

웨이블릿을 이용한 선박 엔진 마모 상태 진단 평가

Marine Engine Wear Diagnosis and Assessment Using the Wavelet Transform

김 경 환* · 조 재 한** · 이 현*** · 이 장 명†
(KyungHwan Kim · Jaehan Jo · Hyun Lee · Jangmyung Lee)

Abstract - Currently power of the diesel engine is increasing continuously, where the wearing problems become more severe. The wearing happens irregularly inside the cylinder, which causes a high burden to the marine engine. In this paper, a novel scheme to measure the wearing and to represent the engine states has been proposed. To monitoring the states of the marine engine efficiently, a laser displacement sensor has been utilized to measure the wearing happening inside the marine engine. To eliminate the noise signals in the distance measurement, the wavelet transform has been adopted, which is robust against the noises caused by vibrations. An engine simulator is designed to develop the system for measuring the engine wears, where the superiority of the wavelet transform against the conventional filtering schemes has been demonstrated.

Key Words : Wavelet transform, Bearing wear monitoring, Marine engine

1. 서 론

산업설비나 기계류 등의 운전 및 상태 점검 형태가 자동화 및 무인화로 유지 및 고장 예방의 차원에서 엔진 상태·진단에 대한 관심이 높아지고 있다[1]. 특히 선박에서 주 동력원으로 사용하는 디젤엔진은 타 엔진에 비해 열효율이 높고 기동성이 뛰어나 대부분의 선박의 추진용과 발전용 엔진으로 사용되고 있다. 그리고 열효율을 향상시키기 위하여 최대 평균유효압력과 연소압력이 상향된 고회전 엔진이 개발되고 엔진의 설치 공간을 줄이기 위하여 간결화 되어가는 추세이다[2]. 이런 장비들은 점차 고온, 고부하 등의 운전조건에 직면함에 작은 부분에서 큰 부분의 손상이나 파손이 연비가 낮아지고 최악의 경우에는 선박의 운행을 중지해야 하는 경우가 발생한다.

일반적으로 엔진은 실린더 내부의 피스톤링과 피스톤 라이너에 밀착된 상태로 있다. 엔진의 압축·폭발을 실린더 라이너 내측의 피스톤(Piston)이 Connecting Rod를 거쳐서 Crank shaft의 회전력으로 전달되어 구동된다. 이 과정에서 피스톤 링(Ring)과 실린더 라이너(Cylinder Liner) 간의 상대 운동에 의해 실린더 라이너 내면이 지속적으로 마모되고 이 현상은 순간적으로 발생하는 마찰열이 신속히 방출되지 못할 경우 마모현상을 일으키게 된다. 마모량의 정도에 따라 엔진 기동 여부를 결정해야 한다[3,4,5].

과거에는 엔진에 이상이 생겼을 경우 직접 사람이 라이너

내측에 들어가 문제 지점에서 실린더의 마모 도나 고장 여부를 체크를 했다. 이는 계측하는 작업자의 숙련도에 따라 오차가 발생할 수 있고, 사다리를 이용한 고소 작업으로 안전상의 문제를 유발 시킬 수 있다. 그리고 실린더 라이너의 내면 마모량을 계측할 때 마다 피스톤 헤드(head)를 분해하고 재조립해야 되기 때문에 많은 시간이 요구된다[6].

따라서 본 논문에서는 모사 장치에 장착된 레이저 변위 센서를 이용하여 엔진 실린더 라이너의 이상 마모 현상을 미리 예측하여 엔진을 보호 하고, 특성이 조금 다른 마모 현상을 예측할 수 있는 Wavelet을 적용하려고 한다.

본 논문은 서론 및 결론을 포함하여 총 5장으로 구성되고, 2장에서는 센서로 측정하여 알고리즘을 적용하는 방법을 소개 하고, 3장에서는 실험 환경 구성에 대한 설명을 소개하며 4장에서는 실험 결과에 대하여 설명한다. 마지막 결론으로 본 논문을 마무리 짓는다.

2. Wavelet 알고리즘

FFT(Fast Fourier Transform)는 신호처리 및 미분 방정식의 해법에 많이 사용되었지만 특성상 주파수 영역에서만 신호를 분석할 수밖에 없어 신호의 시간정보와 주파수 정보를 동시에 파악할 수 없다는 단점이 있다[7].

STFT(Short-time Fourier transform)는 시간에 의존하는 가중함수를 기존의 푸리에 변환에 가중함수인 독립적인 창함수를 붙여 사용하기 때문에 분석 영역이 시간-주파수에 대해 항상 일정하여 시간의 변화에 따라 확률적인 특성이 변하는 약 정상 신호 (Non-stationary Signal)를 효율적으로 분석할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 만약 저 대역 통과 필터(Lowpass Filter)를 사용하게 되면 특정 주파수 대역 이상의 모든 정보가 제거 되므로 높은 주파수 대역을 포함한 정보까지 같이 사라지게 된다.

웨이블릿 변환은 잡음제거 (De-noising) 방법으로 많이

* 비 회 원 : 부산대학교 전자전기공학과 석사과정

** 준 회 원 : 부산대학교 전자전기공학과 석사

*** 정 회 원 : 부산대학교 전자전기공학과 박사과정

† 교신저자, 정회원 : 부산대학교 전자전기공학과 교수

E-mail : jmlee@pusan.ac.kr

접수일자 : 2011년 12월 19일

최종완료 : 2012년 5월 1일

사용된다. 웨이블릿 함수를 이용하여 신호를 각각의 잔물결 신호로 나눌 수 있고, 그 신호들을 분석·가공하여 신호별로 잡음을 제거한다. 처리된 신호들은 신호의 분해·재조립이 가능하다. 각각의 필터링 된 레벨의 파형들에서 노이즈를 제거하면 원래 중요 정보는 그대로 남아 있고 노이즈가 제거된 깨끗한 파형을 얻을 수 있다. WT (Wavelet Transform) 은 FFT, STFT와 더불어 최근 신호처리 분야에서 많이 활용되고 있는 신호 변환 기법이다. 기본 WT는 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$\psi_{s,\tau} = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (1)$$

여기서 s 는 웨이블릿 함수를 축소 및 확대시키는 스케일링 파라미터(Scaling Parameter)이고 τ 는 기저함수를 시간 축에 따라 평행이동 시키는 천이 파라미터(Translation Parameter)이며 $\frac{1}{\sqrt{s}}$ 은 에너지 정규화를 위한 항이다. 웨이블릿 변환을 이용하여 연속적인 신호를 분석할 경우 다음 식으로 표현된다.

$$W_f(s, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (2)$$

또한 이산 신호(Discrete Signal)를 웨이블릿 변환 처리하면 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$W_f(2^{-j}k, 2^j) = 2^j \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi(2^{-j}x - k) dt \quad (3)$$

식(2)와 (3)에서 마더 웨이블릿 함수 $\psi(t)$ 의 s 및 τ 값을 변화 시키고 임의의 신호 $f(t)$ 와 컨볼루션(Convolution)하여 분석한다.

WT은 척도가 중요한 역할을 한다. 척도가 큰 창문함수를 통해서 신호를 관찰하면 그 신호의 전반적인 특징을 관찰할 수 있다. 척도가 작은 창문 함수에서 신호를 관찰하면 신호의 세부적인 특징을 관찰할 수 있다. 웨이블릿이라는 창문을 사용해 신호를 원하는 퍼포먼스까지 분석하게 되면 신호의 전체적인 모습뿐만 아니라 세부적인 모습까지도 분석할 수 있다. 그래서 신호의 불연속성, 단절 등을 잘 식별할 수 있다. 이는 웨이블릿이 단순히 신호의 자세한 부분까지를 반영하는 것이 아니라 신호가 변화하는 부분을 잘 나타내기 때문이다[8,9].

그림 1과 같이 웨이블릿 변환은 마치 신호를 저주파 필터(LP, Lowpass Filter)와 고주파 필터(HP, Highpass Filter)에 통과시킨 것과 같으며 분해된 신호의 성분들을 웨이블릿 계수라 한다. 분해된 LP와 HP 값은 정해진 시간구간에서 신호를 분석하여 나오게 된 근사정보(LP 성분)와 상세정보(HP 성분)의 계수의 값으로 표현되어진다.

일반적으로 잡음이 포함된 신호는 다음과 같은 방정식으로 나타낼 수 있다.

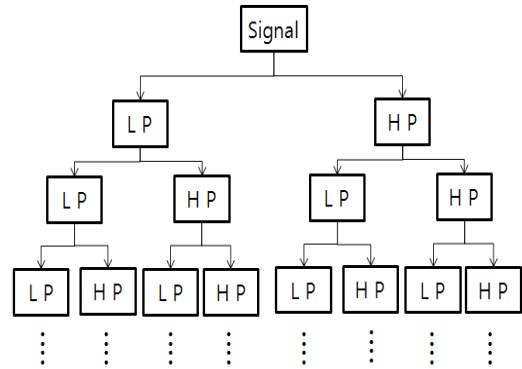


그림 1 웨이블릿을 이용한 HPF 와 LPF 필터의 신호 분해·분석

Fig. 1 Signals using wavelet decomposition and analysis of HPF and LPF

$$u = f + \omega \quad (4)$$

식(4)에서 u 는 노이즈에 의해 손상된 신호, f 는 유한 에너지를 갖는 미지의 신호이고 ω 는 어떤 형태로든 신호에 포함될 수 있는 잡음이다. 식(4)를 이용하여 측정된 u 로부터 f 를 어떻게 복원할 지 관건이다. 잡음이 포함된 신호 데이터 u 의 값만 알고 실제신호와 잡음데이터를 알 수 없기 때문에 잡음을 줄이고 없애는 방법은 매우 어렵다. 그러나 웨이블릿 변환으로 분석된 신호의 계수성분을 이용한다면 노이즈가 제거된 신호 형태로 표현 가능하다[10,11,12].

3. 측정 방식

이 장에서는 마모량을 측정하기 위하여 레이저 변위 센서를 사용하고 엔진에서 마모가 일어났을 때 거리를 측정하는 방법을 설명하며 센서로 받은 데이터를 엔진에서 발생하는 진동으로 인해 왜란을 제거할 수 있도록 Wavelet에 적용하였다.

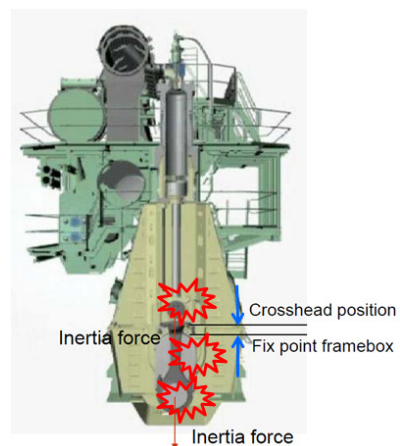


그림 2 선박 엔진의 마모가 일어나는 지점

Fig. 2 Points of marine engine wear occurring

위의 그림 2는 실제 선박에서 사용하는 디젤 엔진이다. 이상 마모는 Crosshead 베어링, Connecting Rod, Crank shaft에서 금속 간 접촉기간이 제한적인 작동면의 상대적인 미끄럼 운동과 관련된 마모 조건에 의해서 발생한다[13]. 오랜 시간을 구동하게 되면 Crosshead 베어링과 Crank shaft의 베어링이 마모가 되어 Crosshead의 상사점(Top Dead Center)과 하사점(Bottom Dead Center)의 움직임이 더욱 커지게 된다. 이를 이용하여 엔진에 초음파 센서를 장착하여 데이터의 수치가 크고 작음으로 마모 도를 측정하려고 한다. 또한 센서의 탈부착이 용이하여 센서 유지 보수가 쉽다.

3.1 실제 구동 장치(Zig)

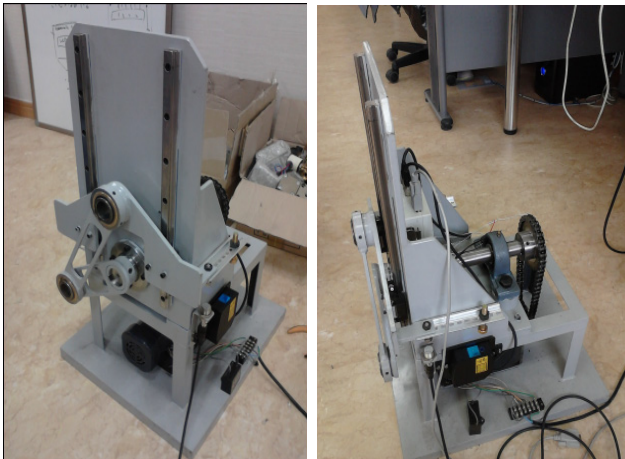


그림 3 실제 사용했던 모사 장치
Fig. 3 The actual copied equipment that uses

그림 3과 같이 실제 엔진과 비슷한 구조로 모사 장치를 제작 하였다. 450 x 450 x 760 mm 크기로 Crosshead 베어링, Connecting Rod, Crank shaft의 동작을 고려하고 중간에는 선박에서도 사용하는 민 베어링으로 장착하였다. 뒤쪽으로 샤프트를 연결하여 DC모터를 체인으로 연결하여 움직이게 만들었다. 옆에 틀을 추가적으로 만들어 지그가 상하를 움직임을 보일 때 이를 레이저 센서가 데이터를 측정하도록 제작했다. 중간의 Connecting Rod는 계속된 동작으로 인한 손상·마모도가 발생하기 때문에 한 번의 테스트가 끝나면 교체를 하도록 여러 개를 제작하였다.

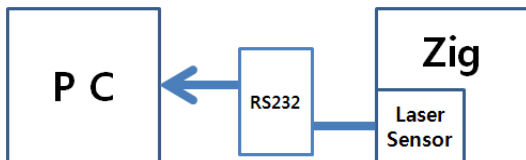


그림 4 레이저 변위 센서 시스템 블록도
Fig. 4 The laser sensor system block diagram

3.2 레이저 변위 센서 보정

현재 레이저 센서로 측정하는 장치는 매우 날카로운 레이

저 펄스를 발사하고 그 레이저 펄스가 목표물에서 반사되어 다시 광 수신기로 수집되기까지의 거리를 측정하는 방식이다. 현재 사용하고 있는 레이저 센서는 OD-Max 30시리즈로 30 mm내의 거리를 오차범위 10 μm 내외로 거리를 측정하여 아주 정확한 거리를 측정할 수 있다.

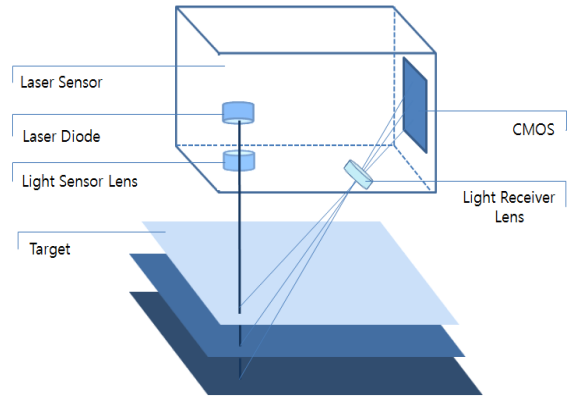


그림 5 레이저 센서의 측정 방법
Fig. 5 The laser sensor measurement methods

레이저는 일직선으로 신호를 보내고 받기 때문에 거리를 정확하게 측정 할 수 있다. 이 점을 이용하여 비교적 정밀도가 높은 레이저 센서를 초음파 센서로 받은 데이터에서 발생하는 비선형적인 오차를 보정하는데 사용된다. 동일한 지점, 동일한 거리 등 모든 환경을 동일하게 만든 후에 측정을 다수 하여 비선형적 오차 지점을 알아내어 선형적인 결과를 내도록 유도한다.

4. 데이터 분석

4.1 이동 평균 필터를 이용한 데이터 분석

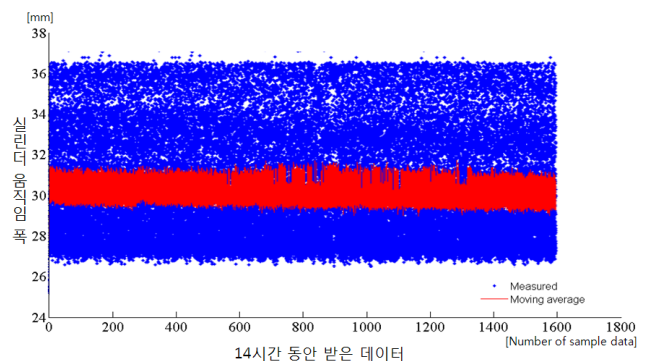


그림 6 이동 평균 필터를 이용한 신호 분석
Fig. 6 Moving Average Filter Signal Analysis

그림 6은 총 14시간 동안 지그를 동작하여 데이터를 받은 뒤에 이동 평균 필터를 이용하여 데이터를 분석했다. 이는 웨이블릿과 이동 평균 필터와의 필터링 차이를 비교·분석하기 위해 측정 하였다.

파란색 부분으로 표현한 부분이 지그를 동작하여 받은 데이터를 표현 한 것이고 빨간색 부분으로 표현 부분은 이동

평균을 사용한 데이터를 표현한 부분이다.

평균을 내면 측정 데이터에서 노이즈를 제거 할 수 있다. 노이즈를 없애는 동시에 시스템의 동적인 변화를 제대로 반영하는 방법을 이용하기 위해 사용되었다[14]. 지그가 동작한지 실제 총 14시간 동안 약 5mm정도 마모가 발생되었지만 필터링 한 결과 이동 평균을 이용하여 표현한 결과보다 웨이블릿이 마모량 측정에 더 좋은 결과를 보여주고 있다.

4.2 Wavelet을 이용한 데이터 분석

선박에서 실제로 사용하는 엔진과 비슷한 구조로 모사장치(Zig)를 만들어 실험을 하였다. 총 구동시간 13시간 동안 작동하였고 실제로 선박 엔진에서도 몇 년간 구동해야 수 mm 단위가 마모가 되는데 현재 실험 또한 수 mm만 변동하기 때문에 보다 세밀한 데이터가 필요하게 되고 하나의 데이터로 분석하게 되면 레이저 센서가 너무 많은 데이터를 받기 때문에 알아보기 쉽지 않아 4시간씩 끊어 마모 도를 측정하여 데이터를 분석했다.

지그의 실린더가 상하로 동작 할 때 옆에 장착된 레이저 센서가 상하의 움직임을 측정한다. 이번 실험에 사용된 레이저 센서는 일정 특정 구간에서만 측정이 된다. 지그가 상하로 움직이면서 마모가 발생되면 하사점의 위치가 더 내려가게 된다.

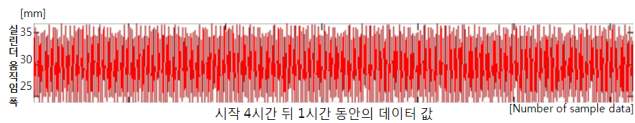


그림 7 시작 4시간 뒤 1시간동안의 데이터 값
Fig. 7 After 4 hours, the value of the data in one hour.

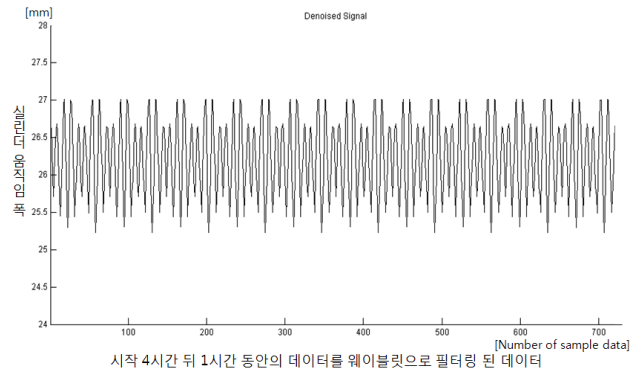


그림 8 시작 4시간 뒤 1시간동안의 파형을 디노이징 (De-noising)
Fig. 8 De-noised signal during an hour after 4 hours from start.

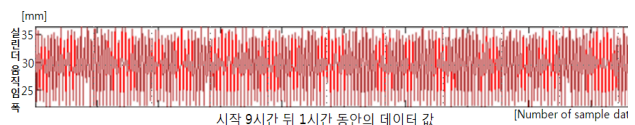


그림 9 시작 9시간 뒤 1시간동안의 데이터 값
Fig. 9 After 9 hours, the value of the data in one hour.

구동 후 데이터 측정을 시작한지 4시간 구동한 뒤에 1시간 동안 마모량을 측정한 부분이다. 상사점은 변화가 없지만 하사점 위치를 De-noising 된 파형을 분석해 보면 약 25.3mm 까지 내려온 것을 볼 수 있다.

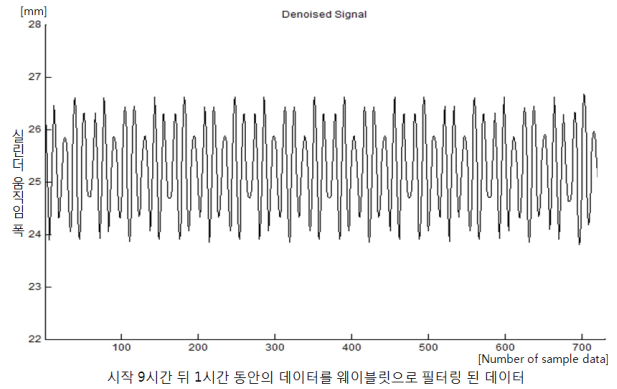


그림 10 시작 9시간 뒤 1시간동안의 파형을 디노이징 (De-noising)
Fig. 10 De-noising the signal during an hour after 9 hours from start.

구동 후 데이터 측정을 시작한지 9시간 구동하고 1시간 동안 측정한 부분이다. 하사점 위치를 De-noising 된 파형을 분석해 보면 약 24 mm 정도까지 내려온 것을 볼 수 있다.

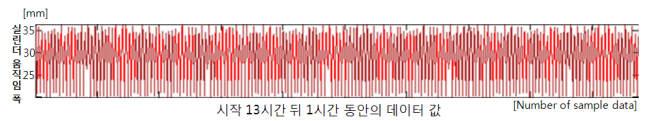


그림 11 시작 13시간 뒤 1시간 동안의 파형을 데이터 값
Fig. 11 After 13 hours, the value of the data in an hour.

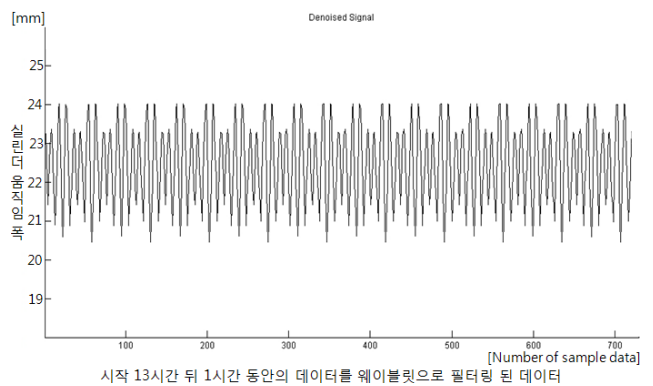


그림 12 시작 13시간 뒤 1시간 동안의 파형을 디노이징 (De-noising)
Fig. 12 De-noising the signal during an hour after 13 hours from start.

구동 후 데이터 측정을 시작한지 13시간 구동하고 1시간 동안 측정한 부분이다. 하사점 위치를 De-noising 된 파형을 분석해 보면 약 21.5 mm 까지 내려온 것을 볼 수 있다. 하사점의 시작부분은 약 26 mm 부분이었다. 약 14시간 동안 구동하면서 마모된 양은 4.5 mm 정도 마모되었다.

이 수치는 레이저 센서에서 받은 데이터 수치로 실제로 계산해 확인하면 4.5 mm정도 마모된 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문은 300 Kw급 2행정 디젤 선박엔진의 동작과 유사한 모사장치를 제작하고 Connecting Rod와 Crank shaft에 연결되어 있는 베어링의 이상 마모를 시뮬레이션으로 진단 할 수 있는 시스템을 연구했다. Trust 베어링, Unit 베어링 Radial 베어링 주제로 마모도를 측정하는 방법은 나와 있지만 실제 선박 엔진에 사용되고 있는 베어링에 관한 연구는 없다. 또한 베어링의 마모 성 및 Shieling 성 평가에 관한 규격화 및 공인화된 방법은 존재하지 않고 있고 대부분 제조사별로 다른 기준과 방식에 따라 평가하고 있다[15]. 엔진이 구동되는 진동 속에서 측정되는 데이터는 노이즈를 많이 가지게 되었고 이를 해결하는 방법이 필요하여 레이저 센서를 이용하여 보다 정밀한 마모량을 측정할 수 있도록 실험을 하였다. 기존에 나와 있는 음향진동을 이용하는 측정 방법[16]과 본 실험으로 알아본 이동 평균을 이용하여 필터링을 하는 방법 보다는 웨이블릿을 적용하여 데이터를 분석하여 노이즈를 제거하는 방법이 더 효과적인 것으로 판단되었다. 이 연구를 통해 이상 마모가 발생 시 마모 상태를 예측이 가능하므로 윤활유 공급량의 조절을 통해 엔진의 상태를 더욱 개선시킬 것으로 판단된다.

감사의 글

“본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 로봇 전문 인력양성 프로그램 지원사업의 연구결과로 수행되었음”(NIPA-2010-(C7000-1001-0009))

“본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 특수환경 Navigation/Localization 기술 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음”(NIPA-2010-(C7000-1001-0004))

참 고 문 헌

- [1] Sang-Guk Lee, Sun-Ki Lee, Do-Hwan Lee and Sung-Keun Park, "A Study on Damage Evaluation of Bearings for Rotating Machinery in Power Plant Using Ultrasonic Wave," *Journal of the Korean Society Mechanical Engineers*, Vol.32, No.7, pp.583~589, 2008
- [2] D. C. Lee, D. S. Kang, "A Study on the Strength Analysis of Crankshaft for 4 Stroke Marine Diesel Engine," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol.30, No.3, pp 359~367, 2006.5
- [3] Sang Myung Chun, "Engine Tribology" Bookshill Co, 2003, Second printing
- [4] S.Tung and G.Hong, "Tribological Characteristic and Surface Interaction between Piston Ring Coatings and a Blend of Energy-Conserving Oils and Ethanol Fuels," *Wear*, Vol.255, No.7-12,pp. 1276-1285, 2003
- [5] M. Giorgio, M. Guida and G. Pucini, "A Wear Model for Assessing the Reliability of Cylinder Liner in Marine Diesel Engines," *IEEE Transactions on reliability*, Vol.56, No.1,pp.158-166, 2007
- [6] Jang-Kyu Kim, Min-Cheol Lee, "Development of Automatic Measuring Device for Cylinder Liner Wear Amount in Large Two Stroke Diesel Engine," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol.32, No.6, pp 981~998, 2008.9
- [7] N. F. Zein and W. G. Chambers and T. G.. Clarkson, "Use of matched filters for serial acquisition in a fast frequency-hopping system," *Proceedings of IEEE Military Communications Conference, MILCOM*, vol. 1, pp. 161-165, September 1990.
- [8] Hasan Ocak, Kenneth A. Loparo, Fred M. Discenzo, "Online tracking of bearing wear using wavelet packet decomposition and probabilistic modeling: A method for bearing prognostics," *Journal of Sound and Vibration* 302 (2007) 951 - .961
- [9] ByungSun Choi, "Wavelet interpretation", Sekyung Co, p120, 2001
- [10] H. Z. XU and D. Zhang, "Wavelet-based data processing for distributed fiber optic sensors," *Proc. ICMLC*, 13-16,2006.
- [11] Yo-Han Cho, Hyun-Jin Kim, Minho Song, "The Accuracy Improvement of FBG Temperature Sensor by using Wavelet Transform" *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers* (2011) 25(5) : 73~78
- [12] Nam Yong Lee, Yoon Young Kim, "Wavelet and Engineering Application," *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol.9, No.5, 1999
- [13] Sang Myung Chun, "A Study on Engine Durability Considering Oil Consumption and Wear of Piston-Ring Pack and Cylinder Bore," *Journal of the KSTLE*, vol. 22, no. 3, pp.155-163, 2006.
- [14] 김성필, "칼만필터의 이해" 2010
- [15] Hyung-il Moon, Jongsoo Im, Heon Young Kim "Shape Optimization of an Automotive Wheel Bearing Seal Using the Response Surface Method," *Transactions of KSAE*, Vol. 18, No. 6, pp.84-90 (2010)
- [16] T.J Holroyd and N. Randall,"Field Application of Acoustic Emission to Machinery Condition Monitoring," in *Proceedings of COMADEM University of West of England, Bristol*, pp.217-222, 1993.

저 자 소 개



김 경 환 (金 慶 煥)

2009년 진주산업대학교 전자공학과 졸업 (공학사). 2011년~현재 부산대학교 대학원 로봇관련협동과정 석사과정. 관심분야는 지능로봇 시스템 제어, 마이크로 프로세서 응용.



조 재 한 (趙 宰 漢)

2010년 동의대학교 정보통신공학과 졸업, 2012년 부산대학교 로봇협동과정 석사 (공학석사). 관심분야 지능로봇 시스템 제어 마이크로프로세서응용



이 현 (李 炫)

2007년 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부 전자공학과(공학사), 2010년 부산대학교 대학원 전자 전기공학과(공학석사), 2010년 현재 부산대학교 전자전기공학과 박사과정.

관심분야는 지능제어시스템. CAN Network, 마이크로프로세서 응용 시스템 설계.



이 장 명 (李 章 明)

1980년 서울대학교 전자공학과 졸업, 1982년 동대학원석사, 1990년 USC 공학 박사 미국남가주대학교, 1993년 현재 부산대학교 정교수

관심 분야는 지능로봇 시스템제어 마이크로프로세서응용 Navigation/Localization.