

선박용 발전기 엔진 출력 측정 장치의 TDC 오차 발생 원인

이지웅* · 정균식**† · 이원주***

* 한국해양대학교 해사IT공학부 교수, ** 메카텍 대표, *** 한국해양대학교 기관공학부 교수

Causes of Top Dead Center Error in Marine Generator Engine Power-Measuring Device

Ji-Woong Lee* · Gyun-Sik Jung**† · Won-Ju Lee***

* Professor, Division of IT, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

** CEO, MECA-Tech, Korea

*** Professor, Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

요 약 : 엔진의 출력을 측정하기 위한 방법은 실린더의 연소압력을 측정하여 지시마력을 구하는 방법과 축토크를 측정하여 축마력을 구하는 방법이 있다. 축토크로 실린더의 상태를 확인하기에는 한계가 있으며, 엔진의 성능 측정과 실린더의 연소 해석을 위해서는 실린더의 연소 상태를 확인할 수 있는 연소압력을 측정하는 방법이 가장 정확하다. 측정에 있어 연소압력은 크랭크샤프트 회전 각도에 따른 실린더 압력이 도시되어야 하기 때문에 정확한 실린더 앵글각도를 정확히 인지시키는 작업이 가장 중요하다. 본 연구에서는 실제 운항선의 발전기 엔진을 대상으로 실린더 압력을 측정하기 위하여 크랭크 앵글 센서로 엔코더를 사용하였고 엔코더에서 인지하는 TDC($TDC_{encoder}$)와 압축압력에 의한 TDC(TDC_{comp}) 간의 실측을 통하여 차이가 발생하는 원인에 대하여 고찰하였다. 또한 0%, 25%, 50%와 60% 부하에서 측정된 실린더의 TDC_{comp} 와 $TDC_{encoder}$ 간의 차이를 통하여 크랭크샤프트의 제작에 의한 영향, 부하증가에 따른 엔진과 발전기 사이의 커플링 영향에 대한 결과를 고찰하였으며, 발전기의 부하가 증가할수록 최대 3°CA까지 TDC의 오차가 발생함을 확인하였다.

핵심용어 : 디젤엔진, 디젤발전기, TDC 오차, 각도센서, 출력

Abstract : Different methods are used for determining the output of engines to obtain the indicated horsepower by measuring the combustion pressure of cylinders, and to obtain the shaft horsepower by measuring the shaft torque. It is difficult to examine the shaft torque using the condition of the cylinder, and the most accurate method used for determining the combustion pressure involves examining the combustion state of the cylinder to evaluate the engine performance and analyze the combustion of the cylinder. During the measurement, the combustion pressure is the most important parameter used for accurately determining the cylinder angle because the cylinder pressure is indicated based on the angle of the crankshaft. In this study, an encoder was used as the crank angle sensor to measure the cylinder pressure on the generator engine of the actual operating ship. The reasons for the differences between the top dead center (TDC) recognized by the encoder ($TDC_{encoder}$) and the TDC recognized by the compression pressure (TDC_{comp}) were considered. The differences between the TDC_{comp} and $TDC_{encoder}$ of the cylinders measured at idle running, 25%, 50%, and 60% loads were analyzed to determine for the crankshaft production effect, the crankshaft torsion effect owing to the increased rotational resistance from the increased load, and the coupling damping effect between the engine and generator. It was confirmed that the TDC error occurred up to 3° crank angle as the load of the generator increased.

Key Words : Diesel engine, Diesel generator, TDC error, Encoder, Power

1. 서 론

선박 엔진은 추진용 엔진과 발전용 엔진으로 나눌 수 있으며, 추진용 엔진의 경우 출력의 측정은 엔진의 가스압력

으로부터 IHP를 계산할 수 있으며, 가스압력을 측정할 수 없는 경우 shaft의 torsion meter로부터 SHP 혹은 BHP를 산출한다. 최근 이종연료를 사용하는 발전용 중·고속 엔진에는 실린더의 압력을 측정하여 IHP를 산출할 수 있다. 하지만, 많은 운항중인 발전용 중·고속 디젤엔진의 경우 선박에서는 실린더의 가스 압력을 측정하여 IHP를 산출할 수 있는 측정

* First Author : woongsengine@kmou.ac.kr, 051-410-4571

† Corresponding Author : meca@meca.tec.co.kr, 02-730-6850

장치가 보편화되지 않았으며, 엔진의 출력은 선박의 전기적 부하에 의한 출력으로 엔진의 출력을 가늠하고 있다. 실린더의 연소압력을 측정하여 IHP를 산출하기 위해서는 크랭크 각도센서와 실린더 압력센서가 필요하다. 각도센서를 설치할 수 있는 환경과 조건이 차이가 있기 때문에 각각의 조건과 환경에 따라 발생할 수 있는 TDC 오차를 보완하여 정확한 출력을 계측하고 연소해석의 오차를 줄이기 위한 연구 및 장치들이 개발되어 적용되고 있다.

엔진의 출력성능과 연소해석에서 오차가 발생하는 주요 원인은 TDC의 오차가 발생하기 때문이다. 엔진출력 측정에서 상사점(TDC) 1.0°CA의 오차는 디젤엔진에서는 약 10% 정도 (Chang et al., 2005), 가솔린 엔진에서는 는 약 4%의 도시평균유효압력과 25%의 열발생률의 오차를 유발하기 때문에 TDC의 위치는 최소한 0.1°CA각도 범위내의 정확도를 확보하여야 한다(Morishita and Kushiyama, 1997; Pipitone and Beccari, 2010).

Chang et al.(2005)은 이상기체와 열역학적 모델을 사용하여 시뮬레이션을 통해 TDC와 관계된 최대폭발압력과 형상에 의한 TDC와의 관계에서 0.05°CA의 TDC 오차를 계산하였다. Stas(1996)은 열전달과 가스누설이 TDC 오차에 미치는 영향을 통해 “heat lose angle”에 대한 연구 결과를 발표하였다. 그 밖에 TDC연구를 위하여 다양한 연구자들이 압축과 팽창과정의 폴리트리픽지수를 이용한 TDC 결정에 대한 연구를 발표하였다(Stas, 2000; Morishita and Kushiyama, 1998).

본 연구는 선박의 발전용 엔진을 대상으로 실험을 하였으며, 발전기 부하별로 발생할 수 있는 TDC 오차의 영향을 연구하였다. 압축압력의 피크에 의한 TDC와 실제 TDC와의 차이를 손실각(loss angle)이라 한다(Pipitone and Beccari, 2010). Jung et al.(2012)은 선박 저속 2행정 디젤엔진에서의 rpm이 증가할수록 손실각은 50% 부하에서 0.4°CA, NCR에서 0.2°CA로 작아짐을 증명하였다. 이는 손실각의 주요원인이 TDC 근방에서의 열손실에 기인하기 때문에 저속엔진보다 피스톤 평균속도가 빠른 중·고속 4행정엔진에서 손실각(loss angle)은 무시할 만큼 작아지며 압축압력의 피크 즉 압축 TDC를 실린더의 체적이 가장 작을 때의 실제 TDC로 간주할 수 있다. 본 연구는 부하와 상관없이 항상 압축 TDC가 존재하여야 가능하기 때문에 Fig. 1과 같이 P-θ 선도에서 압축압력을 확인할 수 있는 TDC 이후 연료분사가 이루어지는 엔진이 필요하다. 따라서 본 연구는 실제 선박엔진에서 연료분사시기가 TDC 근처 또는 그 이후에 이루어지는 엔진을 실험 대상으로 하였다. 본 연구는 0%, 25%, 50%, 60%에서 테스트를 하였으며, 부하증가에 따라 발생하는 TDC 오차에 관한 영향을 연구하였다.

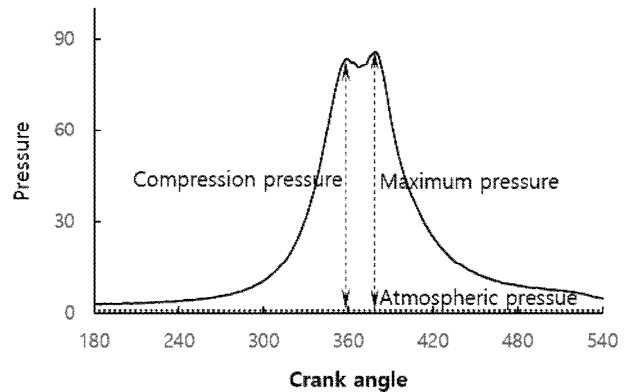


Fig. 1. P-θ diagram for compression and maximum pressure.

2. 실험방법

크랭크 앵글에 따른 실린더 압력을 측정하기 위하여 앵글 엔코더는 Fig. 2와 같이 엔진 앞과 발전기 끝단 2군데 설치 가능하며 본 실험에서는 발전기 끝단(End bearing side)에 앵글 엔코더를 설치하고 실린더의 압력을 측정하였다. Fig. 2에서 엔진과 발전기를 연결하는 커플링은 비틀림 진동, 토크 변동 감소, 공명 감소, 축 정렬의 보상의 이유로(Rubber, 2020) 플렉시블 커플링이 장착되어 있어 출력 측정을 위한 TDC 검출 시 커플링의 유격에 의해 TDC_{error}가 발생할 수 있다.

Fig. 3은 각도센서인 엔코더에서 발생하는 파형에 대한 그림이고, Table 1은 본 실험에서 사용한 각도센서와 연소압력 센서의 사용을 보여준다. 본 실험에서 앵글엔코더는 No.1 Cylinder의 TDC에 엔코더의 ‘Z’펄스(1회전에 1번 발생하는 펄스)를 세팅하였으며, No.1 Cylinder의 TDC는 플라이휠의 TDC 마크를 기준으로 하였다. No.1 실린더의 TDC를 기준으로 착화순서에 따라 등 간격으로 720°CA(2회전, 1 cycle)씩 데이터를 취득할 수 있다. 데이터의 샘플링은 앵글엔코더의 ‘A’ 펄스를 트리거 신호로 하였으며, 샘플링은 1회전에 720 펄스 엔코더를 사용하여 0.5°CA 간격으로 데이터가 취득된다. 본 실험에 사용된 데이터 수집 장치는 각도센서를 No.1 Cylinder의 플라이휠 TDC mark에 ‘Z’펄스를 일치시키고, 압축·폭발 TDC와 흡·배기 TDC를 자동적으로 구분하는 방법을 적용하였다. 어느 실린더의 압력을 수집하더라도 폭발순서에 따라 흡·배기 TDC 이후 데이터 수집을 시작해서 압축·폭발 TDC가 오고, 흡·배기TDC에서 수집을 종료한다. 이를 위해 정확한 1 Cycle을 수집하는 기술을 적용한 ‘I-MEP’의 장치를 이용하였다(Jung and Lee, 2018a; Jung and Lee, 2018b; Jung and Lee, 2018c).

선박용 발전기 엔진 출력 측정 장치의 TDC 오차 발생 원인

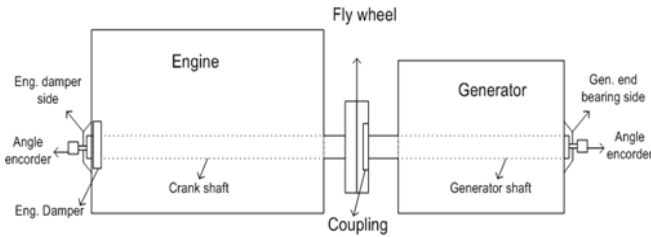


Fig. 2. Diesel Generator engine with engine driven generator.

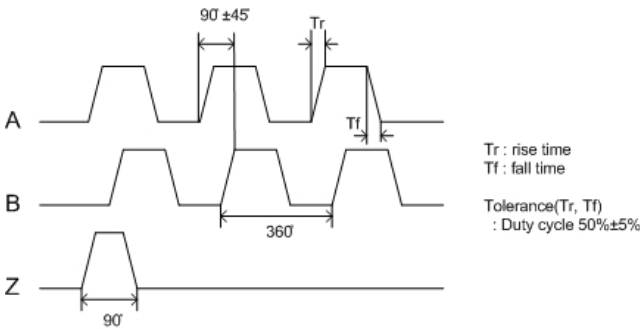


Fig. 3. Pulse waveform Tolerances of angle sensor (encoder).

Table 1. Specification of encoder and pressure sensor

	Item	Specification
Encoder	Type	Line drive type
	Resolution	720
	Output pulse	A, B, Z
	Input voltage	5VDC
	Tolerance	0
Combustion pressure sensor	Sensor Type	Piezotron Pressure Sensor
	Pressure range	0 ~ 250 bar
	Operating range	-50 ~ 300 °C
	Input current	4 mA
	Output bias	9 ~ 14 VDC

Table 2는 본 연구를 위한 대상엔진의 사양을 보여주고 있다. 먼저 오차 발생부분을 확인하기 위하여 무부하 상태에서 연료를 차단하고 압축압력을 수집하였다.

또 압력데이터는 데이터 취득 과정에서 노이즈를 포함하고 있기 때문에 노이즈를 제거하기 위하여 데이터 스무싱이 필요하다(Charchalis and Dereszewski, 2013). 연료를 차단하여 측정된 압축압력선도는 단열압축과 단열팽창 과정으로 외부로부터의 열량의 출입이 없어 연소에 의한 압력선도의 변곡점이 발생하지 않는다. 따라서, 데이터의 노이즈 제거를 위하여 3 point smoothing을 적용하였다.

Table 2. Engine Specification

Model engine specification	
Type	ZJMD-MAN B&W 6L23/30H
Bore/Stroke	230/300 [mm]
compression ratio	13 : 1
Length of con-rod	69.3 [mm]
Firing order	1-4-2-6-3-5
Normal rated speed	720 [rpm]
Maximum output	700 [kW]
Maximum pressure	13.0 [MPa]

압축압력의 피크 즉 $TDC_{compression}$ 과 실린더의 체적이 가장 작을 때의 TDC_{volume} 의 차이를 손실각이라 하며, 본 연구의 대상엔진은 4행정 중속엔진으로 손실각에 의한 TDC 오차는 무시할 수 있는 수준으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 TDC_{volume} 과 $TDC_{compression}$ 이 동일하다고 가정한다. 본 연구에서 확인하고자하는 TDC_{error} 는 실린더 압축압력의 $TDC_{compression}$ 와 No.1 실린더 TDC mark에 설정된 엔코더 앵글과 폭발순서에 의한 $TDC_{encoder}$ 의 차이를 의미한다(이후 TDC_{error} , $TDC_{encoder}$, TDC_{comp} 로 표현).

$$Loss\ angle = TDC_{volume} - TDC_{compression} \quad (1)$$

$$TDC_{error} = TDC_{encoder} - TDC_{compression} \quad (2)$$

3. 실험 결과의 고찰

Fig. 4와 Fig. 5는 연료를 차단하고 공기만을 압축하는 압축압력선도와 TDC의 위치를 확인하기 위하여 압축압력을 미분한 선도를 나타내고 있다. 이 $dp/d\theta$ 선도를 통하여 TDC_{comp} 위치를 정확하게 확인할 수 있다.

Table 2는 Fig. 5의 미분 선도로부터 찾은 TDC_{comp} 과 TDC_{error} 를 보여주고 있다. 여기서 각 실린더별 TDC_{comp} 가 정확하게 등 간격이 아니며, TDC_{error} 가 발생함을 알 수 있다. 또 엔코더는 1번 실린더의 $TDC_{encoder}$ 에 Z펄스를 세팅을 하였기 때문에 1번 실린더의 TDC_{comp} 와 차이(오차)가 $0.4^\circ CA$ 발생하는 것을 알 수 있다. 이 오차(TDC_{error})의 발생 원인은 다음과 같이 생각할 수 있다.

- ㉠ 엔코더 펄스 파형의 오차
- ㉡ 플라이휠 TDC mark에 의한 오차
- ㉢ 엔코더와 플라이휠 TDC mark 세팅 오차
- ㉣ 발전기와 엔코더 사이의 슬립
- ㉤ 엔진과 발전기 사이의 슬립(플렉시블 커플링)

- ㉑ 실제 엔진의 압축과정이 단열과정이 아니기 때문에 발생하는 열손실에 의한 손실각 오차
- ㉒ 블로바이 가스로 인한 압력손실에 의한 손실각 오차
- ㉓ 크랭크샤프트의 제작 오차
- ㉔ 크랭크샤프트의 비틀림

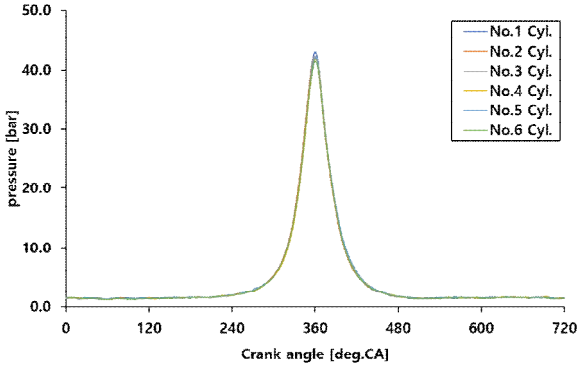


Fig. 4. P-θ diagram at 0% load.

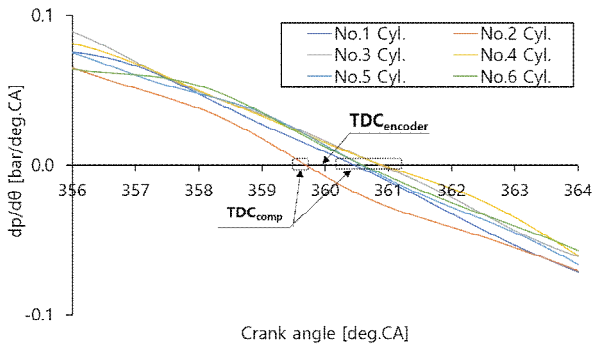


Fig. 5. $dp/d\theta = 0$ diagram at 0% load.

여기서, $TDC_{encoder}$ 를 1번 실린더의 플라이휠 TDC mark에 설정하였기 때문에 1번 실린더의 TDC_{error} 를 통해 ㉑~㉔의 엔코더에 의한 오차와 플렉시블 커플링에 의한 유격 ㉓의 크랭크샤프트 제작 오차 그리고 ㉔의 크랭크샤프트의 비틀림 (Kowalak, 2008)에 의한 오차를 생각할 수 있다.

㉑의 엔코더 펄스 파형 오차의 경우 Fig. 3의 엔코더 파형의 오차시간(t_r , t_f)은 0.025° CA의 오차범위를 가지고 있으며, Z펄스의 ON구간은 90° 의 시간이므로 0.125° CA의 범위 내에서 오차가 발생할 수 있다.

㉒의 발전기와 엔코더 사이에서 발생할 수 있는 슬립은 엔코더의 회전 저항이 극히 작기 때문에 슬립이 발생하기는 어렵다고 판단된다.

㉓의 크랭크샤프트의 비틀림 오차는 크랭크샤프트의 제작 시 재료의 항복강도 이하에서 100% 부하영역이 나타나도록 제작되기 때문에 무부하 상태에서의 비틀림은 나타나지 않을 것으로 판단된다.

㉑, ㉒의 손실각은 앞서 무시할 수 있는 수준으로 가정하였다. 따라서, 본 연구의 대상엔진에서 발생할 수 있는 오차의 경우는 ㉓, ㉔, ㉑, ㉒의 경우가 될 수 있다.

Table 3에서와 같이 측정결과는 실린더 별로 서로 다른 오차각을 보이고 있다. 그리고 무부하 상태에서는 발전기의 부하는 0이며, 엔진의 각 실린더 중량에 의한 부하만 있기 때문에 크랭크샤프트 제작의 오차 및 플렉시블 커플링의 감쇄 작용과 유격에 의한 오차가 TDC_{error} 를 발생시키는 것으로 판단된다. Table 3에서 각 실린더의 TDC_{error} 의 최대와 최소의 차이는 $-0.1 \sim 1^\circ$ CA임을 알 수 있다. 여기서 (-)는 TDC_{comp} 가 $TDC_{encoder}$ 보다 진각됨을 의미하며 (+)는 지각됨을 의미한다.

Table 3. Peak position of the compression pressure

Cyl. NO.	1	2	3	4	5	6
P_{comp} position[$^\circ$ CA]	360.4	359.9	360.9	361.0	360.6	360.7
TDC_{error} [$^\circ$ CA]	0.4	-0.1	0.9	1	0.6	0.7

Table 4는 1번 실린더의 TDC_{error} 를 기준으로 전 실린더의 TDC_{error} 를 보정 후 실린더의 폭발순서에 따라 재정렬하여 실린더 간 연소간격 즉, 크랭크샤프트의 제작 각도를 나타낸 것이다. 폭발순서가 4행정기관이기 때문에 120° CA 간격으로 일정해야하지만 Table 3의 combustion interval에서 보는 바와 같이 일정하지 않음을 알 수 있다. 이는 크랭크샤프트의 배치간격이 일정하지 않음으로 판단되며 최대 1.1° CA의 오차가 있다. 이는 크랭크샤프트 제작과정에서 발생하는 오차로 판단된다.

Table 4. Combustion interval by firing order after TDC_{error} collection

Cyl. NO.	1	2	3	4	5	6
TDC_{error} collection	360	359.5	360.5	360.6	360.2	360.3
Firing order	1	4	2	6	3	5
Firing angle error	0.6	-1.1	0.8	0.2	-0.3	-0.2
Combustion interval	120.6	118.9	120.8	120.2	119.7	119.8

각 실린더의 TDC_{comp} 를 기준으로 하여 부하별 TDC_{comp} 의 변화를 추적하면 TDC_{error} 의 원인을 찾을 수 있다.

Fig. 6~11은 25%, 50%, 60%의 부하에서 P-θ 선도도와 $dp-d\theta$ 선도를 보여주고 있다. 이 그림에서 TDC 이후에 연료가 분사되기 때문에 P_{comp} 와 P_{max} 가 확연히 구분되는 그래프를 그리고 있다. 여기서 P_{comp} 는 공기만을 압축하는 TDC_{comp} 이므로 이 지점을 추적하면 부하 증가에 따른 TDC_{comp} 위치의

선박용 발전기 엔진 출력 측정 장치의 TDC 오차 발생 원인

오차 변화를 확인할 수 있다. 발전기의 부하 증가는 회전저항의 증가로 전달동력이 커져 엔진과 발전기 사이의 슬립 즉, 플렉시블 커플링의 유격으로 나타날 수 있다.

Fig. 4와 5의 0% TDC_{error}와 비교하여 25%, 50%, 60% 부하에 해당하는 dp/dθ 그래프에서 부하가 증가할수록 각 실린더의 TDC_{comp} 지점이 점점 앞으로 진각되고 있음을 확인할 수 있다.

0% 부하에서는 No.2 실린더의 오차각이 TDC 이전에 TDC_{comp}가 온 반면 Fig. 6~11의 25%, 50%, 60% 부하에서는 전 실린더의 TDC_{comp}가 TDC_{encoder} 이전에 나타나고 있어 점점 TDC 오차가 진각 되고 있음을 알 수 있다.

엔진의 동력은 발전기의 일정한 회전(720rpm)을 목적으로 하기 때문에 부하가 증가할수록 발전기의 회전저항 증가에 의한 엔진의 동력은 커지며, 엔진과 발전기 사이의 플렉시블 커플링은 동력과 부하사이에서 유격 및 감쇄 작용에 의한 오차를 발생시키면서 회전하게 된다. 60% 부하에서 전체 실린더의 TDC_{comp}가 2.0~3.0°CA를 전·후하여 오차가 발생하고 있기 때문에 무시할 수 없는 수치이다. 이를 무시하고 출력을 측정하면 최대 30%의 출력측정 오차가 발생할 것으로 판단되며, 연소해석에 있어서도 3.0°CA는 엔진성능에 큰 영향을 미치기 때문에 이 오차를 고려하여야 잘못된 판단을 예방할 수 있다.

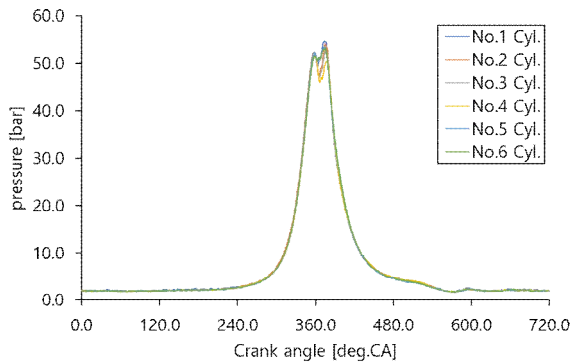


Fig. 6. P-θ diagram at 25% load.

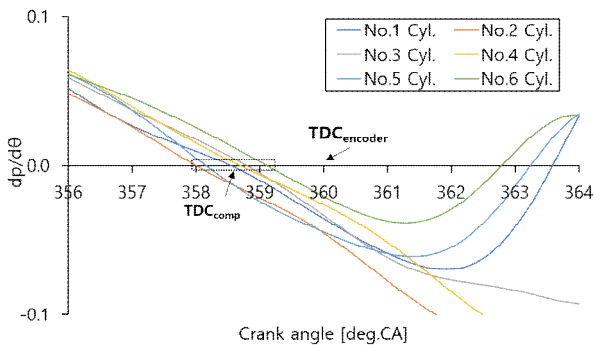


Fig. 7. dp/dθ diagram at 25% load.

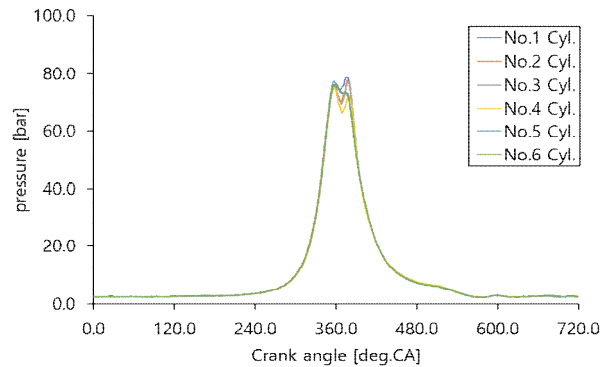


Fig. 8. P-θ diagram at 50% load.

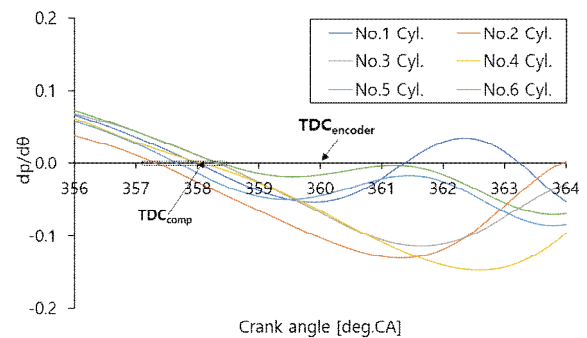


Fig. 9. dp/dθ diagram at 50% load.

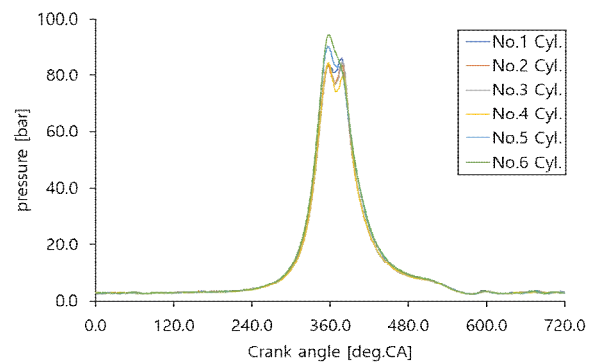


Fig. 10. P-θ diagram at 60% load.

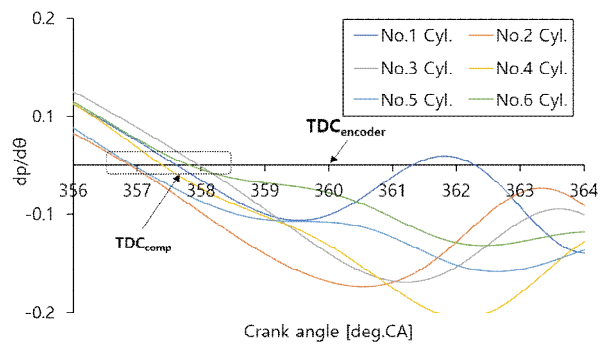


Fig. 11. dp/dθ diagram at 60% load.

Fig. 12는 0%, 25%, 50%, 60% 부하에 걸쳐 발생한 각 실린더의 TDC_{error} 의 각도를 부하별로 나타낸 그래프이다. 전 실린더에서 부하가 증가할수록 발생하는 TDC의 오차의 변화는 같은 경향을 가지고 있음을 확인할 수 있으며, 각 실린더별로 부하가 증가할수록 TDC_{error} 는 (-)방향 즉, $TDC_{encoder}$ 보다 TDC_{comp} 가 빨라짐을 확인할 수 있다. 이는 발전기 end bearing에 설치된 앵글 엔코더의 $TDC_{encoder}$ 보다 엔진에서 측정되는 TDC_{comp} 가 부하증가에 따라 점점 빨라짐을 의미한다. 발전기 부하의 증가는 엔진 부하의 증가로 이어지고 엔진과 발전기 사이의 플렉시블 커플링 사이의 유격이 더욱 커지기 때문으로 판단된다. 따라서, 부하에 따라서, TDC_{comp} 를 보정해야 정확한 출력을 산출할 수 있다.

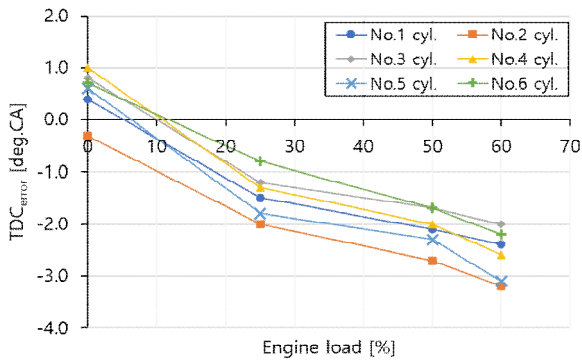


Fig. 12. Difference angle by deformation of the crankshaft on multi-cylinder engine during operation.

4. 결론

본 연구에서는 선박용 중속발전기 디젤엔진에 엔코더와 압력센서를 이용하여 크랭크 각도에 따른 실린더 압력을 측정하였다. 발전용 정속 엔진은 무부하 상태와 부하상태에서의 rpm은 동일하므로 해당 실린더의 연료를 차단한 후 압축 압력을 측정함으로써 TDC_{comp} 를 찾을 수 있으며, 이렇게 찾은 TDC_{comp} 로부터 무부하 상태에서의 TDC_{error} 를 확인할 수 있었다.

TDC_{error} 를 확인함으로써 선박용 발전기 디젤엔진에서 폭발각이 등간격이 아닌 경우 즉, 크랭크샤프트 제작에 대한 오차와 플렉시블 커플링 유격에 의한 오차를 찾아 낼 수 있었다. 본 실험대상 엔진에서 폭발각이 최대 1.1°CA까지 어긋나 있음을 확인하였다.

본 실험에서 부하가 증가할수록 TDC_{error} 증가하고 최대 3°CA 내외까지 TDC_{error} 가 발생함을 확인하였다. 이는 엔진출력의 측정 시 TDC 오차를 보정하지 않으면 최대 30%까지 오차를 유발할 수 있으므로 반드시 이를 고려한 출력측정을

하여야 할 것이다.

부하증가로 엔진과 발전기 사이의 플렉시블 커플링의 감쇄 작용에 의한 슬립이 발생하기 때문에 TDC를 보정해야 정확한 출력이 산정될 수 있다.

본 연구에서는 실제 운항중인 선박의 엔진을 계측하여 발생할 수 있는 TDC_{error} 의 원인들에 대하여 고찰하였다. 그리고 보다 정확도 높은 출력을 산정할 수 있도록 정확한 TDC 위치를 찾기 위한 기초연구를 수행하였다. TDC_{error} 의 원인으로 판단되는 각각의 요소에 대한 오차는 추가 연구를 통하여 확인할 필요가 있다.

References

- [1] Chang, H., Y. Zhang, and L. Chen(2005), An applied thermodynamic method for correction of TDC in the indicator diagram and its experimental confirmation, Applied Thermal Engineering, Vol. 25, No. 5-6, pp. 759-768.
- [2] Charchalis, A. and M. Dereszewski(2013), Processing of instantaneous angular speed signal for detection of a diesel engine failure, Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2013, No. 659247, pp. 1-7.
- [3] Jung, G. S., J. Y. Choi, E. S. Jeong, and J. S. Choi(2012), Correction of TDC Position for Engine Output Measuring in Marine Diesel Engines, Journal of the Krea Society of Marine Engineering, Vol. 36, No. 4, pp. 459-466.
- [4] Jung, G. S. and S. K. Lee(2018a), Method for collecting 1 cycle data for output measurement and combustion analysis of large-sized low-speed 4 stroke engine, Korea Patent 1019277860000.
- [5] Jung, G. S. and S. K. Lee(2018b), Method for collecting 1 cycle data for output measurement and combustion analysis of large-sized low-speed 4 stroke engine, Korea Patent 1019130700000.
- [6] Jung, G. S. and S. K. Lee(2018c), Method for collecting 1 cycle data for output measurement and combustion analysis of large-sized low-speed 4 stroke engine, Korea Patent 1019277850000.
- [7] Kowalak, P.(2008), Experimental determination of low speed diesel engine crankshaft twisting, POLISH CIMAC, Vol. 3, No. 2, pp. 75-81.
- [8] Morishita, M. and T. Kushiya(1997), An improved method for determining the TDC position in a PV-diagram (First Report), SAE transactions, Vol. 106, pp. 233-244.
- [9] Morishita, M. and T. Kushiya(1998), An improved method

of determining the TDC position in a PV-diagram, SAE Technical Paper, No. 980625.

- [10] Pipitone, E. and A. Beccari(2010), Determination of TDC in internal combustion engines by a newly developed thermodynamic approach, Applied Thermal Engineering Vol. 30, No. 14-15, pp. 1914-1926.
- [11] Rubber(2020), Rubber Design vibration and noise control, <https://www.rubberdesign.nl/products/propulsion-equipment/marine-couplings>, Accessed April 20, 2020.
- [12] Stas, M. J.(1996), Thermodynamic determination of TDC in piston combustion engines, SAE paper, No. 960610.
- [13] Stas, M. J.(2000), An universally applicable thermodynamic method for TDC determination, SAE Technical Paper, No. 000-01-0561.

Received : 2020. 04. 24.

Revised : 2020. 05. 26.

Accepted : 2020. 06. 26.