

농업용 디젤기관의 대체연료로서 바이오디젤유의 특성

최승훈 오영택 이충호

The Characteristics of Biodiesel Fuel as an Alternative Fuel of an Agricultural Diesel Engine

S. H. Choi Y. T. Oh C. H. Lee

Abstract

Our environment is faced with serious problems related to the air pollution from diesel engines in these days. In particular, the exhaust emissions of agricultural diesel engines are recognized main cause which influenced environment strongly. In this study, the potential possibility of biodiesel fuel was investigated as an alternative fuel for a naturally aspirated agricultural D.I. diesel engine. The smoke emission of biodiesel fuel was reduced remarkably in comparison with diesel fuel, that is, it was reduced approximately 50% at 2500 rpm, full load. But, power, torque and brake specific energy consumption didn't have 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%) in an agricultural D.I. diesel engine.

Keywords : Biodiesel Fuel, Alternative Fuel, Diesel Engine, Exhaust Gas Recirculation

1. 서론

디젤 기관은 기술된 기관과 더불어 동력을 얻을 수 있는 대표적인 열기관으로서 발전을 거듭하여 왔다. 이러한 디젤 기관은 높은 열효율을 낼 수 있고, 저급연료를 포함한 여러 종류의 연료를 사용할 수 있으며, 또한 고효율을 낼 수 있어 농업용 기관의 대다수를 차지하며 그 수요가 증가되는 추세에 있지만, 기관 특성상 연소 후 배출되는 매연으로 인하여 대기 오염의 주범으로 주목받고 있다.

이와 같은 문제를 해결하기 위한 방안으로는 디젤기관의 고압분사에 의한 연소개선과 배출물 저감^{1,2)}, 분사시기 및 연료공급량의 제어³⁾, 촉매에 의한 NOx의 저감⁴⁾, 연소실 형상 변화로 스웰과 텀블에 의한 NOx와 매연의 동시저감^{5,6)} 등이

있으며, 최근의 커먼 레일 방식(common rail system)⁷⁾을 사용함으로써 기술된기관처럼 디젤기관도 전자제어 방식에 의해 배기가스를 저감하기 위한 방안까지 제시되고 있으며, 일부는 실용화 단계에 이르고 있으나, 비교적 저가로서 보급해야만 하는 농업용 디젤기관에 대한 적용으로는 많은 무리가 있는 실정이다.

또 다른 방법의 하나로는 연료자체의 성상을 변화시키는 방법을 들 수가 있다. 이는 기존의 화석연료는 연료 자체속에 산소성분이 전혀 존재하지 않는 탄화수소 화합물이기 때문에 디젤기관의 특성상 저부하영역에서는 물론 고부하영역 즉, 농후한 혼합기 영역 및 연소말기에 불완전 연소가 될 가능성이 농후하므로 연료자체에 산소를 다량 함유하고 있는 합산소연료를 기존의 경유와 혼합하여 사용함으로써 배출가스의

This article was submitted for publication in March 2006, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in April 2006. The authors are Seung Hun Choi, Researcher and Young Taig Oh, Professor, Research Center of Industrial Technology at CBNU, Division of mechanical Engineering, Chonbuk National University, Jeonju, Korea and Choong Ho Lee, Professor, Dept. of Manufacturing and Design Engineering, Jeonju University, Jeonju, Korea. The corresponding author is S. H. Choi, Researcher, Division of mechanical Engineering, Chonbuk University, 664-14 Doekjin-dong, Doekjin-gu, Jeonju, 561-756, Korea; Fax : 063-270-2316; E-mail : <medr@chonbuk.ac.kr>

저감을 시도하고자 하는 것이다.

이러한 합산소연료를 이용한 여러 가지 실험들을 살펴보면, Liotta 등은 글리콜 에테르, 방향족 알콜, 지방족 알콜, 폴리 에테르 폴리올 등을 이용한 연구⁷⁾에서 글리콜 에테르가 매연과 알데히드, 케톤, 포름알데히드 등을 저감시키는데 매우 유용함을 밝혔고, 또한, Murayama 등은 합산소연료와 EGR 방법을 병용하여 매연과 NOx를 동시에 저감시키는 연구⁸⁾에서 합산소연료가 매연과 NOx를 동시에 저감할 수 있는 가능성을 입증하였으며, 또한 합산소연료의 일종인 고점도의 식용유를 알콜과의 화학반응으로 연료의 고점도 성분을 감소시키는 에스테르화 방법을 이용⁹⁾하여 매연저감 가능성 등을 보고하고 있고, La 등¹⁰⁾도 바이오디젤유의 일종인 미강유를 소형 디젤 기관에 적용하여 매연이 현저히 저감되었음을 보고하고 있다.

바이오메스 연료의 일종인 바이오디젤유(B.D.F. : biodiesel fuel)는 지방산 글리세린 에스테르를 단쇄기 알코올(메탄올, 에탄올)의 지방산 에스테르로 전환시킨 것으로 식용유를 비롯한 각종 식물성 기름에서 생산할 수 있는 디젤엔진의 대체연료로서¹¹⁾, 우리나라와 같은 비산유국에서 화석연료의 소비량을 억제할 수 있고, 매연, 이산화탄소, 미연탄화수소 및 아황산가스 등의 오염물질의 배출량을 현저하게 저감할 수 있는 친환경적인 관점에서 관심이 고조되고 있다.

또한, 경유에 필수적으로 함유되어 있는 유헴성분이 전혀 없어 산성비의 주요원인인 SOx와 같은 유해 배기배출물의 저감이 더욱 가능할 것으로 보인다.

본 연구에서는 바이오디젤유의 일종인 현미유를 에스테르 전환한 연료를 디젤기관의 연료로 사용할 경우, 기관 성능 및 배기가스 배출 특성을 디젤기관의 상용연료인 경유와 비교·분석하여 바이오디젤유가 디젤기관의 대체연료로서의 이용가능성을 확인하고자 하였으며, 바이오디젤유 적용시 약간 증가되는 NOx의 저감대책¹²⁾으로서 배기가스 재순환(EGR; exhaust gas recirculation) 방법을 적용하여 매연과 NOx의 동시저감을 실현함으로써 바이오디젤유의 디젤기관의 대체연료로서의 위치를 확고히 하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 기관은 단기통, 수냉식, 4행정, 농업 직접분사식 디젤기관이며, 기관 부하와 회전속도는 엔진 동력계에 의해 임의로 조절할 수 있도록 하였다.

실험에 사용된 기관의 사양은 표 1에, 사용된 연료의 특성은 표 2에 각각 나타내었으며, 실험장치의 개략도는 그림 1과 같다.

본 실험은 일반적인 상용 경유와 바이오디젤유(이하 BDF), 그리고 이들 각각의 혼합비율에 따른 혼합연료를 기관의 각 회전속도에서 무부하, 25%, 50%, 75%, 90% 및 전부하 경우의 기관 성능과 배기배출물을 측정하였다.

기관부하를 변화시키는 경우에는 스로틀을 완전히 개도한 상태를 전부하로 설정하고, 전부하의 토크값을 측정하여, 기관 회전속도를 일정하게 유지시키며 부하를 %별로 변화시키면서 실험하였다. 매연 농도의 측정은 매연측정장치(HBN-1500)를 사용하여 기관으로부터 300 mm 하류에서 일정량의 배기가스를 흡입한 후, 여과지에 흡착된 매연의 농도를 측정하였으며, 매연 농도는 동일 조건에서 각각 3회 측정하여 평균값을 취하였다.

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	10.5

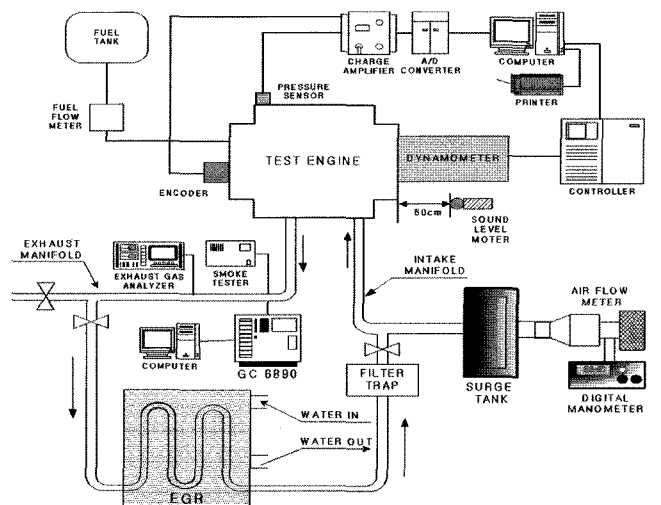


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

CO₂, O₂, 및 NO_x의 측정은 배기 매니폴드로부터 약 400 mm 하류에서 배기가스 분석기(Mod. 588)로 일정량의 배기가스를 흡입하여 측정하였다. 배기가스는 분석기의 다이어프램 펌프로 흡입하여 측정 셀로 이동시켰고, 샘플링 튜브 중간에 필터를 설치하여 측정 조건의 변화에 따라 새로운 필터로 교환하여 배기가스 샘플링 농도의 오차를 줄였다.

또한, 기관이 일정량의 연료를 소모하는 시간을 측정하여 단위시간당의 에너지소비율(MJ/kW-h)로 계산하였으며, 정적 분사시기는 실험조건에 관계없이 BTDC 23°CA로 고정하였다.

실험조건이 변경될 때마다 냉각수, 윤활유, 연료 등의 온도를 일정하게 유지하였으며 동력계 및 기관의 냉각수는 강제 순환방식을 채택하여 적용하였다. 특히, 연료 공급계통, 연료 필터 및 연료탱크 속의 모든 연료를 완전히 교체하고, 전 실험이 다음의 실험에 영향을 미치지 않도록 충분한 시간동안 예비운전을 실시한 후 실험을 수행하였다.

실험연료는 경유 100%와 BDF 100% 및 BDF를 20, 40% 혼합한 연료로 실험하여 비교하였다.

또한, NO_x 저감대책으로서 적용된 EGR율을 구하기 위하여 전체 연소실 흡기량에 대한 EGR된 양, 즉 새로운 흡입공기량의 감소율로서 식 (1)을 이용하였다.

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

여기에서, V₀는 EGR을 수행하지 않았을 경우의 흡입공기량(m³/h), V_a는 EGR을 수행했을 경우의 새로운 흡입공기량이다. 또한, 각 기관 부하에서 303-845 K까지 변화하는 배기가스의 온도는 냉각순환시스템을 거쳐 297 K 정도로 일정하게 유지하였으며, 재순환되는 배기가스 중의 미립자를 제거하기 위하여 필터를 설치하였다.

3. 실험결과 및 고찰

가. 기관성능 및 배기배출물 특성 비교

그림 2는 각 기관 회전속도변화와 부하변화에 따라 BDF의 함유량에 따른 기관 출력 특성을 경유만을 사용한 경우와 대비하여 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 40%미만으로 BDF를 혼합한 경우 공히 전 회전속도 및 부하범위에 걸쳐 기관 출력특성은 경유만을 사용한 경우와 거의 유사함을 알 수 있으며, 순수 BDF만을 적용한 경우 경유와 비교하여 약간 저하됨을 알 수 있다. 즉, BDF를 본 연구에서 적용한 디젤기관의 연료로 사용시에, BDF의 발열량이 경유의 것에 비해 약 12% 정도가 낮지만, 합산소성분의 영향에 기인한 열효율의 향상으

로 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.

그림 3은 저회전속도와 고회전속도 영역에서 부하변화에 따른 에너지소비율(BSEC)의 변화를 BDF의 함유량에 따라 경유만을 사용한 경우와 비교하여 나타낸 것이다.

그림에서와 같이, 연료 중의 BDF 함유량의 차이에 따른 에너지소비율의 변화는 각 회전수별로 거의 유사한 경향을 나

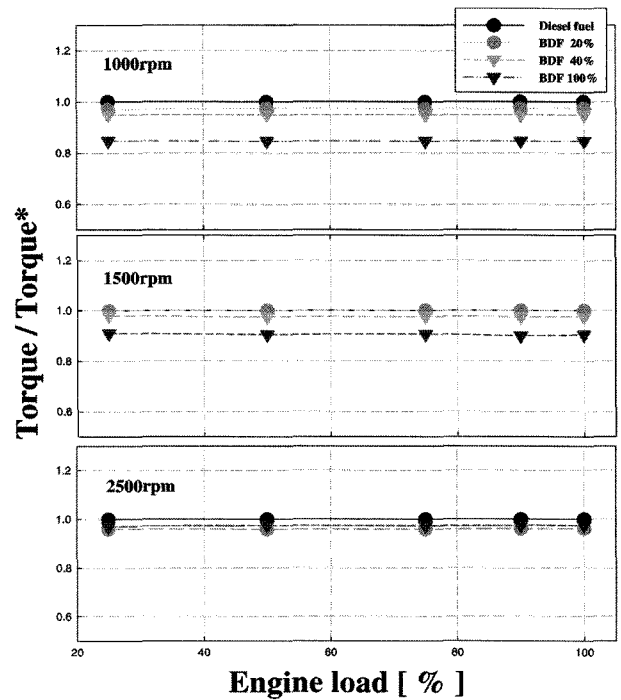


Fig. 2 Comparison of torque

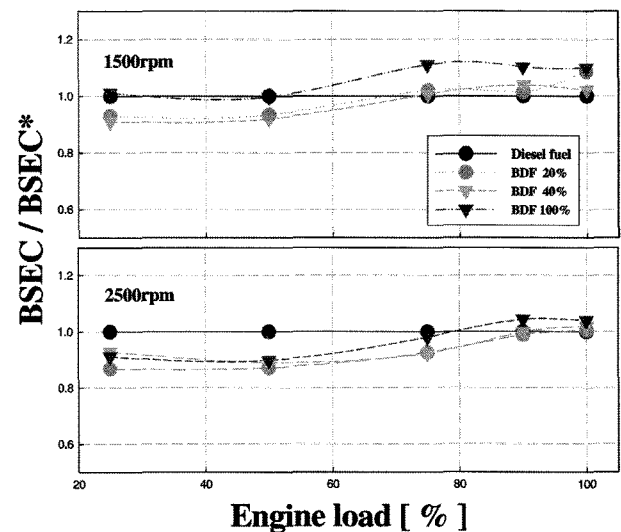


Fig. 3 BSEC versus engine loads at lower and higher speeds.

타내었으며, 고부하영역의 경우는 BDF 100%를 연료로 사용한 경우가 경유의 경우에 비하여 약간 악화되었으나, 고회전 속도 영역일수록 BDF의 함유량이 증가할수록 에너지 소비율은 거의 동일하거나 약간 개선됨을 알 수 있으며, 특히 BDF 20% 혼합연료의 경우는 거의 모든 영역에서 경유의 경우보다 개선됨을 알 수 있다.

이는 중부하 이하, 또는 저회전영역에서는 혼합기속의 산소성분이 충분하여 연료 속의 합산소성분이 커다란 영향을 미치지 못하였지만, 고부하·고회전 영역에서 BDF 속의 산소성분에 기인하여 기관의 연소효율이 향상되었기 때문으로 생각된다.

그림 4는 농업용 디젤기관에서 경유와 BDF, 그리고 혼합연료를 각각 연료로 사용한 경우에, 각 회전속도와 부하의 변화에 따라서 매연의 배출 특성을 나타낸 그림이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이, 고회전과 고부하 영역으로 갈수록 경유와 BDF, 혼합연료사이의 현격한 매연의 배출농도 차이를 보이고 있다. 이는 저회전영역 및 중부하 이하인 경우에는 경유를 연료로 사용한 경우에도 공기이용률이 충분하기 때문에 BDF와 비교하여 매연 생성에 큰 영향을 미치지 않았으나, 고부하·고회전수로 갈수록 BDF 자체에 포함된 산소성분이 비교적 산소농도가 희박한 후연소기간동안에 연료입자의 산화를 더욱 촉진시켰기 때문으로 생각된다.

또한, 경유의 경우는 고회전일수록 부하변화에 따른 매연

배출특성이 현저하게 차이를 보이고 있으나, BDF를 혼합한 경우에는 혼합율이 증가함에 따라 부하변화에 따른 매연 배출특성의 차이가 크지 않음을 알 수 있다.

즉, BDF를 사용한 경우에 실린더내의 고온상태에서 잔존하는 탄소상 미립자의 생성량과 산화량의 차이가 줄어들었기 때문이며, BDF에 포함된 산소성분이 탄화수소성분의 산화속도를 더 빠르게 진행시켜주었기 때문으로 생각된다.

그림 5는 농업용 디젤기관의 부하변화에 따른 NOx의 배출 특성을 기관 회전수별로 나타낸 그림이다.

그림에서와 같이 NOx의 배출특성은 회전수가 증가할수록, 부하가 고부하로 진행할수록 BDF의 함유량에 따라서 전체적으로 약간 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 이는 고부하와 고회전수에서 산소성분의 영향으로 실린더내의 온도가 상승함에 따라 NOx 생성에 영향을 준 것으로 생각된다. 또한, BDF의 함유량에 따라 살펴보면, 저부하·저회전 영역에서의 배출량의 차이보다 고부하와 고회전 영역에서의 배출량의 차이가 약간 증가하였는데, 이는 전에 언급한 바와 같이 BDF에 포함된 10% 정도의 산소성분이 연소실내의 온도를 높여 주어 NOx의 증가를 가져온 것으로 생각된다.

나. EGR 적용시 배기배출물 특성 비교

이상의 실험결과에서와 같이 경유에 BDF를 혼합하여 사용할 때 매연은 현저히 감소하며, 에너지소비율도 약간 개선되

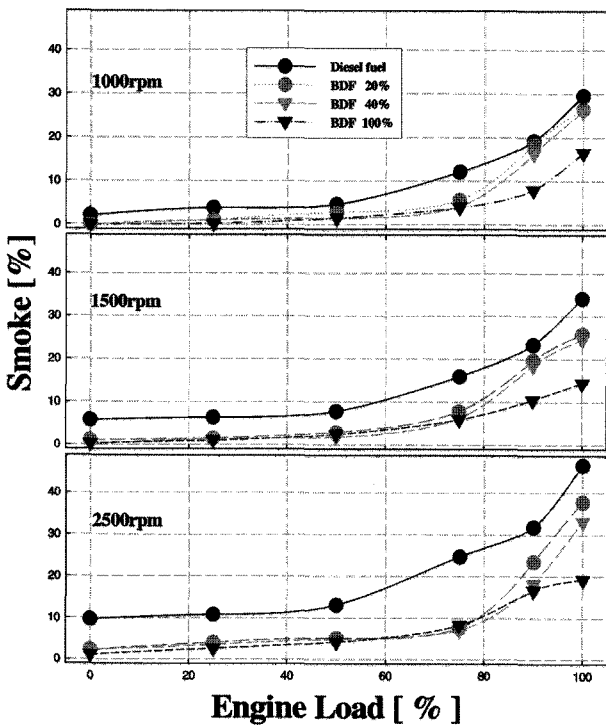


Fig. 4 Smoke versus engine loads at various engine speeds.

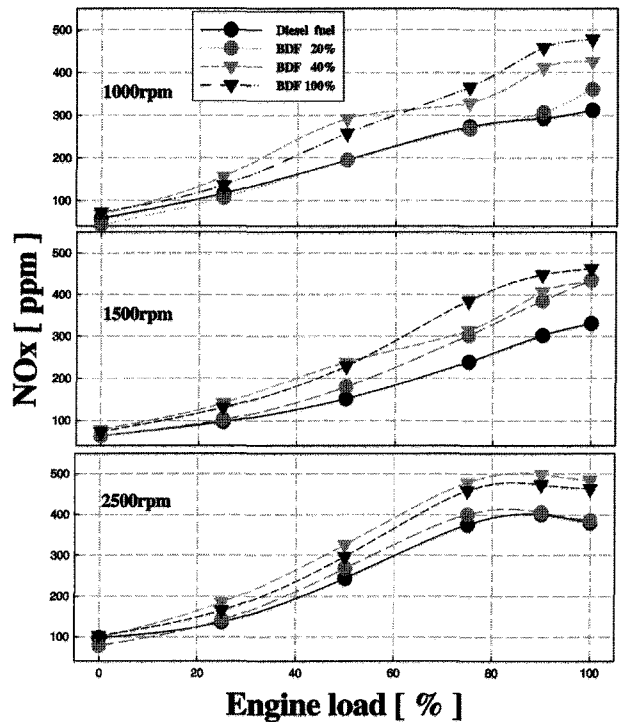


Fig. 5 NOx versus engine loads at various engine speeds.

는 경향을 나타내지만, 디젤기관의 주요 규제 대상으로 부각되는 NOx의 배출농도는 BDF의 혼합율이 증가함에 따라 꾸준히 증가되는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 BDF 20%를 적용한 경우에 농업용 디젤기관에서 NOx 저감방법의 하나로 알려진 EGR방법을 병행하여 사용하였다.

그림 6은 각 기관회전속도와 부하에서 BDF를 20vol% 혼합·적용한 경우 EGR율에 따른 매연의 배출 특성을 경유를 기준으로 하여 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 EGR율이 증가함에 따라서 BDF를 혼합하여 사용한 경우에도 매연의 증가폭이 커지는 것을 알 수 있으며, 저회전속도영역에

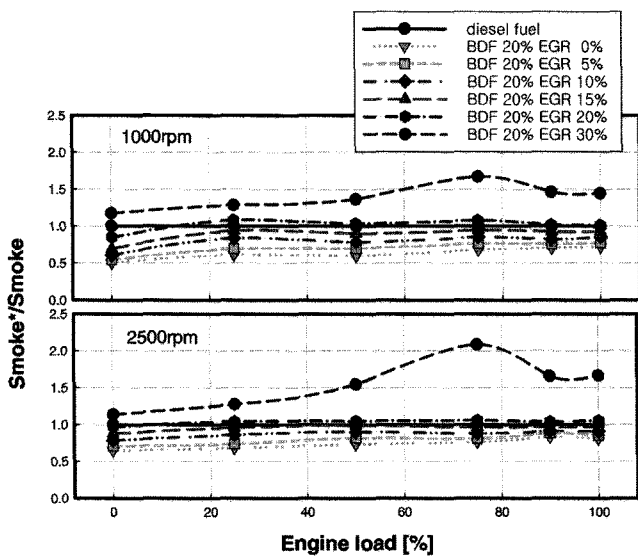


Fig. 6 Variation of smoke versus EGR rate at various engine speeds and loads.

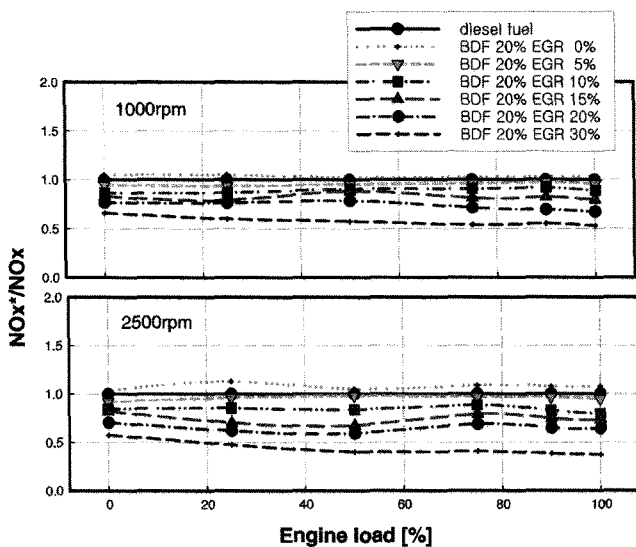


Fig. 7 Variation of NOx versus EGR rate at various engine speeds and loads.

서의 저감율이 고회전속도영역의 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, BDF를 혼합하여 사용하고 5~15%의 EGR율을 적용한 경우에도 경유만을 사용한 경우보다 매연이 감소하는 이유는 BDF내에 함유된 10%정도의 산소가 연소과정중에 연료입자의 산화를 촉진시켰기 때문으로 생각된다. 이는 디젤기관의 연소특성상 연료내의 산소가 흡입과정시 흡입된 공기 속의 산소보다는 연소를 위한 탄화수소와의 화학반응 속도가 빨라 거의 완전 연소를 이루었기 때문으로 분석⁸⁾된다.

그림 7은 그림 6과 동일한 조건에서 배출되는 NOx의 배출 특성을 경유를 기준으로 하여 나타낸 것이다. 그림 6과는 달리 고회전속도영역에서의 저감율이 저회전속도영역에서의

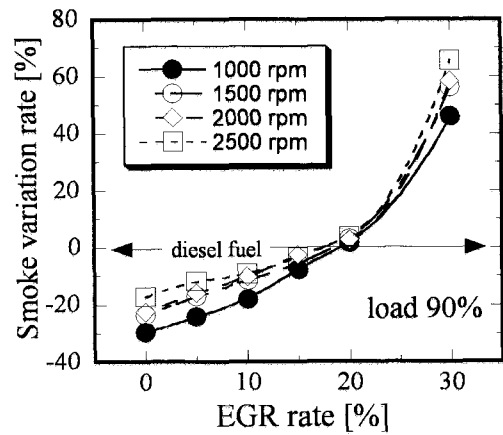


Fig. 8 Variation rate of smoke on EGR rate with BDF 20% in comparison with diesel fuel under various speeds at load 90%.

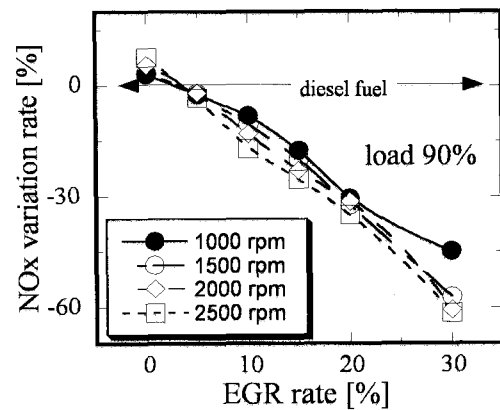


Fig. 9 Variation rate of NOx on EGR rate with BDF 20% in comparison with diesel fuel under various speeds at load 90%.

저감율보다 커짐을 알 수 있으며, 전체적으로 NO_x는 EGR율의 증가에 따라 현저하게 저감됨을 알 수 있다. 또한, BDF 20% 혼합·적용시 NO_x의 증가율이 크지 않았기 때문에 5% 이상의 EGR율을 적용한 모든 경우에 경유만을 사용한 경우보다도 NO_x 배출량이 저감됨을 알 수 있다.

그림 8은 농업용 디젤기관에 BDF 적용시 매연 배출에 대한 EGR의 영향을 정량적으로 나타낸 경우이며, BDF 20vol-%를 혼합하여 사용한 경우에 90%의 부하에서 각 회전 속도 변화에 따른 매연의 배출특성을 경유만을 사용한 경우와 비교하여 나타낸 것이다. 그림 8에서 나타낸 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.

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

4. 요약 및 결론

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

- (1) BDF 혼합연료의 출력은 경유만을 기관에 적용한 경우와 큰 차이를 보이지 않았으며, 에너지소비율은 BDF의 혼합율이 증가할수록 경유보다 다소 개선됨을 확인할 수 있어 농업용 디젤기관의 대체연료로서 BDF의 적용 가능성을 확인할 수 있었다.
- (2) BDF를 농업용 디젤기관의 연료로 사용하였을 경우, 연료내 BDF의 함유량이 증가할수록 매연 배출의 감소량이 증가하며, BDF 100vol%를 적용한 경우에 경유만을 연료로 사용한 경우와 비교하여 25% 이하의 저부하에서는 최대 약 75%, 90% 이상의 고부하에서는 48%의 매연 저감 효과를 확인하였다.
- (3) BDF에 대한 NO_x 배출특성은 BDF의 함유량이 증가함에 따라, 즉 연료내의 산소량이 증가함에 따라 경유만을 사용한 경우보다 증가함을 알 수 있었으며, 20vol%의

BDF를 적용한 경우에 경유만을 사용한 경우와 비교하여 2000 rpm, 전부하의 경우에 약 6%, 2500 rpm, 전부하의 경우에 약 7%가 증가됨을 확인하였다.

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

참고 문헌

1. Konno, M., Chikahisa, T. and Murayama, T. 1993. An Investigation on the Simultaneous Reduction of Particulate & NO_x by Controlling Both the Turbulence & the Mixture Formation in DI Diesel Engine. SAE 932797.
2. Jeung, D. Y. and Lee, J. T. 2003. A Development of Ultra High Pressure Injection Equipment for Study on Diesel Spray Characteristics with Ultra High Pressure. Transaction of the KSAE, 11(5):50-59.
3. Ziejewski, M., Goettler, H. and Pratt, G. L. 1986. Comparative Analysis of the Long-Term Performance of a Diesel Engine on Vegetable Oil Based Alternate Fuels. SAE 860301.
4. Montagne, X. 1996. Introduction of Rapeseed Methyl Ester in Diesel Fuel-The French National Program. SAE 962065.
5. Konno, M., Chikahisa, T. and Murayama, T. 1993. An Investigation on the Simultaneous Reduction of Particulate & NO_x by Controlling Both the Turbulence & the Mixture Formation in DI Diesel Engine. SAE 932797.
6. 이경환. 1997. 디젤엔진의 배기가스 저감기술 동향. 한국자동차공학회지. 19(5):28-34.
7. Liotta, F. J. and Montalvo, D. M. 1993. The Effect of Oxygenated Fuels on Emissions from a Modern Heavy-Duty Diesel Engine. SAE 932734.
8. Murayama, T., Oh, Y. T., Chikahisa, T., Fujiwara, Y., Tosaka, S., Yamashita, M. and Yoshitake, H. 1995. Simultaneous Reductions of Smoke and NO_x from a DI Diesel Engine with EGR and Dimethyl Carbonate. SAE 952518.
9. 오영택, 최승훈. 2000. 디젤엔진에서 DMC를 사용한 경우의 배기가스의 농도분석에 관한 실험적 연구. 한국자동차공학회 논문집. 8(2):1-8.
10. 나우정, 유병구, 정진도. 1998. 미강유 적용 소형 디젤엔진의 배기배출물 특성. 한국농업기계학회지. KSAM 23(2):125-134.
11. Ziejewski, M., Goettler, H. and Pratt, G. L. 1986. Comparative Analysis of the Long-Term Performance of a Diesel Engine on Vegetable Oil Based Alternate Fuels. SAE 860301.
12. Ham, Y. H. and Chun, K. M. 2002. Engine Cycle Simulation for the Effects of EGR on Combustion and Emissions in a DI Diesel Engine. Transaction of the KSAE. 10(4):51-59.