

선박발전기용 디젤엔진의 부분부하에서 에너지 효율 개선에 관한연구

정균식[†]

(원고접수일 : 2014년 7월 22일, 원고수정일 : 2014년 9월 1일, 심사완료일 : 2014년 9월 11일)

Energy efficiency improvements in part load for a marine auxiliary diesel engine

Kyun-Sik Jung[†]

요약 : 국제해사기구 해양환경보호위원회에서 그린하우스가스(GHG)의 주범인 CO₂ 배출량 감축을 위해 선박에서 대기로 방출하는 CO₂의 양을 지수화 하고자 활발한 논의가 진행되고 있다. 이에 따라 에너지 효율 개선을 위해서 선체의 설계변경, 마찰저항을 줄이기 위한 도료개발, 엔진의 열효율을 개선하기 위한 첨가제 개발, 연료를 절감하기 위하여 저속운전 등 다양한 방법들이 적용되고 있다. 선박의 주 기관에서는 전 부하영역에서 효율을 높이기 위하여 전자엔진이 사용되고 있으나, 선박용 발전기 엔진은 여전히 캠으로 연료분사와 흡·배기 밸브를 구동하는 기계식 작동엔진이 대부분이다. 또한 선박용 발전기 엔진은 선박의 과부하 방지 시스템 내에서 운전되므로 대부분의 운전은 80% 이하의 부분부하 영역에서 사용되고 있다. 따라서 100%부하에 세팅된 발전기 엔진은 부분부하에서 효율적인 운전을 위해서는 연료분사시기 재조정이 필요하다.

본 연구는 현재 운항중인 선박발전용 디젤엔진의 운용특성을 파악하여 부분부하에서 연료분사시기 재조정을 통하여 연료소비량 개선에 관한 결과를 보고 하고자 한다.

주제어 : 부분부하, 저속운전, 선박발전용 디젤엔진, 과부하 방지장치

Abstract : The reduction of CO₂ emission has been discussed in the Marine Environment Protection committee in the International Maritime Organization as the biggest causes of GHG for the purpose of indexing CO₂ amounts released into the atmosphere from ships. Accordingly, various methods including the change in the hull design to improve energy efficiency, the coating development to reduce friction resistances, the additives development for improving thermal efficiency in an engine, the low-speed operation to reduce fuel consumptions, and etc. have been applied. The main engine of a ship is an electronic engine for improving the efficiency of the whole load area. However, marine generator engines still use mechanical drive engines in intake, exhaust, and fuel injection valve drive cams. In addition, most of marine generator engines in ships apply a part-load operation of less than 80% due to an overload protection system. Therefore, marine auxiliary diesel engine set at 100% load is necessary to readjust in order to efficient operation because of part-load operation.

The objective of this study is to report the results of the part-load fuel consumption improvement by injection timing readjust to identifying the operational characteristics of a marine generator engine currently operated in a ship.

Keywords : part-load, Low-speed operation, Marine generator engine, Overload protection system

[†]Corresponding Author: Training Ship HANARA, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-Gu, Busan 606-080, Korea, E-mail: vikings99@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4477

1. 서론

최근 국제해사기구 해양환경보호위원회에서 그린하우스가스(GHG)의 주범인 CO₂ 배출량 감축을 위해 선박에서 대기로 방출하는 CO₂의 양을 지수화 하고자 활발한 논의가 진행되고 있다. 대표적인 지수로서 에너지효율 지수(EEDI), 에너지효율 운전지표(EEOI), 에너지 효율관리 계획(SEEMP)등이다. 특히 에너지 효율관리 계획은 2013년 1월부터 시행되고 있다. 이에 따라 에너지 효율 개선을 위해서 선박의 설계변경, 마찰저항을 줄이기 위한 도료개발, 엔진의 열효율을 개선하기 위한 첨가제 개발, 연료를 절감하기 위하여 저속운전 등 다양한 방법들이 연구·적용되고 있다. 그러나 이러한 모든 연료절감 방법들은 상대적으로 연료소비가 많은 주 기관에 국한 되어 있다. 주 기관에 비하면 연료 소모량이 적지만 상당한 연료를 소모하고 있기 때문에 보조기관인 발전기용엔진에도 관심을 확대할 필요가 있다고 생각된다.

실제로 운용되고 있는 선박에서 성능분석의 대상은 주로 주 기관이며, 계측기 또한 주 기관에 대하여 개발되고 있다.

이에 저자는 선행연구에서 주 기관뿐만 아니라 발전기용엔진에도 적용 가능한 연소분석장치를 개발하여 적용함에 있어 늦어진 분사시기를 재조정하여 연비를 5~12.8% 절감 하였다[1].

더 나아가 발전기용엔진의 운전특성을 연구·활용하여 부분부하에서 연료분사시기 재조정을 통하여 연비 향상과 후 연소(After burn) 개선 방법을 제시하고 그 결과를 보고하고자 한다.

최근 엔진은 전 부하영역에서 효율을 높이기 위하여 자동차의 경우 전자엔진(CRDI)이 개발되어 사용되고 있으며, 선박의 주 기관도 전자엔진(ME Engine, RTFLEX Engine)의 사용이 점차 확대되고 있는 실정이다. 그러나 선박용 발전기엔진은 여전히 캠으로 연료분사와 흡·배기 밸브를 구동하는 기계식 작동엔진이 대부분이다. 이러한 발전기용 엔진은 100% 부하 조건에서 연료분사시기, T/C의 매칭 등이 이루어져 시운전을 거쳐 장착되어 있다. 그러나 선박의 발전 시스템에서는 과부하 방지장

치가 있어 대부분 80~85% 부하 이상 영역에서는 과부하로 인식하여 병렬운전이 되기 때문에 85% 이상의 부하에서는 운전될 수 없다.

또한 대부분의 선박용 발전기엔진은 입·출항의 짧은 기간에 최고의 부하영역인 70~80% 부하에서 운전되고, 그 외의 항해와 정박 중에는 50~70% 부하영역에서 주로 운전 된다.

그리하여 선박에 사용되고 있는 발전기엔진은 연소조건이 좋지 않은 부분부하에서 운전되기 때문에 연료소비율이 높고, 흡·배기 밸브의 오손, 후 연소로 인한 배기가스 온도의 상승 등으로 이어져 정비기간이 단축되는 경우가 많다.

따라서 본 연구는 선박용 발전기엔진의 부하에 따라 점화지연기간을 계산함으로써 부분부하에서 연료분사시기 진각조정을 확인하고, 진각조정을 통하여 후 연소 개선뿐만 아니라 연료소모량 절감에 도움이 되고자 한다.

2. 실험 장치와 방법

본 실험 대상 선박에서 과부하 방지 시스템은 83%부하에 세팅되어 있으며, 부하운용 특성은 다음 Table 1과 같다.

Table 1에서와 같이 최고부하는 입출항시 75%부하로 운전되며, 주 운전영역이 50% 범위 내에 있다. 이러한 선박에서 운전되고 있는 발전용 엔진의 운전영역은 설계영역과 상당한 차이가 있으며, 저부하 영역에서 주로 운전되고 있다. 그 외 타 선박에서의 발전용 엔진 운전특성도 정도의 차이는 있으나 크게 다르지 않은 것으로 오랜 선박엔지니어 경험(10년 이상)으로 알게 되었다.

Table 1: Characteristics of operation loads

Operation status		Load range	Operation equipment
Arrival/Departure in port		Max. 75%	Bow thrust
Nav.	Winter	35~45%	-
	Summer	55~70%	Air Cond.
In Port	Winter	25~40%	-
	Summer	55~65%	Air Cond.

Table 2: Specification of the test engine.

Item	Specification
Engine Type	4-Stroke, single acting Diesel Engine with T/C
NO. of Cylinder	5
Bore/Stroke	225/300mm
Compression ratio	13.0
Output	725BHP at 720rpm
Firing order	1-2-4-5-3
Injection timing	BTDC 14
Pmax(100%Load)	11.5MPa

Table 3: Specification of the used encoder.

Item	Specification
Type	E6C2-CWZ6C
Source Power	DC 5V~24V
Plus/Rev.	360
Output	A, B, Z
Tolerance	1/4T

Table 4: Specification of the fuel

Products	Bunker-A
Gravity API@60°F	24.6
S.G.@15/4°C	0.9060
Viscosity Kin.cst	8.22(@50°C)
Flash Point	76°C
Sulfur	1.146%
Water & Sediment	0.01%

연소압력 분석 장치는 엔진의 연소실에서 연소의 과정을 직접 눈으로 확인하기 어렵기 때문에 연소과정의 압력 데이터를 크랭크 각도별로 수집하여 직접정보(평균유효압력, 압력상승률, 체적에 대한 압력변화, 사이클 변화, 녹킹 및 실화 등)와 간접정보(열발생률, 연소가스온도 등)를 해석하는 장치이다[1].

실험대상 엔진은 선박의 발전기엔진(Generator engine)으로 **Table 2**에 주요 사양을 나타낸다. **Table 3**은 실험에 이용한 각도센서의 사양을 나타낸다. 엔진의 실린더 번호는 선수 측을 기점으로 1번 실린더로 정하였으며, 크랭크샤프트 끝단에 각도센서를 장착 하고, 1번 실린더의 기하학적 TDC 위치에 1회전에 1회 펄스를 발생하는 각도센서의 Z 펄스를 일치시켰다.

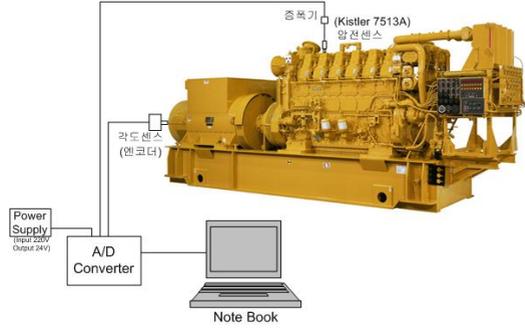


Figure 1: Schematic diagram of the experimental apparatus.

또한 데이터 수집 방법으로는 엔코더의 A펄스 (360 PPR sampling interval: 1.0°CA)를 트리거로 압력 데이터를 수집하는 ‘각도기준 계측방법’을 이용하였다[2].

Figure 1은 실험장치의 개략도를 보여주고 있다.

Figure 2와 **Figure 3**은 연소분석장치로부터 수집한 연소압력을 분석하여 열발생률 선도를 보여주고 있다. 이 선도로부터 열이 발생하는 점화의 시점을 알 수 있다.

본 실험대상 선박의 발전기엔진의 연료분사 시기는 345°CA(BTDC 15°CA)에 세팅(Setting)하여 운전되고 있으며, 위의 **Figure 2**와 **Figure 3**에서 보듯이 50% 부하에서는 약 356°CA부근에서 75% 부하에서는 354°CA부근에서 점화가 됨을 알 수 있다.

이는 부하가 증가될수록 소기 온도와 압력이 증가하여 압축행정 말기에 온도가 더욱 증폭되어 분사된 연료가 착화하는데 까지 시간이 짧아지는 것으로 생각된다.

착화지연기간의 실측은 0.7 ~ 3ms 정도라고 하였으며, 연료 및 부하가 변하지 않으면 기관회전수와는 관계없이 대체로 일정(약 1/600s = 1.67ms)하다[3].

본 실험엔진의 회전수는 720rpm이므로 50%부하에서의 점화지연기간은 2.55ms, 75%부하에서는 2.08ms 정도로 계산된다. 또한 부하가 더 증가 한다면 소기온도와 압력은 더욱 상승 될 것이기 때문에 점화지연기간은 더욱 짧아 질 것으로 생각된다.

또 50%와 75%의 부하간의 점화지연기간의 차이가 약 2°CA정도 이며, 부하가 증가하여 100%부하

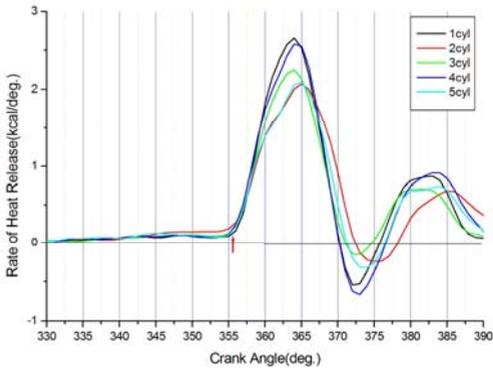


Figure 2: Rate of heat release after injection timing set with a 50%(240kW) load

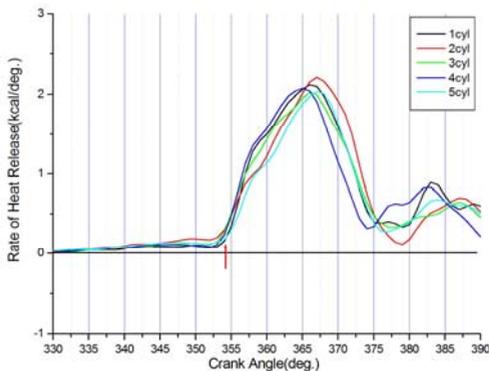


Figure 3: Rate of heat release after injection timing set with a 75%(360kW) load

부근에서 약 2°CA 짧아 진다면 위의 Jeong 등의 연구내용과 거의 일치하게 됨을 알 수 있다[3].

따라서 **Figure 2**과 **Figure 3**에서 보여주듯이 부하가 낮아질수록 점화지연기간이 길어져 후연소가 증가할 가능성이 높다. 또한 여기서 TDC후 열발생률 곡선은 부하가 낮을수록 불안정 연소가 크게 일어나는 것으로 생각된다. 특히 100% 부하에서 연료분사시기가 결정되어 진다면, 선박의 발전기용 엔진은 과부하 방지 시스템 내에서 운전되기 때문에 부분부하에서 효율을 향상시키기 위해서는 연료분사 시기가 재조정되어야 할 것으로 생각된다.

본 연구는 이러한 결과를 토대로 현재 운용되는 선박의 엔진을 대상으로 연료분사시기를 진각 하여 연소상태 분석과 연료소모량의 변화를 조사하였으며, 제한조건과 실험방법은 다음과 같다.

- (1) 연료분사시기 진각 조정은 최고폭발압력을 증가시키기 때문에 100% 부하의 최고폭발압력 (117bar)을 초과하지 않는 범위까지 조정한다.
- (2) 연료분사시기 조정은 모든 부하영역에서 만족할 수 없기 때문에 목표 부하를 정한다. 본선 발전기의 부하운용특성상 최고부하가 75% 부하이므로 75%부하를 목표로 하였다.
- (3) 부분부하에서의 연료효율 향상이 목표이기 때문에 배기가스(NOx)의 측정은 고려하지 않았다.
- (4) 실험은 2°CA씩 진각을 하여 각각 BTDC 15°CA, 17°CA, 19°CA로 하였으며, 연소분석과 연료소모량을 계산하였다.

여기서 연료소모량은 본 실험 선박에 장착된 유량계(Flowmeter)를 이용하였으며, 사용연료는 **Table 4**에서 보여주고 있다.

3. 연소분석과 고찰

본 실험 선박의 발전기 엔진의 연료분사 시기는 345(BTDC 15°CA)에 세팅 하여 사용 되고 있기 때문에 연료 캠 샤프트를 진각방향으로 2°CA씩 진각 하였다.

Figure 4와 **Figure 5**는 각각 50%와 75%에서 연료분사시기 진각에 따른 $P-\theta$ 선도를 보여주고 있다. 분사시기를 진각 함에 따라 Pmax 값이 증가 하였으며, Pmax의 위치도 TDC쪽으로 앞당겨 졌음을 알 수 있다. Pmax의 증가 폭은 BTDC 15°CA에서 BTDC 17°CA로 2°CA진각 할 때가 이후 19°CA로 진각 할 때 보다 증가 폭이 더 큼을 알 수 있다. 또한 연료분사시기를 진각 함으로서 Pmax가 증가하는 엔진의 특성을 잘 보여주고 있으며, 따라서 에너지 효율이 증가 하는 것으로 생각된다. **Table 5**에서 연료분사 시기 진각에 따른 최고폭발압력과 증가의 정도를 나타내고 있으며, 4°CA 진각했을 경우 100%부하보다 약 1MPa 낮음을 알 수 있다.

Figure 6과 **Figure 7**은 열발생률 선도를 보여주고 있다. 연료분사시기가 진각 됨에 따라 열발생률의 피크(Peak)값이 증가함을 알 수 있다. 또한 피크의 위치가 TDC와 가까워짐을 확인 할 수 있다.

Figure 7의 점선 원 부분은 연료분사시기가 진각

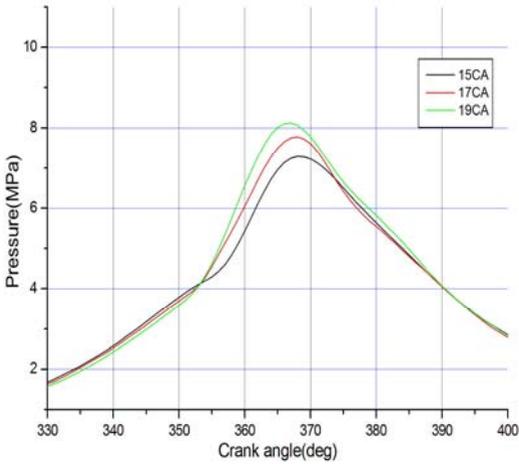


Figure 4: $P-\theta$ diagram of the 50% load(240kW)

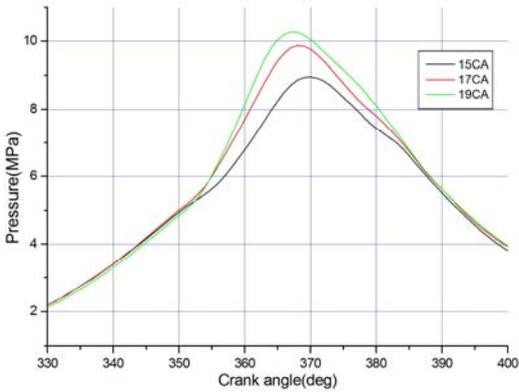


Figure 5: $P-\theta$ diagram of the 75% load(360kW)

Table 5: Comparison of the $P-\theta$ diagram for fuel injection timing for each load

	50% Load			75% Load		
	CA (BTDC)	15	17	19	15	17
Pmax (MPa)	7.29	7.78	8.13	9.24	10	10.52
Inc. (MPa)	-	0.49	0.35	-	0.76	0.52

됨에 따라 불안전연소 부분이 많이 해소 되고 있음을 알 수 있다. 또한 연돌에서의 배기가스 색도 진각 될수록 맑게 보임을 확인하였다. 여기서 100% 부하에서 분사시기의 결정은 부분부하에서 연소 조건과 상이하므로 부분부하로 운전되는 엔진은 알맞

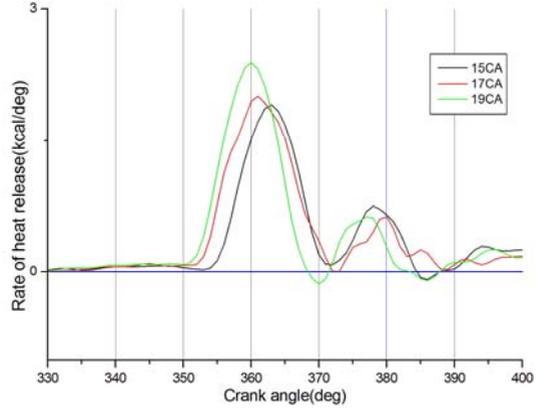


Figure 6: Rate of heat release according to adjustments fuel injection timing with the 50% load.

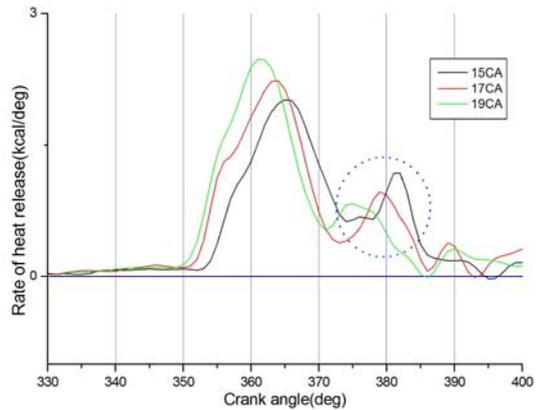


Figure 7: Rate of heat release according to adjustments fuel injection timing with the 75% load.

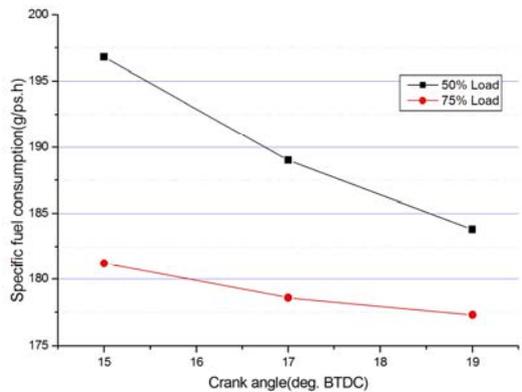


Figure 8: Specific fuel consumption according to adjustments of fuel injection timing for each load.

은 연료분사조건으로 재조정이 필요함을 알았다.

Figure 8은 연료분사시기 진각에 따른 연료소비를 부하별로 보여주고 있다. 여기서 전체적으로 연료분사시기를 진각 함으로서 연료소모량이 감소함을 알 수 있으며, BTDC 15°CA에서 17°CA로 2°CA 진각하는 구간이 17°CA에서 19°CA로 진각하는 구간보다 더 많이 감소함을 알 수 있다. 이는 앞의 **Table 5**와 **Figure 4**, **Figure 5**에서의 Pmax 상승의 결과와 일치하고 있음을 알 수 있다[4].

또한 연료분사시기 진각을 통하여 저 부하 영역이 고 부하 영역에서 보다 연료소모량이 훨씬 더 많이 개선됨을 알 수 있다.

4. 결 론

이상의 선박에너지 효율관리계획을 목적으로 연료소모량을 절감하고 연소상태를 개선하기 위하여 선박 발전용 엔진의 운전 상태를 고려한 연료분사시기의 새로운 조정을 통한 실험결과를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 선박발전용 엔진은 과부하 방지를 위한 시스템에서 운전되기 때문에 운전 상태를 고려한 최적의 운전조건으로 재조정이 필요함을 알았다.

2. 부분부하에서 운전되는 선박발전용 엔진은 적당한 연료분사시기 조정을 통하여 연료소모량을 개선할 수 있었고, 불안정 연소를 상당히 개선할 수 있었다.

3. 연료분사시기 재조정을 통하여 분사시기를 4°CA진각 함으로 50%부하영역에서 연료소모량을 약 6.6% 개선 시켰고, 75% 부하영역에서는 2.2% 감소되는 효과가 나타났다. 이러한 결과는 저 부하영역에서 연료분사시기 진각이 연소조건을 개선할 가능성이 더 높음을 시사한다.

참고문헌

[1] K. S. Jung, "Improvement of combustion efficiency for marine auxiliary diesel engine", *Journal of the Korea Society of Marine Engineering*, vol. 38, no. 3, pp. 233-239, 2014 (in Korean).

[2] K. S. Jung, J. U. Lee, J. A. Jung, and J. S. Choi, "Estimation of engine output for marine diesel engine", *Journal of the Korea Society of Marine Engineering*, vol. 35, no. 4, pp. 436-442, 2011 (in Korean).

[3] H. C. Jeong and J. S. Choi, *Lecture of Internal Combustion Engine*, Hyosung Publisher, pp. 88, 143, 1999 (in Korean).

[4] J. K. Lim, S. G. Sho, H. H. Lee, and H. S. Im, "Effects of fuel injection timing on performance in old marine diesel engine", *Journal of the Korea Society of Marine Environment & Safety*, vol. 19, no. 5, pp. 525-530, 2013 (in Korean).