

선박용 디젤엔진의 출력산정에 관한 연구

정균식¹ · 이진욱² · 정진아² · 최재성[†]

(원고접수일 : 2010년 11월 16일, 원고수정일 : 2011년 1월 3일, 심사완료일 : 2011년 1월 3일)

Estimation of Engine Output for Marine Diesel Engines

Kyun-Sik Jung¹ · Jin-Uk Lee² · Jin-Ah Jung² · Jae-Sung Choi[†]

요 약 : 기관의 정확한 출력을 얻기 위해서는 실린더내 압력의 정확한 측정이 기본적으로 중요하다. 그러나 MIPS같은 전자식지압기로 측정된 지시마력(IHP)과 기계식 지압기에 의해 산출된 지시마력 사이에는 상당한 차이를 보인다. 이러한 차이는 선박용 디젤엔진에서 TDC위치가 부정확하기 때문으로 확인되었다. 본 논문에서는 TDC위치에 대한 크랭크 각의 부정확한 정도를 선박용 M/E와 G/E에 대하여 각각 연구하였다. 또한 실린더 압력을 ‘시간기준’과 ‘크랭크각도기준’의 두 가지 방법으로 수집하여 검토하였다. 크랭크각도기준은 크랭크축에 장착된 엔코더로부터 실제 각도에 의한 수집방법이며, 시간기준은 엔코더의 Z펄스로 검출된 회전수에 의해 계산된 각도에 의한 수집방법이다. 시간기준 방법은 MIPS의 데이터 수집과 같은 방법이다. 시간기준 수집방법은 순간속도 변동과 부하변동의 영향으로 선박 엔진(M/E와 G/E)의 성능분석에는 적합하지 않음을 분명히 하였다. 또한, 각도기준 방법에 있어서도 M/E의 경우에는 부하변동에 의한 속도변동이 정확한 출력산정을 어렵게 하는 요인임을 확인하였다.

주제어 : 선박엔진, 엔진성능, 전자식 지압기, 기계식 지압기, 엔진출력, 상사점

Abstract : To obtain the engine output correctly is basically very important factor for estimating a engine performance. But, it has been reported that the IHP measured from electronic indicator such as MIPS(Mean Indication Pressure System) has a deviation compared to mechanical indicator. It was reported by authors that the uncertainty of crank angle for TDC position could be one of the reasons. In this paper, the uncertainty of crank angle for TDC position and its influence to engine output were investigated respectively about M/E and G/E for marine diesel engines. For the purpose, two sampling methods of pressure in cylinder were considered which were 'angle base sampling' and 'time base sampling'. Angle base sampling is real crank angle acquired from angle encoder which is attached to crank shaft and time base sampling is crank angle calculated by detected revolution with Z-pluse of encoder. Time base sampling is same method of MIPS. This paper concluded that time base sampling method is not suitable for obtaining the output of marine diesel engine on board because of instantaneous speed variation and load fluctuation. Also it is verified that the variation of engine speed by load fluctuation should be one of reasons additionally in case of M/E.

Key words : Marine diesel engine, Engine performance, Electronic indicator, Mechanical indicator, Engine output, TDC

[†] 교신저자(한국해양대학교, E-mail : jschoi@hhu.ac.kr. Tel : 051-410-4262)

¹ 한국해양대학교 대학원

² 한국해양대학교

1. 서 론

기관의 출력을 얻는 방법으로는 실린더 내 압력을 측정하여 얻는 방법과 추진축에서 토크를 직접 측정하는 방법이 있다[1]. 실린더 내 압력을 통해 얻을 수 있는 정보는 기관출력 이외에도 평균유효 압력, 사이클 변동, 녹킹 및 실화의 확인, 열발생을 및 연소가스 평균온도 등이다[2-4]. 따라서 실린더 내 압력의 정확한 취득은 출력산정 및 기관의 운전 상태 파악에 기본적인 요소이다[5].

최근에 건조되는 선박의 경우 각종 감시 및 진단 장치를 설치하고 있으며, 주기관의 성능을 분석하는 MIPS(Mean Indicated Pressure System)도 그 주요 항목 중 하나이다. 그러나 EMS(engine Monitoring System)에서 계측 및 산출된 지시마력(IHP)과 기계식 지압기에 의한 지시마력 사이에는 상당한 차이를 보이는 것으로 알려져 있으며, 저자들도 경험하고 있는 사항이다.

기존의 MIPS의 방법은 플라이휠에 근접센서를 장착하여 회전수를 검출하고, 검출된 회전수에서 일정한 시간 간격으로 나누어 내부 Clock신호를 발생시켜 연소압력 Data를 Sampling하며, 이 Clock신호를 Crank Angle로 간주하는 방법이다. 이러한 MIPS 방법은 순간속도변동을 고려하고 있지 않기 때문에 실제의 Crank Angle과는 차이가 있게 되고, 특히 피스톤의 TDC위치를 부정확하게 인식함으로써 결과적으로 디젤기관의 정확한 출력산정을 곤란하게 하는 원인으로 확인되었다[6].

본 연구에서는 선박에서 이용되는 추진용과 발전기용 디젤기관의 정확한 출력산정에 요구되는 정확한 TDC의 위치를 실험적으로 측정하여 그 정확도에 영향을 미치는 인자들에 관하여 고찰하였다. 즉, 디젤엔진의 순간속도변동과 부하변동에 의한 회전수 변동이 TDC 위치에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 기존의 MIPS의 방법으로는 디젤엔진의 출력을 정확하게 산정하기에는 한계가 있음을 분명히 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

실험대상엔진은 두 선박의 주기관 및 발전기 엔

진으로 각 엔진의 주요사항을 Table 1,2에 보인다. 본 실험에서는 각도센서(encoder)를 이용하여 정확한 실린더내 압력을 얻고자 하였다. 엔코더는 설치여건을 고려하여 Crank Shaft 끝단 또는 Lubricator 구동축 끝단에 장착하였다. 즉, 주기관 B는 Lubricator Shaft 끝단에 720펄스 엔코더를 주기관 A 및 발전기용 G/E는 Crank Shaft 끝단에 360펄스 엔코더를 각도 센서로 장착하여 실험을 하였다. 또한 실험은 엔진 1회전에 1회 펄스를 발생하는 엔코더의 Z펄스를 측정하고자 하는 실린더의 TDC에 맞추고, 1회전에 360 또는 720 펄스를 발생하는 A펄스를 Trigger로 연소압력을 샘플링 하는 방법과 Z펄스의 시간간격으로부터 rpm을 감지하여 1회전을 일정한 sampling 시간 간격으로 나누어 내부 clock 신호를 주는 방법을 각각 이용하였다. 여기서는 전자를 'Angle Base' Sampling, 후자를 'Time Base' Sampling이라 하기로 한다. 후자의 Time Base Sampling 방법은 기존의 MIPS의 방법과 동일한 방법이다.

Table 1: Specifications of Test M/Es

Item	Specification	
	A	B
Engine Type	2-Stroke, single acting Diesel Engine with T/C	
NO. of Cylinder	6	
Bore/Stroke	420/1360 mm	350/1050 mm
MCR	8130BHP/176rpm	4000BHP/200rpm
NCR	6911BHP/167rpm	3400BHP/190rpm

Table 2: Specification of Test G/E

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

Table 3: Specification of Encoders

Item	Specification	
	A	B
Type	D23SR15	E6C2-CWZ6C
Source Power	DC24V	DC 5V~24V
Plus/Rev.	360	720
Output	A, B, Z	A, B, Z
Tolerance	0	1/4T

3. 엔진의 순간속도변동 계측 및 고찰

Figure 1은 주기관 B의 80rpm ~ 170rpm 범위에서 각 rpm별 순간속도변동을 측정된 결과를 나타낸다. Crank Angle 1 deg.당 내부 Clock에 의한 Count 수를 5point FFT Smoothing 처리하여 보여주고 있다. 그림으로부터 2행정 6실린더 엔진이므로 1 cycle동안 6번의 속도 변동이 나타나고, 각 실린더의 TDC 부근의 압축행정에서 속도가 느리고, 팽창행정에서 속도가 빠르게 나타남을 확인할 수 있다. Figure 2는 순간속도(N_s)의 계측결과를 평균속도(N_o)와의 비(N_{nor})로 나타낸 것이다. 회전속도가 증가함에 따라 속도변동폭이 감소하고 있음을 알 수 있다. N_{nor} 은 식 (1)과 같이 정의 된다.

$$N_{nor} = \frac{N_s}{N_o} \tag{1}$$

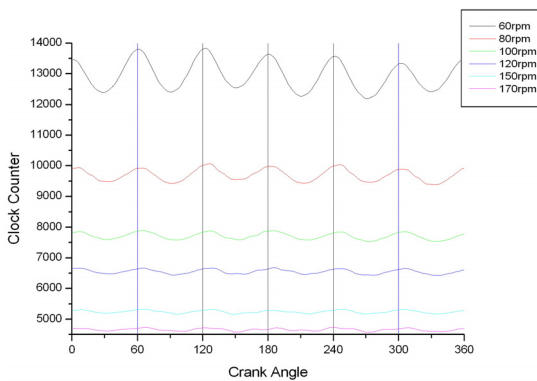


Figure 1: Measured result of Clock Counts at each rpm of M/E A

Figure 3은 M/E의 경우 기관회전속도에 따른 속도변동의 정도를 나타낸 것이다. 횡축은 기관 최대회전수MCR(Maximum Continuous Rating)에 대한 속도비로 종축은 식 (2)로 정의되는 속도변동비(R_n)로 나타낸다.

$$R_n = \frac{(N_{s_{max}} - N_{s_{min}})}{N_o} \tag{2}$$

회전속도가 증가할수록 속도변동비가 감소하고, N_{nor} 가 80~85% 부근에서 최소가 됨을 알 수 있으며, 이 경향은 두 엔진 모두 같게 나타났다. 이는 엔진의 회전속도가 증가함에 따라 관성력의 영향이 크게 되기 때문으로 판단된다.

Figure 3의 결과에 있어서 M/E B의 경우는 Encoder A를 사용한 경우이며, M/E A의 경우는 magnetic sensor를 플라이휠에 근접 설치하여 얻은 결과이다. 그러나 M/E B에 Encoder B를 사용한 경우의 계측결과는 신뢰할 수 없는 것으로 확인되었으며, 그 원인은 Table 3에 보이는 바와 같이 허용오차에 의한 것으로 파악되었다. 따라서 Encoder의 사양이 중요함을 알 수 있었다.

Figure 4는 발전기 엔진에 대하여 부하에 따라 Figure 2와 같은 방법으로 발전기 엔진의 순간속도의 계측결과를 평균속도와의 비로 나타낸 것이다.

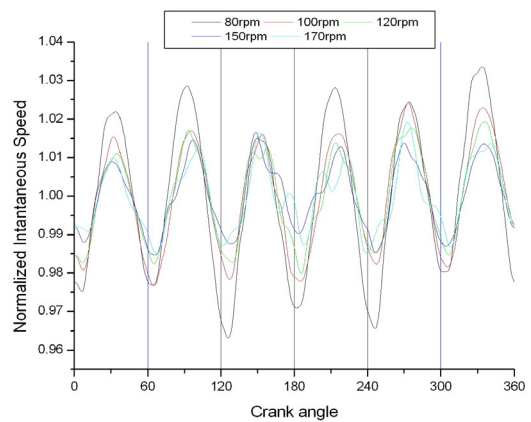


Figure 2: Normalized instantaneous speed at each rpm of M/E A

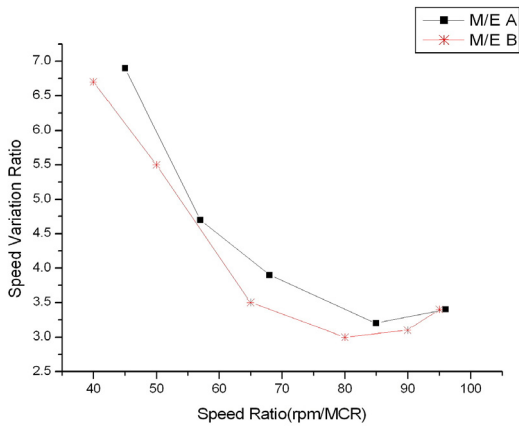


Figure 3: Speed variation ratio according to crank shaft speed

주기관의 경우와 비교하기 위하여 같은 스케일로 보여주고 있다. G/E는 720rpm으로 M/E(A:176 rpm, B:200rpm)에 비해 고속이기 때문에 속도 변동폭이 적음을 알 수 있다. 즉, 발전기용 엔진의 경우 순간속도변동 및 부하변동의 영향은 무시할 정도로 작다고 판단된다.

4. 속도변동과 부하변동이 TDC 위치 측정에 미치는 영향

기관 출력산정에 있어서 TDC 위치의 정확한 측정이 매우 중요하다[6]. 정확한 TDC 위치를 확인하기 위하여 연료를 차단하고 압축과 팽창과정의

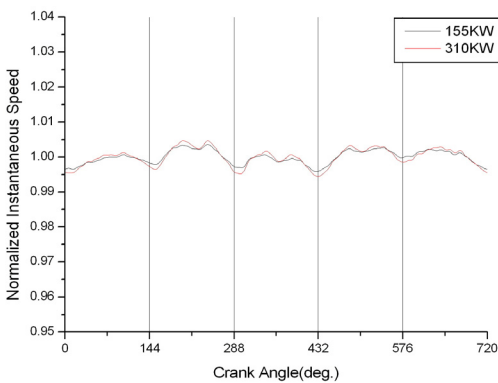


Figure 4: Normalized instantaneous speed at each load of G/E

압력데이터를 취득하였다. 정확한 TDC 위치는 압축압력의 Peak점이며, 이는 압축압력을 미분함으로써 얻을 수 있다.

실험은 2행정 주기관의 최저 회전수(80rpm)에서, 4행정 발전기 엔진은 무부하 상태에서 수행하였다. 또한 각도센서(엔코더)의 Z펄스를 각 엔진의 최종실린더인 주기관은 6번 실린더, 발전기엔진은 5번 실린더에 세팅하였고, Z펄스를 시작신호로 하여 1 cycle씩 각 3회의 Data를 수집하였다.

Figure 5는 연료를 차단하고 Z펄스를 시작신호로 하여 Angle Base와 Time Base의 방법으로 각각 1 cycle 동안 측정한 실린더내 압력(Pcomp)을 각각 3회 수집하여 나타낸 것이다. Figure 6은 정확한 TDC 위치를 판단하기 위하여 Figure 5의 측정결과를 미분하여 나타낸 것이다. 또한, Figure 7은 Figure 6의 결과중 dp/dθ=0 인 부분, 즉 TDC 부근을 확대한 것이며, Figure 8은 같은 방법으로 발전기 엔진의 경우를 나타낸 것이다.

그림으로부터 Angle Base Sampling의 경우는 주기관과 발전기 엔진의 경우 모두 3회의 data가 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 Time Base Sampling의 경우는 Figure 7로부터 알 수 있는 바와 같이 주기관의 TDC의 위치가 불규칙하게 변함을 알 수 있다. Figure 8은 발전기 엔진의 경우를 나타낸 것으로 정확한 TDC 위치는 알고 있는 TDC 위치에 비하여 항상 뒤에 나타남을 알

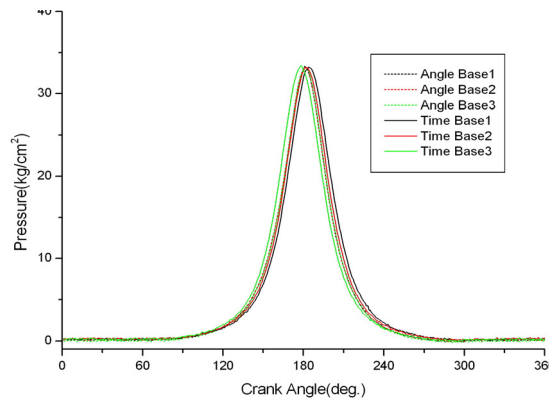


Figure 5: Pressure variation in No.6 cylinder of M/E with cut-out fuel

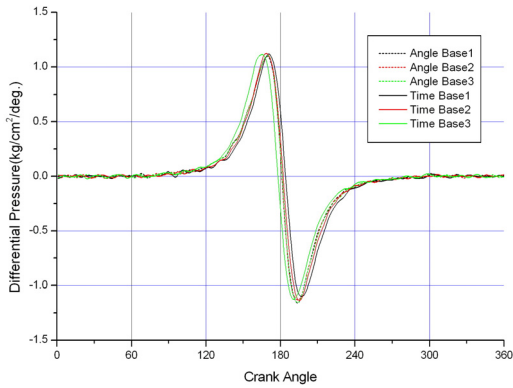


Figure 6: $dp/d\theta$ for pressure in No.6 Cylinder

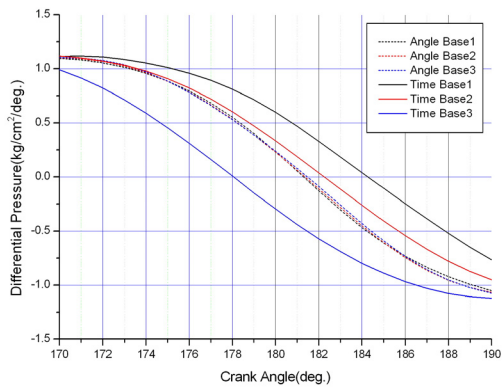


Figure 7: Enlargement of $dp/d\theta$ for Figure 4.2

수 있다. 즉, TDC는 압축과정의 말기에 오기 때문에 앞에서 언급한 순간속도의 변동에서 알 수 있듯이 실제 Crank Angle 속도는 압축과정에서 느리고, 팽창과정에서 빨라지므로 Time으로 일정하게 나누어 Crank Angle로 간주하면 실제 Angle보다 TDC 위치가 더 빠른 시기로 인식되기 때문에 정확한 TDC 위치 보다 앞선 위치에서 검출되게 된다.

이상의 검토결과를 이용하면, Figure 7의 주기 관에서도 Time Base의 경우의 TDC 위치는 뒤에 위치하여야 할 것으로 판단되나, 앞에 위치하는 경우도 있어 정확한 TDC의 위치가 불규칙하게 나타나고 있다. 이것은 해상 상태에 따른 부하변동의 영향이 크게 작용하기 때문 이라고 판단된다. 즉, 주기관의 회전속도의 변동은 엔진 토크의 변동에 의한 순간속도 변동성분과 해상 상태등의 부하변동

에 의하여 발생하는 속도 변동성분에 의한 것이며, 이 두 성분의 영향을 각각 고려하여야 한다고 판단 된다.

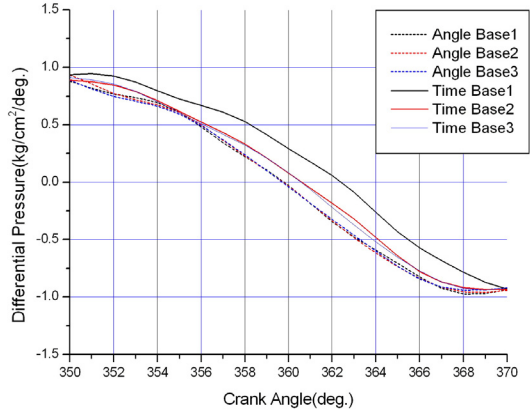


Figure 8: Enlargement $dp/d\theta=0$ for No. 5 Cylinder of G/E

Table 4~6은 각 실험엔진에 대하여 Angle Base와 Time Base로 각각 3회 측정된 p-v 선도로부터 산출한 출력결과를 나타낸 것이다.

Table 4는 발전기 엔진의 경우의 결과를 보여 주고 있다. 이 때 엔진의 부하는 75% 360KW 이었으며, 부하변동이 거의 없는 상태로 운전되었다.

Table 4에서 Angle Base의 경우 3회의 출력 값이 평균값과 비교하여 Angle Base는 최대 약 3% 범위내의 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 발전기 엔진은 통상 주파수의 변화가 0.03Hz정도의 범위내에서 변동함으로 회전수의 변화는 1rpm 이하의 범위에서 변동하며, 720rpm에서의 1rpm은 무시할 정도의 변화이므로 이 경우 rpm 변동은 무시할 수 있다고 판단된다.

그러나 Time Base의 경우 출력이 Angle Base의 출력보다 항상 10%정도 크게 나타난다. 임의적으로 TDC 1 deg.의 오차에 의해 계산된 출력은 약 8%정도 었음을 감안하면 Time Base의 경우 실제 Crank Angle 보다 약 1.2 deg. 정도 더 빨리 도착하게 된다고 추정할 수 있다. 이러한 결과는 앞에서 언급한 바와 같이 순간속도 변동의 영향에 의한 결과임을 잘 나타내고 있다고 판단된다.

Table 5는 주기관 B에 대하여 Angle Base와 Time Base에 의한 지시마력의 산출결과를 보여 주고 있다.

Table 4: Calculated IHP of G/E for 75% load

	Angle Base	Time Base
1	101.15	106.81
2	99.55	111.16
3	102.71	113.32
Ave.	101.14	110.43

여기에서도 Angle Base의 경우는 약 1% 오차 범위내에서 거의 일치하는 결과를 보여주고 있으며, Time Base의 경우는 대부분 큰 값을 나타내고 있으나 작은 값을 나타내는 경우도 있다. 그 차이는 주기관 B의 경우 Angle Base의 경우의 평균값과 비교하여 -9 ~ 4.5%, 범위에서 불규칙하게 변화하고 있다는 것을 알 수 있다.

Table 6은 주기관 A의 경우로 항해시 가장 빈번하게 사용하는 rpm 영역인 150rpm에서 무작위로 약 30회의 Data를 Sampling하여 rpm변화를 확인한 결과 150 ~153rpm (3 rpm 차이) 범위에서 변화하고 있음을 확인할 수 있었으며, 이 때의 지시마력 산출결과를 rpm별로, 그리고 Angle Base와 Time Base로 각각 구분하여 비교하여 나타낸 것이다.

여기서도 Angle Base의 경우는 약 2%범위내에서 거의 일치하고 있으나 Time Base의 경우 Angle Base의 경우의 평균값과 비교하여 4 ~ 14% 범위내에서 불규칙하게 변함을 알 수 있다.

주기관에서 rpm변화는 부하변동을 의미한다. 해상에서는 파도, 조류, 바람 등의 다양한 해상상태에 따라 항상 부하변동이 있으며 양호한 해상상태일지라도 이의 영향을 무시할 수 없음을 나타낸다고 판단된다.

Table 7은 주기관이 부하변동의 영향으로 회전속도가 1rpm 변화할 때 발생하는 크랭크각도 차이를 나타낸 것이다. 부하변동에 의하여 회전속도가 변하면 일정하게 등분된 Clock 신호의 시간 간격이 변하게 되어 TDC까지 누적되게 된다. 이 결과로

150rpm에서는 1rpm의 차이가 TDC위치를 약 1.2 deg.정도 다른 위치를 나타내게 된다. 또한 Time Base의 경우는 회전수를 검출하는 순간의 회전속도와 Data를 검출하는 순간의 회전속도가 일치하지 않을 수 있기 때문에 이 값은 더 크게 변할 수 있다.

따라서 시간으로 일정하게 나눈 clock 신호를 crank angle로 간주하게 되면 순간속도와 부하변동을 무시하게 되는 결과로 인해 정확한 출력산정을 어렵게 만드는 결과를 가져온다. 이러한 결과는 Table 5와 6의 Time Base에 의한 출력이 불규칙하게 변하는 결과를 잘 설명하고 있다. 그러므로 Time Base Sampling 방법은 주기관의 경우 순간속도 변동뿐만 아니라 부하변동에 의한 영향 때문에 정확한 출력산정을 어렵게 한다고 판단된다. 이러한 결과는 앞에서 언급한 TDC 검출의 결과와 잘 일치하고 있다.

Table 5: IHP of Engine B

	Angle Base	Time Base
1	528.94	478.15
2	522.36	548.85
3	523.80	533.85
Ave.	525	520

Table 6: IHP of Engine A

	Angle Base	Time Base
150rpm	643.96	754.16
151rpm	666.69	719.43
152rpm	653.98	679.82
153rpm	649.11	704.96
Ave.	654.6	714.6

Table 7: Difference of TDC position difference of 1 rpm by time base sampling

rpm	sec /rev.	sec /deg.	sec/ 180deg.	diff. (sec)	diff. (deg.)
151	0.397	0.00110	0.20000	0.00132	1.20
150	0.400	0.00111	0.19868		

6. 결 론

이상의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 선박용 디젤엔진의 정확한 출력산정을 위해서는 정확한 TDC의 위치과약이 매우 중요하다. 이를 위해서는 Angle Base Sampling방법이 매우 유효함을 알았다.

(2) 선박용 디젤엔진의 출력산정에 있어서 Time Base Sampling은 정확한 출력 산정에 적합하지 않다.

(3) Time Base Sampling 방법에 의한 선박용 발전기 엔진의 출력산정 결과는 순간속도 변동에 의한 영향 때문에 실제보다 항상 크게 나타난다. 본 연구의 실험대상 엔진의 경우 10%정도 크게 산출되었다.

(4) 주기관의 경우 Time Base Sampling방법은 순간속도 변동뿐만 아니라 해상상태 등에 의한 부하변동에 의한 영향 때문에 정확한 출력산정이 어렵다. 본 연구의 실험대상 엔진의 경우 -9% ~ 14%의 범위에서 불규칙한 결과를 얻었다.

(5) Angle Base Sampling방법을 이용할 경우 encoder의 사양이 중요하다.

참고문헌

- [1] Kazumasa lida, Katsuo Akishino, Kazuo Kido, "IMEP estimation from instantaneous crankshaft torque variation", SAE Paper No.900617, 1990.
- [2] 배상수, 임인건, 김세웅, 김웅서, "사이클 내 크랭크축 각속도의 변동 해석", 한국자동차공학회 논문집, 제4권, 제2호, pp. 166-172, 1996.
- [3] Se-Woog Kim, "Misfire Detection of the Automotive Engine by Analysis of the Crankshaft Speed", 서울대학교 공학박사 학위논문, 1996.
- [4] G.Rizzoni, "Diagnosis of Individual Cylinder Misfires by Signature Analysis of Crank shaft Speed Fluctuations", SAE Paper No.890884, 1989.
- [5] Lars karlsson and Jarl Sobel, "Strole by stroke measurement of diesel engine

performance on board", CIMAC Congress Kyoto Paper no.23, 2004.

- [6] 최재성, 이진욱, 이상득, 조권희 "저속박용디젤기관의 순간회전속도 변동에 관한 연구", 한국마린엔지니어링학회지, 제31권 제2호, pp. 138-144, 2007.

저 자 소 개



정균식(鄭均植)

1994. 2 한국해양대학교 기관시스템공학부 졸업(공학사), 1999. 2 한국해양대학교 대학원 졸업(공학석사), 2002. 2 한국해양대학교 대학원 박사과정 수료, 2005.1-현재 한국해양대학교 실습선 일등기관사



이진욱(李鎭旭)

1992. 2 한국해양대학교 기관시스템공학부 졸업(공학사), 1992.2-1997.10 한진해운(주) 기관사, 2007. 한국해양대학교 대학원 졸업(공학석사) 1998-2009 한국해양대학교 실습선, 현재 한국해양대학교 부교수



정진아(鄭珍阿)

1996. 2 한국해양대학교 기관시스템공학부 졸업(공학사), 1999. 2 한국해양대학교 대학원 졸업(공학석사), 2009. 2 부산대학교 대학원 박사과정 수료, 2005.3-현재 한국해양대학교 조교수



최재성(崔在星)

1974. 2 한국해양대학교 기관시스템공학부 졸업(공학사), 1976. 2 한국해양대학교 대학원 졸업(공학석사), 1986.3 일본 Kyoto Univ. 대학원 졸업(공학박사), 2010.11 현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수