

바이오디젤 사용과 연료분사시기 변화에 따른 DI 디젤기관 성능 특성(Ⅱ)

The Characteristics on the Engine Performance for Variation of Fuel Injection Timing in DI Diesel Engine Using Biodiesel(Ⅱ)

장 세 호**

Se-Ho Jang**

(접수일 : 2013년 07월 18일, 수정일 : 2013년 09월 16일, 채택확정 : 2013년 09월 17일)

Abstract: Biodiesel is technically competitive with it and offers technical advantages over conventional petroleum diesel fuel. Biodiesel is an environment friendly alternative liquid fuel that can be used in any diesel engine without modification. In this study, $(dp/dCA)_{max}$ and heat release, emission characteristics with different fuel injection timings are compared between diesel fuel and biodiesel in the D.I. diesel engine with T/C. The engine was operated at five different fuel injection timings from BTDC 6deg to 14deg at 2deg intervals and with four different loads at engine speed of 1800rpm. The experiments in a test engine showed that ranges between low and high of $(dp/dCA)_{max}$ got narrower, as the engine load increased, BD blend rate increased, and fuel injection timing was delayed. Cumulative heat release increased with the advanced fuel injection timing. NO_x emissions decreased with the delays of fuel injection timing.

Key Words : DI Diesel Engine, Biodiesel, Fuel Injection Timing, Rate of Heat Release, NO_x , Soot

1. 서 론

바이오디젤은 석유기반인 경유의 대안으로 식물성 기름이나 동물성 지방과 같은 재생 가능한 자원을 바탕으로 제조되며, 연소특성이 경유와 매우 비슷하여 현재 사용되는 경유를 대체할 수 있는 대체에너지 중의 하나이다.

바이오디젤의 장점으로는 인화점이 경유보다 낮기 때문에 불이 잘 붙지 않아 안정적이며, 디젤 연료의 착화성을 좌우하는 세탄가가 경유보다 높으며, 온실가스인 CO_2 배출이 적고, 황산화물(SO_x)

과 입자상물질(PM)도 적게 배출된다. 식물자원에서 생산되기 때문에 국내에서 자체생산 가능하고, 폐식용유 등 폐자원의 활용으로 환경오염 저감의 효과도 있다. 그러나 바이오디젤은 아직 몇 가지 문제점을 가지고 있다. 배출가스의 유해물질 저감을 위해서는 바이오디젤의 배합비율을 높여야 하는데, 바이오디젤은 엔진을 부식시키는 특성이 있고, 오래 저장해 두면 변질되는 문제가 있다. 또한 동결점이 경유보다 높고, $5^{\circ}C$ 이하에서는 유동성이 떨어지기 때문에 바이오디젤 혼합비율이 높아질수록 연료의 이송이 원활하지 못하므로 첨가제나 연

** 장세호(교신저자) : 강원도립대학 해양경찰과
E-mail : jangsh@gw.ac.kr, Tel : 033-660-8203

** Se-Ho Jang(corresponding author) : Department of Marine Police & Technology, Gangwon Provincial college.
E-mail : jangsh@gw.ac.kr, Tel : 033-660-8203

료를 가열하는 장치가 필요하다¹⁻⁴⁾. 이러한 이유로 100% 바이오디젤을 사용하는 것보다 경유와 혼합하여 사용하고 있다. 바이오디젤은 유해물질의 저감과 온난화방지에 효과적이라는 장점이 있지만, 한정된 연료자원과 기후에 따른 급격한 원료가격 변동 등의 문제점과 경유에 첨가제로 투입되는 성격의 변형 에너지원이라는 점에서 아직은 한계를 가지고 있는 실정이다. 우리나라는 2006년 7월 1일부터 일반 경유에 바이오디젤이 0.5% 혼합되었고, 2008년부터 매년 0.5%씩 혼합율이 증가하여 2010년에 2.0% 혼합되었으며, 이후부터 의무혼합비율 상향 조정이 쉽지 않아 올해에도 2.0% 혼합이 유지되고 있다. 반면에 독일과 이탈리아에서는 2006년부터 도심버스, 대형 트럭은 100% 바이오디젤을 사용하도록 의무화하고 있다. 바이오디젤의 안정적이고 원활한 공급과 바이오디젤의 문제점들이 해결되면 석유계 에너지를 대체할 대체에너지로서 유리하기 때문에 바이오디젤에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다⁵⁻⁹⁾.

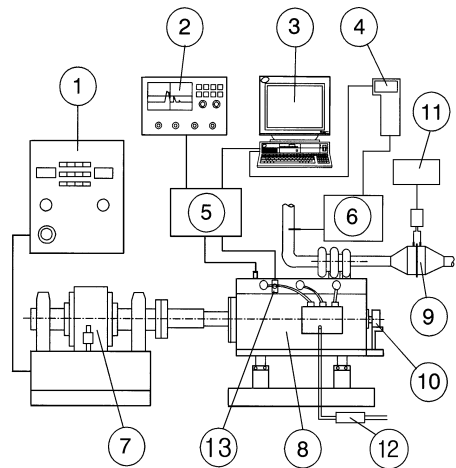
본 연구에서는 바이오디젤을 보쉬식 연료분사 펌프를 장착한 직접분사식 디젤 엔진에서 연료분사시기 변화와 바이오디젤과 경유와의 혼합비를 변경했을 때의 연소특성과 배기배출물에 대해서 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험장치 개략도를 Fig. 1에 나타내었으며, 실험에 사용된 엔진은 3기통 직접분사식 과급 디젤엔진으로서 배기량은 2,591cc이다¹⁰⁾. 동력계는 와전류식 동력계가 설치되어 있으며, 연소실압력 측정장치, 연료분사압력 측정장치 등이 설치되어 있다. 배기가스 분석을 위하여 전기화학적 셀방식의 배기분석기(testo 350)를 사용하였다. 그리고 광투과 방식을 이용한 스모크 분석기(BOSCH, RTM430)를 이용하여 그을음 농도를 계측하였으며, 분석기 입구측에 수냉식 배기냉각기를 설치하였다. 엔진 흡·배기온도, 냉각수 온도를 측정할 수 있는 온

도측정장치가 설치되어 있으며, 연소실 압력은 피에조 압력센서(KISTLER 6067B, 0~25MPa)를 이용하여 크랭크 각도 0.5도마다 측정하였으며, 10사이클의 압력을 평균한 값을 사용하여 연소실 압력, 압력상승율, 열발생율 등을 계산하였다. 연소실 압력을 정확하게 측정하기 위하여 크랭크축과 직결로 엔코더를 설치하였으며, 캠축에는 포토 커플러를 설치하여 피스톤의 TDC 시점부터 데이터 수집이 되도록 하였다. 그리고 연소실 압력, 압력상승율, 연료분사압력, 열발생율 등의 데이터는 A/D Board(NI PCI-6110)와 LabVIEW 프로그램을 이용하여 데이터 수집을 하고 계산되도록 프로그래밍하였다.



1. Dynamometer controller
2. Digital oscilloscope
3. Computer
4. Exhaust gas hand-held instrument
5. Pressure sensor amplifier
6. Exhaust gas analyser box
7. Dynamometer
8. Test engine
9. Laminar flowmeter
10. Rotary encoder
11. Digital manometer
12. Fuel oil heater
13. Injection pressure sensor

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 실험조건 및 방법

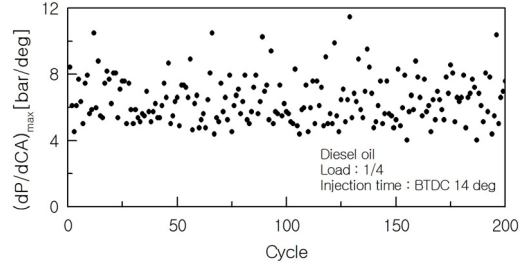
실험조건은 엔진 회전수를 1800rpm으로 일정하게 유지하고, 부하는 25%, 50%, 75%, 100%로 변화시켰으며, 실험에 사용된 연료는 경유에 바이오디젤 원액을 체적분율로 각각 20%, 40%, 60%로 혼합한 BDF20, BDF40, BDF60을 교반기를 이용해 30분이상 교반시킨 후 실험에 사용하였다. 연료분사시기는 BTDC 6deg에서 BTDC 14deg까지 2deg씩 변경시키며 실험을 진행하였다. 연료분사시기 조정을 위해 노즐에서 170mm 떨어진 고압파이프에 압력센서를 설치하였으며, 실험하고자 하는 연료분사시기 조정은 고압파이프에서 측정된 파이프 내의 압력이 보쉬연료펌프의 압축에 의해 압력이 상승하기 시작하는 시점을 정확히 파악하기 위해 크랭크축과 직결된 엔코더의 Z펄스(TDC)와 B펄스(0.5도 간격)를 비교하면서 캠축을 회전시켜 연료분사시기를 실험조건에 맞도록 조정하였다. 그리고 실험은 엔진을 충분히 워밍시킨 후 냉각수의 온도가 80℃를 유지할 때 행하였으며, 한 연료를 사용해서 부하 변화와 연료분사시기 변화에 대한 모든 실험을 끝낸 후, 다른 연료로 교체하여 파이프에 남아 있는 연료의 2.5배 정도 소비되도록 엔진을 운전시킨 후 실험을 실시하였다. 그리고 연료와 연료분사시기 변화에 따른 배기가스특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 배기분석기를 이용하여 NO_x 배출량을 측정하고, 배기메니폴드에서 배기를 추출하여 배기냉각기를 거친 후 그을음의 배출농도를 계측하였다.

3. 실험결과 및 고찰

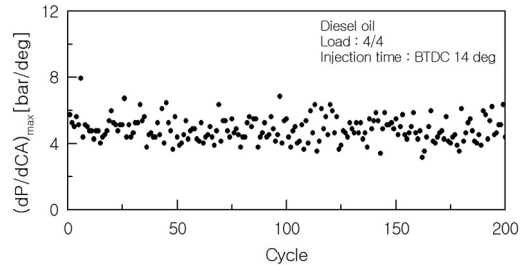
Fig. 2는 엔진회전수 1800rpm 일 때 연료와 부하 및 분사시기 변화에 따른 각 사이클당 연소실 압력상승을 최대값을 200cycle 동안의 변화를 나타낸 것이다. 먼저 그림(a)와 (b)는 연료를 경유로 사용하고, 연료분사시기를 고정시킨 후 부하만을 변화시켰을 때의 압력상승을 최대값의 변화를 비교한 것으로 부하 25%에서 최대값의 변동폭이 매우 심한 반면에 부하 100%에서는 상대적으로 최대값의 변동폭이 작고, 압력상승을 최대값들이 부하

25% 일 때 보다는 낮게 나타났다.

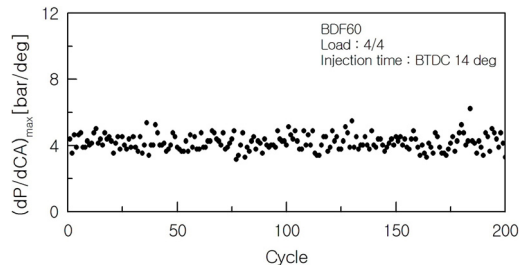
그림(b)와 (c)는 부하와 연료분사시기는 동일하고 연료를 바꾸었을 때의 변화를 비교한 것으로



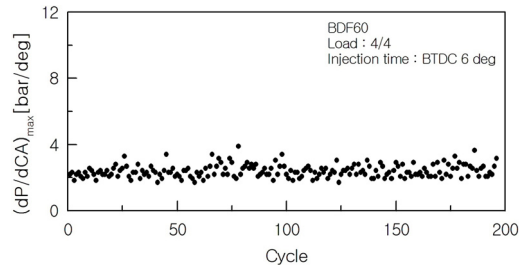
(a)



(b)



(c)



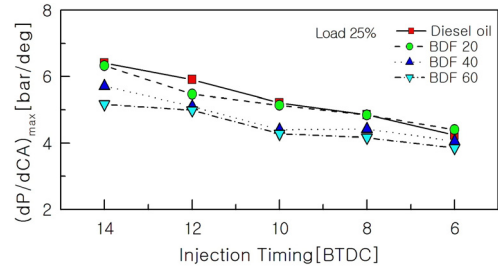
(d)

Fig. 2 (dP/dCA)_{max} versus time variation according to engine load and injection timing

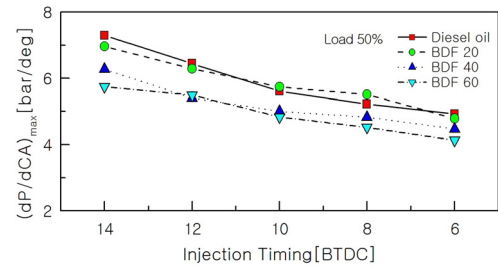
경유보다 BDF60을 사용하면 압력상승을 최대값의 변동폭이 적게 나타나고, 그 값도 낮게 나타났다. 이러한 현상은 BD의 세탄가가 경유보다 높기 때문에 착화성이 안정되어 압력상승율이 균일하게 나타난다고 판단된다. 그림(c)와 (d)는 연료와 부하를 일정하게 하고 연료분사시기를 변화시켰을 경우를 비교한 것으로 분사시기를 늦춘 BTDC 6deg 일 때 최대압력상승율의 변동폭이 적고, 압력상승을 최대값들은 낮게 나타나며, 엔진의 운전이 매우 안정된 운전상태를 보여주고 있다. 즉, 연료분사시기를 지연시키면 엔진의 예혼합 연소량이 줄어들고 확산연소의 비율이 높아짐으로 인해 완만한 연소실 압력이 형성되어 압력상승율의 최대값은 작아지며 그 변동폭도 작아졌다.

Fig. 3은 사이클당 압력상승을 최대값을 200 cycle 평균하여 연료분사시기, 연료 및 부하변화에 따른 변화를 각각 나타낸 것이다. 연료분사시기 BTDC 14deg에서 BTDC 6deg 범위내에서는 부하와 연료의 변화와는 관계없이 분사시기가 늦어질수록 압력상승을 최대값은 감소되었다. 그리고 연료변화에 따른 압력상승을 최대값의 변화를 비교해 보면, 바이오디젤 혼합유보다 경유를 사용한 경우에 분사시기나 부하와 관계없이 항상 높게 나타나고 있으며, 바이오디젤의 혼합비율이 높아질수록 압력상승을 최대값이 작아지고 있다. 이것은 바이오디젤의 점도가 경유보다 높기 때문에 증발속도가 경유보다 늦고, 바이오디젤의 함유량이 많아질수록 확산연소량이 많아지기 때문으로 판단된다¹⁰⁾. 그리고 분사시기가 진각될수록 연료 변화에 따른 변화가 크게 나타나고 있으며, 분사시기가 늦어질수록 그 변화폭이 점차적으로 작아지고 있다. 부하 변화에 따른 압력상승을 최대값의 변화를 비교해보면, 부하 100%에서는 압력상승을 최대값이 매우 작아지고 있는데, 이는 엔진 부하가 증가될수록 연소실 온도가 상승하여 연료의 착화지연기간이 짧아지기 때문에 압력상승을 최대값이 작아지고 있다.

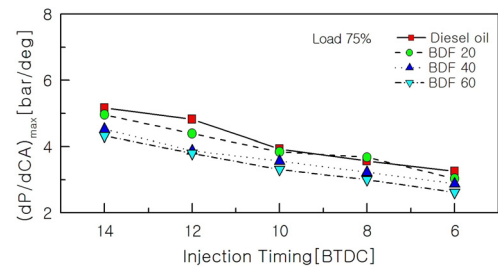
Fig. 4는 연료를 BDF20, BDF60, 경유를 각각 사용하고, 연료분사시기를 변경시켰을 때의 열발생율선도를 나타내 것이다. 사용된 모든 연료에서



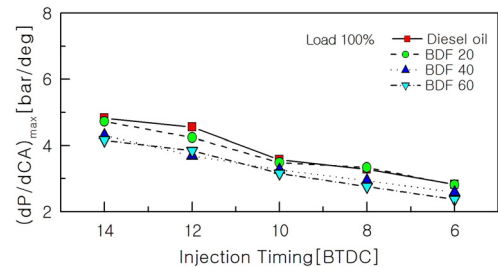
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3 Variation of $(dP/dCA)_{max}$ according to engine load and injection timing

연료분사시기를 진각시킬수록 예혼합연소 비율이 커짐을 알 수 있다. 이는 연료분사시기를 진각시

킬수록 착화지연기간이 길어지고, 그에 따라 예혼합연소량도 많아지기 때문이라 생각된다. 그리고 연료변화에 따른 열발생율선도에서 예혼합연소와 확산연소의 비율을 비교해보면, 바이오디젤을 혼합한 그림(a), (b)보다 그림(c)의 경유를 사용했을 때 예혼합연소 비율이 높게 나타나며, BDF60은 BDF20보다 예혼합연소 비율이 작음을 알 수 있다.

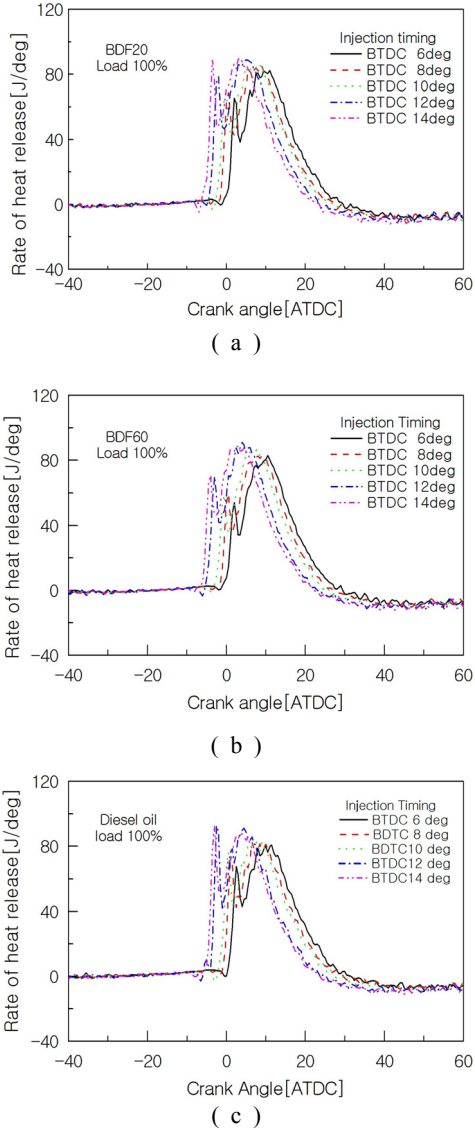


Fig. 4 Variation of heat release rate according to fuels and injection timing

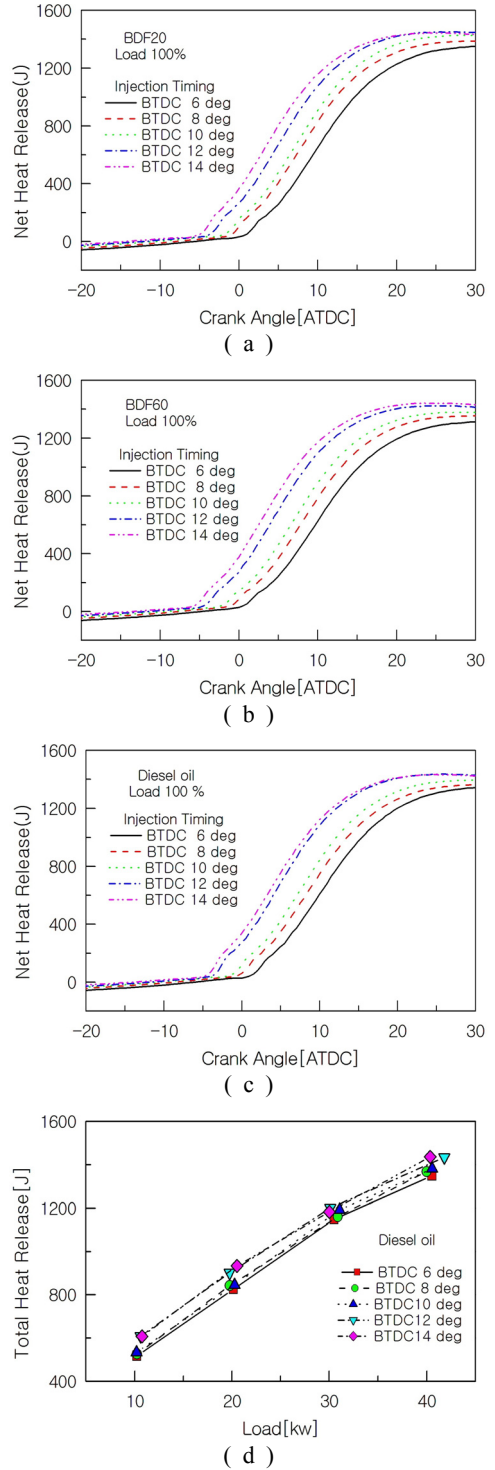


Fig. 5 Variation of net heat release and total heat release according to Fuels and injection timing

이는 연료 점도에 의한 증발속도 차이 때문으로 생각된다.

Fig. 5의 (a)(b)(c)는 경유를 사용했을 때의 누적 열발생량을 나타내 것이다.

부하 100%에서 연료분사시기를 진각시킬수록 총누적열발생량이 증가되었으며, 그림(d)에서 부하를 변화시켜도 연료분사시기를 진각시킬수록 누적 열발생량이 높게 나타났다. 실험 엔진에 적용된

연료분사시기 변동 범위내에서 연료분사시기를 진각시키면 연료소비율이 감소하지만 오히려 누적열 발생량이 증가하는 것은 착화지연기간이 길어져 예혼합연소량이 증가하여 연소개선에 의한 누적열 발생량이 증가되었다고 생각된다.

Fig. 6은 엔진회전수 1800rpm에서 부하와 연료 분사시기 변화에 따른 NO_x 배출량을 나타낸 것이다. NO_x의 배출량은 연료분사시기를 지연시킬수록

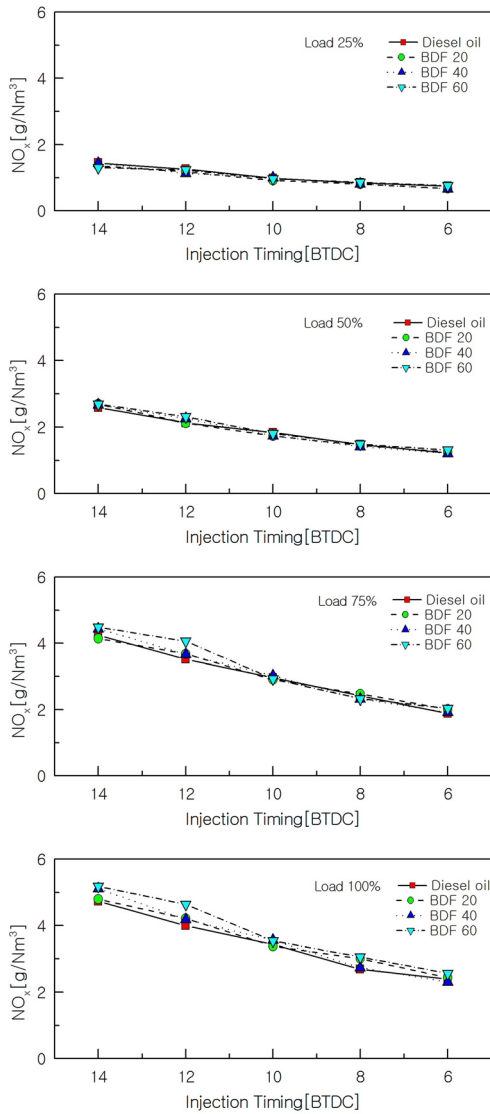


Fig. 6 Variation of NO_x according to engine load and injection timing

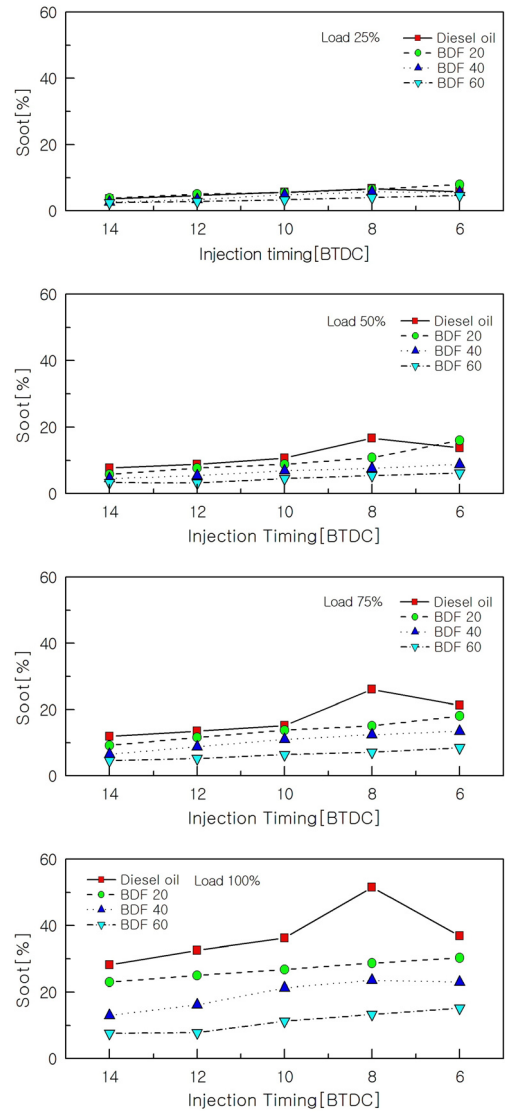


Fig. 7 Variation of Smoke according to engine load and injection timing

록 낮게 나타났으며, 부하 25%, 50%, 75%에서는 연료변화에 따른 NO_x 배출의 차이가 별로 없었으며, 부하 100%에서 연료변화에 따라 NO_x 배출량이 약간의 변화가 나타났다. Fig. 7은 부하와 연료분사시기 및 연료의 변화에 따른 그을음 배출농도를 나타낸 것이다.

부하 25%에서는 연료분사시기 변화에 큰 영향을 받지 않으나 부하가 증가될수록 연료분사시기에 따른 영향이 점차적으로 커지고 있으며, 그을음의 배출이 연료분사시기가 늦어질수록 많아지고, 부하가 증가될수록 그을음의 배출이 증가하였다. 실험범위내에서 연료분사시기가 늦어질수록 그을음 배출이 증가되는 것은 확산연소의 비율이 증가하여 불완전연소가 더욱 증가되기 때문으로 판단된다. 그리고 합산소 연료인 바이오디젤의 함유량이 증가할수록 그을음 배출량은 현저히 감소하였다.

4. 결 론

직접분사식 과급 디젤기관에서 경유와 바이오디젤을 혼합한 BDF20, 40, 60을 연료로 사용하고, 연료분사시기 변화에 따른 연소특성과 배기배출물에 관한 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 연소실 최대압력상승율의 변동폭은 엔진부하가 클수록, 바이오디젤의 혼합비율이 높을수록, 연료분사시기가 늦어질수록 작아졌다.

2) 바이오디젤의 점성이 경유보다 높기 때문에 바이오디젤의 혼합비율이 높을수록 확산연소량이 많아져 최고압력상승율은 낮아졌다.

3) 실험에 사용된 모든 연료에서 연료분사시기를 진각시킬수록 예혼합연소비율이 커지고, 누적열발생량이 높게 나타났다.

4) NO_x의 배출량은 연료변화에 따른 NO_x 배출량의 차이는 별로 없는 반면, 연료분사시기를 지연시킬수록 적게 배출되며, 부하가 증가할수록 NO_x 배출량은 증가하였다.

5) 그을음 배출은 부하가 증가할수록 연료분사시기에 따른 영향이 더 커지며, 배출농도는 연료분사시기가 늦어질수록, 부하가 증가할수록 증가

한 반면에 합산소연료인 바이오디젤의 혼합비율이 높을수록 현저히 감소하였다.

References

1. A. Demirbas, 2007, "Biodiesel A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engine", Springer, pp 111~158.
2. G. Knothe, J. V. Gerpen and J. Krahl, 2005, "The Biodiesel Handbook", AOCS, Champaign, Illinois.
3. C. Y. Choi, G. R. Bower and R. D. Reitz, 1997, "Effects of Biodiesel Blended Fuels and Multiple Injections on D. I. Diesel Engines", SAE paper, 970218.
4. A. Senatore and M. Cardone, V. Rocco, M. V. Prati, 2000, "A Comparative Analysis of Combustion Process in D. I. Diesel Engine Fueled with Biodiesel and Diesel Fuel", SAE Paper, 2000-01-0691.
5. J. P. Szybist and A. L. Boehman, 2003, "Behavior of a Diesel Injection System with Biodiesel Fuel", SAE Paper, 2003-01-1039.
6. J. Nuskowski, G. J. Thompson and N. N. Clark, 2008, "Heat Release and Emission Characteristics of BD20 Biodiesel Fuels During Steady State and Transient Operation", SAE Paper, 2008-01-1377.
7. Y. Ra and R. Reitz, 2008, "Effects of Fuel Physical Properties on Diesel Engine Combustion Using Diesel and Bio-diesel Fuels", SAE Paper, 2008-01-1379.
8. H. K. Gangwar and A. K. Agarwal, 2008, "Combustion Characteristics of Jatropha Oil Blends in a Transportation Engine", SAE Paper, 2008-01-1383.
9. J. K. Yeom and H. S. Ha, 2013, "An Experimental Study on Application of Biofuel to Diesel Engine", Journal of the Korea Society for Power System Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 29~37.

10. S. H. Jang and J. J. Suh, 2008, "The Combustion Characteristics of Biodiesel Fuel as an Alternative Fuel for DI Diesel Engine", Journal of the Korea Society for Power system Engineering, Vol. 12, No. 2, pp. 12~17.