

선박발전기용 디젤엔진의 연소효율 개선에 관한연구

정균식[†]

(원고접수일 : 2013년 7월 23일, 원고수정일 : 2013년 9월 2일, 심사완료일 : 2013년 9월 11일)

Improvement of combustion efficiency for marine auxiliary diesel engine

Kyun-Sik Jung[†]

요약: 엔진성능 분석을 위해서는 기관의 정확한 출력이 기본적으로 중요한 인자이며, 또한 오늘날 내연 기관에서 연소압력 분석 장치는 엔진의 연구와 개발, 환경규제 및 엔진의 유지관리를 위해서 필수 장비로 대두 되고 있다. 엔진의 출력뿐만 아니라 연소상태를 분석하여 엔진의 상태에 대한 올바른 판단을 유도하고, 구체적인 개선방법을 제시하여 실질적으로 연료소비량을 절감하여, 엔진의 유지관리 및 운항 비 절감에 도움이 되도록 하기위해서는 이를 위한 도구가 절실히 필요하다.

따라서 본 연구는 개발된 측정 장치를 이용하여 선박용 발전기관인 실험엔진의 연소분석을 행하였으며, 실험기관의 불규칙적인 연소상태를 체크하고 재조정하여 안정된 운전 상태를 유지할 수 있었음은 물론 연료절감에 기여할 수 있었다. 이상의 결과로 엔진출력을 정확하게 측정할 수 있는 새로운 방법에 의한 측정 장치가 개발되었으며, 그 유용성이 입증되었다고 판단된다.

주제어: 연소분석장치, 엔진출력, 연소최고압력 게이지

Abstract: The accurate engine output is basically one of important factors for the analysis of engine performance. Nowadays in-cylinder pressure analyzer in internal combustion engine is also an indispensable tool for engine research and development, environment regulation and maintenance of engine. The combustion analysis is desperately needed in order to induce a correct judgment on the condition of the engine and suggest the specific ways to improvement as well as the correct engine output. And these tool is advantageous to reduce fuel consumption and maintenance of the engine.

In this study, using the developed measuring kit, combustion analysis of marine generator engine which was adapted as test engine was carried out. It was verified that the good operation condition of the engine as well as contributing to fuel savings by checking and readjusting accurately the irregular combustion of the test engine were accomplished. From the results all above, it was recognized that the measuring kit by new method for engine output was developed and verified for its utilities.

Keywords: The combustion analysis, Engine output, Pmax gauge

1. 서 론

오늘날 선박용 디젤엔진의 연소압력 분석 장치는 선박엔진의 연구와 개발, 환경규제 및 엔진의

유지관리를 위해서 필수 장비로 대두 되고 있다. 또한 측정 오차를 최소화 하여 정확도를 높이는 것이 요구된다.

한편, 선박에서 기관의 연소상태 분석은 연소압

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

력 측정을 위한 연소최고압력(P_{max})게이지 등으로 파악하고 있으나, 이러한 방법으로는 연소상태를 분석하고 판단하여 개선방법을 찾기에는 한계가 있다. 따라서 엔진의 출력뿐만 아니라 연소상태를 분석하여 엔진의 상태에 대한 올바른 판단을 유도하며, 구체적인 개선방법을 제시함으로써 실질적으로 연료소비량을 절감하여, 엔진의 유지관리 및 운항비 절감에 도움이 되도록 하기 위해서는 이를 위한 도구가 절실히 필요하다.

선행연구를 통하여 엔진의 출력은 물론 연소해석에 필요한 데이터 계측장치와 해석을 위한 S/W를 개발하였다[1]. 이 장치를 이용하여 현재 운항 중인 선박의 발전기용 과급 디젤엔진을 대상으로 부하별 실린더 내 압력을 계측하여 1 사이클 기간 중 압력의 변화를 고찰하여 연소상태를 해석 하고, 이를 토대로 연료소비율의 개선을 꾀할 수 있었다.

따라서 본 논문은 개발된 연소해석 장치 및 S/W를 실제 엔진에 활용하여 얻은 결과를 보고하고자 한다. 즉, 발전기용 과급 디젤엔진의 연소성능을 파악하고 이를 토대로 연비성능을 개선한 결과를 보고한다.

2. 연소압력 분석 장치와 실험방법

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.

대부분의 선박에서 발전기용 엔진의 상태를 점검하기 위하여 **Table 1**과 같은 엔진상태 보고서를 작성하게 된다. 여기서 사용되는 장비는 아날로그 연소 최고압력 게이지와 엔진에 설치된 각종 온도계 및 압력게이지를 통하여 엔진의 정보를 수집하게 된다. 본 실험엔진은 운전시간 2,000h 이상 지나면 장기간의 저 부하 운전으로 인하여 흡기 밸브가 쉽게 오손이 되는 경향이 있다[2]. 따라서 **Table 1**에서 2번 실린더의 압축압력이 낮게 계측이 되기 때문에 실린더 헤드 분해정비 시간이 도래하

였음을 짐작할 수 있다. **Table 1**과 **2**는 각각 30%, 50% 부하에서의 엔진상태 보고서이다.

Table 2에서는 **Table 1**에서 예측한 결과에 따라 실린더 헤드 분해정비 후의 상태에 대한 엔진상태 보고서이다. 여기서 압축압력은 전체적으로 회복이 되었음을 확인 할 수 있다. 그러나 연소최고압력 값은 1번 실린더에서 약 8bar 정도 높게 나타나고, 배기온도는 3번 실린더에서 가장 높게 나타나며 최대/최소값의 편차가 75°C로 상당히 높게 나타나고 있다. 이러한 정보들만으로 엔진의 상태를 정확하게 진단하기가 쉽지 않으며, 엔진의 특성과 숙련된 경험을 요구하게 된다.

따라서 본 연구에서는 누구나 쉽게 엔진의 상태를 점검하고 최적의 상태를 유지하여 연료를 절감하고, 정비기간 및 엔진의 수명을 연장하는데 도움이 될 수 있도록 개발한 연소해석 장치를 이용하여 엔진성능을 개선한 결과에 대하여 설명하고자 한다.

Table 1: Condition report of generator engine before overhaul at engine output 140kW

Cyl. No.	1	2	3	4	5
Fuel rack	11	11	11	11	11
P_{max} [bar]	59	49	50	53	52
Exh. gas temp. [°C]	285	295	300	250	275
P_{comp} [bar]	30	25	30	30	30

Table 2: Condition report of generator engine after overhaul at engine output 240kW

Cyl. No.	1	2	3	4	5
Fuel rack	13.5	13	13	13	12.5
P_{max} [bar]	68	60	60	60	61
Exh. gas temp. [°C]	312	270	345	275	280
P_{comp} [bar]	32	32	32	32	32

실험대상엔진은 선박의 발전기엔진(Generator engine)으로 Table 3에 주요 사양을 나타낸다. Table 4는 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.

또한 데이터 수집 방법으로는 엔코더의 A펄스(360 PPR sampling interval: 1.0°C)를 트리거로 압력 데이터를 수집하는 ‘각도기준 계측방법’을 이용하였다[3].

Figure 1은 실험장치의 개략도를 보여주고 있다.

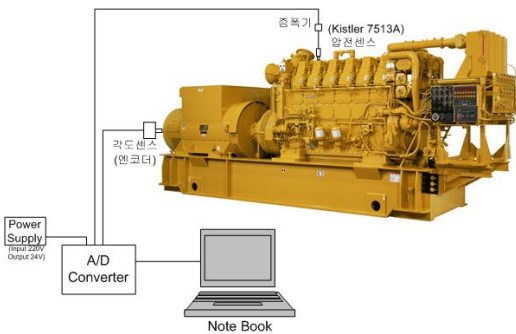


Figure 1: Schematic diagram of experimental apparatus

Table 3: Specifications of test engine

Item	Specification
Engine Type	4-Stroke, single acting Diesel Engine with T/C
NO. of Cylinder	5
Bore/Stroke	225/300 mm
Compression ratio	13.0
Output	725BHP at 720rpm

Table 4: Specifications of used encoder

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

3. 연소상태 분석과 고찰

3.1 연소상태 분석

연소해석 방법은 실험 장치를 통하여 실린더 압력을 크랭크 각도별로 수집을 하여 압력 상승률을 구하고, 체적, 체적 상승률, 열발생율, 평균가스 온도 등을 계산하였다. 크랭크 각도별 연소압력, 압력상승율, 열발생율등으로 연소상태를 해석하기에 충분하며, 수집 데이터의 신뢰성을 확인하기 위하여 연소압력과 체적을 이용하여 지시마력을 계산하였다.

Figure 2는 연소압력을 크랭크 각도별로 수집하여 도시한 그림이며, 50%부하에 대하여 나타내었다. 여기서 1번 실린더부터 5번 실린더까지 TDC부근에서의 압력상승부분이 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 최고 5~6°C 정도의 차이를 보이고 있다.

Figure 3은 압력상승률 곡선 이며, Figure 4는 열발생률 곡선을 보여주고 있다.

따라서 Figure 2 ~ Figure 4의 선도로부터 각 실린더간의 점화시점이 다른 것을 알 수 있으며, 이는 연료분사시점이 각각 상이하기 때문으로 판단이 되고, 전체적으로 분사시기가 늦어졌음을 알 수 있다. 또한 저 부하에서는 소기온도와 압력의 저하로 후연소가 일어나게 되고, 이로 인한 연소불안정 현상이 발생하여 배기가스 온도의 편차를 만들었다고 판단된다. 따라서 각 실린더별 연료분사 시기를 확인하고 조정하면 연소불안정과 배기가스온도의 편차를 줄일 수 있을 것으로 판단되었다.

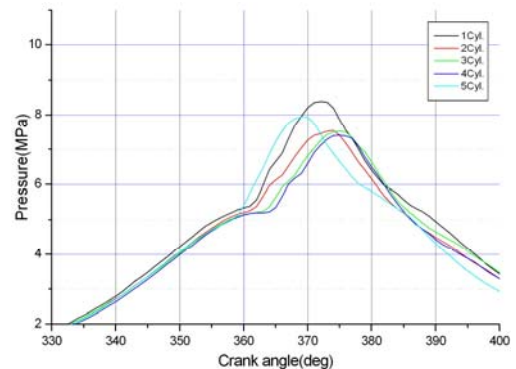


Figure 2: P-θ diagram of 50%(240kW)

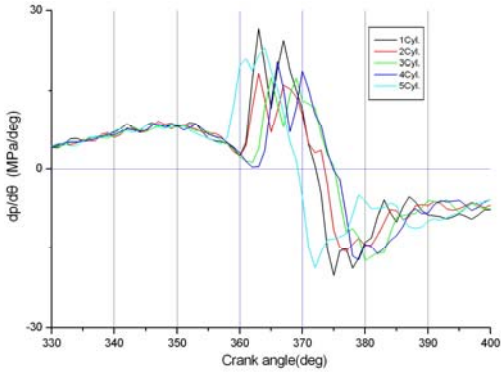


Figure 3: dP/θ diagram of 50%(240kW)

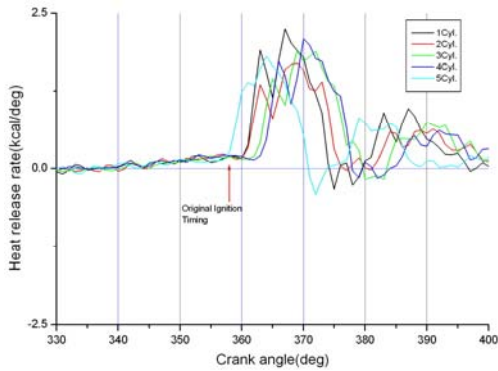


Figure 4: Rate of heat release of 50%(240kW) load

3.2 연료분사시기 측정 및 조정

앞에서 분석한 결과를 확인하기 위하여 연료분사시기를 측정하였다. Photo 1에서 연료분사시기를 측정하기 위한 기구(Tool)를 보여주고 있다. 이것은 고압파이프를 절단하여 내경 1.5mm의 가는 투명 파이프를 연료펌프 토출밸브 출구 측에 붙여서 만든 것이다. 내경이 작을수록 측정 오차를 줄일 수 있기 때문에 최대한 가는 파이프가 추천된다.

또한 오차를 줄이기 위하여 최소한 4회 이상 측정된 데이터를 평균하였으며, 측정은 플라이휠을 터닝하면서 파이프에 연료가 나타나는 순간을 플라이휠에 표시 하여 TDC로부터의 거리를 재고, 각으로 환산하였다.

실험엔진의 연료분사 시기는 BTDC 15°이다.

Table 5에서는 연료분사시기 측정 결과와 연료분사지연의 정도 및 재조정 시기를 보여주고 있다. 5번 실린더는 정상연소에 가깝고, 1~4번 실린더는 2.5~5.3°CA정도 지연되어 있음을 알 수 있으며, 이 결과는 Figure 2 ~ Figure 4의 연소상태 분석 결과와 일치하고 있음을 알 수 있다.

또한 연료점화시점을 일치하게 하기 위하여 분사시기 재조정 시 경험상 터보차저 끝단의 실린더(5번 실린더)는 급기효율이 좋기 때문에 약 0.5°CA 정도 지연시켜 조정하였다.

Figure 5와 Figure 6은 본 실험의 신뢰성의 결과를 확인하기 위하여 75%(360kW)부하와 무부하에서 출력을 계산한 $P-V$ 선도를 보여주고 있다.



Photo 1: Injection timing measuring tool using high pressure pipe

Table 5: Measuring and adjustment of injection timing

	Measured injection timing (BTDC) [deg]	Retarded injection timing [deg]	Adjustment injection timing (BTDC) [deg]
Cyl.1	12.48	2.52	14.52
Cyl.2	12.29	2.71	14.57
Cyl.3	10.95	4.05	14.67
Cyl.4	9.7	5.3	14.57
Cyl.5	14.76	0.24	14.0
Ave.	12	3.0	14.47

Figure 6의 무부하 상태에서의 지시마력은 엔진의 마찰손실과 발전기의 기계손실로 간주할 수 있다. 회전속도가 일정하면 마찰손실은 일정하기 때문에 75%부하 시의 지시마력(617.1IHP)에서 무부하 시의 지시마력(105IHP)을 감하면 엔진의 제동마력을 알 수 있다. 이로부터 동기발전기의 효율을 구하면 5% 정도의 범위를 나타내고 있어 신뢰할 수 있다고 판단된다. 따라서 출력측정으로도 본 실험의 데이터 수집에 대한 신뢰성을 검증 할 수 있었다. 동기 발전기의 효율은 다음 식에 의하여 구하였다[4].

$$\text{효율}(\eta) = \frac{\text{출력}}{\text{입력}(\text{출력} + \text{제손실})} \times 100$$

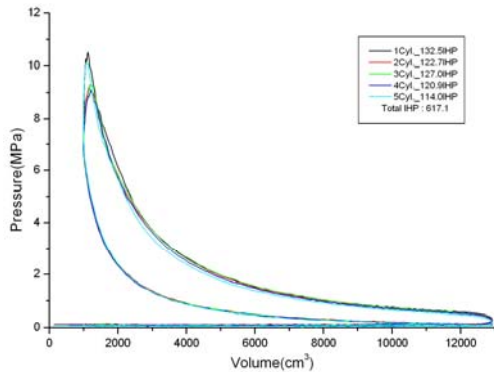


Figure 5: $P-V$ diagram of 75%(360kW) condition & output

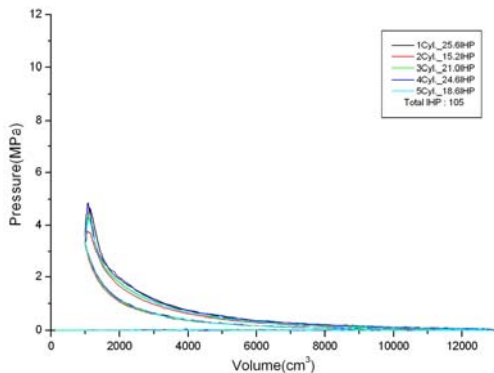


Figure 6: $P-V$ diagram of no-load condition & output

3.3 연료분사시기 조정 후 연소해석

연료분사시기 조정 후의 상태를 연소해석 장치로 분석한 결과를 Figure 7 ~ Figure 9에서 보여주고 있으며, 50%부하에서의 상태이다.

Figure 7은 $P-\theta$ 선도를 보여주고 있다. 연료분사 조정 전의 Figure 2와 비교하면 전체적으로 연소최고압력이 상승한 결과를 보여주고 있다. 다섯 실린더 모두가 상승 시점이 거의 일치하고 있으며, 연료분사 진각의 정도에 따라 압력상승의 정도가 비례하여 증가하는 것을 또한 알 수 있다.

Figure 8에서는 압력상승률 선도를 나타내고 있다. Figure 3과 비교하면 압력 상승률은 높지만 TDC 이후 압력파의 맥동이 줄었음을 알 수 있다. 이는 연료분사시기가 진각 되어 연소최고압력이 증가되었기 때문에 압력상승률이 증가하였고, TDC 이후의 압력파의 맥동의 감소는 연소불안정 현상이 상당히 줄었음을 알 수 있다.

Figure 9는 열발생률 선도를 보여주고 있으며, 1~5번 실린더의 점화시점이 거의 일치하고 있음을 보여주고 있다.

3.4 해석결과의 고찰

지금까지 연소해석의 결과 연료분사 시기가 지연되어 연소최고압력이 상당히 낮아져 있었으며, 이 때문에 후 연소의 증가 및 배기가스 온도의 상승이 있었다는 것을 알 수 있었다. 또한 각 실린더별 연료분사시기가 다르기 때문에 실린더별 편차가 더욱 증가 하였던 것으로 생각된다.

지연된 연료분사시기를 조정하고 각 실린더별 연료분사시기를 일치시킨 후 연료소비와 실제 배기가스를 조사한 결과에 대하여 아래 Tables 6 ~ 8에서 보여주고 있다. 또한 실린더 헤드 분해정비 후 운전시간이 상이한 두 발전기 엔진을 비교함으로써 엔진의 노후화에 의한 영향을 추정할 수 있을 것으로 생각된다.

Table 6에서는 No.1 발전기 엔진은 실린더 헤드를 분해정비 직후 실험을 하였던 경우이며, No.2 엔진은 운전시간 약 1,500시간이 경과한 경우이다. 연료분사 시기를 조정하여 일치시킨 결과 각각 5%와 12.8%의 연비 절감 효과를 나타내었다. 실험대

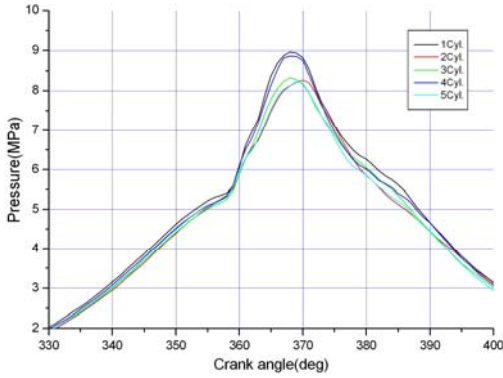


Figure 7: $P-\theta$ diagram after injection timing adjustment at 50%(240kW) load

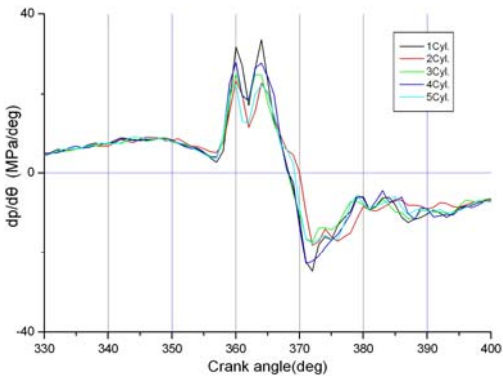


Figure 8: $dP-d\theta$ diagram after injection timing adjustment at 50%(240kW) load

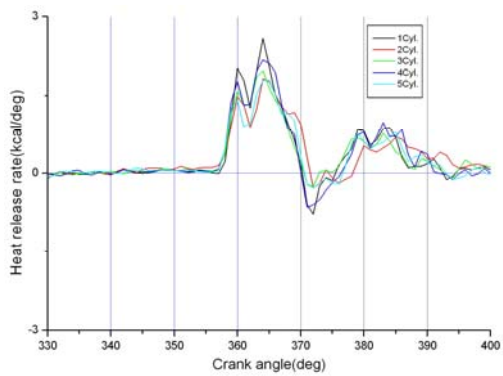


Figure 9: Rate of heat release after injection timing adjustment at 50%(240kW) load

상 발전기의 특성상 운전시간이 경과하면 저부하 운전의 영향으로 흡기 밸브의 오손이 심한 특성을 가지고 있다[2]. 이러한 결과로 연료분사시기 조정은 노후화의 정도가 높을수록 연비 절감 효과가 높은 것으로 추정 될 수 있다.

Tables 7 ~ 8 에서의 배기가스 온도는 연료분사시기를 조정함으로써 앞의 연소해석의 결과로 추정 될 수 있듯이 하향 안정화 되었으며, 편차가 상당히 줄었음을 알 수 있다.

Table 6: Result of fuel consumption effect after injection timing adjustment for No. 1 & 2 generator engines

Fuel injection timing Adj.	G/E 1	G/E 2
Before	208g/IHP.h	231g/IHP.h
After	198g/IHP.h	205g/IHP.h
Fuel Cons. effect(%)	5.0	12.8
Note	After Head overhaul	1,500h running condition

Table 7: Result of exhaust gas temperature after injection timing adjustment for No. 1 generator engine

Cyl. NO. Timing Adj.	Cyl.					Dev. [°C]
	1 [°C]	2 [°C]	3 [°C]	4 [°C]	5 [°C]	
Before	312	270	345	275	280	75
After	285	305	300	280	285	20

Table 8 Result of exhaust gas temperature after injection timing adjustment for No. 2 generator engine

Cyl. NO. Timing ADJ.	Cyl.					Dev. [°C]
	1 [°C]	2 [°C]	3 [°C]	4 [°C]	5 [°C]	
Before	305	340	350	330	355	50
After	310	330	332	310	335	25

4. 결 론

이상의 연소해석 장치를 통하여 연소해석을 바탕으로 이상연소의 원인을 알았고, 새로운 조정을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 선박엔진의 연소최고압력(Pmax) 게이지 및 각종 압력, 온도 게이지의 정보를 통하여 판단하기 어려운 이상연소에 대하여 연소 해석 장치로 해석함으로써 그 원인을 올바르게 진단할 수 있었다.
2. 크랭크 각도별로 수집된 압력 데이터를 이용하여 $P-\theta$ 선도, 압력상승률, 열발생률 등을 통하여 분석한 결과와 $P-\theta$ 선도로 계산된 지시마력 및 실측한 연료분사시기가 비교적 잘 일치하고 있다. 이로서 개발된 연소 해석 장치의 신뢰성이 인정된다고 판단된다.
3. 지연된 연료 분사시기를 초기에 설정된 분사 시기로 조정함으로써 연료소비율을 약 5% 향상 시킬 수 있었으며, 운전시간이 1,500h 경과한 경우에는 약 12.8%까지 향상 시킬 수 있었다. 이는 노후의 정도가 심한 경우에 그 효과가 더욱 클 것으로 예상된다.

참고문헌

[1] J. S. Choi, C. H. Jeong, K. H. Cho, J. U. Lee, T. B. Ha, and H. S. Kim, "Development of simulation program of two-stroke marine diesel engines", Journal of the Korean Society of Marine Engineering. vol. 34, no. 1, pp. 62-68, 2010 (in Korean).

[2] J. D. Kim, A Study on Low Load Operation of Marine Auxiliary Diesel Engine, M.S. Theses, Department of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Korea, 2011 (in Korean).

[3] K. S. Jung, J. U. Lee, J. A. Jeong, J. S. Choi, "Estimation of engine output for marine diesel engines", Journal of the Korean Society of Marine Engineering. vol. 35 no. 4, pp.

36-442, 2011 (in Korean).

[4] C. J. Noh, Marine Electric, Ah-Sung Publisher, p. 252, 1986 (in Korean).