

중질 잔사유의 연소성 분석과 보조 분사에 의한 연소성 향상에 관한 검토

Examination on Combustion Quality Analysis of Residue Heavy Fuel Oil and Improvement of Combustion Quality Using Pre-injection

유동훈*†

Dong-Hoon Yoo*†

(접수일 : 2014년 11월 04일, 수정일 : 2014년 11월 30일, 채택확정 : 2014년 11월 30일)

Abstract: Due to the development of the petroleum refining technology and continuously increased demand from markets, a quantity of gasoline and diesel oil produced from a restricted quantity of crude oil has been increasing, and residual fuel to be used at marine diesel engines has been gradually becoming low quality. As a result, it was recently reported that trouble oils which cause abnormal combustion such as knocking with extreme noise and misfire from internal combustion engines were increasing throughout the world. In this study, an author investigated ignitability and combustion quality by using combustion analyzer with constant volume(FCA, Fuel Combustion Analyzer) and middle speed diesel engine about MDO(Marine Diesel Oil), HFO(Heavy Fuel Oil), LCO(Light Cycle Oil) and Blend-HFO which was blended LCO of 1000 liters with HFO of 600 liters. Moreover, for betterment of ignitability and combustion quality of injected fuels, multi-injection experiment was carried out in the diesel engine using Blend-HFO. According to the results of FCA analysis, ignitability and combustion quality was bad in the order of MDO<HFO<Blend-HFO<LCO. And combustion of blended HFO caused extreme knocking in experiments of the diesel engine. However, sub-injection with injection timing of BTDC 20 CA(Crack Angle) defused the knocking that was caused from drop of fuel quality.

Key Words : Residue fuel, Pre-injection, Multi-injection, FCA, CCAI

1. 서 론

석유 정제기술의 발달로 원유로부터 시장의 수요가 많은 휘발유나 경유의 획득률이 증가하면서, 선박의 연료로 사용되는 잔사유는 중질화, 저 연

소성의 문제를 안게 되었다.¹⁾ 특히, 최근에는 촉매반응(FCC : Fluid Catalytic Cracking, RFCC : Residue Fluid Catalytic Cracking) 기술을 이용하여, 감압 가스오일(VGO, Vacuum Gas Oil)로부터 분해유를 생산함으로써, 부산물로 발생하는 경질순환

*† 유동훈(교신저자) : 독립해상법인 해상기술안전연구소
E-mail : komorebi023@gmail.com, Tel : +81-422-3560

*† Dong-Hoon Yoo(corresponding author) : Environment / Power and Energy Department, National Maritime Research Institute.
E-mail : komorebi023@gmail.com, Tel : +81-422-3560

유(LCO, Light Cycle Oil)나 정제된 현탁유(CLO, Clarified Oil)를 감압잔사유(VR, Vacuum Residue)와 혼합·생산함으로써 선박에서 사용하는 연료의 질은 더욱더 하락하고 있는 실정이다.²⁾ 이러한 LCO나 CLO는 포화 탄화수소가 거의 존재하지 않고, 방향족 또는 이중결합 이상의 불포화 탄화수소로 구성되어 있기 때문에 디젤엔진과 같은 내연기관에서 이러한 물질이 많이 혼합된 연료를 사용할 경우 착화성 악화를 불러일으키고, 착화시에는 극심한 노킹 등을 유발할 가능성이 크기 때문에 엔진의 안전 운전성을 해치고, 나아가 엔진 소모품의 조기마모 및 열화, 장기적으로는 엔진의 내구성에 악영향을 미칠 수 있다.³⁾ Fig. 1은 과거 선박용 연료 제조구조와 현재 제조구조의 차이점을 간략하게 나타내었다.

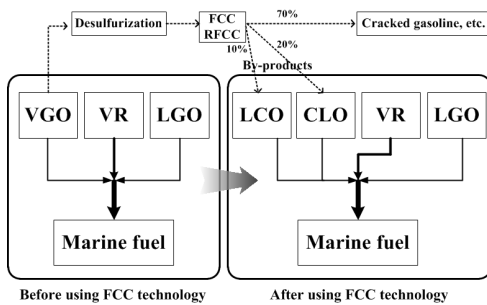


Fig. 1 Changing of manufacture method on marine fuel

이러한 연료유의 저급화에 따라 결과적으로 선박운전 시에 이상연소를 일으키는 문제발생 연료의 증가가 최근에 눈에 띄게 증가하고 있으며, 문제발생 연료의 연료분석결과 방향족 물질의 증가에 의한 착화성지수(CCAI, Calculated Carbon Aromaticity Index)의 증가와 세탄지수(CI, Cetane Index)의 하락으로 나타났다. 선박엔진에서 이러한 저급연료의 안정적인 연소를 도모하기 위한 대책으로는 양질의 연료를 혼합하는 방법과 연료의 분사제어를 통한 착화시기 개선방법, 연료유에 첨가제를 혼합함으로써 분사된 연료의 증발속도를 높이거나 초기 자착화 온도를 낮추어 연료연소를 돕는 방법 등을 생각할 수 있다. 하지만 양질의

연료를 혼합하는 방법이나 첨가제를 사용하는 방법은 부가적인 설치비용이 필요하지 않다는 장점을 가진 반면, 장기적인 운전 면에서는 비용적인 문제를 피할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 이러한 조악연료의 착화·연소성에 대한 기초적 평가를 위해 MDO(Marine Diesel Oil), HFO(Heavy Fuel Oil), LCO, HFO와 LCO가 3:5로 혼합·제조된 연료(Blend-HFO)를 정용적 연소분석(FCA, Fuel Combustion Analyzer)장치와 실제의 중속 디젤엔진에 적용하여 연소특성을 검토하였고, 보조적인 연료분사(Pre-injection)의 시행이 디젤엔진의 연소에 미치는 영향에 대하여 조사하여 착화성 및 연소성 개선에 대하여 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 FCA에 의한 연소해석

Fig. 2는 본 실험에 사용된 FCA(FIA-100/FCA)의 개략도를 나타낸다. FCA는 FIA(Fuel Ignition Analyzer) 분석방법⁴⁾의 일종으로 전반적인 연료의 연소과정을 평가할 수 있는 장치이다. 본 실험에 사용된 FCA는 정용적 연소용기(약 600 cm³)와 연료 분사노즐, 연료주입 액추에이터, 흡·배기관으로 구성되어 있는데, 연소용기는 3개의 밴드히터에 의하여 가열되고, 용기내부의 압력은 압전센서에 의하여 계측된다.

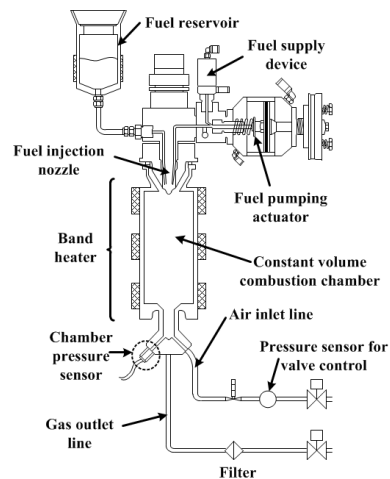


Fig. 2 Schematic diagram of constant volume combustion chamber

연료분사 액추에이터는 벤드히터에 의해 가열된 용기내부 공기의 압력이 4.5 MPa, 온도가 773 K에 도달한 시점에서 구동되어 3.3 msec. 동안 약 0.1 mL의 연료를 용기내부에 분사시키고, 분사된 연료는 착화지연기간을 거쳐 자착화 연소를 시작하게 된다. 이때의 연소용기 내부의 압력을 측정함으로써 Fig. 3의 압력변화와 압력상승률에 대한 상세한 데이터를 얻게 되는데, 연소실 내부압력은 모든 연료가 연소를 마쳤을 때가 가장 높고 그 이후부터는 외부와의 열교환에 의해 점차 낮아진다.

또한, 본 실험장치는 정용적식 압력용기이기 때문에 Fig. 3 하단의 압력상승률 그래프는 열발생률 선도와 같게 되고, 본 논문에서는 이것을 ROHR(Rate of Heat Release)로 표기하였다. Fig. 3의 그래프에서 주 연소지연기간(MCD, Main Combustion Delay)은 최종 증가압력(Max PI, Max Pressure Increase) 값의 1/10 상승 지점까지 걸린 시간으로, 착화지연기간(ID, Ignition Delay)과 착화 후부터 Max IP×0.1까지의 기간(PCP, Pre Combustion Period)을 합한 기간과 같다. 또한, 그래프에서 주 연소기간(MCP, Main Combustion Period)은 Max IP×0.1지점에서 Max PI×0.9 지점까지로 정의하고, 후 연소기간(ABP, After Burning Period)은 연료 분사시기부터 연소 종료시기까지의 기간(EC, End of Combustion)에서 주 연소기간을 뺀 기간(EMC, End of Main Combustion)으로 정의한다. 이러한 연료의 연소성 측정은 영국 석유회사(IP, Institute of Petroleum)가 제안한 방법으로 IP541/06이라는 이름으로 CIMAC(The International Council on Combustion Engines)에서도 채용하고 있다.⁵⁾

본 실험에 사용된 연료유는 MDO(Marine Diesel Oil), HFO, LCO, HFO와 Blend-HFO에 대하여 실험을 하였고, 25번의 FCA시험 시행 후 결과들의 평균을 분석결과 값으로 채용하였다. Table 1은 본 실험에 사용된 연료들의 물성치를 나타낸다.

LCO의 동점도는 2.696 cSt로써 MDO의 동점도와 비슷한 수치를 갖고 있으므로, LCO의 낮은 동점도의 영향에 의해 Blend-HFO 또한 10.38 cSt의 낮은 동점도를 나타내고 있다. 또한, LCO와 Blend-HFO의 CCAI수치에서 알 수 있듯이, 두 연

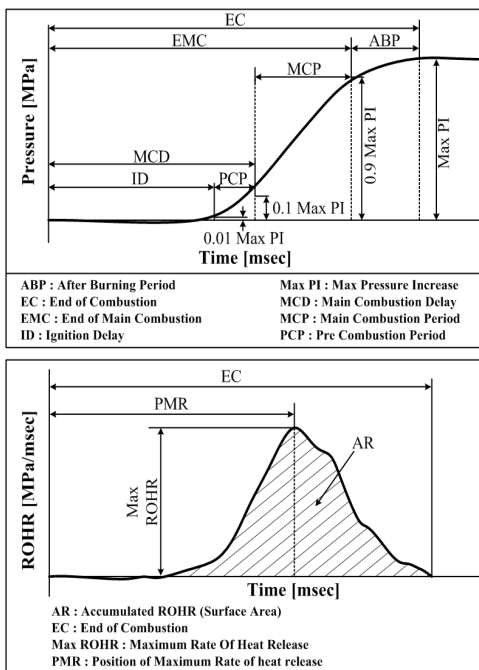


Fig. 3 Measured results as fuel combustion analyzer (FCA)

Table 1 Test fuel properties used at experiments

Item	Density(15℃)	Viscosity(50℃)	Water	Sulfur	CCAI	Calorific value
Unit	g/cm ³	mm ² /s (cSt)	% (m/m)	% (m/m)	-	MJ/kg
MDO	0.8733	2.352	0.01	0.52	845	43.52
HFO	0.9906	349.6	0.2	2.93	852	44.87
Blend-HFO	0.9517	10.38	0.05	1.27	868	43.13
LCO	0.9328	2.696	0.01	0.25	897	42.36

료유 모두 잠정적인 문제발생 연료의 가능성을 충분히 만족하고 있다. 실제로 본 실험의 중속 디젤엔진 연소해석 실험에서 LCO만의 연소는 연료의 조기소염과 엄청난 노킹을 일으켰기 때문에 엔진의 보호와 데이터의 연속성 결여로 실험을 중지하였다.

2.2 실제 엔진에서의 연소해석

실험에 사용된 엔진은 직접분사식 중속 디젤엔진으로 Table 2에 엔진의 사양을 나타낸다. 실험엔진은 캠에 의한 기계식 분사시스템을 사용하는데, 본 실험에서는 주 분사 전에 보조분사를 시행할 필요가 있으므로 기존의 기계식 분무시스템에 전자제어식 분무시스템을 추가하여 설치하였다.

Table 2 Test engine specification

Test Engine	MU323DGSC(Matsui)
Cylinder	3
Stroke	4
Injection method	Direct injection
Bor×stroke(mm)	230×380
BMEP(MPa)	1.78
Compression ratio	13
Continuous output	257.4 kW/420 rpm

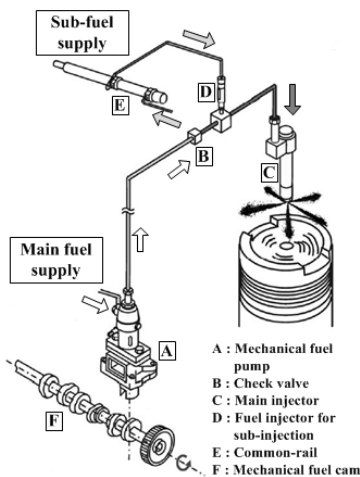


Fig. 4 Experimental apparatus for hanging fuel injection patterns

Fig. 4는 변경된 연료공급 시스템의 개략도로써 추가된 분무시스템에 의한 연료 분사패턴 변경과정을 보면, 주 분사용 연료의 압력은 캠으로 구동되는 기계식 연료펌프 「A」로부터 발생하여 체크밸브 「B」를 통과 후 분사노즐 「C」에 도달한다. 한편, ECU(Engine Control Unit)에 의해 분사시기와 분사시간이 제어된 보조연료가 전자제어 노즐 「D」로부터 주 연료관에 공급되는데, 이때 보조공급관의 압력은 주 연료공급관보다 훨씬 높은 압력으로 공급되기 때문에, 연소실 분사노즐인 「C」의 개방압력을 초과하여 연료를 분사시킨다. 이러한 과정을 통해 전자제어 노즐의 분사시기 및 분사시간의 제어로 연소실 내부로 분사되는 연료를 제어함으로써 연소패턴의 변경이 가능하게 된다. 체크밸브 「B」의 역할은 주 연료가 공급되기 전후에 「D」로부터 주입된 연료가 「A」와 「B」 사이의 관에 역류하여 「C」의 제어에 영향을 미치는 것을 방지하기 위함이다. 노즐 「C」는 연료분사구경이 0.32 mm이며, 7개의 분사구를 갖고, 개방압력은 약 26 MPa이다. 또한, 보조분사용 전자제어 연료분사장치는 6기통, 15.7 리터, 최고압력 180 MPa의 자동차용 디젤엔진의 연료분사 시스템을 사용하였다.⁶⁾

실험조건으로는 선박용 엔진출력 3승 곡선의 25% 부하(64 kW/ 265 rpm), 50% 부하(129 kW/ 333 rpm) 그리고 75% 부하(193 kW/ 382 rpm)에서 연소실 압력과 열발생량에 대하여 조사하였다. 또한, 모든 실험에서 캠에 의한 주 분사시기는 BTDC 10도로 고정하였고, 보조분사의 분사시기는 BTDC 20도이며, 보조분사 분사량은 주 분사 분사량 대비 25% 부하가 10.9%(m/m), 50% 부하가 6.5%(m/m) 그리고 75% 부하가 5.8%(m/m)이다. 다만, 부하에 따라 주입되는 보조분사연료의 주입비율이 다른 것은 부하에 따라 엔진의 연료소비량이 다르기 때문으로 연료주입량은 모두 같다.

3. 실험 결과 및 검토

3.1 FCA에 의한 연료 연소성 해석

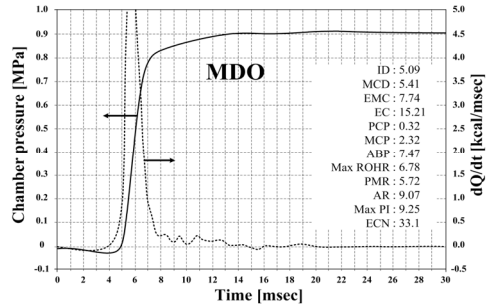
Fig. 5는 MDO, HFO, LCO 및 Blend-HFO의

FCA 분석으로부터 얻어진 결과를 나타낸다. 각 그래프에서 연료별 Max IP 값이 완전히 일치하지는 않았는데, 연료들의 발열량과 동점성의 차이가 영향을 미친 것으로 생각된다. 이러한 Max IP 값의 차이는 실험결과들에 다소의 영향을 미칠 수 있지만, ID, PCP 등의 계수에 미치는 영향이 적기 때문에 결과에 큰 오차를 야기하지는 않았다고 사료된다. 또한, 이렇게 얻어진 데이터의 분석을 통하여 추정세탄가(ECN, Estimated Cetane Number)를 구할 수 있는데, 다음의 경험식이 이용된다.

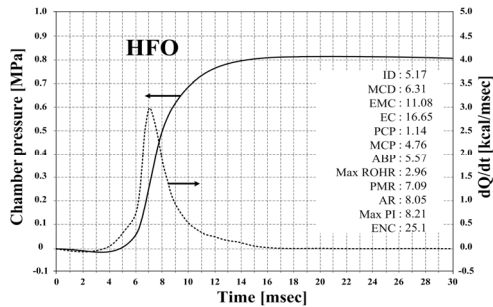
$$ECN = 153.15e^{-0.2861MCD} \quad (1)$$

HFO는 MDO보다 긴 착화지연기간과 낮은 Max ROHR을 갖고 있었는데 연료의 증발속도가 MDO가 HFO보다 빠르기 때문으로 사료된다. 또한, LCO의 MCD는 7.49이고, PCP가 1.52로써 분석연료 중에 가장 긴 ID 값과 PCP 값을 갖고 있었는데, 실제 엔진에서 이러한 연료가 많이 함유된 연료의 사용은 예혼합 연소기간의 증가에 의한 극심한 노킹을 야기하고 연소불량으로 이어질 가능성이 극히 높다. 한편, HFO와 LCO가 혼합된 Blend-HFO는 HFO와 LCO의 사이의 값을 갖고 있었는데, 여전히 문제발생 연료의 성질을 확인할 수 있었다.

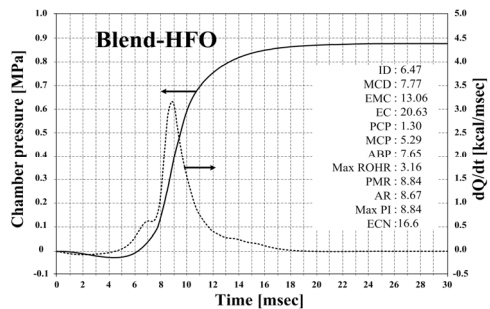
MCP와 ABP 값은 MDO<HFO<Blend-HFO<LCO 순으로 큰 값을 갖고 있었고, 연소성의 하락으로부터 기인하는 연료연소의 장기화가 원인으로 사료된다. 이러한 결과는 Table 1의 CCAI와 Fig. 5의 ECN 결과와도 일치하는데, 연소성이 낮은 연료일수록 큰 CCAI 값과 낮은 ECN 값을 갖고 있음을 알 수 있다. ClassNK⁷⁾의 문제발생 연료에 대한 FCA 분석을 통한 평가 보고서에 따르면 연소실 압력이 4.5 MPa, 연소실 온도가 723 K의 초기조건에서 착화지연기간이 약 7 ms 이상과 연소기간이 25 ms 이상의 조건에 집중되어 있다는 것을 발표하였는데, 본 실험의 초기온도 773 K을 고려하였을 때 LCO와 Blend-HFO는 확실한 문제발생 연료에 속하는 것으로 판단된다. 또한, Takeda⁸⁾는



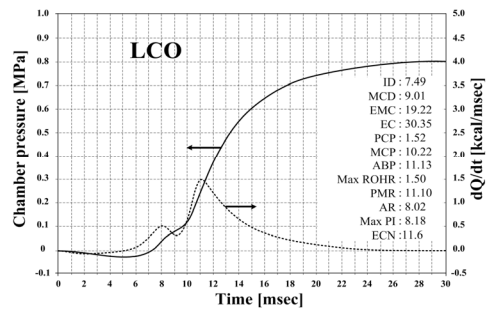
(a) MDO



(b) HFO



(c) Blend-HFO



(d) LCO

Fig. 5 Results of fuel combustion at FCA

문제발생 연료의 조성분석을 시행하여 문제발생 연료가 정상유보다 다환족 물질의 함유비율이 높다는 것을 밝혔는데, 본 연구에서 사용한 Blend-HFO 역시 LCO의 고 다환족 방향성물질의 혼입으로 착화지연기간과 연소기간이 증가하였다 고 사료된다.

3.2 중속 엔진에서 연료 연소성 해석과 다단 분사 방법을 사용한 연소성 개선

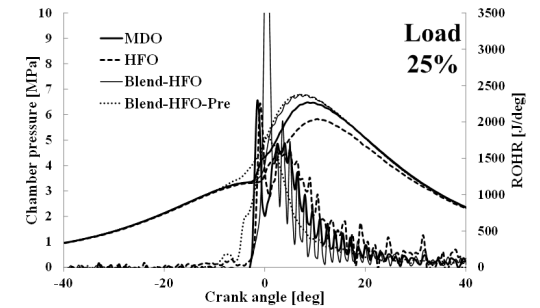
본 실험에서는 상기의 FCA에서 사용한 연료들을 실제 중속 디젤엔진에 적용하여 연소실의 압력을 계측하여 열발생률을 계산함으로써 연료착화성과 연소성을 파악하였고, Blend-HFO의 연소성 실험에서는 보조분사 시행에 의한 분사패턴의 변경이 연소성에 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

Fig. 6은 상기의 연료종류에 따른 연소실 압력과 열발생률을 나타낸다. 다만 본 실험에 사용된 HFO는 연료의 수급관계로 밀도:0.974 g/cm³, 동점도:182.3 mm²/s를 갖는 HFO를 사용하였기 때문에 본 논문에서는 참고 값으로 그래프에 포함시켰다. 하지만 Blend-HFO는 Table 1의 연료를 사용하였다.

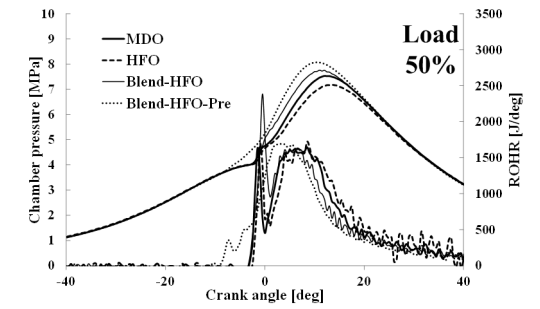
3.1의 FCA 실험에서 보인 것처럼 양호한 착화성과 연소성을 나타낸 연료는 MDO와 HFO이며, Blend-HFO는 극심한 착화지연 현상과 노킹이 발생하고 있음을 모든 부하에서 확인할 수 있는데, 늦은 착화로 인해 노즐로부터 분사된 연료의 증발기간이 길어져 착화 시에 증발된 연료의 급격한 연소가 원인으로 사료된다. 이러한 예혼합 연소기에서의 높은 열발생률은 연소실 각부에 열부하(열 충격)를 주어 피스톤 압축링의 파단, 흡기 밸브와 배기밸브의 수명단축, 실린더 라이너 및 헤드의 조기교체 등 디젤기관에 여러 가지 악영향을 미칠 것으로 사료된다.

같은 그래프에서 Blend-HFO-Pre라고 표기된 그래프는 Blend-HFO와 동일한 주 분사 분사시기를 갖고 같은 주변조건에서 BTDC 20도의 보조분사를 시행하였을 경우의 압력과 열발생률을 나타낸다. 결과에 의하면 모든 부하에서 보조분사는 압력의 상승시기와 열발생 시작시기를 빠르게 하고, 예혼합 연소기간을 거의 존재하지 않게 만들며,

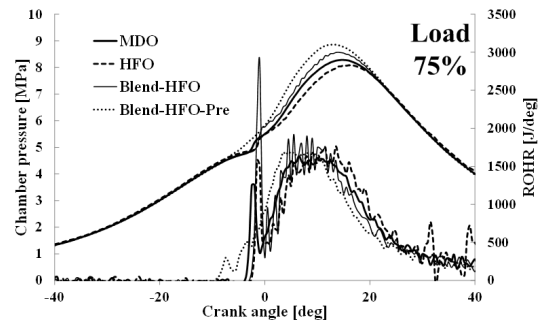
확산연소 개시시기 또한 빨라지게 하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) Engine load : 25%



(b) Engine load : 50%



(c) Engine load : 75%

Fig. 6 Chamber pressure and rate of heat release at each engine loads

이것은 기계식 캠에 의한 연료분사가 시작되기 전에 전자제어에 의해 미리 분사된 연료가 증발·착화함으로써 연소실 온도를 높였고, 캠에 의해 분사된 연료의 불씨를 생성시켜 안정된 주 분사의 착화가 이루어졌다고 생각된다. 실제로 Blend-HFO를 사용하고 보조분사를 시행하지 않았

을 경우에는 큰 소음을 동반한 불규칙한 운전을 지속하였지만, 보조분사를 시행함에 따라 MDO의 연소 시보다 정숙한 운전이 이루어졌다. 이상의 결과로써 조약한 연료를 사용하는 디젤엔진에서 11%(m/m) 미만의 보조분사를 사용하면 노킹과 이상연소를 회피할 수 있음을 확인하였다.

3. 결 론

본 연구는 MDO, HFO, LCO 그리고 HFO와 LCO를 3:5로 혼합한 Blend-HFO 연료를 정용적식 연소기에 분사하여 조약연료의 상세한 연소형태를 파악하였고, 같은 연료를 중속 디젤엔진에 적용하여 조약연료가 실제 디젤엔진의 연소에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 또한, 보조분사의 시행이 조약연료의 연소성 개선에 미치는 영향에 대하여 조사하였는데, 11%(m/m) 미만의 연료를 BTDC 20도에서 분사하여 연소과형과 열발생률을 분석하였다. 이하는 실험으로부터 얻어진 결과이다.

(1) FCA 분석에 의하면 MDO<HFO<Blend-HFO<LCO의 순으로 착화지연기간, 후 연소기간과 전체 연소기간이 길었다. 이러한 결과는 CCAI와 ECN의 분석결과와도 일치하여 연소성이 결여된 연료일수록 큰 CCAI 값과 낮은 ECN 값을 갖고 있었다.

(2) ECN:16.6, CCAI:868을 갖는 Blend-HFO를 실제 중속엔진에서 사용하였을 때 극심한 착화지연 현상과 노킹이 발생하였다.

(3) 조약연료를 사용하는 디젤엔진에서 보조분사(Pre-injection) 방법을 사용하면 노킹과 같은 불량연소를 개선할 수 있었고, 보조분사가 예혼합 연소기간을 짧게 한 것이 원인으로 분석됐다.

Reference

1. E. Y. Na, S. Y. Baik, 2009, "A Study on Types and Reasons of Engine Troubles Related to Fuel Oil", Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol. 12, No.

- 3, pp. 143-150.
2. C. Takahashi, 2013, "Property and Ignitability of Residue Fuel Oil", Journal of the Japan Institute of Marine Engineering, Vol. 48, No. 3, pp. 76-81.
3. J. K. Lim, 1988, "An Analysis on the Main Engine Stop Frequency by Trouble and Repair Cost", Research Report of Kunsan University, Vol. 22, No. 1.
4. D. H. Yoo, O. Nishida, H. Fujita, J. K. Lim, 2010, "Combustion Characteristics of Emulsified C-heavy Oil in Constant Volume Combustion with High Temperature and Pressure", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 34, No. 2 pp. 243-249.
5. CIMAC, 2011, "Fuel Quality Gaude - Ignition and Combustion", The International Council on Combustion Engines.
6. M. Takagi, Z. Xu, A. Ohashi, 2013, "Study on Ignition and Combustion Control of Low Cetane Number Fuels", Journal of the Japan Institute of Marine Engineering, Vol. 48, No. 6, pp. 131-138.
7. ClassNK, 2007, Recent Tendency on Marine Fuel Oil of Engine Trouble, 2007 NK Report.
8. Takeda, Takasaki, Struckmeier, Baba, 2011, "Counter Effect of High-Aromatic Cutter Stocks on Bunker Fuel Combustion", Proceedings of the International Symposium on Marine Engineering, D2-2.