

MTS 기법을 이용한 회전기기의 이상진단

A Fault Diagnosis on the Rotating Machinery Using MTS

박원식*·이해진*·이정윤**·김동섭***·오재응†

Key Words : Statistical Method(통계적 기법), Fault Diagnosis(고장진단)MTS (마할라노비스-다구찌 시스템)

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, it presents 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. 서 론

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 감지하는 간이진단 역할을 하였다. 신호처리기법으로는 스펙트럼, 캡스트럼, ANC, Filtering 등의 정밀진단법이 있다. 이러한 신호처리기법의 주목적은 시스템의 이상상태와 정상상태를 적절히 진단하는데 있다. 이러한 기법들을 이용하여 시스템의 이상진단이 가능하다. 하지만 진단의 경우, 결과는 여러 가지 진단의 항목이 종합적으로 하나의 결과를 나타낸다. 즉, 진단기법의 여러 항목들은 독립적 관계가 아닌, 서로 상관관계를 가지고 있게 된다. 따라서 보다 정확한 진단 시스템의 구축을 위해서는 다변량 분석이 필요하다. 본 연구에서는 회전기기의 이상진단을 위해 통계적 방법과 신호처리법을 분석하여

Mahalanobis Distance 을 계산하고, 많은 파라미터 중 관심대상이 되는 데이터를 분석하기 위하여 다구찌 기법을 이용하여 SN 비를 향상시키기 위한 모든 요소의 최적화를 시킨다. 이러한 방법을 통하여 시스템의 정상 및 이상상태의 식별능력을 확인하는 것을 주요 내용으로 한다.

2. Mahalanobis-Taguchi System

2.1 Mahalanobis Distance(MD)

마할라노비스 거리(Mahalanobis Distance)는 인도의 통계학자 마할라노비스에 의해 고안된 공간개념의 척도이다. 사람은 다양한 정보를 통하여 대상에 대한 패턴을 인식하고 있는 것으로 정의하였으며, 마찬가지로 개념으로 다차원의 단위공간으로서 마할라노비스 공간을 정의하고 임의의 대상이 그 공간으로부터 얼마나 떨어져있는가를 거리로 나타낸 것이다.

예를 들어, 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 분 0 야 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 의미한다. 마할라노비스 공간의 식은 다음과 같다.

$$D^2 = \frac{Z_1^2}{V(Z_1)} + \frac{Z_2^2}{V(Z_2)} = \frac{u_1^2 + u_2^2 - 2\rho u_1 u_2}{1 - \rho^2}$$

† 오재응 : 한양대학교 기계공학부

E-mail : jeoh@hanyang.ac.kr

Tel : (02) 2220-0452, Fax : (02) 2299-3153

* 한양대학교 기계공학과 대학원

** 경기대학교 기계시스템 디자인공학부

*** MK 전자 공정기술팀

$$(Z_1, Z_2: \text{변수 } Z_1 = \frac{u_2 + u_1}{\sqrt{2}}, Z_2 = \frac{u_2 - u_1}{\sqrt{2}}$$

$$u_1, u_2: \text{표준화변량 } u_1 = \frac{x_1 - \mu_1}{\rho_1}, u_2 = \frac{x_2 - \mu_2}{\rho_2}$$

x_1, x_2 : 변수, V : 분산, ρ : 상관계수)

2.2 MTS Methodology

MTS 는 진단과 같은 여러 특성들을 종합적으로 평가하여 하나의 결과로 표현하는 다변량 시스템을 이해하고 결론을 내리는데 유용한 결과를 얻을 수 있다. MTS 는 패턴을 인식하는 정보 시스템으로 디자인 하기 위하여 3 단계 Methodology 로 이루어져 있다.

첫째, 관심 대상이 되는 하나의 표준이 되는 하나의 그룹을 선정한다. 그리고 선별된 그룹으로부터 판단에 사용할 파라미터를 결정한다. 이 그룹으로 만들어진 다차원 공간이 마할라노비스 공간이 된다.

둘째, 마할라노비스 공간으로부터 정상그룹 및 비정상그룹의 데이터에 대한 마할라노비스 거리를 구하여 식별능력을 확인한다.

셋째, 정상 및 비정상 그룹에 대한 식별력 증진을 위하여 SN 비를 사용하여 마할라노비스 거리를 구하는데 영향력이 적은 항목들을 제거하여 정보의 모든 파라미터를 최적화 시킨다.

MTS 의 3 단계 Methodology 는 다음 그림과 같다.



Fig. 1 Flow chart of the MTS

3. 실험 및 결과 고찰

그림 2 의 Rotor Kit 을 이용하여 Normal, Unbalance 상태의 실험을 하였다. 실험장치는 Rotor kit, FFT Analyzer, 가속도계로 구성되었으며, 가속도계는 Rotor Kit 의 베어링 부위에 설치하였다. 0~11000rpm 상태에서 1000rpm 단위로 구분하여 데이터를 측정하였다.

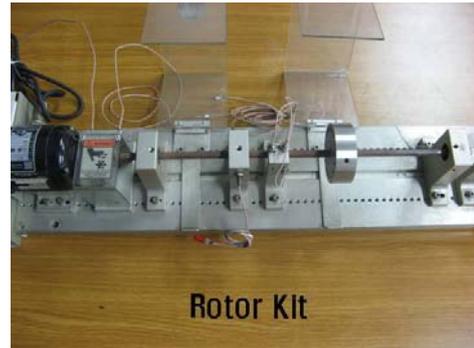


Fig. 2 Rotor Kit

3.1 정상그룹 선정 및 특성인자 선정

회전체의 정상상태 진동을 측정하여, 1000rpm 단위로 11 개의 데이터를 측정하였다. 분석기법으로는 진단기법으로서 대표적인 rms, peak to peak, crest factor, kurtosis, skewness, 1st peak, overall level을 이용하여 분석하였다. 이와 같은 통계적 기법과 신호처리기법을 이용한 분석 결과를 표.1 에 나타내었다.

Table 1 The result of the normal signals

	rms	Peak to peak	Crest factor	kurtosis	skewness	1 st peak	Overall level
Sig_1	0.195	2.182	5.609	5.292	0.063	0.000435	0.04421
Sig_2	0.2553	2.8572	5.594	5.0493	0.107	0.0026	0.0598
.
Sig_10	2.153	16.94	3.935	3.741	-0.043	0.871	4.116
Sig_11	2.642	18.76	3.551	3.505	-0.005	0.395	2.527

정상상태의 마할라노비스 거리를 구하기 위하여, 정상상태의 분석결과를 표준화 시킨다. 표준화 시킨 값들을 이용하여 총 7 가지의 변수들의 상관계수를 구하고, 상관행렬을 구성하면 표.2 와 같다.

Table 2 Correlation matrix

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	1	0.95	-0.23	0.21	0.56	-0.53	0.83
C2	0.95	1	0.02	0.45	0.74	-0.63	0.87

C3	-0.23	0.02	1	0.87	0.49	-0.26	0.09
C4	0.21	0.45	0.87	1	0.81	-0.56	0.51
C5	0.56	0.74	0.49	0.81	1	-0.77	0.82
C6	-0.53	-0.63	-0.26	-0.56	-0.77	1	-0.80
C7	0.83	0.87	0.09	0.51	0.82	-0.80	1

구해진 상관행렬을 이용하여 회전기기의 정상 상태 마할라노비스 거리를 구해보면, 표.3 과 같이 1.2 이하의 값들을 가지게 된다.

Table 3 Mahalanobis distance of Normal signals

	Sig_1	Sig_2	Sig_3	Sig_4	Sig_5	Sig_6	Sig_7	Sig_8	Sig_9	Sig_10	Sig_11
MD	1.10	1.264	0.89	1.091	1.130	0.916	0.473	1.11	0.656	0.969	1.047

3.2 비정상 그룹의 선정 및 식별능력 확인

두 번째 실험으로써, 모터에 불평형 질량을 추가하여 측정하였다. 첫 번째 실험과 마찬가지로 로터가 작동되는 0~11000rpm의 상태에서 1000rpm단위로 나누어 측정하였다. 불평형 질량에 의하여 RMS, Overall Level 그리고 1st Peak가 정상상태에 비해 증가함을 알 수 있다. 분석결과는 표. 4 와 같이 정리하였다.

Table 4 The result of the abnormal signals

	rms	ptp	crest factor	kurtosis	skewness	1st peak	overall level
Sig_1	0.20722	1.97414	4.76318	3.883	0.0447	0.00119	0.039
Sig_2	0.21153	2.02527	4.78714	4.08933	0.08666	0.00025	0.043
.
Sig_10	2.47426	19.113	3.86237	2.957	-0.1125	2.85387	6.18802
Sig_11	3.01811	24.5531	4.06763	3.16478	0.05	3.61007	6.54004

정상상태 신호의 분석결과를 이용하여 만든 상관행렬에 이상신호의 분석결과를 입력하여 불평형상태의 마할라노비스 거리를 구한 결과는 표.5 와 같다.

Table 5 Mahalanobis distance of abnormal signals

	Sig_1	Sig_2	Sig_3	Sig_4	Sig_5	Sig_6	Sig_7	Sig_8	Sig_9	Sig_10	Sig_11
MD	1.468	1.560	2.916	1.789	10	49.71	1.502	20.99	1.140	4.06	6.31

정상, 불평형 그리고 과도 상태의 각 마할라노비스 거리 값을 비교하여 그림 3 에 나타내었다. 각 상태에 따른 신호의 분석 결과 정상상태와 비교하였을 때 불평형 상태는 0~4000rpm 에서는 약 27~80% 큰 결과를 보였으며 특히 5000~9000rpm 구간에서는 정상상태와 확연히 구별되는 결과를 보임으로써 마할라노비스 거리를

통하여 확실한 분별력 확인이 가능하였다.

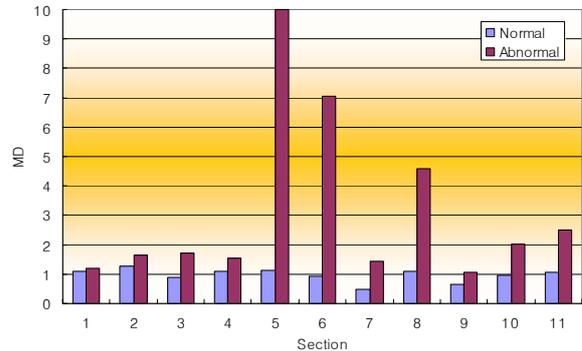


Fig. 3 Comparison between normal and abnormal

3.3 주요변수 선정 및 최적화

다구찌 박사는 마할라노비스 거리를 구하는데 너무 많은 측정 항목을 줄이기 위하여 측정항목이 결과에 미치는 영향 정도를 판단하는 기준이 S/N Ratio 를 활용하였다. 위의 다양한 기법들 중 영향력 있는 항목을 선정하기 위하여 표. 6 과 같이 실험계획법을 사용하여 S/N ratio 를 사용하였다.

Table 6 Simulation layout using array L12

Exp. No.	rms	ptp	crest factor	kurtosis	skewness	1st peak	overall level	Sig_3	Sig_6	Sig_7	Sig_9	Sig_10
1	1	1	1	1	1	1	1	0.792	0.839	0.223	0.430	0.939
2	1	1	1	1	1	2	2	1.208	1.187	0.265	0.286	0.956
.
11	2	2	1	2	1	1	1	0.529	1.244	0.254	0.325	1.093
12	2	2	1	1	2	2	1	1.326	0.834	0.144	0.284	0.434

실험방법으로는 L_{12} 를 사용하였으며, 1 은 특성치를 사용할 경우를 의미하고, 2 는 사용하지 않은 것을 의미한다. 정확한 S/N Ratio 계산을 위하여 잡음인자의 결과를 정상과 이상상태의 분별이 확실한 5 가지 rpm 의 경우를 선별하여 각 마할라노비스 거리를 구하였다. 결과는 그림 4 와 같다.

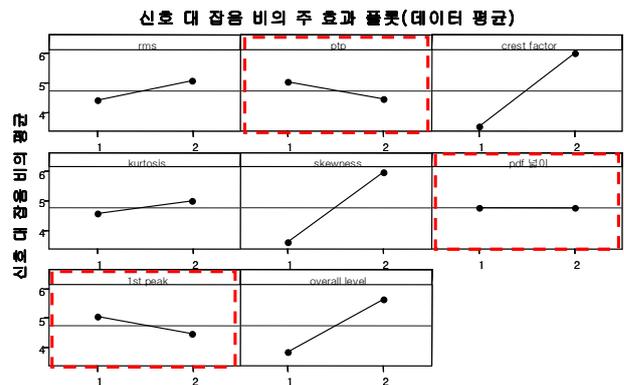


Fig. 4 The comparison analysis of the S/N ration's

main effects

Table 7 The analysis of the S/N ration's main effects

특성치	rms	ptp	crest factor	kurtosis	skewness	pdf 넓이	1st peak
1 (Used)	4.427	5.045	3.516	4.543	3.56	4.754	5.049
2 (Not Used)	5.085	4.468	5.997	4.97	5.953	4.759	4.464
delta	-0.658	0.576	-2.481	-0.427	-2.392	-0.006	0.585

실험계획법을 이용하여 각 특성치를 사용하였을 경우와 사용하지 않았을 경우를 비교하였다. Delta가 +인 결과(ptp, 1st peak)는 해당 특성치를 사용하였을 때, 긍정적인 효과를 미치는 것을 의미한다. 그러므로 진단 시, 식별력 증진을 위한 주요 변수임을 의미한다. 모든 특성치를 사용하였을 경우와 주요 변수 특성치만을 사용하였을 경우를 표 8에 비교하였다

Table 8 The comparison of MD before/after removal ineffective character values

분석대상	Mahalanobis Distance	
	모든 특성치 사용	특성치 제거
Sig_3	0.8903	0.5561
Sig_6	0.916	0.4001
Sig_7	0.47	0.3468
Sig_9	0.65	0.322
Sig_10	2.51	0.5801
Abnormal Sig_11	2.513	2.1883

모든 특성치를 사용하였을 경우와 주요변수 특성치만을 사용하였을 경우를 비교해보면, 마할라노비스 거리는 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 모든 특성치를 사용하지 않고 주요 변수 특성치만을 이용하여 마할라노비스 거리를 구하더라도 동일한 판단을 할 수 있다.

4. 결 론

Rotor Kit 을 0~11000rpm 으로 운전하여 정상상태와 불평형 실험을 측정하고 분석 비교함으로써, 여러 통계적 분석과 신호처리의 결과를 이용하여 마할라노비스 거리의 각 상태의 식별능력을 확인하고, S/N Ratio 를 이용하여 주요변수를 선정하여 효과적인 진단이 가능함을 확인하였다.

먼저 정상상태의 시스템을 분석하고, 통계적 분석과 신호처리의 결과를 이용하여 마할라노비스

거리를 구한 결과 0.6~1.2 의 값을 구하였다. 두 번째로서 불평형 질량의 시스템을 분석 결과 마할라노비스 거리는 1.4~49 의 값을 구하였다. 이번 연구에서 각각 다른 상태의 시스템을 각 분석방법에 따른 결과와 마할라노비스 거리를 비교함으로써, 정상과 이상상태의 식별능력을 확인하였다. 이와 같이 MTS 기법은 다변량 분석이 필요한 진단분야에서 효과적인 기법이 될 수 있다..

참고문헌

- (1) J.E. Oh, E.S. Jeon, 1989 “The Development of Conditioning monitor system for Bearing”, KSAE
- (2) C.H. Lee, H.J. Sim, J.E. Oh., December 2004 “Development of the Fault Diagnostic System on the Rotating Machinery Using Vibration Signal”, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol.21, No.12.
- (3) Genichi Taguchi, Rajesh Jugulum, 2002, “The Mahalanobis-Taguchi Stategy : A Pattern, Technology System, John Willy & Sons.
- (4) Genichi Taguchi, Subir Chowdhury, YuinWu, 2000, The Mahalanobis-Taguchi System, John Willy & Sons