

# LVDT를 이용한 선박용 디젤 엔진의 실린더 라이너 마모 계측시스템 개발 및 성능평가

하윤수<sup>†</sup>

(원고접수일 : 2011년 8월 10일, 원고수정일 : 2011년 9월 27일, 심사완료일 : 2011년 9월 29일)

## Development of LVDT-Based Measuring System of the Cylinder Liner Wear for Marine Diesel Engines and Its Performance Evaluation

Yun-Su Ha<sup>†</sup>

**요약** : 본 논문에서는 대형 선박용 디젤 엔진의 실린더 라이너의 마모량을 측정하는 새로운 시스템의 개발에 관하여 소개한다. 제안된 시스템은 LVDT, 온도센서, 실린더 내부의 밝기조절용 LED 및 카메라가 각각 1개씩 부착된 측정부, 계측명령전달 및 측정데이터 모니터링을 담당하는 컴퓨터기반 모니터링부, 측정부의 제어 및 측정데이터의 모니터링부로의 전송을 담당하는 주 제어부로 구성된다. 개발된 시스템의 정도는 1/100 mm의 측정정도를 갖는 내경게이지의 것과 비교되어진다.

**주제어** : 선박용 디젤 엔진, 실린더 라이너 마모, 측정시스템, LVDT

**Abstract**: This paper introduces a new system which measures abrasion quantity of cylinder liners of large-scale marine diesel engines. The proposed system consists of three parts; measurement part where an LVDT, a temperature sensor, a camera and LED for lighting control are installed, monitoring part which accomplishes measurement command transmission and monitoring based on PC or notebook, and master control part which controls the measurement part and transfers measurement data to the monitoring part. The accuracy of the developed system is compared with that of an internal micrometer with 1/100 mm accuracy.

**Key words**: Marine diesel engine, Cylinder liner wear, Measurement system, LVDT

### 1. 서 론

선박 엔진에 있어서 피스톤의 왕복운동에 의한 실린더 라이너의 마모는 엔진의 열효율을 저하시켜 에너지비용을 늘어나게 하며, 비정상적 연소를 발생시킬 수 있다[1-2]. 그러나 필요이상 잦은 라이너의 교체는 선박운용 비용을 증대시킬 뿐 아니라 많은 시간적 낭비를 초래할 수 있다. 따라서 실린더 라이너의 마모 상태에 따라 적절한 시기에 라이너를 교체하는 것은 엔진효율증대 및 선박운용 비용 절감을 위해 매우중요하다. 이를 위해 실린더 라이너의 내경에 대한 정기적인 계측이 필요하다.

그러나 Figure 1에서 보는 바와 같이 기존의 라이너 내경 계측 작업의 경우 사람이 실린더 커버를 탈착한 후 작업자가 실린더 라이너 내측으로 들어가 내경 계측 게이지로 작업하였다. 이 경우 실린더 내부의 높은 온도에 의한 위험 부담이 존재하여 고도로 숙련된 해기사가 요구 된다. 또한 계측 작업 시간이 길며, 작업자의 개인차에 의한 계측오차 등이 존재한다. 때문에 이러한 문제점들을 해결하기 위한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다 [2-3]. [2]에서는 내경의 측정을 위하여 엔코더와 초음파센서를 이용하고 있어 초음파의 넓은 지향

<sup>†</sup> 교신저자(한국해양대학교 IT 공학부, E-mail:hys@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4347)

각과 경면반사에 의한 오차가 발생할 수 있다. [3]에서는 ANFIS를 이용한 마모예측방법을 제안하고 있으나 실제 현장에서는 적용되고 있지 않다. 본 논문에서는 LVDT, 마이크로프로세서, DC모터 등을 기반으로 하여 선박용 엔진 실린더 라이너 내경을 자동으로 측정함으로써 라이너의 마모상태를 알 수 있도록 하는 시스템의 개발에 관하여 논하고자 한다. 또한 개발된 시스템의 성능을, 정도 1/100mm 인 MITUTOYO사의 라이너 내경 게이지와 비교하고 평가하고자 한다.

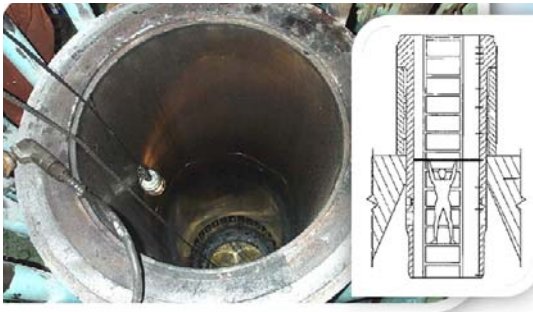


Figure 1: A scene of usual working for measuring cylinder liner wear

## 2. 시스템의 구성

### 2.1 전체 시스템 구성도

Figure 2는 본 연구에서 대상으로 하고 있는 실린더 라이너 내경 자동측정시스템의 구성을 나타낸다. 기구부의 구성은 수평, 수직 이동을 위해 엔코더가 장착된 DC 모터 2EA, 내경 측정을 위한 LVDT, 실린더 라이너 내부 상태를 모니터링 하기 위해 카메라와 온도 센서가 장착되어 있다. 각각의 제어는 Cortex-M3 코어가 내장된 STM32F103ZET6 칩을 중심으로 이루어진 메인 컨트롤러에 의해 이루어진다[4]. PC나 노트북에서는 사용자 애플리케이션이 설치되어 원격으로 기구부를 제어할 수 있으며 카메라로부터 실린더 라이너의 내부 상태 관측이 가능하다. 또한 측정된 결과를 데이터베이스에 저장하고 그래프로 결과를 보여줄 수 있도록 하였고, 측정 순서를 사용자가 지정하여 순차적으

로 측정이 가능하도록 설계하였다.

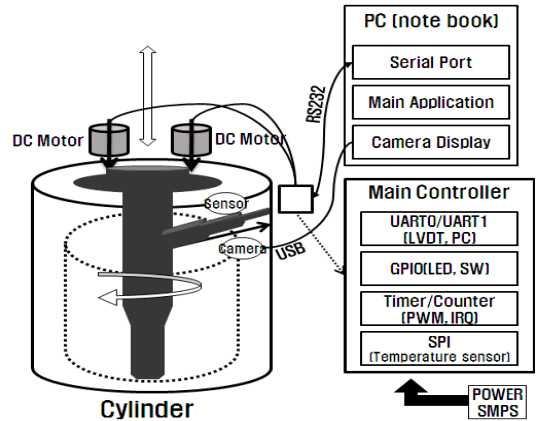


Figure 2: Architecture of the proposed system

Figure 3은 실린더 라이너 내경 자동측정시스템의 신호 흐름에 관한 블록 다이어그램을 나타낸다. 메인 컨트롤러에서는 PC로부터 제어 신호를 전달받아 LVDT를 측정 위치로 이동시키기 위해 모터를 제어하거나, 내경측정 값과 실린더 내부의 온도 값을 받아 그래픽 LCD에 출력한다. 또한 실린더 라이너 내부가 어두울 경우, 카메라를 비추는 LED의 휘도를 PWM 제어를 통해 조절할 수도 있다. PC에서는 수신된 데이터를 사용자 프로그램에 실시간으로 출력하며 실린더 내부 상태를 카메라를 통해 모니터링 할 수 있다.

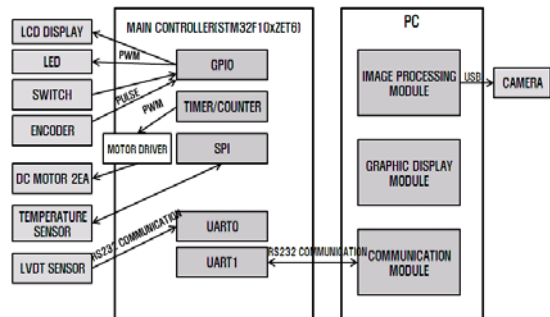


Figure 3: Block diagram of signal processing

2.3 측정부의 사양

실린더 라이너의 경우 주기적인 내경 측정을 통해 10mm 이상의 마모가 발생할 경우 교체가 불가피하다. 때문에 정확한 마모량을 계측하기위해서 LVDT의 분해능이 고려되어야한다.

Figure 4와 Table 1은 내경 계측에 사용되는 LVDT의 센서 특성을 나타낸다. 본 연구에서 선정 한 센서는 RS232 통신을 통해 센서 값을 측정하도록 설계되어 있다. 실린더 내경측정 시 만족할 만한 정도를 확보하기위하여 센서와 컨트롤러 간, 컨트롤러와 PC 간의 신호전송에 수반되는 잡음을 포함한 계측오차가 최대 10 $\mu$ m 이내가 되도록 하였다.

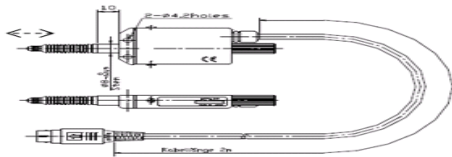


Figure 4: LVDT(DT512NP)

Table 1: LVDT specifications

Error	$\pm 3\mu\text{m}$
Resolution	1 $\mu\text{m}$
Range of measurement	12 mm / 0.47
Operating temperature	0 $^{\circ}\text{C}$ ~ 50 $^{\circ}\text{C}$
Critical temperature	-10 $^{\circ}\text{C}$ ~ 60 $^{\circ}\text{C}$
Size	12 $\times$ 34 $\times$ 116 mm
Weight	80g



Figure 5: IG-42GM W/EC geared motor

Figure 5와 Table 2는 본 연구에서 계측 지점에서의 정확한 이동을 위해서 사용한 엔코더 부착형 DC모터의 사양을 나타낸다. 본 연구에서는 계측부가 원하는 지점으로 이동할 시 수직으로 1mm, 수평으로 1 $^{\circ}$ 의 정밀도를 목표로 엔코더 및 모터의 기

어 비를 선정하였다. 선정된 IG-42GM은 기어비가 1/24로써 엔코더 펄스 당 1mm이내, 수평 이동시 펄스 당 0.1 $^{\circ}$  이내의 이동거리와 기어대비 속도를 만족한다.

Table 2: IG-42GM specifications

Model name	IG-42GM W/EC
Reduction ratio	1 / 24
Rated torque	9.5
Rated speed	240 RPM
Encoder spec.	39pulses(2 Channel)
Gearboxes length	39.2 mm
Weight	551g

2.3 측정 원리

실린더 라이너 내경 계측기의 측정 원리는 Figure 6 과 같다.

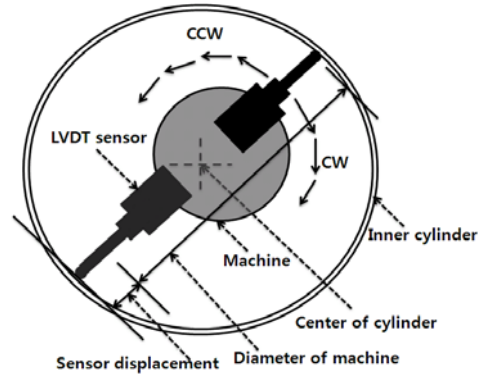


Figure 6: The principle of measurement

기구부의 모터를 제어하여 원하는 높이에서 계측기가 회전하며 LVDT를 통해 수평 변위의 변화를 측정한다. LVDT의 팁이 수평 이동할 시 변위 값을 출력하게 되는데, 이 때 실린더 라이너의 마모량은 계측기의 중심이 일정하지 않음에 따라 다른 값을 출력하게 된다. 이를 보정하기 위하여 수평 변위를 측정할 때 360 $^{\circ}$  전 구간을 측정하여 0 $^{\circ}$ 와 180 $^{\circ}$ 지점, 90 $^{\circ}$ 와 270 $^{\circ}$  지점과 같이 180 $^{\circ}$  간격으로 지름의 길이를 측정하게 된다. 이후 사용자가 알고 있는 계측기 지름의 길이의 차를 구하고 이

등분 하게 되면 실린더 라이너의 마모 상태를 알 수 있다. 때문에 사용자가 계측기를 설치 시 실린더 라이너의 중심에 정확히 위치하지 않아 내경의 반지름의 편차가 커도 정확한 마모량의 측정이 가능하다.

### 3. 성능 평가 및 고찰

#### 3.1 계측 장치의 구성

Figure 7, 8은 각각 본 연구를 통하여 개발한 LVDT를 이용한 선박용 엔진 실린더 라이너 내경 계측시스템의 메인 컨트롤러 부분과 계측부의 사진이다. 또한 Figure 9는 실험을 위하여 제작된 실린더 라이너의 모습이다.

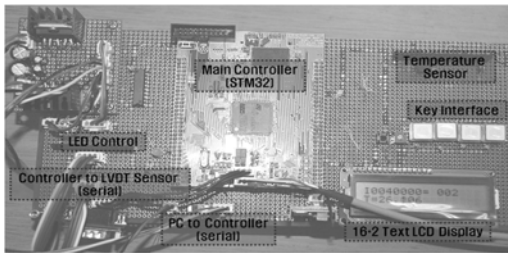


Figure 7: Main controller

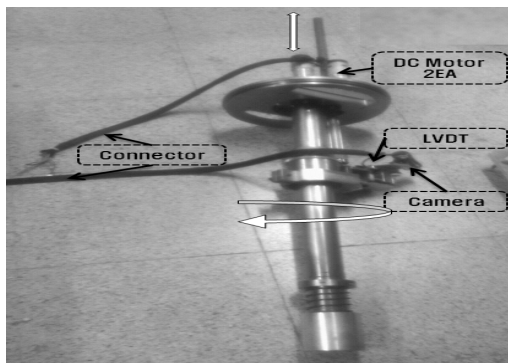


Figure 8: Measurement part of the system

Figure 10은 Figure 7, 8의 메인 컨트롤러 부분과 계측부를 Figure 9의 실린더 라이너에 취부하여 내경을 계측하는 장면이다. Figure 11은 계측실험 시 계측부가 장착된 실린더 내부의 모습이다. 이상에

서 언급한 계측시스템을 대상으로 정확도에 대한 검증시험을 실시하였다.

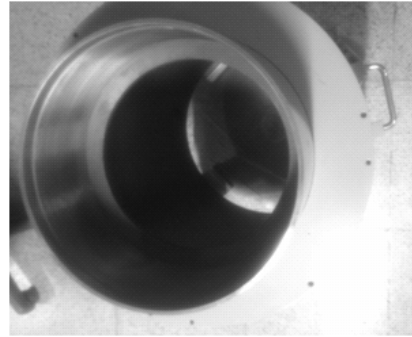


Figure 9: Cylinder liner for experiment

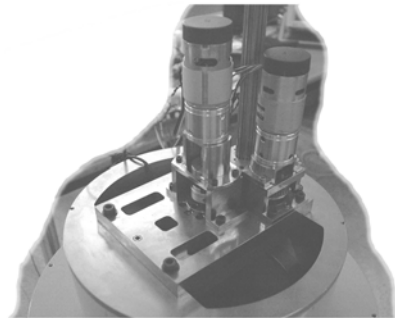


Figure 10: Experimental picture 1

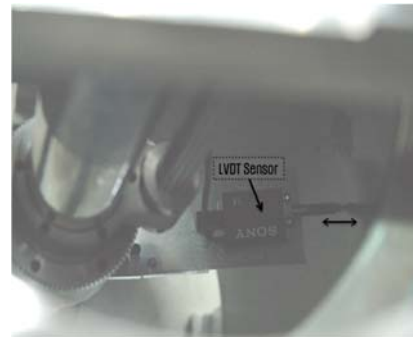


Figure 11: Experimental picture 2

#### 3.2 실험 결과 및 검토

우선, 사용자가 원하는 지점을 계측하기 위해서는 측정 유닛이 오차 없이 목표 지점에 도달할 수 있어야 한다. 개발된 측정시스템의 경우, 엔코더에

서 나오는 펄스를 피드백 받아서 측정한 결과 수평 이동 시 360° 회전 당 2,788의 펄스가 발생하였으며, 수직으로 700mm 이동 시 25,037개의 펄스가 발생하였다. 이 결과로부터 수평 이동시 1펄스 당 0.13°만큼의 분해능이며 수직 이동시에는 1펄스 당 0.028mm의 분해능을 가짐을 알 수 있다. Table 3은 개발된 시스템의 위치제어에 관련한 주요사항을 나타낸다.

**Table 3:** The specifications for position control

	Horizontal mobility	Vertical mobility
Number of pulse	2,788/360°	25,037/700mm
Reduction ratio	24 : 1	14 : 1
Measuring instrument reduction ratio	5.5 : 1	10 : 1
Resolution	0.13°/pulse	0.028mm/pulse

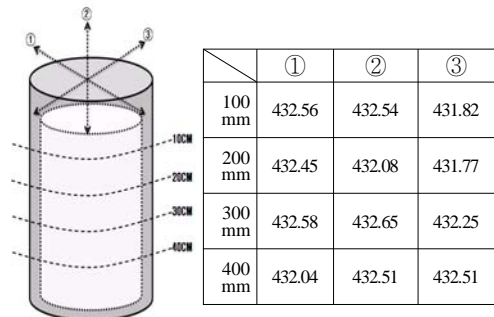
Figure 12는 개발된 시스템의 측정 정확도를 비교 검증하기 위해 선박현장에서 흔히 사용되는 내경계이지 중 하나인 정확도 1/100mm 인 MITUTOYO사의 라이너 내경 계이지이다. Figure 13은 Figure 12의 라이너 내경 계이지를 이용하여 수작업으로 내경을 측정할 때의 측정 포인트와 측정결과를 나타낸다. 이때 내경측정은 실린더 내부의 깊이 100mm, 200mm, 300mm, 400mm 지점에서 120° 간격으로 3번 이루어진다. 이 측정 결과는 본 연구에서 개발된 측정 장치의 정도를 평가하는 기준으로 이용된다.

Table 4는 개발된 측정시스템의 정확도를 비교 검증하기 위해 Figure 13에 나타난 측정 점의 내경을 측정한 결과를 나타낸다. 이 때 LVDT의 분해능이 1μm이지만 비교검증대상의 내경계이지의 정확도가 1/100mm 이므로 소수점 셋째자리는 의미가 없다. 이점을 고려하여 소수점 둘째자리 까지만 나타내었다. 측정결과로부터 비교대상 계이지의 측정결과와 최대 ±0.01mm 의 오차를 보이고 있다. 이는 일반적으로 실 현장에서 해기사들에 의해 수작업으로 측정될 때의 수반되는 측정오차 값(±0.03mm)보다 작은 값을 알 수 있다. 또한 Figure

14는 개발된 시스템에 대한 반복 재현성을 평가하기 위하여 Fig 13에 나타난 방향①의 깊이 100 mm 지점의 내경을 100회 반복적으로 측정한 결과를 나타낸 것으로, 평균치의 ±5μm 이내의 편차를 보였다. 이는 전자회로에 유입되는 각종 노이즈를 감안할 때 개발된 시스템이 매우 높은 측정 신뢰성을 확보하였음을 알 수 있다.



**Figure 12:** The diameter gauge with 1/100mm accuracy (MITUTOYO)

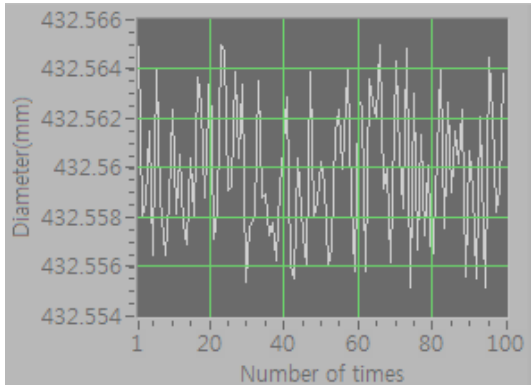


**Figure 13:** The measured values by the diameter gauge with 1/100mm accuracy

**Table 4:** The measured values by the proposed system

(unit : mm)

Depth	direction ①	direction ②	direction ③
100mm	432.56	432.55	431.82
200mm	432.45	432.08	431.77
300mm	432.57	432.65	432.24
400mm	432.04	432.52	432.51



**Figure 14:** Experimental results of repeatability and reproducibility

#### 4. 결 론

본 연구에서는 선박용 대형 엔진의 실린더 라이너 내경측정에서 문제점으로 지적되었던 작업 인부의 안전 문제, 작업 시간 및 효율성을 획기적으로 혁신하기 위해 LVDT를 이용한 실린더 라이너 내경자동계측시스템을 개발하였다. 또한 실험용 라이너를 이용하여 개발시스템에 대한 성능을 일반적으로 현장에서 흔히 사용되는 내경계이지와 비교검증 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 개발된 측정 시스템의 성능을 비교 검증한 결과 선박현장에서 필요로 하는 측정 정확도를 확보할 수 있었다.

2) 보드내에 유입되는 각종 노이즈에도 불구하고  $\pm 5\mu\text{m}$  이내의 반복 재현성을 확보할 수 있었다.

3) 따라서 본 시스템은 해기사들의 정기적인 실린더 라이너 내경 마모측정환경을 개선하는데 기여할 것으로 본다.

#### 5. 참고문헌

[1] 전상명, “피스톤 링 팩 및 실린더 보아 마모와 오일소모를 고려한 엔진 내구수명 연구”, *Journal of the KSTLE*, vol .22, no. 3, pp. 155-163, 2006.

[2] 김장규, 이민철, “대형 저속 디젤 엔진용 실린더 라이너 내면 마모량 자동 측정 장치 개발”, *한국마린엔지니어링학회지*, 제32권, 제6호, pp. 981-988, 2008.

[3] 손창우, “ANFIS를 이용한 선박용 엔진 실린더 라이너의 이상마모 예측”, 부산대학교 대학원: 기계공학부, 석사학위논문, 2008.

[4] 조셉 위, *ARM CORTEX-M3 완벽가이드*, 아이티씨, 2009.

#### 저 자 소 개



#### 하윤수(河潤秀)

1962년 4월생. 1986년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1990년 동 대학원 졸업(공학석사). 1996년 일본 쓰쿠바대학 대학원 졸업(공학박사). 1996년~현재 한국해양대학교 IT공학부 교수