

마할라노비스 거리를 이용한 회전기기의 이상진단

박상길* · 박원식* · 정재은* · 이유엽** · 오재응†

(2008년 1월 30일 접수, 2008년 5월 21일 수정, 2008년 5월 23일 심사완료)

A Fault Diagnosis on the Rotating Machinery Using Mahalanobis Distance

Sang-Gil Park, Won-Sik Park, Jae-Eun Jung, You-Yub Lee and Jae-Eung Oh

Key Words : Statistical Method(통계적 기법), Fault Diagnosis(고장진단), Mahalanobis Distance (마할라노비스 거리)

Abstract

As higher reliability and accuracy on production facilities are required to detect incipient faults, a diagnostic system for predictive maintenance of the facility is highly recommended. In this paper, we present a study on the application of vibration signals to diagnose faults for a Rotating Machinery using the Mahalanobis Distance-Taguchi System. RMS, Crest Factor and Kurtosis that is known as the Statistical Methods and the spectrum analysis are used to diagnose faults as parameters of Mahalanobis distance.

1. 서론

현재 산업의 치열한 시장경쟁으로 인한 유지보수비용의 절감과 플랜트의 효율성 증대를 위해 이상진단의 연구에 대한 관심은 높아지고 있다. 특히 산업 발전과 더불어 회전기기가 더욱 고속화되고 정밀화 됨에 따라 경제적 손실 또한 더욱 증가하게 되었다. 이러한 회전기기의 이상을 모니터링하는 경우 구조물의 운전에 기인하여 발생하는 진동신호를 이용한 기법들이 종래부터 많이 사용되고 있으며, 일반적으로 이러한 기법들은 통계적인 방법과 신호처리법으로 구분할 수 있다. 통계적 방법은 RMS, Peak-Peak, Crest Factor, Kurtosis, PDF 등의 변화를 관측함으로써 이상발생 유무를 감지

하는 간이진단 역할을 하였다. 신호처리법으로는 스펙트럼, 캡스트럼, ANC, Filtering 등의 정밀진단법이 있다. 이러한 신호처리법의 주목적은 시스템의 이상상태와 정상상태를 적절히 진단하는데 있다. 이러한 기법들을 이용하여 시스템의 이상진단이 가능하다.^(1,5) 하지만 진단의 경우, 결과는 여러가지 진단의 항목이 종합적으로 하나의 결과를 나타낸다. 즉, 진단기법의 여러 항목들은 독립적 관계가 아닌, 서로 상관관계를 가지고 있게 된다. 따라서 보다 정확한 진단시스템의 구축을 위해서는 다변량 분석이 필요하다. 본 연구에서는 회전기기의 이상진단을 위해 통계적 방법과 신호처리법을 분석하여 Mahalanobis Distance 을 계산하고, 이를 이용하여 시스템의 정상 및 이상상태의 식별능력을 확인하는 것을 주요 내용으로 한다.

2. 이론

2.1 통계적 기법

회전기기로부터 얻은 시간데이터를 $x(n)$ 라 하면, RMS 값 x_{rms} 는

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : jeoh@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2294-8294 FAX : (02)2299-3153

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 호원대학교 자동차·기계공학부

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x(n)^2 dt} \quad (1)$$

RMS 변화를 관찰하면 결함이 진전하는 경우 RMS 값도 증가한다고 알려져 있다.

Peak 치와 RMS 값의 비를 Crest Factor 라 하며 이는 충격파형의 신호를 검출, 즉 초기결함을 감지할 수 있는 factor 로 알려져 있다.

$$Crest\ Factor = \frac{Crest\ value}{rms\ value} = \frac{\sup|x(n)|}{\sqrt{(1/N) \sum_{n=1}^N [x(n)]^2}} \quad (2)$$

Kurtosis value 는 4 차 모멘트와 2 차 모멘트의 비율로서, 이 값은 무차원화된 값이므로 입력 데이터의 절대량에 관계없이 상대적인 값으로 표시되므로 이상진단에 유효하게 사용되고 있다.

$$Kurtosis = \frac{M_4}{M_2^2} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2 \right]^2} \quad (3)$$

2.2 Mahalanobis Distance

마할라노비스 거리(Mahalanobis Distance)는 다차원의 단위공간으로서 마할라노비스 공간을 정의하고 임의의 대상이 그 공간으로부터 얼마나 떨어져 있는가를 거리로 나타낸 것이다.

예를들어, 인체의 건강에 적용하면 건강한 사람의 그룹을 만들어 건강한 사람에 대한 데이터를 수집한 후 여러 항목별로 측정 및 분석 후 건강한 사람에 대한 마할라노비스 거리를 계산한다. 여기서 여러 항목을 선택하는 것은 해당 분야 전문가의 역할이다. 일반적으로 모집단 내(정상)속하면 마할라노비스 거리는 보통 0~2 정도의 범위 안에 존재하며, 마할라노비스 공간에 속하지 않은 건강하지 못한 사람의 건강 정도는 마할라노비스 거리 크기에 비례하여 건강하지 않은 정도를 나타낸다.

정상그룹을 정의하고 마할라노비스 거리를 계산하는 과정은 Fig. 1 과 같다.

3. 실험 및 결과 고찰

Fig. 2 의 Rotor Kit 을 이용하여 Normal, Unbalance,



Fig. 1 Flow Chart of the Mahalanobis Taguchi System

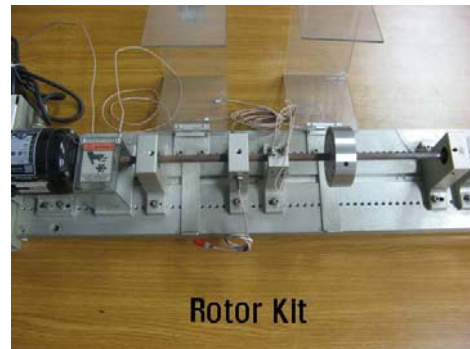


Fig. 2 Rotor Kit

Impulse 상태의 총 3 가지 실험을 하였다. 실험장치는 FFT Analyzer, 가속도계, Impact Hammer 로 구성되었으며, 가속도계는 Rotor Kit 의 베어링 부위에 설치하였다. 회전축의 속도는 1300rpm 으로 운전하였다.

3.1 정상그룹 및 특성인자 선정

회전체의 정상상태 진동을 측정하면 Fig. 3 과 같다. 정상상태의 신호를 5 회 측정하여 통계적 기법과 신호처리기법 중 회전체 신호 분석에 가능한 7 종류의 방법을 이용한 분석결과를 Table 1 에 나타내었다.⁽²⁾

정상상태의 마할라노비스 거리를 구하기 위하여, 정상상태의 분석결과를 표준화 시킨다. 표준화 시

Table 1 The result of the normal signal

	RMS	Peak to peak	Crest factor	Kurto-sis	Skew-ness	1 st peak	Over all level
S1	0.33	2.58	4	3.3	0.1509	0.01	0.11
S2	0.34	2.63	4.28	3.263	0.18	0.01	0.1
S3	0.384	3.107	4.58	3.544	0.32	0.01	0.11
S4	0.32	2.02	3.22	2.99	0.0132	0.01	0.1
S5	0.365	2.51	3.47	3.048	0.083	0.01	0.11

Table 2 Correlation matrix

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	1	0.814	0.532	0.578	0.708	0.576	0.619
C2	0.814	1	0.907	0.919	0.968	0.601	0.577
C3	0.532	0.907	1	0.955	0.962	0.667	0.26
C4	0.578	0.919	0.955	1	0.978	0.579	0.423
C5	0.708	0.968	0.962	0.978	1	0.689	0.419
C6	0.576	0.601	0.667	0.579	0.689	1	-0.21
C7	0.619	0.577	0.26	0.423	0.419	-0.21	1

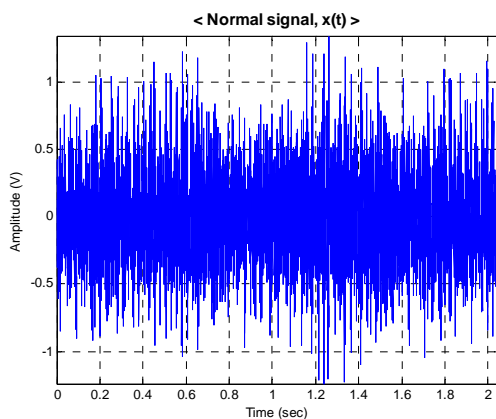


Fig. 3 Time data of normal state signals

킨 값들을 이용하여 총 7 가지의 변수들의 상관계수를 구하고, 상관행렬을 구성하면 Table 2 와 같다. 구해진 상관행렬을 이용하여 회전기기의 정

Table 3 Mahalanobis Distance of normal state

	S1	S2	S3	S4	S5
MD	0.683	0.674	0.677	0.684	0.689

Table 4 The result of the unbalancing signal

	RMS	Peak to peak	Crest factor	Kurto-sis	Skew-ness	1 st peak	Over all level
S1	0.392	2.69	3.72	2.75	0.13	0.05	0.13
S2	0.407	2.724	3.59	3.11	0.14	0.04	0.14
S3	0.389	2.89	3.73	3.125	0.013	0.04	0.13

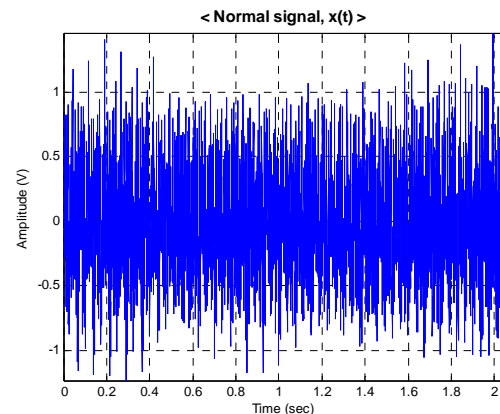


Fig. 4 Time data of unbalancing state signals

상상태 마할라노비스 거리를 구해보면, Table 3 과 같이 0.7 이하의 값들을 가지게 된다.

3.2 비정상 그룹의 선정 및 식별능력 확인(1)

두 번째 실험으로써, 로터에 불평형 질량을 추가하여 측정하였다. 불평형 질량은 4g 의 추를 부착하였으며, RMS Overall Level 그리고 1st Peak 가 정상상태에 비해 증가함을 알 수 있다. 분석결과는 Table 4 와 같이 정리하였다.

정상상태 신호의 분석결과를 이용하여 만든 상관행렬에 이상신호의 분석결과를 입력하여 불평형상태의 마할라노비스 거리를 구한 결과는 Table 5 와 같이 계산되었으며, 정상상태의 마할라노비스 거리와 비교하면 식별결과가 뚜렷함을 알 수 있다. 추후 불평형 질량에 따른 마할라노비스 거리값을 데이터베이스화한다면 정량적 평가가 가능할 것으로 사료된다.

Table 5 Mahalanobis Distance of unbalancing state

	Signal_1	Signal_2	Signal_3
MD	84.1	72.7	68.3

Table 7 Mahalanobis Distance of transient state

	Signal_1	Signal_2	Signal_3
MD	2834.23	1917.28	2636.74

Table 6 The result of the transient signal

	RMS	Peak to peak	Crest factor	Kurtosis	Skewness	1 st peak	Overall level
S1	0.74	26.15	18.76	74.38	0.06	0.01	0.33
S2	0.71	19.42	17.48	63.76	-2.46	0.01	0.3
S3	0.75	26.12	17.64	85.8	-1.71	0.01	0.44

Table 8 Comparisons of each technique

	RMS	Peak to peak	Crest factor	Kurtosis	Skewness	1 st peak	Overall level	MD
Normal	0.445	0.098	0.213	0.044	1	0.2	0.333	0.0002
Unbalance	0.53	0.102	0.198	0.036	0.861	1	0.393	0.029
Impulse	1	1	1	1	0.397	0.2	1	1

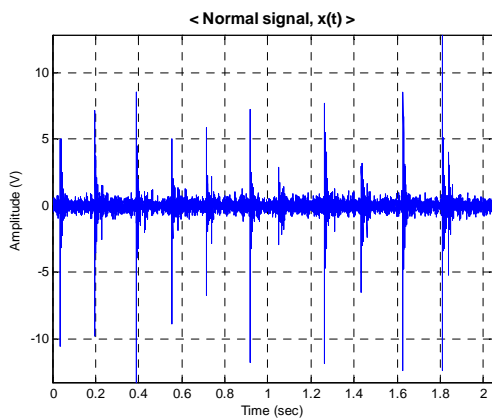


Fig. 5 Time data of transient state signals

3.3 비정상 그룹의 선정 및 식별능력 확인(2)

세 번째 실험으로, 이전의 정상상태에 Impact Hammer 로 가진을 하여 과도상태로 만들어 측정을 하였다. 이는 실제로 나타나는 현상은 아니지만, 베어링 결함을 모사하기 위한 충격파형으로 인해 통계적 분석 시 정상상태와 불평형 상태 대비 Crest Factor 가 큰 것을 확인 가능하다. 분석결과 Table 6 와 같이 정리하였다.

정상상태 신호의 분석결과를 이용하여 만든 상관행렬에 이상신호의 분석결과를 입력하여 과도상태의 마할라노비스 거리를 구한 결과는 다음과 같다. 정상, 불평형 그리고 과도 상태의 각 마할라노

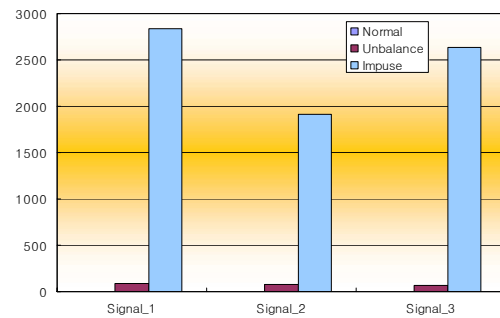


Fig. 6 Comparisons of each states

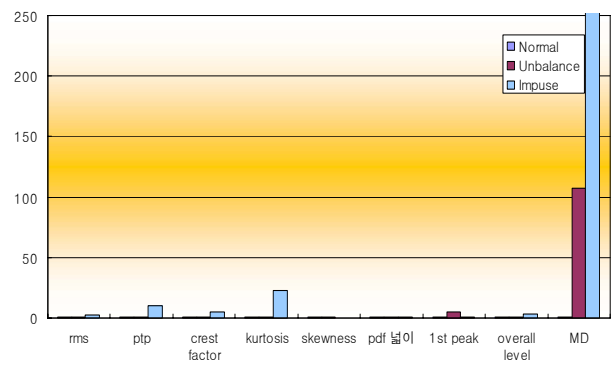


Fig. 7 Comparisons of each technique

비스 거리 값을 비교하여 Fig. 6 에 나타내었다. 각 상태에 따른 신호의 분석 결과 정상상태와 비교하였을 때 불평형 상태는 약 110 배, 충격파형 상태

는 약 3500 배로써 마할라노비스 거리를 통하여 확실한 분별력 확인이 가능하다.

3.4 각 분석기법과 MD의 성능비교

앞 절에서 마할라노비스 거리를 비교함으로써 정상, 불평형, 과도상태에 대한 식별이 가능함을 확인하였다. 이 절에서는 각 분석기법, 즉 각 통계적 기법들과 신호처리 기법들을 이용한 각 분석결과들과 마할라노비스 거리를 비교하였다. 그 결과는 Table 8 과 같고, Fig. 7 과 같이 나타내었다.

4. 결론

Rotor Kit 을 1300rpm 으로 운전하여 세가지의 실험을 측정하고 분석 비교함으로써, 통계적 분석과 신호처리의 결과를 이용하여 마할라노비스 거리의 각 상태의 식별능력을 확인하였다.

먼저 정상상태의 시스템을 분석하고, 통계적 분석과 신호처리의 결과를 이용하여 마할라노비스 거리를 구한 결과 0.67~0.68 의 값을 구하였다. 두 번째로서 불평형 질량의 시스템을 분석 결과 마할라노비스 거리는 68~84 의 값을 구하였다. 마지막으로 충격과형의 시스템을 분석하였을 때의 마할라노비스 거리 값은 2000~2800 의 결과를 나타내었다.

이번 연구에서 각각 다른 상태의 시스템을 각 분석

방법에 따른 결과와 마할라노비스 거리를 비교하였을 때, 어느 다른 한가지의 분석 결과보다 마할라노비스 거리를 이용하였을 때 시스템의 상태에 따른 월등한 식별력을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Shin, J., Lee, J. C., Oh, J. E. and Jang, K. Y., 1992, "Diagnosis of Bearing by High Frequency Resonance Technique," *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol.14, No.5, pp. 83~94.
- (2) Lee, C. H., Sim, H. J. and Oh, J. E., 2004 "Development of the Fault Diagnostic System on the Rotating Machinery Using Vibration Signal," *Transactions of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol.21, No.12, pp. 75~83.
- (3) Genichi Taguchi, Rajesh Jugulum, 2002, "The Mahalanobis-Taguchi Strategy : A Pattern, Technology System, John Willy & Sons.
- (4) Genichi Taguchi, Subir Chowdhury, YuiWu, 2000, *The Mahalanobis-Taguchi System*, John Willy & Sons.
- (5) Choi, C. S., Tae, S. J., Kim, H. M., Cho, K. N., Moon, J. M., Kim, J. Y. and Kwon, H. J., 2005, "Fuzzy Algorithm for FDD Technique Development of System Multi-Air Conditioner," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol.29, No.11, pp. 1220~1228.