

다변량 통계 분석 방법을 이용한 회전기계 이상 온라인 감시

On-Line Condition Monitoring for Rotating Machinery Using Multivariate Statistical Analysis

0김홍목 · 임은섭*

Heung-Mook Kim and Eun-Seop Lim

ABSTRACT

A condition monitoring methodology for rotating machinery is proposed based on multivariate statistical analysis. The CMS usually are using the vibration signal amplitude such as acceleration RMS, peak and velocity RMS to detect machine faults but the information is not so enough that CMS cannot perform reliable monitoring. So new parameters are added such as shape factor, crest factor, kurtosis and skewness as time domain parameters and spectrum amplitude of rotating frequency, 2nd harmonics and gear mesh frequency etc. as frequency domain parameters. Many parameters are combined to represent the machine state using the Hotelling's T^2 statistic. The proposed methodology is tested in laboratory and the on-line experiment has shown that the proposed methodology offers a reliable monitoring for rotating machinery.

1. 서 론

각종 회전기계를 비롯한 기계 설비들은 생산능력의 극대화를 위해 고출력화, 고속경량화, 고성능화의 추세에 있다. 이에 따라 이들 설비에서 많은 진동문제가 발생하고 있고 전문가의 부족으로 인하여 고장감시 및 이상진단의 자동화에 대한 요구가 매우 높아지고 있다.

일반적으로 회전기계 및 중요 설비에 대한 예방정비 활동의 일환으로 설비의 상태를 상시 감시하는 CMS (Condition Monitoring System)를 설치하여 진동신호의 경향관리를 통한 이상감시를 수행하고 있다. 즉, 각종 회전설비의 중요위치에 진동가속도 센서를 설치하여 진동신호의 가속도 RMS, Peak 및 속도 RMS 를 지속적으로 감시하여 설비의 이상유무를 자동으로 판정하고 있다⁽¹⁾. 실제로 사용되는 설비 상태 신호에는 진동신호

뿐만 아니라 압력, 온도 등의 다른 설비상태 변수들을 사용하고 있으나 본 논문에서는 주로 사용되는 진동센서에 의한 설비 이상 감시를 다룬다.

상태 변수가 설정된 주위치 또는 경고치를 초과할 때 자동으로 경보를 나타내고 설비관리자가 주파수분석 등을 통해 설비에서의 이상원인을 확인하는 정밀진단을 수행하게 된다. 하지만 상태 감시를 위해 사용되는 상태 변수들이 진동신호의 크기 정보만을 이용하고 있기 때문에 진동신호로부터 얻을 수 있는 많은 정보를 잃게 되어 정밀한 설비 상태 감시가 이루어지지 않는 경우가 발생할 수 있다. 즉, 진동신호의 가속도 및 속도 RMS 의 경우 신호 크기의 평균적인 값을 취하는 RMS 자체 특성에 의해 설비의 이상에 의해 발생하는 작은 변화는 감시되지 않을 수 있으며, peak 값은 신호에 외부의 잡음이 더해질 경우 잘못된 값을 나타내어 신뢰성 있는 상태 감시가 어렵게 된다. 또한 설비의 이상유무를 판정하기 위하여 사전에 설정하는 진동신호 크기의 주의치

* 포항제철 기술연구소

및 경고치의 결정을 위해 많은 실험적인 노력을 필요로 하는 단점이 있다.

이에 본 연구에서는 설비의 상태 감시를 위한 상태 변수로 시간영역에서의 크기 정보를 다루는 RMS, Peak 뿐 아니라 파형 정보를 나타내는 파형을, 파고율 및 통계적 분포 특성을 나타내는 첨도, 왜도 등을 추가하고, 주파수영역에서는 회전 주파수 및 고조파 성분에서의 진동크기와 각종 결합 주파수에서의 진동크기를 상태 변수로 추가하여 설비의 상태를 감시하고자 하였다.

그러나 상태 변수의 수가 많아지게 되면 모든 변수들을 동시에 감시하기가 어려워지므로 다변량 통계 분석 방법을 적용하여 많은 상태 변수들의 특징을 잘 나타내는 새로운 통합된 상태 변수를 도출하여 설비의 상태를 감시하고자 하였다.

2. 본 문

본 연구에서 사용한 다양한 상태 변수들은 진동신호의 크기 정보에서 찾을 수 없는 많은 정보들을 제공해 주며, 다변량 통계 분석 방법 중 Hotelling's T^2 statistic 은 많은 상태 변수들을 통합하여 단일 변수로 나타냄으로써 단순화된 감시가 가능하도록 하는 방법이다.

2.1 설비 상태 변수

설비 상태 변수는 크게 시간영역 상태 변수와 주파수영역 상태 변수로 나눌 수 있다.

시간영역 상태 변수는 기존에 널리 사용되고 있는 진동 신호의 절대적인 크기 정보를 나타내는 진동 가속도 신호의 RMS 와 peak, 진동 속도 신호의 RMS 를 사용한다. 또한 진동 신호의 파형 정보를 나타내는 상태 변수로는 파형을 (Shape factor) 및 파고율 (Crest factor) ⁽¹⁾ 을 사용하며, 진동 신호의 통계적 분포 특성을 나타내는 상태 변수로는 왜도 (Skewness) 와 첨도 (Kurtosis) 를 사용한다 ⁽²⁾.

$$S = \frac{x_{rms}}{\bar{x}_{abs}} \quad (1)$$

$$C = \frac{x_p}{x_{rms}} \quad (2)$$

$$\beta_1 = \frac{1}{\sigma^3} \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{n-1} \quad (3)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{\sigma^4} \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{n-1} - 3 \quad (4)$$

여기서 x_{rms} 는 진동 신호의 제곱평균근(RMS), \bar{x}_{abs} 는 진동 신호의 절대치 평균값, x_p 는 진동

신호의 최대값, \bar{x} 는 평균값, σ 는 x 의 표본 표준편차를 나타낸다. 파형을 S 는 평균치에 대한 RMS 의 비로써 파형의 기울기 정도를 나타내고, 파고율 C 는 RMS 에 대한 최대치의 비로써 파두의 날카로운 정도를 나타낸다. 왜도 β_1 은 진동 신호 분포의 기울어진 방향과 정도 즉, 비대칭도를 나타내며, 첨도 β_2 는 진동 신호 분포의 뾰족한 정도를 정규분포에 대한 차이값으로 나타낸 것이다.

주파수영역 상태 변수는 회전주파수 성분의 진동크기, 2차 회전주파수 성분의 진동크기 및 회전기계 요소별 결합 특성 주파수를 사용한다 ⁽³⁾.

이상의 상태 변수들을 종합하면 Table 1 과 같다.

Table 1 Monitoring parameters

Parameter domain	Type	Parameter
Time	Amplitude	RMS(Acc.)
		PEAK(Acc.)
		RMS(Vel.)
	Waveform	Shape factor
		Crest factor
	Statistical moment	Skewness
Kurtosis		
Frequency	Power spectrum density	1X
		2X
		Gear mesh freq.
		Bearing fault freq.

2.2 Hotelling's T^2 statistic

정규분포를 가지는 단변량 문제에서 어떤 측정값이 정상인지 아닌지를 알 수 있는 기준은 일반적으로 평균 즉, 분포의 중심에서의 거리가 된다. 그리고 2 개 이상의 변수가 포함된 다변량 문제에서도 각 변수가 상호 독립적이라면 어떤 측정에 대해 각각의 측정값과 각각의 평균 사이의 거리가 그 최도가 될 수 있다. 하지만 변수들 사이에 상관관계가 존재하는 경우에는 전체 데이터의 상관관계를 고려한 기준이 필요하게 되는데 이때 사용할 수 있는 것이 Hotelling's T^2 statistic 이 된다 ⁽⁴⁾.

대부분의 진동 신호에서 계산된 상태 변수들은 정규분포를 가진다 설비가 정상상태에 있을 때에 n 번의 측정에 의한 상태 변수들은 각 측정에 대해 상호 독립적인 것으로 가정한다.

설비가 정상상태에 있을 때 p 개의 상태 변수에 대해 n 번의 측정 결과를 각각 X_1, X_2, \dots, X_n 이

라고 한다. 여기서 $\mathbf{X}_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}]^T$ 를 나타내는 것으로 p 개의 상태 변수들의 i 번째 측정 결과를 나타내는 것이므로 i 번째 상태 변수 벡터라고 한다. 또한 $\bar{\mathbf{X}}$ 를 n 개의 상태 변수 벡터들의 평균벡터라고 하고, 상태 변수 벡터들의 표본 공분산행렬 \mathbf{S} 는 다음과 같이 구해진다.

$$\mathbf{S} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\mathbf{X}_i - \bar{\mathbf{X}})(\mathbf{X}_i - \bar{\mathbf{X}})^T \quad (5)$$

다음으로 새롭게 측정된 상태 변수 벡터 \mathbf{X} 의 T^2 는 다음과 같이 정의되고,

$$T^2 = \frac{n}{n+1} (\mathbf{X} - \bar{\mathbf{X}})^T \mathbf{S}^{-1} (\mathbf{X} - \bar{\mathbf{X}}) \quad (6)$$

정상상태를 벗어나는 기준이 되는 상승 경계치(Upper Control Limit) 는 다음과 같이 설정된다.

$$UCL = \frac{(n-1)p}{(n-p)} F_{p, n-p}(\alpha) \quad (7)$$

여기서 $F_{p, n-p}(\alpha)$ 는 p 와 $n-p$ 의 자유도를 가지는 F 분포의 상위 $100\alpha\%$ 를 나타내는 값이다. 일반적으로 주의치 및 경고치를 위하여 α 는 0.05 또는 0.01 이 사용되고 구해진 T^2 는 시간 축에 대하여 상승 경계치와 함께 그려진다⁽⁵⁾.

따라서 T^2 차트를 이용한 회전기계 이상 감시는 설비가 정상상태 일 때의 설비 상태 변수들의 평균 벡터 $\bar{\mathbf{X}}$ 와 표본 공분산행렬 \mathbf{S} 를 구하고, 감시하고자 하는 설비가 운전중일 때의 상태 변수 벡터 \mathbf{X} 를 구하여 식 (6)에 의해 구해진 T^2 값을 상승 경계치와 비교함으로써 이상 여부를 판정할 수 있다.

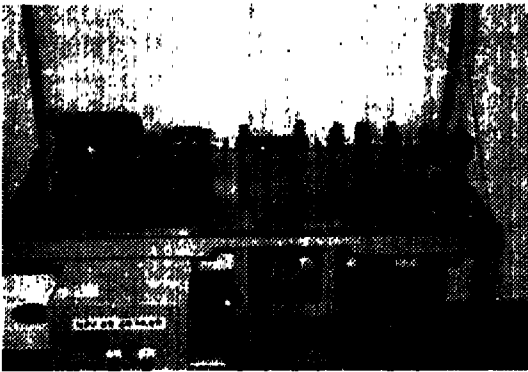


Fig. 1 Simple rotating machine for experiment

2.3 실험 및 검증

T^2 를 이용한 회전기계 이상 감시를 위하여 본 연구에서는 우선 간이 회전기계 장치를 제작하여 이에 적용해 보았다. Fig.1 은 실험에 사용된 간이 회전기계 장치를 나타낸 것으로 모터, 기어 및 디스크 등으로 구성되어 있으며 진동 신호 분

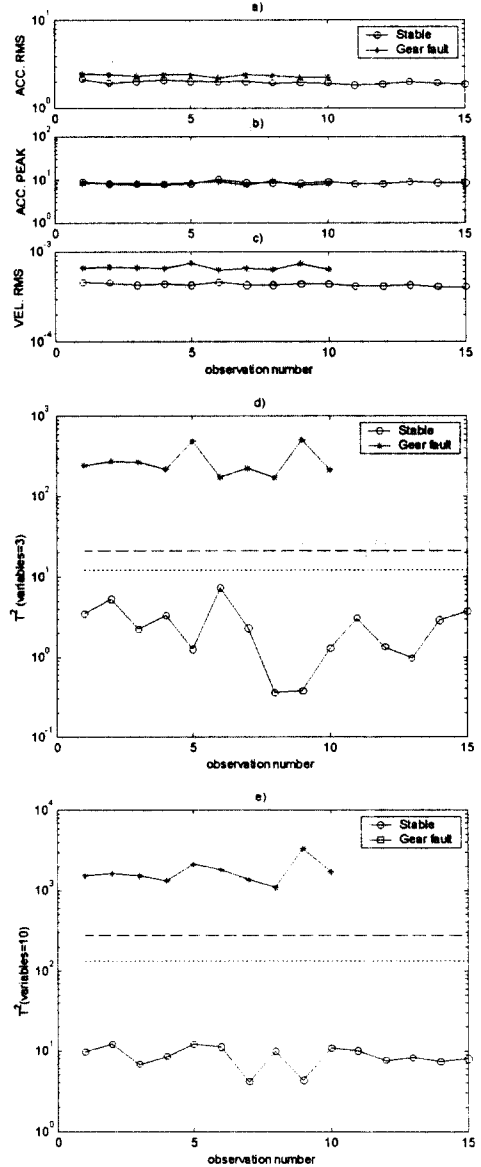


Fig. 2 Trend chart for gear fault (10Hz, V)
a) acceleration RMS, b) acceleration PEAK, c) velocity RMS, d) T^2 chart with 3 variables, e) T^2 chart with 10 variables

석장치로는 B&K 의 PULSE(Multi Analyzer Type 3560)을 사용하였다.

회전기계 장치에 축의 불평형, 축 어긋남, 헐거움 및 기어 치차 결함을 의도적으로 발생시켜 정상상태에 대한 비교 실험을 수행하였다.

우선 기계 장치가 정상상태에 있을 때 Table 1에 나타난 상태 변수들에 대하여 평균 벡터 및 공분산행렬을 구한 후, 정상상태, 축 불평형 상태, 축어긋남 상태, 헐거움 상태 및 기어 치차 결함 상태에 대하여 각각 T^2 값을 구하여 기존의

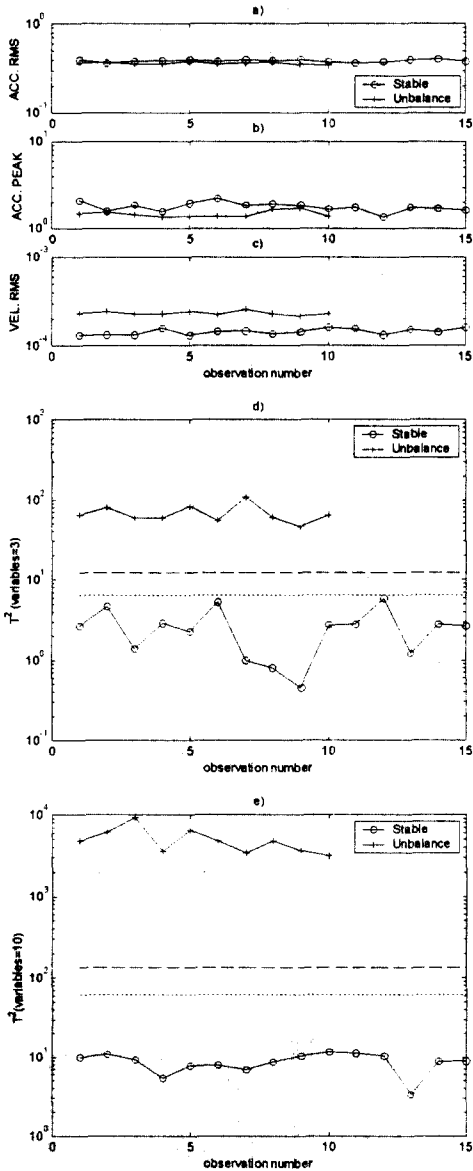


Fig. 3 Trend chart for unbalance(20Hz, H) a) acceleration RMS, b) acceleration PEAK, c) velocity RMS, d) T^2 chart with 3 variables, e) T^2 chart with 10 variables

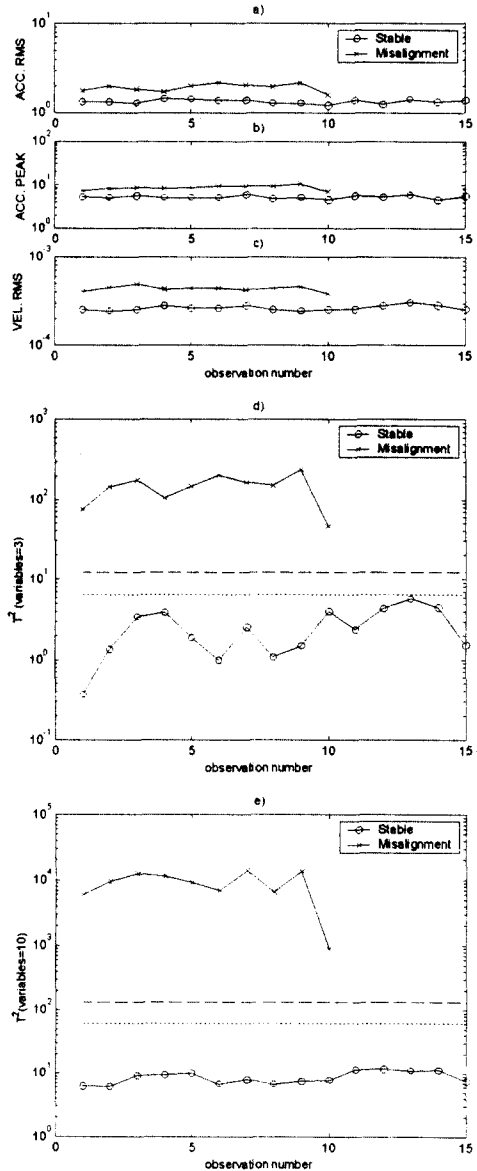


Fig. 4 Trend chart for misalignment(20Hz, H) a) acceleration RMS, b) acceleration PEAK, c) velocity RMS, d) T^2 chart with 3 variables, e) T^2 chart with 10 variables

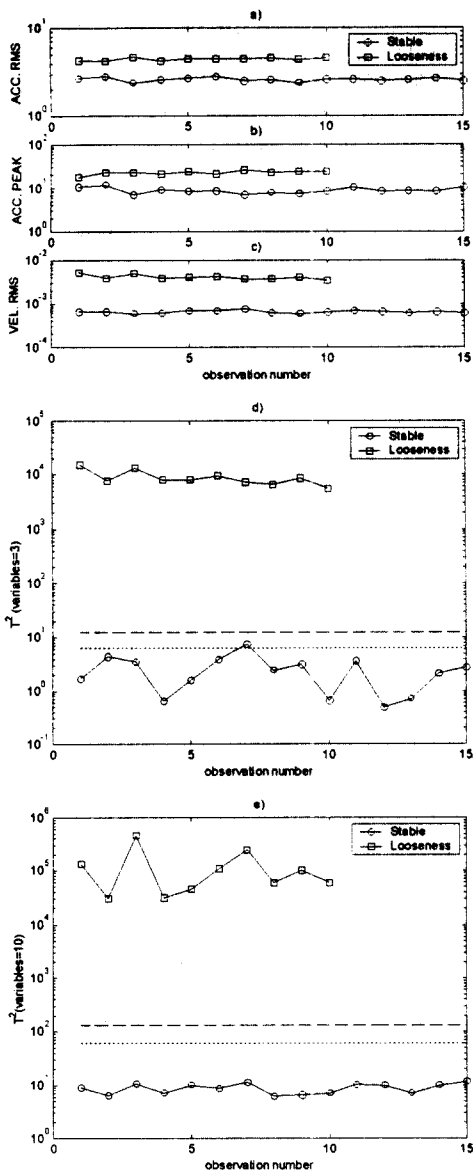


Fig. 5 Trend chart for looseness(25Hz, V) a) acceleration RMS, b) acceleration PEAK, c) velocity RMS, d) T^2 chart with 3 variables, e) T^2 chart with 10 variables

CMS 에서 사용하던 진동 신호의 크기만을 사용한 방법과 비교하였다.

Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 는 각각 기어 결합 상태, 축 불평형 상태, 축 어긋남 상태 및 헐거움 상태에서의 경향관리 차트를 나타낸 것으로 a), b) c) 는 각각 가속도 RMS, 가속도 PEAK

및 속도 RMS 를 나타내고, d) 는 a), b), c) 의 상태 변수들을 T^2 를 이용하여 나타낸 것이며, e) 는 Table 1 에 있는 10 개의 상태 변수에 대하여 계산한 T^2 값을 나타낸 것이다.

상기의 각 결합에 대한 경향관리 차트를 보면 기존의 시간영역에서의 진동 신호 크기를 이용한 경향관리에서는 결합의 종류에 따라 진동 절대치의 증가가 발생하는 부분이 있으나 그 증가 정도가 적고, 3 개의 기존 상태변수를 이용한 T^2 차트에서는 결합의 분리정도가 명확히 나타남을 알 수 있다.

또한 각 그림에서 Table 1 의 10 개의 상태변수를 사용한 T^2 차트를 보면 설비의 이상을 명확히 구분할 수 있을뿐 아니라, 3 개의 상태변수에 대한 T^2 에 비해 정상상태의 상태 정의가 안정화되어 있음을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터 본 연구에서는 제안된 T^2 statistic 을 이용한 회전설비 이상 감시 방법의 유효성을 검증하기 위하여 기존 CMS 에서 사용하고 있는 진동신호의 크기 정보에 기반한 상태변수들 즉, 진동 가속도 RSM, Peak 및 진동속도 RMS 를 이용한 T^2 차트를 실 공정에 적용하여 사용하였다.

Fig. 6 은 T^2 차트를 이용하여 실제 공정에서의 회전설비 이상 감시를 위한 시스템의 감시 화면을 보여 주는 것으로 현재 기존의 설비 상태 감시방법에 비해 향상된 이상 감시 능력을 나타내고 있다.

그러나 본 연구에서 사용된 T^2 차트를 이용한 이상 감시 방법은 설비가 단일 운전조건에서 작업중인 경우에 사용될 수 있으며 운전조건이 자주 달라지는 경우에는 정상상태의 기준이 달라지기 때문에 각 운전조건에 대한 정상상태에서의 설비의 진동 모델이 필요하게 된다.



Fig. 6 On-line monitoring chart

3. 결 론

본 연구에서는 기존의 진동신호의 절대치의 변화를 이용한 회전설비의 이상 감시 방법의 개선을 위하여 진동신호로부터 설비상태를 잘 나타낼 수 있는 다양한 상태변수를 도출하고, 다변량 통계 분석 방법의 하나인 T^2 statistic 을 이용하여 많은 상태변수로부터 통합된 상태변수를 도출하여 설비의 이상을 경향관리 할 수 있도록 하였다.

제안된 방법은 기존 CMS 에 비하여 설비의 다양한 이상에 대하여 신뢰성 있는 감시를 수행하였으나 운전조건의 변화에 대해서는 운전조건에 따른 설비의 진동 모델 설정이 필요하게 되고 제안된 방법의 결과만으로는 설비의 이상 원인 진단을 수행할 수는 없다는 단점이 있었다.

향후 실 공정에서 나타나는 다양한 운전조건에 따른 진동 특성을 수집 및 모델링하고 개발된 시스템을 지속적으로 개선 보완하여 보다 정확하고

신속한 실시간 감시 시스템 및 진단 시스템으로 개발할 계획이다.

참 고 문 헌

- (1) 牧 修市 著, 양보석 譯, 1999, "진동법에 의한 설비진단의 실제", 일오출판사
- (2) Robert V. Hogg and Allen T. Craig, 1978, "Introduction to Mathematical Statistics"(4th ed.), Macmillan Publishing.
- (3) Victor Wovk, 1991, "Machinery Vibration - Measurement and Analysis", McGraw-Hill, Inc.
- (4) Robert L. Mason and John C. Young, 1998, "Hotelling's T^2 : A Multivariate Statistic for Industrial Process Control", Annual Quality Congress Transactions, pp. 78-85
- (5) Richard A. Johnson and Dean W. Wichern, 1998, "Applied Multivariate Statistical Analysis"(4th ed.), Prentice-Hall