

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.9.1005>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

스퍼 기어의 진동 신호와 비 유막 두께(Specific Film Thickness)의 상관 관계에 관한 실험적 연구

김종식* · M.Amarnath* · 이상권**†

* 인하대학교 기계공학부

Experimental Investigation to Establish Correlation Between Specific Film Thickness and Vibration Signals in Spur Gear System

Jong Sik Kim*, M.Amarnath* and Sang Kwon Lee**†

* Dept. of Mechanical Engineering, Inha Univ.

(Received June 23, 2014 ; Revised July 15, 2014 ; Accepted July 15, 2014)

Key Words: Surface Fatigue Wear(표면 피로 마모), Specific Film Thickness(비 유막 두께), Tooth Thickness(기어 이 두께), Stribeck Curve(스트라이벡 곡선)

초록: 기어의 구동은 여러 기계요소에서 동력전달을 가능하게 해주는 가장 중요한 요소이다. 이러한 기어 접촉면에서의 상태는 마모, 재료의 변형 그리고 윤활 상태에 따라 크게 좌우되며, 이러한 상태 변화는 기어의 수명에 큰 영향을 준다. 따라서, 이러한 상태 진단에 대한 해법은 원활한 구동을 위한 필수요소이다. 기어의 상태 변화는 연마 마모(Abrasive wear), 점식 (Pitting), 스커핑(Scuffing), 스폐링(Spalling) 등을 유발하며, 이러한 마모들은 기어로부터 발생하는 진동 레벨을 상승시킨다. 본 연구에서는 스퍼 기어를 장착한 기어 박스를 이용한 실험적 연구를 통해 기어의 표면 피로 마모를 평가하기 위해 진동 신호로부터 구해진 통계적 변수들과 Stribeck Curve와의 상관관계를 검증하였다

Abstract: Gears are critical elements in automobiles, and their use as power transmitting machine elements in engineering applications is quite extensive. In the areas of contact between gear teeth, the condition of a gear is likely to deteriorate due to contact fatigue, wear, material defects, lubrication failure, etc. Thus, it is necessary to monitor its condition to ensure smooth power transmission. Gear teeth deterioration causes failures such as abrasive wear, scuffing, pitting, and spalling. These failures lead to a higher level of vibration signals in the gear system. This paper presents the results of an experiment on the surface fatigue wear of a spur gear system. The correlation between the estimated specific film thickness, statistical parameter of the vibration signals, and Stribeck curve was considered in this study.

- 기호설명 -

η_0 : 절대 점도

α : 압력 점성 계수

u : 원주 속도

E' : 혼합 Young 계수, $E' = \frac{2E_1E_2}{E_2(1-\sigma_1^2)+E_1(1-\sigma_2^2)}$

E_1, E_2 : 각 구동 기어의 탄성계수

σ_1, σ_2 : 구동, 종동 기어 소재의 푸아송 비

ρ : 기어 두 표면의 곡면 유효 반지름,

$$\frac{1}{\rho} = \frac{2}{\sin\beta} \left(\frac{1}{d_{0,1}} + \frac{1}{d_{0,2}} \right)$$

$d_{0,1}, d_{0,2}$: 구동, 종동 기어의 지름

β : 기어 압력 각

w : 기어 이 단위 두께당 수직력, F/b

F : 기어 이에 작용하는 수직력, $F = \frac{F_U}{\cos\beta}$

F_U : 원주 방향의 힘, $\frac{2M}{d_b}$

d_b : 피치 원 지름

† Corresponding Author, sangkwon@inha.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

- M : 토크
- b : 기어 이 두께
- λ : 비 유막두께
- R : 복합 표면 거칠기

1. 서론

기어 시스템은 자동차의 변속기, 조향 장치 등에서 동력을 전달하거나 동력 방향의 전환 그리고 감속비를 이용한 속도조절 등, 가장 보편적인 기계 요소 중 하나이다. 이러한 기어의 수명은 윤활유, 구동 시간, 기어의 종류, 구동 환경 등 여러 가지 요소에 의해 결정된다. 이 중 기어 시스템의 원활한 구동을 위해 사용되는 윤활제는 기어의 맞물림 영역에서의 마찰을 줄여주며, 자동차의 구동 환경으로 인한 장시간의 구동 또는 간헐적인 구동으로 인해 윤활제의 기능을 수행하지 못할 경우, 기어 맞물림 영역에서의 마찰과 마모가 크게 증가하게 된다. 이러한 마찰과 마모의 증가는 연마 마모(Abrasive wear), 점식(Pitting), 스폴링(Spalling), 스커핑(Scuffing) 그리고 스코어링(Scoring) 등의 손상을 야기한다. 이러한 손상으로 인해 기어 접촉 강성이 변화할 뿐만 아니라, 기어 박스에서 발생하는 진동 신호의 레벨을 증가시키게 된다.⁽¹⁾ 이러한 결함들의 진단에 대해서는 구름, 미끄럼 접촉면(rolling and sliding contact)을 가지는 기어, 캠, 그리고 롤링 또는 저널 베어링에 대하여 선행 연구가 진행되었다.^(2,3) 치형에 따른 피로 수명에 대한 연구 또한 진행되었다.⁽⁴⁾ 본 논문에서는 이러한 결함에 대한 새로운 가설을 검증하기 위하여, 스퍼기어를 대상으로 한 피로 실험을 진행하였고, 표면 피로 마모의 정도를 평가하기 위하여 마모의 전과, 최소 유막 두께의 감소, 비 유막 두께(Specific film thickness, λ), 기어 이 두께의 감소, 기어 박스로부터 측정된 진동 신호로부터 계산된 통계적 변수(Parameters)들과 Stribeck curve의 상관관계를 검증하였다.

2. 기어 맞물림 영역에서의 윤활 영역의 전이와 마모 형태

기어 전달장치 내에서의 충분한 윤활은 내구성에 있어 가장 중요한 요소 중 하나이며, 이러한 기어 전달장치 내에서의 기어 결함(점식, 스커핑스폴링, 스코어링)들은 기어 이(tooth) 접촉면에서의 윤활에 크게 의존하고 있다.⁽¹⁾ 기어, 롤링 베어링(rolling bearings), 저널 베어링(journal bearings), 그리고 캠(cam)과 같은 구름, 미끄럼(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 세가지 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 의해 계산할 수 있으며, 아래의 식 (1)과 (2)로 표현 된다.

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

$$\lambda = \frac{h_{min}}{R} \tag{2}$$

각 기호는 첫 페이지의 기호 설명에서 찾을 수 있다. Stribeck curve(Fig. 1)에서 λ 값의 변화를 통해 스퍼기어 시스템에서의 윤활 영역을 파악 할 수 있으며, 또한 λ 값이 줄어들어 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.

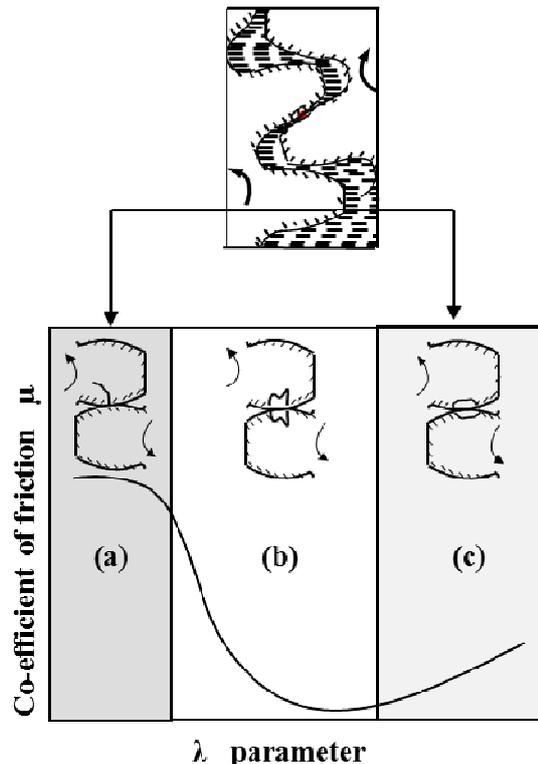


Fig. 1 Gear teeth contacts in Stribeck diagram as a function of specific film thickness

유체 윤활 영역(EL)은 접촉면이 가압된 윤활유에 의해 지지될 때를 말하며, 이 때 비 유막 두께(Specific Film Thickness, λ)는 결합 표면 거칠기(R)보다 큰 값을 가지게 된다($\lambda \gg 3$). 유체 윤활 영역에서 수집된 진동 신호는 회전체에 대한 진동 특성을 보여주며, 진동 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(λ)는 $1.4 > \lambda > 3$ 사이의 값으로 혼합 마모가 생기기 시작한다.⁽⁶⁾ 점식 (Pitting), 스커핑(Scuffing) 등이 이 영역에서 관찰되기 시작하며, 이러한 마모, 결합들이 성장하여 진동 신호 레벨의 증가와 더불어 주기적인 임팩트 소음들을 생성한다. 한편, 경계 윤활 영역(BL, $1.4 > \lambda$)은 Fig. 1 에서 가장 왼쪽 부분에 도시되어 있으며, 기어 이(Tooth)의 접촉면에서 이 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 진동 신호의 주원인이 되며, 기계 요소가 이 영역에 접어들 경우, 진동 신호는 무작위(Random)의 임팩트 신호들을 생성하고 그 레벨이 점점 증가하게 된다.⁽¹⁾

3. 통계적 변수

기어 표면에서 발생 할 수 있는 여러 마모 형태들은, 수집된 진동 신호로부터 계산된 통계적 변수들을 구해 검출할 수 있다. 진동 신호의 평균평방근(Root Mean Square-RMS)은 신호 샘플 제공들의 합한 후, 그들의 평균의 제곱근을 말하며 식 (3)과 식 (4)를 사용하여 표현할 수 있다.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2} \quad (3)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) \quad (4)$$

N 은 샘플의 개수를 나타내며, $x(n)$ 은 신호의 n 번째 지점에서의 진폭을 나타낸다. \bar{x} 는 진폭 값들의 평균 값이다. 파고율(Crest Factor-C)⁽³⁾은 신호 x 의 값들 중 양수인 피크 값을 RMS 값으로 나눈 값으로 식 (5)로 구할 수 있다.

$$C = \frac{\max(x)}{RMS} \quad (5)$$

파고율(Crest Factor)은 신호들의 진폭을 정규화 시킨 값으로써, 이로 인해 피팅이나 스코어링 그리고 스폴링으로 인해 생긴 높은 진폭들을 정도를 나타낸다. 한편, 기어에서 수집한 진동 또는 진동 신호를 이용한 통계적 변수들을 통해서도 기어 이빨 표면의 마모 강도율(severity)을 판별할 수 있다.

4. 스퍼 기어 구동 실험

4.1 실험 장비 및 구동 조건

Fig. 2 에 스퍼 기어 쌍에 대한 피로 실험 조건이 표현되어 있다. 기어는 0.75kW D.C 모터를 사용하여 구동하였고, 1 단짜리 스퍼 기어에 대해 다른 쌍이 평행한 샤프트(Shaft)에 설치되어 있다. 구동기어는 24 개의 이(tooth), 종동 기어는 25 개의 이(tooth)을 가지고 있으며, 기어 결합에 대한 검출은 구동기어에서 이루어 졌다. 실험조건과 실험에 사용된 장비들과 구동 조건들은 Table 1 에서 확인할 수 있고, 기어의 재료에 대한 성질은 Table 2 에서 확인 가능하다. D.C 모터의 속력은 구동 샤프트에 연결된 속도 컨트롤러로 조절되었고, 전자 브레이크(max torque capacity 12Nm)를 사용함으로써 기어박스에 토크(torque)를 가하였다. 진동 신호는 Bruel & Kjaer 4506 삼 축 가속도계를 사용하여 측정하였다. 각 신호는 LMS SCADAS mobile 과 TestLab 으로 8.2kHz 로 샘플링하여 수집되었으며, 후 처리를 통해 분석에 사용되었다. 시간 도메인 신호는 진동 신호에서 노이즈(Noise)의 양이 충분히 감소될 수 있도록, 16 회에 걸쳐 평균값을 취하였으며 진동 신호는 구동 샤프트에 연결된 베어링 위치를 측정지점으로 선정하고 Z 방향의 가속도만을 고려하였다.

Table 에 나열 된 실험 조건을 바탕으로 한 피로



Fig. 2 View of the test rig showing sensors and equipment

실험이 약 1000 시간동안 진행되었다(27X10⁶ cycles). 초기 마모 진행을 위한 run-in wear 시간을 첫 30 시간 동안 가졌고, 그 후 기어 세척 과정을 거친 후 실험을 진행하였다. 기어 박스 내의 윤활유는 SAE40 을 사용하였고, 윤활유의 온도는 k-type 온도계(0~900°C)를 이용, 기어의 맞물림 영역(gear mesh zone)에서 30 분 간격으로 측정되었다. 각 온도에 상응하는 점도 값은 유막 두께를 계산하는데 사용되었으며 측정된 온도에 따라 계산하였다. 기어 표면의 마모 검사를 위해 기어 박스의 구동을 200 시간마다 중지하였으며, 이때 기어 이 측면 거칠기와 이의 두께를 측정하였다. 두께는 디지털 버니어 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

Table 1 Gear test rig specifications

Parameters	Pinion	Gear
Number of teeth	24	25
Deport angle	0.00	0.00
Pressure angle	20°	20°
Height	6.53	6.53
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	450rpm	
Normal load	44N	
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 X 10 ⁵ N/mm ²

중요한 요소이다. 토크가 주어진 상황에서의 피로 실험이 진행됨에 따라, 윤활유의 온도는 상승하게 되며 이러한 온도의 상승은 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 유막두께(λ)를 식 (2)를 통해 복합 표면 거칠기와 최소 유막 두께의 비로써 계산한 것을 매 200 시간을 구간으로 하여 25 시간 단위로 표현한 것을 Fig. 3(a)~(e)에 나타내었다. 구동 시간이 길어짐에 따라 기어 표면에서는 피로에 의한 마모, 윤활유 특성(산화(Oxidation), 질화(Nitration), 황산화(Sulphation) 등)으로 인한 마모들이 생성되었고, 이로 인한 기어 이(Tooth) 측면의 결합 표면 거칠기(R)값이 구동 시간이 길어짐에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(a)을 통해 0~200hrs 구간에선 유체 윤활(HL, $\lambda > 3$)임을 확인할 수 있다. 200 시간의 구동 후 현미경으로 관찰 된 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 전이되어 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, 앞서 생성된 점식(Pitting)이 성장하고 전이된 것을 확인할 수 있다(Fig. 4(c)). 탄성 유체 구간이 이어짐에 따라, 점식(Pitting) 이외에도 또 다른 형태의 마모인 스코어링(Scoring), 스커핑(Scuffing) 등이 발생하기 시작한다. 이러한 다른 형태의 마모의 증가로 인한 온도의 상승, 점도의 하강에 따라 유막 두께가 감소하게 되고, 유막이 줄어들에 따라 기어 표면의 거칠기에 영향을 미치게 된다. 또한, Fig. 3(c), Fig. 3(d)를 에서 보여지는 것처럼 400 ~ 600hrs, 600 ~ 800hrs 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 800 시간의 구동 이후 윤활 상태가 경계 구간에 들어가는 것을 확인할 수 있으며, 기어 표면에서 확인된 스코어링과 스커핑이 Fig. 5(c)와 (d)에 나타내었다. 스코어링 마모는 패치 형태를 가지며 기어의 디텐덤(Dedendum) 구간에서 발생하는 것을 확인할 수 있고, 또한, 스커핑이 발생함으

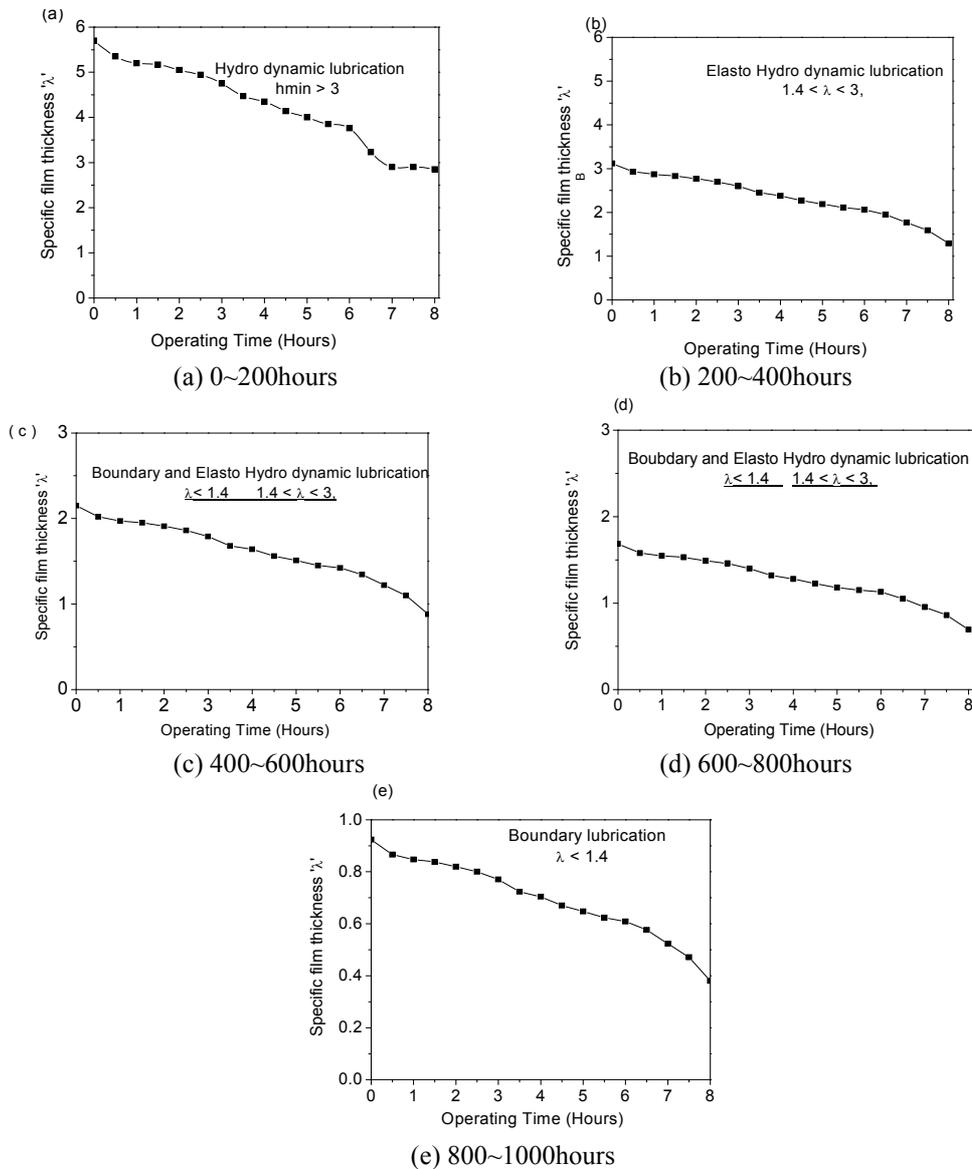


Fig. 3 Specific film thickness versus time (a) 0~200hrs, (b) 200~400hrs, (c) 400~600hrs, (d) 600~800hrs (e) 800~1000hrs

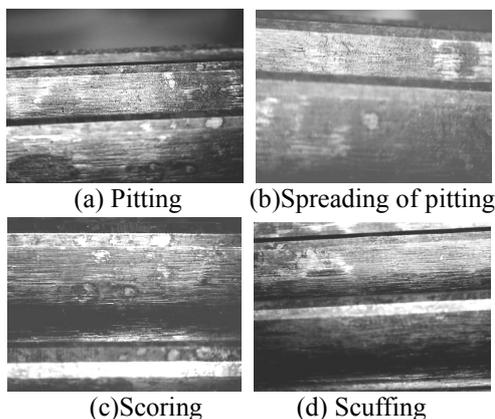


Fig. 4 Surface fatigue wear on the pinion teeth surface

로써 기어 이빨과 이빨 끝에서의 구름 또는 미끌림 현상들이 복합적으로 발생, 이빨 끝에서부터 이빨 뿌리까지 마모가 진행되게 만든다. 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 3 에 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.

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

4.3 음향 신호의 통계변수와 Stribeck curve 와의 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(RMS, Crest Factor)과 앞서 구해진 비 유막 두께를 Stribeck curve 를 통해 비교해 보았다. 각 구간 별로 측정 된 진동 신호를 통해 계산된 RMS 값들과 비 유막 두께를 비교한 것을 Fig. 5 에 도시해 놓았다. 앞서 Fig. 3 에서 확인하였듯이, 피로 실험이 진행됨에 따라 윤활 영역의 전이가 이루어지고, 그 전이에 상응한 마모들이 생성되고 성장한다. 마모로 인한 복합 표면 거칠기 (R) 는 증가하고 비 유막 두께는 식 (2)에 의해 감소한다. 윤활 영역이 유체 구간(EL, $\lambda \gg 3$)에서 탄성 유체 구간(EHL, $1.4 > \lambda > 3$), 경계 구간(BL, $1.4 \gg \lambda$)으로 접어들에 따라, 마모의 정도가 증가하고, RMS 값들이 증가하는 경향을 Fig. 5 에서 확인할 수 있다. λ 에 대해 표현된 RMS 값을 통해, 진동 신호로부터 계산된 RMS 값이 Fig. 1 에 나타나 있는 Stribeck Curve 와 상관도가 있음을 확인할 수 있다. 즉, Fig. 1 과 RMS 값을 활용한 분석으로부터 유체 윤활 구간(EL)에서는 마찰 계수인 μ 와 RMS 값이 같은 양상을 띄며 낮은 값을 가지고, 마찰 계수 μ 이 증가, λ 이 감소함에 따라 RMS 값들이 증가하는 것을 Fig. 5 를 통해 확인할 수 있다.

또한, 또 다른 통계적 변수인 Crest Factor 또한 λ 에 대해서 RMS 값들이 증가한 양상과 비슷하게 증가하는 것을 Fig. 6 에서 확인할 수 있다. 즉, 진동 신호로부터 구해진 이러한 통계적 변수들(RMS, Crest Factor)이 λ 값에 대해, Fig. 1 에 나타나 있는 Stribeck Curve 와 상관도가 존재하며, 통계적 변수를 통한 기어 시스템의 유지 및 작동 조건을 판별하는 변수로서의 사용 가능성을 확인할 수 있다.

추가로, 기존의 기어 결함 검출에 주로 사용되

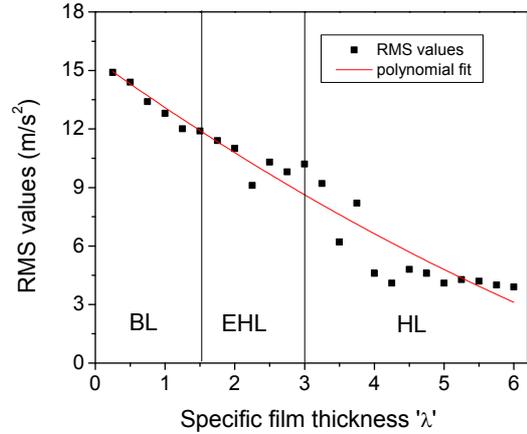


Fig. 5 RMS value of vibration signals versus λ

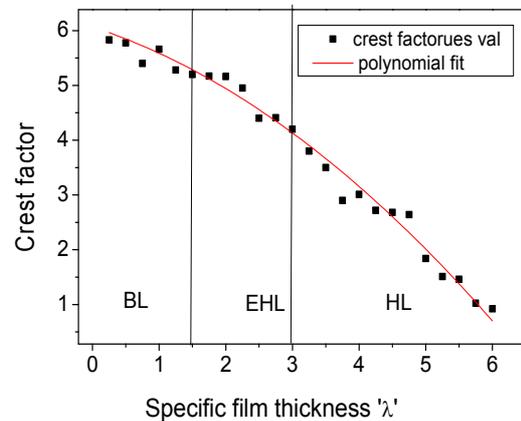


Fig. 6 Crest factor value of vibration signals versus λ

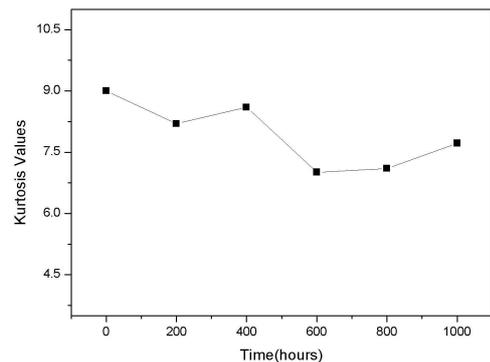


Fig.7 Kurtosis values of vibration signal versus time

는 Kurtosis Value 의 변화를 시간에 따라 Fig. 7 에 나타내었다. Figure 에서 확인할 수 있듯이, 시간에 대하여 균일하지 않은 양상을 보이며, 이는 윤활 영역에 대한 마모 정도를 판별하기에 Kurtosis Value 는 적합하지 않음을 확인 할 수 있다. 또한, 진동 스펙트럼은 기어가 맞물리는 과정에서 발생하는 동적 특성 및 마모가 진행되는 과정에 대한 포괄적인 정보를 포함하고 있는데, 이를 분석함으

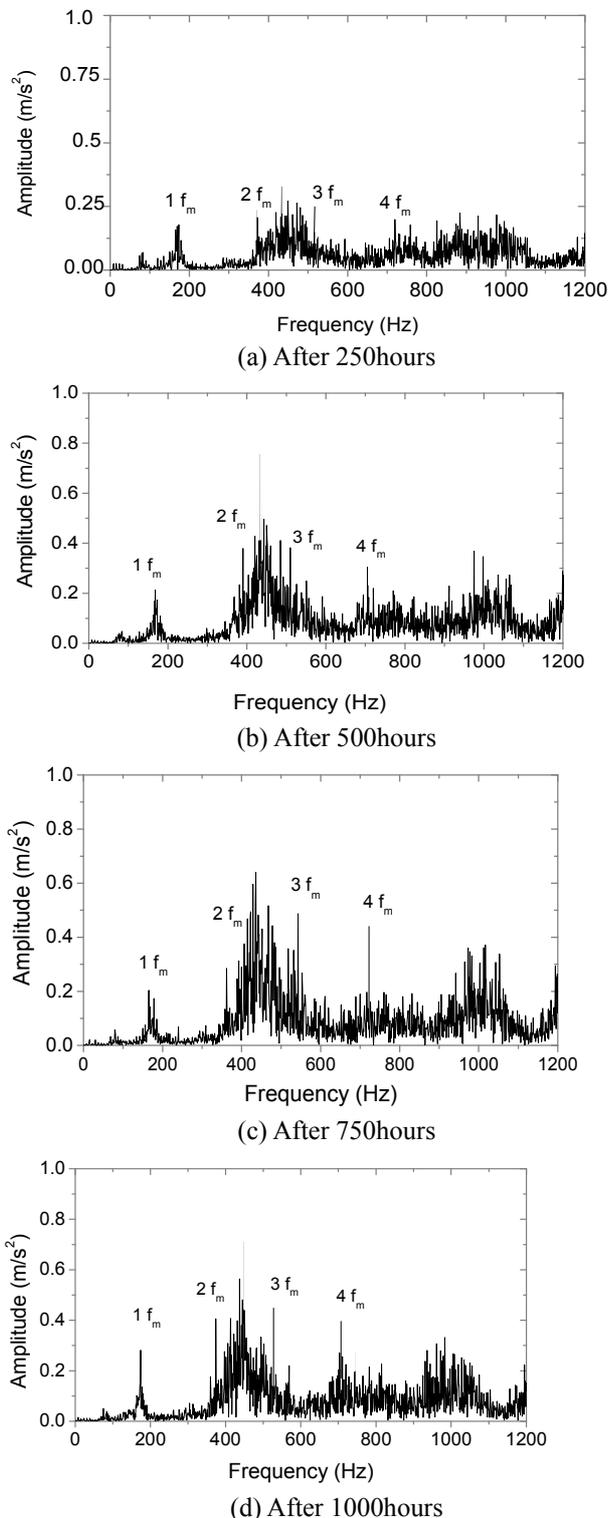


Fig. 8 FFT spectra of vibration signal

로써, 기어 이(tooth)에서 생성되는 마모의 정도 또는 위치를 파악할 수 있다. 본 연구에서 구동기어의 속력은 450rpm 으로서 180Hz 의 기본 맞물림 주파수(Fundamental Mesh Frequency)를 가진다. 이

기본 주파수($1 f_m$)와 그에 대한 하모닉스($2 f_m, 3 f_m, 4 f_m$)를 포함한 스펙트럼을 Fig. 8(a)~(d)에 묘사해 놓았다. 또한 실험에 사용된 기어박스의 구조공진 주파수는 450Hz 이다. 각 스펙트럼은 250 시간 단위로 가속도계를 통해 측정된 진동 데이터로부터 구하였다. (a)로부터, 첫 번째와 두 번째 기어 맞물림 주파수를 확인할 수 있으며, 후에 측정 시간이 증가하면서 기어 표면에 마모가 생기고 250 시간 이후 측정된 진동 신호 스펙트럼에서의 진폭변화가 (b)로부터 관찰된다. 시간이 지남에 따라 기어 맞물림 주파수와 그의 하모닉 주파수의 진폭이 증가하는 것을 확인할 수 있고, 400 시간이 지나면서부터, Fig. 4 에서 확인한 마모들이 전이되고 성장함으로써 기어박스에서 측정된 진동 레벨이 상승하는 것으로서 확인할 수 있다. 즉, 스펙트럼 분석을 통해, 기어 맞물림 주파수 및 하모닉 주파수들의 진폭 증가와 함께 늘어나는 측대파(Sideband)로부터 기어의 이상을 확인할 수 있다.

5. 결론

스퍼 기어 이(Tooth) 표면에서의 마모 전과와 그로 인한 진동 레벨의 변화에 대한 가설이 본 연구에서 조사되었다. 마모 형태, 유막의 두께, 비 유막 두께(Specific Film Thickness), 진동 신호로부터 구한 통계적 변수 분석을 통한 스퍼 기어 시스템에 대한 평가가 수행되었고, 다음과 같은 결과도출되었다.

(1) 1000 시간 이상의 장시간의 구동은 기어 표면에 피로 마모를 발생시키고 그에 따라, 비 유막 두께(Specific Film Thickness)를 감소 시킨다. 감소하는 비 유막 두께의 측정은 기어의 마모 정도를 예측하는 또 다른 방법이 될 수 있다.

(2) 통계적 변수, 즉 진동 신호로부터 계산된 RMS 와 파고율(Crest Factor) 값은 윤활 체계에서 전반적으로 증가 추세를 보이는 것이 관찰되었다.

(3) 윤활 영역을 나타내는 Stribeck Curve 가 본 연구에서 고려되었다. 진동 신호로부터 구해진 통계적 변수들이 비 유막 두께에 대해 Stribeck Curve 에서 마찰계수 값이 변화하는 양상과 비슷한 추이로 변화하는 것이 관찰되었으며, 이는 Stribeck Curve 와 통계적 변수들 사이의 상관관계를 확립 시켰다.

(4) 진동 신호의 FFT 분석에서 기어 맞물림 주파수와 그에 대한 하모닉 주파수들의 진폭 증가는 명확하게 기어 표면에서의 피로 마모 정도를 나타내었다.

후 기

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

참고문헌
(References)

- (1) Bartz, J. W., 1993, "*Lubrication of Gearing*," Mechanical Engineering Publication Ltd.
- (2) Castro, J. and Seabra, J., 1998, "Scuffing and Lubricant Film Breakdown in FZG Gears Part 2," New PV Scuffing Criteria, Lubricant and Temperature Dependent.
- (3) Glodez, S., Winter, H. and Stüwe, H. P., 1997, "A Fracture Mechanics Model for the Wear of Gear Flanks by Pitting," *Wear*, 208(1-2), pp. 177~183.
- (4) Nam, H., Kim, C.-H. and Kwon, S.-M., 2012, "Contact Fatigue Life for CRG System," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No.11, pp. 1391~1397.
- (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) Amarnath, M. and Praveen Krishna, I. R., 2012, "Empirical Mede Decomposition of Acoustic Signals for Diagnosis of Faults in Gears and Rolling Element Bearings," *IET Science Measurement and Technology*, Vol. 6, pp. 279~287.