

기계시스템 파손에 따른 상태진단 파라미터의 상관관계 해석에 관한 연구

장래혁[†] · 강기홍 · 공호성[‡] · 최동훈*

한국과학기술연구원 트라이블로지연구센터, *한양대학교 기계공학부

A Study on the Correlation of Condition Monitoring Parameters of Functional Machine Failures.

Rae-Hyuk Chang[†], Ki-Hong Kang, Hosung Kong[‡] and Dong-Hoon Choi*

Tribology Research Center, KIST,

*School of Mechanical Engineering, Hanyang University

Abstract – Integrated condition monitoring is required to monitor effectively the machine conditions since machine failures could not be monitored accurately by any single measurement parameter. Application of various condition monitoring techniques is therefore preferred in many cases in order to diagnosis the machine condition. However it inevitably requires lots of maintenance cost and sometimes it could be proved to over-maintenance unnecessarily. This could happen especially when one measurement parameter closely correlates to another. Therefore correlation analysis of various monitoring parameters has to be performed to improve the reliability of diagnosis. In this work, Pearson correlation coefficient was used to analyze the correlation between condition monitoring parameters of an over-loaded machine system where the vibration, wear and temperature were monitored simultaneously. The result showed that Pearson correlation coefficient could be regarded as a good measure for evaluating the availability of condition monitoring technology.

Key words – correlation, fault diagnosis, condition monitoring.

1. 서 론

산업이 발전하고 기술이 발달함에 따라 제품 생산의 중요성 만큼이나 각종 시스템에 대한 유지, 보수 및 진단에 관한 인식이 높아져 가고 있으며 이미 커다란 경제적인 영역을 형성하고 있다[1]. 상태진단기술(condition monitoring technology)이란, 기계시스템의 예기치 않은 고장 또는 부품파손으로 인한 작동불능으로 발생하는 막대한 경제적, 인적 손실을 줄이기 위해 기계시스템의 운전상태를 지속적으로 또는 정기적으로 감시하며 이상발생현상을 사전에 검지하여 예방, 조치하는 기술을 말하며, 온도, 압력 등의 물리량 측정에서부터 진

동, 소음 측정과 마멸에 의한 재료손실검지에 이르기까지 매우 다양하다[2-3].

그러나, 이러한 여러 진단기술 중 어느 하나의 측정 결과만으로는 기계시스템의 이상발생 여부 및 파손상태 정도를 정확하게 진단 및 예측하기에는 많은 어려움이 따르기 때문에, 최근에는 보다 효과적인 진단을 위해서 서로의 장단점을 보완할 수 있는 진동 및 마멸측정을 중심으로 한 통합상태진단기술 적용의 필요성이 높아져 가고 있으며 더불어 이에 따른 진단알고리즘에 관한 연구가 이루어지고 있다[5-6].

실제 기계시스템의 진단시 입력값으로 사용되는 진단파라미터들은 측정값의 다양성 및 비선형성, 불확실성 등의 문제를 가지고 있어 이의 해결을 위해 인공지능(AI)을 비롯한 신경회로망, 퍼지이론, 패턴인식, 확률적 접근 등의 기법 등이 적용되고 있으며, 진단파라미

[†]주저자 : rhchang@kist.re.kr

[‡]책임저자 : hkong@kist.re.kr

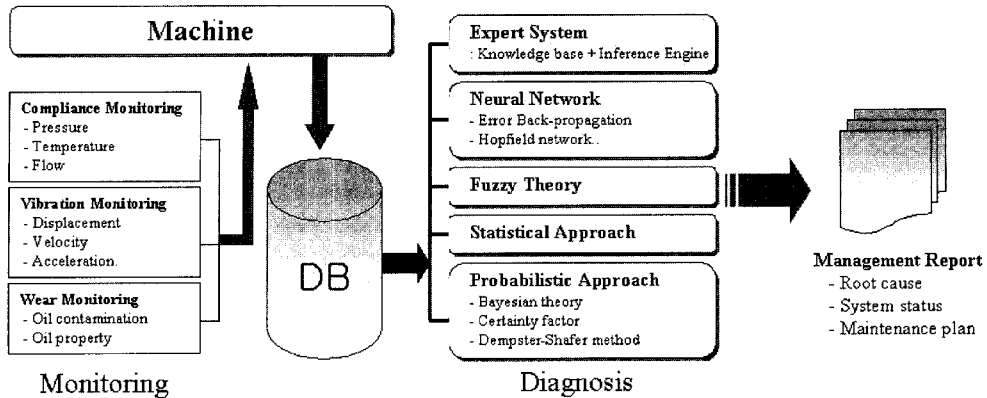


Fig. 1. Integrated condition monitoring & diagnosis.

터들은 대부분 동일한 속성과 범위를 갖는 하나의 진단기술에 따른 독립변수로써 사용된다[7-10].

그러나, Fig. 1에 나타난 여러 상태진단기술을 바탕으로 한 진단알고리즘의 경우 기계시스템 파손현상에 따라 특정 진단파라미터의 종속성이 나타나므로 개별 진단파라미터의 독립성을 유지하기가 어렵다. 서로 상관관계를 갖는 독립변수들로 인하여 어느 한 독립변수가 종속변수의 결과에 미치는 정도가 동일하지 않기 때문에, 독립변수들간의 상관관계의 해석 없이 종속변수의 결과를 유추하기에는 오차를 내재한 진단결과를 얻을 수 밖에 없다. 따라서, 통합상태진단시 다양한 기계시스템 파손에 따른 진단파라미터들 사이의 상관관계 해석의 필요성이 제기되었다.

본 논문에서는 연속적인 두 변수간 선형결합의 정도를 수치적으로 나타내는 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient) 평가를 바탕으로 진단파라미터 사이의 상관관계 해석을 수행하였으며, 실제 기계시스템 파손실험 결과와 비교, 연구함으로써 향후 보다 나은 통합상태진단 알고리즘 구현 가능성을 검토해 보았다.

2. 피어슨 상관계수

서로 다른 두 변수 사이의 상호관련성 정도를 평가, 수치화 하는 통계적 방법으로는 Kendall, Spearman, Pearson 상관계수가 있다. Kendall 상관계수의 경우 동률을 고려하는 보통변수나 순위변수에 대한 비모수 측도에 사용되며, Spearman 계수는 데이터의 서열순위를 표현하고자 할 때 사용된다[4]. 따라서, 본 연구에서는 연속 데이터에 적용되며 두 변수간 선형적 결합정도를

표현하는 피어슨 상관계수를 사용하였다.

피어슨 상관계수 r 은 두 변수 X 와 Y 사이에 상호관계를 밝히는 통계치 중 하나인 식(1)의 공분산(covariance)을 식(2)에서와 같이 각 표준편차로 나눈 표준화된 공분산 값으로 부호는 공분산값의 부호에 따라 결정되며, 그 범위는 -1에서 1 사이가 된다.

$$cov(X, Y) = \sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \tag{1}$$

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum(Y_i - \bar{Y})^2}} \tag{2}$$

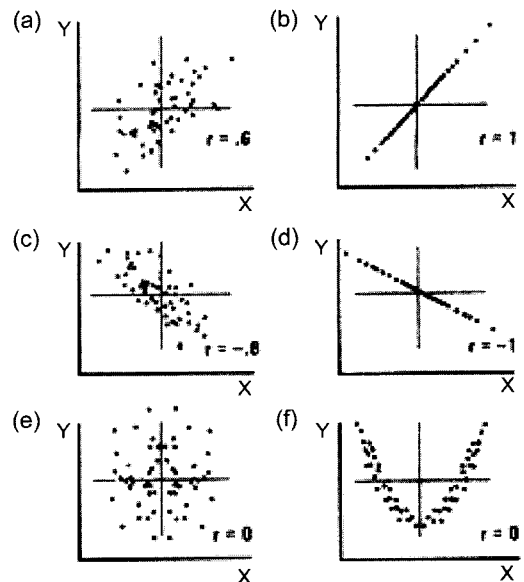


Fig. 2. Correlation diagram.

상관계수는 Fig. 2에 나타난 두 변수의 변량 사이의 관계를 나타낸 상관도(correlation diagram)로 대략적인 파악이 가능한데, 높은 상관관계를 갖는 -1이나 1에 가까울수록 음과 양의 직선을 이루며 반대로 선형관계가 매우 미약한 0에 가까울수록 무작위형태나 이차곡선의 형태로 나타난다.

3. 실험장치 및 실험방법

3-1. 실험장치

Fig. 3은 본 연구에 사용된 실험장치의 구성도를 보여준다. 이 장치는 회전기에서 발생하는 진동 특성 뿐 아니라 기계장치 내의 윤활유의 오염도를 정량적으로 온라인 측정함으로써 기계요소별 마모와 진동 사이의 유기적 관계를 파악하고, 시스템의 건전성 유무 및

파손 진행의 상태 진단을 수행할 수 있도록 제작되었다[11].

다양한 기계파손 실험에 따른 통합상태진단을 위해 기계요소별로 마모, 진동, 온도 센서를 설치하고 측정하였다. 마모는 기계요소 부위를 순환하는 오일 내의 총 오염도량을 측정하며[12], 진동값은 벤틀리-네바다사의 비접촉 변위센서를 사용하여 X, Y 방향의 변위값 및 동특성을 분석하며 각 베어링에 설치된 열전대(thermocouple)를 통하여 온도가 측정된다. 데이터 수신시 경우 진동, 온도신호는 A/D board를 통하여 USB 포트로 전달되며, 마모신호는 자체애플을 거쳐 시리얼 포트로 PC로 전송된다. 수신된 모든 측정값은 실시간으로 데이터베이스화되어 관리된다.

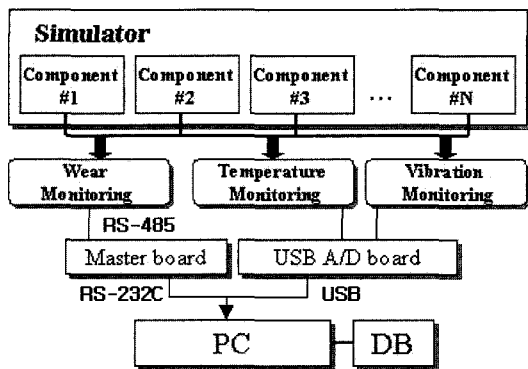


Fig. 3. Schematic view of simulator.

Table 1. Specification of simulator

Integrated Condition Monitoring System	
· Main Component	
- Motor(7.5 kW), Oil Reservoir	
- Gear Unit: gear ratio 1:1, helical gear	
- Journal Bearing: brass 1/d=1	
- Loading Device: load cell, pneumatic	
· Lubrication	
- Oil Viscosity: 46 cSt @ 40°C (ISO VG46)	
- Oil Reservoir: about 2 L	
· Sensor	
- Gear: OMD, accelerometer, thermocouple	
- Bearing & Seal	
: OMD, gap sensor(X,Y), thermocouple	

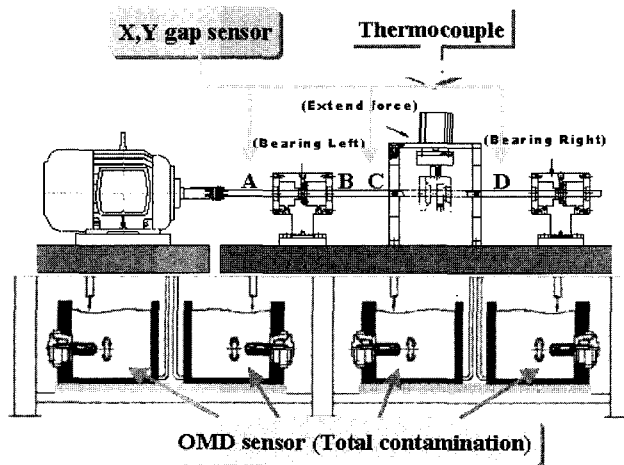
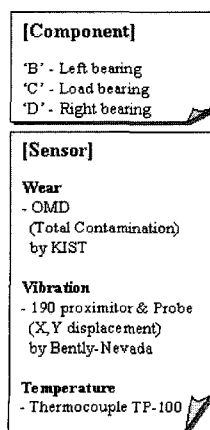


Fig. 4. Schematic view of overload test.

3-2. 실험방법

상기 실험장치를 토대로 과부하시험에 따른 기계요소파손 실험을 수행하였으며, 시스템 구성은 Fig. 4에서 보듯이 모터와 커플링 연결축, 양단베어링과 하중을 받는 베어링으로 구성되었다. 신속한 베어링파손을 유도하기 위해 접촉하는 부위의 축에 널링(knurling) 처리를 하였으며, 공압실린더를 이용하여 정하중 5 kgf, 10 kgf를 일정시간 경과시 부과한 후 그 변화를 측정하였다[13]. 진단을 위한 센서측정은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 각 기계요소의 A, B, C, D에서 X, Y 변위값과 세 베어링요소의 온도값 그리고 각 요소에서 발생하는 오일 내 오염도량 등 총 14개의 마모, 진동, 온도 진단파라미터에 대한 데이터를 통합적으로 측정하였다.

4. 실험결과 및 상관관계 분석

4-1. 실험결과와 피어슨 상관계수 비교

초기 가동 후 5 kgf의 하중부과시 소량의 마모량(D1)의 증가와 Y축 변위가 증가하였으며, 10 kgf의 하중을 부과한 후부터 하중을 받는 베어링이 불안정해짐에 따라마모량의 급격한 증가와 함께 베어링이 파손되었다. Fig. 6은 각각 가장 큰 변화를 보였던 베어링에서의 시간에 따른 마모, 온도, 진동 측정값 변화를 보여주고 있다. Fig. 7에서 보듯이 우측 베어링도 베어링 파손진행에 따른 영향으로 마모량과 진동값의 증가를 보였으나, 좌측 베어링의 경우 커플링으로 모터 축에 구속되어 있어 다소 영향이 적었던 것으로 판단된다.

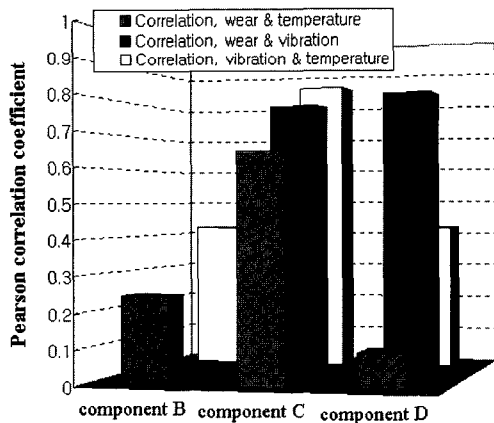


Fig. 5. Pearson correlation coefficient.

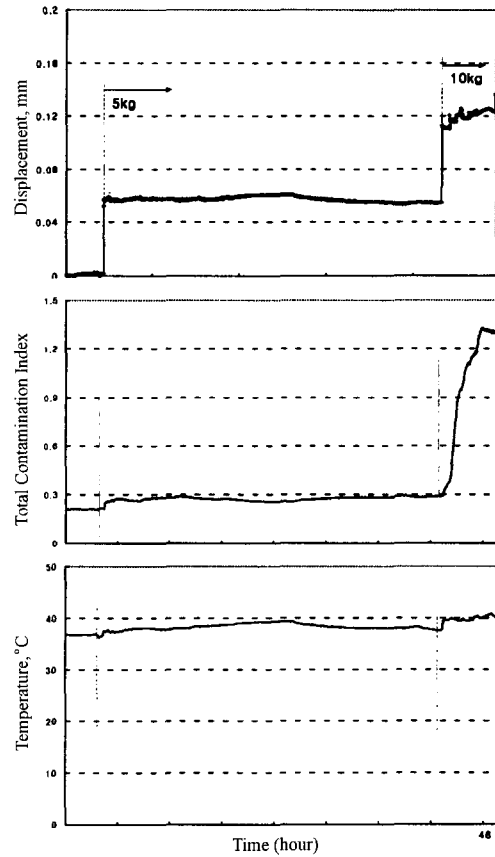


Fig. 6. Trend analysis (load bearing).

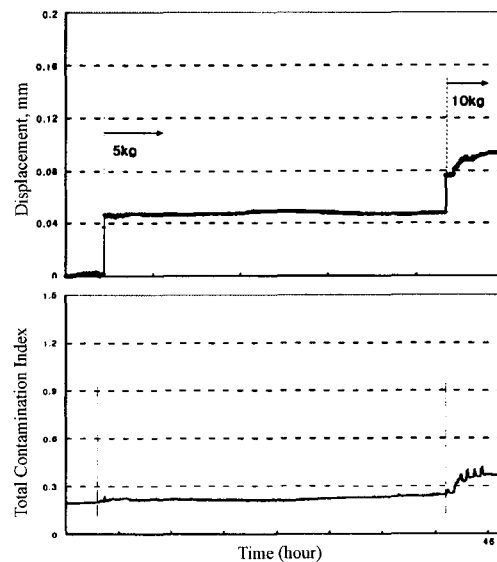


Fig. 7. Trend analysis (right bearing).

실험 데이터를 토대로, 대응되는 각 요소별 측정값들 사이의 피어슨 상관계수를 계산하였으며 Fig. 5에 그 결과를 제시하고 있다. 진동값의 경우 X방향 성분과의 마모, 온도간 상관계수 값이 모두 0.25 이하의 낮은 상관관계를 보여 거의 별다른 변화가 없었던 실험결과와도 일치하였기 때문에, Fig. 5의 진동값의 경우 Y방향 성분과의 상관계수만을 나타내고 있다.

Fig. 5를 살펴보면, 우선 파손된 베어링요소부위(Fig. 4, C)에서의 진동, 온도, 마모 사이의 상관계수가 모두 0.65 이상으로 기계요소 중 가장 높은 상관성을 보임으로써 파손부위와 상관계수와의 관련성을 나타내었다. 또한, 가장 큰 변화를 보였던 마모량과 진동값 사이의 상관계수를 기계요소별로 살펴보면, 우선 변화가 적었던 좌측베어링(Fig. 4, B)의 경우 상관계수가 0.015로 일반적으로 상관성이 없는 범위인 0.2 이하로 나타났다. 파손된 베어링요소에서의 상관계수 값은 0.781로 높은 상관관계를 보여주는 범위인 0.7 이상으로 나타났다. 파손진행에 따라 큰 영향을 받았던 우측베어링(Fig. 4, D)에서의 상관계수 값 역시 0.812을 보임으로써 실험결과와 거의 유사함을 알 수 있다. 따라서, 기계파손에 따른 진단파라미터들의 실제 측정값 변화와 각 기계요소별 피어슨 상관계수와의 밀접한 관련성을 확인할 수 있었다.

4-2. 시간에 따른 상관계수 변화

기계파손이 진행되는 시간에 따른 진단파라미터 사이의 상관계수의 변화를 실제 측정데이터와 비교, 검토해 보았다. 각 기계요소별 마모, 진동, 온도 사이에 대응되는 상관계수의 변화 중 실제 가장 큰 측정값의 변화를 보였던 마모와 진동 Y축 사이의 상관계수의 변화 그래프를 기계요소별로 나타내었다.

우선 파손이 일어났던 베어링에서 가장 큰 변화를 보였던 마모와 진동(Y)변수간의 상관계수의 변화를 Fig. 8에서 살펴보면, 초기 하중이 주어지지 않았던 구간을 제외하곤 5 kg가 가해졌던 시점부터 지속적으로 0.7 이상의 높은 상관관계를 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나, 하중부과 시점부터는 지속적인 상관계수의 감소를 보이고 있는데, 이것은 Fig. 6에서 보듯이 하중부과 시점에 두 측정변수 모두 증가한 이후로는 실제 두 측정값의 변화가 거의 없는 상태가 지속됨으로써 구간이 증가할수록 그 전체 측정데이터의 변화폭이 상대적으로 줄어들고 있기 때문이다. 그리고 10 kg 하중이 부과된 시점 이후는 다시 V자 커브형태로 상관계

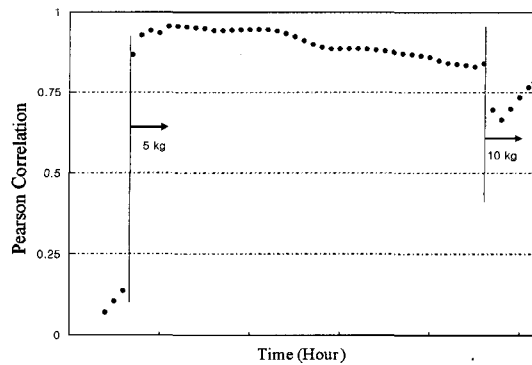


Fig. 8. Trend of correlation coefficient for wear & vibration Y (load bearing).

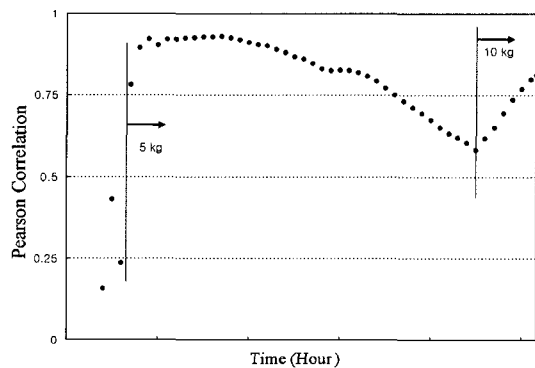


Fig. 9. Trend of correlation coefficient for wear & vibration Y (right bearing).

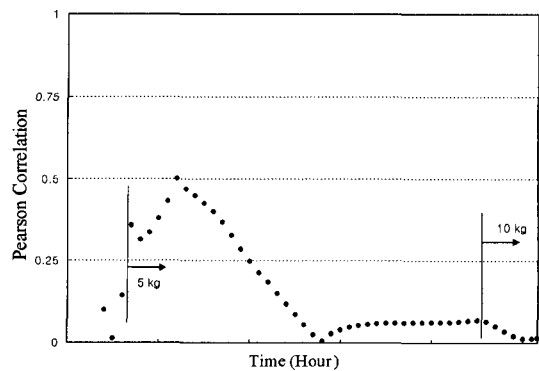


Fig. 10. Trend of correlation coefficient for wear & vibration Y (left bearing).

수의 상승을 나타내는데, 이것은 두 변수가 그 시점 이후로 모두 큰 폭의 증가세로 돌아섰음을 알 수 있다. 다음으로 직접적인 파손은 일어나지 않았지만, 영향

을 크게 받았던 Fig. 9의 우측베어링에서의 상관계수 변화를 살펴보면, 역시 파손된 베어링에서보다는 다소 상관계수의 값이 조금 낮긴 하지만 대체로 높은 상관성을 유지하고 있어 중요한 진단파라미터의 하나임을 알 수 있다. Fig. 8 보다 초기하중 부과 이후의 감소 기울기가 큰 것은, 상대적으로 더 변화의 폭이 작은 상태가 지속되고 있기 때문이다.

마지막으로 가장 변화폭이 적었던 좌측베어링의 경우, 초기하중시 약간의 증가를 보이다 두 변수의 변화가 없는 상태가 지속됨으로써 Fig. 10에서 보듯이 상관관계가 거의 없는 형태로 변화하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 다양한 상태진단기술의 적용시에 서로 상관관계를 갖는 독립변수들로 인해 생기는 오차를 감소시킴으로써 보다 신뢰성있는 진단을 수행하고자, 기계시스템 파손에 따른 진단파라미터들 사이의 상관관계 해석의 필요성을 제기하였다. 피어슨 상관계수를 바탕으로 실제 기계시스템 파손실험결과와 비교, 연구함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

우선적으로 실제 과부하시험(overload test)에 따른 기계파손 실험결과와 기계요소별 대응되는 파라미터들 사이의 피어슨 상관계수값이 거의 유사한 결과를 보임으로써 상관계수 적용의 타당성을 기본적으로 확인할 수 있었다.

다음으로 파손 진행시간에 따른 상관계수의 변화를 측정결과와 비교해 본 결과 상태진단 해석의 파라미터로서의 활용 가능성을 엿볼 수 있었다. 첫째로 전체적인 상관계수 값을 서로 비교함으로써 다양한 진단 파라미터들 중에서 기계시스템의 변화에 큰 영향을 미칠 수 있는 주요 진단파라미터들을 구별할 수 있는 장점이 있다. 둘째로 기계시스템 내 변화로 인한 측정값의 증감시점과 변화상태와의 밀접한 상관성을 보여줌으로써 기계요소별 대응되는 두 출력치의 변화상태를 하나의 진단값으로 제공할 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Williams, Davies and Drakes, Condition-based Maintenance and Machine Diagnostics, Chapman & Hall, 1994.
2. B.K.N. RAO, Handbook of Condition Monitoring, Elsevier Advanced Technology, 1996.
3. Zhang A. H, Monitoring and Diagnostic Technique for Mechatronic Equipment, Publishing House of Northwest University of Technology, 1995.
4. W. Mendenhall & R.L Scheaffer, Mathematical Statistics with Application, University of Florida, 1994.
5. Hu W, Wang W. and Mathew J, "Machine Fault Diagnosis by Integrating Neural Network and Expert System," Proceedings of the 11th International Conference on COMADEM, Vol. 1, pp. 415-422, 1998.
6. 윤의성, 장래혁, 공호성, 한홍구, 권오관, 송재수, 김재덕, 엄형섭, "마모발생의 통합분석을 통한 대형기계윤활시스템의 상태진단기술 적용," 한국윤활학회지, Vol. 14, pp.75-81, 1998.
7. Alexandru. A, "A Knowledge-based Approach for Fault Diagnosis and its Application," Proceedings of the 11th International Conference on COMADEM, Vol. 1, pp. 11-20, 1998.
8. 양보석, 전순기, 김호중, "퍼지이론을 이용한 회전기계의 진동진단법," 대한기계학회, Vol. 20, No. 5, pp.1411-1418, 1996.
9. 박홍식, 조연상, "기계구동계의 손상상태 모니터링을 위한 신경회로망의 적용," 한국윤활학회지, Vol. 14, pp.74-80, 1998.
10. 장래혁, 윤의성, 공호성, A.Ya.Grigoriev, "입자유형별 형상추출에 의한 마모입자 자동인식에 관한 연구," 한국윤활학회지, Vol.15, No.2, pp.206-211, 1999.
11. 한국과학기술연구원 연구보고서(BSV0041-6817-4), "KIST-2000 지능형 시스템 모니터링 기술개발," 2000. 12.
12. 한국과학기술연구원 연구보고서(UCE1360-5710-2), "광자기량 밀도 측정을 통한 윤활시스템내 마모량 평가기기의 On-line화 개발(I)," 1996.4.
13. 강기홍, 윤의성, 장래혁, 공호성, 김승중, 이용복, 김창호, "회전기계 파손에 따른 마모 및 진동 특성(I)," 한국윤활학회 2001 추계학술대회.