

간접분사식 압축착화기관에서 BD 혼합율과 연료분사시기에 따른 기관성능 및 배기배출물 특성 연구

최승훈 오영택

A Study on Engine Performance and Exhaust Emissions for Biodiesel Blending Ratios and Fuel Injection Timing in an Indirect Injection Compression Ignition Engine

S. H. Choi Y. T. Oh

Abstract

Biodiesel (BD) can be effectively used as an alternative fuel in diesel engines. However, BD may affect the performance and exhaust emissions in diesel engines because it has different physical and chemical properties from diesel fuel such as viscosity, compressibility and so on. To investigate the effect of injection timing on the characteristics of engine performance and exhaust emissions with BD in an indirect injection diesel engine, BD derived from soybean oil was applied in this study. The engine was operated at six different injection timings from TDC to BTDC 12°CA and five loads at various engine speeds. Below BD 30, there's similar trend compared with diesel fuel. But, the best injection timing was 4~6°CA retarded compare with diesel fuel using BD 30. When the fuel injection timing was retarded, better results were showed, which may confirm by advantages of BD.

Keywords : Biodiesel fuel, Fuel injection timing, Exhaust emission, Smoke, NOx

1. 서론

경유를 주 연료로 사용하는 디젤기관은 열효율이 높고 연료소비율이 낮아 중대형 수송수단의 동력원으로서 주로 사용되고 있으며 최근에는 고속주행이 가능한 승용차량에도 그 사용이 증가하고 있다. 그러나 최근 유가 상승과 환경에 대한 규제가 엄격해지고 있는 추세에 있어 세계 각국은 수송에너지를 대체할 수 있는 다양한 대체 연료에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다(Cenk and Canakci, 2009; Choi et al., 2007). 이러한 대체 연료 중 디젤기관의 주연료인 경유의 대체에너지로서 부각되는 바이오디젤(biodiesel, 이하 BD)은 농업 생산물에서 그 원료를 추출하므로 친환경적이며 재생가능한 장점이 있어 많은 연구가 진행(Chang and Gerpan,

1998; Choi and Oh, 2006) 되고 있다. 즉, BD는 디젤기관의 상용 연료인 경유와 물리적 성상이 비슷하고, 비교적 높은 에너지 밀도를 가지고 있어 경유와 혼합사용시 기관의 구조변경 없이 사용가능하다.

디젤기관에 BD를 연료로 사용하였을 경우 BD 자체에 내포하고 있는 산소성분이 연소를 촉진시켜 매연을 감소시킬 수 있다는 것은 많은 연구를 통해 입증되어 왔다(Choi et al., 2007; Kim et al., 2008). 반면 연료내의 산소성분이 연소시 연소실내 온도상승을 유도하여 thermal NOx가 증가되는 단점도 존재하는 것으로 알려져 있다. 그러나 BD를 추출할 수 있는 식물성 바이오매스의 재배시 광합성작용을 통한 CO₂ 저감을 꾀할 수 있기 때문에 BD를 연료로 사용할시 기관에서 배출한 CO₂는 온실가스 배출량 산정시 반영하지 않아 기

후 변화 협약에 대처하는데 장점을 가지고 있다. 또한, 현재 국내에는 2006년에 모든 자동차용 경유에 바이오디젤이 0.5% 혼합되었고, 2008년부터 매년 0.5%씩 혼합율이 증가하여 2010년 현재에는 2.0%에 달하고 있어 국내 유통량이 증가되고 있으며, 국내에서 생산되는 BD의 주원료인 대두유는 물리·화학적 특성이 경유와 달라 상용 디젤기관에 적용시 상용 경유에 비해 다른 연소 특성을 보일 수 있다.

즉, 이전의 연구에서 Monyen 등(2001)은 직접분사식 디젤기관에 BD를 기관의 연료로 사용할 경우 상용경유와 혼합율이 20%일 때 경유에 비해 연소 시작이 약 0.25~0.75°CA 빨리 나타나고, BD 100%를 기관의 연료로 사용할 경우에는 그 시작이 2.3°CA까지 빨리 나타난다고 보고하였고, Szybist 과 Boehman 등(2003)은 직접분사식 디젤기관에 BD를 연료로 사용할 경우 디젤에 비해 연소 시작이 약 4°CA 빨리 나타난다고 보고하고 있다. 이와 같이 직접분사식 디젤기관에 BD를 연료로 사용하여 연료분사시기에 따른 영향을 연구한 결과는 많이 이뤄졌으나 간접분사식 디젤기관에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 현재 국내에서 사용되고 있는 기계식 디젤기관은 간접분사식 디젤기관이 주를 이루고 있으며, 향후 신재생에너지 보급정책에 따라 BD의 혼합율은 점점 증가할 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 국내에 유통되는 대두유에서 추출한 BD를 간접분사식 디젤기관의 연료로 사용할 경우 기관 성능 및 배기배출물 특성에 영향을 미치는 연소 조건을 파악하기 위하여 연료분사시기의 변화에 따른 기관 성능 및 배기배출물 특성을 살펴보고자 하였다.

2. 재료 및 방법

실험에 사용된 기관은 수냉식, 4기통, 4행정, 간접분사식 디젤기관이며, 기관부하와 회전속도는 기관 동력계에 의해 임의로 조정할 수 있도록 하였다. 실험에 사용된 기관의 사양은 표 1에 나타내었다.

표 2는 실험에 사용된 BD의 특성을 경유와 비교하여 나타낸 것이다. BD는 탄소함량이 경유보다 약 10%정도 적어 발열량이 저하되지만, 세탄가는 경유보다 높으며 경유자체에 내포하고 있지 않은 산소를 약 11% 함유하고 있다. 실험에 사용된 연료는 디젤기관의 상용연료인 경유를 기본으로 하고, 경유와 BD를 체적비율로 혼합한 BD 10%, 30% 및 순수 BD 100%를 연료로 사용하여 경유와 비교하였다.

실험은 기관 동력계에 장착된 간접분사식 디젤기관을 이용하여 난기운전이 끝난 후 각 기관회전속도 25% 부하부터 전 부하상태까지 25% 간격으로 부하를 조절하였으며, 90% 부하도 실험하여 각각의 특성을 비교하였다. 연료분사시기는 상사점을 기준으로 2°CA씩 진각하는 방향으로 BTDC 12°CA

까지의 범위로 변경하며 실험을 진행하였다. 모든 실험 조건에서 냉각수 온도는 80±2°C 로 일정하게 유지하였다.

BD가 배기가스 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 배기다기관으로부터 400 mm 하류에 매연측정장치(HBN-1500; Korea)를 사용하여 매연의 농도를 각 실험조건에서 3회 반복 측정하여 평균값을 취하였으며, NOx의 측정은 배기 매니폴드로부터 약 300 mm 하류에서 전기화학적 셀 방식의 배기가스 분석기(Greenline MK 2; Italy)로 일정량의 배기가스를 흡입하여 측정하였다. 또한, 기관이 일정량의 연료를 소모하는 시간을 측정하여 단위시간당의 에너지소비율(MJ/kW·h)로 계산하였다.

Table 1 Specification of test engine

Item	Specification
Engine model	D4BA
Bore × Stroke	91.1× 95.0 (mm)
Displacement	2476 (cc)
Compression ratio	21
Combustion chamber	indirect injection

Table 2 Properties of test fuels

	Diesel fuel	BD
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	11.03

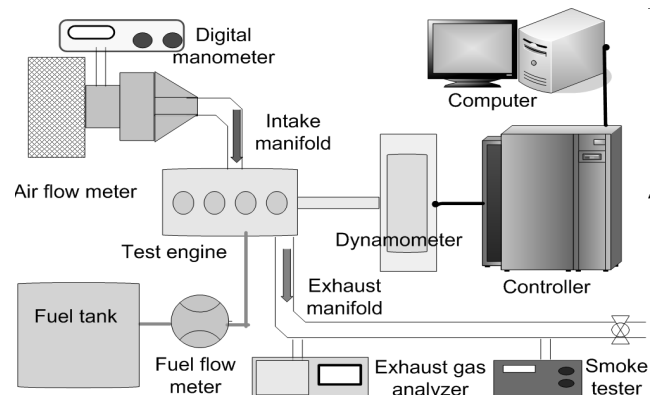


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 기관회전속도 2000 rpm의 경우에 부하변화에 따

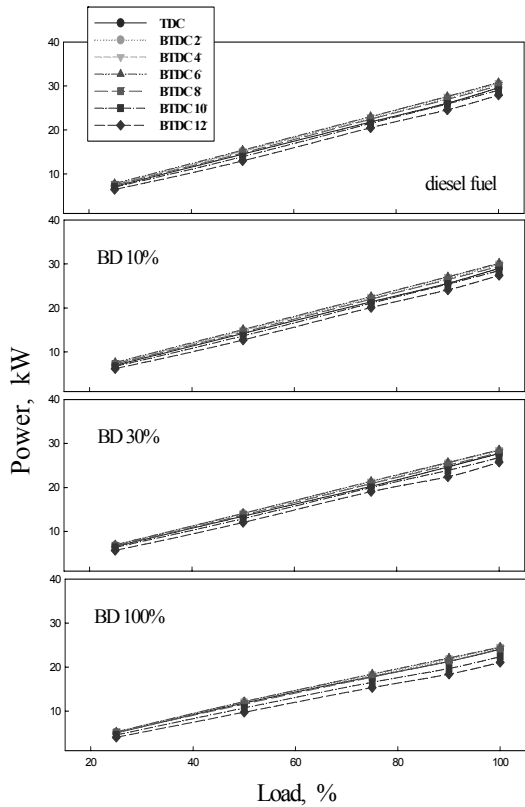


Fig. 2 Power versus various injection timing on fuel types at 2000 rpm.

른 분사시기별 출력 특성을 경유와 비교하여 BD의 혼합률에 따라 나타낸 것이다. 경유를 사용한 경우가 전체적 출력면에서 가장 높게 나타나며, BD의 혼합률이 증가함에 따라 약간씩 출력이 저하됨을 알 수 있다. BTDC 4°CA, 전부하시 경유를 사용한 경우와 비교하여 BD 10%의 경우는 약 1.8%, BD 30%의 경우는 6.9%의 출력이 저하되었다. 전체적인 출력특성 측면에서 살펴보면 연료에 관계없이 연료분사시기가 BTDC 4°CA와 6°CA일 때 가장 높은 출력특성을 나타내고 있다. 그러나, 연료분사시기가 BTDC 10°CA이상으로 진각되는 경우를 제외하고는 그 차이가 크지 않았다. 즉 BD 30%, 2500 rpm의 경우에 가장 높은 출력특성을 보이고 있는 BTDC 4°CA를 기준으로 하여 BTDC 2°CA는 약 1.2%, BTDC 8°CA는 약 1.3%의 출력감소 경향을 보이고 있어 그 차이가 크지 않음을 알 수 있었다. 연료분사시기가 너무 빠르면 피스톤이 상사점에서 도달하기 이전에 연소과정이 이루어져 일로서 충분히 전달되지 못하게 되고, 너무 늦게 연료를 분사하게 되면 피스톤이 하강하는 시기에 피스톤에 일이 전달되어 효율이 떨어지게 된다. 따라서 너무 이르거나 늦은 연료분사는 기관의 출력에 악영향을 미칠 수 있다.

그림 3은 기관회전속도 2500 rpm의 경우에 부하변화에 따른 분사시기별 에너지소비율(brake specific energy consumption; BSEC) 특성을 BD의 혼합률에 따라 나타낸 것이다. 경

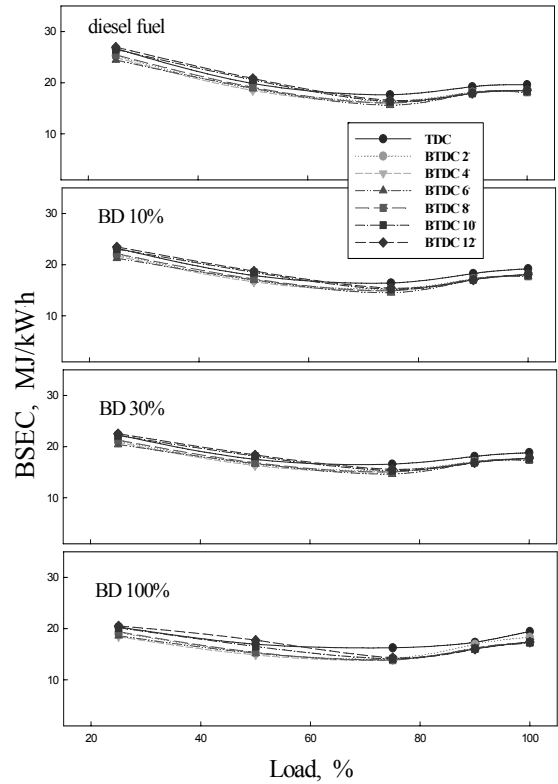


Fig. 3 BBSEC versus various injection timing on fuel types at 2500 rpm.

유 및 BD를 혼합한 연료의 경우 전체적으로 비슷한 에너지소모율의 패턴을 유지하고 있는 것으로 나타났으며, 75%부하에서 에너지소비율이 가장 양호한 것으로 나타났다. 분사시기 측면에서 살펴보면, 경유를 연료로 사용한 경우 전체 부하 조건에서 연료분사시기를 BTDC 4°CA와 6°CA로 고정하였을 때 가장 우수한 에너지소비율을 나타내었다. BTDC 6°CA, 90% 부하를 적용한 경우 경유와 비교하여 BD 10%의 경우는 약 4.9%, BD 30%의 경우는 5.8%, BD 100%의 경우는 10.7%의 에너지소비율의 개선효과를 나타내었다. 단, 모든 경우에 연료분사시기가 너무 빠르거나 상사점에서 행해진 경우는 에너지소비율이 악화된 것을 알 수 있다.

그림 4는 기관회전속도 2000 rpm의 경우에 부하변화에 따른 분사시기별 매연 배출 특성을 BD의 혼합률에 따라 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 BD의 혼합률이 증가함에 따라 매연배출은 현저하게 저감됨을 알 수 있다. 특히, BD 100%를 적용한 경우에는 전부하영역에서도 매연배출량이 5%이하로 배출됨으로서 디젤기관에 대한 BD의 유용성을 확인할 수 있었다. 이는 BD를 혼합한 경우 국부적으로 농후한 과농혼합기 부분에서 연료자체내에 포함된 산소성분이 급기중의 산소보다 균일한 가연혼합기 형성에 더 기여할 뿐 아니라 전체적인 탄소함량의 감소로 매연생성의 직전물질인 아세틸렌의 생성을 억제하고 있는 것으로 생각된다(Rubino, 1999).

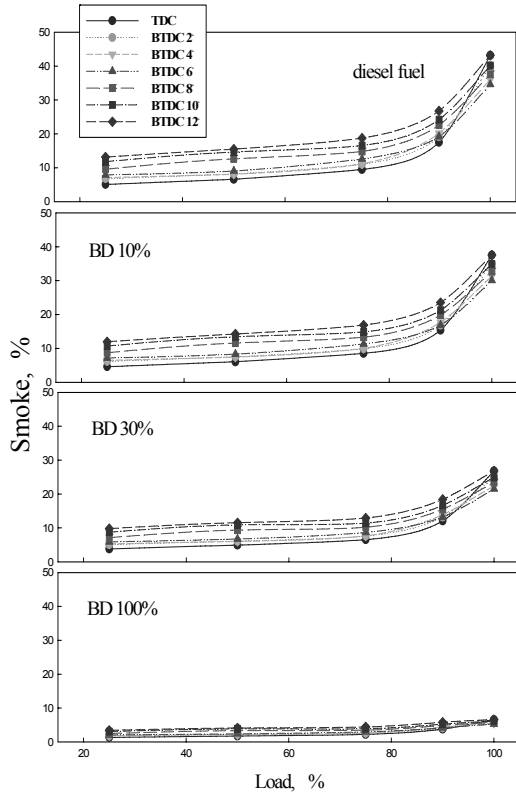


Fig. 4 Smoke versus various injection timing on fuel types at 2000 rpm.

또한, 전체적인 매연 배출측면에서 살펴보면 분사시기가 진각됨에 따라 매연배출량이 증가됨을 알 수 있다. 즉, 경유를 사용한 경우, 75%의 부하영역에서 TDC의 배출량과 비교하여 BTDC 2°CA는 16.2%, BTDC 10°CA는 74.4%의 매연 증가율을 나타내고 있어 분사시기의 진각이 매연배출에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 또한, 분사시기가 TDC에서 BTDC 6°CA까지는 매연의 배출이 크게 증가되지 않으나, 그 이상의 진각시 매연 배출의 증가폭이 커짐을 알 수 있다. BTDC 4°CA, 90%부하영역에서 경유만을 적용한 경우와 비교하여 BD 10% 혼합시에 약 12.1%, BD 30%는 31.1%, BD 100%의 경우는 78.3%의 매연저감효과를 나타내고 있다.

그림 5는 그림 4와 동일한 조건에서 부하변화에 따른 분사시기별 NOx 배출 특성을 나타낸 것이다. 모든 실험 조건에서 연료분사시기가 진각됨에 따라 NOx의 배출이 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 중부하이상의 영역에서는 연료분사시기가 BTDC 6°CA 이상 진각될 경우 NOx 배출의 증가폭이 커짐을 볼 수 있다. 이는 연료분사시기가 진각이 되면 연료가 증발해 공기와 혼합할 수 있는 시간적 여유가 비교적 충분하여 급격한 연소가 이루어지기 때문으로 생각된다.

4. 요약 및 결론

예연소실식 간접분사식 디젤기관에 BD를 체적비율로 10,

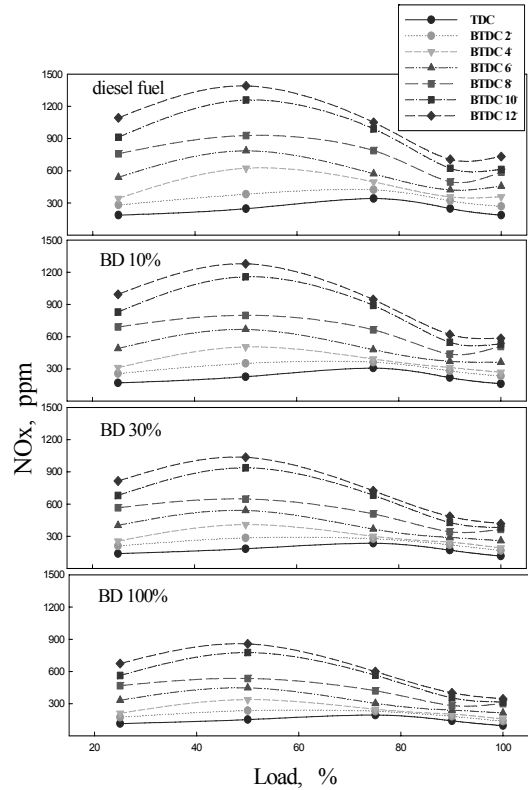


Fig. 5 SNOx versus various injection timing on fuel types at 2000 rpm

30, 100% 혼합하여 연료로 사용하고 그 혼합율과 연료분사시기에 따른 기관 성능 및 배기배출물 특성을 경유만을 사용한 경우와 비교한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- (1) BTDC 4°CA, 전부하시 경유를 사용한 경우와 비교하여 BD 10%의 경우는 약 1.8%, BD 30%의 경우는 6.9%의 출력이 저하되었으나, 30% 이하의 BD 혼합물에서는 그 차이가 크지 않았다.
- (2) BTDC 6°CA, 90% 부하를 적용한 경우 경유와 비교하여 BD 10%의 경우는 약 4.9%, BD 30%의 경우는 5.8%, BD 100%의 경우는 10.7%의 에너지소비율의 개선효과를 나타내었으며, 이는 BD 혼합연료내에 포함된 산소성분의 영향으로 판단된다.
- (3) 매연배출측면에서 BD의 혼합률이 증가함에 따라 경유만을 사용한 경우와 비교하여 매연 배출이 현저하게 저감됨을 알 수 있다.
- (4) 연료분사시기가 진각됨에 따라 NOx의 배출이 증가하며, 특히 BTDC 6°CA 이상 진각될 경우 NOx 배출의 증가폭이 커짐을 확인하였다.

참고 문헌

1. Cenk, S. and M. Canakci. 2009. Effects of injection timing

- on the engine performance and exhaust emissions of a dual-fuel diesel engine. *Energy Conversion and Management* 50:203-213.
2. Chang, D. Y. and J. H. V. Gerpen. 1998. Determination of particulate and unburned hydrocarbon emissions from Diesel engines fueled bio-diesel. SAE Paper No.982527. Warrendale, pennsylvania, USA.
 3. Choi, S. H. and Y. T. Oh. 2006. Combustion characteristics of esterified rice bran oil as an alternative fuel in a diesel engine. *International Journal of Automotive Technology* 7(4): 399-406.
 4. Choi, S. H., Y. T. Oh and G. H. Kim. 2007. Characteristics of durability and emission with biodiesel fuel (5%) in a common rail direct injection diesel engine at SEOUL-10 mode. *Journal of Biosystems Engineering* 32(2):97-101.
 5. Kim, Y. J., Y. K. Kang, K. C. Kang and Y. S. Ryou. 2008. Facilities for bio-production and environmental engineering ; fuel qualities of different biodiesels in the gun type burner. *Journal of Biosystems Engineering* 33(2):124-129.
 6. Monyen, A., J. H. V. Gerpen and M. Canakci. 2001. Effect of timing and oxidation on emissions from biodiesel-fueled engines. *Transactions of the ASAE* 44(1):35-42.
 7. Rubino, L. 1999. The Effect of Oxygenated Additives on Soot Precursor Formation in a Counterflow Diffusion Flame. SAE Paper No. 993589, Warrendale, Pennsylvania, USA.
 8. Szybist, J. P. and A. L. Boehman. 2003. Behavior of a diesel injection system with biodiesel fuel. SAE Paper No. 2003-01-1039. Warrendale, pennsylvania, USA.