

# 다변량 분석을 통한 회전기기의 이상진단 Fault Diagnosis on the Rotating Machinery using multivariate analysis

\*박원식<sup>1</sup>, 이해진<sup>1</sup>, 김동섭<sup>2</sup>, 오재응<sup>3</sup>

\*W. S. Park<sup>1</sup>, H.J. Lee<sup>1</sup>, D.S. Kim<sup>2</sup>, #J.E. Oh(jeoh@hanyang.ac.kr)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 대학원 기계공학과, <sup>2</sup>엠케이전자, <sup>3</sup>한양대학교 기계공학부

Key words : Fault Diagnosis, Rotating Machinery, Statistical Method, 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 모니터링 하는 경우 구조물의 운전이 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 진단시스템의 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. 이론

(1) 통계적 기법

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

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

RMS변화를 관찰하면 결함이 진전하는 경우 RMS 값도 증가한다고 알려져 있다.

Peak치와 RMS값의 비를 Crest Factor라 하며 이는 충격파형의 신호를 검출, 즉 초기결함을 감지할 수 있는 factor로 알려져 있다.

$$s_{ac} = \frac{s_a}{ms_a} = \frac{\sup|x(t)|}{\sqrt{(1/N) \sum_{i=1}^N [x(t)]^2}} \quad (2)$$

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.

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

## (2) Mahalanobis Distance

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.

$$D^2 = \frac{x_1^2}{\sigma_1^2} + \frac{x_2^2}{\sigma_2^2} - \frac{2\rho_{12}x_1x_2}{\sigma_1\sigma_2} \quad (4)$$

$$x_1, x_2 : \text{표준화변량} \quad x_1 = \frac{x_1 - \mu_1}{\sigma_1}, \quad x_2 = \frac{x_2 - \mu_2}{\sigma_2}$$

$x_1, x_2$  : 변수,  $\sigma_1, \sigma_2$  : 분산,  $\rho$  : 상관계수

## 3. 실험결과 및 고찰

그림 1의 Rotor Kit 을 이용하여 Normal, Unbalance, 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.

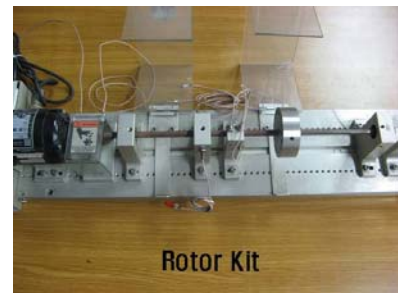


Fig. 1 Rotor kit

(1) 정상그룹 및 특성인자 선정  
회전체의 정상상태 진동을 측정하여, 통계적 기법과 신

호처리기법을 이용한 분석결과를 표.1에 나타내었다.

**Table 1** The result of the normal signal

	rms	Peak to peak	Crest factor	kurtosis	skewness	1 <sup>st</sup> peak	Overall level
S1	0.33	2.58	4	3.3	0.1509	0.01	0.11
:	:	:	:	:	:	:	:
S5	0.365	2.51	3.47	3.048	0.083	0.01	0.11

정상상태의 마할라노비스 거리를 구하기 위하여, 정상상태의 분석결과를 표준화 시킨다. 표준화 시킨 값들을 이용하여 총 7가지의 변수들의 상관계수를 구하고, 상관행렬을 구성한다. 구해진 상관행렬을 이용하여 회전기기의 정상상태 마할라노비스 거리를 구해보면, 표.2와 같이 0.7 이하의 값을 가지게 된다.

**Table 2** Mahalanobis Distance of normal state

	S1	S2	S3	S4	S5
MD	0.683	0.674	0.677	0.684	0.689

(2) 비정상 그룹과 식별력 확인(I)

두 번째 실험으로써, 로터에 불평형 질량을 추가하여 측정하였다. 불평형 질량에 의하여 RMS Overall Level 그리고 1<sup>st</sup> Peak가 정상상태에 비해 증가함을 알 수 있다. 분석결과는 표.3와 같이 정리하였다.

**Table 3** The result of the unbalancing signal

	rms	Peak to peak	Crest factor	kurtosis	skewness	1 <sup>st</sup> peak	Overall 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

정상상태 신호의 분석결과를 이용하여 만든 상관행렬에 이상신호의 분석결과를 입력하여 불평형상태의 마할라노비스 거리를 구한 결과는 다음과 같다.

**Table 4** Mahalanobis Distance of unbalancing state

	Signal_1	Signal_2	Signal_3
MD	84.1	72.7	68.3

(3) 비정상 그룹과 식별력 확인(II)

세 번째 실험으로, 이전의 정상상태에 Impact Hammer로 가진을 하여 과도상태로 만들어 측정을 하였다. 충격과형으로 인해 통계적 분석시 정상상태와 불평형상태 대비 Crest Factor가 큰 것을 확인 가능하다. 분석결과는 표.5와 같이 정리하였다.

**Table 5** The result of the transient signal

	rms	Peak to peak	Crest factor	kurtosis	skewness	1 <sup>st</sup> 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
----	------	-------	-------	------	-------	------	------

정상상태 신호의 분석결과를 이용하여 만든 상관행렬에 이상신호의 분석결과를 입력하여 과도상태의 마할라노비스 거리를 구한 결과는 다음과 같다.

**Table 6** Mahalanobis Distance of transient state

	Signal_1	Signal_2	Signal_3
MD	2834.23	1917.28	2636.74

정상, 불평형 그리고 과도 상태의 각 마할라노비스 거리 값을 비교하여 그림에 나타내었다. 각 상태에 따른 신호의 분석 결과 정상상태와 비교하였을 때 불평형 상태는 약 110 배, 충격과형 상태는 약 3500 배로써 마할라노비스 거리를 통하여 확실한 분별력 확인이 가능하다.

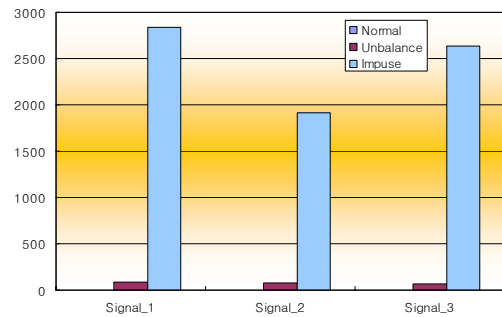


Fig. 2 Comparisons of each state

4. 결론

Rotor Kit을 1300rpm으로 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 0.67~0.68의 값을 구하였다. 두 번째로서 불평형 질량의 시스템을 분석 결과 마할라노비스 거리는 68~84의 값을 구하였다. 마지막으로 충격과형의 시스템을 분석하였을 때의 마할라노비스 거리 값은 2000~2800의 결과를 나타내었다.

이번 연구에서 각각 다른 상태의 시스템을 각 분석방법에 따른 결과와 마할라노비스 거리를 비교하였을 때, 어느 다른 한가지의 분석 결과보다 마할라노비스 거리를 이용하였을 때 시스템의 상태에 따른 월등한 식별력을 확인하였다.

참고문헌

1. J.E. Oh, E.S. Jeon, 1989 "The Development of Conditioning monitor system for Bearing", KSAE
2. Genichi Taguchi, Rajesh Jugulum, 2002, "The Mahalanobis-Taguchi Strategy : A Pattern, Technology System, John Willy & Sons.
3. Genichi Taguchi, Subir Chowdhury, YuiWu, 2000, The Mahalanobis-Taguchi System, John Willy & Sons.