

# 선내 회전장비의 이상진동 진단 시스템

## 개발

김극수\*, 최수현\*, 백일국\*

### Development of Vibration Diagnosis System for Rotating Machinery Onboard Ships

\*Kuk-Su Kim, Su-Hyun Choi, Il-Cuk Baek

#### ABSTRACT

In this study, the vibration diagnosis program for onboard machinery has been developed. The developed program includes signal monitoring module, system diagnosis module, and system modification module. The signal monitoring module is to monitor the vibration signal in time and frequency domains. And the system diagnosis module, which is developed by using Neural Network with error back propagation algorithm, can detect the abnormal symptom indicating the malfunction of the machinery onboard ships. The investigations of the developed system are presented through the experiment using Rotor Kit. Abnormal vibration signals are created by adding additional weight, manually misaligning the shaft, and loosening the bolts.

#### 1. 서론

최근 선박에 탑재된 회전장비의 진동에 대한 선주의 관심이 증가하고, 주요 장비에 대한 진동 규제치가 엄격해짐에 따라 회전장비의 진동을 계측 평가하고 이상을 진단하는 기술이 필요하게 되었다.

회전의 진동문제를 근본적으로 해결하기 위한 기술을 확보하는 것이 필요하게 되었다.

기계의 이상진단이란 기계의 현재 상태량을 파악하고, 문제의 발생 유무, 종류, 원인, 정도 및 장애의 영향을 예측하여 필요한 대책을 찾아내는 기술을 말한다.

진동을 이용한 회전기계의 이상진동 진단 방법

은 각각의 이상상태에 따라 진동 특성(증상)을 추출하고 진동 특성 즉 증상에 따라 이상의 원인을 추론하는 방법이다.

한편, 진동문제 분석에 관한 연구는 오랜 기간 동안 연구되어 왔으며 그 결과 전형적인 이상진동 문제에 관한 패턴이 발견되었다. 따라서, 일반적으로 기계에서 자주 발생하는 고장을 이상진동 패턴과 비교함으로써 진동원인의 분석이 가능하게 되었다.

그러나 이상진동 데이터로부터 이상의 원인을 추정하고 대책을 마련하는 데는 많은 경험과 전문적 지식이 필요하다. 따라서, 최근 전문적 지식 및 경험과는 무관하게 기계의 이상을 진단할 수 있는 이상진단 시스템 개발에 관한 연구가 진행되고 있으며 특히 인공지능의 한 분야인 퍼지와 신경망이 많이 이용되고 있다.

\* 대우조선 선박해양기술연구소 진동소음연구팀

본 연구에서는 회전체 이상진동의 원인 및 특성을 파악하기 위하여 각종 문헌 및 사례집을 연구 조사 하였고 이를 실험장치를 이용하여 검증하여 정리하였다. 또한 신경망의 패턴 인식 기능을 이용하여 자동으로 이상진단을 할 수 있게 하였으며<sup>1)</sup>, 실험장치에서 여러 가지 결함을 만들어서 결함 진동신호를 인위적으로 발생시키고, 이를 계측하여 신경망을 이용한 회전기계의 진동진단법의 유효성을 검토하였다. 일반적으로, 진동의 불평형과 축정렬 불량 발생률이 전체결함의 70%를 차지하고, 선박에 탑재되는 장비는 새 장비이므로 특히 다른 결함보다 불평형과 축정렬불량의 발생 비율이 높다. 따라서 본 연구에서는 밸런싱과 축정렬 프로그램을 개발하였다. 밸런싱 프로그램은 영향계수법과 4run Method가 있으며, 이 중 현재 가장 많이 사용되고 있는 방법인 영향계수법을 사용하였으며 실험을 통하여 유효성을 검증하였다. 축정렬 프로그램은 현장에서 많이 사용하고 있는 다이얼 게이지를 이용한 면-원주 측정법을 이용하였고 축정렬 실험장치를 제작하여 축정렬의 정도에 따른 진동신호의 변화를 관찰하였다.

## 2. 시스템의 구성

본 회전장비의 이상진동 진단 시스템은 Fig.1과 같이 진동신호 모니터링부와 진단부와 수정부로 나누어져있고 모니터링부는 Labview, 진단부는 Matlab을 이용하여 개발하였다.

진동신호 모니터링부는 진동신호를 시간역과 주파수역에서 모니터링 할 수 있으며, 진단부는 이상진동 신호를 이용하여 이상의 원인을 진단하는 부분으로 불평형, 축정렬 불량, 헐거움 등을 진단하게 되며, 수정부는 이상의 원인 중 발생비율이 가장 높은 불평형과 축정렬불량을 수정하는 부분이다.

## 3. 진동신호 모니터링 프로그램

진동신호 모니터링 프로그램은 Fig.2과 같이 입력 채널수, 센서 민감도, window 및 Filter등을 설정하는 부분과 Fig.3과 같이 시간역과 주파수역에서 진동신호를 모니터링하는 부분, 그리고 Fig.4와 같이 경고치 및 한계치를 설정하여 진동 신호의 피크치만 모니터링 하는 부분으로 나누어져 있다. 한계치 설정하는 모듈은 진동신호값이 한계치 보다 크면 경고음과 함께 경고 메시지를 주게 된다.

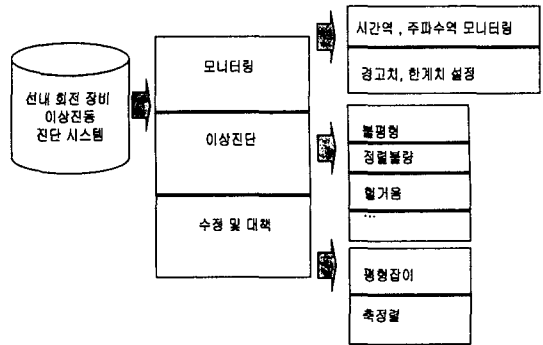


Fig. 1 시스템 구성

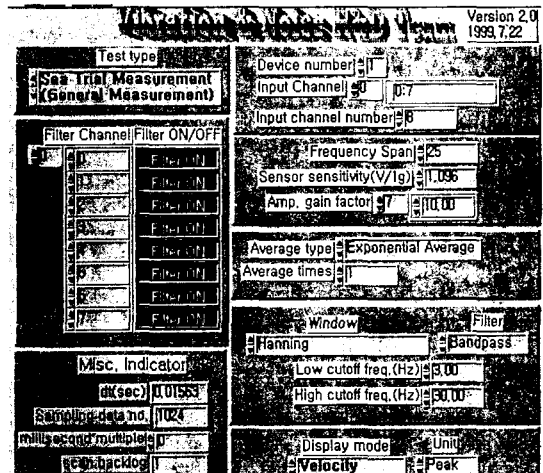


Fig.2 Configuration of Monitoring System

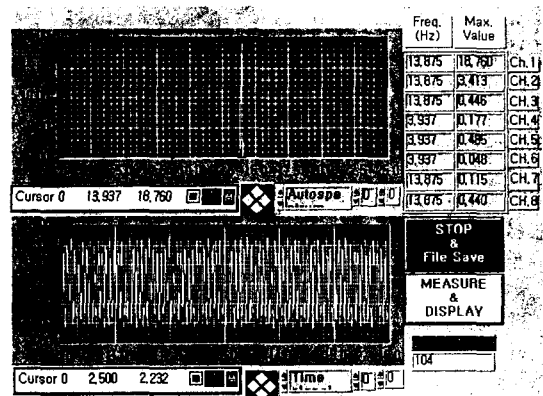


Fig.3 Monitoring Window of Developed System

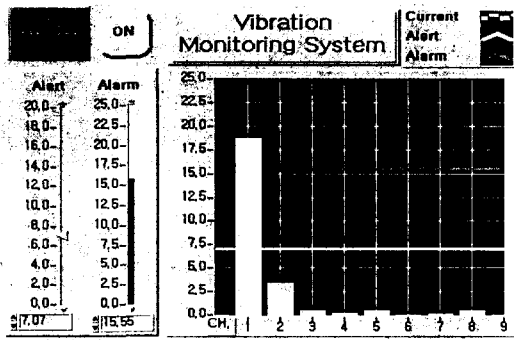


Fig. 4 한계치 설정

#### 4. 신경망을 이용한 이상진동 진단방법

이상진동 데이터로부터 이상의 원인을 추정하고 대책을 마련하는데는 많은 경험과 전문적 지식이 필요하다. 최근 전문적 지식과 경험과 무관하게 기계의 이상을 진단할 수 있는 이상진단 시스템 개발에 관한 연구가 진행되고 있으며, 통계적인 방법과 인공지능적인 방법이 사용되고, 현재 인공지능을 이용한 이상진단에 관한 연구가 수행되고 있다.

본 연구에서는 이상 원인과 증상에 대한 패턴을 신경망에 학습시키고, 기계의 이상 진동 신호를 입력으로 하여 이상의 원인을 진단하게 하였다.

##### 4.1 결함진단 실험

Fig. 5의 진동 실험 장치를 이용하여 인위적인 불평형, 정렬 불량, 헐거움에 대한 이상 진동 신호를 만들어 Table. 1과 같이 계측 데이터를 정리하였다. 이 이상신호를 이용하여 신경망 진단 시스템의 유효성을 검증하는 데 사용하였다.

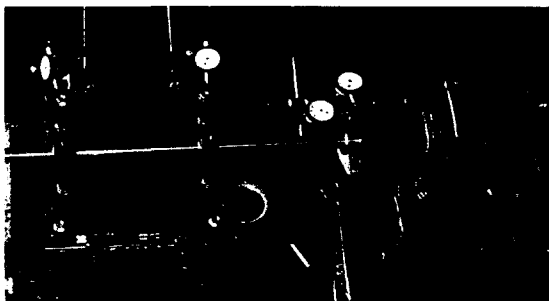


Fig. 5 실험장치

Table. 1 이상신호 성분별 계측 데이터 (mm/sec)

주파수	1x	2x	3x	nx	zx	fi	fo	fb
불평형	2.30	0.34	0.21	0				
정렬불량	0.16	0.38	0.16	0.11				
헐거움	0.1	0.25	1.52	1.51				
베어링 결함	1.0	0.6	0.6	0.2	0	2.6	0.6	0.4

불평형에 대한 진단을 수행한 결과 Fig. 6과 같이 축 회전주파수 성분이 99%이므로 불평형으로 진단 할 수 있으며, 정렬불량에 대한 진단은 Fig. 7과 같이 정렬불량의 가능성이 40%로 가장 높게 나왔다. 헐거움에 대한 진단을 수행한 결과는 Fig. 8 같이 헐거움의 가능성이 56%로 높다. 볼 베어링결함 데이터는 J. I. Taylor의 실험자료 중 내륜 결함이 있는 베어링의 주파수 분석 결과를 이용한 것으로 Fig. 9 같이 내륜 결함일 가능성이 87%로 가장 높다.

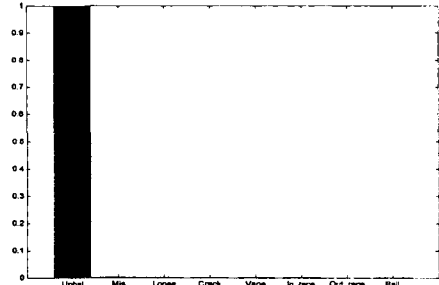


Fig. 6 불평형 진단 결과

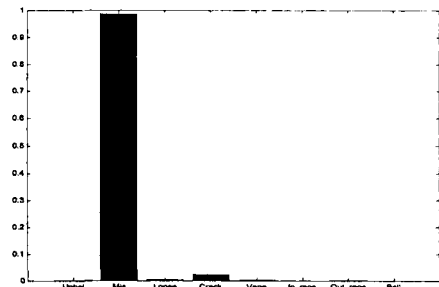


Fig. 7 정렬 불량 진단 결과

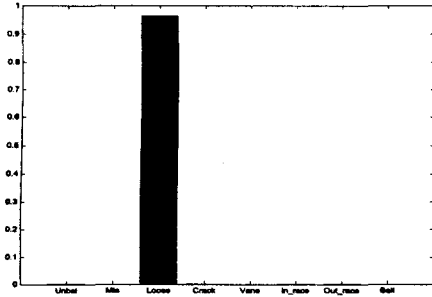


Fig. 8 혈거움의 진단 결과

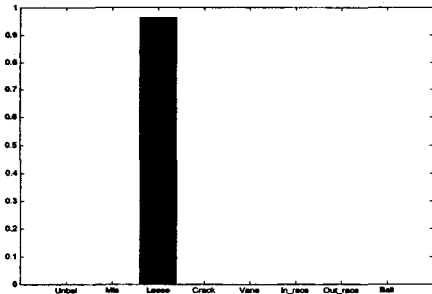


Fig. 9 볼베어링 결함 진단

## 5. 이상진동의 수정과 대책

불평형 및 축정렬 불량에 의한 이상 진동의 발생률이 전체결함의 70%를 차지하므로 본 연구에서는 밸런싱과 축정렬 프로그램을 개발하였다. 밸런싱 방법은 영향계수법과 4run Method가 있으며 이중 현재 가장 많이 사용되고 있는 방법인 영향계수법을 이용하였으며 실험을 통하여 유효성을 검증하였다. 축정렬 방법은 현장에서 많이 사용하고 있는 다이얼 게이지를 이용한 면-원주 측정법을 정리하였으며 축정렬 실험장치를 제작하여 축정렬의 정도에 따른 진동신호의 변화를 관찰하였다.

### 5.1 밸런싱 실험

유도전동기의 초기 불평형량에 대하여 밸런싱을 실시하였다. Fig. 10과 같이 가속도계를 불평형의 영향이 가장 많은 수평방향으로 부착하고 키 패이저를 가속도계와 같은 방향에 부착하여 Tachometer로 임펄스신호를 발생시켰다. Key phasor 신호를 기준으로 가속도의 위상을 측정하였다.

유도전동기의 초기 진동 가속도 신호는 Fig. 11과 같이 측정하였다. 영향계수법을 이용한 유도전동기의 밸런싱을 다음과 같은 절차로 수행한 결과 Fig.13과 같이 가속도 진동치가 80%정도 줄어들었다.

1) 초기 불평형에 의한 가속도 신호 : [Fig.11]

$$2.231 \text{ mm/sec}^2 \angle 30^\circ$$

2) 시험질량 : 1.52g을 로터의 중심에서 4cm 떨어진 곳 180°의 위치에 부착

3) 시험질량 부착 후 가속도 신호 : [Fig.12]

$$0.765 \text{ mm/sec}^2 \angle 31.7^\circ$$

3) 영향계수 :  $0.843+0.47i$  ( $\text{mm/sec}^2/\text{g}$ )

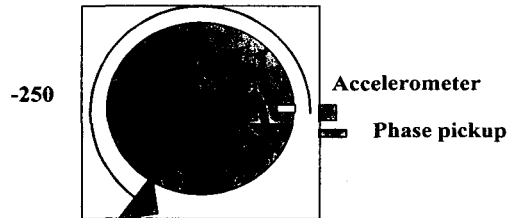
4) 밸런싱 질량과 부착 위치 :

$$2.33 \text{ g} * 4 \text{ cm} \angle -177^\circ$$

5) 밸런싱 후 진동치 : [Fig.13]

$$0.28 \text{ mm/sec}^2 \angle 190.4^\circ$$

Rotational direction : CR



High Acc. Spot

Fig. 10 Balancing 장치구성

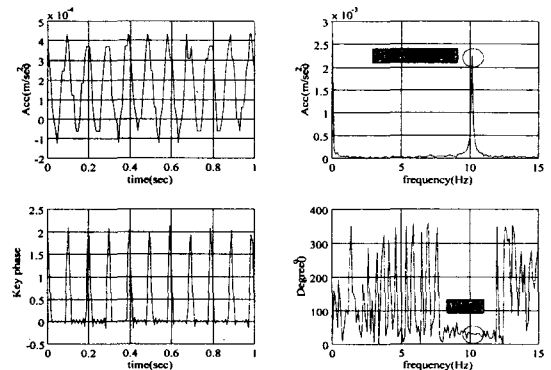


Fig. 11 유도전동기의 초기 진동치

(가속도:  $2.231 \text{ mm/sec}^2$ , 위상 :  $30^\circ$ )

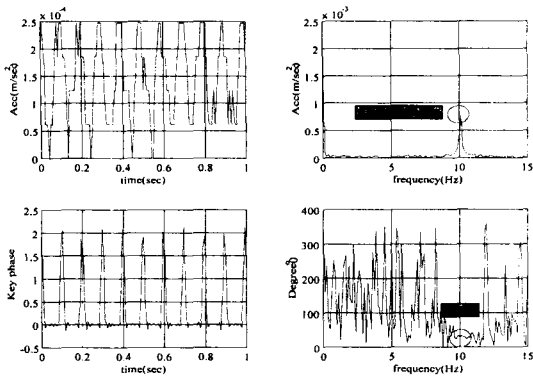


Fig. 12 유도전동기의 시험질량 부착후 진동치  
(가속도:  $0.765 \text{ mm/sec}^2$ , 위상:  $31.7^\circ$ )

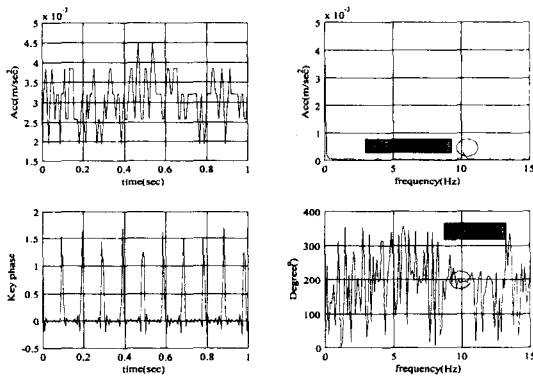


Fig. 13 유도전동기의 밸런싱 후 진동치  
(가속도:  $0.28 \text{ mm/sec}^2$ , 위상:  $190.4^\circ$ )

## 5.2 측정렬

측정렬 불량인 생기는 원인은 서로 다른 제조 회사에서 만든 두 기계를 조립할 때, 축의 중심선이 일치하지 않아서 발생하며 두 기계의 축의 중심을 완벽하게 맞출 수는 없기 때문에 측정렬 불량으로 인한 진동은 불가피하다. 측정렬 불량의 종류는 중심선 정렬 불량 및 각 정렬 불량과 이들이 복합된 경우가 있으며, 이 중 각 정렬 불량은 축의 굽힘과 같은 진동형태로 취급하기도 한다.

### 5.2.1 측정렬 실험 장치 구성

측정렬 실험장치를 Fig. 5와 같이 구성하였다.

모터축을 기준축으로 하고 베어링축을 이동축으로 하였다. 커플링부의 다이얼 게이지를 이용하여 면과 원주를 측정하고 베어링부의 좌우 이동 볼트를 이용하여 수평방향의 측정렬을 수행하였다. 수직방향의 이동을 위하여 베어링 고정부에 수직방향 이동 볼트를 사용하였다. 수평 방향의 베어링 이동량을 측정하기 위해 다이얼 게이지를 좌측에 부착하였고 다이얼 게이지 부착면은 정밀하게 가공하였다. 이동축에 사용한 베어링은 P204를 사용하였다. 축의 직경은 20mm, 커플링의 직경은 100mm이다. 커플링 중심에서 커플링에 가까운 베어링 사이의 거리는 210mm, 베어링사이의 거리는 210mm이다.

### 5.2.2 측정렬 프로그램

측정렬 프로그램은 Fig. 13과 같고 이 프로그램을 이용하여 측정렬 실험을 수행하였다. 모터축에 다이얼 게이지를 고정시키고 커플링을  $90^\circ$ 간격으로 회전시키면서 상하좌우 4방향의 면과 원주에 대한 측정값을 current alignment에 입력하고 커플링의 직경과 커플링의 중심에서 중동축 베어링 사이의 거리 및 베어링간의 거리를 입력하였다. 커플링의 Gap 과 Sag 및 각각의 베어링의 이동량을 표시하였고 베어링의 현재 위치를 좌측 하단에 그림으로 표시하였다. 다이얼 게이지로 측정한 값은  $1/100 \text{ mm}$  단위를 사용하였으며 커플링과 베어링 사이의 거리 및 직경은 mm단위계를 사용하였다.

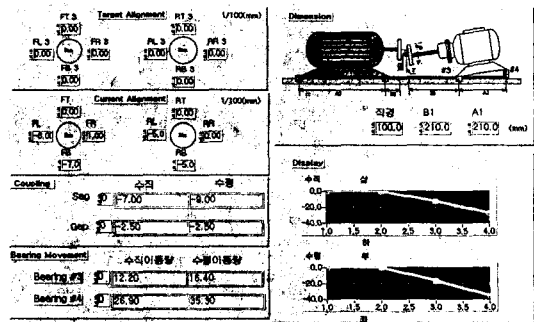


Fig. 13 측정렬 프로그램

### 5.2.3 Misalignment량에 따른 진동신호의 변화

위의 프로그램과 모델을 사용하여 측정렬을 한 후 Misalignment량을 변화시키면서 횡방향의 진동치를 측정하였다. Misalignment량의 변화에 따

라 모터의 회전주파수의 배수성분(2x, 3x, 4x성분)의 값이 대체로 증가하였다.

### ● 중심선 정렬 불량(Parallel Misalignment)

초기 정렬불량 0.02mm에서 증동축을 평행 이동시키며 Parallel Misalignment량을 증가시키면서 진동을 측정하였으며 Misalignment에 따른 스펙트럼의 변화를 Fig. 14에 나타내었다. Parallel Misalignment량이 증가함에 따라 2x와 3x의 성분이 점차적으로 증가하는 경향이 보인다.

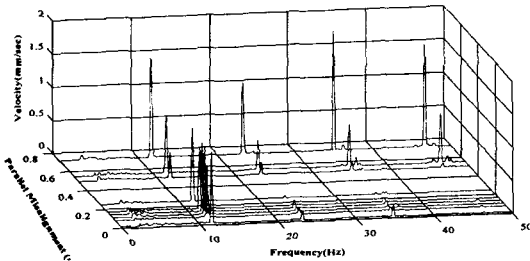


Fig. 14 Parallel Misalignment량에 따른 진동 특성 변화

### ● 각 정렬 불량(Angular Misalignment)

초기 정렬불량 0.04mm에서 증동축의 Angular Misalignment량을 증가시키며 진동을 측정하였으며, Misalignment량에 따른 스펙트럼의 변화를 Fig. 15에 나타내었다. Angular Misalignment량이 증가함에 따라 1x의 성분이 점차적으로 증가하는 경향이 보인다.

## 6. 결론

본 연구에서는 선내 회전장비의 이상진동을 모니터링, 진단 및 수정할 수 있는 시스템을 개발하였고 다음과 같은 기능을 가지고 있다.

- 모니터링프로그램은 진동신호를 시간역과 주파수역에서 분석 할 수 있다.

- 신경망을 이용한 회전기계의 이상진단 프로그램을 개발하였고, 불평형, 축정렬 불량, 헐거움, 볼베어링 등에 대한 이상신호를 이용하여 이상 진단 프로그램의 유효성을 검증하였다.

- 회전체 고장 유형의 70%이상을 차지하는 불평

형과 정렬불량에 대하여 수정 대책을 마련하였다. 중심선 정렬 불량과 각 정렬 불량에 대하여 Misalignment 량에 따른 진동스펙트럼의 변화를 실험하여 정리하였다.

- 본 연구에서 얻어진 자료는 차후 선박 내 회전장비의 이상진단 및 보수 및 회전기계의 이상진단 시스템 구축에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대 된다.

## 참고문헌

- [1] 양보석, 전순기, 김호중 "퍼지이론을 이용한 회전기계의 진동진단법", 대한기계학회논문집(A) 제 20권 제 5호, pp.1411~1418, 1996.
- [2] 배용채, "터빈 이상 진동의 자동 진단 시스템에 관한 연구", 전남대학교 대학원 기계 공학과, 1995, 2
- [3] 양보석, "유전 알고리즘을 이용한 강성회전체의 평형잡이", 한국박용기관학회지 제20권 제2호, 1996
- [4] 황철호, "발전설비의 터빈 축정렬(I): 발전소 적용사례", 한국소음진동공학회지 제 4권 제1호, 1994
- [5] J.I.TAYLOR, "Identification of Bearing Defects by Spectral Analysis", ASME, J. of Mechanical Design, Vol. 102, PP.199-204, 1980.
- [6] FREDRIC F.EHRICH, "Handbook of Rotordynamics"