

패턴 분류 기법을 이용한 회전 장비의 고장 원인 진단

이장현, 황세윤, 홍규택(인하대학교)

1. 서론

육상이나 해양 플랜트의 생산 공정은 그 목적에 따라 다양하게 다양한 장비들이 배치되어 있으며, 일반적으로 컴프레서, 펌프, 모터, 터빈, 등의 회전 장비들이 주를 이루고 있다. 이러한 회전 장비는 각 장비의 목적에 따라 특징을 가지고 있지만, 일반적으로 회전체와 고정체들로 구성되어 있기 때문에, 장비의 부품들 간의 정렬불량(Misalignment), 편심(Eccentricity), 헐거움(Looseness), 액체 유출(Leakage), 마모(Abrasion), 부식(Corrosion), 등 회전 운동과 공정의 운영 조건에 따라 다양한 형태의 고장 특징을 가지고 있다. 이러한 고장은 일반적으로 장비의 특성에 따라 발생 가능한 고장모드로 분류하여 관리가 된다. 플랜트에서 안정적인 설비 운영을 위해서는 지속적으로 고장을 감시하고 고장 여부를 사전에 인지하여 관리할 수 있도록 모니터링 시스템이 도입되어 있다. 그러나 모니터링 시스템에서 이상신호 발생 시 이상신호의 원인을 판단하기 위해서는 대부분 엔지니어의 경험에 의존하고 있으며, 최근 데이터 장비를 구성하는 부품들 간의 고장의 영향도를 분석하는 FMEA(Failure mode and effect analysis), FTA(Fault tree analysis), RCA(Root cause analysis), 등의 다양한 방법이 제시되고 있다. 이러한 방법들은 일반적으로 고장 빈도, 고장의 영향도, 피해도, 등에 근거하여 고장의 원인을 분석하는 방법이다. 또한 조건기반 예지보전(Condition Based Maintenance) 방법을 적용하여 장비에 센서를 부착하고 운영 시 계속되는 데이터에 의해 장비의 상태와 고장원인을 분석하는 데이터 구동방법(Data driven approach)과 장비 자체의 물리적 특징에 중점을 둔 물리 기반 접근법(Physics based approach)들도 다양하게 소개되고 있으며, 이 두 가지 방법을 혼용한 방법론도 소개되고 있다(최연선 외, 1996; 정원식 외, 2001; Kim et al., 1999; Huang et al., 1998).

본 연구에서는 조건기반 예지보전 방법론에 기반하여 플랜트 공정에서 이상신호가 발생하였을 때, 이상 신호를 엔지니어가 경험에 의존하여 판단할 수 있는 한계점을 극복하기 위해서 고장 원인 진단 방법을 소개하고자 한다. 일반적으로 플랜트 회전 장비는 그림 1에서와 같이 안정적인 운영을 위해서 다수의 센서를 부착하여 상태를 모니터링 하고 있으며, 그 과정을 간략히 설명하면 다음과 같다. 모니터링 하고자하는 장비를 기준으로 발생 가능한 고장모드를 감시하기 위한 대표

센서를 장비에 부착한다. 예를 들면, 회전 장비에서 진동 특성에 의해 발생하는 고장모드를 감시하기 위해서 진동센서를 장비 주요부위 여러 위치에 부착하는 사례를 들 수 있다. 이 후 각 센서에서 계속된 신호는 분산 제어 시스템(Distribution control system), 등과 같은 저장 장치에서 기록하게 된다. 이러한 신호를 획득하는 과정 중 가장 주요한 부분은 데이터의 획득 주기가 데이터의 양에 해당하는 센서 및 시스템의 성능과 밀접하게 연관되기 때문에, 일반적으로 데이터를 필터링하여 일단 시간단위의 데이터로 획득을 하고 모니터링 시스템에서 이상신호의 유무를 파악하여 이상신호에 대한 결과를 출력하고 이를 엔지니어가 판단하여 고장의 원인을 찾는 과정으로 이어진다(Bae et al., 2006; Peng et al., 2005; Peng et al., 2003). 회전 장비는 지속적인 회전 운동을 하며 진동신호를 발생하기 때문에 일반적으로 진동 신호가 장비의 상태를 나타내는 대표적인 신호이다. 이러한 회전 장비에서 계속되는 진동신호의 특징을 추출하기 위해서는 일반적으로 고장신호의 특징을 검출할 수 있는 FFT(Fast fourier transform), Wavelet transform, 등의 신호 처리 기법을 적용하여 판단하고 있으나, 본 방법을 적용하기에는 실제 수집되는 데이터가 일반적으로 10kHz 정도 또는 그 이상의 간격으로 수집되어야 하나 계속 설비의 한계 때문에 현장에 적용하기에는 다양한 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 데이터의 수집 간격의 한계를 극복하기 위해서, 수집되는 신호의 패턴 분류 기법을 적용하여 신호의 특징을 추출하였다. 패턴인식 방법은 크게 통계적인 접근과 신경망을 이용한 방법으로 나뉘는데, 일반적으로 실측 데이터는 상당한 비선형성을 가지기 때문에 신경회로망을 이용한 패턴인식 방법이 다양하게 적용되고 있다. 본 연구에서는 회전운동의 특징을 가지는 장비의 고장 원인 진단을 위해서 통계적인 방법과 신경망을 이용한 기법을 접목시켜서 접근하는 방법의 일환으로서, 통계적 방법 중 모수적인 방법은 회전체의 각 상태에 대한 정규성과 등분산을 가정하는 선형판별함수와 상태에 대한 정규성을 가정하는 판별함수를 가정하여 구성하고 각 상태에 대한 임의의 분포를 가정하지 않는 접근방법으로 구성하였다. 소개된 패턴 분류 기법은 실 플랜트에서 계속된 회전장비에서의 고장신호 및 정상상태의 신호에 적용함으로써 고장 원인진단의 기능성에 대해서 검토하였으며, 그 결과에 대해서 검토하였다.

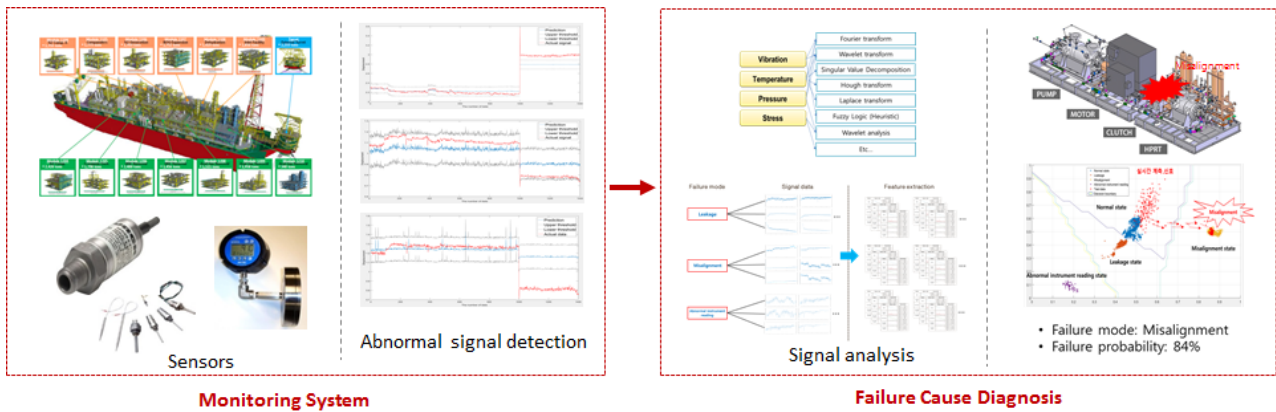


그림 1 플랜트 주요 장비의 고장 진단 절차 개념도

2. 패턴 분류 기법

패턴 분류 기법을 적용하여 회전 장비의 결함을 분류하는 과정은 그림 2에서와 같으며 그 과정은 다음과 같다. 첫 번째 단계로서 센서로부터 계속된 신호로부터 신호의 특징을 나타낼 수 있는 정량저긴 특징 값을 추출하는 과정, 그리고 과거 고장 이력에 기반하여 이미 고장 상태에서 취득한 신호를 기반으로 패턴화하여 학습하는 과정, 그리고 얻어진 정보를 바탕으로 고장의 원인을 판단하는 과정으로 분류할 수 있다. 이러한 과정들을 단계별로 상세히 설명하면 다음과 같다.

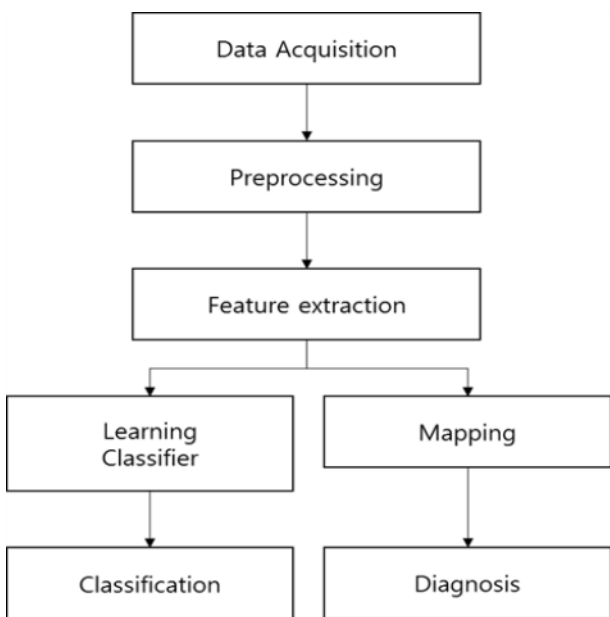


그림 2 고장 신호의 패턴 분류 절차

2.1 데이터 수집 (Data acquisition)

대상 설비의 특징을 나타내기 위한 주요 데이터를 수집하는 과정으로서, 장비의 상태를 나타낼 수 있는 진동, 온도, 압력 등의 주요 신호를 수집한다. 또한, 수집된 데이터는 장비의 정상상태 또는 이상상태별로 분류하여 획득되어야 하며, 특히 고장 발생 시 고장 모드별로 분류되어 획득되어야 한다.

2.2 전처리 (Preprocessing)

습득한 데이터를 정제하여 불필요한 정보는 제거하고 정규화를 통해 다루기 쉽게 변환하는 과정을 전처리 과정이라 한다. 이러한 전처리 과정은 주어진 데이터에 따른 최적화된 처리가 수행되어야 한다.

2.3 특징 추출 (Feature extraction)

특징 추출 과정은 데이터의 특성을 가장 잘 나타내는 특징들을 찾는 과정이다. 많은 양의 데이터로부터 특징을 추출하여 사용함으로써 시간 및 메모리를 절약할 수 있으며 어떠한 특징을 추출하여 사용할지 결정하는 것은 고장진단에 있어서 핵심적인 역할을 한다. 또한 획득되는 데이터의 시간 간격, 종류, 등의 특징에 따라 사용되는 변수들이 면밀히 검토되어야 한다.

2.4 분류 학습 (Learning classifier)

분류 학습 과정에서는 특징 추출 과정을 거친 주어진 데이터의 각 패턴을 구분할 수 있는 기준을 마련하는 작업이 수행된다. 이러한 학습과정으로 데이터를 분류할 수 있는 결정 경계가 얻어지게 된다.

2.5 분류 및 진단 (Classification and Diagnosis)

분류 과정은 분류 학습에서 얻어진 분류 기준을 바탕으로 주어진 데이터를 각각의 데이터 패턴의 특성에 알맞은 부류(class)로 분류하는 과정이다. 기존의 데이터로부터 학습을 통하여 분류 기준이 결정되고 학습 데이터에 사용된 데이터와는 별도로 새로운 데이터를 인식하는 과정으로 해당 데이터의 부류를 결정할 수 있다.

3. 회전 장비의 고장 원인 진단

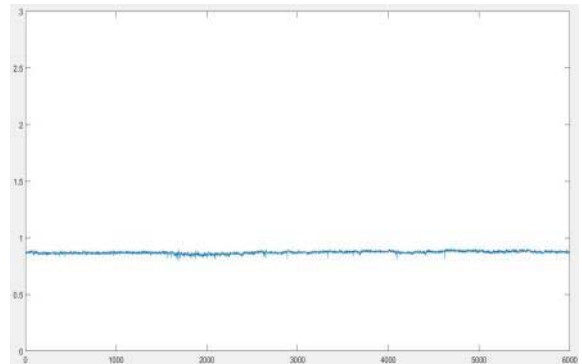
앞서 언급한 바와 같이 회전 장비를 대상으로 운영 시 모니터링 단계에서 이상 징후가 발생하였을 때, 획득된 센서 신호를 이용하여 고장 원인 진단한 사례에 대해서 소개하고자 한다. 적용 대상 장비는 플랜트 설비에서 일반적으로 운영되고 있는 회전운동의 특징을 가지는 펌프이며, 진동(vibration)신호를 분석하여 고장 원인을 진단하였다.

3.1 Compressor

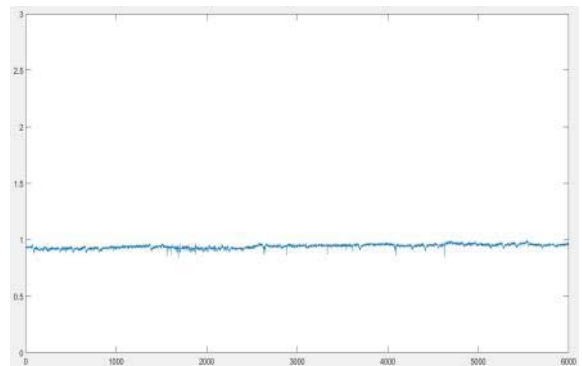
고장 원인 진단에 적용된 장비는 그림 3에서와 같이 플랜트 공정에 일반적으로 사용되는 컴프레서(Compressor) 장비이다. 해당 장비는 회전 운동의 특징을 가지고, 주요 고장이 발생하는 위치에 6개의 진동 센서가 부착되어 진동신호를 실시간으로 계속하여 상태를 감시하도록 구성되어 운영되고 있다. 고장 원인 진단에 적용된 센서 신호는 진동 신호가 적용되었으며, 신호는 플랜트의 운영 시스템에서 분(minute) 단위로 계속되었으며, 약 6개월의 운전 정보데이터를 기반으로 검토되었다. 그림 4는 운전정보 시스템에서 계속된 정상상태의 진동 신호를 보여주고 있다.



그림 3 고장 원인 진단에 적용된 컴프레서 장비



(a) x - direction vibrations



(b) y - direction vibrations

그림 4 컴프레서 장비에서 계속된 정상상태의 진동 신호

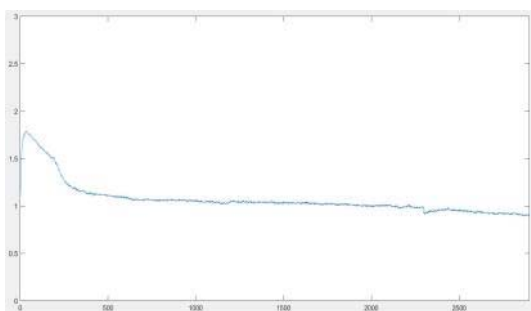
표 1 컴프레서 장비의 고장모드 분석 (OREDA)

Equipment	Failure mode	Rate (%)
Compressor	Abnormal instrument reading	18.54
	Breakdown	0.25
	External leakage - Process	5.12
	External leakage - Utility	11.14
	Erratic output	1.58
	Fail to start on demand	3.17
	High output	0.22
	Internal leakage	2.96
	Low output	11.36
	Noise	0.68
	Overheating	4.63
	Other	6.85
	Parameter deviation	8.39
	Minor in-service problem	14.18
	Structural deficiency	1.1
	Fail to stop on demand	0.33
	Unknown	1.95
	Spurious stop	5.52
Vibration	1.99	

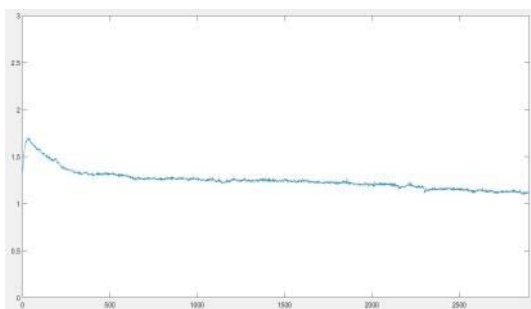
대상 장비의 고장 원인을 분석하기 위해서는 장비에서 발생 가능한 고장 모드들에 대해서 분류가 선행되어야 한다. 본 연구에서는 해양플랜트 설비들에 대해서 발생하는 고장 모드를 분류해 놓은 OREDA DB에서 컴프레서 장비에서 발생 가능한 고장모드를 참고하여 고장 모드에 대해서 정의하였다. 표 1은 OREDA에서 정의된 컴프레서 장비의 고장 모드에 대해서 나타내고 있다.

3.2 고장 모드별 데이터 수집

대상 장비에 대한 고장모드 및 모드별 특징은 일반적으로 장비의 공급업체에서 성능평가를 통해서 검토되고, 제공되는 정보이나 표 1에서와 같이 OREDA에서 정의된 고장모드를 기준으로, 데이터 분석을 통해 획득된 대상 장비의 과거 고장 사례 데이터를 이용하여 적용하였다. 본 연구에서 적용된 고장 모드는 표 1에서 정의된 고장 모드 중 과거 고장 이력과 일치하는 항목에 대해서 다음의 표 2에서와 같이 3가지 고장모드로 분류하였다. 각 신호는 총 6개의 진동 센서에서 계측된 신호를 적용하였으며, 각 고장모드를 대표하는 신호들의 시계열 특징은 그림 5, 6, 7에서와 같이 정상 상태의 신호(그림 4)와 비교하였을 때, 육안으로도 이상 신호가 발생하는 것을 확인할 수 있으나, 각 신호별 특징을 분류하기에는 모호한 것으로 확인 된다.

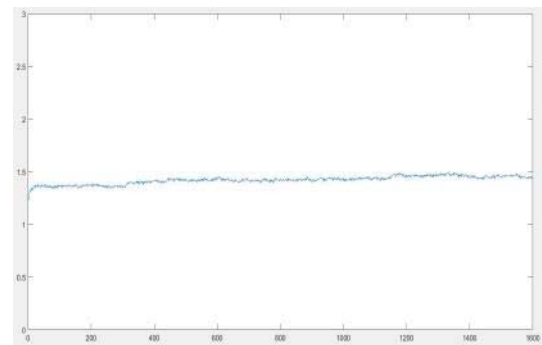


(a) x - direction vibrations

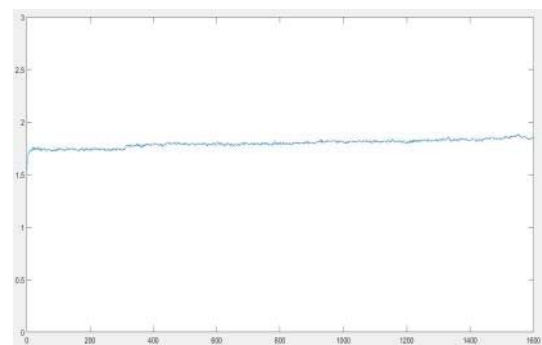


(b) y - direction vibrations

그림 5 컴프레서 장비의 Leakage 상태의 진동 신호

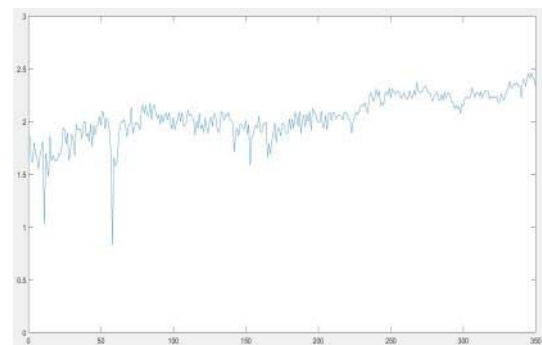


(a) x - direction vibrations

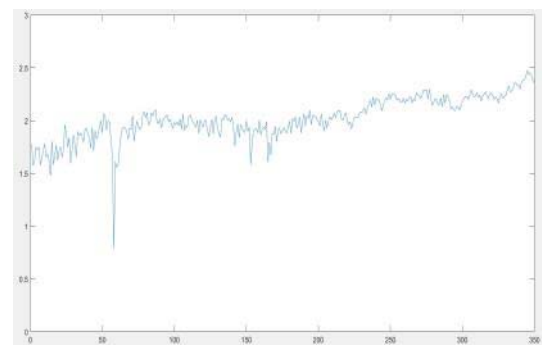


(b) y - direction vibrations

그림 6 컴프레서 장비의 Misalignment 상태의 진동 신호



(a) x - direction vibrations



(b) y - direction vibrations

그림 7 컴프레서 장비의 센서 이상 상태의 진동 신호

표 2 컴프레서 장비의 고장 이력 및 고장 모드 분석

No.	Failure history	Failure mode
1	Oil leak failure	Leakage
2	Shaft align problem	Misalignment
3	Sensor problem	Abnormal reading

3.3 진동 신호의 특징 변수

진동 신호를 패턴화하기 위해서 시계열 신호를 일정구간으로 구분하여 구간 별 신호의 특징 추출하여 분류하였다. 컴프레서 장비의 진동신호에 대한 특징은 다음과 같이 회전 기계의 고장진단에 일반적으로 사용되는 시간 영역의 통계적 특징을 가지는 변수를 선정하여 적용하였다.

RMS(Root mean square)

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} s_i^2} \quad (1)$$

첨도(Kurtosis value)

$$k = \left[\int (X-u)^4 p(x) dx \right] / \sigma^4 \quad (2)$$

파고율(Crest factor)

$$CF = peak / RMS \quad (3)$$

3차 중심 적률

$$E([X-u]^3) = \int (X-u)^3 p(x) dx \quad (4)$$

5차 중심 적률

$$E([X-u]^5) = \int (X-u)^5 p(x) dx \quad (5)$$

3.4 차원 축소 및 패턴 분류

진동 신호의 패턴을 표현하기 위해, 앞 절에서 제시된 5개의 특징을 사용하여 정상상태 그리고 각 고장모드 별 진동 신호를 패턴화 하였다. 각각의 진동 신호는 5개의 통계적 특징의 파라미터로 5차원의 벡터형태로 표현된다. 이러한 5차원 벡터형태의 패턴을 가시화하기 위해 차원 축소 방법인 주성분

분석(Principal component analysis) 기법이 사용되었다. 각 특징들의 상관계수 행렬(Correlation matrix)로부터 고유벡터(Eigen vector)를 구하여 2개의 주성분(Principal component)을 새로운 2차원의 파라미터로 선정하여 각 신호의 패턴을 2차원 평면에 가시화하여 나타내었다.

패턴 분류기법을 적용하여 계측된 진동 신호의 특징을 패턴화하여 각 신호들의 특징을 분류하였다. 패턴 인식 과정에서 적용되어지는 다수의 변수들에 대한 결정은 다양한 수치실험을 통해서, 적용된 진동 신호의 패턴 분류를 위한 파라미터를 결정하였다. 그 결과 각 상태에 대해서 분류된 패턴 분류 결과는 아래의 그림 8에서와 같으며 정상상태의 신호 패턴과 각 고장 모드별로 발생한 신호의 패턴이 분류된 것을 확인할 수 있으며, 본 과정에서 분류된 정보가 대상 장비의 고장 원인 판단 기준으로 적용된다.

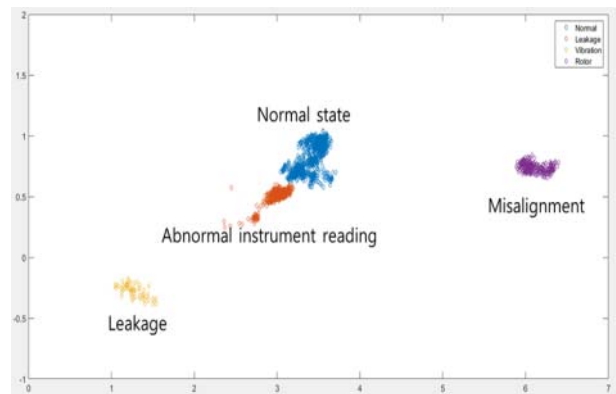


그림 8 2차원으로 분류된 컴프레서 장비의 진동 신호

3.5 고장 원인 진단 적용

컴프레서 장비에 대해 고장 원인 판단을 위해서 패턴 분류 기법을 적용하여 고장 판단 기준으로 정의하였다. 따라서 이를 검증하기 위해서 실 운전 데이터를 기반으로 임의의 값을 가지도록 생성된 가상 신호를 적용하여 타당성을 검토하였다. 가상 신호는 정상상태 그리고 임의의 고장상태 신호의 평균과 분산을 기반으로 하는 가우시안 정규분포를 구하고 각각의 가우시안 정규분포로부터 임의의 값을 갖는 데이터를 구해 조합하여 신호를 생성하였다. 가상신호는 그림 9에서와 같이 정상상태의 신호에서 약 2/3 시점부터 고장모드 신호로 변환되는 시나리오로 구성되어 있다.

고장 원인 진단을 위해서 3.3절에서 언급한 방법과 동일하게 각각의 가상 신호를 5개의 특징 패턴으로 나타내고 차원 축소과정을 통하여 학습 과정에서 생성된 2차원 평면에 나타내었다. 적용 결과, 기존의 데이터에 의해 분류되어 학습된 2

차원 평면에 가상 신호 패턴이 나타남을 확인할 수 있으며, 현재 신호는 처음 정상상태 영역에서 정렬불량 상태 영역으로 이동하였으며 이러한 신호의 패턴을 분석하여 가상 신호의 상태를 진단할 수 있다. 가상 신호 분류 결과는 그림 9에서와 같으며 원인 진단 결과는 표 3에서와 같다.

표 3 가상 신호의 고장 원인 진단 결과

Failure mode	Failure probability
Misalignment	82%

4. 결론

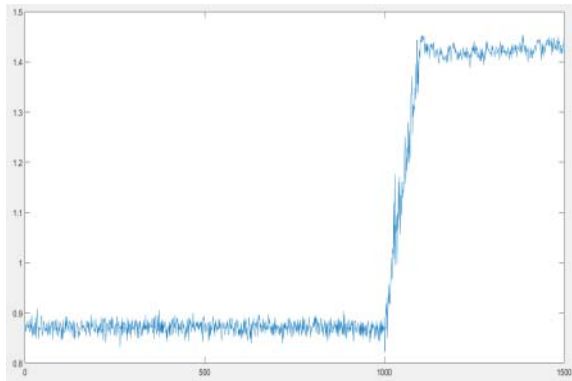
본 연구는 플랜트에 탑재되는 주요 장비 중 회전운동의 특징을 가지는 컴프레서 장비를 대상으로 획득된 진동 센서 신호를 이용하여 장비의 운영 중 이상신호가 발생했을 때, 이상 신호의 의미를 파악하기 위한 고장 원인 진단 방법에 대해서 소개하였다. 진동 신호의 특징을 분류하기 위해서 통계적 접근법에 기반한 패턴 인식 기법이 소개되었으며, 제시된 방법은 플랜트 장비에서 계측된 고장이력 신호 및 정상 상태의 신호 분석에 적용하여 고장 원인 판단까지 가능성을 보여주고 있다. 그러나 본 연구에서 검토된 신호의 패턴 추출 과정은 고장 모드별로 특정 신호 유형에 대해서만 분석되었기 때문에, 고장 모드별로 고장 사례가 축적됨에 따라 고장신호 패턴 분석 및 원인 진단 기준 방법에 대한 신뢰성을 확보하기 위해서는 제시된 알고리즘의 고도화가 필요 할 것이다. 따라서 본 연구에 이어서 해당 장비에 대한 고장 모드 별 고장 이력 데이터를 충분히 획득하여 실제 플랜트 공정에서 장비의 고장 원인 진단에 활용되기 위한 연구가 지속되어야 할 것이다.

후 기

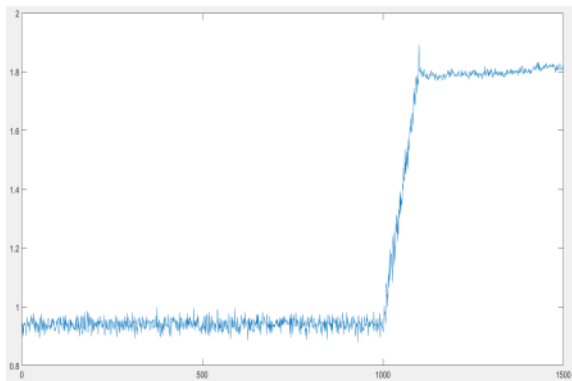
본 연구는 산업통상자원부 해양플랜트특성화대학사업 및 KEIT 및 산업통상자원부 산업핵심기술개발 사업(No. 10048341)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

최연선, 김준모, 정호권. [회전마멸현상에서의 마찰과 편심의 영향, 한국소음진동 공학회지, 제6권, 제6호, pp. 819~825] (1996)
 정원식, 이신영, 정태진, 이종길. [진동신호를 이용한 펌프의 고장진단 연구, 대한기계학회 춘추학술대회, 2001, pp. 590-595] (2001)
 Chu, F. and Zhang, Z. [Bifurcation and Chaos in a Rub-Impact Jeffcott Rotor System, Journal of Sound and Vibration, 210(1), pp. 1-18] (1998)



(a) x - direction vibrations



(b) y - direction vibrations

그림 9 임의의 고장 모드가 적용된 가상의 컴프레서 장비의 진동 신호

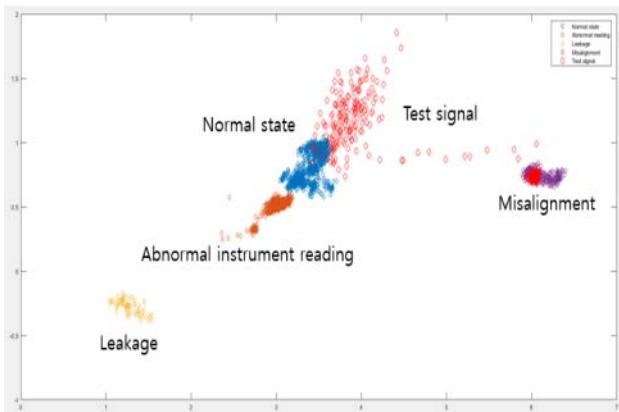


그림 10 가상의 컴프레서 장비의 진동 신호의 패턴 분류 결과

Kim, C.G. Park, K.H. and Chang, D.K. [A Comparison of Artificial Neural Networks and Statistical Pattern Recognition Methods for Rotating Machine Condition Classification, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 16(12), pp. 119–125] (1999)

Huang, N.E. Shen, Z. Long, S.R. Wu, M.C. Shih, H.H. Zheng, Q. Yen, N.C. Tung, C.C. and Liu, H.H. [The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis, Proceedings of the royal society of London, vol 454, pp. 903–995] (1998)

Peng, Z.K. Chu, F.L. and Tse, Peter W. [Detection of the Rubbing-Caused Impacts for Rotor-Stator Fault Diagnosis Using Reassigned Scalogram, Mechanical System and Signal Processing, 19, pp. 391–409] (2005)

Peng, Z. HE, Y. Lu, Q. and Chu, F. [Feature Extraction of the Rub-Impact Rotor System by Means of Wavelet Analysis, Journal of Sound and Vibration, 259, pp. 1000–1010] (2003)

Bae, Y.C. Lee, H. and Kim, Y.H. [Current and Vibration Characteristics Analysis of Induction Motors for Vertical Pumps in Power Plant,

Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 16(4), pp. 404–413] (2006)



이 장 현

- 1969년생
- 1999년 서울대학교 조선해양공학과 공학박사
- 현 재 : 인하대학교 조선해양공학과 정교수
- 관심분야 : PHM, CBM, 고장 진단 시스템, 곡면 가공 시스템, Smart ship, 열전달, FEM
- 연 락 처 : ***-****-****
- E - mail : jh_lee@nha.ac.kr



황 세 윤

- 1980년생
- 2015년 인하대학교 조선해양공학과 공학박사
- 현 재 : 주식회사 마리모이엔지 대표
- 관심분야 : PHM, CBM, 고장 진단 시스템, 구조 강도 평가, 슬로싱 강도평가
- 연 락 처 : ***-****-****
- E - mail : seyun.hwang@gmail.com



홍 규 택

- 1991년생
- 2016년 인하대학교 조선해양공학과 학사
- 현 재 : 인하대학교 조선해양공학과 석사과정
- 관심분야 : CBM, 고장 진단 알고리즘, 선체 외판 가공 시스템
- 연 락 처 : ***-****-****
- E - mail : hongkyutack@gmail.com

대한조선학회지 칼럼 필진 모집

대한조선학회지 칼럼 투고를 환영합니다.

다양한 주제의 원고 투고 부탁드립니다.

원고 접수 : editor@snak.or.kr