한국정밀공학회지 제 26권 5호 pp. 104-111 May 2009 / 104
Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 26, No. 5, pp. 104-111

리니어 엔코더를 이용한 선박 엔진용 무선 크랭크 샤프트 디플렉션 검사 장치 개발

Development of Wireless Device for Inspecting Crankshaft Deflection Using Linear Encoder

김장규[1], 이민철[2,✉]
Jang Kyu Kim[1] and Min Cheol Lee[2,✉]

1 두산엔진 기술연구소 (Technology Center, Doosan Engine.)
2 부산대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.), 기계기술연구원
✉ Corresponding author: mclee@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2439

Manuscript received: 2008.6.26 / Revised: 2009.2.12 / Accepted: 2009.2.16

A ship engine operator should compensate the crankshaft assembly of ship engine after inspecting crankshaft deflection error in the crank throw regularly to avoid engine vibration and abrasions. In the previous method, the operator enters the bed plate and measures crankshaft deflection using dial gauge on rotating crankshaft manually. However, this method can cause dangerous situation to the operator as well as uncomfortable in an inferior environment. In order to solve the problems, this paper studies the method which makes the operator measure the error outside of the bed plate. In this paper, it is suggested that BlueTooth wireless communication transfers the error data to the outer standing operator with digitalized crankshaft deflection inspection device developed in this paper. So, the wireless measurement system is developed and applied to a medium-speed marine engine through size-miniaturization. After applying test, the developed inspection device showed that it provides much safe and ease inspection method. Furthermore, in the result, the measuring accuracy is more improved.

Key Words: Crankshaft (크랭크 샤프트), Deflection (휨), Wireless (무선)

1. 서론

선박용 디젤엔진의 구동부는 크게 실린더, 피스톤, 커넥팅 로드, 크랭크 축 등으로 구성된다. 특히 크랭크 축은 엔진 최하단의 베드 플레이트(bed plate)에 조립되어 엔진 폭발력에 의한 피스톤의 상하 운동을 커넥팅 로드와 연결하여 회전운동으로 변환시켜주는 역할을 수행한다. 크랭크 축의 조립 시 이를 지지하는 베드 플레이트의 공차로 인해 크랭크 축이 부분적으로 처지게 되면, 엔진의 운전 중 과진동 등의 문제가 발생하게 된다. 따라서 엔진 조립작업을 하거나 일정시간 엔진의 운전 후 크랭크 축 처짐의 양을 정기적으로 검사하게 된다. 이러한 검사 작업은 크랭크 축을 1 회전 시킬 때, 크랭크 스루(crank throw) 내부의 상대거리 측정을 통해 수행하게 되며, 이를 크랭크 축 디플렉션(deflection, 휨) 측정이라 한다.[1] Fig. 1 은 크랭크 축 디플렉션을 도식적으로 나타낸다.

기존의 크랭크 축 디플렉션 측정 방식은 다이얼 게이지를 이용하여 수행되었다. 엔진 기종에 따라 크랭크 스루의 내부 거리가 다르기 때문에 연결관을 이용하여 사용 거리를 조절한다. 다이얼

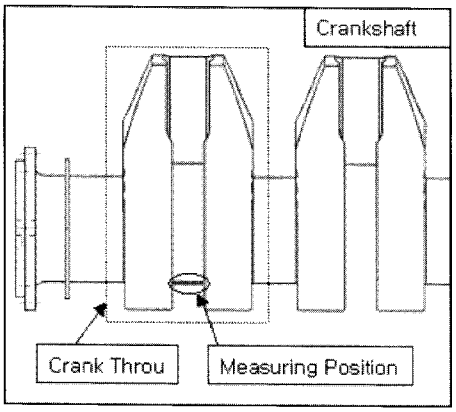


Fig. 1 Block diagram of crankshaft

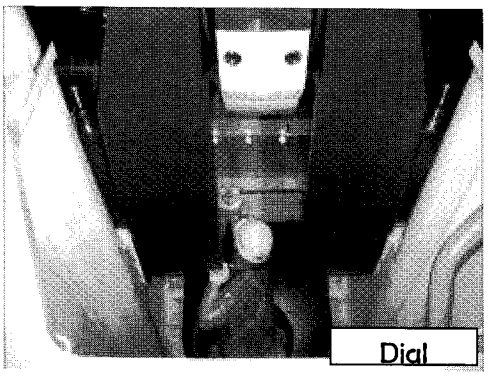


Fig. 2 Picture of using dial gauge

게이지를 사용한 측정 방법은 한 명의 작업자가 다이얼 게이지를 크랭크 스루에 장착한 후 크랭크 축 회전 시 베드 플레이트 내부에 들어가 따라 돌면서 측정 위치에서 다이얼 게이지 측정 값을 육안으로 확인 한다. 그리고 확인된 값을 외부의 작업자에게 구두로 전달하게 된다. 이러한 측정작업은 추락, 미끄럼 등의 위험요소를 포함하고 있으며, 육안 측정으로 인한 정밀 측정이 힘든 단점이 있다. Fig. 2 는 다이얼 게이지를 이용한 측정작업을 나타낸다.

다이얼 게이지를 이용한 측정의 문제점을 개선하기 위해 유선 디지털 측정장치가 개발되었다.[2] 작업자는 장치의 장착 시에만 베드 플레이트 내부에 들어가며, 크랭크 축이 회전할 때는 외부에서 측정치를 읽는다. 그러나 엔진 1 회전 시 신호선이 꼬이는 현상으로 인해 사용상 불편함을 야기시키는 문제점이 있어 실제 사용은 미미한 실정이다.

상기 문제점들을 보완하기 위해 선행 연구에서 무선 통신을 이용한 크랭크 축 디플렉션 측정장치를 개발하였다.[3] 측정장치를 크랭크 스루에 장착한 후 작업자는 베드 플레이트 외부에서 무선으로 전달된 신호를 상용 PDA(personal digital assistants)를 통하여 측정함으로써 신호선의 꼬임 문제를 해결하였다. 하지만 측정장치에 사용된 변위 센서 모듈의 크기 문제로 인해 선박용 저속 엔진에만 사용 가능하며 상용 PDA 의 내구성이 약해 잦은 고장이 발생하는 문제점이 발생하였다.

본 연구에서는 선박엔진 조립/검사 공정에 세계 최초로 원격 측정기술을 도입한 기존의 측정장치 개발 기술을 실용화하기 위해 선행 개발단계에서 한계가 있었던 운용 범위를 개선하여 선박용 중속엔진까지 운용 범위를 확장시키고, 기존 상용 PDA 사용에 따른 문제점을 해결하기 위해 디스플레이부 전용 장치를 개발하여 실용성과 내구성을 개선 하고자 한다.

2. 디플렉션 측정장치 개념 및 설계

본 연구를 통해 개발 하고자 하는 장치는 크게 2 부분으로 구성된다. 측정장치부는 크랭크 스루의 펀칭마크에 장착되며, 엔진 모델에 따라 크랭크 스루 간격이 다르므로 연장관을 사용하여 다양한 모델에 장착 가능한 구조로 되어 있다. 표시장치부는 측정장치부에서 측정된 디플렉션 값을 무선통신을 통해 전송 받아 표시해 주는 역할을 수행한다.

또한 전송 받은 측정치를 저장할 수 있는 기능이 있어 사용의 편의성을 증대하였다. Fig. 3 은 개발 장치의 설치도를 나타낸다.

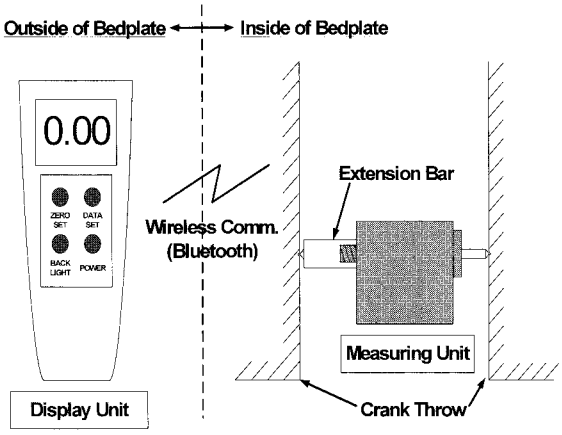


Fig. 3 Block diagram of developed device

2.1 측정장치부

측정장치부는 크랭크 스루에 장착되어 크랭크 샤프트 1 회전 시 발생하는 디플렉션 값을 디지털 값으로 변환시킨 후 블루투스 무선통신을 이용하여 표시장치부로 전송하는 기능을 수행한다. 엔진 기종에 따라 크랭크 스루의 간격이 다르므로 연장관(extension bar)을 이용하여 다양한 엔진 기종에 장착한다.

2.1.1 측정장치부의 설계 개념

Fig. 4 는 기존의 측정장치부 구조를 나타낸다. 상용의 선형 변위센서를 사용하여 변환된 길이 값을 제어보드를 통해 획득한 후, 블루투스 무선통신으로 표시장치에 전달하게 된다. 하지만 상용의 변위센서의 경우 시판되는 제품 중 가장 짧은 길이가 127mm 로써, 기구부 구조를 고려하면 크랭크 스루간의 거리가 150mm 이하인 엔진 모델은 측정할 수 없게 된다. 이는 선박 추진용 저속엔진의 전 모델은 측정이 가능하나, 선박의 전원 공급용 보조엔진인 중속엔진의 소형 모델에는 적용할 수 없는 단점이 있다. 따라서 본 개발에서는 적용영역 확대를 위해 상용 변위센서 기반이 아닌 리니어 엔코더 모듈을 사용하여 개선된 측정장치부를 제안하고자 한다.

제안된 측정장치부는 리니어 엔코더 모듈을 활용한 정밀 소형 기계 설계기술을 접목하여 측정모듈의 획기적 소형화를 이루었다. Fig. 5 는 개선된 측정장치 기구부의 설계 개념도를 나타낸다. 제안된 측정장치부의 구성은 끝단에 팁이 장착된 샤프트를 연결 지그로 미니 슬라이드 가이드와 연결하여 샤프트의 왕복운동이 연결 지그의 왕복운동으로 전환된다. 연결 지그에는 리니어 엔코더용 스트립이 부착되어 이를 엔코더 헤드를 이용하여 거리 값으로 환산하게 된다. 크랭크 스루 내부의 펀칭 마크에 측정장치부가 원활히 장착되기 위하여, 연결 지그는 스프링을 통하여 인장력이 부가된다.

이러한 구조는 기존의 최소길이인 150mm 의 측정장치부 길이를 약 30% 축소하여 100mm 이내로 사이즈 소형화를 가능케 한다. 이를 통해 적용대상 엔진 종류를 확대하였다.

2.1.2 리니어 엔코더 측정 원리

리니어 엔코더는 선형 측정 스트립과 헤드로 구성되며, 그 원리는 Fig. 6 과 같다. 광센서가 센서 스트립의 슬릿 마크를 통과할 때 빛이 통과했다 끊겼다 하는 물리적 신호를 펄스 신호로 변환하며, 컨트롤러에서 이를 계수하여 선형 변위값을 측정하게 된다. 본 개발에 사용된 센서 스트립 슬릿 마크의 간격은 10 ㎛이다.

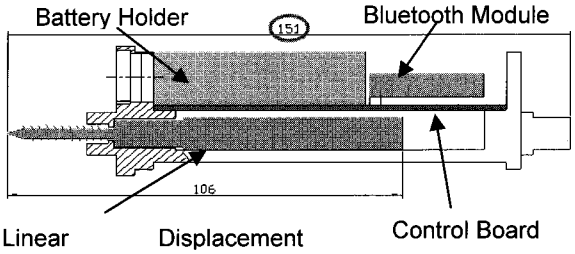


Fig. 4 Block diagram of measuring unit(old model)

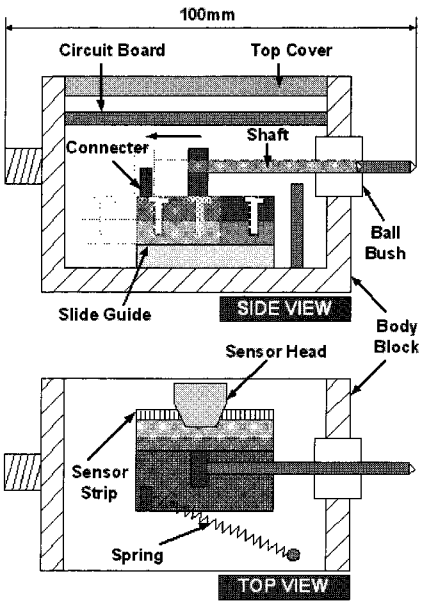


Fig. 5 Block diagram of measuring unit(new model)

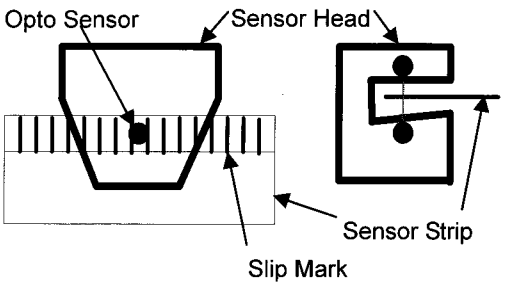


Fig. 6 Block diagram of linear encoder

2.2 표시장치부

표시장치부는 측정장치부로부터 블루투스 무선 통신을 이용하여 측정데이터를 전달 받은 후 이를 표시해 주는 기능과 계측된 값을 저장하는 기능을 가진다. 또한 상위의 PC 와 블루투스 통신 연결이 가능하다.

2.2.1 표시장치부 기능

Fig. 7 은 표시장치부의 디자인 및 각 버튼의 기능을 나타낸다. 버튼은 총 4 개로 구성되며, 'POWER' 버튼을 통하여 전체 전원을 인가하게 된다. 표시 모드는 2 가지로 구성된다. 첫 번째 모드는 "DATA VIEW MODE"로써, 현재의 디플렉션 값을 표시해 주는 기능을 수행한다. 두 번째 모드는 "FUNCTION MODE"로써 저장된 데이터를 확인 및 삭제하는 기능을 수행한다. 모드는 'DATA SET' 버튼에 의해 변환된다. 'DATA SET' 버튼은 1 초 정도 누르면 Fig. 8 과 같이 모드가 변환된다. "FUNCTION MODE"에서는 총 3 개의 메뉴가 구성된다. 첫 번째는 저장된 데이터를 확인하는 버튼이며, 두 번째는 저장된 데이터를 삭제하는 버튼이다. 마지막으로 세 번째는 "FUNCTION MODE"를 종료하는 기능이다.

선박용 저속엔진의 1 실린더에 대한 디플렉션 정 위치는 총 5 개로 구성된다. 상위 디플렉션 데이터 관리 프로그램과의 통신을 위해서 데이터 저장 시 실린더 번호와 측정 위치정보가 지정되어야 한다. 하지만 사용 편의성을 위한 단순화된 시스템 구성으로 버튼 수가 3 개로 제약된다. 이를 해결하기 위해 데이터 저장을 위한 'DATA SET' 버튼을 누를 시 저장될 실린더 번호 선택 화면으로 자동으로 전환되며, 실린더 번호 선택 후 측정 위치 선택 하는 경우 자동 변환되도록 저장 절차를 정립하였다. Fig. 9 는 저장 절차를 나타낸다.

2.2.2 데이터 통신 설계

데이터 통신은 블루투스 무선통신 [4,5] 을 이용하며 크게 2 개의 루틴을 통해 수행된다. 첫 번째는 상위 PC 와 측정장치부를 구별하기 위한 루틴으로 블루투스 통신의 링크가 'ON'될 시 표시장치는 '0x55' 값을 RS232 통신을 통해 송신하게 된다. 이후 상대 장치로부터 '0x33'이 수신되면 상위 PC 로 인식하며, '0x44'가 수신되면 측정장치로 인식한다. 외부 장치를 인식한 후 두 번째 통신 루틴이 수행되게 된다. 외부 장치가 상위 PC 일 경우의 루틴은 향후 연구과제로 추진할 예정이며, 측정장치부로 인식했을 경우의 측정장치부와 표시장치부 간의 통신 순서도는 Fig. 10 과 같다. 우선 표시장치부에서 데이터를 받을 시점에 '0xFF' 값을 측정장치로 송신하면, 폴링 방식에 의해 수신 데이터를 감시하고 있던 측정장치부로 그 값이 전달된 후 측정장치는 일련의 데이터 수집과정을 거친 값을 상위 디스플레이 장치로 전송하게 됨으로써 통신의 한 주기를 형성하게 된다. 전송되는 정보는 현재의 변위값과 측정장치부의 배터리 전압이다. 이 중 배터리 전압값은 표시장치부에서 측정장치부의 배터리 잔량을 체크하여 표시해 주기 위해 전송된다.

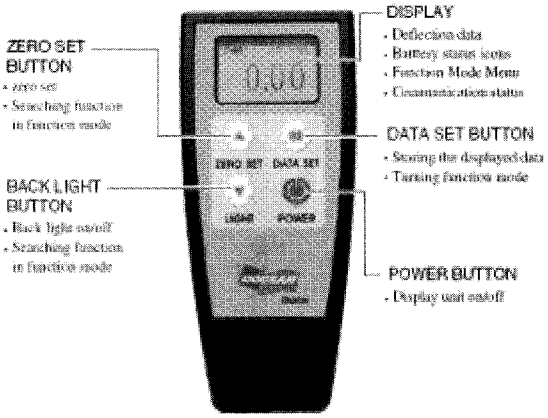


Fig. 7 Function of Display unit

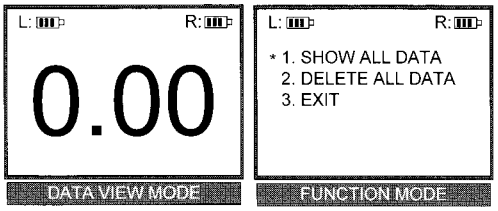


Fig. 8 Block diagram of linear encoder

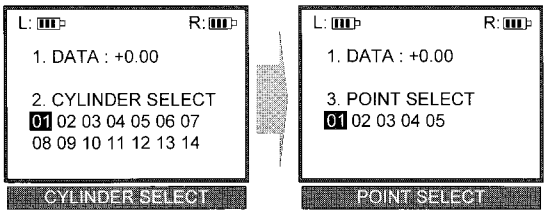


Fig. 9 Sequence of saving data

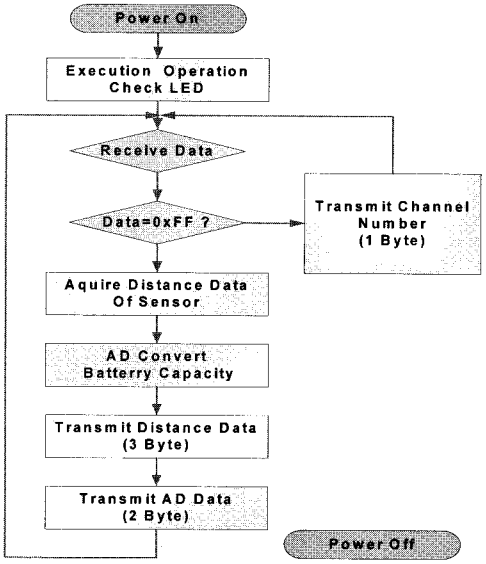


Fig. 10 Communication sequence diagram

3. 성능평가

본 개발품을 현장에 적용하기 위해서 현장 상황에 맞는 성능 및 내구성이 요구된다. 첫 번째, 정도는 선박엔진의 설계 사양에 따라 10 ㎛를 만족해야 하며, 두 번째, 통신거리는 측정장치를 크랭크 샤프트에 장착 후 엔진 갤러리 상의 어느 위치에서나 측정 가능할 정도를 만족하기 위해 최대 엔진을 기준으로 30m 이상이 요구된다. 세 번째, 배터리 지속시간은 12 실린더 엔진 기준 측정 시간이 약 4 시간이며 1 년간 선박에서 약 4 회의 측정이 필요하므로 배터리 교환없이 측정하기 위해서는 약 20 시간 이상이 필요하다. 마지막으로 엔진 운전 후 크랭크샤프트 디플렉션 측정 시 측정장치부 장착위치에서의 온도가 60℃임을 감안하여 80℃이상에서 동작이 가능해야 한다.

3.1 정도 평가

측정장치부의 정도를 평가하기 위해 Fig. 11 과 같이 정도 평가장치를 구성하였다. 고정 지그에 개발품을 장착한 후 맞은편 변위 테스터(디지매틱 마이크로 헤드, Mistoyo 사)와 축을 일치 시킨 다음 변위 테스터의 핸들을 회전해 가며 변위 테스터의 변위값과 개발품에서 측정된 변위값을 비교하였다. 변위 테스터의 사양은 Table 1 과 같다. 시험 사진은 Fig. 12 와 같으며, 최종 결과는 Table 2 와 같다.

크랭크 샤프트의 디플렉션 범위가 1mm 를 넘지 않으므로 최대 3mm 까지 변위값을 비교하였다. 이때, 13 개의 전 비교 지점에서 값이 정확히 일치함을 확인하였다. 센서 값이 리니어 엔코더 모듈에 의해 디지털화 되어 측정되기 때문에 0%의 오차율을 얻을 수 있었다. 본 과제의 개발 후 시제품 제작을 수행하여 100 여 제품에 대한 정도 테스트를 수행한 결과 전 제품이 오차율 0%로써 사양을 만족하였다. 이는 본 연구에서 제안한 디지털 센서의 적용을 통해 가능하였다.

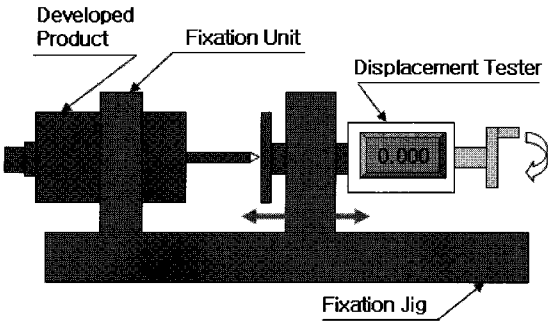
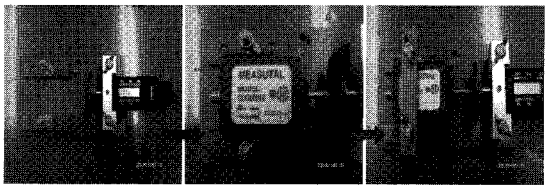


Fig. 11 Block diagram of accuracy tester



(a) Setting of a displacement tester

(b) Testing of a displacement tester

Fig. 12 Display values of a displacement tester and a development product

Table 1 Specification of the displacement tester

Item	Specification
Range	0 ~ 25 mm
Accuracy	± 2 ㎛

Table 2 Result of accuracy test

Measuring Point [mm]	Tester [mm]	Developed device [mm]	Error [mm]
0.00	0.00	0.00	0
0.01	0.01	0.01	0
0.05	0.05	0.05	0
0.10	0.10	0.10	0
0.15	0.15	0.15	0
0.20	0.20	0.20	0
0.30	0.30	0.30	0
0.40	0.40	0.40	0
0.50	0.50	0.50	0
0.70	0.70	0.70	0
1.00	1.00	1.00	0
2.00	2.00	2.00	0
3.00	3.00	3.00	0

3.2 통신 거리 평가

엔진 내부에서 자유롭게 이동해 가며 통신을 하기 위한 통신거리의 사양은 선박용 저속엔진 중 길이가 24m, 폭이 4m 인 엔진을 기준으로 했을 시 오픈 공간에서 통신거리가 30m 이상이 되어야 한다. 따라서 통신거리 평가는 아래의 2 가지 스텝으로 실시였으며 Fig. 13 과 같이 30m 까지 동작 가능함을 확인하였다.

Step 1. 측정장치와 표시장치를 켜서 정상 통신 상태를 확인.

Step 2. 측정장치를 표시장치와 멀어져 가며 통신 에러가 발생하는 지점을 측정함.

3.3 배터리 지속시간 평가

본 개발품에 사용된 배터리 사양은 AA 사이즈 알카라인 배터리이며, 수량은 표시장치부와 측정장치부에서 각각 2 개씩 장착된다. 배터리 지속시간 측정을 위해 Fig. 14 와 같이 전압 측정기를 통해 동작인 멈출 때까지 배터리의 전압을 측정하였다. 총 3 sets 의 개발품에 대해 측정을 한 결과는 Fig. 15 와 같으며, 동작을 위한 최소 전압인 1.6V 까지의 지속시간이 20 시간으로 기본 사양에서 요구되는 20 시간을 만족하는 성능을 구현함이 확인되었다.

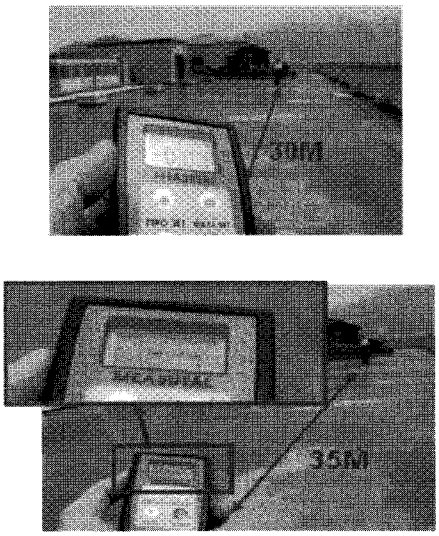


Fig. 13 Result of communication distance test

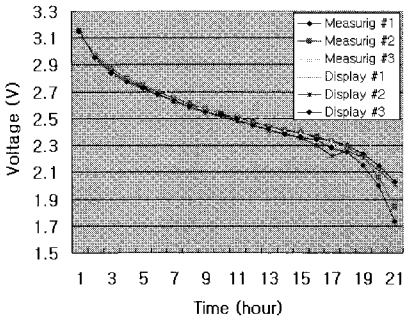


Fig. 14 Block diagram of battery life test

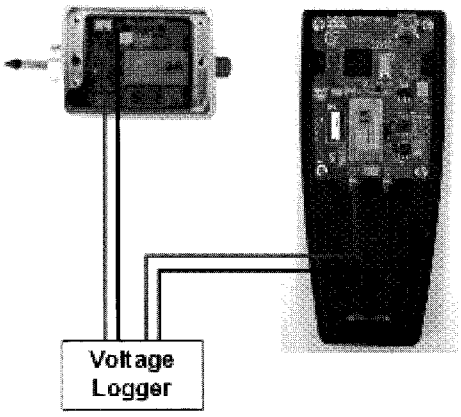


Fig. 15 Result of battery life test

3.4 내온 성능 평가

내온 성능은 고온에서의 정상동작에 대한 신뢰성을 평가하기 위한 방법이며, 시험 방법은 고온 챔버를 80℃까지 가열한 후, 개발품 26 sets 를 챔버 내부에서 2 시간 동안 에이징(aging) 시킨다. 그 후 개발품의 기본 성능을 평가하였다. Table 3.은 성능 평가 항목을 나타내며, Fig. 16 은 항온실험 현장을 나타낸다.

상기의 실험 결과 총 26 sets 모두 정상 동작을 확인하였다. 따라서 온도에 대한 항온 능력이 충분히 확보 되었음을 알 수 있었다.

Table 3 Function test specification

Test items	Function test criteria
Light ON/OFF Function	There is no error when Light On/Off is conducted 20 times.
Storage Function	There is no error when 10 data stored are correct
Zero set Function	There is no error when Zero set is conducted 20 times.

4. 현장 적용 실험 및 평가

현장 적용을 위해 기존의 당사에서 수행 중인 다이얼 게이지를 이용한 측정과 본 연구에서의 개발품을 이용한 측정을 비교 분석하였다. Fig. 17 은 실험 현장을 나타낸다. 그림에서와 같이 기존의 다이얼 게이지의 측정을 위해서 작업자가 챔버 내부에서 직접 육안으로 측정치를 확인하고 있으며, 이후 측정된 결과를 외부의 작업자에게 구두로 전달하게 된다. 이에 반해 오른쪽 개발품 적용에서는 장착된 표시장치부로부터 무선으로 데이터를 전송 받아 외부에서 측정치를 확인할 수 있으며, 측정치를 바로 기입할 수 있다. 따라서 기존 방식이 작업자 2 명이 필요한 반면 본 개발품의 사용 시 작업자가 1 명으로 줄어들고 측정의 편의성이 확보함을 알 수 있다.

Fig. 18 은 현장 적용 시험 시 1 실린더에 대해 측정될 위치를 나타낸다. 실제 측정 데이터는 4 개가 필요하나, 크랭크샤프트의 최하단 위치에서는 커넥팅 로드의 간섭으로 인해 두 개로 분리되어 실제로는 5 개의 데이터를 측정하게 된다.

측정 대상 엔진은 8 실린더의 보어 크기가 80cm 이며, 측정 결과는 Table 4 와 같다. 측정결과 오차범위는 1/100mm 이었으며, 이는 대형 구조물의 특성 상 같은 측정을 두 번 수행할 경우 생기는 일반적인 오차범위 내에 들어오므로 본 결과는 개발품의 실제 현장 적용 시 정밀도가 확보되었음을 알 수 있다.

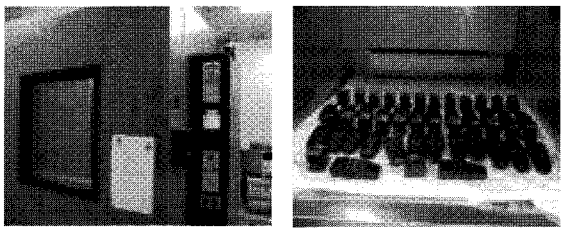


Fig. 16 System setup for heat-resistant test

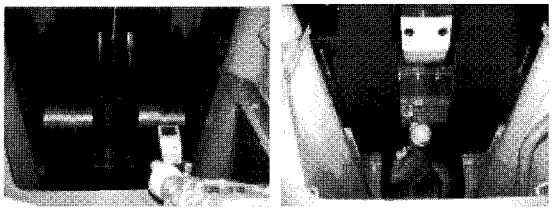


Fig. 17 Comparison between dial gauge and developed device

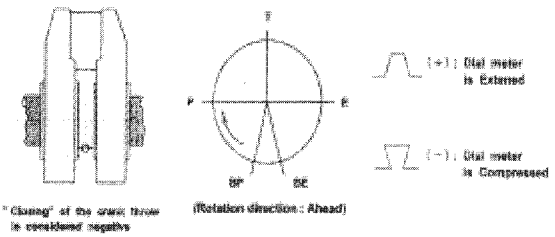


Fig. 18 Measuring position

Table 4 Result of field test

Measuring Position	Dial Gauge	Developed Device	Error
BP	0.00	0.00	0
P(pump)	-0.01	-0.01	0
T(Top)	0.08	0.09	0.01
E(Exhaust)	0.02	0.03	0.01
BE	0.02	0.02	0

5. 결론

본 연구에 의해 개발한 선박용 디젤 엔진의 크랭크샤프트 디플렉션 측정장치는 기존 개발품의 한계를 극복하여 중속 엔진까지 적용 범위를 확장하였으며, 안정성 및 정도 확보를 위한 실험을 통하여 장치의 강인성을 검증하였다. 마지막으로 현장 적용 시험을 통하여 측정 시간의 단축 및 편의성을 검증하였다. 이상의 수행 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 성능 평가 결과
  - 정도(Accuracy) : 10 ㎛
  - 통신거리(Communication Distance) : 30 m
  - 배터리 지속시간(Battery Life Time) : 20 hours
  - 내온 성능(Heat-Resistant) : 80 ℃

- 현장 적용 시험 결과
  - 측정 효율 향상 : 2인 작업 → 1인 작업
  - 측정 편의성 향상 : 챔버 내부 작업 삭제

또한 본 개발품은 현재 상용화되어 판매 중에 있으며, 상기 기능과 편의성 등으로 인하여 지속적으로 시장이 확대되고 있다.

향후 상위 PC 의 크랭크샤프트 디플렉션 데이터 관리 기능 개발을 통하여 선박 엔진의 이력을 효율적으로 관리할 수 있도록 연구를 추진하고자 한다.

참고문헌

1. Malin Instruments Ltd., "Crankshaft Deflection Meter," Technical Manual, pp. 6-11, 2002.
2. Prisma Teknik AB, "Crankshaft Deflection Indicator DI-4C," Technical Manual, pp. 1-4, 2004.
3. Kim, J. K., "Development of Crank Shaft Deflection Measuring System by Bluetooth Communication For the Marine Diesel Engine," Proc. of the KSPE Autumn Conference, pp. 752-755, 2004.
4. Gehrmann, C. " Bluetooth™ Security White Paper," Bluetooth SIG Security Expert Group, 2002.
5. Toshiba Computer Systems, "The Bluetooth Technology," White Paper, 1999.