선박엔진의 실린더 라이너의 손상 진단을 위한 진동 분석법

구현호¹ · 조연상² · 박준홍² · 박흥식^{2†}

¹두산엔진(주), ²동아대학교 기계공학과

Vibration Analysis for Failure Diagnosis of Cylinder Liner of Large Ship Engine

Hyunho Koo¹, Yonsang Cho², Junhong Park² and Heungsik Park^{2†}

¹Doosan Engine co., Ltd.

²Dept. of Mechanical Engineering, DongA University

(Received October 21, 2013 ; Revised December 1, 2013 ; Accepted December 5, 2013)

Abstract – Damage to the cylinder liner of large ship engines, such as scuffing on the surface, can occur very easily because it is operated in a corrosive environment. This scuffing may be due to oil film destruction and corrosive wear caused by water and sulfur included in the fuel, abrasive impurities, and poor lubricants. Thus, a method for monitoring the condition and diagnosing the failure of the cylinder liner and piston ring is needed. In this study, a reciprocating friction and wear test was carried out with a cast iron specimen, which simulated an engine cylinder in a corrosive atmosphere. The lubricants used were base oil, stirred oil with distilled water, a NaCl solution, and dilute sulfuric acid. The friction coefficient and frequency spectrum were measured using a load cell and acceleration sensor in each experimental condition. We then used these results to diagnose the failure of the cylinder liner.

Keywords – cylinder liner (실린더 라이너), scuffing (스커프), corrosion wear (부식 마멸), frequency spectrum (주파수 스펙트럼), vibration analysis (진동분석)

1. 서 론

선박의 엔진은 불순물과 황이 많이 포함된 벙커C유를 연료로 사용하고 습한 지역에서 가동되고 있기 때문에 실린더 라이너의 표면에서 스키핑(scuffing)[1-3]과 같은 손상이 매우 발생되기 쉬운 환경에 있다. 지금까지 조사된 스키핑의 발생 원인은 연료에 포함된 물과 황, 마모성 불순물 및 윤활 불량으로 인한 유막파괴 및 부식마멸이 가장 유력시 되고 있다[1].

따라서 스키핑의 발생으로 인한 심각한 엔진 손상의 모니터링을 위하여 운전 중에 라이너 표면 온도 및 실린더 내의 유증기 농도의 비정상적인 증가를 실시간으로 체크하고 있으며, 시간과 비용을 많이 들여 라이너

와 링의 마모 상태를 주기적으로 점검하고 있다. 그러나 이러한 대책에도 불구하고 스키핑이 갑자기 발생하여 엔진을 가동할 수 없는 상태가 될 수 있기 때문에 엔진을 제작하는 회사나 선박을 운용하는 회사의 입장에서는 여전히 이 문제에 대해 매우 민감한 실정이다.

특히, 실린더 라이너 손상의 모니터링을 위한 라이너 온도 및 실린더 내의 유증기 농도 측정 방법은 오류가 많아 신뢰성이 낮기 때문에 이상 징후를 보이며 문제가 나타났을 때는 이미 심각한 손상에 도달하여 라이너와 피스톤 링의 시저(seizure) 및 용착에 의한 파손뿐만 아니라 심지어 엔진이 폭발하는 문제도 발생할 수 있다.

따라서 운전 중에 발생될 수 있는 스키핑 문제를 보다 효과적으로 파악하여 빠르게 대응하기 위해서는 실린더 라이너의 상태를 진단할 수 있는 방법이 필요하다

[†]Corresponding author : parkhs@dau.ac.kr

다. 이를 위해 본 연구에서는 앞서 다양한 부식 환경에서 실린더 라이너 소재의 윤활마찰 및 마멸에 의한 표면 손상에 대하여 선행 연구[4]를 하였고, 이번에는 실린더를 모의한 윤활 마찰 실험 중에 발생하는 진동 파형과 주파수 스펙트럼[5-8]을 조사하여 부식 마멸[9]에 의한 마찰면 손상과의 관계를 살펴보았다.

2. 실험 방법

2-1. 부식 윤활 마찰 마멸 실험

본 연구에서는 선박 엔진의 피스톤과 실린더를 모의하여 윤활 마찰·마멸 실험을 하기 위해 Fig. 1에 나타낸 왕복동 마찰·마멸 시험기[2-4]를 이용하였다. 3:1 감속기가 부착된 400W 서브모터를 사용하여 시험편을 상하운동 시켰으며, 핀 시험에 사하중을 가하고 로드셀로부터 마찰력을 측정하여 마찰계수를 구하였다. 그리고 핀 시험편 홀더에 가속도 센서를 부착하여 마찰시 발생하는 진동 파형을 측정하였다. 진동파형은 LabView를 이용하여 4초마다 한번씩 25.6 kHz 샘플링 속도로 2초 동안 측정하고 이를 주파수 스펙트럼으로 변환하여 저장하였다. 윤활유는 교반기를 이용하여 수용액과 계속 혼합 상태가 유지되도록 하였고, 로터리 펌프를 이용하여 시험편의 표면에 공급하였다. 그리고 시험편 뒤에는 가열기를 부착하여 시험편이 일정한 온도가 되도록 가열하였다.

본 연구에서 사용한 주철 시험편은 실제 실린더 라이너 소재인 합금주철[4]을 $40 \times 65 \times 7.5$ mm 크기의 직육면체의 판재 형상으로 가공하였으며, 표면조도는 $Ra0.2 \mu\text{m}$ 로 연마하여 왕복 마찰 실험을 하였다. 그리고 상대 재료인 핀 시험편은 기계구조용강 SM45C 소

Fig. 1. hematic diagram of reciprocating friction wear tester of pin on disk type.

Table 1. Experiment conditions

Applied load	10 kg _r
Sliding speed	Max. 0.08 m/s (30 rpm)
Oil	Base oil
	Base oil + 5% of H ₂ O
	Base oil + 5% of NaCl solution (concentration:3.5%)
	Base oil + 5% of H ₂ SO ₄ solution (concentration:15%)
Temp.	90°C
Time	3 hr
System frequency	120 Hz
Natural frequency of Pin Holder	78 Hz

재를 직경 3 mm, 길이 10 mm로 가공하였으며, 표면 경화처리를 하여 표면경도가 HB730 이상이 되도록 하였다. 윤활유는 동점성계수 7cSt(40°C)-2.3cSt(100°C)인 기유에 Table 1에 나타낸 바와 같이 증류수, 염화나트륨(NaCl) 수용액, 묽은 황산을 각 5% 씩 혼합하여 부식마멸 실험을 하였다. 실제 선박에서 사용하는 실린더 오일은 다양한 첨가제가 포함되어 있어 부식 및 유막파괴를 유발하는 인자들의 영향을 단시간 내에 파악하기 힘들다. 그리고 실린더 라이너의 내벽 온도는 운전 중에 약 250°C로써 실린더 오일의 동점성계수는 6~8cSt[1]정도를 유지한다. 따라서 본 연구에서 윤활유는 첨가제등의 영향을 배제하고 상온에서 비슷한 동점성 계수를 가지는 기유를 사용하였다. 작용하중은 실린더 라이너와 피스톤링 사이에 가해지는 면압과 유사하도록 10 kg_r의 사하중을 가하여 시험편과 핀 사이의 면압이 약 14.4 N/cm²이 되도록 하였다. 시험편의 표면 온도는 90°C가 유지되도록 하였으며, 시험편은 행정길이 50 mm로 직선 왕복운동을 시켰다. 이때 시험편의 최대 미끄럼 속도는 약 0.08 m/s가 되도록 모터의 회전수를 30 rpm으로 고정하여 각각 3시간 동안 실험을 행하였다. 여기서 미끄럼 속도는 시험장비의 한계로 인하여 실제 피스톤의 미끄럼 속도인 8~9 m/s에 비해 매우 느리지만 1 행정시간은 2초로써 실제 피스톤의 행정시간과 유사하도록 설정하였다. 이렇게 함으로써 단시간에 마찰면의 손상을 파악하고 1 행정시간 동안 발생하는 진동파형과 주파수 스펙트럼의 데이터를 용이하게 수집하여

분석할 수 있다고 생각한다.

2.2. 진동분석

본 연구에서는 진동 측정법을 이용하여 부식 환경에서의 실린더 라이너 소재의 손상을 진단하고자 하였다. Fig. 2는 일반적으로 기계의 진동을 측정하여 상태를 진단하는 과정을 나타낸 것으로 가속도 센서를 통해 기계 설비에서 얻어지는 진동 신호에서 유해한 잡음(noise) 성분을 필터링(filtering), 포락선 처리(enveloping), 평균 가산법 등의 전처리(preprocessing) 과정을 통하여 제거하고, 상태 감시 및 진단의 목적 혹은 신호의 특성에 따라 정밀 분석에 편리하도록 시간 영역 및 주파수 영역 분석을 통하여 각종 특징 파라미터를 추출한다[5].

시간 영역 분석(time domain analysis)에는 통계량, 상관 해석, 확률밀도해석 등이 이용되며, 본 연구에서는 통계량 해석을 통하여 분석을 하였다. 통계량 해석은 측정된 진동 파형의 샘플링 시간에 따른 진폭의 변화에 대하여 해석하는 방법으로 평균값(mean value), 표준 편차(standard deviation), 첨도(kurtosis)를 구하여 경향을 파악한다.

여기서, 평균값 처리는 신호 중에서 관측시간에 대해 충분히 높은 주파수 성분을 제거하고, 관측 시간에 있어서 직류 성분을 구하는 것으로 시계열 신호의 전체를 대표하는 값이며 식 (1)로 나타낸다.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (1)$$

표준편차는 식 (2)에 의해 구하는 값으로 시계열 신호의 산포(scatter)를 측정하는 척도가 된다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

첨도는 시계열 신호의 확률밀도함수 분포가 갖는 첨예의 정도를 나타내는 척도[5]이다. 앞에서 설명한 평균, 표준편차가 모두 같다고 하더라도 데이터의 분포 형태가 다른 경우가 있을 수 있으며, 따라서 데이터의 양적 구조를 나타내기 위해 관측 값들이 중심에 집중되는 정도를 나타내는 값인 첨도가 필요하게 된다. 이는 진동 파형이 얼마나 충격적인가, 즉 파형이 얼마나 예리한가를 나타내는 값이다. 구름 베어링이나 기어 장치에 국부 결함이 발생하면, 그 진동은 충격적으로 된

Fig. 2. Flow chart of vibration analysis for condition monitoring and diagnosis.

다. 따라서 이 값은 구름 베어링이나 기어 장치의 진단에 널리 이용되고 있다.

$$\beta = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^4}{\sigma^4} \quad (3)$$

첨도는 파형의 4차 모멘트를 표준편차 σ 의 4승으로 나누어 규격화한 값으로 식 (3)에 의해 구하며, 파형 진폭의 크기와 관계없이 파형의 형태에 의해 결정되는 값이다. 그 예로 정현파와 삼각파에서는 각각 1.5, 1.7로 되고, 가우스 분포의 백색 잡음에서는 3.0이 된다. 시계열 신호가 정규 분포를 가질 경우 첨도 계수는 3이며, 첨도 계수가 3 이상일 경우 급첨(leptokurtic)으로 정규 분포보다 뾰족한 분포가 되고, 3보다 작을 경우 완첨(platykurtic)이 된다. 첨도는 둔감한 저차 모멘트와 민감한 고차 모멘트 사이의 절충된 척도로서, 이 값은 충격적인 신호 파형에서만 얻어지고, 베어링의 결함(crack, spalling 등) 진단에 효과적인 방법이다.

주파수 영역 분석(frequency domain analysis)은 현재 가장 유용하게 활용되고 있는 신호 해석 기술이다. 이는 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform:FFT)에 의해 시간축의 진동 파형을 주파수 영역으로 변환하고, 주파수 성분이나 위상을 관찰하는 방법으로 이들 주파수가 발생하는 원인을 조사하여 설비의 이상 내용을 추정하는 방법이다.

3. 실험 결과 및 검토

3-1. 부식마멸과 진동 파형

Fig. 3은 각 윤활유 조건에서 마찰 시간에 따른 마찰계수의 변화를 나타낸 것으로 기유에서 실험한 경우, 초기에는 런닝-인 과정에 의해 마찰계수가 증가하여 비교적 높게 나타나지만 실험시간 90분 이후에는 마찰계수가 약 0.2 정도로 정상적인 경계윤활 마찰이 진행되고 있다. 그러나 부식 용액을 혼합한 경우에는 모두 마찰계수가 초기에 급격히 상승하여 0.3 이상의 높은 마찰계수 값을 나타내고 있다. 이는 부식용액 혼합으로 인하여 유막이 파괴되기 쉬워지고 마찰표면이 빠르게 부식 및 산화되어 나타난 결과라고 생각한다. 또한 초기마멸 상태는 기유, 증류수, 염화나트륨 및 묽은 황산 순으로 짧아지고 있다. 이것은 묽은 황산의 부식 반응이 가장 빠르게 진행되고 다음으로 염화나트륨, 증류수, 기유 순으로 진행되기 때문이라고 생각된다.

특히, 증류수 혼합유의 경우 초기 마멸구간인 약 70분까지는 마찰계수가 급격히 증가하여 약 0.6 정도로 매우 높게 나타나고 있다. 이는 마찰면 전체에 걸쳐 유막이 거의 형성되지 못하고 온도 상승에 따른 증류수의 빠른 기화로 인하여 스틱슬립(stick-slip)[10]마찰이 진행된 결과라고 생각된다. 그러나 염화나트륨 수용액의 혼합유는 묽은 황산 및 증류수를 혼합한 경우보다도 현저히 낮다. 이는 부식으로 인한 산화막 뿐만 아니라 표면에 염화나트륨이 생성 및 침식되어 묽은 황산 및 증류수의 혼합유에 비해 마찰 전단력이 낮아진 결과라고 생각된다[4].

Fig. 4는 각 조건에서 왕복동 마찰 실험을 하였을

Fig. 3 Variation of friction coefficient on each oil.

Fig. 4. Time domain record of signal from acceleration sensor at the (a) first and (b) end of experimental time.

때, 전체 실험 시간의 초기에 해당하는 (a)30분 지점과 말기에 해당하는 (b)150분 지점에서 샘플링 시간에 대한 가속도 신호의 변화를 나타낸 것이다. 이러한 파형은 2초 동안 25.6 kHz의 샘플링 속도로 기록된 가속도 신호로써 주철 시험편이 왕복 운동을 2회 하는 동안 편 시험편을 통해 전달되는 가속도 진폭의 변화를 나타낸 것이다.

그림에서 각 지점의 파형을 살펴보면, 기유의 경우에는 실험초기인 (a)30분 지점의 최대 진폭이 (b)150분 지점보다 크게 나타나고 있다. 이처럼 초기의 진폭이 다소 크게 나타나는 것은 Fig. 3의 기유에서의 마찰계수 변화에서도 볼 수 있듯이 초기 마멸 상태인 런닝-인(running-in) 과정에 의한 영향이라고 생각된다. 그리고 증류수, 염화 나트륨 수용액 그리고 묽은 황산을 혼합한 경우에는 기유를 사용하여 실험한 가속도 파형의 진폭보다 대체로 진폭이 크게 변화하며 나타나고 있다. 이는 유막 파괴로 인한 마찰열 상승과 함께 마찰 표면의 부식 및 산화가 촉진되고 이로 인한 스틱슬립 현상이 발생된 결과라고 생각되며, 실제로 기유를 사용하여 실험한 경우에는 발생되지 않았던 스틱슬립에 의한 소음을 확인할 수 있었다. 특히, 묽은 황산

을 혼합한 경우에는 진폭 변화도 매우 크고 소음도 매우 심하게 발생하였다.

3-2. 진동파형의 시간 영역 분석

Fig. 5는 각 조건에서 실험 시간에 따른 진폭의 표준편차의 변화를 나타낸 것으로 기유를 사용한 경우에는 Fig. 3의 마찰계수 변화와 유사하게 초기에는 런닝-인의 영향으로 진폭이 증가하여 표준편차가 비교적 높게 나타나지만 실험 시간 90분 이후에는 약 1G 정도의 값으로 안정되게 나타나고 있다. 그리고 묽은 황산을 혼합한 경우도 마찰계수 변화와 유사하게 초기 30분까지는 표준편차가 급격 증가하고 있으며, 그 이후에는 약 3.5~4G 사이로 크게 유지되고 있다. 그러나 증류수를 혼합한 경우에는 마찰계수 변화와 다르게 실험 시간 5분 이내에 표준편차가 급격히 증가하여 약 2G 정도 값을 나타내며, 70분 이후 조금씩 감소하여

Fig. 5. Variation of standard deviation of amplitude for the experimental time.

Fig. 6. Variation of kurtosis coefficient for the experimental time.

약 1.7~1.8 정도의 값을 유지하고 있다. 여기서 마찰의 시작과 함께 진폭의 표준편차가 급격하게 증가하는 것은 유막 파괴로 인하여 마찰 온도의 급격한 증가와 함께 마찰 표면의 미세돌기가 급격하게 제거되고 다듬어진 결과라고 생각된다. 그리고 그 이후에는 전면에 걸쳐 산화막이 형성되어 산화, 응착 그리고 이탈이 반복적으로 일어나고 있다고 보여 진다. 그리고 초기마멸 이후의 표준편차의 변화를 살펴보면, 기유와 증류수 혼합유를 사용한 경우에는 염화나트륨 수용액 및 묽은 황산 혼합유를 사용한 경우보다 그 변화가 작다. 이는 생성된 산화막이 산소와 결합하여 형성되었기 때문에 산화막의 형성과 이탈이 상대적으로 느리게 진행된 결과라고 생각한다.

Fig. 6은 각 조건에서 실험 시간에 따른 첨도의 변화로서 이는 파형 진폭의 크기와는 상관없이 파형 형태의 특징 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 기유를 사용한 경우 마찰 초기에는 런닝-인 과정에 의해 비교적 높게 나타나고 있다. 그러나 시간이 증가함에 따라 점차 감소하여 3에 근접하고 있다. 이는 초기 마멸 과정에서 마찰면의 미세돌기가 탈락하여 면이 다듬어짐에 따라 마찰면의 조도 분포가 가우스(Gaussian) 분포에 근접하였기 때문이다. 그리고 실험 시간 90분 이후에는 다시 증가하여 약 3.5 정도를 유지하고 있다. 이는 정상 마멸 과정 중에 발생하는 경미한 연삭 또는 응착의 영향이라고 생각된다.

그리고 묽은 황산의 경우에는 부식률이 높아 부식마멸이 빠르게 진행됨에 따라 첨단계수가 급격히 증가하고 있다. 이는 부식막의 형성 및 이탈이 빠르고 크게 반복되며 심각한 응착 마멸이 진행되고 있다는 것을 나타내는 것으로 첨단계수도 5에서 7사이 값에서 크게 변화하고 있다. 그러나 증류수와 염화나트륨 수용액을 혼합한 경우에는 초기마멸 이후에도 첨단계수는 약 3~3.5 정도를 유지되고 있다. 이는 부식막의 형성 및 이탈이 묽은 황산과 같이 크고 급격히 진행되는 형태가 아니라 비교적 작고 느리게 진행된 결과라고 생각된다.

이와 같이 시간 영역에 대한 통계적 분석을 통하여 각 실험조건에서 마찰시 발생하는 진동 파형을 분석한 결과, 각 실험조건에서의 마찰면의 상태 및 마멸기구와 진동파형의 진폭 평균 및 첨단계수 사이에 상관관계가 있음을 알 수 있었다.

3-3. 진동파형의 주파수 영역 분석

Fig. 7과 Fig. 8은 기유와 황산 혼합유에서 실험 시

Fig. 7. Dynamic cascade plot of frequency spectrum for experiment time : base oil.

Fig. 8. Dynamic cascade plot of frequency spectrum for experiment time : base oil + H₂SO₄.

간에 대한 진동주파수 스펙트럼의 변화를 캐스케이드 선도(cascade plot)로 나타낸 것이다. 이와 같은 캐스케이드 선도는 기계의 상태를 진단하기 위하여 많이 이용되는 것으로 시간에 따른 특정 주파수 성분의 상태와 진폭 변화를 감시할 수 있다. 본 연구에서는 이를 통하여 각 혼합유에서 마찰시간에 따른 마찰 상태변화와 마찰 진동의 스펙트럼 변화를 분석하여 마찰 및 마멸과 관련 있는 주파수 성분을 파악하였다.

일반적으로 운전 중인 기계구동부의 진동 주파수 스펙트럼을 살펴보면 저주파 영역에는 대체로 마찰에 의한 진동뿐만 아니라 외력과 운동에 의한 여러 가지 기계 부품의 진동 성분이 포함되어 있으며, 고주파 영역에는 기계 부품의 결함 및 마멸에 따른 표면 손상에 의한 진동 성분이 포함되어 있다. 따라서 진동 주파수 스펙트럼의 캐스케이드 선도를 통하여 부품의 결함인자에 따라 변화되는 특정 주파수 성분을 알아내어 진폭의 변화를 파악하는 것이 중요하다.

Fig. 7은 기유에서 실험을 한 경우의 진동주파수 스펙트럼의 캐스케이드 선도로 (a)전체 주파수 영역에서 살펴보면 500 Hz 이하에서만 큰 진폭이 관측되고 있다. 그러나 Fig. 8의 황산혼합유에서 실험을 한 경우는 500 Hz이하 영역뿐만 아니라 그 이상의 높은 주파수 영역에서도 큰 진폭이 나타난다. 이는 황산에 의한 부식마멸로 인하여 스틱슬립 현상이 발생하면서 마찰면이 손상된 결과라고 생각된다. 그리고 Fig. 7과 Fig. 8의 (b)120 Hz 이하의 주파수 영역에서 살펴보면 실험이 진행됨에 따라 70 Hz에서 120 Hz 사이에서 주파수 성분의 변화와 진폭의 변화가 뚜렷하게 관찰되고 있다. 이것은 일반적으로 마찰이 일어나는 부품의 고유진동 주파수 성분과 관련이 있으며, 마찰 운동과 함께 마찰 상태에 따른 강성의 변화로 인한 영향으로 알려져 있다.

Fig. 9는 각 혼합유를 사용하였을 때 낮은 주파수 영역에서 시간에 따른 주파수와 진폭의 변화를 나타낸 것으로 70 Hz에서 120 Hz 사이의 주파수 영역에서 (a)최대 진폭과 최대 진폭을 가지는 (b)주파수 성분의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 기유를 사용하여 실험 하였을 경우에는 시간이 지남에 따라 초기에 진폭이 증가하다가 정상마찰 상태에서는 0.2G 이하로 낮아진다. 그리고 88 Hz에서 90 Hz 사이의 주파수 영역에서 주파수 성분이 나타나고 있다. 그러나 증류수 및 부식 용액을 혼합한 경우에는 진폭이 0.4G 이상 크게 나타나고 있으며 그 변화 폭이 크다. 이는 유막 파괴 및 부식 마멸로 인하여 표면의 응착과 탈락이 반복된

(a) variation of amplitude

(b) variation of frequency

Fig. 9. Trend plot in frequency between 70 Hz and 120 Hz.

결과라고 생각된다. 또한 (b)주파수 성분의 변화에서 초기마멸 상태일 때 증류수와 묽은 황산의 혼합유는 주파수가 급격히 높아진다. 이는 초기에 유막파괴 및 급격한 부식으로 마찰표면의 온도가 급상승하면서 응착 마멸이 일어난 결과라고 생각된다. 특히, 묽은 황산 혼합유는 초기마멸 이후에도 부식과 응착에 의한 지속적인 표면 손상의 영향으로 주파수 성분이 100 Hz 정도로 높게 나타나고 있다.

Fig. 10은 각 혼합유를 사용하였을 때 높은 주파수 영역인 700 Hz에서 1000 Hz 사이의 (a)최대 진폭과 (b)주파수 성분의 변화를 나타낸 것으로 기유를 사용한 경우에는 주파수 성분이 관측되지 않는다. 그러나 유막파괴 및 부식마멸이 진행되고 있는 증류수, 염화나트륨 및 황산의 혼합유는 약 840 Hz의 주파수 성분에서 마찰이 진행됨에 따라 진폭의 변화가 나타나고 있다. 특히 스틱슬립에 의한 소음이 가장 심한 묽은 황

(a) variation of amplitude

(b) variation of frequency

Fig. 10. Trend plot in frequency between 700 Hz and 1000 Hz.

산의 혼합유에서 진폭이 가장 크게 나타나고 있으며, 증류수와 염화나트륨의 혼합유도 그 정도에 따라 진폭의 변화가 나타났다.

이와 같이 주파수 영역에서의 스펙트럼 분석을 통하여 부식 마멸에 의한 마찰면의 손상과 진동 주파수와 의 관계를 살펴보았다. 그러나 실제 선박엔진에서는 시스템에 전달되는 다양한 노이즈 성분에 의해 특정 주파수 성분을 찾는 것이 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 실제 엔진에서 적용하기 전에 선행 연구로 순수하게 스커핑을 유발할 수 있는 요인과 그에 따른 진동 파형 및 스펙트럼을 조사하였으며, 실린더 라이너와 피스톤 링의 이상마멸의 진단 가능성을 먼저 살펴보았다. 그 결과, 실제 선박 엔진으로부터 측정된 진동 데이터를 적절한 주파수 필터링 기법을 구축하여 손상과 관련되는 특정 주파수 성분을 파악할 수 있다면, 상태 진단을 위한 데이터로 활용할 수 있다고 생각된다.

4. 결 론

부식 환경 하에서 가동되는 선박 엔진의 실린더 라이너의 손상에 대한 자료를 구축하고자 실린더를 모의하여 주철 시험편에 대한 왕복동 윤활 마찰마멸 실험을 하였다. 그리고 실험 중에 측정된 진동 파형으로부터 시간 및 주파수 영역 분석을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기유의 경우에는 마찰계수가 약 0.2 정도로 정상적인 경계윤활 마찰이 진행되지만, 부식 용액을 혼합한 경우에는 0.3 이상의 높은 마찰계수 값을 나타낸다.
- 2) 묶은 황산 혼합유에서의 진폭의 표준편차는 약 3.5~4G, 첨단계수는 약 5~7 이고, 증류수 및 염화나트륨 혼합유에서의 표준편차는 약 1.5~2G, 첨단계수는 약 3~3.5의 값을 가진다.
- 3) 정상마멸 상태에서는 88~90 Hz 사이의 영역에서 진폭이 약 0.2G인 주파수 성분이 나타나지만, 부식마멸이 진행되면 90~105 Hz 사이의 영역에서 0.4G 이상의 주파수 성분이 나타난다.
- 4) 고주파 영역에서 정상마멸 상태일 때는 주파수 성분이 관측되지 않지만, 부식마멸이 진행되면 약 840 Hz의 주파수 성분에서 진폭의 변화가 나타나고 있다.

Acknowledgements

이 논문은 동아대학교 교내연구비에 의하여 연구되었음.

References

[1] Doug, W., Marine Diesel Engines and Gas Tur-

- bines, Ninth Edition, Dongmyung comp, 2011.
- [2] Francesco, M., Markus, W., Matthias, S., Konrad, R. and Marco, P., "Suction air humidity influence on piston running reliability in low-speed two-stroke diesel engines," CIMAC, No. 74, pp. 1-15, 2010.
- [3] Saburi, Shigeru, Saitoh, Yoshiyuki and Yamada, Takayuki, "Tribology between Piston Rings and Cylinder Liners of Marine Diesel Engines," IHI Engineering Review, Vol. 38, No. 1, 2005.
- [4] Koo, H. H., Cho, Y. S., Cho, H. Y., and Park, H. S. "Effect of Atmosphere on Corrosive Wear of Alloy Cast Iron for Cylinder Liner of Large Ship Engine," J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng., Vol. 28, No 5, pp. 233-239, 2012.
- [5] Yang, B. S. Condition Monitoring and Diagnostics, Intervision, 2006.
- [6] Martin, H. R. Lubrication, Friction, and Analysis, Wear Technology-Vibration, ASM HANDBOOK, Vol. 18, pp. 293-298, 1995.
- [7] Baek, D. J., Lee, Y. B., Kim, S. J., Yoon, E. S., Kim, C. H., Kong, H. S., and Jang, G. H., "The Study on the Correlation of Vibration, Wear and Temperature for Rubbing in Rotating Machinery," KSNVE, pp. 453-459, 2002.
- [8] Baraa Al Sayed, Eric Chatelet, Sebastien Baguet & Georges Jacquet-Richardet, "Dissipated energy and boundary condition effects associated to dry friction on the dynamics of vibrating structures," Mechanism and Machine Theory, No. 46, pp. 479-491, 2011.
- [9] Mars G. Fontana, CORROSION ENGINEERING, Third Edition, McGraw-Hill Book Company, 1986.
- [10] Hur, B. R. Lee and Lee, J. E., "A Study on the Identification of Nonlinear Vibration System with Stick Slip Friction," KSNVE, Vol. 10, No. 3, pp. 451-456, 2000.