 추진중에 있다.

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

국내에서는 2004년을 신재생에너지 원년으로 삼고 2011년까지 신재생에너지 비중을 5%까지 확대할 계획을 발표하고 2002년 11월부터 산업자원부가 시범보급 지역을 설정하여 20% 혼합 바이오디젤유를 공급하고 그 사용 지역을 점차 확대해 나갈 방침을 가지고 있어 그 사용이 확산될 것이다. 또한, 바이오디젤유 자체에는 경유에 필수적으로 함유되어 있는 유황성분이 전혀 없어 산성비의 주요원인인 SOx와 같은 유해 배기배출물의 저감이 더욱 가능한 것<sup>3)</sup>으로 알려져 있다.

최근까지 바이오디젤유에 관한 연구는 주로 기계적 분사방식을 채택한 디젤기관에서 연소 및 배기배출물 특성에 주안을 두어 진행되었으며, 거의 모든 연구에서 HC, CO, PM 등 대부분의 배기배출물은 감소하며 NOx는 약간 증가하는 경향을 보이고 있는 것으로 보고하고 있다.

그러나, 최근 연비개선과 배기배출물 저감 측면에서 세계적으로 큰 수효를 보이고 있는 커먼레일 방식의 디젤기관에 대해서는 바이오디젤유의 적용에 대한 연구가 초기단계에 머물러 있다. 특히, 커먼레일 방식 디젤기관의 주요부품 제조사인 BOSCH 사에서는 5vol-% 이상의 바이오디젤유를 커먼레일 디젤기관에 적용한 경우 자사 제품에 대한 신뢰성을 보장할 수 없다는 제한 조건을 제시하고 있으며, 이는 소비자에게 신뢰성을 줄 수 있는 선행연구들이 적기 때문으로 생각된다.

본 연구에서는 커먼레일 방식 디젤기관에 바이오디젤유를 적용할 경우, 기관 성능 및 배기가스 배출 특성을 상용연료인 경유와 비교분석하였다. 또한, 바이오디젤유 적용시 약간 증가되는 NOx의 저감대책<sup>4)</sup>으로서 배기가스 재순환(exhaust gas recirculation: EGR) 방법을 적용하여 매연과 NOx의 동시저감 영역을 확인하여 커먼레일 방식 디젤기관에 대한 바이오디젤유의 적용가능성을 살펴보고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 기관은 현재 상용 커먼레일 디젤기관으로 판매되고 있는 4기통, 수냉식, 4행정, 커먼레일 방식 디젤기관이며, 기관 부하와 회전속도는 기관 동력계에 의해 임의로 조정할 수 있도록 하였

Table 1 Specification of test engine

Item	Specification
Engine model	D-ENG, D4EA
Bore × Stroke	83 × 92 (mm)
Displacement	1991 (cc)
Compression ratio	17.1

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	11.03

다. 실험에 사용된 기관의 사양은 Table 1에, 사용된 연료의 특성은 Table 2에 각각 나타내었으며, 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다.

본 실험은 일반적인 상용 경유와 합산소연료의 일종인 바이오디젤유 0-30vol-%를 혼합한 연료를 커먼레일 방식 디젤기관에 적용하여 각 회전속도(1500~4000rpm)와 부하(0~100%)에서 기관 성능과 배기배출물을 측정하였다. 이 때 실험조건을 설정하기 위하여 각각의 회전속도를 일정하게 유지한 상태에서 기관의 부하변화는 각 연료 사용시 인젝션펌프의 랙을 완전히 당겼을 경우를 전부하로 하며 이때의 토크 값을 일정 비율(0, 25, 50, 75, 90, 100%)로 나누어 실험 조건을 설정하였고, 각각의 조건에서 기관이 정상상태로 운전되도록 충분히 구동한 후 데이터를 취득하였다.

매연 농도의 측정은 매연측정장치(Hesbon; HBN-1500)를 사용하여 기관으로부터 300 mm 하류에서 일정량의 배기가스를 흡입한 후, 여파지에 흡착된 매연의 농도를 측정하였으며, 매연 농도는 동일 조건에서 각 3회 측정하여 평균값을 취하였다. CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, 및 NO<sub>x</sub>의 측정은 배기 매니폴드로부터 약 400 mm 하류에서 배기가스 분석기(Greenline MK2; Italy)로 일정량의 배기가스를 흡입하여 측정하였다.

또한, 기관이 일정량의 연료를 소모하는 시간을 측정하여 단위시간당의 에너지소비율(MJ/kW-h)로 계산하였다. 실험연료는 경유 100%와 바이오디젤

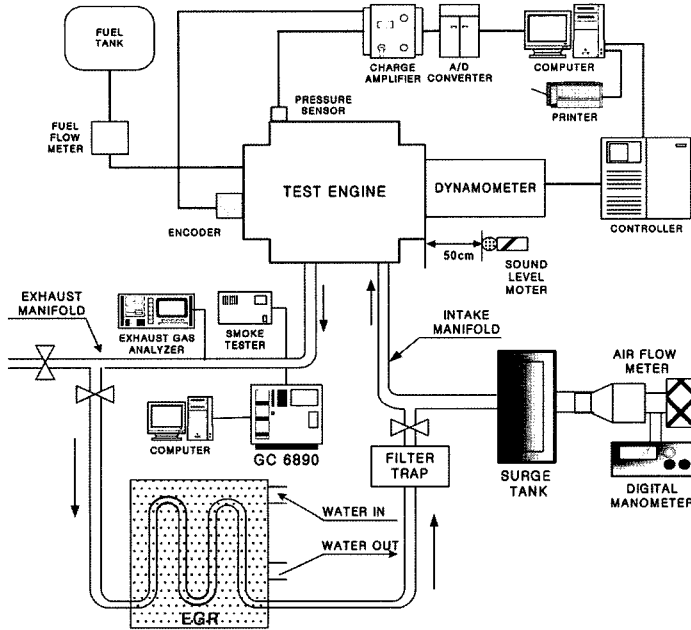


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

유 5, 10, 20, 30%의 체적비율로 혼합한 연료를 사용하였다.

또한, EGR율을 구하기 위하여 전체 연소실 흡기량에 대한 EGR된 양, 즉 새로운 흡입공기량의 감소율로서 식 (1)을 이용하였다. 여기에서,  $V_0$ 는 EGR을 수행하지 않았을 경우의 흡입공기량( $m^3/h$ ),  $V_a$ 는 EGR을 수행했을 경우의 새로운 흡입공기량이다. 또한, 각 기관 부하에서 303~845K까지 변화하는 배기가스의 온도는 냉각순환시스템을 거쳐 297K 정도로 유지하였으며, 재순환되는 배기가스 중의 미립자를 제거하기 위하여 필터를 설치하였다.

$$EGR \text{ rates}(\%) = \frac{V_0 - V_a}{V_0} \times 100 \quad (1)$$

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 바이오디젤유 적용시 기관 특성

Fig. 2는 커먼레일 방식 디젤기관에 바이오디젤유를 적용하였을 경우 토크의 변화를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 바이오디젤유 혼합율이 증가함에 따라 경유만을 연료로 사용한 경우와 비교하여 약간 감소됨을 알 수 있다. 이는 바이오디젤유의 발열량이 경유의 경우보다 작기 때문인 것

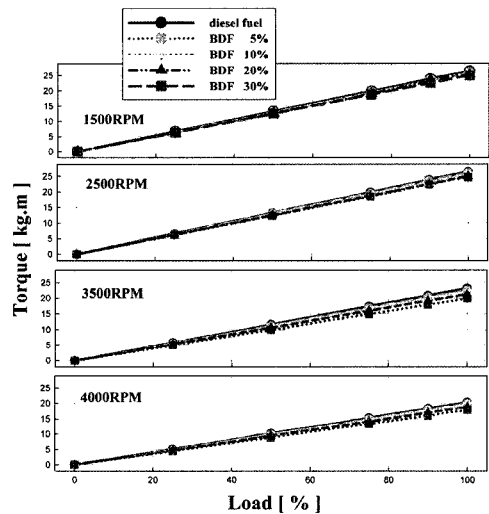


Fig. 2 The comparison of torque on biodiesel fuel contents

으로 생각되지만, BDF 20vol-% 이상을 혼합한 경우를 제외하고는 거의 유사한 경향을 나타내고 있다.

바이오디젤유를 본 연구에서 적용한 디젤기관의 연료로 사용시에, 바이오디젤유의 발열량이 경유의 것에 비해 약 11%정도가 낮지만, 바이오디젤유 10vol-% 적용시에 1%정도의 발열량 차이를 보여 기관출력에는 그 차이가 거의 없음을 알 수 있었다.

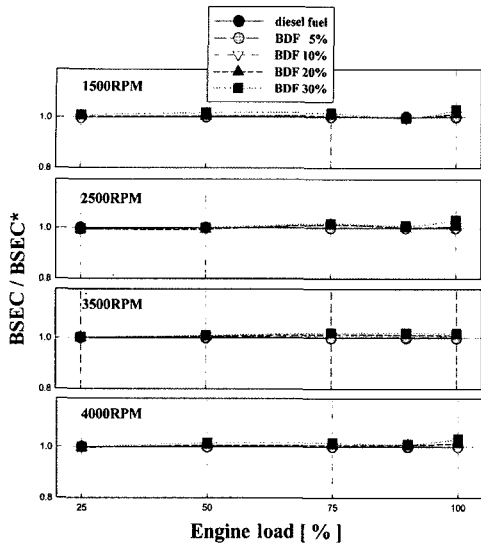


Fig. 3 The comparison of BSEC on biodiesel fuel contents

이와 같은 상황을 살펴보기 위하여 각 실험조건에서 에너지소비율(BSEC)을 조사하여 보았다.

Fig. 3은 각 기관회전수의 경우, 부하변화에 따른 제동에너지소비율(BSEC)의 변화를 경유만을 적용한 경우와 비교하여 바이오디젤유의 함유량에 따라 변화율을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 연료중의 바이오디젤유 함유량에 따른 BSEC의 변화는 경유의 경우와 비교하여 거의 유사한 경향을 나타내고 있다. 바이오디젤유의 발열량이 경유만을 사용한 경우와 비교하여 약간 저하됨에도 불구하고 바이오디젤유내에 함유된 산소성분에 기인한 기관의 연소효율이 개선되었기 때문으로 생각된다. 즉, 산소농도가 증가하면 반응속도가 증가되므로 연소 범위는 넓어지게 되며 특히, 과농한 영역인 고부하영역에서 반응속도가 증가하고 연소를 안정화시켰기 때문으로 생각한다.<sup>5)</sup>

Fig. 4는 각 회전속도에서 기관부하 변화에 따른 매연의 배출특성을 나타낸 그림이다. 전체적으로 부하가 증가함에 따라 매연의 배출량은 증가하지만, 바이오디젤유 함유량이 증가함에 따라 전 운전영역에서 경유를 사용한 경우보다 매연의 배출 농도는 감소하였고, 고부하영역으로 진행할수록 매연의 저감폭이 크게 나타났다. 또한, BDF 5vol-%를 혼합한 경우에는 경유를 사용한 경우와 비교하여 4000rpm, 90%부하영역에서 약 16%, 전부하영역에서

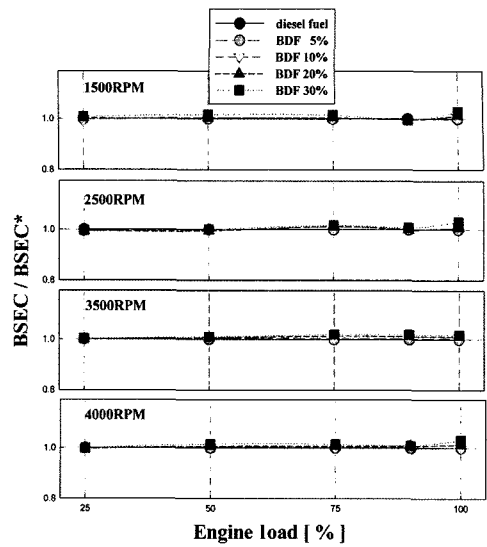


Fig. 4 The comparison of smoke on biodiesel fuel contents

서는 약 8%의 저감이 이루어지고 있다. 본 실험에서 최대 혼합량인 BDF 30vol-%를 혼합한 경우에 경유만을 사용한 경우와 비교하여 4000rpm, 90%부하영역에서 약 57%, 전부하영역에서는 약 60%의 매연 저감이 이루어져 바이오디젤유의 함유량이 증가함에 따라 매연의 배출량이 급격하게 저감됨을 있다.

Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 조건에서 NOx의 배출특성을 나타낸 그림이다. NOx의 배출특성은 BDF 20vol-%이상을 혼합한 경우를 제외하고는 현저한 증가추이를 보이지 않았으며, 바이오디젤유의 혼합량이 증가함에 따라 약간씩 증가하는 경향을 나타내고 있다. BDF 5vol-%를 혼합한 경우에는 경유를 사용한 경우와 비교하여 4000rpm, 90%부하영역에서 약 6.7%, 전부하영역에서는 약 2% 정도가 증가하고 있다. 본 실험에서 최대 혼합량인 BDF 30vol-%를 혼합한 경우에 경유만을 사용한 경우와 비교하여 4000rpm, 90%부하영역에서 약 19.8%, 전부하영역에서는 약 14.3%가 증가하여 바이오디젤유의 함유량이 증가함에 따라 NOx의 배출량이 약간씩 증가됨을 알 수 있다. 또한, Fig. 4와 Fig. 5에서 보면 바이오디젤유의 함유량이 증가함에 따라 매연은 감소하고, NOx는 증가되는 상반관계의 경향을 보이고 있으나, NOx의 증가량보다는 매연이 저감량이 더욱 현저함을 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 4와 Fig. 5에서 나타난 매연과 NOx의

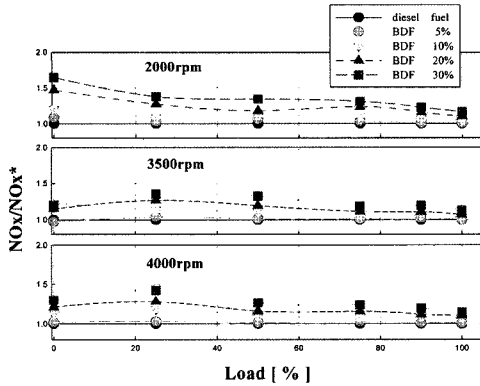


Fig. 5 The comparison of NOx on biodiesel fuel contents

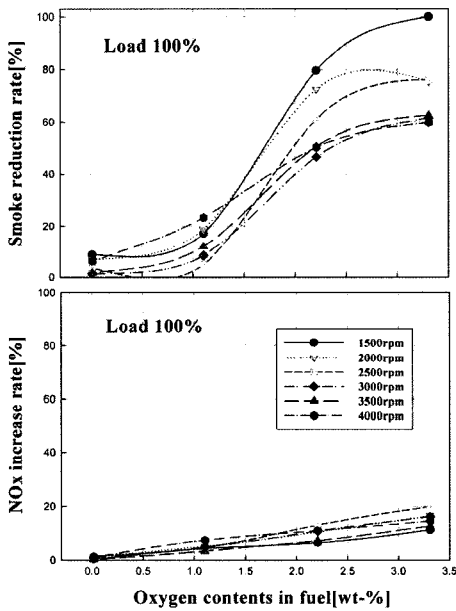


Fig. 6 The comparison of variation rate on smoke and NOx at full load

배출특성을 전부하시에 각 회전속도 별로 나타낸 것이다. 앞에서 언급한 바와 같이 연료내 산소량이 증가함에 따라, 즉 연료내의 바이오디젤유 혼합량이 증가함에 따라 매연은 감소폭이 커지고, NOx는 약간 증가됨을 알 수 있다. 또한, 산소량이 증가함에 따라 매연의 감소폭이 NOx의 증가폭을 크게 상회함을 알 수 있다.

### 3.2 EGR 적용시의 배기배출물 특성 비교

이상의 실험결과에서와 같이 경유에 바이오디젤

유를 혼합하여 커먼레일 디젤기관에 적용할 때 매연은 현저히 감소하며, 에너지소비율도 약간 개선되는 경향을 나타내지만, 디젤기관의 주요 규제 대상으로 부각되는 NOx의 배출농도는 바이오디젤유의 혼합율이 증가함에 따라 약간 증가되는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 디젤기관에서 NOx 저감방법의 하나로 알려진 EGR방법을 병행하여 사용하고, 특히 체적효율의 증대를 위하여 cooled EGR 방법을 적용<sup>6)</sup>하였으며, 본 실험에서는 바이오디젤유 5%를 혼합한 연료를 적용하여 5-10%의 EGR 적용 실험을 수행하였다.

Fig. 7은 각 기관회전속도와 부하에서 바이오젤유를 20vol% 혼합·적용한 경우 EGR율에 따른 매연의 배출 특성을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 EGR율이 증가함에 따라서 바이오디젤유를 혼합하여 사용한 경우에도 매연의 증가폭이 커지는 것을 알 수 있다. 또한, 10%의 EGR율이 적용된 경우에는 3500rpm의 고회전속도 영역에서 경유를 사용한 경우보다도 매연 배출이 증가되기 시작함을 알 수 있다. 이는 재순환되는 배출가스가 연소실내로 흡입되는 신기 중의 산소량을 감소시켜 연소에 충분한 산소의 공급이 어려워지고 동시에 연료입자의 산화가 불충분하기 때문으로 생각된다.

또한, 바이오디젤유를 혼합하여 사용하고 5%의 EGR율을 적용한 경우에도 경유만을 사용한 경우보다 매연이 감소하는 이유는 바이오디젤유내에 함유된 11%정도의 산소가 연소과정중에 연료입자의 산화를 촉진시켰기 때문으로 생각된다. 이는 디젤기관의 연소특성상 연료내의 산소가 흡입과정시 흡입된 공기속의 산소보다는 연소를 위한 탄화수소와의 화학반응 속도가 빨라 거의 완전 연소를 이루었기 때문으로 분석된다.

Fig. 8은 Fig. 6과와 동일한 조건에서 배출되는 NOx의 배출특성을 나타낸 것이다. 5%의 EGR만을 적용하여도 경유만을 적용한 경우보다 NOx의 저감이 이루어지고 있으며, 전체적으로 NOx는 EGR율의 증가에 따라 저감됨을 알 수 있다. 이는, 바이오디젤유 5% 혼합·적용시 NOx의 증가율이 크지 않았기 때문에 5%이상의 EGR율을 적용한 경우에 경유만을 사용한 경우보다도 NOx 배출량이 저감됨을 알 수 있다.

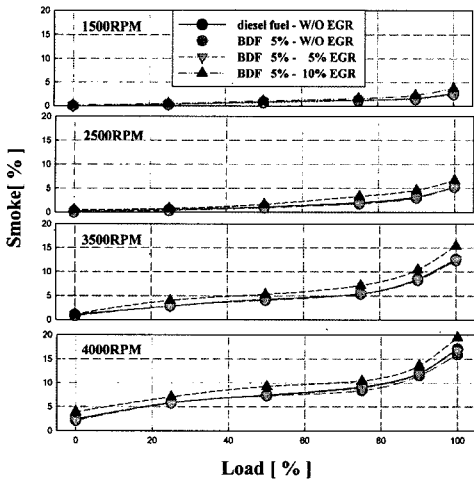


Fig. 7 Variation of smoke versus EGR rate at various engine speeds and loads

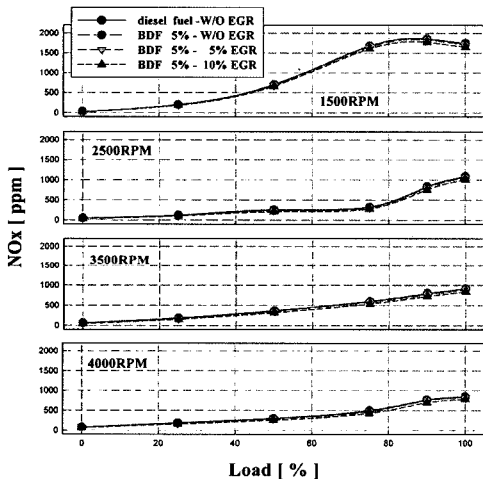


Fig. 8 Variation of NOx versus EGR rate at various engine speeds and loads

#### 4. 결론

바이오디젤유를 상용 경유와 0~30%의 혼합비율로 혼합하여 커먼레일 디젤기관에 적용하여 기관 성능 및 배기배출물 특성을 조사하고, 바이오디젤 유 적용시 증가되는 NOx의 저감대책으로서 EGR을 적용한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- 1) 바이오디젤유의 함유량이 증가함에 따라 매연은 저감되고, NOx는 약간 증가하지만 매연의 저감율이 NOx의 증가율을 크게 상회하여 커먼레일 디젤기관에 대한 대체연료로서 바이오디젤

유의 가능성을 확인할 수 있었다.

- 2) 바이오디젤유에 대한 NOx 배출특성은 바이오디젤유의 함유량이 증가함에 따라, 즉 연료내의 산소량이 증가함에 따라 경유만을 사용한 경우보다 약간 증가함을 알 수 있었다.
- 3) 바이오디젤유 5vol-%를 혼합하여 커먼레일 디젤기관에 적용하고 5%의 EGR을 적용한 결과 매연과 NOx의 동시저감이 가능하였다.

#### 후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 2005년도 지역대학우수과학자지원사업(KRF-2005-D00130-R05-2004-000-10643-0)의 지원으로 이루어졌으며, 관계 제위께 깊이 감사드립니다.

#### References

- 1) 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.
- 2) B. C. Choi, C. H. Lee and H. J Park, " Power and Emission Characteristics of DI Diesel Engine with a Soybean Bio-diesel Fuel," Journal of KSPSE, Vol.6, No.3, pp.11-16, 2002.
- 3) S. H. Choi and Y. T. Oh, "An Experimental Study on Simultaneous Reduction of Smoke and NOx in a Agricultural Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.11, No.3, pp.85-91, 2003.
- 4) S. H. Choi and Y. T. Oh, "A Simultaneous Reduction of Smoke and NOx with Biodiesel Fuel in a D.I. Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.13, No.2, pp.65-71, 2005.
- 5) Y. T. Oh and S. H. Choi, "Experimental Study on Emission Characteristics and Analysis by Various Oxygenated Fuels in a DI Diesel Engine," Int. J. Automotive Technoloyg, Vol.6, No.3; pp.197-203, 2005.
- 6) Y. H. Ham and K. M. Chun, "Engine Cycle Simulation for the Effects of EGR on Combustion and Emissions in a DI Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.10, No.4, pp.51-59, 2002.