

커먼레일을 이용한 디젤과 BD20 연료가 인젝터에 미치는 영향에 관한 연구

정연호¹ · 임옥택^{2†}

¹울산대학교 자동차신박기술대학원 설계기술학과, ²울산대학교 기계공학과

A Study on Injector Durability Test with Diesel and BD20 Using Common Rail

YUNHO JEONG¹, OCKTAECK LIM^{2†}

¹Graduate of Institute of e-Vehicle Technology, University of Ulsan, Ulsan 44610, Korea

²School of Mechanical Engineering, University of Ulsan,, Mugu-dong Nam-gu, Ulsan, 44610, Korea

Abstract >> The characteristics of diesel and biodiesel are similar like as cetane number and auto-ignition temperature. High cetane number of diesel and BD could make possible to compression ignition. but BD showed different atomization from diesel due to component like density, viscosity and iodine value etc. Because of this, the biodiesel requires validation. This study using diesel and BD20 investigated effect to durability injector. Durability test were used common rail and bosch solenoid type 5-hole injector. Total test was 672hr but actual running time was 200hr. Spray experiments for spray characteristics were carried out using constant volume combustion chamber. Spray characteristics of diesel and BD showed different result up to durability test time. After 100hr, diesel showed spray shapes were stable but BD was not. After 200hr, difference of diesel and BD spray shapes were grow serious.

Key words : Common rail(커먼레일), Biodiesel(바이오디젤), Injector(인젝터), Durability(내구성), Spray Characteristics (분무 특성)

Subscripts

BD : biodiesel condition

CVCC : Constant volume Combustion Chamber

CR : Common Rail

SEM : Scanning Electron Microscope

inj : Injection

DI : Diesel Injector

BI : BD20 Injector

1. 서 론

현재 대한민국은 신재생에너지의 사용량을 늘리기 위해서 신재생에너지 공급의무제(Renewable Portfolio Standard)를 실시하고 있다. 한국에서는 디젤에 바이오디젤을 일정량이상 첨가해서 사용하고 있다^{1,2)}.

바이오 디젤의 경우 대표적인 신재생 연료이며 많

[†]Corresponding author : otlim@ulsan.ac.kr

Received : 2015.6.16 in revised form : 2015.10.27 Accepted : 2015.10.30

Copyright © 2015 KHNES

은 곳에서 내연기관에 적용을 위해서 연구 및 개발을 진행 중이다. 바이오디젤은 식물성 기름이나 동물의 지방 혹은 재활용 식용유등을 이용해서 만든 것으로 디젤과 혼합하여 사용한다.

디젤과 바이오디젤은 특성이 비슷하고 높은 세탄가로 인해서 디젤엔진에 바이오디젤의 사용이 가능하다(Table 1). 그렇지만 바이오디젤의 산소(O₂)의 함유량이 높고 황(S)성분이 없기 때문에 오염물질의 배출을 상당히 저감할 수 있다. 또한 바이오 디젤을 사용할 경우 디젤에 비해서 탄화수소(HC)와 일산화탄소(CO)등의 오염물질의 발생을 감소시킬 수 있다. 하지만 디젤에 추가적으로 첨가해함으로 부대비용의 상승 등 여러 부분을 염려해야한다.

그리고 커먼레일(CR) 시스템을 이용해서 연료를 이용할 때는 연료가 시스템에 미치는 영향을 고려하여야 한다. 엔진을 사용함에 있어서 적절한 연료의 사용은 엔진의 수명과 직면되는 문제이기 때문에 항상 연료를 사용하기 전에 꼭 고려하여야 한다. 최근 신재생 에너지 등 많은 대체연료가 개발, 사용되고 있다. 하지만 단순히 연소가 가능하다는 이유만으로는 디젤의 대체연료가 될 수 없다^{3,4)}.

디젤과 바이오디젤은 밀도와 점도에서 차이를 보이는데 이 때문에 바이오연료의 비율이 증가 하였을 때 연료가 기존의 장비들에 어떠한 영향을 미치는지

알아보기 위해서 기존의 장비와 동일한 시스템을 구성하여서 바이오디젤의 첨가로 인해서 장비의 내구성 이 어떠한 영향을 미치는 지 알아보기 위해서 이번 실험을 진행하였다.

2. 실험장비 및 방법

본 실험은 커먼레일(CR)을 이용해서 내구성 평가 장비를 구성하여 디젤과 바이오디젤 혼합연료를 총 672시간 동안 인젝터(Injector)를 이용해서 연료를 분사하고 기준시간 마다 분무가시화 시스템을 이용해서 내구성 테스트 시간 경과에 따른 연료의 분무 특성에 관하여 연구하였다⁵⁾.

2.1 실험 장치

2.1.1 커먼레일 내구성 평가 장비

커먼레일 내구성 평가 장비(Fig. 1)는 커먼레일과 고압펌프 그리고 연료 순환 시스템 등을 이용하여 인젝터의 내구성을 평가하기 위해서 장비를 구성하

Table 1 Properties of Diesel and BD20

Fuel Property	Diesel	Biodiesel
Fuel Composition	C10~C21	C12~C22
Lower Heating Value, Btu/gal.	131.295	117.093
Kin. Viscosity, @40 degC	1.3~4.1	1.9~6.0
Density, lb/gal @ 15 degC	7.079	7.328
Oxygen, wt %	0	11
Sulfur, wt %	.05 max.	0.0
Cloud Point, degC	-15 to 5	-3 to 12
Pour Point, degC	-35 to -15	-15 to 10
Cetane Number	40 ~ 55	48 ~ 65
HFRR, microns	685	314

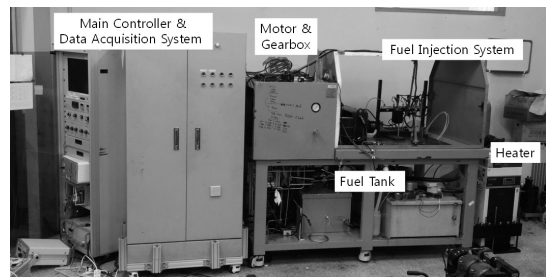


Fig. 1 The injection durability system with CRDI

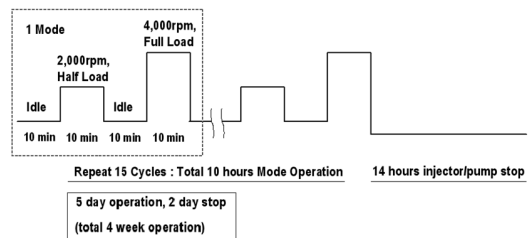


Fig. 2 Injector durability test condition

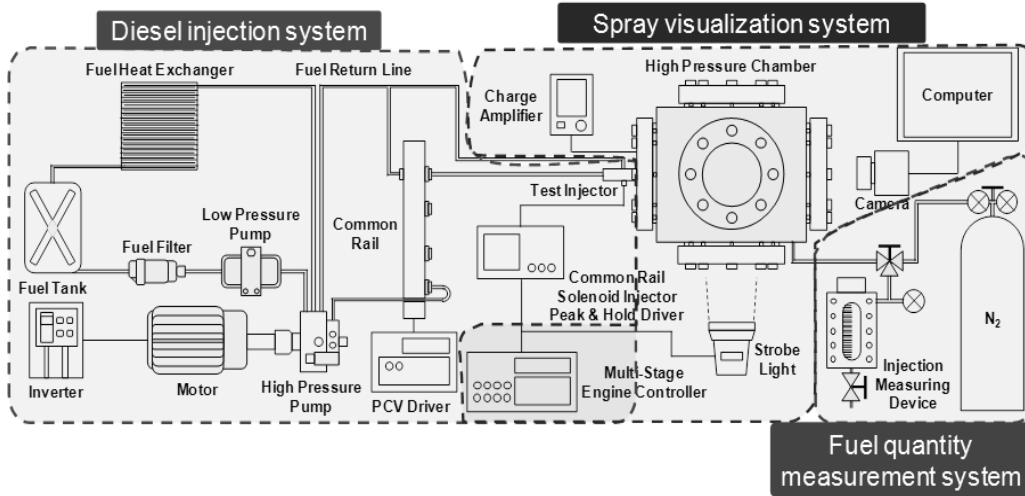


Fig. 3 lay out of CR spray visualization system

였으며 디젤과 바이오디젤 혼합연료를 총672시간 동안 인젝터를 이용해서 연료를 일정한 패턴에서 분사하였다. 분사된 연료는 연료탱크로 회수하였으며 실험을 통해서 연료의 안정도를 알아 볼 수 있었다⁶⁾.

2.1.2 분무가시화 시스템

인젝터 내구성 평가 후 연료가 인젝터에 미친 영향을 알아보기 위하여 커먼레일과 고속카메라(CCD), 정적 연소기등(CVCC)을 이용하여 분무가시화 시스템(Fig. 3)을 구성하였다. 분무 가시화 시스템을 이용해서 내구성 실험에 따라서 연료의 분무 형상이 어떠한 차이점을 보이는지 관찰하였다.

2.2 실험 방법

2.2.1 커먼레일 내구성 평가 실험 방법

커먼레일 내구성 평가 장비를 이용하여 인젝터의 내구성을 평가 실험의 운전 조건은 다음과 같다⁷⁾.

Fig. 2에서와 같은 반복 운전조건을 설정 하였으며 2000 rpm과 4000 rpm을 사용하여 가혹실험 조건 하에서 실험을 진행하였다. 이때 분사 압력은 2000 rpm에서는 900 bar, 4000 rpm에서는 1350 bar로 각

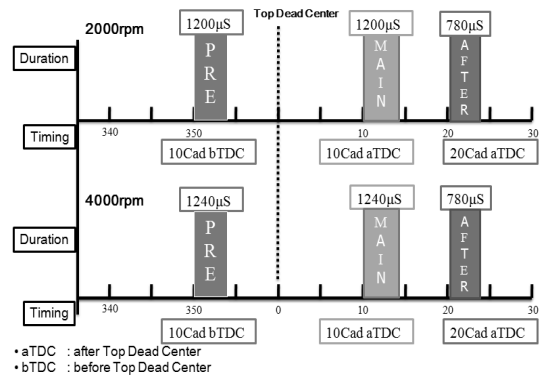


Fig. 4 Injector durability test fuel inject condition

각 설정하여 실험을 진행하였다.

내구성 평가 실험 중에서 분사 조건은 Fig. 4와 같으며 rpm마다 다른 분무 조건을 적용하였다. 이는 높은 rpm에서는 엔진에서 연료 소비량이 많아지기 때문이다⁸⁾.

2.2.2 분무가시화 실험 방법

내구성 평가 실험을 진행한 인젝터를 디젤을 이용해서 커먼레일과 고속카메라, 정적연소기 등을 이용해서 분무형상을 촬영 하였다^{9,10)}.

분무 형상을 촬영하기 위한 실험 시에 실험조건은

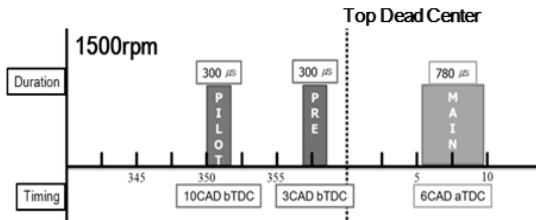


Fig. 5 Spray visualization fuel inject condition

Fig. 5와 같으며 내구성 실험과 달리 1500 rpm을 이용 하였으며 내구성 실험과 같이 다단분사를 적용 하였지만 메인분사 부분의 시간을 길게 주었으며 다른 분사들은 분사가 될 수 있는 최소시간 조건을 주어서 분사가 정상적으로 가능한지를 알아보았다.

3. 실험 결과

바이오 디젤의 첨가비율에 따라서 디젤과 BD20의 내구성 평가 결과는 차이를 확실히 보여 주었다. BD20의 경우 상용디젤과 비교 하여 분무형상과 발달길이, 인젝터에 미치는 영향 등에서 차이를 보여 주었다¹¹⁾.

3.1 분무형상 촬영 결과

분무형상은 Pilot, Pre, Main으로 나누어서 구별이 가능 했으며 그에 따른 결과는 Fig. 6~9과 같다.

분무실험을 진행 하면서 형상을 촬영할 때 사용한 연료는 디젤이다. 디젤의 경우 비교적 분무 해석에 대한 결과가 많으며 바이오디젤의 경우 연료 속에 다양한 성분이 있기 때문에 분무 가시화 등에 어떤 영향을 미칠지 모르며 미립화 정도나 기화정도가 디젤보다 작기 때문에 분무가시화 실험에 사용한 연료는 디젤을 사용하였다.

Fig. 6, 7은 디젤을 연료로 사용하여 내구성테스트를 진행한 인젝터의 분무형상이다. Fig. 6은 내구성 실험 전 인젝터의 분무형상 촬영 결과로서 Main분사 부분의 형상이 균일 하지 않다는 것을 알 수 있다. 하지만 시간이 지남에 따라서 분무형상의 변화를 보여 준다. Fig. 7을 보면 분무형상이 균일화되었다는 것을 알 수 있다.

반면 Fig. 8, 9의 경우 초기 Fig. 8의 결과를 보면 안정적인 형상으로 분사가 되고 있지만 시간이 지나서 Fig. 9의 경우 오히려 5홀의 인젝터 홀 중 형상이

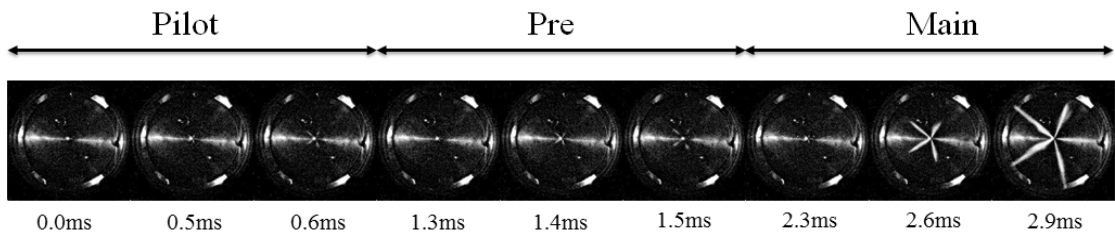


Fig. 6 Diesel 0hr injector spray shapes (Plnj : 350bar, rpm : 1500, CPre : ATM)

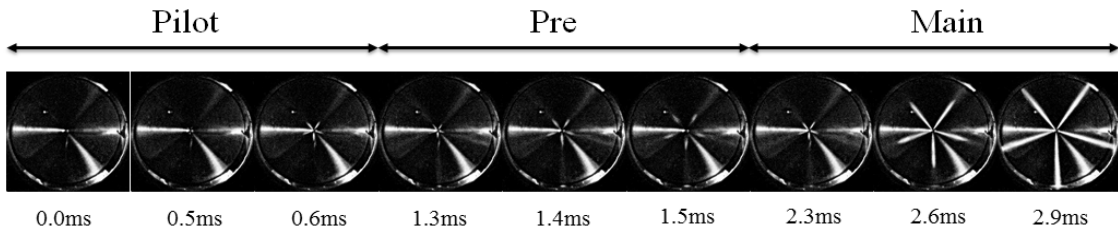


Fig. 7 Diesel 100hr injector spray shapes (Plnj : 350bar, rpm : 1500, CPre : ATM)

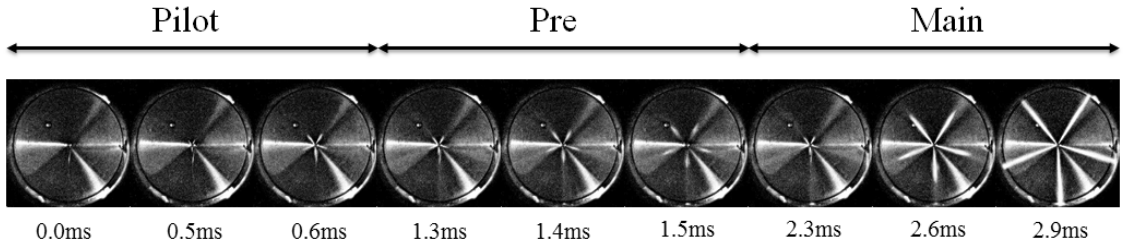


Fig. 8 Diesel 200hr injector spray shapes (Plnj : 350bar, rpm : 1500, CPre : ATM)

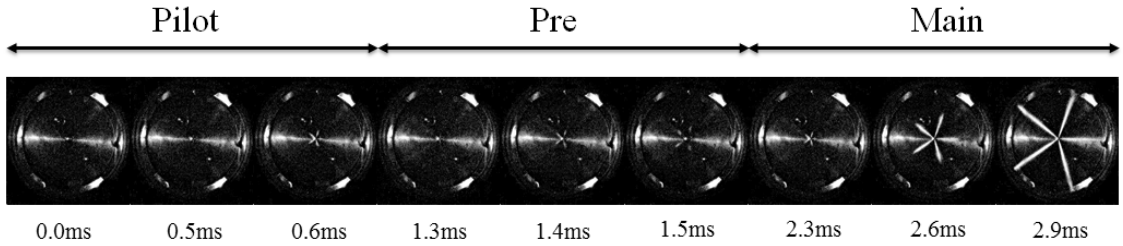


Fig. 9 BD20 0hr injector spray shapes (Plnj : 350bar, rpm : 1500, CPre : ATM)

다른 홀이 모습을 보인다.

3.2 분무관통 길이 측정 결과

Fig. 10은 연료의 분무발달 길이를 그래프로 나타낸 것으로 그래프에서 디젤과 BD20의 실험 결과를 비교하면 디젤 인젝터의 경우에는 시간이 지날수록 안정화 되며 분무 길이가 늘어나지만 분무의 발달이 빨리 진행된다. 최종적으로 디젤 인젝터와 BD20 인젝터의 분무 길이는 같지만 도달하는 시간은 약 0.5ms의 차이를 보인다. 이 차이는 같은 연료와 같은 조건하에서 진행한 실험임으로 이러한 결과는 인젝터 내구성 실험을 진행하면서 인젝터에 미친 영향으로 생각된다.

반면 BD20의 경우에는 0 hr의 분무 발달시간이 100 hr과 200 hr과 비교하여 의 분무 발달 시간이 오히려 늦어진다. 또한 분무 발달길이의 변화도 디젤과 비교하여서 짧은 거리가 분사되었다. 이는 BD20에 함유된 아연(Zn)등과 같은 입자 들이 영향을 미쳐서 이와 같은 결과를 나타낸 것이다.

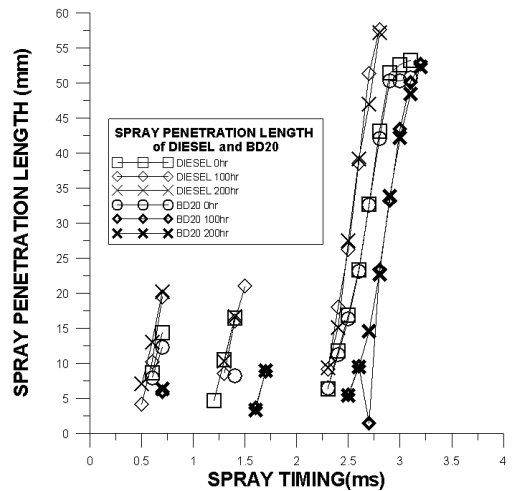


Fig. 10 Spray penetration length analyzed result of diesel and BD20

또한 다단분사 중 분무발달 길이의 차이는 Pre 단 계에서 가장 크게 나타났다. 디젤의 경우 Pre분사의 경우에도 분사발달이 잘 나타나는 반면에 BD20의 경우 함유하고 있는 여러 성분으로 인해서 점도가 크기 때문에 짧은 시간동안 디젤보다 분무 발달이 잘되지 못해서 이러한 결과를 보인다.

3.3 분무 발달 각 측정 결과

Fig. 11은 연료의 분무발달 에 따른 분무각을 그래프 나타낸 것으로 그래프에서 비교하면 디젤을 사용한 인젝터의 경우 초기의 분무 각도는 크지만 감소하는 속도가 매우 빠르다. 하지만 BD20 인젝터의 경우에는 최초의 분사 각도는 작지만 감소가 천천히 일어나며 최종의 분무 각도도 디젤보다 넓은 경향을 보여준다.

디젤의 경우 분사 시간이 지나면서 분무각이 빠르게 줄어들며 분무각이 줄어드는 현상만을 보여주지만 BD20의 경우 최초 0hr 상황에서는 디젤처럼 분무각이 감소하는 형상을 보여주지만 100 hr과 200 hr의 경우 분무각이 분무 초기에는 증가하다가 후기에 다시 감소하는 형상을 보여준다. 이는 디젤보다 BD20의 미립화의 속도가 늦고 인젝터 노즐의 손상으로 더 많은 양의 분사되면서 이러한 결과를 보였을 것

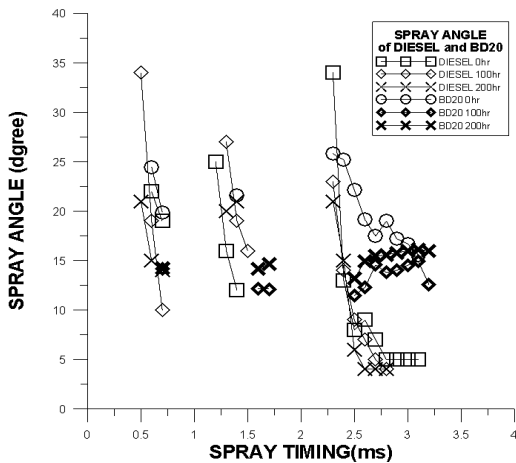


Fig. 11 Spray angle analyzed result of diesel and BD20

Table 2 Result of fuel spray quantity at 2000 rpm

Time(Hr)	Diesel		BD20	
	DI	BI	DI	BI
0	105	106	108	108
100	106	109.5	109	111
200	107	113	110	115

이라 생각된다.

3.4 인젝터 분무유량 실험 결과

Table 2, 3는 디젤과 BD20을 이용하여 인젝터의 내구성 실험 중 각 기준시간 마다 분무 유량을 촬영한 결과이다. 분무 유량 실험을 위한 설정은 Fig. 2-13을 그대로 적용하였다.

2000 rpm (Table 2)에서의 경우 시간이 지남에 따라서 두 인젝터 모드 유량이 증가함을 보여 주었다. 디젤을 사용할 경우 최종적으로 디젤 인젝터는 2 ml, BD20 인젝터는 8 ml가 증가 하였으며 BD20을 이용한 유량 측정의 경우에는 디젤 인젝터는 변함없이 2 ml였으나 BD20 인젝터의 경우 1 ml가 감소하여 총 분사유량이 시작보다 7 ml 증가 하였다. 2000 rpm의 영역은 Fig. 2-9에서도 보였듯이 NEDC모드에서도 토크가 안정되는 단계이며 실제 차량들이 운전 중에 가장 사용하는 영역임으로 이는 앞으로도 개선이 필요한 부분이다.

4000 rpm (Table 3)의 경우 디젤 인젝터는 연료 유량이 오히려 1 ml정도 줄어드는 현상을 보여준다. 인젝터의 작동오류를 생각 할 수 있지만 Fig. 3-13, 14에서 분무형상 및 길이와 각도 또한 안정된 결과를 보여주는 것으로 알 수 있듯이 오류가 아닌 정상작동 범위에 있다고 할 수 있다. 하지만 BD20 인젝터의 경우는 여전히 어떤 연료를 사용해도 분무 유량이 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 분명히 내구성 실험으로 인하여 인젝터가 영향을 받은 것이라 할 수 있다.

Table 3 Result of fuel spray quantity at 4000 rpm

Time(Hr)	Diesel		BD20	
	DI	BI	DI	BI
0	220	220	224	223
100	220.5	223	223	227
200	219	228	223	230

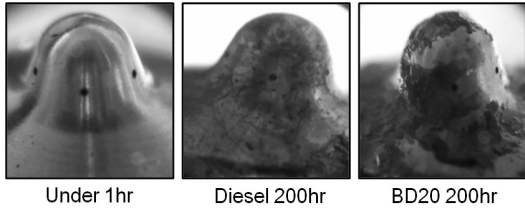


Fig. 12 Surface microstructure of the injector Under 1hr, diesel 200hr and BD20 200hr

3.5 인젝터 노즐 촬영 결과

Fig. 12은 인젝터의 내구성 실험이 종료된 후 인젝터의 표면을 현미경으로 50배 확대하여 촬영한 결과이다. 기준 인젝터의 경우 최초의 분무형상 촬영과 분사 유량 측정 후 사용하지 않았으며 다른 두 인젝터의 경우는 내구성 실험 후 분사 실험 및 유량 측정 후에 촬영한 것이다.

내구성 실험을 진행하는 동안 연소실험을 진행하지 않았기 때문에 Fig. 12처럼 표면에 연료의 흔적이 남았다.

디젤을 사용한 인젝터의 경우는 약간의 흔적이 남았지만 인젝터 노즐구멍 주위는 비교적 깨끗하였다. 하지만 BD20을 사용한 인젝터의 경우 BD20의 높은 점도와 연료의 산화로 인해서 인젝터 표면에 육안으로도 감식 가능한 흔적이 남았다.

이 결과에 대한 더 정확한 결과를 얻기 위해서 전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)을 이용하여 더욱 정밀한 촬영을 실시하였다.

Fig. 13과 Fig. 14은 인젝터의 표면을 35배 확대하여 촬영한 것이다. 디젤과 바이오디젤을 사용한 인젝터를 비교 했을 때 디젤을 사용한 인젝터(Fig. 13)는 초음파 세척 후에는 깨끗한 표면을 보여주는데 반해서 BD20을 사용한 인젝터(Fig. 14)의 경우에는 초음파를 이용하여 세척했음에도 불구하고 연료의 흔적(Fuel wet spot)이 인젝터 노즐 홀 주위에 몰려 있는 것이 관찰되었다. 이는 BD20의 높은 점도와 연료가 산화되면서 일정부분 고체화되었기 때문이다.

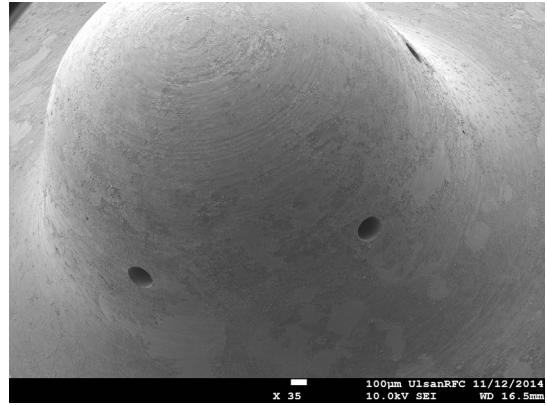


Fig. 13 SEM micrographs of deposited injector surface fuelled with diesel

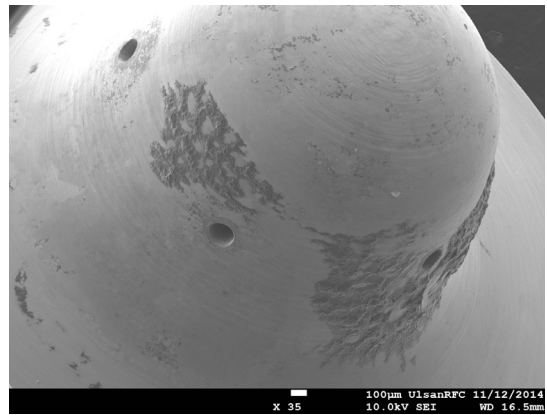


Fig. 14 SEM micrographs of deposited injector surface fuelled with BD20

Fig. 15과 Fig. 16은 인젝터의 노즐 홀을 SEM을 이용하여 300배 확대하여 촬영한 것으로 정면이 아닌 기울여 촬영 한 것은 인젝터 노즐 홀 만 아니라 홀 안쪽의 변화도 알고 싶었기 때문이다. 그 결과 인젝터의 노즐 홀 주위뿐만 아니라 인젝터 내부의 모습까지 알 수 있었다.

Fig. 15의 경우 노즐 홀 주면에 사용한 연료의 흔적이 약간 있을 뿐 부식이나 변형이 관찰되지 않았다. 또한 내부의 통로 역시 잔유물의 흔적만 있을 뿐이다. 하지만 BD20을 사용한 인젝터(Fig. 16)의 경우에는 노즐 홀 주위에 부식이 되어 표면이 변한 흔적이 있으며 인젝터 노즐 홀의 경계부분이 부식되어

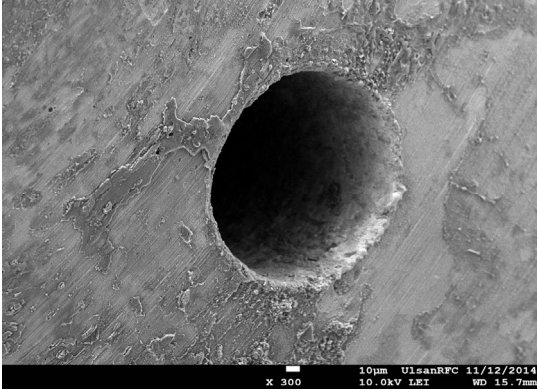


Fig. 15 SEM micrographs of deposited injector hole fuelled with diesel

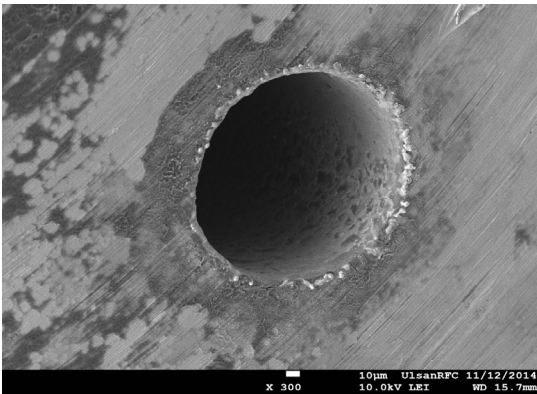


Fig. 16 SEM micrographs of deposited injector hole fuelled with BD20

변형된 것이 뚜렷하게 관찰된다. 이는 장시간 BD20을 사용하면서 연료가 산화되어 부식을 시킨 것으로 생각된다.

4. 결 론

디젤에 바이오 디젤을 혼합하여 인젝터의 내구성 실험을 진행하며 분무 특성을 관찰하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 디젤과 바이오디젤의 혼합연료의 분무 특성을 비교하면 분무 발달 길이나 각도는 큰 차이를 보이지 않지만 연료의 분무 발달 속도가 디젤의 비해

서 바이오디젤 혼합연료가 느리기 때문에 높은 분사 압력을 이용해서 발달 속도를 높이거나 혼합비율을 일정 수준으로 조절해야 한다.

- 2) 디젤과 바이오디젤의 혼합연료를 사용할 경우 기존의 인젝터를 이용 할 경우 내구성등 문제가 발생할 수 있다. 그럼으로 바이오디젤의 함유량이 높은 연료를 사용 할 때는 가능한 사용시간을 짧게 하거나 일정 품질이상의 연료를 사용해야 한다.
- 3) 바이오 디젤을 사용할 경우 산화안정도를 고려하여 기존의 인젝터의 부품을 개조 혹은 개선 후 사용이 필요하다.

결과를 종합 해 볼 때 BD20을 사용하기 위해서는 기존의 시스템을 그대로 사용하기 보다는 개조를 통해서 산화도와 압력조건을 충족시켜야 BD20을 사용할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 지역혁신인력양성사업인 고효율·저공해엔진의 요소 기술개발, 교육부의 재원으로 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업의 연구결과와 중소기업청의 클린신연료 DME를 연료로 하는 중대형선박엔진용 연료공급시스템의 개발의 지원수행된 연구결과입니다. 지원에 감사드립니다.

References

1. Karl Lang, "Biodiesel on the Road to Fueling the Future" National Biodiesel Board, 2001.
2. Tung SC, McMillan ML. "Automotive tribology overview of current advances and challenges for the future", Tribol Int, 2004.
3. Daming Huang, Haining Zhou, Lin Lin, "Biodiesel: an Alternative to Conventional Fuel", Energy Procedia, 1874-1885, 2012.
4. A.M. Liaquat, H.H. Masjuki, M.A. Kalam, M. Varman,

- M.A. Hazrat, "Application of blend fuels in a diesel engine", *Energy Procedia*, 1124-1133, 2012.
5. Yuan Gao, Jun Deng, Chunwang Li, Fengling Dang, Zhuo Liao, Zhijun Wu, Liguang Li, "Experimental study of the spray characteristics of biodiesel based on inedible oil", *Biotechnology Advances*, 2009, pp. 616-624.
 6. Sejun Lee, Sedoo Oh, Soojin Jeong, Ocktaeck Lim, "An Investigation on the Spray Characteristics of DME Common Rail Fuel Injection System with Variation of Ambient Pressure." *Transactions of KSAE*, Vol. 20, No. 2, 2012, pp. 90-97.
 7. Jeong in Seo, Jungwook Park, Jeonghyun Lim, Gyuik Choi, Yunho Jeong, Ocktaeck Lim, Youngjae Lee, Jinyoung Jang, "A Study of Injector Durability Test Used Diesel fuel by Common-rail Fuel System", *KSAE Spring Conference Proceedings*, 2014.
 8. Ahlin K. "Modelling of pressure waves in the Common Rail Diesel Injection System", *Linkopings University*, 121e128, 2000.
 9. Yunho Jeong, Ji Woong Yang, OH Chungwan, Ock Taeck Lim, Jooncheol Kim, Se-Doo Oh, "An Investigation on Spray Characteristics of Diesel - DME Used the Multi- Injection with Various Conditions", *KSAE Annual Conference Proceedings*, 2013.
 10. Olawole Abiola Kuti, Keiya Nishida, Jingyu Zhu, "Experimental studies on spray and gas entrainment characteristics of biodiesel fuel: Implications of gas entrained and fuel oxygen content on soot formation", *Energy* 57, 434e442, 2013.
 11. M.A. Fazal, A.S.M.A. Haseeb, H.H. Masjuki, "Investigation of friction and wear characteristics of palm biodiesel", *Energy Conversion and Management* 67, 251-256, 2013.