

회전기계 이상 진단을 위한 로터 다이내믹스 시뮬레이션 시스템 연구

최현준¹, 이승주¹, 김세원², 김영석^{1*}

¹한국건설기술연구원 남북한인프라특별위원회, ²한국건설기술연구원 지반연구본부

A Study on Rotor Dynamics Simulation System for Fault Diagnosis of Rotating Machinery

Hyun-Jun Choi¹, Seungjoo Lee¹, Sewon Kim², YoungSeok Kim^{1*}

¹Korean Peninsula Infrastructure Special Committee, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요약 최근 현대산업의 발전과 더불어 기계의 사용은 더욱 증가하였고, 기계의 예상치 못한 고장은 공정 및 생산 중단으로 이어지기 때문에 정확하고 신속한 상태 진단은 중요한 요소로 부각되고 있다. 전체 기계의 약 90%가 유도 전동기, 즉 회전기계로 구성되기 때문에 회전기계에 대한 고장 진단(fault diagnosis)은 특히 중요하다. 일반적으로 회전기계의 고장은 오정렬, 불균형, 균열 등 기계적 결함에 의한 고장의 비율이 가장 크고, 진동 및 소음의 형태로 나타난다. 본 논문에서는 실제 운영 중인 회전기계에 대한 1D 해석모델을 구축하였으며, 회전축 축편심 및 각편심, 불균형 고장 조건에 대한 로터 다이내믹스(rotor dynamics) 시뮬레이션을 수행하였다. 주파수 스펙트럼 분석을 통해 고장 원인 별 진동 특성을 분석하였으며, 고장 원인에 따라 특정 주파수에서 진폭이 증가됨을 확인하였다. 제안된 로터 다이내믹스 시뮬레이션 시스템은 이상 진동 데이터가 없는 회전기계 구축 초기단계에서 고장 상태의 진동 특성을 구축하고, 이를 통해 기계의 고장 진단 및 고장 원인 평가가 가능할 것으로 기대된다.

Abstract With recent advancements in industrialization, the use of machinery has significantly increased. Unforeseen faults of machinery can lead to process interruptions and production halts, making accurate and rapid condition diagnosis crucial. Approximately 90% of all machinery consists of induction motors, which are rotating machines. Therefore, fault diagnosis for rotating machinery is particularly important. Failures in rotating machinery are primarily attributed to mechanical defects such as misalignment, unbalance, and cracks, and they manifest in the form of vibrations and noise. In this paper, a 1D numerical model was developed for operating rotating machinery. Rotor dynamics simulations were conducted to assess conditions involving parallel misalignment, angular misalignment, and unbalance faults. Through frequency spectrum analysis, vibration characteristics were analyzed according to the root causes of faults, with an observed increase in amplitude at specific frequencies depending on the fault type. The proposed rotor dynamics simulation system is expected to be valuable in the initial stages of constructing rotating machinery, especially when abnormal vibration data is not available. Also, it enables the establishment of vibration characteristics associated with fault conditions, facilitating the diagnosis of machinery faults and the evaluation of their root causes.

Keywords : Diagnosis, Fault, Rotating Machinery, Rotor Dynamics, Vibration

본 논문은 2023년도 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2021-KA161932, AI 기반 가스·오일 플랫폼 운영·유지관리 핵심기술 개발).

*Corresponding Author : YoungSeok Kim(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

email: kimys@kict.re.kr

Received October 11, 2023

Revised December 5, 2023

Accepted December 8, 2023

Published December 31, 2023

1. 서론

산업현장에서 사용되고 있는 기계설비에 대한 상태 감시와 고장 진단 기술은 1970년대부터 급격하게 발전되었다[1]. 특히, 회전기계의 경우 정렬 불량, 불평형, 균열 발생 및 베어링 결함 등으로 인해 진동과 소음이 발생하기 때문에 진동 신호는 회전기계의 고장진단에 주로 사용되고 있다[2-6].

회전기계는 대부분의 설비에서 핵심 구동부에 해당하므로 운전 신뢰도가 특히 중요하다. 따라서 운전 중 진동을 감시하여 진동에 의한 설비의 고장을 감지함은 물론 진동문제를 예방할 수 있도록 진동에 대한 세밀한 분석이 필요하다. 회전기계는 결함이 발생되면 특정한 주파수 영역에서 이상 진동 및 소음이 발생되며, 진동 분석을 위하여 주파수 영역으로의 변환 과정이 필요하다[7,8].

회전기계의 진단에 있어서 주파수 스펙트럼 분석은 현재 가장 널리 사용되고 있는 기법으로, 주파수 스펙트럼은 푸리에(fourier)로 구할 수 있다[9,10]. 고속 푸리에 변환은 어떤 주기적인 시간 함수도 0 Hz의 주파수에서 시작하고 기본주파수의 정수배에 대한 \sin 과 \cos 함수의 무한합과 같다는 가정에서 시작된다. 회전기계의 진동신호는 여러 부품들의 진동이 합성되어 나타나고 각 부품들의 진동은 가진력 주파수와 고유진동수에 의하여 일정한 주파수를 나타낸다. 푸리에 변환을 통하여 합성된 진동 신호를 각 부품의 진동 신호로 분리할 수 있기 때문에 각 부품의 진동 특성을 분석하여 고장을 진단할 수 있다.

기존에 진동 분석을 통한 기계의 상태를 진단하는 연구들은 회전기계에서 발생하는 진동 신호에서 노이즈 성분을 제거한 고장진단 모델 개발[11], 압축기로부터 수집된 진동 신호에 대한 웨이블릿 변환을 통한 진동 특성 추출[12], 압축기에서 발생하는 진동과 유체의 맥동 때문에 발생하는 진동의 고조파 분석[13] 등이 있으며, 대부분 측정된 진동과 소음에 대한 분석을 통해 기계의 상태를 진단하는 연구[14,15]를 수행하였다.

본 연구에서는 로터 다이내믹스 시뮬레이션을 통하여 충분한 이상 데이터가 구축되기 이전이라도 고장 원인별 진동 특성을 분석하여 기계의 상태를 진단할 수 있는 시스템을 구축하고자 하였다. 또한, 주파수 영역에서의 진동 신호를 분석함으로써 고장 원인에 따른 주파수 응답을 평가하였다.

2. 연구방법

2.1 고장 원인 별 시뮬레이션 인자

본 연구에서는 회전기계의 기계적 고장 원인 중 주요하게 발생하는 세 가지 원인을 고려하여 로터 다이내믹스 시뮬레이션 시스템을 구축하였다.

2.1.1 회전축 축편심

회전축 축편심(parallel misalignment)은 회전축의 중심선이 그것을 고정하는 베어링들을 이은 연결선과 오정렬(offset)이 있는 경우 발생하는 고장으로, 베어링에 발생된 오정렬은 일반적으로 지름 방향과 축 방향으로 큰 진동을 야기한다.

특히, 오프셋 오정렬은 두 커플링 부품 사이에 180°만큼의 위상차를 갖는 지름 방향의 고진폭 진동을 유발한다. 오정렬 문제로 발생된 진동은 지배적으로 회전속도와 같거나 혹은 그 두 배인 진동수(frequency)를 가지며, 위상차 특성을 통해 오정렬 문제와 불균형 문제를 구분할 수 있다.

회전축 축편심에 대한 시뮬레이션 주요 인자는 회전축 중심선으로부터의 회전축 요소 간 오프셋 오정렬이며, x, y 방향값으로 구분된다(Fig. 1).

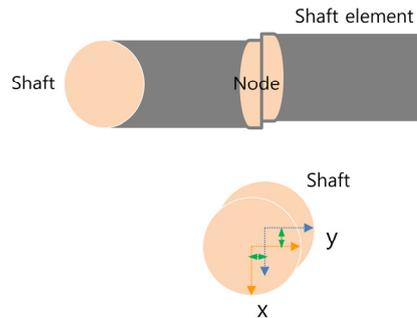


Fig. 1. Fault factors for parallel misalignment simulation

2.1.2 회전축 각편심

회전축 각편심(angular misalignment)은 회전축의 중심선이 베어링 지지에 대한 문제로 0°가 아닌 각도를 이룬 경우로 각도 오정렬은 두 커플링 부품 사이에 180°만큼의 위상차를 갖는 축 방향의 고진폭 진동을 유발한다.

회전축 각편심의 시뮬레이션 주요 인자는 회전축 중심선에 대한 회전축 요소간의 각도 편차값으로 나타낼 수 있다(Fig. 2).

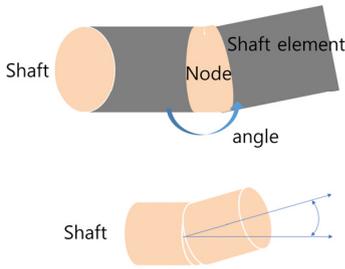


Fig. 2. Fault factors for angular misalignment simulation

2.1.3 불균형

불균형(unbalance)은 질량 중심이 회전 중심과 맞지 않는 상태를 의미하며, 원심력을 발생시켜 회전 속도와 같은 진동수로 높은 진폭의 사인 파형(sinusoidal waveform)을 발생시킨다(Fig. 3).

단단히 고정된 기계에서 지면에 수직방향보다는 수평 방향으로 최대 진폭이 발생한다. 불균형으로 인한 진폭은 회전 속도의 제곱에 비례하여 증가하며, 수평 방향과 수직 방향의 진폭이 90° 만큼 위상차의 차이를 보이는 특징이 있다.

Fig. 3에 나타낸 것과 같이 불균형에 대한 시뮬레이션 주요 인자는 샤프트 무게중심 대비 회전축의 불균형 정도로 정의할 수 있다.

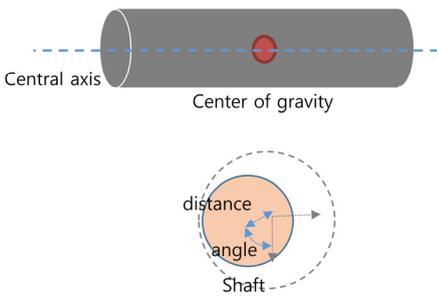


Fig. 3. Fault factors for unbalance simulation

2.2 로터 다이내믹스 모델 구축

회전기계의 고장 종류 별 시뮬레이션을 위하여 실제 플랜트에서 운영 중인 리사이클 가스 압축기(recycle gas compressor)를 대상으로 회전기계 모델링을 수행하였다. 회전자를 구성하는 샤프트를 유연체로 취급하여 1차원 FEM을 수행하는 오픈소스 회전체 동역학 해석 소프트웨어인 ROSS(Rotordynamic Open Source Software)를 활용하여 1D 모델을 구축하였다. 구성요소로 샤프트(shaft), 디스크(disk), 베어링(bearing)이 있

으며, 실제 설비에 대한 재료 물성을 모델에 적용하였다 (Table 1).

Table 1. Material properties by component

Material property		Value	
Shaft	Density (kg/m ³)	7.850	
	Young's modulus (GPa)	217	
	Shear modulus (GPa)	81.2	
	Poisson's coefficient (-)	0.299	
Disk	Mass (kg)	2.6375	
		Moment of inertia (kg·m ²)	0.0075
Bearing	Stiffness (kN/m)	x-dir	950
		y-dir	109,000
	Damping coefficient (N·s/m)	50.4	

고장 위치에 따라 영향을 미치는 샤프트 요소 분할 모델링을 적용하였으며, Fig. 4와 같이 설비 도면을 기반으로 압축기와 터빈으로 구분하였다.

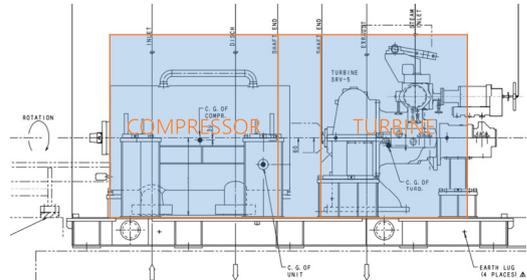
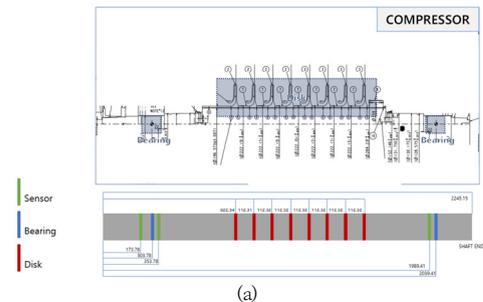


Fig. 4. Drawing of recycle gas compressor

압축기와 터빈에 대한 샤프트, 베어링, 디스크를 모델링하였으며, Fig. 5에 나타낸 바와 같이 도면에 표현된 진동 센서 위치와 동일한 위치에 절점을 설정하여 해석 결과를 추출하였다.



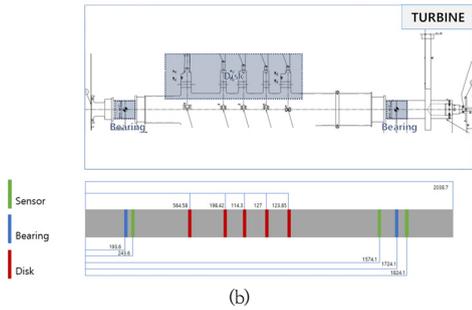


Fig. 5. Location of mechanical components for each facility
(a) Compressor (b) Turbine

압축기와 터빈을 연결하는 플랜지(flange)를 모사하기 위하여 플랜지 위치에 절점을 설정하였고, 플랜지 사이는 별도의 샤프트로 연결하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 실제 설비의 가동조건인 회전 각속도 8,400 rpm 조건에 대하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 해석시간은 5초로 설정하였다. 이 때, 나이퀴스트(nyquist) 이론 및 시뮬레이션 정확도 향상을 위하여 시간 간격(time step)을 0.0001초로 진행하였다.

3.1 로터 다이내믹스 시뮬레이션 결과

로터 다이내믹스 시뮬레이션에 적용된 고장 원인 별 고장 범위를 Table 2에 정리하였으며, 한 번에 한 개의 절점에서 한 개의 고장만 발생하는 조건을 가정하였다. 즉, 동시에 두 개 이상의 고장이 복합적으로 발생하는 조건은 고려하지 않았다.

Table 2. Range by cause of fault

Cause of fault	Value range
Parallel misalignment	0.00005~0.0002 m
Angular misalignment	1.25~5 degree
Unbalance	0.000005~0.00002 kg·m

진동 원인 별 고장 특성을 분석하기 위하여 고장이 없는 정상 상태에 대한 로터 다이내믹스 시뮬레이션을 수행하였으며, 센서 위치 별 해석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 이 때, 센서 번호는 왼쪽에서부터 순서대로 1~6번으로 설정하였다.

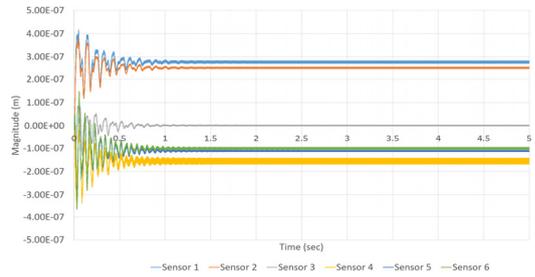


Fig. 6. Simulation results for normal condition

3.1.1 회전축 축편심

회전축 축편심 고장은 베어링과 플랜지에서 주요하게 발생되기 때문에 압축기, 터빈의 베어링과 플랜지(3개 지점)에 대하여 로터 다이내믹스 시뮬레이션을 수행하였으며, 고장 부위와 인접한 센서에 대한 해석 결과를 Fig. 7에 정리하였다. 이 때, 고장 정도에 따른 진동 특성을 평가하기 위하여 3.9651~3.9741초에 대한 해석 결과를 주요하게 분석하였다.

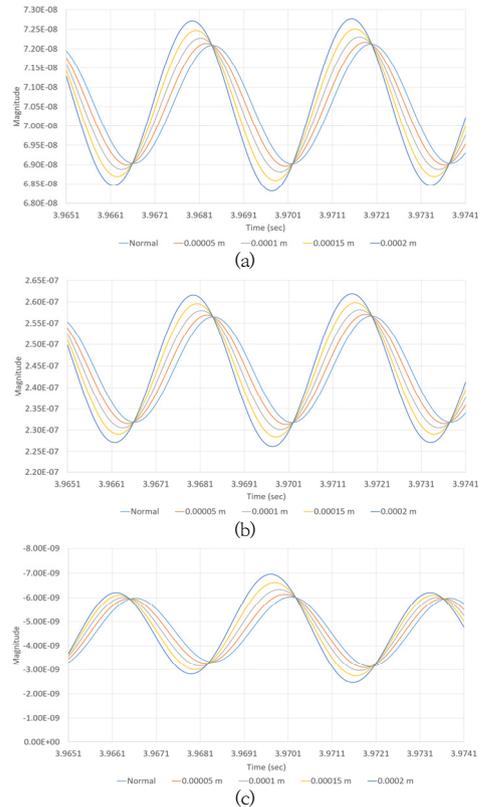


Fig. 7. Simulation results for parallel misalignment fault conditions
(a) Bearing in compressor (b) Bearing in turbine (c) Flange

3.1.2 회전축 각편심

회전축 각편심 고장도 축편심과 동일하게 베어링과 플랜지에서 주요하게 발생되기 때문에 압축기, 터빈의 베어링과 플랜지(3개 지점)에 대하여 로터 다이내믹스 시뮬레이션을 수행하였으며, 해석 결과를 Fig. 8에 정리하였다.

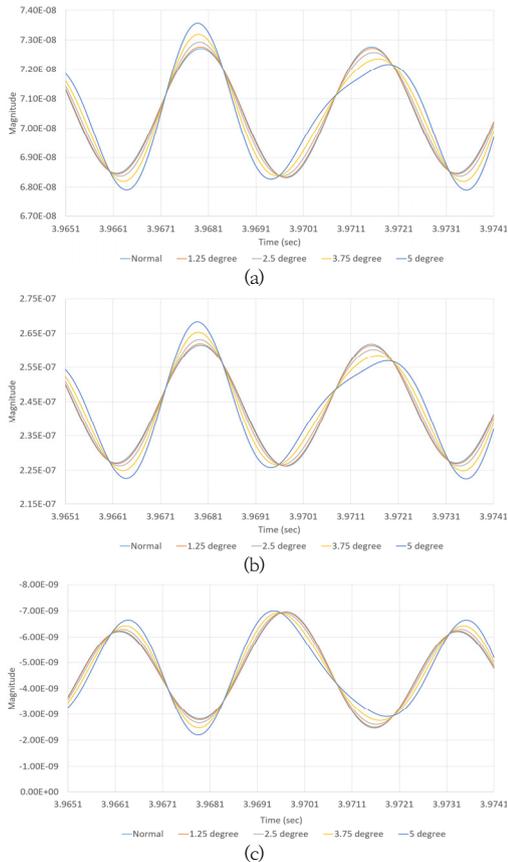


Fig. 8. Simulation results for angular misalignment fault conditions
(a) Bearing in compressor (b) Bearing in turbine
(c) Flange

3.1.3 불균형

불균형 고장은 일반적으로 디스크 위치에서 주요하게 발생되며, 압축기, 터빈의 중심부 디스크(2개 지점)에 대하여 로터 다이내믹스 시뮬레이션을 수행하였다. 고장 위치 별 인접 센서에 대한 해석 결과를 Fig. 9에 정리하였다.

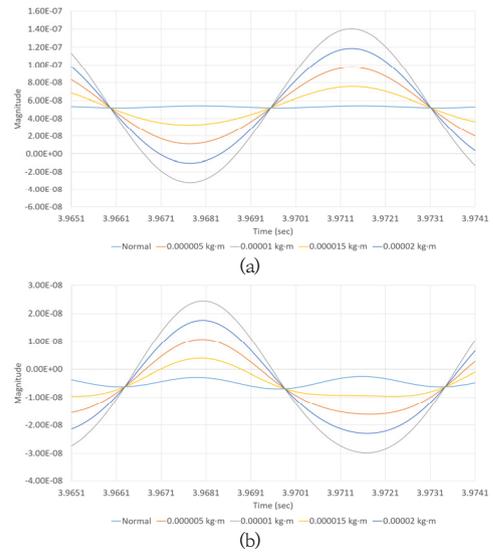


Fig. 9. Simulation results for unbalance fault conditions
(a) Center disk of compressor (b) Center disk of turbine

3.2 고장 원인 별 진동 특성 분석

고장 원인 별 진동 특성을 도출하기 위하여 고속 푸리에 변환(FFT: Fast Fourier Transform, 이하 FFT)을 적용하여 시간 영역의 진동을 주파수 영역으로 변환하여 분석을 수행하였다.

연속적인 변위 아날로그 신호에 대한 FFT를 수행하기 위하여 표본화 과정이 필요하며, 표본화율(sampling rate)은 이산적인 신호를 아날로그 형태의 원 신호로 역 변환하여 복원시킬 때 원 신호의 정보 손실이 없도록 하여야 한다.

나이퀴스트 이론에 의하면 취득하고자 하는 주파수 대역의 최대 주파수의 2배에 해당하는 빈도로 표본화를 수행해야 원하는 주파수 정보로 변환이 가능하다고 알려져 있다[16]. 따라서 본 연구에서 적용한 회전 각속도인 8,400 rpm에 대한 표본화 과정을 위하여 280 Hz의 표본화율이 필요하며, 이는 0.00357초의 표본간격(sampling interval)이 필요함을 의미한다.

표본간격 0.003초를 적용하여 표본화를 수행하였으며, 해석 초기의 과도 상태(transient)를 제외하고 3.771~5초 구간의 4,096(2^{12})개의 데이터로 FFT를 수행하였다(Fig. 10).

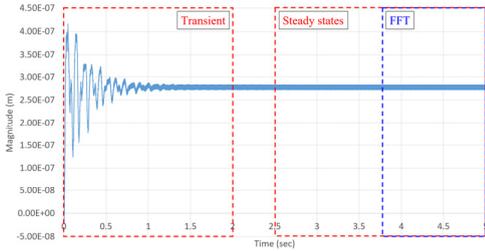


Fig. 10. Transient and steady states

FFT 수행 결과, 회전 각속도 8,400 rpm에 따라 침두 주파수(peak frequency) 간격은 140Hz로 분석되었다. 고장 원인 별 FFT 결과를 Figs. 11~13에 정리하였다.

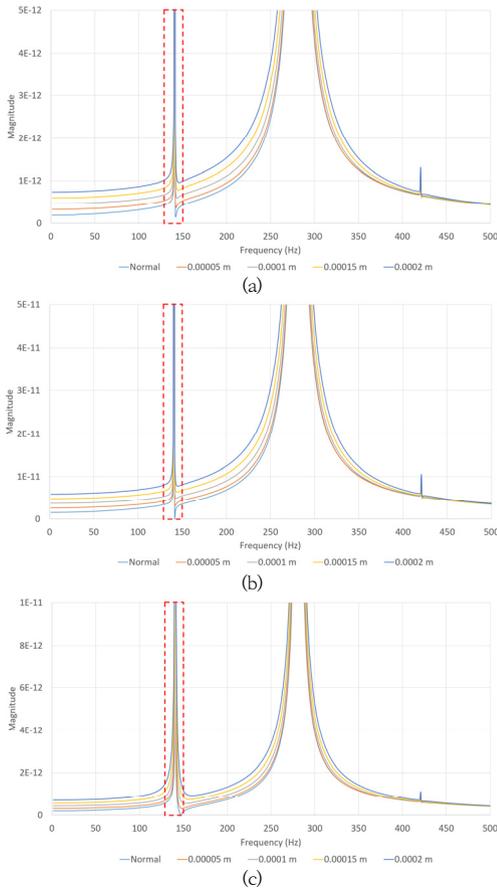


Fig. 11. FFT results for parallel misalignment fault conditions
(a) Bearing in compressor (b) Bearing in turbine
(c) Flange

회전축 축편심에 대한 FFT 수행 결과, 세 지점 모두 첫 번째 침두 주파수인 140 Hz에서 축편심 정도가 증가

할수록 진폭이 증가하는 것으로 분석되었다.

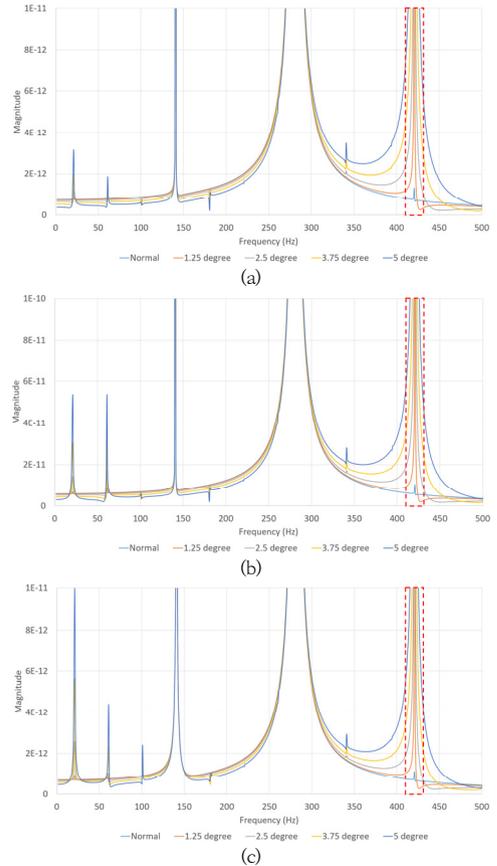


Fig. 12. FFT results for parallel misalignment fault conditions
(a) Bearing in compressor (b) Bearing in turbine
(c) Flange

회전축 각편심에 대한 FFT 수행 결과, 세 지점 모두 세 번째 침두 주파수인 420 Hz에서 각편심 정도가 증가 할수록 진폭이 증가하는 것으로 분석되었다.

불균형에 대한 FFT 수행 결과, 두 지점 모두 첫 번째(140 Hz)와 세 번째(420 Hz) 침두 주파수에서 불균형 정도가 증가할수록 진폭이 증가하는 것으로 분석되었다.

FFT 분석 결과, 고장 원인에 따라 특정 주파수에서 진폭이 증가되는 것으로 평가되었다. 이는 회전기계에 대한 진동 감시 중 특정 주파수에서 이상 진폭이 발생 될 경우 고장 원인 및 부위를 진단할 수 있음을 의미한다.

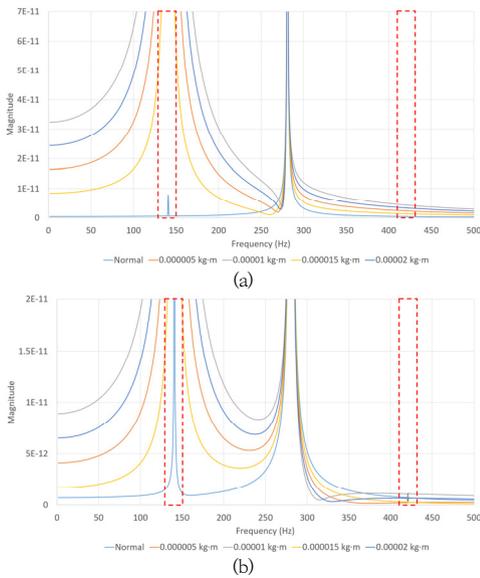


Fig. 13. FFT results for unbalance fault conditions
(a) Center disk of compressor (b) Center disk of turbine

3.3 로터 다이내믹스 시뮬레이션 시스템

본 논문에서는 회전기계 고장 진단을 위한 로터 다이내믹스 시뮬레이션 시스템을 Fig. 14와 같이 제안하였다. 일반적으로는 진동의 상한치와 하한치를 기준으로 이상 진동이 발생한 경우 설비를 점검함으로써 유지관리를 진행한다. 로터 다이내믹스 시뮬레이션 시스템은 이상 데이터가 없는 설비 구축 초기단계에도 매개변수해석을 통해 고장 원인 별 진동 특성을 도출함으로써 이상 진동이 발생한 경우 고장 원인을 분석하고 적절한 조치를 취할 수 있도록 한다. 즉, 이상 진동이 발생하면 이상 진동에 대한 FFT를 통해 어느 주파수 영역에서 진폭이 증가하였는지 분석할 수 있고, 고장 원인 별 진동 특성(로터 다이내믹스 해석 결과)에 따라 고장 원인을 도출할 수 있다. 예를 들어 본 논문에서 모델링한 리사이클 가스 압축기에 이상 진동이 발생하여 FFT를 수행하였을 때, 140 Hz에서 진폭이 증가하였다면 회전축 축편심 고장이 발생한 것으로 분류할 수 있다.

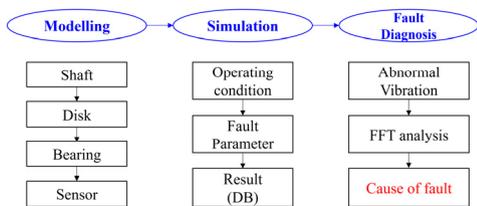


Fig. 14. Rotor dynamics simulation system

운전 중에 확보되는 실제 이상 데이터를 통해 시뮬레이션 결과 검증 및 고도화가 가능하며, 고장 원인 분류를 위한 AI 모델 구축 시 학습 및 검사(train and test) 데이터로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 논문에서는 실제 가동 중인 설비에 대한 1D 로터 다이내믹스 모델을 구축하고, 주요 기계적 결합에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 해석 결과를 통해 고장 원인 별 진동 특성을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실제 플랜트에서 운영 중인 리사이클 가스 압축기를 대상으로 1D 로터 다이내믹스 모델을 구축하였으며, 설비의 가동조건을 고려하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이 때, 고장 원인 별 진동 특성을 분석하기 위하여 회전기계에서 주로 발생하는 기계적 결합인 회전축 축편심 및 각편심, 불균형을 시뮬레이션 인자로 설정하였다.
2. 로터 다이내믹스 시뮬레이션 결과, 시간 영역에서는 육안으로 고장 원인 별 진동 특성을 분석하기 제한적이었고, 고속 푸리에 변환을 통해 주파수 영역에서 진동 특성을 분석하였다. 고장 원인에 따라 특정 주파수에서 고장 정도가 증가할수록 진폭이 증가하였고, 축편심 고장은 140 Hz, 각편심 고장은 420 Hz, 불균형 고장은 140 Hz와 420 Hz의 첨두 주파수에서 진폭 증가가 분석되었다.
3. 분석 결과를 바탕으로 회전기계 고장 진단을 위한 로터 다이내믹스 시뮬레이션 시스템을 도출하였다. 시뮬레이션 시스템을 통해 고장 원인 별 진동 특성을 도출할 수 있고, 이상 진동 발생 시 고장 원인을 분석함으로써 합리적인 설비 건전성 평가가 가능할 것으로 기대된다.

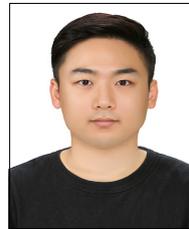
References

- [1] J. L. An, *Failure diagnostics of rotating machinery using artificial neural networks*, Ph.D dissertation, Pukyong National University, Busan, Korea, pp.1-3, 2002.
- [2] H. S. Han, "Development of a web-based vibration analysis system for a rotary compressor", *Korean Journal of Computational Design and Engineering*, Vol.8, No.3, pp.175-183, Sep. 2003.

- [3] F. Al-Badour, M. Sunar, L. Cheded, "Vibration analysis of rotating machinery using time-frequency analysis and wavelet techniques", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.25, No.6, pp.2083-2101, Feb. 2011.
DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ymssp.2011.01.017>
- [4] B. Kumar, G. Diwakar, M. R. S. Satynarayana, "Determination of unbalance in rotating machine using vibration signature analysis", *International Journal of Modern Engineering Research*, Vol.2, No.5, pp.3415-3421, Oct. 2012.
- [5] C. Li, R. V. Sanchez, G. Zurita, M. Cerrada, D. Cabrera, "Fault diagnosis for rotating machinery using vibration measurement deep statistical feature learning", *Sensors*, Vol.16, No.6, pp.895, Jun. 2016.
DOI: <http://doi.org/10.3390/s16060895>
- [6] S. I. Kim, Y. Noh, Y. J. Kang, S. Park, B. Ahn, "Fault classification model based on time domain feature extraction of vibration data", *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol.34, No.1, pp.25-33, Feb. 2021.
DOI: <http://doi.org/10.7734/COSEIK.2021.34.1.25>
- [7] H. C. Lin, Y. C. Ye, B. J. Huang, J. L. Su, "Bearing vibration detection and analysis using enhanced fast fourier transform algorithm", *Advances in Mechanical Engineering*, Vol.8, No.10, pp.1-14, Oct. 2016.
DOI: <http://doi.org/10.1177/1687814016675080>
- [8] O. Jeon, *Development of ΔT variable FFT algorithm for low-cost continuous fault monitoring system for unspecified motors*, Master's thesis, Incheon National University, Incheon, Korea, pp.13-16, 2022.
- [9] G. Betta, C. Liguori, A. Paolillo, A. Pietrosanto, "A DSP-based FFT-analyzer for the fault diagnosis of rotating machine based on vibration analysis", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.51, No.6, pp.1316-1322, Dec. 2002.
DOI: <http://doi.org/10.1109/TIM.2002.807987>
- [10] J. W. Jeong, *A fault diagnosis of bearing using machinery fault simulator*, Master's thesis, Hanyang University, Seoul, Korea, pp.7-14, 2023.
- [11] B. S. Yang, W. W. Hwang, D. J. Kim, A. Tan, "Condition classification of small reciprocating compressor for refrigerators using artificial neural networks and support vector machines", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.19, No.2, pp.371-390, Mar. 2005.
DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ymssp.2004.06.002>
- [12] S. H. Lee, S. M. Ryu, W. B. Jeong, "Vibration analysis of compressor piping system with fluid pulsation", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.26, No.12, pp.3903-3909, Jan. 2012.
DOI: <http://doi.org/10.1007/s12206-012-0891-8>
- [13] J. Ko, J. Jung, M. Kim, H. Kong, B. Youn, "Noise robust fault diagnosis technique to simultaneously learn classification and denoising", *Proceeding of The Korean Society of Mechanical Engineers*, KSME, Jeongseon, Korea, pp.165-167, Dec. 2018.
- [14] Y. B. Lee, C. H. Kim, "A study on real and rotor dynamics for high-pressure turbo pump", *The KSFJ Journal of Fluid Machinery*, Vol.7, No.3, pp.70-75, Jun. 2004.
DOI: <http://doi.org/10.5293/KFMA.2004.7.3.070>
- [15] A. Lee, "Journal bearing design retrofit for process large motor-generator - Part I: Bearing performance analysis", *Journal of the KSTLE*, Vol.28, No.5, pp.197-202, Dec. 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.9725/kstle-2012.28.5.197>
- [16] J. Lee, D. Kim, K. Kwon, Y. Yoon, "Recommendation of adequate sampling rate for drop weight impact test with application of Nyquist's sampling theorem", *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.15, No.3, pp.61-67, Jun. 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.9798/KOSHAM.2015.15.3.61>

최 현 준(Hyun-Jun Choi)

[정회원]



- 2012년 8월 : 고려대학교 건축사 회환공공학과 (공학사)
- 2019년 8월 : 고려대학교 건축사 회환공공학과 (공학박사)
- 2018년 12월 ~ 2021년 12월 : (주)동명기술공단종합건축사사무소 대리

- 2022년 1월 ~ 2022년 12월 : 한국건설기술연구원 남북한인프라특별위원회 박사후연구원
- 2022년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 남북한인프라특별위원회 수석연구원

<관심분야>

지반공학, 인공지능

이 승 주(Seungjoo Lee)

[정회원]



- 2015년 8월 : 강원대학교 지역건설공학과 (공학사)
- 2016년 7월 ~ 2018년 7월 : (주)아이콘택이앤씨 사원
- 2018년 10월 ~ 2023년 2월 : 주식회사스마트지오택 과장
- 2023년 2월 : 강원대학교 지역건설공학과 (공학박사)

- 2023년 3월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 남북한인프라특별위원회 박사후연구원

<관심분야>

농공학, 지반방재공학

김 세 원(Sewon Kim)

[정회원]



- 2003년 8월 : 홍익대학교 토목공학과 (공학사)
- 2009년 8월 : 고려대학교 건축사회환경공학과 (공학석사)
- 2019년 2월 : Texas A&M 토목과(공학박사)

- 2019년 2월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 지반연구본부 박사후연구원

<관심분야>

지반공학, 플랜트엔지니어링

김 영 석(YoungSeok Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 영남대학교 토목공학과 (공학사)
- 2002년 3월 : (일본) Osaka University 토목공학과 (공학석사)
- 2005년 3월 : (일본) Kyoto University 사회기반공학과 (공학박사)

- 2005년 4월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 남북한인프라 특별위원회 선임연구위원

<관심분야>

극한지공학, 융복합기술, 플랜트엔지니어링