

스퍼 기어 시스템의 음향 신호와 비 유막 두께 (Specific Film Thickness)의 상관관계에 관한 실험적 연구 Experimental Investigation to Establish Correlation between Specific Film Thickness and Sound Signals in a Spur Gear System

김 종 식* · Amarnath, M.* · 이 상 권†
Jongsik Kim, M. Amarnath and Sangkwon Lee

(Received June 23, 2014 ; Revised July 21, 2014 ; Accepted July 21, 2014)

Key Words : Surface Fatigue Wear(표면 피로 마모), Lubricant Film Thickness(윤활 막 두께), Tooth Thickness(기어 이 두께), Statistical Parameter(통계적 변수)

ABSTRACT

Gear transmission system is widely applied in engineering. As the problem of contact fatigue, wear, lubrication failure etc, the condition of gear teeth contacts will be worse. The vibration and sound signals in the gear system will be affected by the some failures like scuffing, abrasive wear and spalling due to the deterioration of gear teeth surface. By studying the estimation of specific film thickness, measurement of reduction in tooth thickness, visual examination of wear mechanisms on the gear teeth and their effects on the statistical parameters of vibration and sound signals, the research obtained the satisfactory results on accessing the surface fatigue wear in a spur gear system. The paper utilizes the relationship between statistical parameters obtained from sound signals and Stribeck curve to confirm the hypothesis of dependency of surface fatigue wear, specific film thickness.

1. 서 론

기어의 구동은 다양한 회전체를 포함한 기계요소, 또는 시스템을 제어하는 과정에서 동력을 전달해주는 가장 보편적인 요소 중 하나이다. 기어 시스템의 수명은 윤활유, 디자인, 기어의 오염, 구동 환경 등 다양한 요소에 의해 결정된다. 이 중, 윤활제는 기어 시스템에서 기어 이(tooth)와 이(tooth) 사이의 마찰과 마모를 줄이기 위해 사용되며, 기어 표면에서

의 윤활제가 기어의 회전의 영향으로 그 두께가 얇아 지거나 기능을 수행하지 못할 경우, 기어 표면에서의 온도와 마모의 정도가 급속도로 증가하게 된다. 이러한 윤활제의 상태변화는 연마 마모(abrasive wear), 점식(pitting), 스폴링(spalling), 스커핑(scuffing) 그리고 스코어링(scoring) 등의 결함을 야기한다. 이러한 손상이 심각해 질 경우, 기어의 접촉 강성을 감소시킬 뿐만 아니라, 기존의 기어박스에서 수집되는 진동과 음향 신호를 변화시킨다^(1,2). 지난 이십여 년 간 많은 과학자들이 구름접촉과 미끄럼접촉(rolling

† Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical Engineering, Inha University
E-mail : sangkwon@inha.ac.kr
Tel : +82-32-860-7305, Fax : +82-32-868-1716
* Department of Mechanical Engineering, Inha University

A part of this paper was presented at the KSNVE 2014 Annual Spring Conference
‡ Recommended by Editor Myung Jun Kim
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

and sliding contact)을 포함한 기어나 롤링 베어링, 캠 그리고 저널 베어링의 결함 진단에 대한 논문을 발표하였다^(2,3). 하지만, 몇몇 소수의 과학자들만이 더 나은 결함 진단방법을 위한 다양한 컨디션 모니터링(condition monitoring) 기술의 조합을 연구하였다⁽⁴⁾. 이 논문에서는 앞서 진행된 여러 연구들을 바탕으로, 스피어 기어를 장착한 기어 박스를 사용한 피로 실험을 수행하였다. 이를 통해 마모의 전과, 최소 유막 두께의 감소, 비 유막 두께(specific film thickness, λ), 기어 이 두께의 감소, 음향 신호에서 계산된 통계적 변수(parameters)들로부터 표면 피로 마모의 정도를 평가하고 변수들간의 상관관계를 검증하였다.

2. 기어 맞물림 영역에서의 윤활영역의 전이와 마모형태

기어 전달장치 내에서의 충분한 윤활은 내구성에 있어 가장 중요한 요소 중 하나이며, 이러한 기어 전달장치 내에서의 기어 결함(점식(pitting), 스커핑(scuffing), 스폴링(spalling), 스코어링(scoring))들은 기어 이(tooth) 접촉면에서의 윤활에 크게 의존하고 있다⁽³⁾. 기어, 롤링 베어링(rolling bearings), 저널

베어링(journal bearings), 그리고 캠(cam)과 같은 구름, 미끌림(rolling and sliding) 접촉 상태에서의 윤활은 세가지 영역 (i) 유체 윤활(hydrodynamic lubrication-HL), (ii) 유체 탄성 윤활(elastohydrodynamic lubrication-EHL), (iii) 경계 윤활(boundary lubrication-BL)로 나누어지며, 이 세 가지 영역은 Fig. 1에 도시되어 있듯이 Stribeck curve로 표현된다.

이 세 가지 영역 중 한 영역에서 다른 영역으로의 이전은 구동 조건, 또는 마모가 진행됨에 따라 발생하게 된다⁽⁵⁾. 이 때, 윤활 특성인 최소 유막 두께(h_{min})와 비 유막 두께(specific film thickness, λ)는 Dowson and Higginson 식에⁽⁶⁾ 의해 계산할 수 있으며, 아래의 식 (1)과 (2)로 표현 된다.

$$h_{min} = \frac{1.6\alpha^{0.6}(\eta_0 u)^{0.7}(E')^{0.03}\rho^{0.44}}{w^{0.13}} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{h_{min}}{R} \quad (2)$$

위 식에서 α 는 압력 점성 계수, η_0 는 절대 점도, E' 는 혼합 young 계수, ρ 는 두 기어 표면의 혼합 유효 반지름, w 는 기어에 작용하는 수직력을 나타내며, R 은 복합 표면 거칠기이다. Stribeck curve(Fig. 1)에서 λ 값의 변화를 통해 스피어 기어 시스템에서의 윤활 영역을 파악 할 수 있으며, 또한 λ 값이 줄어들때 따라 기어 이(tooth) 표면에서의 마모가 진행됨을 확인 할 수 있다. 마모의 진행은 기어 이(tooth)의 강성(stiffness)을 낮추게 되고, 이로 인해 기어 전달장치에서 측정되는 진동과 소음의 레벨이 증가 하게 된다. 유체 윤활 영역(EL)은 접촉면이 가압된 윤활유에 의해 지지될 때를 말하며, 이 때 비 유막 두께(specific film thickness, λ)는 결함 표면 거칠기(R)보다 큰 값을 가지게 된다($\lambda \gg 3$). 유체 윤활 영역에서 수집된 음향 신호는 회전체에 대한 음향 특성을 보여주며, 음향 신호의 베이스 라인으로 간주된다. 유체 탄성 윤활 영역(EHL)의 경우는 접촉면 사이 윤활유의 압력이 높아지기 시작하며 기어 이(tooth) 표면이 탄성 변형 하는 구간을 말한다. 이 때 이(tooth) 표면의 변형 량은 접촉면 사이에 존재하는 윤활유의 두께와 관계가 있으며, 비 유막 두께(specific film thickness, λ)는 $1.4 > \lambda > 3$ 사이의 값으로 혼합 마모

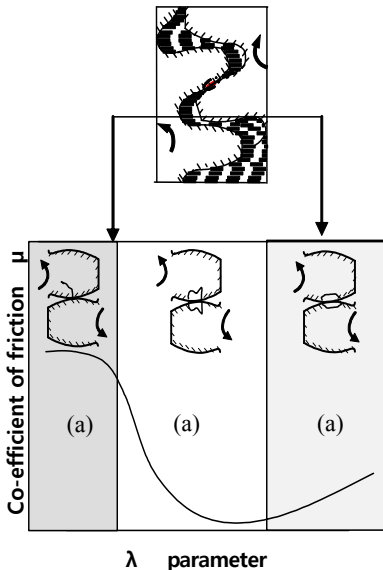


Fig. 1 Gear teeth contacts in Stribeck diagram as a function of specific film thickness

가 생기기 시작한다⁽⁴⁾. 점식(pitting), 스커핑(scuffing) 등이 이 영역에서 관찰되기 시작하며, 이러한 마모, 결합들이 성장하여 음향 신호 레벨의 증가와 더불어 주기적인 임팩트 소음들을 생성한다. 한편, 경계 윤활 영역(BL, $1.4 > \lambda$)은 Fig. 1에서 가장 왼쪽 부분에 도시되어 있으며, 기어 이(tooth)의 접촉면에서 이(tooth) 표면의 거칠기 돌기(asperities)들이 직접 접촉하는 영역을 말한다. 거칠기 돌기(asperities)들의 직접적인 접촉으로 인해, 표면에서의 화학적 마모 또는 기계적 마모가 생기기 시작한다. 경계 윤활 영역에서의 거칠기 돌기의 접촉은 음향 신호의 주원인이 되며, 기계 요소가 이 영역에 접어들 경우, 음향 신호는 무작위(random)의 임팩트 신호들을 생성하고 그 레벨이 점점 증가하게 된다⁽¹⁾.

3. 통계적 변수

기어 표면에서 발생 할 수 있는 점식(pitting), 스커핑(scuffing)을 비롯한 여러 마모 형태들은 음향 신호로부터 계산된 통계적 변수들을 구해 검출할 수 있다. 음향 신호의 energy ratio(ER)⁽⁷⁾는 규칙적인 메싱(meshing) 요소만을 포함한 신호(y_d)의 RMS 값과 또 다른 신호(d)의 RMS 비율로 정의되며 이는 식 (3)으로 표현된다.

$$ER = \frac{RMS_d}{RMS_{y_d}} \quad (3)$$

첨도(Kurtosis)⁽⁷⁾는 4번째 모멘트로써 정규화된 신호 샘플들의 뽀족함을 측정하는 단위이다(식 (4)). 즉, 신호 내 피크 점과 진폭을 나타내며, 기어나 베어링 결합 검출에 유용하게 쓰인다.

$$Kurtosis = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{(x(n) - \bar{x})^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2 \right]^2} \quad (4)$$

이 변수를 통해 기어 이(tooth) 표면에 존재하는 상대적으로 큰 마모들을 확인할 수 있다. 한편, 기어에서 수집한 음향 신호를 이용한 통계적 변수들을 통해서도 기어 이(tooth) 표면의 마모 강도율(severity)을 판별할 수 있다⁽⁸⁾.

4. 스퍼 기어 구동 실험

4.1 실험 장비 및 구동 조건

Fig. 2에 스퍼 기어 쌍에 대한 피로 실험 조건이 표현되어 있다. 기어는 0.75kW D.C 모터를 사용하여 구동하였고, 1단짜리 스퍼 기어에 대해 다른 쌍이 평행한 샤프트(shaft)에 설치되어 있다. 구동기어는 24개의 이(tooth), 중동 기어는 25개의 이(tooth)를 가지고 있으며, 기어 결합에 대한 검출은 구동기어에서 이루어 졌다. 실험조건과 실험에 사용된 장비들과 구동 조건들은 Table 1에서 확인할 수 있고, 기어의 재료에 대한 성질은 Table 2에서 확인 가능하다. D.C 모터의 속력은 구동 샤프트에 연결된 속도 컨트롤러로 조절되었고, 전자 브레이크(max torque capacity 12 Nm)를 사용함으로써 기어박스에 토크(torque)를 가하였다. 음향 신호는 Bruel & Kjaer 4189 micro phone으로 사용하여 측정하였다. 각 신호는 LMS SCADAS mobile과 TestLab으로 8.2 kHz로 샘플링하여 수집되었으며, 후 처리를 통해 분석에 사용되었다. 시간 도메인 신호는 음향 신호에서 노이즈(noise)의 양이 충분히 감소될 수 있도록, 16회에 걸쳐 평균값을 취하였으며 음향 신호는 구동 샤프트 부근 near field condition을 충족시키는 측정지점인 5.5 cm~6 cm 거리에 마이크로폰을 설치하여 측정하였다⁽⁴⁾. 모든 실험은 8 inch의 흡음 썰기(acoustic wedge)가 벽, 천장 그리고 바닥에 부착된 무향실에서 진행되었다.

표에 나열된 실험 조건을 바탕으로 피로 실험이 약 1000시간동안 진행되었다(27×10^6 cycles). 초기 마모 진행을 위한 run-in wear 시간을 첫 30시간 동안 가졌고, 그 후 기어 세척 과정을 거친 후 다시 장착하여 실험을 진행하였다. 기어 박스 내의 윤활유는 SAE40을 사용하였고, 윤활유의 온도는 k-type 온도계(0~900 °C)를 이용, 기어의 맞물림 영역(gear mesh zone)에서 매 30분 간격으로 측정되었다. 각 온도에 상응하는 점도 값은 유막 두께를 계산하는데 사용되었으며 측정된 온도에 따라 계산하였다. 기어 표면의 마모 검사를 위해 기어 박스의 구동을 매 200시간마다 중지하였으며, 이때 비 유막 두께를 계산 하는데 필요한 기어 이 측면 거칠기와 이의 두께를 측정하였다. 거칠기는 Hommel-Etamic(w5)장비를

Table 1 Gear test rig specifications

Parameters	Pinion	Gear
Number of teeth	24	25
Deport angle	0.00	0.00
Pressure angle	20°	20°
Module	3	3
Face width	30	30
Pitch diameter	72.72	75.75
Diameter of base	68.34	71.18
Diameter of head	78.78	81.81
Pinion speed	450 rpm	
Torque on pinion shaft	12 Nm	

Table 2 Material properties of gears

Material properties of gears	
Material	SM 45C
Brinell hardness number(HRB)	167
Poisson's ratio	0.3
Young's modulus	$2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$

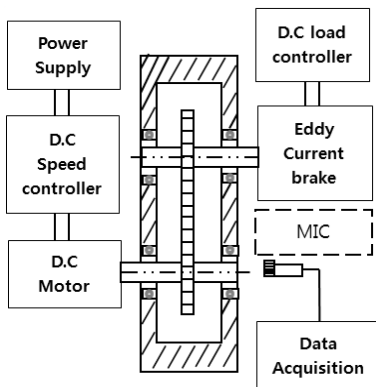


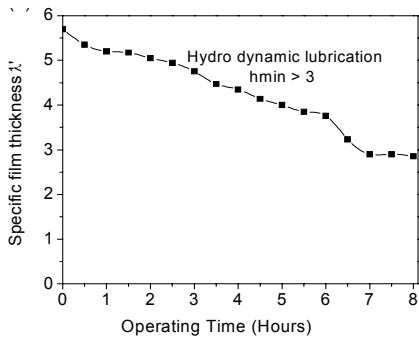
Fig. 2 Representation of the experimental setup installed in anechoic chamber

통해 측정하였으며, 두께는 디지털 버니어 캘리퍼 캘리퍼스를 사용하여 측정하였다. 기어 표면의 마모는 USB 현미경(microscope)으로 확인하였다.

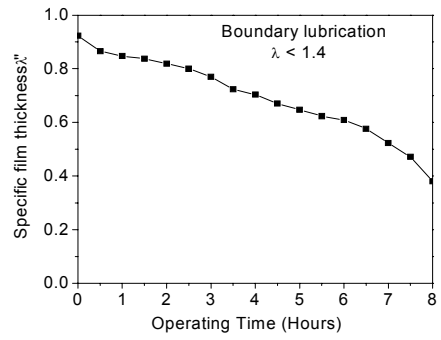
4.2 비 유막 두께(Specific Film Thickness)의 변화를 통한 윤활영역 전이 및 마모의 발생
비 유막 두께(λ)는 피로 수명을 결정하는 가장

중요한 요소이다. 피로 실험이 진행됨에 따라, 윤활유의 온도는 상승하게 되며 윤활유의 점도를 낮추게 된다. 각 온도에 상응하는 점도 값과 그 때의 속력 그리고 기어에 작용하는 힘과 압력 점성 계수를 이용하여 막의 최소 두께를 식(1)을 이용하여 구할 수 있고, 이를 이용한 비 유막 두께(λ)를 식(2)를 통해 복합 표면 거칠기(Fig. 4)와 최소 유막 두께의 비로써 계산한 것을 매 200시간을 구간으로 하여 25시간 단위로 Fig. 3(a)~(e)에 나타내었다. 구동 시간이 길어짐에 따라 기어 표면에서는 피로에 의한 마모, 윤활유 특성(산화, 질화, 황산화 등)으로 인한 마모 등이 생성되었고, 이로 인한 기어 이(tooth) 측면의 결합 표면 거칠기(R)값이 구동 시간에 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(a)를 통해 0~200 hrs 구간에선 유체 윤활(HL, $\lambda > 3$)임을 확인할 수 있다. 200시간의 구동 후 현미경으로 관찰된 표면에서는 점식(pitting)을 확인할 수 있다(Fig. 5(a)). 이러한 점식은 그 크기가 작을 경우 무시할 수 있지만, 그 크기가 커질 경우 기어 표면 또는 다른 기어로 전이 되어 기어를 파괴할 수도 있다. 이러한 점식의 성장으로 발생한 마모로 인해 복합 표면 거칠기는 증가하게 되고, 비 유막 두께는 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 3(b)를 통해 윤활 영역이 탄성 유체 구간(EHL, $3 > \lambda > 1.4$)에 접어든 것을 확인할 수 있고, 기존의 점식(pitting)이 성장하고 전이된 것을 확인할 수 있다(Fig. 5(b),(c)). 탄성 유체 구간이 이어짐에 따라, 점식 이외에도 또 다른 형태의 마모인 스코어링(scoring), 스커픽(scuffing) 등이 발생하기 시작한다. 이러한 다른 형태의 마모의 증가로 인한 온도의 상승, 점도의 하강에 따라 유막 두께가 감소하게 되고, 이로 인해 기어 표면 거칠기에 영향을 미치게 된다. 또한, Fig. 3(c), Fig. 3(d)에서 보여지는 것처럼 400~600 hrs, 600~800 hrs 동안의 비 유막 두께의 변화를 통해, 탄성 유체 구간(EHL)과 경계 구간(BL)을 동시에 관찰할 수 있다. 또한, Fig. 3(e)를 통해 800시간의 구동 이후 윤활 상태가 경계 구간에 들어가는 것을 확인할 수 있으며, 기어 표면에서 확인된 스코어링을 Fig. 5(d)에 나타내었다. 스코어링이 발생함으로써 기어 이(tooth)와 이의 직접적인 접촉으로 인한 마찰에 의해 접촉 부분이 용융되어 뜯겨나간 것을 확인할 수 있다.

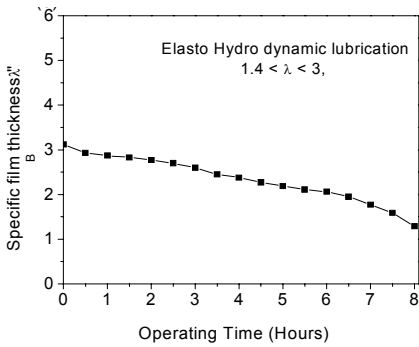


(a) 0~200 hours



(e) 800~1000 hours

Fig. 3 Specific film thickness versus time



(b) 200~400 hours

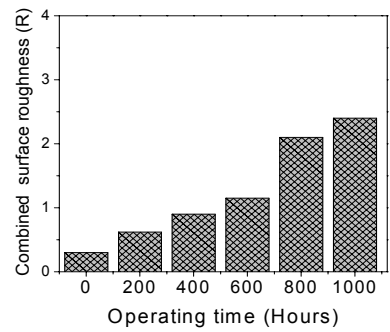
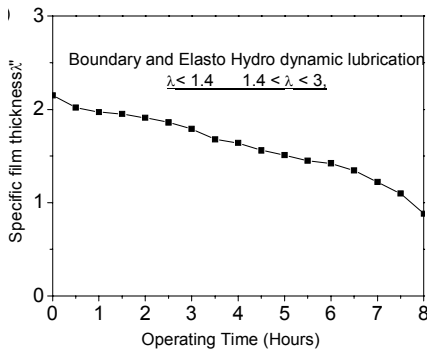
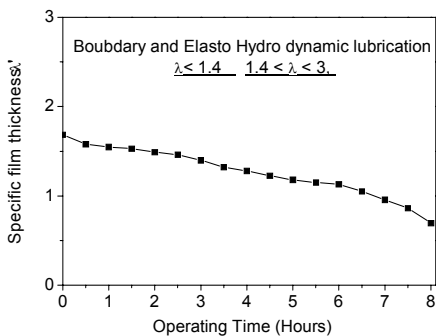


Fig. 4 Combined surface roughness versus time



(c) 400~600 hours



(d) 600~800 hours

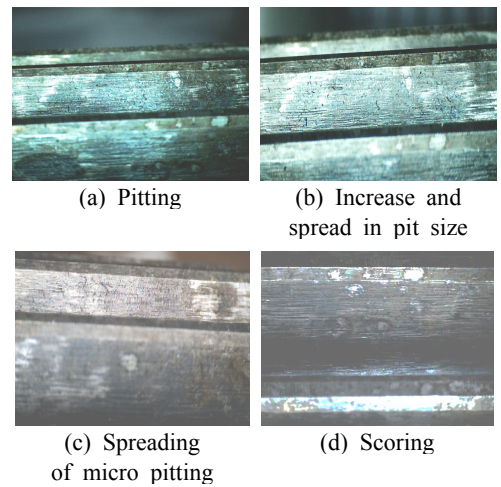


Fig. 5 Surface fatigue wear on the pinion teeth surface

이러한 마모들은 기어 표면에서 재료의 손실을 야기하고 이로 인한 기어 이(tooth)의 두께는 감소하게 된다. 120°간격으로 위치한 기어 이(tooth) 두께의

평균 값을 Table 3에 나타내었다. 앞서 나열한 윤활 영역의 변화로 인한 마모의 증가, 기어 표면과 두께의 변화가 기어박스로부터 측정되는 음향 신호에 주는 영향을 다음 통계적 변수 분석을 통해 확인할 수 있다.

4.3 음향 신호의 통계 변수와 Stribeck Curve와의 상관관계 분석

기어 표면의 손상 정도와 비 유막 두께(specific film thickness, λ)와의 상관성을 확인하기 위하여, 기어 박스에서 측정된 음향 신호를 통해 구해진 통계적 변수들(energy ratio(ER), Kurtosis value)과 앞서 구해진 비 유막 두께를 Stribeck curve를 통해 비교해 보았다. 각 구간 별로 측정된 음향 신호의 ER값들과 비 유막 두께를 비교한 것을 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 앞서 Figs. 3, 4에서 확인하였듯이, 구동 시간이 길어짐에 따라, 윤활 영역의 전이가 발생하고, 그 전이에 상응한 마모들이 생성, 성장하게 된다. 이로 인해 복합 표면 거칠기(R)는 증가, 비 유막 두께는 감소하게 된다. 윤활 영역이 유체 구간(HL, $\lambda \gg 3$)에서 탄성 유체 구간(EHL, $1.4 > \lambda > 3$), 경계 구간(BL, $1.4 \gg \lambda$)으로 접어들에 따라, 마모의 정도가 증가하고, 이로 인해 음향 신호의 ER 값이 증가하는 것을 Fig. 6에서 확인할 수 있다. ER 값을 λ 에 대해 표현함으로써, 음향 신호로부터 구한 ER 값이 Fig. 1에 나타나 있는 Stribeck curve와 상관도가 있음을 확인할 수 있다. 즉, Fig. 1과 ER 값을 사용한 분석으로부터 유체 윤활 구역(EL)에서는 마찰 계수인 μ 와 각 ER값이 같은 양상을 띄며 낮은 값을 가지며, 마찰 계수 μ 값의 증가, λ 값의 감소에 상응하여 ER값들이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 한편, 또 다른 통계적 변수인 첨도(Kurtosis) 값을 시간에 대하여 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보듯이 시간에 대하여 균일하지 않은 양상을 보이고 있으며, 이는 기어 시스템의 유지 및 작동 조건을 판별하는 변수로 적합하지 않음을 나타낸다. 이러한 양상은 첨도 값이 노이즈와 높은 주파수 대역에서의 소음 또는 진동에 대해 높은 민감성을 가지는 스푸리어스(Spurious)효과 때문이다. 이로 인해, 몇몇 구동 조건에서는 첨도 값을 통한 기계요소의 초기 결함을 찾아낼 때의 장점보다 단점이 더 부각된다. 또한, 음향 스펙트럼은 기어가 맞물리는 과정에서 발

Table 3 Tooth thickness and % reduction

Operating time	Average tooth thickness	Reduction(%)
0 hours	5.58 mm	0
200 hours	5.47 mm	1.9
400 hours	5.45 mm	2.3
600 hours	5.41 mm	3.04
800 hours	5.32 mm	4.65
1000 hours	5.22 mm	6.41

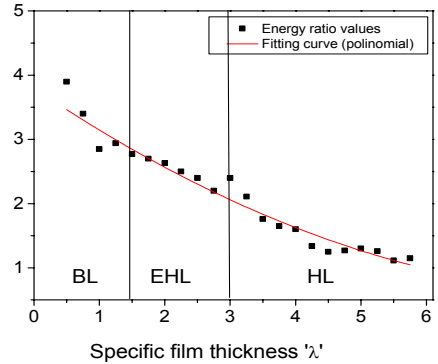


Fig. 6 Energy ratio of sound signals versus λ

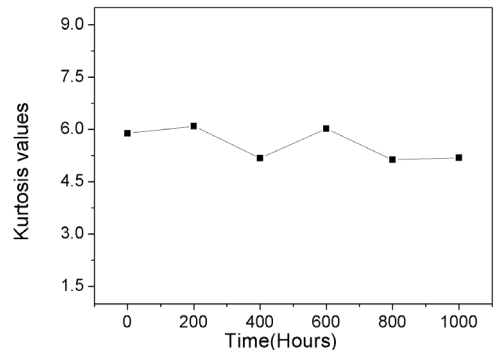


Fig. 7 Kurtosis values of sound signals versus time

생하는 동적 특성 및 마모가 진행되는 과정에 대한 포괄적인 정보를 포함하고 있는데, 이를 분석함으로써, 기어 이(tooth)에서 생성되는 마모의 정도 또는 위치를 파악할 수 있다. 이 연구에서 구동기어의 속력은 450 rpm으로써 180 Hz의 기본 맞물림 주파수(fundamental mesh frequency)를 가진다. 이 기본 주파수($1f_m$)와 그에 대한 하모닉스($2f_m, 3f_m, 4f_m$)를 포함한 스펙트럼을 Fig 8(a)~(d)에 묘사해 놓았다.

또한 실험에 사용된 기어박스의 구조공진 주파수

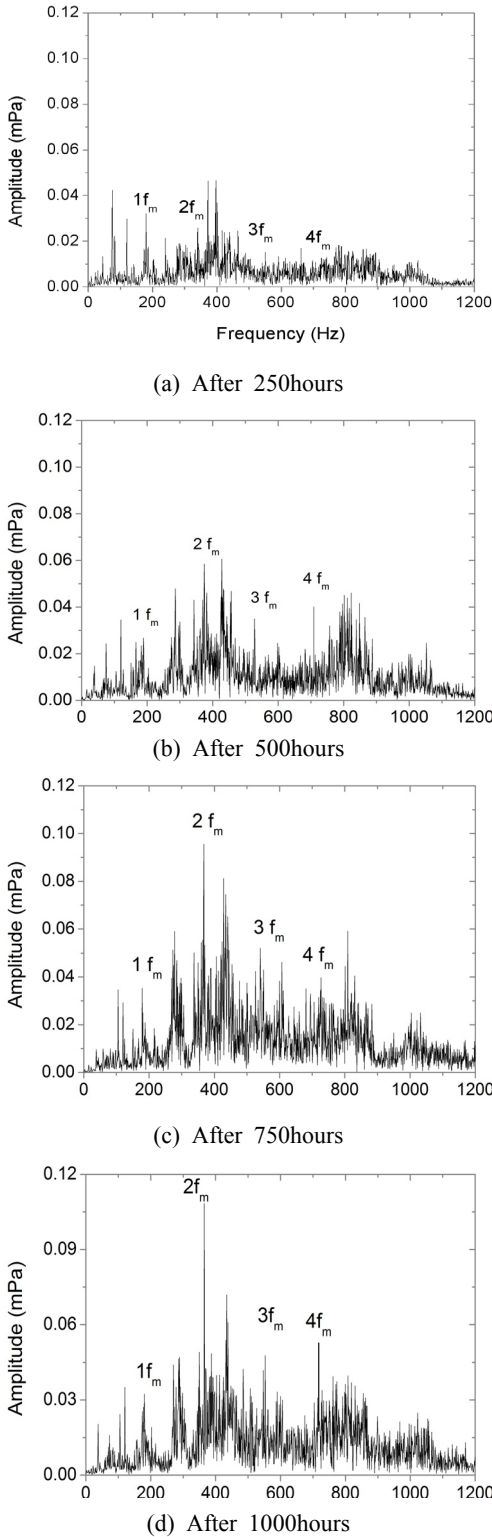


Fig. 8 FFT spectra of sound signals

는 450 Hz이다. 각 스펙트럼은 250시간 단위로 마이크로폰을 통해 측정된 소리로부터 구하였다. (a)로부터, 첫 번째와 두 번째 기어 맞물림 주파수와 그 외의 소음원인 모터, 전자 브레이크 등을 확인할 수 있다. 후에 측정 시간이 증가하면서 기어 표면에 마모가 생기고 250시간 이후 측정된 음향 신호의 스펙트럼에서의 진폭변화가 (b)로부터 관찰된다. 시간이 지남에 따라 기어 맞물림 주파수와 그의 하모닉 주파수의 진폭이 증가하는 것을 확인할 수 있고, 750시간 전후로 스커피ng(scuffing), 스코어링(scoring) 등이 발생함에 따라 세 번째 네 번째 맞물림 주파수의 진폭의 증가가 큰 폭으로 증가하는데, 이로부터 마모의 정도가 심화 되었다는 것도 확인할 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 스퍼 기어 이(tooth) 표면에서의 마모의 생성, 전파와 그에 상응하는 음향 레벨의 영향에 대한 가설이 이 연구에서 조사되었다. 피로 실험을 통한 마모 및 유막 두께, 비 유막 두께 그리고 음향 신호들로부터 구한 통계적 변수 분석이 수행되었다. 이로 인해, 비 유막 두께가 윤활 영역의 전이를 나타내는 지표로 사용됨에 따라, 음향 신호로부터 구해진 통계적 변수인 energy ratio가 Stribeck curve와 비슷한 양상을 띄는 것이 관찰되었고, 이로 인해 표면의 피로 마모와 음향 신호들의 통계적 변수들간의 상관관계를 확립시켰다. 다만 침도 값은 스푸리어스 효과에 대한 민감성 때문에 믿을만한 진단 정보를 제공할 수 없음도 확인하였다. 또한, 음향 신호의 FFT 분석에서 기어 맞물림 주파수와 그에 대한 하모닉 주파수의 진폭변화를 통해 기어 표면에서의 피로 마모 정도를 파악할 수 있음도 확인하였다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2010-0014260).

References

(1) Lee, S. K. and White, P. R., 1998, The

Enhancement of Impulsive Noise and Vibration Signals for Fault Detection in Rotating and Reciprocating Machinery, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 217, No. 3, pp. 485~505.

(2) Yesiyurt, I., 2003, The Application of the Conditional Moments Analysis to Gearbox Fault Detection-a Comparative Study Using the Spectrogram and Scalogram, *NDT&E International*, Vol. 37, Issue. 4, pp. 309~320.

(3) Amarnath, M., Sujatha, C. and Swarnamani, S., 2012, Experimental Investigations of Surface Wear Assessment of Spur Gear Teeth, *Journal of Vibration Control*, Vol. 18, No. 7, pp. 1009~1024.

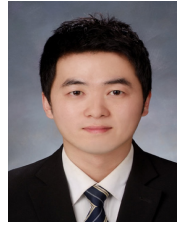
(4) Park, K. H., Jung, G. J., Wee, H., Kim, J. S., Han K. S. and Kim, M. H., 2008, A Study on the Fault Detection of Auto-transmission According to Gear Damage, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 18, No. 1, pp. 47~56.

(5) Serrato, R., Maru, M. M. and Padovese, L. R., 2007, Effect of Lubricant Viscosity Grade on Mechanical Vibration of Roller Bearings, *Tribology International*, Vol. 40, pp. 1270~1275.

(6) Dowson, D. and Higginson, G. R., 1997, *Elasto Hydrodynamic Lubricant*, New York: Pergamon Press Ltd.

(7) Yesilyurt, I., 1997, *Gear Fault Detection and Severity Assessment Using Vibration Analysis*, Ph.D. Thesis, University of Manchester, UK.

(8) Yesiyurt, I., Fengshou, G. and Andrew, D. B., 2003, Gear Tooth Stiffness Measurement Using Modal Analysis and Its Use in Wear Fault Severity Assessment of Spur Gear, *NDT&E International*, Vol. 36, No. 5, pp. 357~372.



Jong-Sik Kim is a graduate student in Department of Mechanical Engineering at Inha University. He has studied for transfer path analysis and vibration design.



M. Amarnath is a head research worker in Inha University. He has studied lubrication.



Sang-Kwon Lee was born in Pusan, Korea, in 1959, He studied mechanical engineering at the Pusan National University, Pusan, Korea for a bachelor's degree In 1998 he received a Ph.D. degree in signal processing at the ISVR (Institute of Sound and Vibration Research) of the University of Southampton in U.K. He has 11 years experiences in automotive noise control by working in Hyundai Motor co. and the Renault-Samsung Motor Company in Korea. In 1999, he moved to Inha University, Incheon, Korea. He has continued the sound and vibration research in the department of mechanical engineering at the Inha University.