

직접분사식 디젤기관에서 바이오디젤유 적용시 매연과 NOx의 동시저감

최승훈^{*1)} · 오영택²⁾

전북대학교 기계공학부¹⁾ · 전북대학교 기계공학과, 전북대학교 부설 공학연구원 공업기술연구소²⁾

A Simultaneous Reduction of Smoke and NOx with Biodiesel Fuel in a D. I. Diesel Engine

Seunghun Choi^{*1)} · Youngtaig Oh²⁾

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

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

(Received 23 August 2004 / Accepted 21 December 2004)

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 D.I. diesel engine. The smoke emission of biodiesel fuel was reduced remarkably in comparison with diesel fuel, that is, it was reduced approximately 48.5% at 2500rpm, 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 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(20vol-%) and cooled EGR method(5~15%).

Key words : Biodiesel fuel(바이오디젤유), Diesel engine(디젤기관), Exhaust gas recirculation(배기가스재순환), Smoke(매연), NOx(질소산화물)

1. 서론

디젤기관은 높은 열효율을 낼 수 있고, 저급연료를 포함한 여러 종류의 연료를 사용할 수 있으며, 또한 고출력을 낼 수 있어 그 수요가 증가되는 추세에 있지만, 기관 특성상 연소 후 배출되는 매연으로 인하여 전 지구촌적인 대기오염의 주범으로 주목받고 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위한 방안으로서 는 고압분사에 의한 연소개선과 배출물 저감, 분사

시기 및 연료공급량의 제어, 촉매에 의한 PM 과 NOx 의 저감, 연소실 형상변화로 스웰과 텀블에 의한 NOx 와 매연의 동시저감¹⁾ 등이 있으며, 최근의 커먼 레일 방식(common rail system)²⁾을 사용함으로써 가솔린기관처럼 디젤기관도 전자제어 방식에 의해 배기가스를 저감하기 위한 방안까지 제시되고 있으며, 일부는 실험단계에서 벗어나 실용화 단계에 이르고 있다.

또 다른 방법의 하나로는 연료자체의 성상을 변화시키는 방법을 들 수가 있다. 이는 기존의 화석연료는 연료 자체속에 산소성분이 전혀 존재하지 않

^{*}To whom correspondence should be addressed.
medr@chonbuk.ac.kr

는 탄화수소 화합물이기 때문에 디젤기관의 특성상 저부하영역에서는 물론 고부하영역 즉, 농후한 혼합기 영역 및 연소말기에 불완전 연소가 될 가능성이 농후하므로 연료자체에 산소를 함유하고 있는 합산소연료를 기존의 경유와 혼합하여 사용함으로써 배출가스의 저감을 시도하고자 하는 것이다.

본 연구에서 실험에 사용한 바이오메스 연료의 일종인 바이오디젤유(biodiesel fuel; BDF)는 각종 식물성 기름에서 생산할 수 있는 디젤엔진의 대체연료로서,^{3,4)} 우리나라와 같은 비산유국에서 화석연료의 소비량을 억제할 수 있고, 매연, 이산화탄소 및 아황산가스 등의 오염물질의 배출량을 현저하게 저감할 수 있는 친환경적인 관점에서 관심이 고조되고 있다. 또한, 경유에 필수적으로 함유되어 있는 유황성분이 전혀 없어 산성비의 주요원인인 SOx와 같은 유해 배기배출물의 저감이 더욱 가능한 것⁵⁾으로 알려져 있다. 본 연구에서는 바이오디젤유를 디젤기관의 연료로 사용할 경우, 기관 성능 및 배기가스 배출 특성을 상용연료인 경유와 비교분석하였고, 바이오디젤유 적용시 약간 증가되는 NOx의 저감대책⁶⁾으로서 배기가스 재순환(EGR; exhaust gas recirculation) 방법을 적용하여 매연과 NOx의 동시저감을 실현함으로써 바이오디젤유가 디젤기관의 대체연료로서의 위치를 확고히 하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 기관은 단기통, 수냉식, 4행정, 직접분사식 디젤기관이며, 기관 부하와 회전속도는 엔진 동력계에 의해 임의로 조정할 수 있도록 하였다. 실험에 사용된 기관의 사양은 Table 1에, 사용된 연료의 특성은 한국석유품질검사소에 의뢰한 내용을 Table 2에 각각 나타내었으며, 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다.

본 실험은 일반적인 상용 경유와 합산소연료의 일종인 바이오디젤유, 그리고 이들 각각의 혼합비율에 따른 혼합연료를 기관의 각 회전속도와 부하에서 기관 성능과 배기배출물을 측정하였다.

또한, EGR 율을 구하기 위하여 전체 연소실 흡기량에 대한 EGR 된 양, 즉 새로운 흡입공기량의 감소율로서 식 (1)을 이용하였다. 여기에서, V_0 는 EGR

Table 1 Specification of test engine

Item	Specification
Engine model	ND130
Bore × Stroke	95 × 95 (mm)
Displacement	673 (cc)
Compression ratio	18
Combustion chamber	Toroidal

Table 2 Properties of test fuels

	Diesel fuel	BDF
Flash point (°C)	40	178
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	11.26

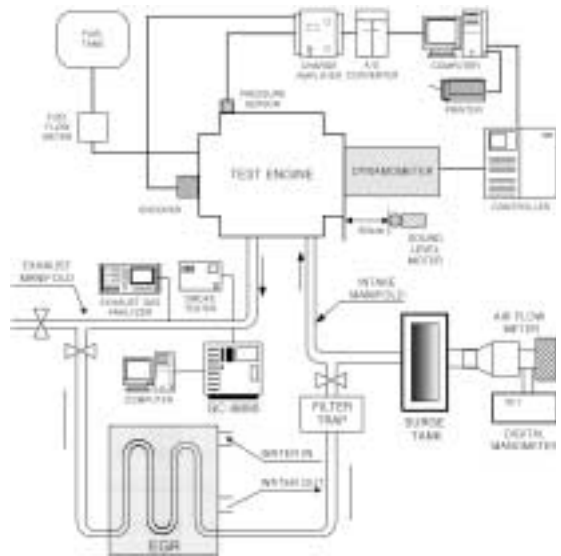


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

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

을 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.

매연 농도의 측정은 매연측정장치(Hesbon; HBN-1500)를 사용하여 기관으로부터 300mm 하류에서 일정량의 배기가스를 흡입한 후, 여과지에 흡착된 매연의 농도를 측정하였으며, 매연 농도는 동일 조건에서 각 3회 측정하여 평균값을 취하였다. CO₂, O₂, 및 NOx의 측정은 배기 매니폴드로부터 약 400mm 하류에서 배기가스 분석기(Motor branch; Model 588)로 일정량의 배기가스를 흡입하여 측정하였다. 또한, 기관이 일정량의 연료를 소모하는 시간을 측정하여 단위시간당의 에너지소비율(MJ/kW·h)로 계산하였다. 실험연료는 경유 100%와 바이오디젤유 100% 및 바이오디젤유를 20, 30, 50%의 체적비율로 경유와 혼합한 연료로 실험하여 비교하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기관성능 및 배기배출물 특성 비교

Fig. 2는 전부하상태에서 각 기관 회전속도변화와 바이오디젤유의 함유량에 따른 기관 출력 특성을 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 모든 연료 공히 전 회전범위에 걸쳐 기관 출력특성은 경유만을 사용한 경우와 거의 유사함을 알 수 있다. 즉, 바이오디젤유를 본 연구에서 적용한 디젤기관의 연료로 사용시에, 바이오디젤유의 발열량이 경유의 것에 비해 약 12% 정도가 낮지만, 함산소성분의 영향에 기인한 열효율의 향상으로 전체적인 기관 작동 영역에서의 기관출력에는 3% 미만의 차이를 보여 실제로는 그 차이가 거의 없음을 알 수 있었다.

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

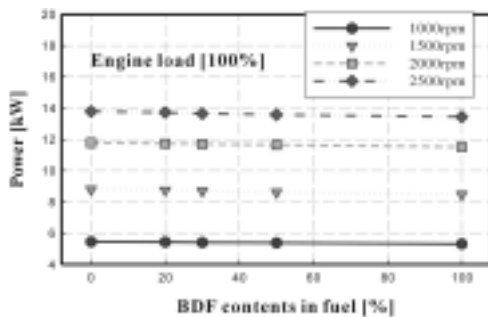


Fig. 2 Engine performance vs. engine speeds at engine load 100%

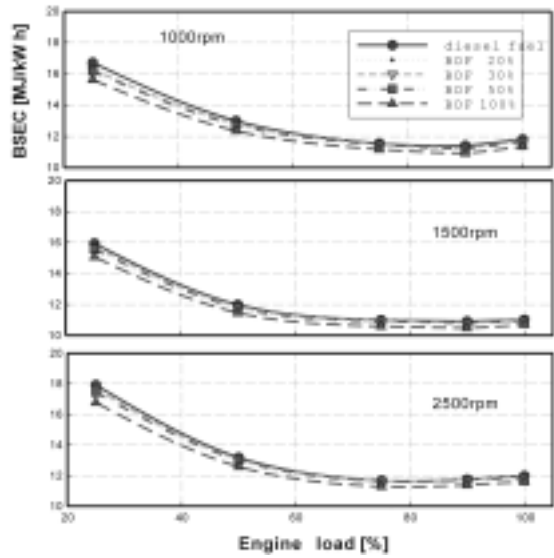


Fig. 3 BSEC vs. engine loads at various engine speeds

Fig. 3은 각 기관 회전수의 경우, 부하변화에 따른 에너지소비율의 변화를 바이오디젤유의 함유량에 따라 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 연료중의 바이오디젤유 함유량의 차이에 따른 에너지 소비율의 변화는 각 회전수별로 거의 유사한 경향을 나타내었으며, 모든 회전 영역과 부하의 경우에 바이오디젤유를 연료로 사용한 경우가 경유의 경우에 비하여 약간 저감되었고, 바이오디젤유의 함유량이 증가할수록 에너지소비율은 거의 동일하거나 소폭 개선됨을 알 수 있다. 즉, 바이오디젤유 100%를 적용한 경우에 무부하영역에서는 최대 6.5%, 전부하영역에서는 약 4% 정도 에너지소비율의 우위를 보이고 있으므로, Fig. 2와 3에 나타난 바와 같이 기관출력과 에너지소비율면에서는 바이오디젤유를 디젤기관에 적용시 경유의 대체연료로서의 가능성을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 경유와 바이오디젤유, 그리고 이들의 혼합유를 각각 연료로 사용한 경우에, 전부하상태에서 기관의 각 회전수에 따른 매연과 NOx의 배출 특성을 나타낸 그림이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이, 경유와 바이오디젤유, 혼합연료 사이에는 현격한 매연 배출 농도 차이를 보이고 있으며, 고회전영역으로 갈수록 큰 차이를 보이고 있다. 이는 저회전영역인 경우에는 경

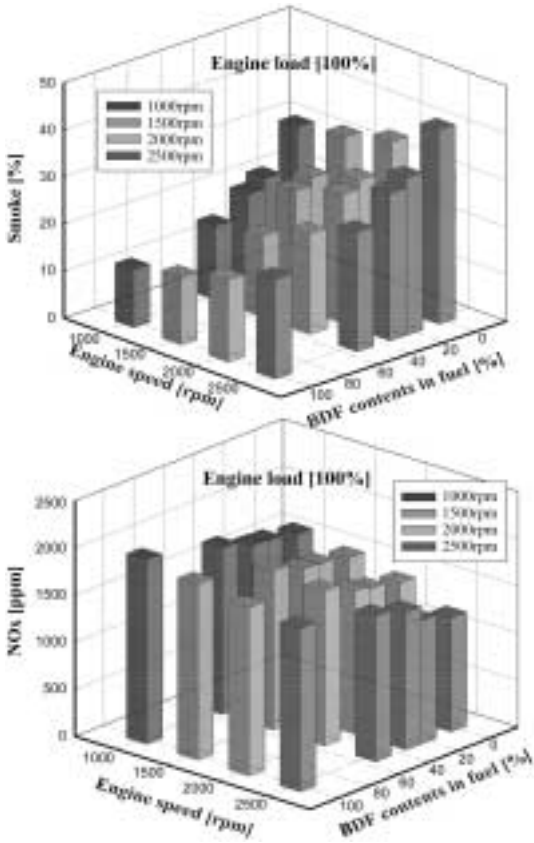


Fig. 4 Smoke and NOx vs. engine loads at various engine speeds

유를 연료로 사용한 경우에도 공기이용률이 충분하기 때문에 바이오디젤유와 비교하여 매연 배출에 대한 산소성분의 영향이 크지 않았으나, 고회전영역으로 갈수록 바이오디젤유 자체에 포함된 산소성분이 비교적 산소농도가 희박한 후연소기간동안에 연료입자의 산화를 더욱 촉진시켰기 때문으로 생각된다. 경유의 경우는 전체적인 기관의 회전속도영역에서 부하변화에 따른 매연 배출특성이 현저하게 차이를 보이고 있으나, 바이오디젤유를 혼합한 경우에는 혼합율이 증가함에 따라 부하변화에 따른 매연 배출특성의 차이가 경유와 비교하여 크지 않음을 알 수 있다. 즉, 바이오디젤유를 사용한 경우에 실린더내의 고온상태에서 잔존하는 탄소상미립자의 생성량과 산화량의 차이가 줄어들었기 때문이며, 바이오디젤유에 포함된 산소성분이 탄화수소성분의 산화속도를 더 빠르게 진행시켜주었기 때문⁵⁾

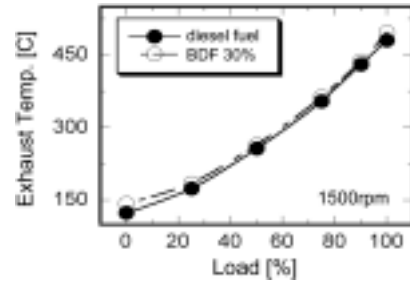


Fig. 5 Comparison of exhaust Temp. between diesel fuel and BDF 30% at various engine loads, 1500rpm

으로 생각된다. NOx의 배출특성은 바이오디젤유의 함유량에 따라서 전체적으로 약간 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 이는 고부하와 고회전수에서 실린더내의 온도가 상승함에 따라 NOx 생성에 영향을 준 것으로 생각된다. 즉, 바이오디젤유의 함유량이 증가함에 따라 NOx 배출량의 차이가 약간 증가하였는데, 이는 바이오디젤유에 포함된 약11.3% 정도의 산소성분이 연소실내의 온도를 높여주어 NOx의 증가를 가져온 것으로 생각된다.

Fig. 5는 이를 확인하기 위하여 경유만을 사용한 경우와 바이오디젤유 30%를 혼합하여 사용한 경우의 배기가스 온도를 비교한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 바이오디젤유 30%를 혼합하여 사용한 경우가 약간 더 배기가스의 온도상승이 이루어짐을 알 수 있었다.

3.2 EGR 적용시의 배기배출물 특성 비교

이상의 실험결과에서와 같이 경유에 바이오디젤유를 혼합하여 사용할 때 매연은 현저히 감소하며, 에너지소비율도 약간 개선되는 경향을 나타내지만, 디젤기관의 주요 규제 대상으로 부각되는 NOx의 배출농도는 바이오디젤유의 혼합율이 증가함에 따라 꾸준히 증가되는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 디젤기관에서 NOx 저감방법의 하나로 알려진 EGR 방법을 병행하여 사용하였으며, 특히 체적효율의 증대를 위하여 cooled EGR 방법을 적용⁷⁾하였다.

Fig. 6은 각 기관회전속도와 부하에서 바이오젤유를 20vol% 혼합·적용한 경우 EGR율에 따른 매연의 배출 특성을 경유를 기준으로 하여 나타낸 것

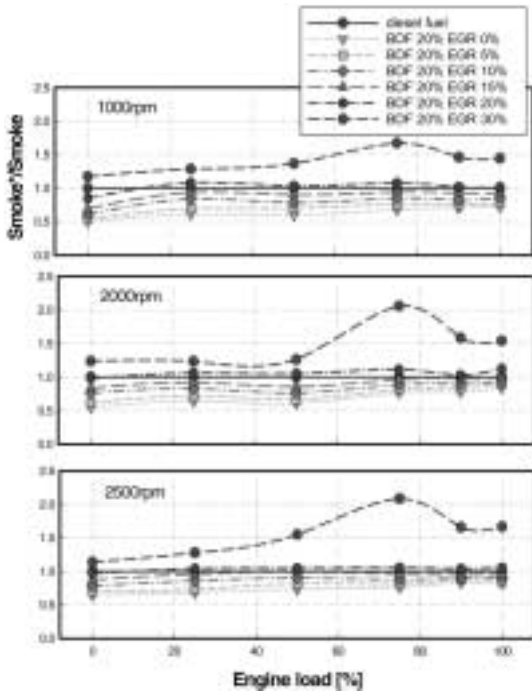


Fig. 6 Variation of smoke vs. EGR rate at various engine speeds and loads

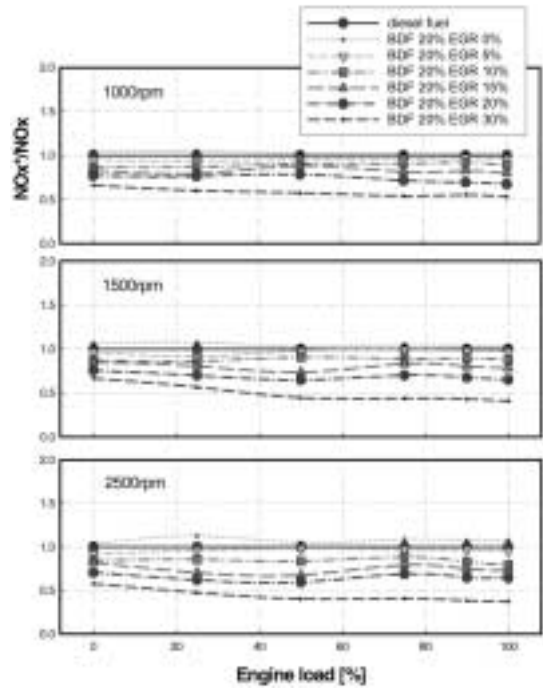


Fig. 7 Variation of NOx vs. EGR rate at various engine speeds and loads

이다. 그림에 나타난 바와 같이 EGR율이 증가함에 따라서 바이오디젤유를 혼합하여 사용한 경우에도 매연의 증가폭이 커지는 것을 알 수 있으며, 저회전 속도영역에서의 저감율이 고회전 속도영역의 저감율보다 커짐을 알 수 있다. 또한, 20% 이상의 높은 EGR율이 적용된 경우에는 중·고부하 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 5~15%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 흡입과정 시 흡입된 공기속의 산소보다는 연소를 위한 탄화수소와의 화학반응 속도가 빨라 거의 완전 연소를 이루었기 때문으로 분석⁸⁾된다.

Fig. 7은 Fig. 6과와 동일한 조건에서 배출되는 NOx의 배출특성을 경유를 기준으로 하여 나타낸 것이다. Fig. 6과는 달리 고회전 속도영역에서의 저감율이 고회전 속도영역에서의 저감율보다 커짐을 알 수 있으며, 전체적으로 NOx는 EGR율의 증가에 따라 현저하게 저감됨을 알 수 있다. 또한, 바이오디젤유 20% 혼합·적용시 NOx의 증가율이 크지 않았기 때문에 5% 이상의 EGR율을 적용한 모든 경우에 경유만을 사용한 경우보다도 NOx 배출량이 저감됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 매연 배출에 대한 EGR의 영향을 정량적으로 나타낸 경우이며, 바이오디젤유 20vol-%를 혼합하여 사용한 경우에 90%의 부하에서 각 회전 속도 변화에 따른 매연의 배출특성을 경유만을 사용한 경우와 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 5에서 나타난 바와 같이 15%까지의 EGR율을 적용한 경우에는 경유만을 사용한 경우보다 매연배출량이 저감되었으며, 20%의 EGR이 적용된 경우에는 경유만을 연료로 사용한 경우보다 매연 배출이 증가하기 시작함을 확인할 수 있다.

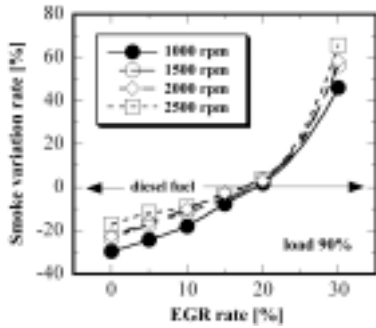


Fig. 8 Variation rate of smoke on EGR rate with BDF 20% in comparison with diesel fuel under varying speeds at load 90%

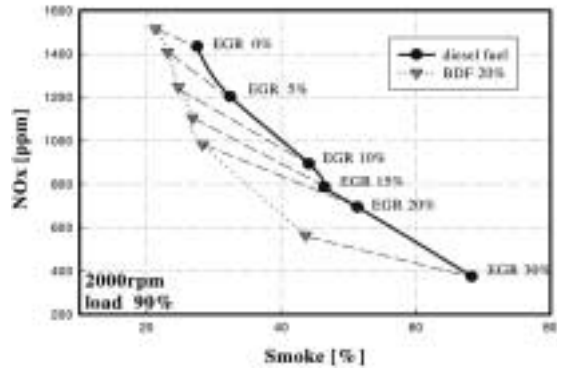


Fig. 10 The effect of combination of biodiesel fuel and EGR on smoke and NOx emission

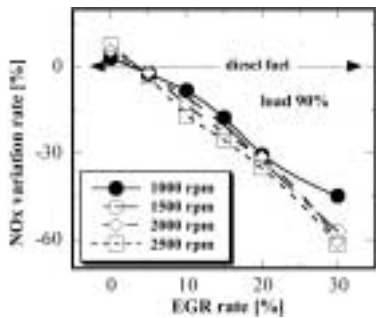


Fig. 9 Variation rate of NOx on EGR rate with BDF 20% in comparison with diesel fuel under varying speed at load 90%

Fig. 9는 Fig. 8과 동일한 조건에서 NOx 배출량에 대한 EGR의 영향을 나타낸 경우이다. EGR을 적용하지 않은 경우에 비하여 비교적 소량인 EGR 5%만을 적용한 경우에도 경유만을 연료로 사용한 경우보다 NOx가 저감됨을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 2000rpm, 90%의 부하상태에서 바이오디젤유 20vol-%를 혼합하여 사용한 경우와 경유만을 사용한 경우의 EGR을 변화에 따른 NOx와 매연과의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 EGR율이 증가함에 따라 양 연료 모두 NOx는 저감되며, 매연은 증가함을 알 수 있다. EGR율은 이 경우에 약 30%까지 가능하였으며, 배기가스 재순환양에 따라서 NOx를 62% 정도까지 저감할 수 있었다. 또한, 앞서 언급한 바와 같이 고부하영역의 경우 완전연소를 위하여 산소의 유효이용이 매우 중요하며 EGR율이 증가할수록 산소농도는 감소하므로 확산연소는 전반적으로 악화되어 Fig. 8에 나타난 바와 같이

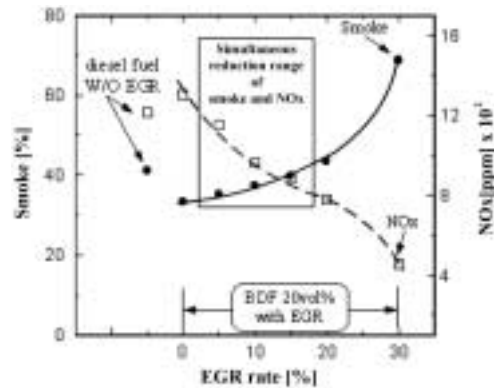


Fig. 11 Smoke and NOx emission vs. EGR rates at 2500 rpm, full load

EGR 20% 이상에서는 경유만을 사용한 경우보다 매연이 증가함을 알 수 있다. 이는 재순환되는 배기가스가 연소실내로 흡입되는 새로운 공기 중의 산소량을 감소시켜 연소에 충분한 산소의 공급이 어렵기 때문으로 생각된다. 그리고 바이오디젤유 20vol-%를 혼합하여 사용하고 5% 정도의 적은 EGR율을 적용한 경우에도 경유만을 사용한 경우와 비교하여 NOx는 약 2%, 매연은 16%를 동시에 저감시킬 수 있었다.

Fig. 11은 2500rpm의 기관 회전속도에서 전부하시에 경유를 연료로 사용하고 EGR을 적용하지 않은 경우와, 바이오디젤유 20vol-%를 혼합한 연료와 EGR을 조합하여 적용한 경우의 매연과 NOx의 상반되는 배출특성과 동시저감영역을 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 매연과 NOx가 동시에 저감되는 영역은 EGR율 5~15%이지만 전체적

인 배기배출물의 배출특성으로 보아 매연과 NOx의 안정적인 동시저감 영역은 EGR율 5~10% 정도 일 것으로 생각된다. 즉, Fig. 8과 9 및 10에서 살펴본 바와 같이 2500rpm, 전부하의 경우에 바이오디젤유 20vol%를 경유와 혼합하여 사용하고, 5%의 EGR율을 적용한 경우 매연 14.6%, NOx 5%가 동시에 저감되며, 10%의 EGR율을 적용한 경우에는 매연 9.2%, NOx 20%정도가 동시에 저감됨을 확인하였다. 또한, 회전속도가 증가할수록 EGR율이 증가함에 따라서 매연의 증가율과 NOx의 저감율이 현저함을 알 수 있었다.

4. 결론

수냉식, 단기통, 4행정, 직접분사식 디젤기관의 연료로서 경유, 바이오디젤유 및 일정한 체적비율로 경유에 바이오디젤유를 혼합한 연료를 사용하여, 이들 연료들이 기관 성능 및 배기 배출물에 미치는 영향에 대하여 조사한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- 1) 바이오디젤유의 출력은 경유만을 기관에 적용한 경우와 큰 차이를 보이지 않았으며, 에너지소비율은 바이오디젤유의 혼합율이 증가할수록 경유보다 다소 개선됨을 확인 할 수 있어 디젤기관의 대체연료로서 바이오디젤유의 적용 가능성을 확인할 수 있었다.
- 2) 바이오디젤유를 디젤기관의 연료로 사용하였을 경우, 연료내 바이오디젤유의 함유량이 증가할수록 매연 배출의 감소량이 증가하며, 바이오디젤유 100vol%를 적용한 경우에 경유만을 연료로 사용한 경우와 비교하여 25% 이하의 저부하에서는 최대 약 75%, 90% 이상의 고부하에서는 48%의 매연 저감효과를 확인하였다.
- 3) 바이오디젤유에 대한 NOx 배출특성은 바이오디젤유의 함유량이 증가함에 따라, 즉 연료내의 산소량이 증가함에 따라 경유만을 사용한 경우보다 약간 증가함을 알 수 있었으며, 20vol%의 바이오디젤유를 적용한 경우에 경유만을 사용한 경우와 비교하여 2000rpm, 전부하의 경우에 약

6%, 2500rpm, 전부하의 경우에 약 7%가 증가됨을 확인하였다.

- 4) 2500rpm, 전부하의 경우에 바이오디젤유를 경유에 20vol% 혼합·사용하고 5%의 EGR율을 적용한 경우 매연 14.6%와 NOx 5%, 10%의 EGR율을 적용한 경우에 매연 9.2%와 NOx 20%가 동시에 저감됨을 확인하였다.

References

- 1) M. Konno, T. Chikahisa and T. Murayama, "An Investigation on the Simultaneous Reduction of Particulate & NOx by Controlling Both the Turbulence & the Mixture Formation in DI Diesel Engine," SAE 932797, 1993.
- 2) D. Y. Jeung and J. T. Lee, "A Development of Ultra High Pressure Injection Equipment for Study on Diesel Spray Characteristics with Ultra High Pressure," Transactions of KSAE, Vol.11, No.5, pp.50-59, 2003.
- 3) M. Ziejewski, H. Goettler and G. L. Pratt, "Comparative Analysis of the Long-Term Performance of a Diesel Engine on Vegetable Oil Based Alternate Fuels," SAE 860301, 1986.
- 4) X. Montagne, "Introduction of Rapeseed Methyl Ester in Diesel Fuel-The French National Program," SAE 962065, 1996.
- 5) Y. T. Oh, S. H. Choi and S. W. Kim, "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.
- 6) 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.
- 7) 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.