한국마린엔지니어링학회지 제36권 제4호, pp. 459~466, 2012. 5 (ISSN 2234-8352(Online) / ISSN 2234-7925(Print))
Journal of the Korean Society of Marine Engineering http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2012.36.4.459

선박용 디젤엔진의 출력산정을 위한 TDC 위치보정에 관한 연구

정균식[1] · 최준영[1] · 정은석[2] · 최재성†

(원고접수일 : 2012년 1월 19일, 원고수정일 : 2012년 3월 13일, 심사완료일 : 2012년 5월 10일)

Correction of TDC Position for Engine Output Measuring in Marine Diesel Engines

Kyun-Sik Jung[1] · Jun-Young Choi[1] · Eun-Seok Jeong[2] · Jae-Sung Choi†

요 약 : 엔진성능 분석을 위해서는 기관의 정확한 출력이 기본적으로 중요한 인자이며, 또한 오늘날 엔진의 연소압력 분석 장치는 엔진의 연구와 개발, 환경규제 및 엔진의 유지관리를 위해서 필수 장비로 대두 되고 있다. 디젤엔진에서 성능 분석의 정확도는 TDC의 위치를 정확하게 찾는 것이 무엇보다 중요하다. 따라서 본 연구에서는 2행정 대형저속의 선박엔진에서 TDC의 위치에 영향을 주는 인자들의 영향을 조사 분석하고, 정확한 TDC 위치를 파악하기 위한 새로운 방법을 제시하고자 한다. 전보에서 정확한 엔진 출력은 TDC위치의 정확도에 의해서 결정이 되며, '시간기준 계측'방법 보다 '각도기준 계측' 방법이 정확도 측면에서 우수함을 밝혔다. 또한 압축압력의 피크는 열손실 및 Blow by에 의한 가스누설로 실제 TDC와 차이가 발생하는 손실각(Loss of angle)을 확인하였으며, 이를 이용하여 정확한 출력을 측정할 수 있는 '향상된 시간기준' 방법을 고안하였다. 이 방법은 선박의 주기관의 손실각만 보정함으로써 엔코더가 설치된 실린더의 '각도기준 계측' 방법과 같은 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 정확한 엔진출력의 새로운 계측 방법을 제시하고, 그 결과에 대한 신뢰성을 검증 하고자 한다.

주제어 : 대형저속엔진, 손실 크랭크 각, 각도기준 계측법, 시간기준 계측법,상사점

Abstract: The accurate engine output is basically one of important factors for the analysis of engine performance. Nowadays in-cylinder pressure analysis in internal combustion engine is also an indispensable tool for engine research and development, environment regulation and maintenance of engine. Here, it is essential more than anything else to find the correct TDC(Top Dead Center) position for the accuracy of engine output for diesel engine. Therefore this study is to analyze affecting factors to TDC position in 2-stroke large low speed engine and to suggest new method for determining correct TDC position. In the previous paper, it was mentioned that the accuracy of engine output is influenced by the determination of exact TDC position, and that 'Angle based sampling' method is better than 'Time based sampling' method in terms of precision. It was confirmed that there is 'Loss of angle', which is a difference between compression pressure peak and real TDC caused by heat loss and blow by of gas leakage. Consequently we invented new method, called "An improved method of time based sampling", which can obtain the correct engine output. The results by this method with compensating loss of angle was shown the same result by the 'Angle based sampling' method in encoder setting cylinder. This study is to suggest the new measuring method of exact engine output, and to examnine the reliance on the outcome.

Key words: Large low speed diesel engine, Loss of angle, Angle based sampling, Time based sampling, TDC (Top Dead Center)

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

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 최소화하여 정확도를 높이는 것이 요구된다. 필자들은 디젤엔진의 출력계측에 관하여 연구한 내용을 전보에서 보고하였다[1,2]. 엔진출력 측정에 있어서 상사점(TDC, Top Dead Center)의 위치오차 1.0°CA(크랭크 각, crank angle)는 약 10%의 IHP(Indicated Horse Power) 오차를 유발하기 때문에 크랭크 위치 특히 TDC의 위치는 최소한 0.1°CA 범위내의 정확도를 확보하여야 한다[3,4,5,6]. 또한 주기관의 경우 부하변동에 의한 회전수 변동을 피할 수 없으며, 그 영향이 적지 않다. 따라서 정확한 지시마력을 얻기 위해서는 각도센서(Rotary encoder)를 사용한 각도기준 계측 방법이 필요하다는 점을 보고하였다[2].

한편 선박의 주기관은 NOx 대책으로 분사시기를 늦추는 방법이 주로 이용 되고 있으며, 이 경우 실린더 내 압력은 일반적으로 TDC 위치와 TDC 이후에서 두 개의 압력 피크를 나타내게 된다. 따라서 실린더 내 압력의 변화로부터 압축 TDC를 파악할 수 있다고 판단된다. 이 방법은 실린더의 위치(실린더의 번호)에 관계없이 TDC위치를 파악할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 압축 TDC는 열손실 및 Blow by에 의한 가스누설로 실제 TDC와는 차이(손실각, Loss of angle)가 발생하기 때문에 이 영향을 파악하여 보정하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 수정된 시간기준 계측 방법을 제안하고 이 방법의 유용성과 손실각에 관하여 연구한 내용을 보고하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

실험대상엔진은 선박의 주기관(main engine)으로 **Table 1**에 주요 사양을 나타낸다. **Table 2**는 실험에 이용한 각도센서의 사양을 나타낸다. 엔진의 실린더 번호는 선수 측을 기점으로 1번 실린더로 정하였으며, 1번 실린더 크랭크샤프트 끝단에 각도센서를 장착하고, 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°CA)를 트리그로 압력 데이터를 수집하는 '각도기준 계측' 방법과 1회전의 시간을 측정하여 수집 간격을 0.1°CA로 한 '시간기준 계측' 방법을 이용하였다. 이하 각각을 각도기준 계측 방법, 시간기준 계측 방법이라 한다.

Figure 1은 실험장치의 개략도를 보여주고 있으며, 각도기준 계측과 시간기준 계측 방법을 동시에 측정하기 위하여 그림과 같이 압력센서와 엔코더의 신호를 각각의 A/D 컨버트(sampling rate : 2μs)를 거쳐 두 방법으로 동시에 데이터를 수집하고, 각 컴퓨터에 저장하는 방식으로 실험을 수행하였다.

데이터 수집은 엔코더의 A펄스의 상승/하강 모서리(edge) 모두를 트리거로 하는 0.5°CA의 수집 간격을 이용하였다.

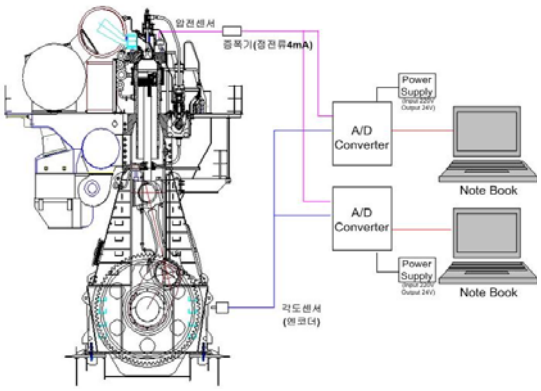

Figure 1: Schematic diagram of exprimental appratus

Table 1: Specifications of test engine

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

Table 2: Specifications of used encoder

Item	Specification
	A
Type	D23SR15
Source Power	DC24V
Plus/Rev.	360
Output	A, B, Z
Tolerance	0

Figure 2는 1번 실린더의 연소압력 측정 결과를 회전수별로 나타낸 것이다.

Figure 3은 10개의 수집된 연소압력 데이터의 노이즈를 제거하기 위하여 평활화(Smoothing) 후 압력변동률 결과를 보여주고 있다. 평활화는 다음 식 (1)과 같은 3점 평활화로 처리하였다.

$$P_i = (P_{i-1} + 2P_i + P_{i_{+1}})/4 \quad (1)$$

또한 측정된 압력 선도를 이용하여 압축압력의 피크를 확인하기 위하여 압력변동률($\frac{dp}{d\theta}$)을 계산하였다.

압력변동률은 식 (2)의 Stirling의 보간공식을 이용하였다.

$$\frac{dp}{d\theta} = \frac{1}{12}(P_{i-2} + 8(P_{i+1} - P_{i-1}) - P_{i+2}) \quad (2)$$

여기서 노이즈 제거를 위한 평활화은 10회 실시하였다.

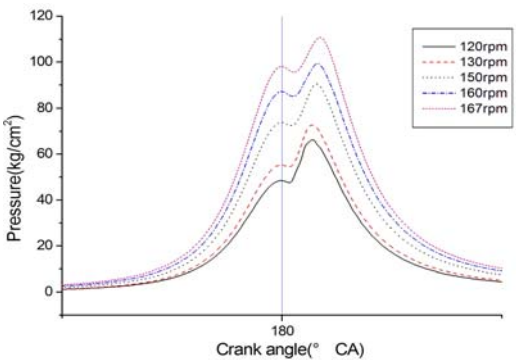

Figure 2: P-Θ Diagram for No.1 cylinder at each engine speed

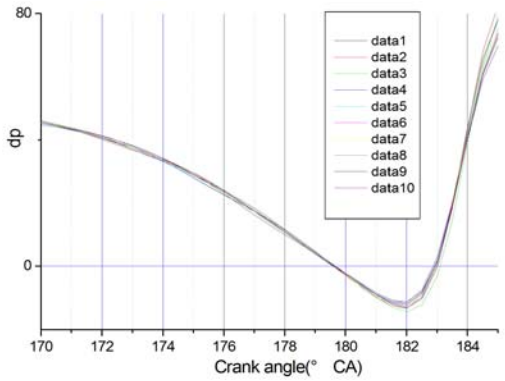

Figure 3: Smoothing results in case of Angle based sampling(0.5°CA) at 120rpm(10times smoothing)

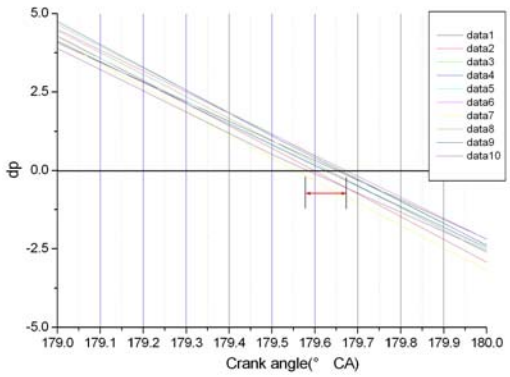

Figure 4: Enlargement of Figure 3

Figure 4는 **Figure 3**을 확대한 것으로 위와 같이 10개의 데이터를 10회의 평활화 처리한 결과를 보여주고 있으며, 모두 0.1°CA의 범위 내에 있음을 알 수 있다.

Figure 5는 시간기준 계측 방법을 위의 **Figure 3**의 방법으로 압축압력의 피크 부근을 확대한 그림을 보여주고 있다. 시간기준계측은 5개의 데이터가 0.07°CA 범위 내에서 있음을 보여주고 있다.

따라서 본 실험에서는 5개 또는 10개의 획득 데이터가 0.1°CA 범위 내에 있는 10회 평활화방법을 사용하였다.

또한 여러 문헌에서도 보고된 바와 같이 TDC 오차 범위를 0.1°CA로 권고하고 있기 때문에 이를 만족하기 위해서는 0.5°CA 간격으로 수집하는 방법이 TDC를 검정하는데 유효한 것으로 판단된다[3-6].

3. TDC 위치보정과 지시마력 계산

3.1 TDC 계측결과 및 고찰

Figure 2는 1번 실린더의 실린더 내 압력을 나타낸 것으로 그림에서 보는바와 같이 본 연구의 주기관은 TDC 이후에 연료를 분사하기 때문에 TDC 부근에서 압축압력의 피크를 정확하게 나타내고 있다.

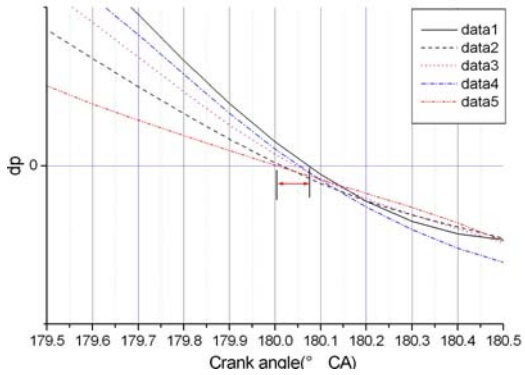

Figure 5: Smoothing results in case of Time based sampling (0.1°CA) at 120rpm (10times smoothing)

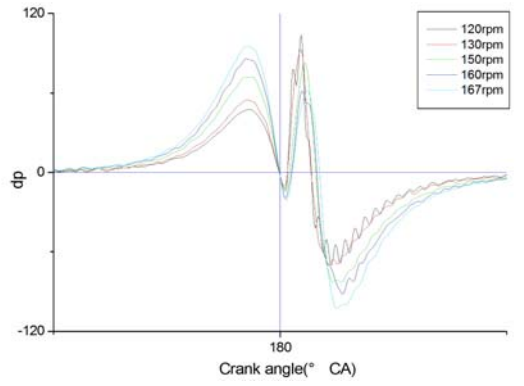

Figure 6: Results of dp/dθ for Figure 2

실린더 내에서 압축최고압력은 압축과정이 단열과정이고 가스누설이 없는 경우 기하학적인 TDC 위치에서 정확하게 발생한다. 그러나 실제 작동중인 엔진에서는 연소실벽으로의 열손실과 피스톤링 등을 통한 가스누설 때문에 압축압력의 피크는 TDC의 위치보다 앞서게 되며, 이에 관한 연구도 다수 보고되고 있다[3-6]. 필자들도 실험을 통하여 이를 확인하고자 하였다. 여기서 압축압력의 피크와 기하학적 TDC와의 차이를 손실각(Loss of angle)이라고 정의 하고 있다.

압축압력의 피크, 즉 dp/dθ=0인 지점을 정확하게 확인하기 위하여 압력변화곡선을 미분하여 그 결과를 **Figure 6**에 또 이를 확대하여 **Figure 7**에 나타내었다.

Figure 7로부터 압축압력의 피크는 기하학적 TDC보다 앞서 나타나며, 회전수가 낮을수록 앞섬의 정도 즉 손실각이 커짐을 알 수 있었다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 열손실과 가스누설에 의한 것으로 판단된다.

본 실험엔진의 경우 계측된 손실각을 **Figure 8**에 나타내었다. 그림으로부터 손실각은 회전속도에 따라 0.2 ~ 0.37°CA정도로 확인되었다.

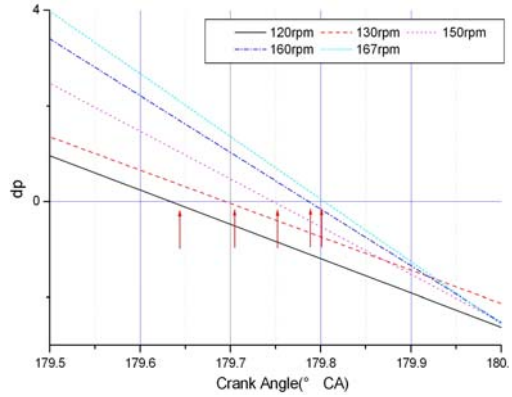

Figure 7: Enlargement of Figure 6 at the position dp/dθ=0

따라서 압축압력의 피크는 열손실과 질량손실로 인하여 실제 TDC보다 먼저 나타나기 때문에 이를 TDC의 기준으로 삼는다면 손실각만큼의 오차를 발생하게 되며, 지시마력은 실제보다 항상 크게 나타나게 된다.

또한 회전속도가 느릴수록 손실각이 크게 나타나기 때문에 대형 저속엔진에서는 이 손실각에 의한 오차는 무시할 수 없다고 판단되며, 본 실험엔진의 경우 NCR(Normal Continuous Rating, 167rpm)에서 약 0.2°CA의 손실각이 있는 것으로 확인되었다.

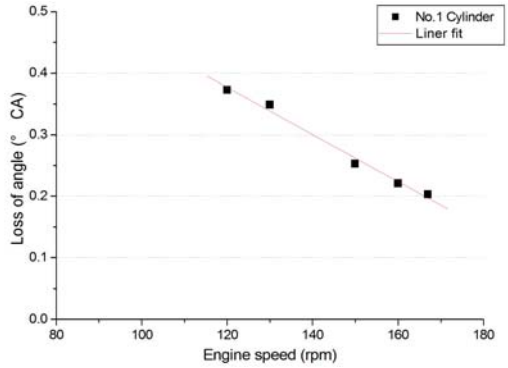

Figure 8: Loss of angle at various engine speeds for NO.1 cylinder

3.2 수정된 시간기준 계측 방법에 의한 지시마력 계산 및 고찰

이상의 검토 결과로부터 손실각을 정확하게 파악하여 결정함으로써 정확한 지시마력을 계산할 수 있다고 판단된다. 따라서 데이터 후처리를 통한 시간기준 계측 방법을 제시하고, 처리과정을 요약하면 다음과 같다.

① 데이터 수집은 시간기준 계측 방법으로 하고, 수집 간격은 회전수를 검출하여 0.1 °CA로 한다.

② 수집된 데이터를 수학적 미분을 통하여 $dp/d\theta=0$이 되는 위치를 확정한다.

③ $dp/d\theta=0$이 되는 지점을 압축압력의 피크(180°CA.)로 하고, 이 지점을 전후로 3600개 데이터를 재배열하여 1사이클을 완성한다.

④ 완성된 사이클에 해당 손실각을 보정하여 출력을 계산 한다.

Table 3은 1번 실린더를 대상으로 그 결과를 각도기준 계측 방법과 비교하였다. 1번 실린더의 각 회전수 120rpm, 150rpm, 167rpm에서의 계측한 결과를 보여 주고 있다.

Table 3: Comparison of Outputs by two sampling methods at each rpm

Rev. (RPM)	Angle base (HP)	Modified time base (HP)	Error (%)
120	316.28	317.40	0.35
150	635.04	623.86	-1.76
167	941.30	924.30	-1.80

Table 3에 보이는 실험결과는 기준이 되는 각도기준 계측과의 비교를 위하여 **Figure 1**에서 보여주는 실험 장치로 동시에 측정하였다. 선박은 해상상태에 따라 수시로 부하가 변동하기 때문에 동시에 실시하지 않으면 같은 부하상태로 보기 어렵기 때문이다. 또한 신뢰성 확보를 위하여 각각 5개의 데이터를 동시 측정하여 비교하였다. 손실각은 5개의 데이터가 0.1°CA 범위 내에 있으며, 그 평균값으로 보정하였다. 본 실험의 경우 120rpm에서는 0.37°CA 150rpm에서는 0.22°CA 167rpm에서는 0.2°CA의 손실각을 각각 보정하였으며, 그 결과 출력의 약 2% 범위 내에서 일치하고 있음이 확인되었다.

따라서 시간기준 계측 방법은 수정된 후처리 과정을 통하여 손실각을 보상함으로써 각도기준 계측 방법의 결과와 비교하여 양호한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

4. Blow-by 가스양의 예측 및 고찰

2000년도 이후 대형저속 선박엔진은 NOx 규제의 대책으로 연료분사 지연 방식을 사용하므로 **Figure 2**와 같이 운전 중에 압축압력의 피크를 확인 할 수 있으며, 이를 이용하여 손실각을 계측 할 수 있었다. 손실각은 열손실과 질량손실에 의한 것으로 열손실에 의한 영향을 사이클 시뮬레이션 기법을 이용하여 파악할 수 있다. 따라서 실제 계측된 손실각과 시뮬레이션 기법으로 계산된 열손실에 의한 손실각을 비교함으로써 질량손실에 의한 영향을 알 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 결과를 토대로 열역학적 연소해석을 이용하여 측정이 불가능한 Blow-by가스의 양을 예측하였다[7].

실린더 벽면으로의 열전달은 다음 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$dQ_w = h\sum F_i(T - T_{wi}) \tag{3}$$

여기서 h는 열전달 계수를 나타내며, 대형 저속 디젤기관임을 고려하여 가장 효과적일 것으로 판단되는 Annand의 실험식 (4)를 이용하였다.

$$h = 0.49\frac{\sigma}{D}\left(\frac{S\cdot n\cdot D}{30\cdot v}\right)^{0.7} \tag{4}$$

Blow-by가스의 량은 다음 식 (6)에 의하여 계산된다.

$$S_B = \pi(B^2 - (B-b)^2)/4 \quad (5)$$

$$dm_l = C_B \cdot S_B \cdot U_{out} \quad (6)$$

여기서, S_B:누설가스 유로면적, B:실린더 직경, b: 마모간격, dm_l: blow-by된 유량 C_B: blow-by 유량계수, U_{out}: 누설가스의 유출속도.

Figure 9는 **Figure 8**에서 계측된 손실각과 사이클 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.

손실각은 열손실과 Blow-by에 의해 발생됨으로 그림에서 ▲은 식 (3)으로부터 Blow-by가 없이 순수 열발생에 의해서 일어나는 손실각을 나타내고, ●는 이러한 열손실에 실험값과 같게 되도록 유량계수 C_B를 변경시켜 고려하여 근사한 결과이다. 따라서 이 두 값의 차이는 Blow-by에 의한 손실각이라고 할 수 있다.

Figure 10은 **Figure 9**에서 실험값과 근사한 결과에 대한 Blow-by가스의 양을 나타내고 있으며, 다음 식 (7)으로 정의하였다

$$r_{B/b}(\%) = \frac{\text{블로바이의 양}}{\text{실린더 내 전체 가스의양}} \times 100 \quad (7)$$

본 실험영역에서 Blow-by가스가 차지하는 비율은 약 2~4% 정도 이며, 회전수가 높아질수록 비율이 작아지고 있다.

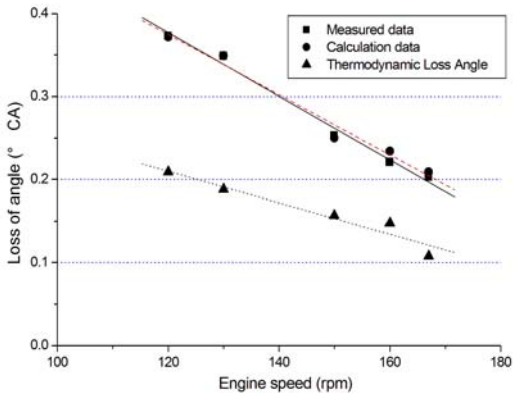

Figure 9: Loss of angle by comparison experiment and calculation

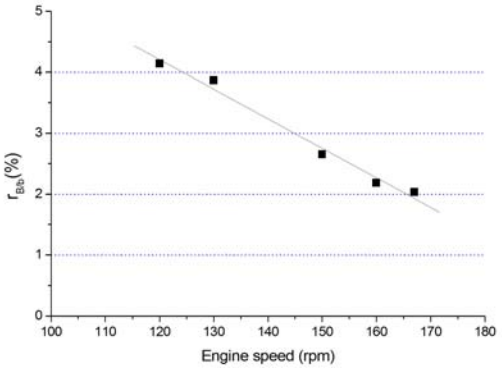

Figure 10: Blow-by gas(%) by matching loss of angle

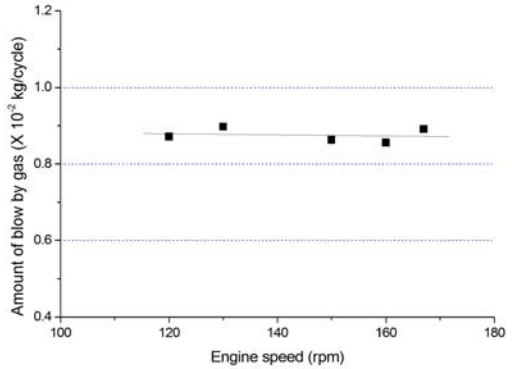

Figure 11: Blow-by gas quantity by matching loss of angle

Figure 11에서는 Blow-by가스의 양을 중량(kg/cycle)으로 나타내었으며, 회전수에 따른 영향이 거의 없이 일정함을 알 수 있다. 이는 실험엔진이 과급 기관이므로 회전수가 증가 할수록 Blow-by 가스의 비율은 작아지지만, 가스의 절대량은 회전수에 관계없이 크게 변하지 않음을 의미한다.

또한 이러한 결과는 Annand의 경험식에 의한 결과 이므로, 본 실험엔진과 경험식의 정확성 정도에 따라 절대 값은 달라질 수 있을 것이다.

5. 결 론

디젤기관의 정확한 지시마력을 얻기 위해서는 각도센서를 사용한 각도기준 계측 방법이 필요하다. 그러나 최근 선박의 주기관은 NOx 대책으로 분사시기를 늦추는 방법이 주로 이용 되고 있으며,

이 경우 실린더 내 압력변화로부터 압축 TDC를 파악할 수 있는 것에 착안하여 수정된 시간기준 계측 방법을 고안하였다. 이 방법은 실린더의 위치(실린더의 번호)에 관계없이 TDC위치를 파악할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 압축 TDC는 기하학적 TDC와 손실각만큼의 차이가 발생한다.

따라서 본 연구에서는 실제 운항 중인 선박주기관의 실험을 통하여 손실각을 계측, 분석하고, 수정된 시간기준 계측 방법을 적용하여 엔진의 지시마력을 산출하였다. 또한 그 결과를 각도기준 계측 방법에 의한 결과와 비교하여 이 방법의 유용성을 검증하였다. 이상의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. NOx 규제 대상이 되고 있는 2000년 이후 생산된 2행정 대형저속 선박용 엔진의 대부분은 TDC 이후에 연료를 분사하기 때문에 압력 데이터로부터 정확한 TDC를 파악할 수 있다. 그러나 손실각에 의한 보정이 요구된다.

2. 손실각의 오차 0.1°CA 범위를 만족하기 위해서는 연소압력 수집 샘플링 간격이 최대 0.5°CA 이하로 하여야 함을 알았다.

3. 압축압력의 피크는 열손실 및 가스의 누설손실로 인하여 손실각이 발생함을 확인하였으며, 회전속도가 느릴수록 손실각이 증가함을 확인하였다. 본 연구의 대상엔진에서는 0.2 ~ 0.37 °CA 정도로 측정되었다.

4. 각도센서 없이도 시간기준 계측 방법의 후처리 과정을 통하여 손실각을 보정함으로써 정확한 TDC를 확인할 수 있으며, 각도기준 계측 방법으로 계산된 엔진의 출력과 비교하여 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

5. 실험으로 계측된 손실각을 이용하여 경험식에 바탕을 두고 열역학적 연소해석을 통하여 Blow-by의 의한 영향을 파악할 수 있었으며, 본 실험에서는 Blow-by가스가 차지하는 비율이 약 2~4%였으며, 회전수가 높아질수록 비율이 작아지지만, Blow-by가스의 절대량은 회전수에 따른 영향이 거의 없다고 판단된다.

참고문헌

[1] 최재성 외 3인, “저속박용디젤기관의 순간회전속도 변동에 관한 연구”, 한국마린엔지니어링학회지. 제31권 2호, pp. 138~144, 2007.

[2] 정균식 외 3인, “선박용 디젤엔진의 출력산정에 관한 연구”, 한국마린엔지니어링학회지, 제35권 제4호, pp. 436~442, 2011.

[3] Emiliano Pipitone, Alberto Beccari “Determination of TDC in internal combustion engines by a newly developed thermodynamic approach”, Applied Thermal Engineering 30, pp. 1914-1926, 2010.

[4] Hanbao Chang, et al., “An applied thermodynamic method for correction of TDC in the indicator diagram and its experimental confirmation”, Applied Thermal Engineering 25, pp. 759-768, 2005.

[5] Wang Xi-Bo, et al., “A thermodynamics model for the compression and expansion process during the engine's motoring and a new metnod for the determination of TDC with simulation technique”, Applied Thermal Engineering 27, pp. 2003-2010, 2007.

[6] Mitsue Morishita, Tadashi Kushiyama “An improved method for determining the TDC position in a PV-Diagram (First Report)”, SAE Paper No. 970062, 1997.

[7] 최재성 외 5인, “선박용 2행정 디젤기관의 성능시뮬레이션 프로그램 개발”, 한국마린엔지니어링학회지, 제34권 1호, pp. 62~68, 2010.

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

최준영(崔俊英)

2005. 2 한국해양대학교 기관시스템공학부 졸업(공학사), 2005. 2 ~ 2009. 9 (주)현대상선 기관사, 2012. 2 한국해양대학교 대학원 졸업(공학석사), 2009. 9 ~ 현재 한국해양대학교 실습선 이등기관사

정은석(鄭殷石)

1990.2 한국해양대학교 기관시스템공학부 졸업(공학사), 1990.2 ~ 1993.10 한진해운(주) 기관사, 1999.2 한국해양대학교 대학원 졸업(공학석사), 2007.2 부경대학교 대학원 박사과정 수료, 1993.12~현재 한국해양대학교 실습선, 한국해양대학교 부교수

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 기관시스템공 학부 교수