

베어링 마모시험을 이용한 진동신호의 통계적 파라미터 특성연구

A Study on the Characteristics of the Parameters for the Statistical Analysis of Vibration Signal by Using Bearing Wear Test

전 오 성* 황 철 호* 윤 병 옥* 은 희 준*

(Oh Sung Jun, Cheol Ho Hwang, Byung Ok Yoon, Hee Joon Eun)

요 약

RMS, Kurtosis, Crest factor, Probability of exceedance와 Probability density function 등의 통계적 파라미터를 선정하여 베어링의 사용조건과 결함진전에 따른 변화특성을 조사하였다. 이를 위해 4볼 시험기에서 하중, 회전수 및 시간을 변화시키면서 실험하여 진동신호를 수집하고, 이를 A/D변환시키 후 디지털 필터링하여 주파수 대역별 통계적 파라미터 값을 계산하였다. 실험결과, 하중이나 회전수와 같은 운전조건이 변화하는 경우 RMS의 값은 운전조건 변화에 따라 변하지만 Kurtosis 등의 통계적 파라미터들은 운전조건과 무관하게 steady한 결과를 나타내었다. 또한 통계적 파라미터와 시간과의 상관관계에 대한 실험으로부터 통계적 파라미터들을 결함의 진전 상태를 나타내는 파라미터로 사용할 수 있음을 확인하였으며, 따라서 파손방지를 위한 예측지표로서 이들 통계적 파라미터를 이용할 수 있을 것으로 판단되었다.

ABSTRACT

This paper is concerned with the characteristics on the statistical parameters of vibration signal from bearing with changing its operating conditions as well as the spreading of faults. The rms, Kurtosis, crest factor, probability of exceedance and probability density function have been chosen as the statistical parameters. To characterize the behavior of each, vibration signals have been recorded from four ball tester at different loads, operating speeds and time. The values of the statistical parameters for each frequency band have been calculated after A/D conversion and digital filtering of the recorded signals.

It has been found that unlike rms values the statistical parameters such as Kurtosis etc. are almost

*한국표준연구소 음향연구실

unchanging with the change of the operating conditions such as load and speed. This suggests that the statistical parameters may be used for determining the development of faults independent of the operating conditions. In fact, the statistical parameters deviate considerably from their respective normal values when the faults developed under load conditions in the samples, conforming the suggestion.

I. 서 론

정상적인 베어링의 진동은 정규분포에 가까운 특성을 가지고 있다. 여기에 결함이 발생하면 정규분포를 갖는 신호를 배경으로 하여 충격성분의 신호가 발생하게 되는데, 이러한 진동신호는 회전부품의 결함에 관련된 정보를 제공하게 된다.

회전기계의 상태를 진단하기 위해 진동신호를 분석하는 방법으로는 rms 분석이나 주파수 분석을 많이 사용하여 왔으나, 응용에 제한이 따르기 때문에 베어링 결함탐지를 위한 여러가지 전문적인 신호처리 기술들이 소개되어 왔다^{(2)~(14)} 이 방법들은 대부분 S/N 비를 향상시켜 대상이 되는 구름 베어링에서 어느 요소(내륜, 외륜 또는 볼)에 결함이 있는가를 찾아내는데 초점을 맞추고 있다. Dyer와 Stewart⁽¹⁵⁾는 구름 베어링에서의 갑작스런 파손을 탐지하기 위해 통계적 분석기술을 도입하였고, White⁽¹⁶⁾는 4 차 모멘트에 대하여, 그리고 Volker와 Martin⁽¹⁷⁾도 진동신호의 통계적 접근 방법에 대해 특성을 연구하였다. Bannister⁽¹⁸⁾는 여러 가지 통계적 파라미터들을 소개하고 특성을 발표하였다.

진동신호의 상태진전은 크게 두 가지로 분류되는데, 하나는 진동신호의 주기적인 모니터링에 의한 경향분석(trend analysis)이고, 다른 하나는 베어링의 어느 요소에 결함이 있는가를 구체적으로 정밀하게 찾는 정밀분석기술이다. 그러나 실제 산업체에서의 기계 파손방지를 위해서는 결함을 갖는 베어링의 요소를 구체적으로 찾는 정밀 분석기술보다는 경향분석에 의존하는 경향을 취하고 있다. 경향 분석을 위해서 현재 산업체에서 사용하는 진동분석은 대부분 rms 값에 의존하고 있다.

본 연구에서는 통계적 파라미터가 경향분석을 위한 분석 파라미터로서 파손방지에 활용 가능한가를 조사하기 위하여, 운전조건과 결함의 진전 또는 마모의 진전에 따라 그 특성이 어떻게 변화되는가를 실험적으로 연구하고자 한다. 이 연구에서의 실험

은 재료의 마모특성을 연구하기 위해 제작한 4 볼 시험기에서 회전수와 하중을 변화시키면서 운전 조건을 변화시켰으며, 진동신호는 A/D변환기를 사용하여 이산 신호로 만들어 처리하였다.

II. 통계적 파라미터

II - 1. 확률밀도 함수

시간에 따라 변하는 시간신호의 진폭 $x(t)$ 가 x 와 $x+dx$ 사이의 구간에 존재할 확률은, 그 구간에 존재하는 신호의 시간합($\sum dt_i$)을 충분히 긴 전체 시간 간격 T 로 나누어 준 것과 같다. 확률 밀도를 $p(x)$ 라고 하면, 다음 식(1)과 같이 정의할 수 있으며 수학적으로는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Prob. } (x \leq x(t) \leq x+dx) = p(x) dx \quad (1)$$

$$p(x) = \lim_{dx \rightarrow 0} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{dx} \frac{\sum dt_i}{T} \quad (2)$$

여기서, 확률 Prob.는 A/D 변환된 N개의 이산 샘플로부터 구하는 경우, 그 구간에 속하는 샘플수 n 을 전체 샘플 갯수 N 으로 나누어주면 된다. 즉, 다음과 같다.

$$\text{Prob.} = n/N \quad (3)$$

II - 2. 모멘트

데이터의 특성을 표현하기 위해서는 여러가지 모멘트를 사용한다. 평균값 $E(x)$ 는 식(4)와 같이 $p(x)$ 에 대한 x 의 1차 모멘트로 나타내어진다.

$$E(x) = \bar{x} = \int_0^T x(t) dt/T = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x) dx \quad (4)$$

그리고 데이터의 산포된 정도를 나타내기 위해 분산을 사용하는데 $(x-\bar{x})$ 의 2차 모멘트가 그것이다.

$$\sigma^2 = \int_0^T \{x(t) - E(x)\}^2 p(x) dx \quad (5)$$

$$= E\{[x - E(x)]^2\}$$

수집된 N개 데이터의 특성을 알기 위해 통계적 모멘트를 계산한다면 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$1차\ 모멘트 = \sum_{i=1}^N x_i / N = \bar{x}$$

$$2차\ 모멘트 = \sum (x_i - \bar{x})^2 / N = \sigma^2$$

$$j차\ 모멘트 = \sum (x_i - \bar{x})^j / N$$

일반적으로 고차 모멘트 중에서 홀수차의 모멘트는 분포의 최고밀도가 중앙값으로부터 얼마나 떨어진 곳에 위치하는 지에 관한 정도를 나타내고, 짝수 계급수의 모멘트는 분포의 분산된 정도를 가리킨다. 많이 사용되는 skewness와 Kurtosis는 다음과 같은 형태의 고차 모멘트로 표시된다.

$$S = (1 / \sigma^3) \sum_{i=1}^N [(x_i - \bar{x})^3 / N]; \text{ skewness} \quad (6)$$

$$K = (1 / \sigma^4) \sum_{i=1}^N [(x_i - \bar{x})^4 / N]; \text{ Kurtosis} \quad (7)$$

skewness는 신호의 확률밀도 함수에서 피크 위치가 중심에서 얼마나 벗어나 있는지를 나타낸다. 이에 비해 4차 모멘트는 신호의 'spiky'한 정도를 나타내는데 이 값은 발생된 단성에너지 및 전달 경로에 따른 센서까지의 attenuation 특성 등에 의존하게 되는데 표준편차 σ 의 4 제곱으로 normalize시켜 줌으로써 제거할 수 있다.

II - 3. Crest factor

신호의 충격적 특성을 나타내는 또 다른 파라미터로서 특정신호의 최대치와 최소치의 차이가 그 신호의 실효치에 비해 얼마나 큰 지를 수치적으로 나타내는 crest factor가 있다. 이것은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Crest factor} = (\max\{x(t)\} - \min\{x(t)\}) /$$

$$|2 * \text{rms}\{x(t)\}|$$

III - 4. Probability of exceedance

신호가 impulsive해짐에 따라 확률밀도 함수의 형태는 정규분포인 경우에 비해 그 주변부의 값이 점점 커지는 방향으로 형태가 바뀌게 된다. 결함의 진전에 따라, 그 신호로부터 구한 표준편차 σ 의 몇 배, 예를 들면 2~3 배를 넘는 신호의 백분율을 구하여 충격적 특성의 정도를 측정하는데 사용한다. 여기서는 σ 의 3 배를 그 기준으로 하였다.

III. 실험

III - 1. 실험장치 및 실험 방법

앞 절에서 정의된 여러가지 통계적 파라미터와 결함과의 관계를 조사하기 위해 재료의 마모 특성을 시험하는 4 볼 시험기를 이용하였다. 이 시험기에서의 실험을 통하여 통계적 파라미터의 변화특성을 관찰하고자 한다. 이 시험기는 작동시 매우 정숙한 상태를 유지하므로 결함과 통계적 파라미터의 상관관계를 관찰하는데 유용하게 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

가. 4 볼 마모시험기

4 볼 마모시험기는 그림 1에서 보는 바와같이 세 개의 강구를 레이스(race)안에 넣고 그 위에 시험인도 다른 강구 하나를 올려 놓은 다음 하중을 가하고, 뒷 부분의 강구를 회전시킴으로써 마모특성을 시험하는 장치이다. 이 장치는 적용하중을 외부에서 변화시킬 수 있고 회전수도 제어가 가능하도록 설계된 것이다. 이 시험기는 강구의 비교평가나

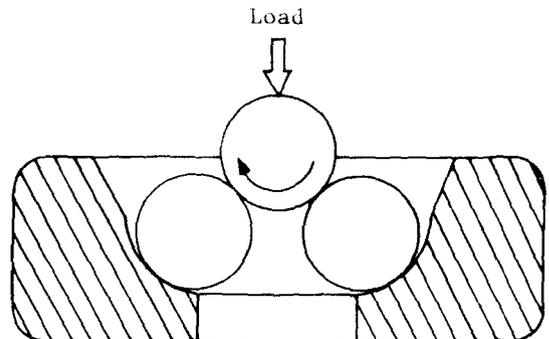


그림 1 Four ball rolling contact test

의 진동신호의 진단 기술 개발에 이용하고자 표준연구소에서 제작된 것이다.

나. 실험방법

실험에 사용한 장구는 직경 12.7mm(1/2")인 국산 베어링 붐로서 4 개가 한 조를 이룬다. 가속도계(B & K 4375)는 시험기의 시편을 싸고 있는 실린더 외벽에 상부로 부터 18mm되는 지점에 접촉적으로 고정시켰다. 측정된 신호는 전하증폭기(B & K 2635)를 사용하여 증폭(주파수 통과범위: 0.3Hz~linear)시킨 후 레코더(B & K 7004)에 기록하였으며 신호 분석기(B & K 2033)를 사용하여 실험상태를 모니터링하였다. 이 실험을 위한 측정장치의 연결상태를 그림 2에 나타내었다. 정상적으로 가공된 금속표면은 random profile을 갖게 되는데, 장구의 표면도 마찬가지인 것으로 판단된다. 따라서 장구와 장구가 접촉할 때 발생하는 신호는 정규분포를 갖는다고 볼 수 있으며, 실제로 가속도계를 통해 얻은 실험결과에 의하면 정규분포를 갖는 진

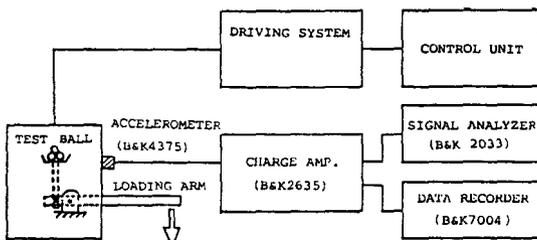


그림 2 Block diagram of experimental setup

동신호가 장구 표면으로부터 발생하는 것을 알 수 있다(1). 장구 표면에 결함이 발생되면 진동신호는 정규분포에서 벗어나게 되며, 시험 조건에 따라 마모 진전속도가 변한다. 이 연구에서는 통계적 파라미터가 베어링의 운전 조건 즉, 회전수, 외부하중 등과 마모 진전에 따라 어떤 특성을 가지고 변화하는가를 조사하고 응용 가능성을 연구하기 위한 것이므로 마모 시험기의 운전조건을 변화시키면서 실험을 하였다. 먼저 회전속도를 고정시키고 하중을 0, 196, 392, 588kg의 4 단계로 변화시키면서 실험하였으며, 하중을 고정시킨 상태에서는 회전수를 600 rpm에서 1800rpm까지 300rpm 간격으로 5 단계에 걸

쳐 실험하였다.

III - 2. 통계적 신호분석 알고리즘

가. A/D 변환

실험시 녹음된 진동신호는 12비트 A/D 변환기를 사용하여 디지털 데이터로 만들어 분석하였다. 샘플링 속도를 50kHz로 하여 주파수 분석이 20kHz 까지 가능하도록 하였으며, 샘플수는 32kword로서 0.64sec 동안의 신호를 수집하였다.

나. Filtering

결합의 진전상태에 따른 신호의 각 주파수 밴드별 특성을 조사하고자 측정신호를 band pass filtering하였다. 여기서는 Chebyshev window를 사용하고 65개의 길이를 갖는 finite impulse response filter를 사용하였다. 주파수 밴드로는 3 Hz~5 kHz, 5~10kHz, 10~15kHz, 15~20kHz를 선정하였다.

다. 통계적 파라미터 계산

통계적 파라미터의 값을 계산하기 위해 그림 3과

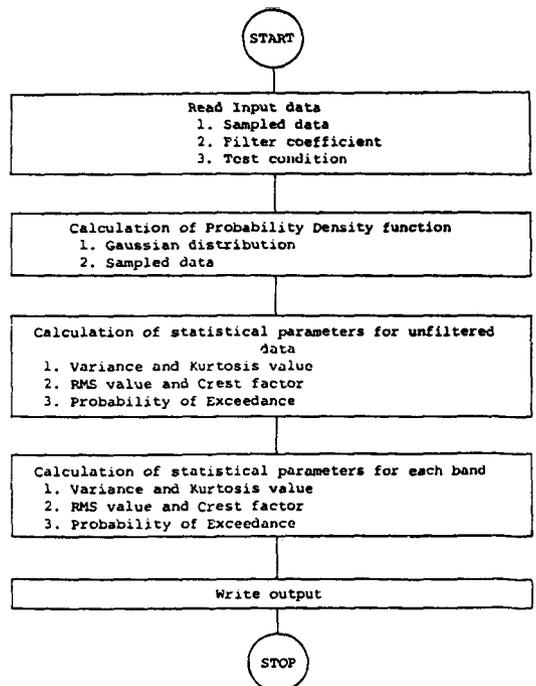


그림 3 Flow chart for calculation of statistical parameters

같은 순서로 프로그램을 작성하였다. 입력 신호의 전체적인 특성을 파악하기 위해 먼저 overall band 에 대한 파라미터 값을 구하였으며, 그 밴드에 대한 계산을 추가하였다. Kurtosis 값 계산시에는 분산 및 unbiased 분산을 구한 후 계산하였고, crest factor 들 계산하기 위하여 먼저 rms 값을 구하였다. Probability of exceedance 값은 3σ 를 기준으로 하여 이를 넘는 백분율을 그 값으로 정하였다.

IV. 결과 분석

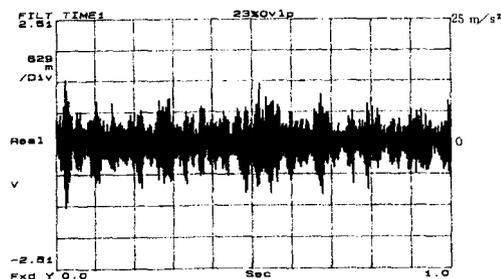
IV - 1. 마모 진전에 따른 통계적 파라미터의 변화

앞에서도 설명하였듯이 통계적 파라미터들은 진동신호의 충격특성과 밀접한 관계를 가진다. 정상적인 상태의 강구를 4 볼 시험기에 장치하여, 초기 상태에서부터 진동신호를 모니터링 하면서 상당한 수준의 마모가 진전되었다고 판단되는 상태까지 고의적으로 마모를 진전시키면서 실험하였다.

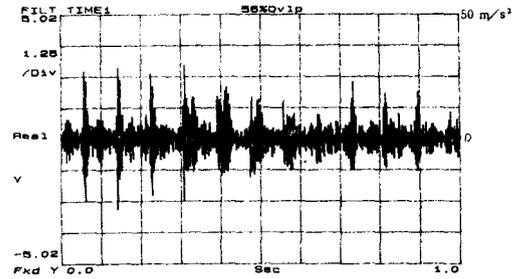
그림 4는 마모 진전에 따른 진동신호의 변화들

보여주기 위한 것이다. 588 kg의 하중을 가한 경우, 실험시간이 55분이 경과한 후의 시간-지속인 확률밀도 함수를 그림 5(a)와 (b)에 나타내었다. (a)는 정상 상태에서의 진동 신호의 확률밀도함수 (그림에서 * 표시)와 강구분포 곡선(0 표시)과 매우 근접함을 보여주고 있다. 반면에 55분이 경과한 후의 확률밀도 함수에서는 양 끝단에서 어긋남이 발생됨과 더불어 중앙에지는 함수가 좁고 높게 분포하는 특성을 나타내고 있다. 이것은 (a)와 비교하여 (c)의 시간신호에 충격적인 성분이 상당히 포함되어 있는 것을 통해 설명할 수 있다.

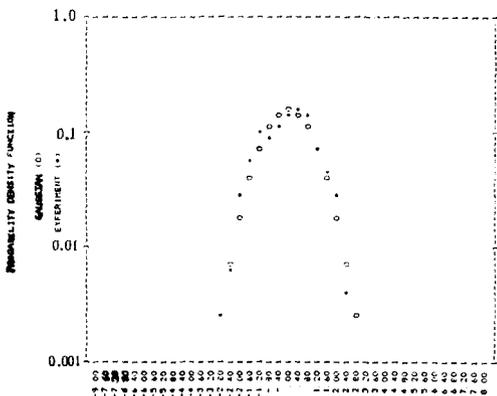
그림 5는 실험 시작 후 시간의 경과에 따라 통계적 파라미터 값의 변화를 주파수 구간별로 분석하여 나타낸 것이다. 밴드 1~4는 각각 3Hz~5 kHz, 5~10kHz, 10~15kHz, 15~20kHz를 나타낸다. (a)는 Kurtosis 값으로서 초기에 3부분의 값을 갖다가, 마모의 증가에 따라 그 값이 상승하여 55분 경과 후에는 overall 값이 5.9 정도의 값을 나타내고 있다. (b)는 crest factor로서 Kurtosis와 마



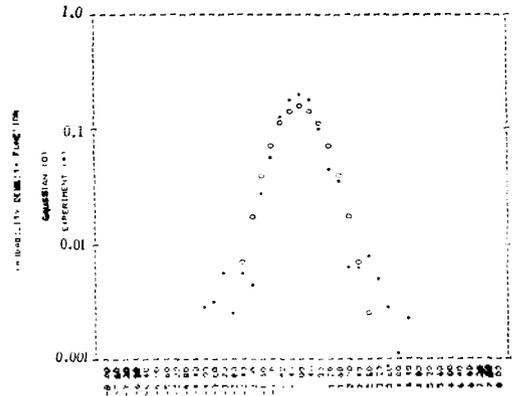
(a) Time signal



(c) Time signal

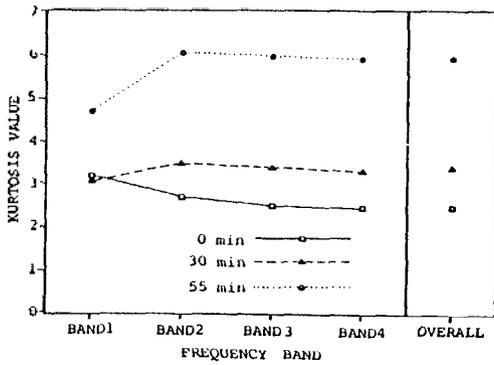


(b) Probability density function

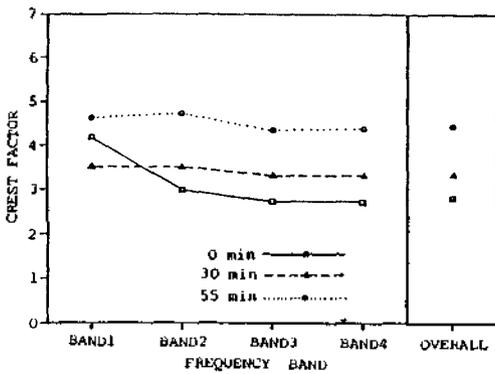


(d) Probability density function

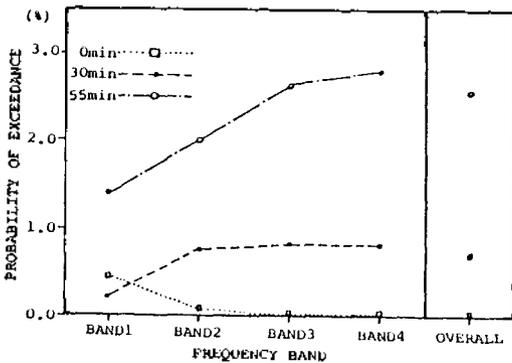
그림 4 Vibration characteristics of ball under normal condition (a), (b) and after 55 minites of experiment (c), (d)



(a) Kurtosis



(b) Crest factor



(c) Probability of exceedance

그림 5 Changes of statistical parameters according to damage increase

찬가지로 마모 진전에 따라 그 값이 상승하는 추세를 잘 보여주고 있다. (c)의 probability of exceedance는 진동신호가 자기 자신 신호의 3σ를 넘는 성분을 나타낸 것인데, 초기에는 거의 정규분포에 가깝기 때문에 0%에 가깝다가 마모증가와 함께 급격히 상승함을 나타내고 있다.

그림 6은 4 볼 시험기에서 충분히 마모를 발생시킨 후 해체된 강구를 보여주는데, 화살표 부분에서

마모 흔적인 track이 존재하는 것을 볼 수 있다. 이 그림의 4 개의 강구는 동시에 실험에 사용된 것들로서 각각 비슷한 형태의 흔적을 가지고 있다. 실험 중간단계에서의 강구의 마모상태 관찰은, 마모의 위치가 변경되는 경우에 계통성없는 진동신호가 발생되므로 곤란하다. 즉, 실험을 도중에 중단하였다가 계속하는 경우 마모가 발생되지 않았던 강구의 부분에 새로운 마모가 처음부터 다시 시작하게 되어 연속적인 마모가 이루어지지 않기 때문에 실험 중간단계에서의 강구 마모상태에 대한 관찰은

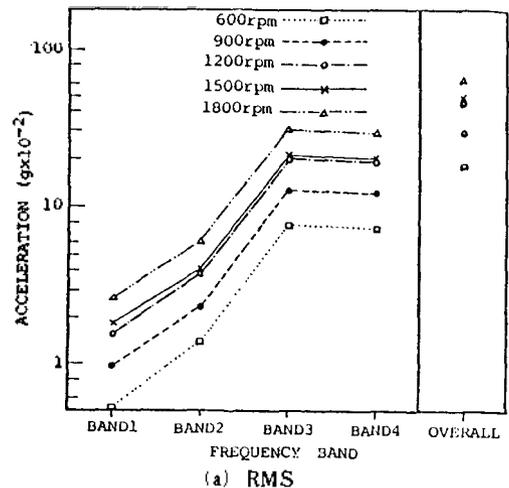


그림 6 Photo of balls after test

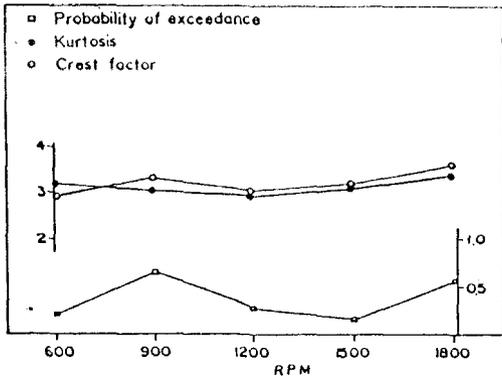
곤란하며, 따라서 실험이 끝난 후에 관찰을 할 수 밖에 없다.

IV - 2. 운전조건에 따른 통계적 파라미터의 변화가. 회전수에 따른 영향

시험기에서의 하중을 588 kg으로 일정하게 고정하고 회전수 변화에 따른 진동신호를 조사하였다. 회전수는 600rpm에서 1800rpm까지 300rpm 간격으로 실험하여, 통계적 파라미터의 계산결과를 그림 7에



(a) RMS



(b) parameters except rms

그림 7 Statistical parameters with varying speeds (under 588 kg).

나타내었다. (a)는 rpm의 증가에 따라 가속도의 rms 값이 급격히 상승함을 보여준다. 반면에 그림(b)에서 overall 값으로 나타낸 나머지 파라미터의 값은 회전수의 변화에도 불구하고 큰 변화물 보이지 않고 있음을 보여준다. 이는 통계적 분석을 위해 사용된 변수들이 동일 좌수로 normalize된 형태를 취하기 때문으로 판단된다. 그림에 회전수 증가에 따른 5 단계의 회전수에서 확률밀도함수를 구해본 결과, 거의 같은 함수분포를 보여줌을 확인하였다. 이들 결과로 회전수의 변화에 의해서는 이 연구에서 대상으로 삼은 통계적 파라미터의 변화에 크나큰 영향을 주지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

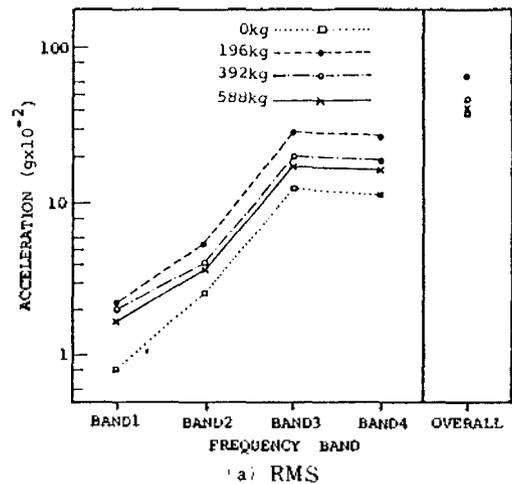
나. 하중변화에 따른 영향

회전수를 고정시키고 하중을 변화시키면서 파라미터의 영향을 조사하였다. 회전수는 1200rpm과 1500rpm으로 고정시키고 각각의 경우에 대하여 하중을 0, 196, 392, 588kg의 4 단계로 나누어 실험하였다.

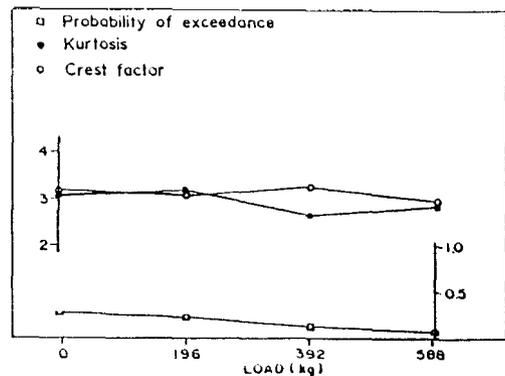
그림 8은 1500rpm에서 하중변화시의 통계적 파라미터의 변화를 보여준다. (a)는 가속도의 rms 값으로, 작은 하중이 작용하면 무부하의 경우보다 훨씬 큰 진동이 발생하며, 하중의 크기가 커지면서 강구의 운동범위가 제약을 받게 되어 점차 작은 진동 신호가 발생함을 보여준다. 반면 (b)에 나타낸 나머지 파라미터 값들은 하중의 변화가 파라미터에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 이러한 현상은 1200rpm에서 하중을 변화시킨 실험 결과에서도 거

의 동일하게 나타나고 있다. 이러한 결과는 회전수의 변화에 따른 실험에서와 마찬가지로, 동일 좌수로 normalize된 통계적 파라미터를 사용함에 따른 현상으로 분석된다.

하중을 일정하게 유지하면서 회전수를 변화시키거나 회전수를 고정시키고 하중을 변화시키는 실험을 통하여, rms를 제외한 통계적 파라미터들이 하중이나 회전수와 같은 운전조건에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다.



(a) RMS



(b) parameters except rms

그림 8 Statistical parameters with varying loads (under 1500 rpm)

V. 토 의

이상에서의 실험결과, 이 연구에서 도입한 통계적 파라미터들이 rms값을 제외하고는 운전조건에 큰 영향을 받지 않고 마모상태의 진전에 따라 계통

정일개 노 값이 증가하니, 컷을 파악할 수 있었다. 컷리 사용자는 기계들의 운전조건이 사용목적과 환경에 따라 변화될 수 있음을 고려할 때 이들 파라미터들이 rms보다 더욱 민감성이 있는 것들임을 알 수 있다. 이들 파라미터들이 동일차수로 normalize되었기 때문으로 판단된다.

분석에 사용되는 시간정보의 길어보나 큰 주기를 갖는 충격신호에 대하여 이 분석 방법을 사용하는 경우에는 샘플이 시작되는 위치에 따라 불규칙한 값이 나올 수 있으나, 이러한 특성을 고려하여 사용한다면 파손방지의 측면에서 기계상태의 경향분석에 훌륭한 통계적 파라미터로 활용할 수 있을 것으로 보여진다. 특히 마모시험기에서와 같이 결함이 연속적으로 발생하는 경우, 여기서 연구된 진동 신호의 통계적 파라미터들을 마모상태의 모니터용으로 사용한다면 윤활유 등의 분석에 의한 방법보다 더 좋은 효과를 기대할 수 있을 것이다.

본 연구는 과학 기술처의 특성연구과제 연구비중 일부로서 수행되었으며 이에 감사를 드리는 바이다.

1. 파손방지 측정기술 개발(제 1 차년도). 한국표준연구소KSRI-87-23-IR(1987).
2. R.F. Burchill, J.L. Frarey, D.S. Wilson, *New Machinery Health Diagnostic Techniques Using High-Frequency Vibration*, National Aerospace Eng'g and Manufacturing Meeting, LA, California, Oct. 16-18, 1973.
3. M.S. Darlow, R.H. Badgley, *Applications for Early Detection of Rolling Element Bearing Failures Using the High-Frequency Resonance Technique*, ASME 75-DET-46, 1975.
4. P.D. McFadden, J.D. Smith, *Model for the Vibration Produced by a Single Point Defect in a Rolling Element Bearing*, JSV, 96(10) '69-82, 1984.
5. D. Dyer, R.M. Stewart, *Detection of Rolling Element Bearing Damage by Statistical Vibration Analysis*, ASME, Trans. of Mech. Design, Vol.100, 229-235, 1978.
6. M.F. While, *Simulation and Analysis of Machinery Fault Signals*, JSV.93(1), 95-116, 1984.
7. E. Volker, J.R. Martin, *Early Detection of Damage in Rolling Bearings*, ISA Trans. Vol.23, No.3, 1984.
8. R.H. Bannister, and et al, *Condition Monitoring of Machinery and Plant*, Mechanical Eng'g Publication Ltd, London, 1985.

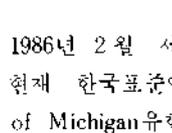
참 고 문 헌

▲전 오 성



1955년 8월 24일생
 1979년 2월 한양대학교 기계공학과 졸업
 1981년 2월 한국과학기술원 기계공학과 졸업
 현재 한국표준연구소 음향연구실 선임연구원

▲윤 병 옥



1982년 2월 서울대학교 기계설계학과 졸업
 1986년 2월 서울대대학원 기계설계학과 졸업
 현재 한국표준연구소 음향연구실 연구원 (Univ. of Michigan 유학 중)

▲황 철 호



1960년 10월 20일생
 1983년 2월 서울대학교 기계설계학과 졸업
 1985년 2월 서울대대학원 기계설계학과 졸업
 현재 한국표준연구소 음향연구실 연구원

▲은 희 준



1942년 5월 27일생
 1968년 2월 서울대학교 물리학과 졸업
 1974년 6월 Polytech Institute of New York 전기물리학 Ph.D.
 1974년 6월~1978년 12월 Polytech Institute of NewYork 연구원
 현재 한국표준연구소 표준 2부장