

간접분사식 디젤기관에서 바이오디젤유 및 EGR 방법 적용

최 승 훈¹⁾ · 오 영 택²⁾

전주비전대학 교육혁신센터¹⁾ · 전북대학교 기계공학과, 전북대학교부설 공학연구원 공업기술연구센터²⁾

Application of Biodiesel Fuel and EGR Method in an IDI Diesel Engine

Seunghun Choi¹⁾ · Youngtaig Oh²⁾

¹⁾Education Innovation Center, Vision University of Jeonju, Jeonbuk 570-759, Korea

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

(Received 8 September 2008 / Accepted 10 October 2008)

Abstract : In this study, the potential possibility of biodiesel fuel was investigated as an alternative fuel for a naturally aspirated indirect injection diesel engine. The smoke emission of biodiesel fuel was reduced remarkably in comparison with diesel fuel, that is, it was reduced approximately 36% at 2000rpm, full load condition. And, power, torque and brake specific energy consumption showed no significant differences. However, NOx emission of biodiesel fuel was increased compared with commercial diesel fuel. Also, the effects of exhaust gas recirculation(EGR) to reduce the 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(10~15%).

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

1. 서 론

디젤기관은 공기 과잉 상태로 운전되기 때문에 비열이 증대되어 열해리가 적고 열효율이 높으며, 또한 고압축비를 기관에 적용할 수 있어 전체적인 내연기관의 관점에서는 가장 열효율이 높은 열기관¹⁾이다. 그러나, 동일한 행정체적에서 연소되는 연료량이 적기 때문에 출력이 낮은 결점을 가지고 있으며, 고출력을 얻기 위하여 완전연소가 가능한 연료농도 이상을 공급하면 기관의 출력은 증대되지만 확산연소영역에서의 국부적인 산소 부족으로 불완전연소되는 연료가 거의 대부분 매연으로 배출된다.²⁾ 이러한 디젤기관의 배기배출물의 저감을 위한

방법으로는 기관설계 변경기술과 연료의 성상 등에 변화를 주어 연료가 연소실내에서 연소하여 배출되기 전에 배출가스를 저감시키기 위한 전처리 방법과 연료가 연소한 후에 연소실 밖에서 촉매장치나 배기가스 재순환(exhaust gas recirculation, 이하 EGR) 방법 등을 사용하여 배출가스를 처리하는 후처리 방법으로 나눌 수가 있다. 이 중 후처리 방법은 배출가스의 생성을 근본적으로 억제할 수 있는 방법이 되지 못하기 때문에 많은 연구자들은 연료가 연소실내에서 연소하기 전이나, 연소 후 배기관으로 배출되기 전에 배출가스를 저감시키는 전처리 방법에 접근하여 문제를 해결하고자 하였으며, 여러 가지 전처리 방법 중에서, 가격의 저렴함과 시간을 절약할 수 있다는 이점 때문에 엔진자체로의 접

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

근 방법보다는 연료자체의 정상변화, 즉, 합산소연료를 상용경유와 혼합하는 방법, 세탄가 개선제의 첨가 등과 같은 방법이 제시되고 있다. 이러한 합산소연료에는 다양한 종류가 산재해 있으나 그 중 바이오디젤유³⁻⁵⁾는 원자재의 생육과정을 거쳐 생산된 식물성 및 동물성 기름을 화학처리하여 디젤기관으로 대표되는 압축착화기관의 연료로 사용가능하도록 한 것이다. 특히, 바이오디젤유(biodiesel fuel; BDF)는 우리나라와 같은 비산유국에서 화석연료의 소비량을 억제할 수 있고, 매연, 이산화탄소 및 아황산가스 등의 오염물질의 배출량을 현저하게 저감할 수 있는 친환경적인 관점에서 관심이 고조되고 있다.⁶⁾ 또한, 경유에 필수적으로 함유되어 있는 유황 성분이 전혀 없어 산성비의 주요원인인 SOx와 같은 유해 배기배출물의 저감이 더욱 가능한 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 폐식용유에서 추출한 바이오디젤유를 간접분사식 디젤기관의 연료로 사용할 경우, 기관 성능 및 배기가스 배출 특성을 상용연료인 경유와 비교분석하였고, 바이오디젤유 적용시 약간 증가되는 NOx의 저감대책으로서 배기가스 재순환(EGR; exhaust gas recirculation)⁶⁾ 방법을 적용하여 매연과 NOx의 동시저감을 실현함으로써 바이오디젤유의 적용가능성을 알아보고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 기관은 4기통, 수냉식, 4행정, 간접분사식 디젤기관이며, 기관 부하와 회전속도는 기관 동력계에 의해 임의로 조절할 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, EGR율을 구하기 위하여 전체 연소실 흡기량에 대

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

Table 1 Specification of test engine

Item	Specification
Engine model	D4BA
Bore × Stroke	91.1 × 95 (mm)
Displacement	2476 (cc)
Compression ratio	21
Combustion chamber	Indirect injection

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

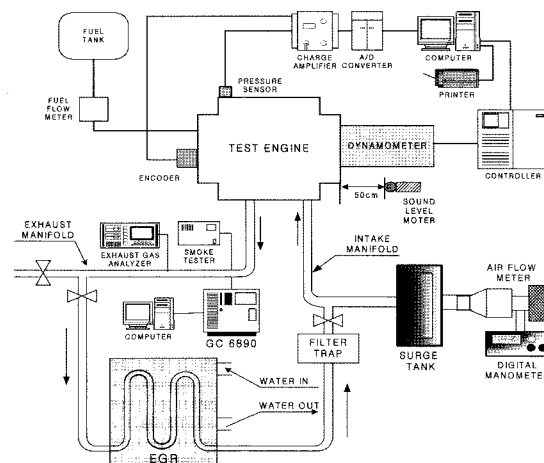


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

한 EGR된 양, 즉 새로운 흡입공기량의 감소율로서 식 (1)^{1,6)}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.

매연 농도의 측정에는 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. 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 순수 바이오디젤유 100% 및 바이오디젤유를 10, 20, 30, 50%의 체적비율로 경유와 혼합한 연료로 실험하여 비교하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 간접분사식 디젤기관에 바이오디젤유 적용시 성능 및 배기배출물 특성

Fig. 2는 기관 회전속도변화와 바이오디젤유의 함유량에 따른 기관 출력 특성을 제동평균유효압력(BMEP)에 따라 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 모든 연료 공히 전 회전범위에 걸쳐 기관 출력특성은 경유만을 사용한 경우와 비교하여 약간 저감되었다. 즉, 경유와 순수바이오디젤유의 발열량의 차이가 약 11%에 이르지만 바이오디젤유 100%를 적용한 경우에 2500rpm, 전부하시 약 5.2%의 차이가 발생하였다.

Fig. 3은 각 기관 회전수의 경우, BMEP 변화에 따른 에너지소비율의 변화를 바이오디젤유의 함유량에 따라 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 연료중의

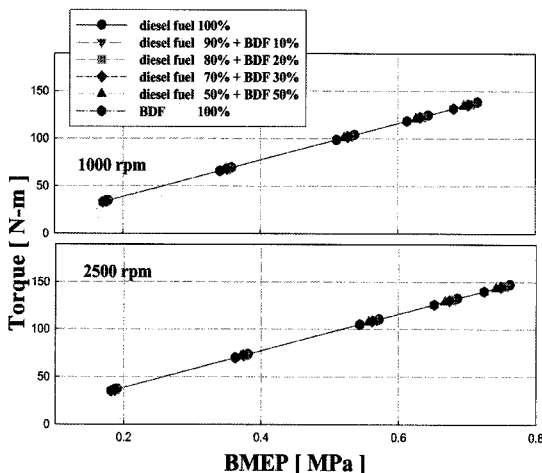


Fig. 2 Torque versus engine loads at various engine speeds

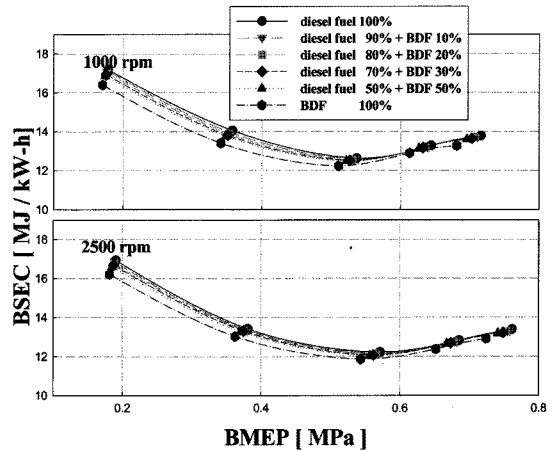


Fig. 3 BSEC versus engine loads at various engine speeds

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 경우 전부하시에 1000rpm에서는 3.7%, 2500 rpm에서는 약 3.4% 정도 에너지소비율의 우위를 보이고 있으므로, Fig. 2와 3에 나타난 바와 같이 기관 출력과 에너지소비율면에서는 바이오디젤유를 간접분사식 디젤기관에 적용시 경유의 대체연료로서의 가능성을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 경유와 바이오디젤유, 그리고 이들의 혼합유를 각각 연료로 사용한 경우에, 2500rpm의 고회전속도영역에서 기관의 각 부하변화에 따른 매연과 NOx의 배출 특성을 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 경유와 바이오디젤유, 혼합연료 사이에는 현격한 매연 배출 농도 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 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 줄어들

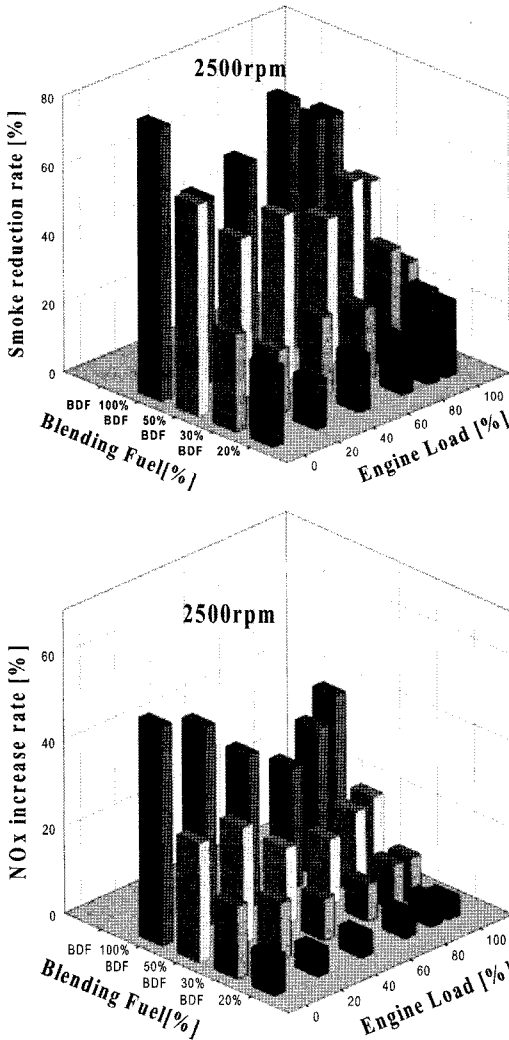


Fig. 4 Smoke and NOx vs. engine loads at various engine speeds

었기 때문에 생각되며,¹⁾ 바이오디젤유에 포함된 산소성분이 탄화수소성분의 산화속도를 더 빠르게 진행시켜주었기 때문에 생각된다. NOx의 배출특성은 바이오디젤유의 함유량에 따라서 전체적으로 약간 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 이는 고부하와 고회전속도영역에서 실린더내의 온도가 상승함에 따라 NOx 생성에 영향을 준 것으로 생각된다.⁶⁾ 즉, 바이오디젤유의 함유량이 증가함에 따라 NOx배출량의 차이가 약간 증가하였는데, 이는 바이오디젤유에 포함된 산소성분이 연소실내의 온도를 높여주어 NOx의 증가를 가져온 것으로 생각된

다. 그러나, 전체적인 매연과 NOx의 배출측면에서 살펴보면 매연의 저감률이 NOx의 증가율을 크게 상회하여 간접분사식 디젤기관에 대한 바이오디젤유의 적용가능성을 알 수 있다.

3.2 간접분사식 디젤기관에 바이오디젤유 및 EGR의 동시 적용

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 EGR방법을 병행하여 사용하였으며, 특히 체적효율의 증대를 위하여 cooled EGR방법을 적용하였다. EGR을 적용하기 위한 실험대상연료로는 경유 및 이전의 기관실험에서 매연과 NOx의 변화율을 고려하여 바이오디젤유 20%를 혼합한 연료를 적용하였다.

Fig. 5는 기관회전속도 2000rpm에서 각 부하변화에 따른 기관성능특성을 나타낸 것이다. 기관출력은 EGR율이 증가할수록, 고부하영역으로 진행될수록 저하되며, EGR율 30%에서 최대 7.2%의 저감을 나타내었다. 본 실험의 최대 혼합률인 바이오디젤유 30% 적용시, 에너지소비율은 EGR율 30%를 적

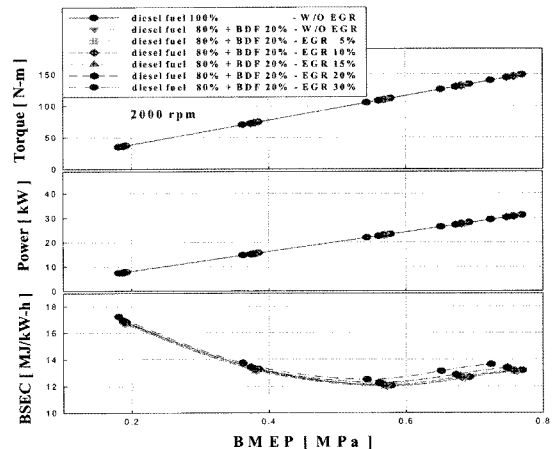


Fig. 5 Engine performance versus BMEP at 2000rpm on various EGR rates

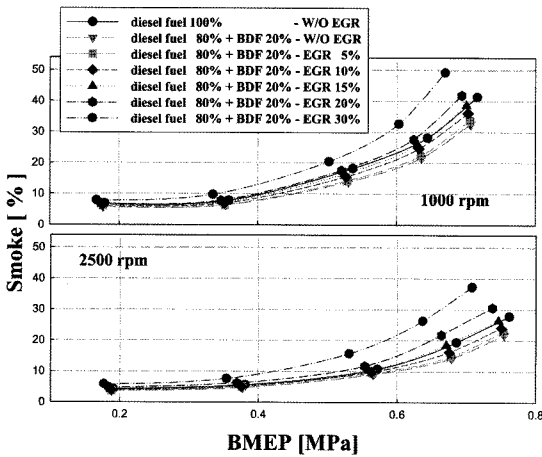


Fig. 6 Smoke versus BMEP at 2000rpm on various EGR rates

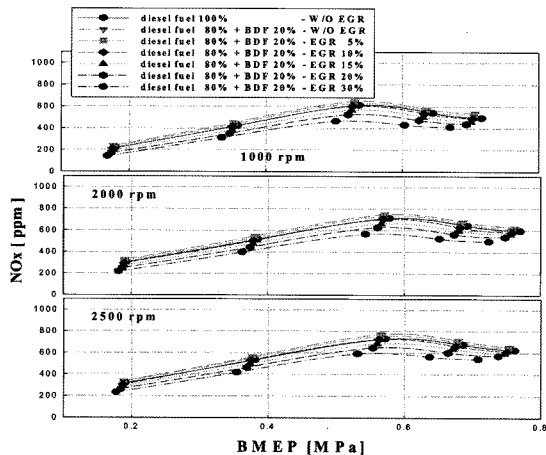


Fig. 7 NOx versus BMEP at 2000rpm on various EGR rates

용한 경우에도 최대 4%미만의 증가율을 보여 큰 차이를 나타내지 않았으며, 이는 바이오디젤유내의 산소성분에 의한 연소개선 효과로 생각되어진다.

Fig. 6은 기관회전속도와 EGR율 변화에 의한 매연의 배출특성을 나타낸 것이다. EGR율이 증가함에 따라 매연의 배출량이 증가되는데 이는 cooled EGR 적용시에 재순환되는 배기가스가 연소실내로 흡입되는 신기의 양을 감소시켜 연소에 충분한 산소공급이 어렵기 때문으로 생각된다. 특히 바이오디젤유를 혼합하여 적용한 경우에는 EGR율 20% 이상에서는 거의 모든 운전영역에서 경유만을 적용한 경우보다 매연배출농도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 경유와 바이오디젤유를 포함한 일반적인

디젤연소 특성상 비교적 희박연소여서 EGR율에 의한 산소농도의 영향을 많이 받지 않다가 고 EGR율에서 산소가 급격히 감소하여 불완전연소가 급증하기 때문으로 생각된다.⁶⁾

Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 조건에서 NOx의 배출특성을 나타낸 그림이다. EGR율이 증가함에 따라 NOx의 배출농도가 현저히 감소되는 것을 알 수 있는데 이는 배기가스 중의 불활성가스가 흡기일부와 치환되어 혼입됨으로써 열용량을 감소시켜 전체적인 NOx의 배출량이 감소하는 것으로 생각된다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 EGR율 10% 이상을 적용한 경우에는 모든 경우에 경유만을 적용한 경우보다 NOx가 저감됨을 알 수 있다.

또한, Fig. 6과 7을 참조하여 전체적 매연과 NOx의 배출경향을 고찰하여 보면 합산소연료의 일종인 바이오디젤유 20%를 혼합하여 간접분사식 디젤기관에 적용한 경우 매연과 NOx의 동시저감이 가능한 EGR율은 10-15%임을 알 수 있었다.

4. 결론

수냉식, 4행정, 4기통, 간접분사식 디젤기관의 연료로서 경유와 바이오디젤유를 0~100vol-%까지 혼합하여 사용한 경우 기관성능 및 배기 배출물에 미치는 영향을 분석하고, 바이오디젤유 사용시 경유의 경우와 비교하여 증가되는 NOx의 저감을 위하여 cooled EGR 방법을 조합하여 실험한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- 1) 간접분사식 디젤기관에 바이오디젤유 적용시 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 간접분사식 디젤기관의 연료로 사용하였을 경우, 연료내 바이오디젤유의 함유량이 증가할수록 매연 배출의 감소량이 증가하여 매연 저감효과를 확인하였다.
- 3) 바이오디젤유에 대한 NOx 배출특성은 바이오디젤유의 함유량이 증가함에 따라, 즉 연료내의

산소량이 증가함에 따라 경유만을 사용한 경우보다 약간 증가함을 알 수 있었으나, 바이오디젤유의 동일 혼합율에서 매연의 저감율이 NOx의 증가율을 크게 상회하여 간접분사식 디젤기관에 대한 바이오디젤유의 적용가능성을 알 수 있었다.

- 4) 바이오디젤유 20%를 혼합하여 간접분사식 디젤기관에 적용한 경우 매연과 NOx의 동시저감이 가능한 EGR율은 10-15%임을 알 수 있었다.

References

- 1) S. H. Choi and Y. T. Oh, "Characteristics of Performance and Exhaust Emission of Diesel Engines by Changes in Fuel Properties and Application of EGR," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.8, No.2, pp.179-184, 2007.
- 2) 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.
- 3) X. Montagne, "Introduction of Rapeseed Methyl Ester in Diesel Fuel-The French National Program," SAE 962065, 1996.
- 4) 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.
- 5) H. Raheman and S. V. Ghadge, "Performance of Diesel Engine with Biodiesel at Varying Compression Ratio and Ignition Timing," *Fuel*, Vol.87, Issue 12, pp.2659-2666, 2008.
- 6) S. H. Choi and Y. T. Oh, "An Experimental Study on Simultaneous Reduction of Smoke and NOx in a Agricultural Diesel Engine," *Transaction of KSAE*, Vol.11, No.3, pp.85-91, 2003.