

함정용 디젤 연료와 바이오디젤 연료를 적용한 단기통 디젤엔진에서 연료분사시기가 연소 및 질소산화물 배출특성에 미치는 영향

이형민[†]

(원고접수일 : 2014년 4월 4일, 원고수정일 : 2014년 6월 17일, 심사완료일 : 2014년 7월 7일)

Effect of fuel injection timing on the combustion and NO_x emission characteristics in a single cylinder diesel engine applied with diesel fuel for naval vessel and biodiesel

Hyungmin Lee[†]

요약: 본 논문에서는 해군함정의 추진용 디젤엔진의 연료로 사용되는 선박용 디젤연료와 바이오디젤을 단기통 엔진에 적용시켜 연료분사시기에 따른 실린더 내 연소특성, 엔진성능 및 질소산화물 배출 특성을 분석하고, 초고속 카메라를 이용하여 선박용 디젤연료와 바이오디젤연료의 연소과정을 분석하는데 초점을 두었다. 연료분사시기가 BTDC25°CA에서 BTDC5°CA까지 지각될수록 실린더 내 연소최고압력은 점점 떨어졌으나, 토크는 증가하는 경향을 보였다. 질소산화물은 BTDC15°CA에서 가장 높게 측정되었으며, BTDC15°CA를 기준으로 지각 및 진각조건에서는 저감되는 것으로 분석되었다. 연료분사시기가 BTDC5°CA일 때 선박용 디젤연료와 바이오디젤연료의 연소과정을 비교한 결과 산소가 포함된 바이오디젤연료의 착화시기가 선박용 디젤연료보다 빠르나, 화염이 확산되어 발달할수록 화염강도는 선박용 디젤연료가 큰 것으로 분석되었다.

주제어: 선박용 디젤연료, 바이오디젤, 초고속 카메라, 착화시기, 화염강도

Abstract: The objective of this work presented here was focused on analysis of in-cylinder combustion characteristic, engine performance, and nitrogen oxides emission characteristic from marine gas oil for propulsion diesel engine of naval vessels and biodiesel with fuel injection timing in a single cylinder diesel engine. In addition, combustion process was analyzed with a high speed camera of marine gas oil and biodiesel fuel. Retarding the fuel injection timing from BTDC25°CA to BTDC5°CA, in cylinder peak combustion pressure was gradually decreased, however, engine torque showed a tendency to increase. The highest nitrogen oxides level was measured at BTDC15°CA, they were reduced at retarded and advanced condition on the basis of BTDC15°CA. Comparing with combustion process of marine gas oil and biodiesel fuel at BTDC5°CA, self-ignition timing of biodiesel fuel included oxygen content was faster than marine gas oil, however, a cautious observation indicates a slightly higher flame intensity for marine gas oil than biodiesel as a diffusion flame is developing.

Keywords: Marine gas oil, Biodiesel, High speed camera, Self-ignition timing, Flame intensity

Nomenclature

ABDC After top dead center

ATDC After top dead center

[†] Corresponding Author: Department of Naval Ship Propulsion System Engineering, Republic of Korea Naval Academy, Jinhae-gu, Changwon-si, 609-391, Korea, E-mail: hmsj1226@korea.ac.kr, Tel: +82-55-549-1458

BBDC	Before top dead center
BD100	Biodiesel 100%
BTDC	Before top dead center
EVC	Exhaust valve closing
EVO	Exhaust valve opening
IVC	Intake valve closing
IVO	Intake valve opening
LHV	Lower heating value
MEP	Mean effective pressure
MGO	Marine gas oil
NOx	Nitrogen oxides
ROHR	Rate of heat release
SOHC	Single overhead camshaft
SOI	Start of injection
TDC	Top dead center
T_{inj}	Injection time
P_{inj}	Injection pressure
PM	Particulate matters
rpm	revolution per minute

1. 서론

화석연료의 고갈, 급격한 에너지 사용량 증가, 유가의 불안정성, 수송수단에 의한 환경오염 및 기후변화 등은 고연비·친환경 엔진과 화석연료를 대체할 수 있는 대체연료 개발이 절대적으로 필요하다는 것을 시사한다. 디젤엔진은 우수한 열효율 등의 이유로 과거부터 선박 및 군함을 포함한 다양한 운송수단의 주 추진 동력원으로 사용되어 왔으며, 최근에는 커먼레일 시스템의 지속적인 발전으로 엔진 운전조건에 따라 연료 분사압력, 연료분사시기 및 연료분사량 등을 정밀하게 제어할 수 있게 되어 연소품질은 더욱더 향상되게 되었다. 그러나 디젤엔진에서 배출되는 유해물질 중 광화학 스모그를 유발하는 질소산화물(NOx)과 인간의 건강에 악영향을 미치는 입자상 물질(PM) 배출은 여전히 해결해야하는 과제로 남아있다[1]-[3].

현재 사용되고 있는 디젤엔진에 개조없이 일정 비율로 혼합하여 사용할 수 있는 연료로 가장 각광을 받고 있는 연료는 높은 세타가와 산소성분을 가지고 있는 바이오디젤이다. 연료의 분무와 무화

적인 관점에서 바이오디젤 사용 시 높은 밀도가 분무의 관통거리는 증가시키나, 동점도가 크기 때문에 연료의 무화 성능은 떨어지게 된다. 그러나 바이오디젤의 높은 세타가의 영향으로 soot을 포함한 입자상 물질의 배출은 줄어들고 실린더 내의 높은 연소온도가 질소산화물 배출 증가의 원인으로 작용한다[4][5].

본 연구의 목적은 해군함정의 추진용 디젤엔진에 사용되는 선박용 디젤연료와 바이오디젤연료를 시험용 단기통 엔진에 적용시켜 과일릿 분사가 고려되지 않은 조건에서 연료분사시기에 따른 실린더 내 연소 특성, 엔진성능, 질소산화물 배출 특성 분석 및 디젤연료와 바이오디젤 연료의 연소 과정을 초고속 카메라를 이용하여 화염의 발달과정과 착화 특성 등을 분석하는 것이다.

2. 시험장치 및 방법

Figure 1은 해군함정에서 사용하는 선박용 디젤연료와 바이오디젤연료(Table 1)의 연소특성 분석 및 연소 가시화를 위한 시험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 시험장치는 커먼레일 단기통 디젤엔진(Table 2)과 연료공급 시스템, 시험엔진의 회전수를 제어하기 위한 22kW급 전기모터, Labview로 프로그램화된 엔진제어장치, 연소가시화를 위한 가시화 시스템, 연소 특성 분석을 위한 연소해석기 및 질소산화물 측정 센서 등으로 구성되어 있다.

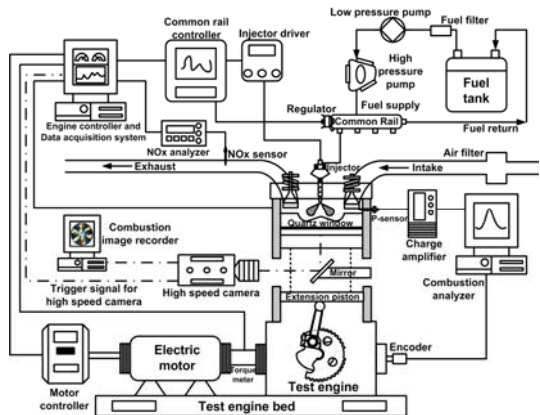


Figure 1: Schematic diagram of experimental system with a single cylinder diesel engine and optical system

함정용 디젤 연료와 바이오디젤 연료를 적용한 단기통 디젤엔진에서 연료분사시기가 연소 및 질소산화물 배출특성에 미치는 영향

연료분사시기에 따른 연소특성을 파악하기 위하여 신호증폭장치(charge amplifier, Kistler, 5018)와 연결된 예열플러그식 압전소자(piezoelectric) 연소 압력센서(Kistler, 6056A)를 장착하였고, 연소가시화를 위해 quartz window를 부착한 확장된 피스톤과 초고속 카메라(Table 3)를 이용하여 연소과정을 촬영할 수 있는 가시화 시스템을 구성하였다.

연료분사시기에 따른 연소특성을 신호증폭장치와 연결된 연소해석기(Mobiltek Eng. Co., Ltd, MT-7002S)를 이용하여 500 cycle 동안 측정된 결과를 평균화하여 분석하였으며, 질소산화물은 Siemens의 NOx sensor module을 이용하여 측정하였다. 엔진회전수는 공회전 상태인 800rpm으로 설정하여 시험을 진행하였고, 솔레노이드 방식의 디젤엔진 인젝터의 연료분사시간은 1.0ms, 연료분사압력은 30MPa로 고정시켰다. 연료분사시기는 BTDC25°C부터 BTDC5°C까지 5°C간격으로 변경하였고, 과일렛 분사는 고려하지 않았다. 초고속 카메라를 이용하여 연소 과정 촬영 시 frame rate와 shutter speed는 16,000 (resolution: 256×256) fps (frame per second) 및 1/32,000초로 각각 설정하였고, 연료분사신호와 동기화시켜 촬영하였다.

Table 1 : Properties of MGO and Biodiesel fuel

Properties		Unit	MGO	BD100
Carbon		wt%	86.97	77.71
Hydrogen			12.64	13.05
Sulfur			0.025	-
Distillation Temperature	10%	°C	227.5	330.5
	50%		296.4	334.3
	90%		352.8	343.0
Density(15°C)		kg/m ³	849.4	882.7
Cetane number		-	52.8	56.3
Kinematic viscosity(40°C)		mm ² /s	3.621	4.341
LHV		MJ/kg	42.7	36.9
Flash point		°C	81.0	154.0

Table 2 : Specifications of a single cylinder diesel engine

Item		Description
Displacement(cc)		498cc
Valve system		SOHC
Bore × Stroke (mm)		83 × 92
Compression ratio		17.7 : 1
Number of valve		2-Intake, 2-Exhaust
Fuel injection system		Bosch common rail
Valve timing	I VO	BTDC7°C A
	I VC	ABDC43°C A
	E VO	BBDC52°C A
	E VC	ATDC6°C A

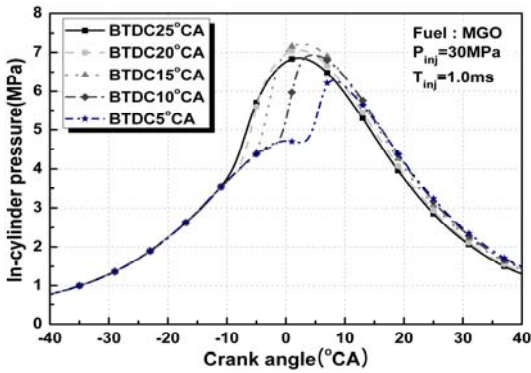
Table 3 : Specifications of a high speed camera

Item	Description
Model	FASTCAM SA3
Frame rate	Up to 2,000fps, Full resolution
Resolution	1024 × 1024
Shutter	Global electronic shutter
Camera control	Gigabit Ethernet or RS-422

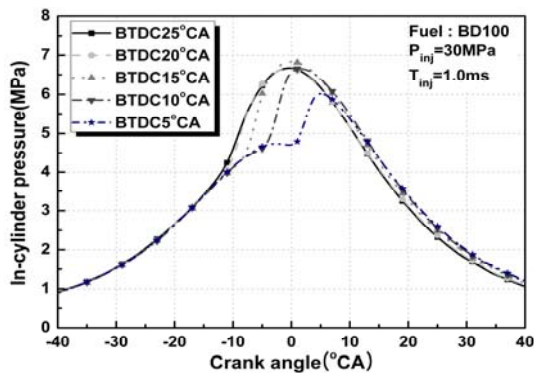
3. 시험결과 및 고찰

Figure 2는 연료분사 시기에 따른 해군함정에서 사용하는 선박용 연료(MGO)와 바이오디젤(BD100)을 시험용 단기통 엔진에 적용 시 실린더 내 연소 압력 선도를 나타낸 결과이다.

시험결과에서 연료분사시기가 BTDC15°C인 경우 실린더 내 연소압력이 가장 높았고, 이후 지각 될수록 낮아지는 경향을 보였다. 이는 실린더 내 예혼합 연소상태가 다소 길어져 진각조건과 비교했을 때 TDC 이후에 연소반응이 발생했기 때문이라고 판단된다. 또한 BTDC15°C를 기준으로 진각될수록 실린더 내 최고 연소압력은 떨어졌는데, 이는 지각조건과 비교했을 때 실린더내의 낮은 압력과 온도에 의해 연료의 착화기간이 길어졌을 뿐만 아니라 낮은 압력으로 인해 연소실 내 분부 도달거리가 길어져 연료의 벽면 부착현상(wall-wetting)에 의한 불완전연소로 열손실이



(a) MGO combustion characteristics



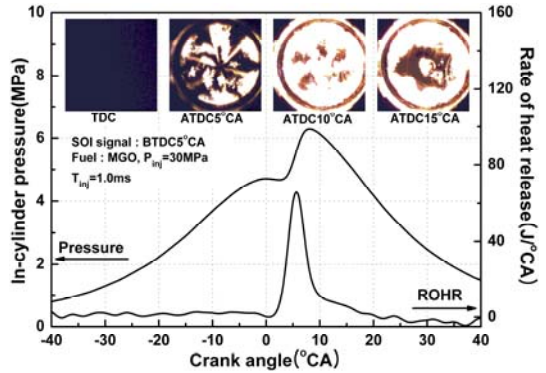
(b) BD100 combustion characteristics

Figure 2: Combustion characteristics comparison of MGO and BD100 with various injection timings

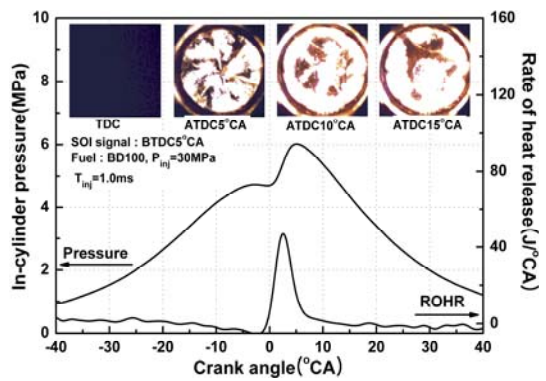
커졌기 때문이라고 판단된다[6].

연료분사시기에 따라 BD100의 연소압력과 비교했을 때 MGO의 연소압력이 다소 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 동일한 연료분사기간(1.0ms)이 적용되었더라도 Table 1에 나타난 것처럼 MGO의 동점도 계수가 BD100보다 적어 소량의 연료가 더 분사되었다고 볼 수 있지만, 가장 큰 이유는 MGO의 발열량이 BD100보다 높기 때문이라고 생각된다.

Figure 3은 연료분사시기를 BTDC5°CA로 했을 때 MGO와 BD100의 실린더 내 연소압력, 열발생 및 화염발달 과정을 나타낸 결과이다.



(a) MGO



(b) BD100

Figure 3: Combustion pressure, ROHR and flame developing process comparison of MGO and BD100 at BTDC5°CA injection timing

Figure 2의 결과분석에서 언급했듯이 분사시기가 지각되면 예혼합 연소가 다소 길어지기 때문에 연소는 TDC이후에서 진행된다. 초기 열발생은 MGO의 발열량이 BD100보다 크기 때문에 높게 나타나는 결과를 볼 수 있으나, 초기 연소는 BD100에서 빨리 이루어지는 현상을 확인할 수 있다. 이는 합산소 연료인 BD100에 포함되어 있는 산소성분이 초기연소에 영향을 미쳤다고 판단된다. 그러나 연료의 발열량의 차이로 실린더 내 연소압력과 열발생은 BD100에서 다소 떨어지는 결과를 확인할 수 있다.

합정용 디젤 연료와 바이오디젤 연료를 적용한 단기통 디젤엔진에서 연료분사시기가 연소 및 질소산화물 배출특성에 미치는 영향

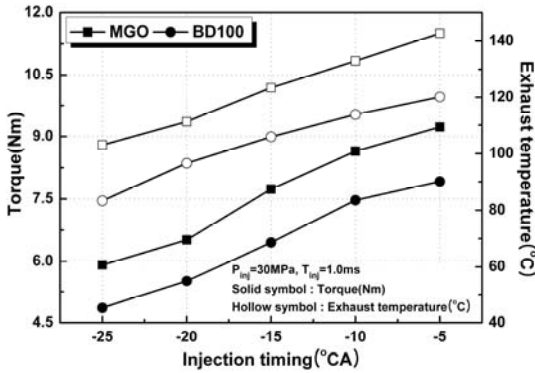


Figure 4: Torque and Exhaust temperature comparison of MGO and BD100 with various injection timings

Figure 4는 연료분사시기에 따른 MGO와 BD100 적용 시 토크 및 배기가스 온도를 측정된 결과이다. 엔진 출력은 토크 및 평균유�효압력(MEP : Mean Effective Pressure)에 비례하는 것으로 생각할 수 있으며, 토크 또한 평균유�효압력과 밀접한 관계가 있다고 생각할 수 있다. 연료분사시기가 진각조건에서 지각조건으로 변경될수록 토크는 증가하는 경향을 보이고 있다. 진각조건에서는 압축행정중에 열발생이 생성되어 음의 일(negative work)이 발생되게 되나, 연료분사시기가 지각조건으로 이동하게 되면서 음의 일은 줄어들기 때문에 토크는 상승하게 된다.

배기가스 온도는 토크와 동일하게 지각조건으로 이동할수록 증가하는데, 이는 분사된 연료가 TDC 이후 까지 연소되는 후연소의 원인이라고 생각된다. 또한 발열량의 차이로 BD100에서 토크 및 배기가스 온도가 MGO에 비해 떨어지는 결과를 확인할 수 있다.

Figure 5는 연료분사시기에 따른 MGO와 BD100에서 배출되는 질소산화물(NOx) 배출특성을 나타낸 결과이다.

질소산화물은 연료분사시기가 진각되면서 점차 증가하다가 BTDC15°CA에서 가장 높은 배출특성을 보였으며, BTDC15°CA 이후 질소산화물의 배출 수준은 확연히 줄어드는 경향을 나타냈다. 일반적으로 질소산화물은 실린더 내부 연소온도가 약 1,500K 이상에서 생성되는 것으로 알려져 있고[6, 7], 높은 수준의 질소산화물 배출은 Figure 2에 나

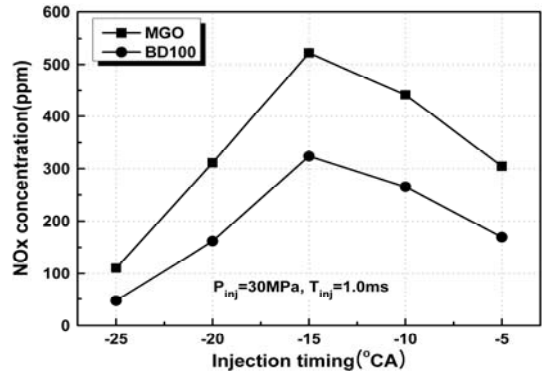


Figure 5: NOx emission characteristics comparison of MGO and BD100 with various injection timing

타난 연소최고압력 및 연소성능과 관련지어 설명될 수 있기 때문에 연소최고압력이 가장 큰 BTDC15°CA에서 질소산화물이 가장 높게 배출되었다고 판단된다.

BTDC15°CA를 기준으로 진각조건에서는 실린더 내부 압력이 낮고 연소 상태가 불안정하기 때문에 질소산화물의 배출량은 줄어드는 것으로 분석되며, 지각조건에서는 TDC 이후까지 지속적인 연소가 이루어지기 때문에 질소산화물 배출특성과 가장 밀접한 실린더 내부 연소온도가 떨어져 배출량이 저감되었다고 판단된다[8].

BD100의 경우 일반적으로 연료속에 포함된 산소성분의 영향으로 질소산화물이 MGO를 적용했을 때보다 다소 증가될 것으로 예상했으나, 실린더 내 연소압력이 MGO를 적용했을 때 보다 낮아 초기 열발생율이 줄어들게 되어 배출량이 저감되었다고 판단되며, 또한 BD100 적용 시 화염온도는 연료속에 포함된 산소 성분으로 인해 MGO보다 높게 발생할 수 있지만, 전체적인 연소온도 상승에는 영향을 미치지 못하여[9] 저속·저압 연료분사의 동일한 운전조건 적용 시 질소산화물 배출특성은 Figure 5와 같은 결과로 도출되었다고 판단된다.

Figure 6은 연료분사시기가 BTDC5°CA일 때 MGO와 BD100의 연소가 진행되는 과정을 나타낸 것이다.

연소과정을 분석해보면 연료분사신호가 적용된 후 연료분사장치(fuel injector) 니들 밸브의 열림시간과 분사된 연료의 착화지연으로 일정시간이 경

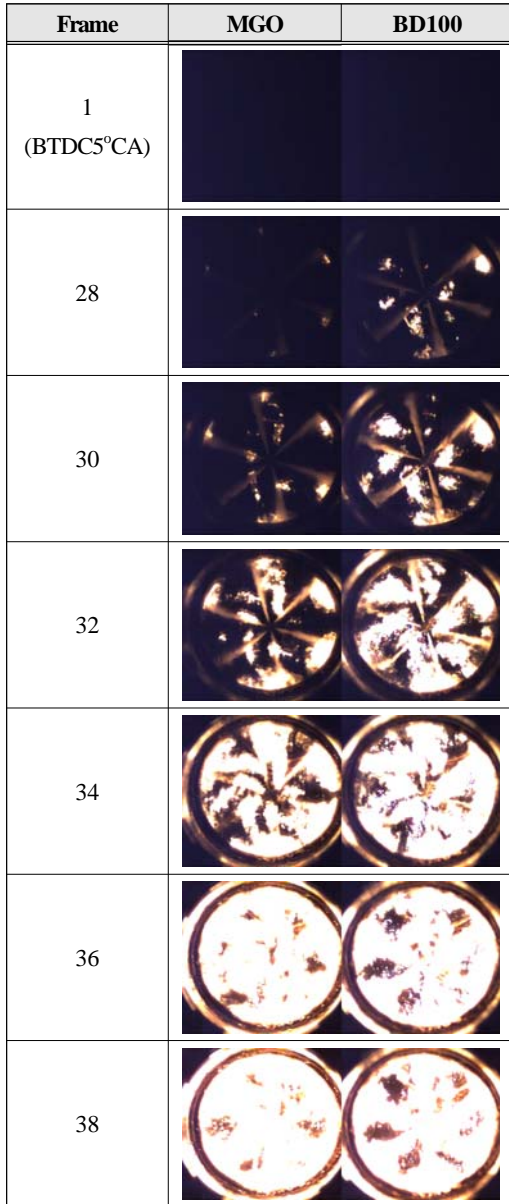


Figure 6: Combustion image comparison of MGO and BD100 after start of injection signal at BTDC5°CA

과한 후 착화되는 현상을 확인할 수 있으며, 화염의 확산은 분사된 연료의 하단부에서 연료분사장치 쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 이후 연소가 진행될수록 확산되는 화염의 구조는 구별이 불가능할 정도로 연소실 전체로 발달하게 된다.

MGO와 BD100의 연소과정을 비교했을 때 BD100

에서 먼저 착화되는 현상을 확인할 수 있으며, 이는 연료속의 포함된 산소 성분의 영향과 MGO보다 높은 세탄가가 착화지연을 줄이는데 영향을 미쳤다고 생각된다. MGO의 경우 착화지연기간이 BD100보다 길지만 착화된 후 화염이 발달되는 강도는 BD100보다 큰 것으로 관찰되었다. 이것은 화염이 확산되는 과정에서 생성되는 soot과 연관시킬 수 있다. BD100의 경우 연료속에 포함된 산소성분으로 연소과정 시 soot 생성율은 낮고 soot 산화율은 높아 화염 발달 시 soot의 광도(soot luminosity)는 저감되기 때문에 MGO의 화염강도는 BD100과 비교했을 때 화염이 발달할수록 크다고 판단되며[10, 11], 또한 MGO가 연소되면서 방출하는 열발생율이 BD100보다 크기 때문이라고 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 해군함정 추진용 디젤엔진에 사용되는 MGO와 바이오디젤 연료의 연소특성, 엔진 성능, 질소산화물 배출특성 및 연소과정을 분석하기 위하여 연료분사시기 제어가 가능한 시험용 단기통 엔진에 적용시킨 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 연료분사시기를 BTDC25°CA에서 BTDC5°CA까지 변경했을 때 지각조건으로 이동할수록 실린더 내 최고연소압은 떨어지나, 바이오디젤 연료보다는 MGO를 적용시켰을 때 연소최고압력은 높은 것으로 분석되었다. 이는 MGO와 바이오디젤 연료의 물성치를 비교했을 때 연료의 발달량이 가장 큰 영향을 미치는 인자라고 판단한다.

(2) 연료분사시기를 지각시킬수록 토크는 증가하는 것으로 분석되었다. 이는 연료분사시기가 지각될수록 압축행정중의 음의 일이 감소되기 때문에 토크는 증가한다. 배기가스 온도는 연료분사시기가 지각될수록 증가하게 되는데 이는 분사된 연료가 착화된 후 TDC 이후까지 연소되기 때문이다.

(3) 질소산화물의 경우 BTDC15°CA에서 가장 높게 측정되었으며, BTDC15°CA를 기준으로 진각 또는 지각될수록 질소산화물의 배출 수준은 저감된다. 바이오디젤의 경우 연료속에 포함된 산소성분의 영향으로 질소산화물이 증가할 것이라고 예측

했으나 동일한 운전조건에서는 질소산화물이 줄어드는 것으로 분석되었다.

(4) 연소가시화 시스템을 적용시켜 MGO와 바이오디젤 연료의 연소과정을 분석한 결과 산소성분이 포함된 바이오디젤의 착화지연이 MGO보다 짧은 것을 확인할 수 있었다. 그러나 화염이 확산되어 발달할수록 화염강도는 MGO에서 높게 나타났다.

후 기

본 연구(논문)는 해군해양연구소의 2014년도 국고연구비를 지원받아 수행되었음.

참고문헌

[1] A. K. Agarwal, D. K. Srivastava, A. Dhar, R. K. Maurya, P. C. Shukla, and A. P. Singh, "Effect of fuel injection timing and pressure on combustion, emissions and performance characteristics of a single cylinder diesel engine," *Fuel*, vol. 111, pp. 374-383, 2013.

[2] M. J. Bae, D. S. Han, Y. J. Chang, J. H. Song, and C. H. Jeon, "A numerical study on effect of pilot injection on combustion and emission characteristics in a marine diesel engine," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 34, no. 1, pp. 37-45, 2010 (in Korean).

[3] S. H. Park, S. H. Yoon, and C. S. Lee, "Effect of multiple-injection strategies on overall spray behavior, combustion, and emissions reduction characteristics of biodiesel," *Applied Energy*, vol. 88, pp. 88-98, 2011.

[4] D. B. Uy, "A study on the use of palm oil(biodiesel-DO) as an alternative fuel on the fuel supply system of marine diesel engines," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 37, no. 7, pp. 685-693, 2013.

[5] J. D. Kim, G. Ainull, K. K. Song, J. Y. Jung, and H. G. Kim, "An experimental study on spray characteristics of diesel and biodiesel fuel," *Journal of the Korean Society of*

Marine Engineering, vol. 35, no. 1, pp. 53-59, 2011 (in Korean).

[6] M. G. Kang, S. J. Kwon, J. P. Cha, Y.-K. Lim, S. W. Park, and C. S. Lee, "Effect of equivalence ratio on the combustion characteristics in a CI engine fueled with biodiesel," *Journal of The Korean Society of Combustion*, vol. 16, no. 3, pp. 52-58, 2011 (in Korean).

[7] K. Akihama, Y. Takatori, K. Inagaki, S. Sasaki, and A. M. Dean, "Mechanism of the smokeless rich diesel combustion by reducing temperature," SAE 2001-01-0655, 2001.

[8] S. K. Hoekman and C. Robbins, "Review of the effects of biodiesel on NOx emissions," *Fuel Processing Technology*, vol. 96, pp. 237-249, 2012.

[9] S. H. Park, S. H. Yoon, and C. S. Lee, "Effects of multiple-injection strategies on overall spray behavior, combustion, and emissions reduction characteristics of biodiesel fuel," *Applied Energy*, vol. 88, pp. 88-98, 2011.

[10] J. Jeon, J. T. Lee, Y. S. Lim, S. I. Kwon, Y. H. Park, J. Cha, K. Lee, and S. Park, "Flame temperature distributions of biodiesel fuel in a single-cylinder diesel engine," *Fuel Processing Technology*, vol. 110, pp. 227-234, 2013.

[11] F. Tiegang and C. F. Lee, "Spray and combustion visualization in an optical HSDI diesel engine fuelled with biodiesel and diesel using multiple injection strategy," *ILASS Americas, 21st Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, pp. 1-11, 2008.

[12] J. Pan, W. Yang, S. Chou, D. Li, H. Xue, J. Zhao, and A. Tang, "Spray and combustion visualization of biodiesel in a direct injection diesel engine," *Thermal Science*, vol. 17, no. 1, pp. 279-289, 2013.