

로봇 기반 검사 시스템의 공명진동수 예측 및 주파수 응답 특성 분석

정해진*, 이종환**,#

*국립금오공과대학교 컨설팅학과, **국립금오공과대학교 산업공학과

Prediction of Resonance Frequencies and Analysis of Frequency Response Characteristics in a Robot-Based Inspection System

Hae-Jin Jeong*, Jong-Hwan Lee**,#

*Department of Consulting, Kumoh National Institute of Technology,

**Department of Industrial Engineering, Kumoh National Institute of Technology

(Received 05 February 2026; received in revised form 22 February 2026; accepted 03 March 2026)

ABSTRACT

This study investigates vibration behavior observed in a robot-based inspection system and assesses its response characteristics under different operating and structural conditions. Triaxial accelerometers were installed at the robot base and key locations of the inspection unit, and frequency response function (FRF) analysis was conducted. The results reveal pronounced vibration amplification within a certain low-frequency band, which is attributed to structural resonance of the inspection unit. The analysis suggests that the dominant vibration source is associated with structural vulnerability in the inspection unit and its supporting frame rather than the robot itself.

Keywords : Robot-Based Inspection System(로봇 기반 검사 시스템), Resonance Frequency(공명진동수), Frequency Response Function, FRF(주파수 응답 함수), Vibration Analysis(진동 분석), Structural Resonance(구조 공명)

1. 서 론

최근 전자 및 디스플레이 제조 공정에서는 검사 공정의 자동화와 정밀도 향상을 위해 로봇 기반 비전 검사 시스템의 적용이 확대되고 있다. 이러한 검사 시스템은 높은 반복 정밀도를 요구하기 때문에, 구조물에서 발생하는 미세 진동도 검사

결과의 신뢰성에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 특히 구조물의 고유진동수와 외부 가진 주파수가 일치할 경우 공명 현상이 발생하여 진동 응답이 크게 증가하며, 이는 검사 불량률의 주요 원인으로 작용할 수 있다.

현장에서는 검사 불량률의 원인을 로봇 구동 진동으로 판단하는 경우가 많으나, 실제로는 로봇 구동 여부와 관계없이 특정 저주파 대역(예: 40 ~ 50 Hz)에서 검사가 진동이 증폭되는 사례가 확인되고 있다. 이는 로봇 자체의 영향보다는 검사가

Corresponding Author: shirjei@kumoh.ac.kr

Tel: +82-54-478-7660, Fax: +82-54-478-7679

및 지지 구조물의 고유진동수와 가진 주파수 간 상호작용으로 인해 공진 현상이 유발될 가능성을 보여준다.

기존 연구에서는 산업용 로봇 자체의 진동 특성 분석 또는 개별 구조물의 동특성 평가에 초점을 맞춘 연구가 주로 수행되어 왔다. 또한 일부 연구에서는 특정 장비 또는 단일 구조물에 대한 주파수 응답 특성을 분석한 사례가 보고되었으나, 실제 생산 환경과 같이 로봇, 검사기, 지지 구조물이 결합된 복합 구조 시스템에서의 진동 전달 및 공명 특성을 종합적으로 분석한 연구는 상대적으로 제한적이다.

특히 기존 연구의 대부분은 특정 장비의 진동 크기 평가 또는 제한된 주파수 대역에서의 응답 분석에 초점을 두고 있으며, 입력과 출력 간의 전달 특성을 기반으로 공명 현상을 정량적으로 평가하는 주파수 응답 함수(Frequency Response Function, FRF) 기반 연구는 부족한 실정이다. 또한 검사 공정에서 실제 불량과 밀접하게 연관되는 약 40 ~ 80 Hz 범위의 공진 문제를 실험적으로 규명한 사례는 매우 제한적이다.

구조물의 고유진동수가 외부 가진 주파수와 일치하는 경우 공진이 유발될 수 있으며, 그 결과 진동 응답이 급격하게 증대되는 특성이 나타난다^[1,3].

따라서 본 연구에서는 로봇 기반 검사 시스템을 대상으로 복합 구조 시스템 관점에서 진동 전달 특성을 분석하고, FFT 및 FRF 기반 분석을 통해 특정 주파수 대역에서의 공명 발생 메커니즘을 규명하고자 한다. 특히 입력(Input)과 출력(Output) 간의 주파수 응답 특성을 비교함으로써 검사기 진동 문제의 원인을 구조적 공명 관점에서 해석하고, 산업 현장에서 발생하는 검사 불량 문제와의 연관성을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 시험 대상 시스템

본 연구의 시험 대상은 전자제품 제조 공정의

검사 시스템에 적용된 로봇 기반 비전 검사 시스템이다. 해당 시스템은 산업용 로봇, 로봇 베이스 상부에 설치된 정반 및 테이블, 그리고 검사 대상 영상을 획득하는 카메라 모듈로 구성되어 있다. 검사 공정 중 특정 조건에서 검사 불량(Fail)이 반복적으로 발생함에 따라, 시스템의 공명진동수와 로봇 구동 시 발생하는 가진 주파수 간의 관계를 규명하기 위해 진동 특성 분석을 수행하였다.

2.2 진동 측정 구성

본 연구에서는 로봇 기반 검사 시스템의 진동 특성을 분석하기 위하여 가속도 센서를 이용한 진동 측정을 수행하였다. 가속도 센서는 검사 시스템의 주요 구조물 및 진동 전달 경로 상에 설치되었으며, 입력 신호와 출력 신호를 동시에 계측할 수 있도록 구성하였다.

입력 신호는 로봇 구동에 의해 발생하는 가진 진동 CH1 ~ CH3으로 정의하였으며, 출력 신호는 검사기 구조물에서 응답으로 나타나는 진동 CH5 ~ CH7으로 정의하였다.

Fig. 1은 진동 측정 구성 및 센서 부착 위치를 나타낸다. 정면(X-Z) 및 측면(Y-Z) 방향의 구조적 배치를 명확히 구분하여 각 평면에서의 센서 위치와 진동 전달 경로를 직관적으로 확인할 수 있도록 하였다.

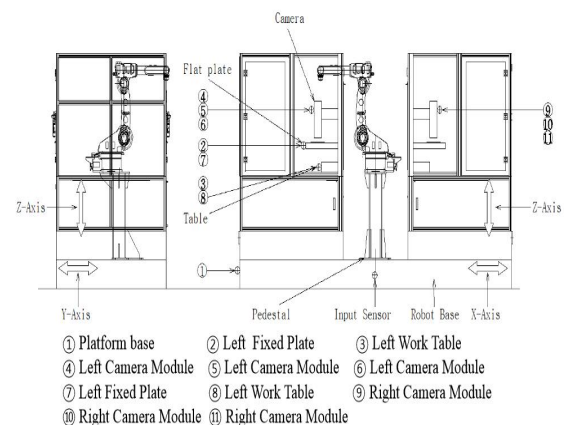


Fig. 1 Vibration measurement configuration and sensor (front view: X-Z plane, side view: Y-Z plane)

2.3 시험 조건 및 Case 정의

시험 조건은 로봇 구동 상태 및 운전 조건을 고려하여 총 11개의 Case로 구성하였다.

각 Case는 로봇의 동작 여부 및 조건에 따라 구분되며, 다양한 운전 환경에서의 진동 특성을 비교 분석할 수 있도록 설정하였다.

또한 각 측정 위치에서 입력 신호(CH1-3)와 출력 신호(CH5-7)를 동시에 계측하여, 입력 대비 출력 응답 특성을 분석할 수 있도록 하였다.

Table 1은 각 시험 Case에 대한 측정 조건 및 입력/출력 채널 구성을 정리한 것이다.

본 연구에서 수행한 구조 보강은 검사기지지 프레임의 X, Y, Z 방향에 보강 브라켓을 추가하고, 체결 강성을 향상시키기 위하여 볼트 체결 토크를 재조정하는 방식으로 수행하였다. 또한 베이스 하부에는 보강 플레이트를 추가 설치하여 국부 강성을

을 증대시켰다.

2.4 신호 처리 및 주파수 응답 분석

본 연구에서는 로봇 기반 검사 시스템에서 발생하는 진동 신호의 특성을 분석하기 위하여, 시간 영역에서 계측된 가속도 신호를 주파수 영역으로 변환하고 이를 기반으로 주파수 응답 특성을 도출하였다. 시간 영역 신호 $x(n)$ 에 대한 FFT는 다음과 같이 정의된다.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn/N}$$

여기서 N 은 샘플 수, k 는 주파수 인덱스를 의미한다^[3].

Table 1 Test cases and operating conditions for evaluating robot base behavior under various actuation states and support structure reinforcement conditions

Case	Input	Output	Condition
1	Robot Base	Platform Base	Robot Actuation
2		Left Fixed Plate	Robot Actuation
3		Left Work Table	Robot Actuation
4		Left Camera Module	Robot Actuation
5		Left Camera Module	Robot Stop
6		Left Camera Module	Robot actuation enabled with support structure
7		Left Fixed Plate	Robot Actuation Enabled with support structure reinforcement along the X, Y, and Z axes
8		Left Work Table	Robot Actuation Enabled with support structure reinforcement along the X, Y, and Z axes
9		Right Camera Module	Robot Actuation Enabled with support structure reinforcement along the X, Y, and Z axes
10		Right Camera Module	Robot halted with support structure reinforcement along the X, Y, and Z axes
11		Right Camera Module	Support structure reinforcement along the X, Y, and Z axes under human-induced floor impact

주파수 응답 함수(Frequency Response Function, FRF)는 시스템의 동적 전달 특성을 주파수 영역에서 정량적으로 평가하는 대표적인 방법으로 널리 사용된다^[2,6]. 본 연구에서는 다음과 같이 정의하였다.

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)}$$

여기서 $X(f)$ 는 입력 신호, $Y(f)$ 는 출력 신호를 의미하며, 가속도 기반 응답 신호를 활용하여 시스템의 동적 특성을 분석하였다. 입력(CH1-3)과 출력(CH5-7) 신호를 이용하여 FRF를 산정하였다. Table 1은 각 시험 Case에 대한 측정 조건 및 입력/출력 채널 구성을 정리한 것이다.

주파수 응답 분석은 10 ~ 156 Hz 범위에서 수행하였다. 해당 주파수 범위는 다음과 같은 기준을 고려하여 설정하였다.

첫째, 사용된 가속도 센서는 10 Hz 이하 주파수 영역에서 노이즈 영향이 증가하여 신뢰성 있는 데이터 확보가 어려운 특성을 가진다.

둘째, 사전 임팩트 테스트 및 예비 실험 결과, 검사 시스템의 주요 고유진동수가 약 20 ~ 120 Hz 범위에 분포하는 것으로 확인되었다.

셋째, 로봇 구동 및 검사 공정 중 발생하는 외부 가진 주파수 또한 해당 범위 내에서 지배적으로 나타나는 것으로 분석되었다.

따라서 센서의 측정 신뢰도, 구조물의 동특성 및 외부 가진 특성을 종합적으로 고려하여 10 ~ 156 Hz 범위를 주파수 응답 분석 구간으로 설정하였다. Fig. 2는 본 연구에서 사용된 검사 시스템의 실험 구성을 나타낸다.

가속도 센서, 데이터 수집 장치(DAQ), 가진원 및 신호 분석 과정을 포함한 전체 실험 구성 및 신호 처리 흐름을 나타낸다. FFT 스펙트럼에서 입력 신호(CH1-3)와 출력 신호(CH5-7)는 각 그래프(Fig. 3 ~ Fig. 13)에 함께 표시되어 있으며, 선 구분을 통해 명확히 구별했으며, 입력 신호(CH1-3)는 색상으로, 출력 신호(CH5-7)는 흑색으로 구분

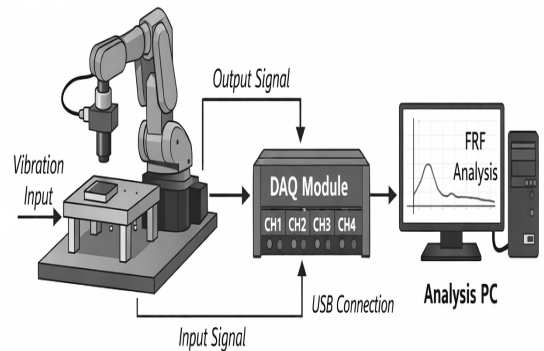


Fig. 2 Experimental setup and signal processing flow for FRF analysis

하여 비교 분석하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

본 장에서는 Fig. 3 ~ Fig. 11에 제시된 각 시험 Case별 X, Y, Z 방향 FFT 분석 결과를 기반으로, 로봇 구동 조건, 구조 보강 여부 및 외부 가진 조건에 따른 주파수 응답 특성을 비교·분석하였다.

각 결과는 해당 Figure에서 관측되는 Peak 주파수 및 진폭 특성을 근거로 해석하였으며, 입력 신호(CH1-3)와 출력 신호(CH5-7)의 응답 차이를 중심으로 공명 발생 여부를 평가하였다.

3.1 방향별 FFT 분석 결과

각 방향(X, Y, Z)에 대한 FFT 결과를 종합적으로 비교한 결과, 거의 모든 시험 조건에서 약 80 Hz 부근에 유사한 Peak 성분이 반복적으로 나타났다. 해당 주파수 성분은 특정 조건에 한정되지 않고 전반적인 시스템 응답에서 반복적으로 나타났으며, 구조물의 지배적 동특성과 연관된 대역으로 판단된다. 방향별 진폭에는 일부 차이가 존재하였으나, 주요 주파수 성분은 유사하게 분포하였으며, 이러한 결과는 시스템 응답이 특정 주파수 영역의 영향 아래에서 형성되고 있음을 보여준다.

특히 Fig. 3의 X 방향 결과와 Fig. 4의 Y 방향 결과에서 80 Hz 부근의 응답이 뚜렷하게 관측되

며, Fig. 5의 Z 방향에서도 동일 주파수 대역에서 유사한 Peak가 확인된다. 이는 시스템의 동적 거동이 특정 주파수 영역의 영향 하에 형성되고 있음을 보여준다.

또한 Fig. 10 및 Fig. 11에서는 출력 신호(CH5-7)가 입력 신호(CH1-3)에 비해 상대적으로 크게 나타나며, 해당 주파수 대역에서 응답 증폭 현상이 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 반면, 일부 Case에서는 출력 응답이 미비하여 검은색 출력선만 두드러지게 보이는 경향이 나타났다.

3.2 로봇 구동 조건에 따른 영향

Fig. 6 ~ Fig. 8은 로봇 구동 조건 변화에 따른 FFT 분석 결과를 나타낸 것이다. 구동 여부에 따라 전체 진폭 크기에는 일부 차이가 발생하였으나, 주요 Peak 주파수는 여전히 약 80 Hz 부근에서 유지되는 것이 확인된다.

예를 들어 Fig. 6과 Fig. 7을 비교하면 진폭의 증감은 존재하지만, 지배적인 주파수 성분의 위치는 변화하지 않는다.

이는 로봇 구동이 새로운 고유 주파수를 형성하기보다 기존 구조 응답을 강화하는 요인으로 작용함을 나타낸다. 따라서 시스템의 주된 진동 특성은 구동 조건보다는 구조적 특성에 의해 결정되는 것으로 판단된다.

3.3 구조 보강 및 외부 가진 영향

Fig. 9 ~ Fig. 11은 구조 보강 및 외부 가진 조건에 따른 FFT 결과를 나타낸 것이다. 구조 보강 이후 일부 진폭 감소 경향이 나타나지만, 약 80 Hz 부근의 주요 Peak는 지속적으로 유지되는 것이 확인된다.

특히 Fig. 10 및 Fig. 11에서는 출력 응답이 입력 대비 크게 나타나며, 특정 조건에서 응답 증폭이 더욱 두드러지는 특성이 관찰된다. 이는 해당 주파수 대역에서 구조 동특성과 외부 가진 간 상호작용에 의해 응답이 증폭될 가능성이 있음을 나타낸다^[1,3].

반면 다른 Case에서는 출력 응답이 상대적으로 미약하게 나타나 입력 대비 응답 증폭이 제한적인 특성을 보였다. Fig. 12와 Fig. 13은 각각 Case 10 및 Case 11 조건에서의 FFT 결과를 나타낸다. 구조 보강 이후 로봇 정지 상태 및 외부 바닥 충격 조건에서도 약 80 Hz 부근의 주요 Peak는 여전히 관측되었다. 특히 인위적 바닥 가진 조건(Case 11)에서도 동일 주파수 대역에서 응답이 집중되는 경향이 나타났으며, 이는 외부 가진 형태와 무관하게 해당 주파수 성분이 구조 고유 특성에 근거함을 나타낸다.

다만 보강 이후에도 주요 Peak 주파수의 이동은 크게 나타나지 않았으며, 이는 보강이 국부적인 강성 증가에는 기여하였으나 시스템 전체의 지배적 동특성을 변화시키기에는 제한적이었음을 시사한다.

3.4 종합 고찰

Fig. 3 ~ Fig. 13의 결과를 종합하면, 전반적인 시험 조건에서 약 80 Hz 부근의 주파수 대역에서 응답 집중 현상이 반복적으로 나타났으며, 이는 시스템 구조 특성에 기인한 지배적 동적 응답으로 해석된다.

한편, 특정 운전 조건(Fig. 10 ~ Fig. 13 해당 Case)에서는 32 ~ 40 Hz 부근에서도 입력 대비 출력 진폭이 상대적으로 크게 증가하는 현상이 관찰되었다.

이는 해당 조건에서 외부 가진과 구조 응답이 상호작용하여 동적 증폭이 발생한 결과로 판단된다. 종합하면, 본 시스템의 진동 현상은 단순한 입력 증대보다는 특정 주파수 대역에 집중된 구조 동특성의 영향과 보다 직접적으로 연결되어 있는 것으로 해석된다.

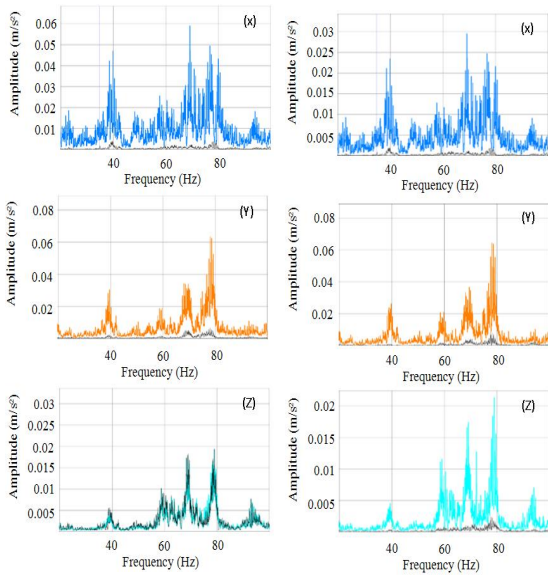


Fig. 3 FFT results of acceleration responses in the X, Y, and Z-directions for Case 1

Fig. 4 FFT results of acceleration responses in the X, Y, and Z-directions for Case 2

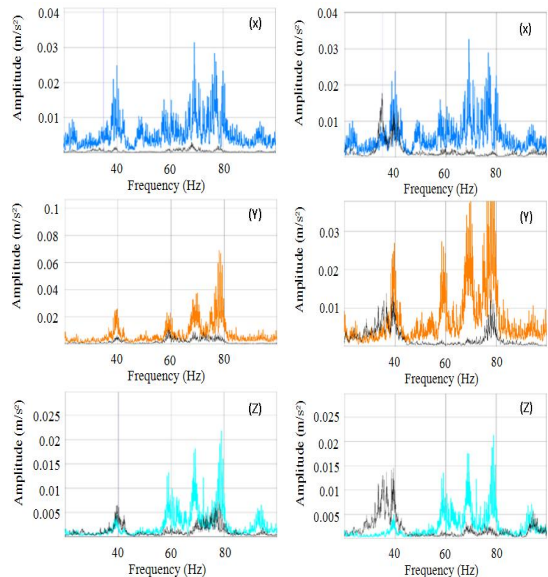


Fig. 5 FFT results of acceleration responses in the X, Y, and Z-directions for Case 3

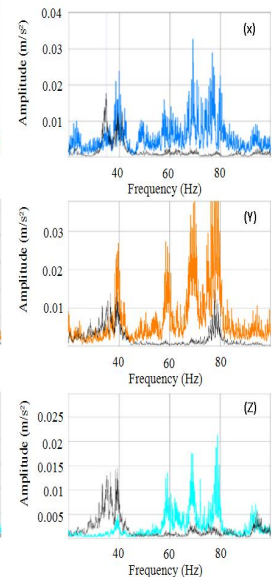


Fig. 6 FFT results of acceleration responses in the X, Y, and Z-directions for Case 4

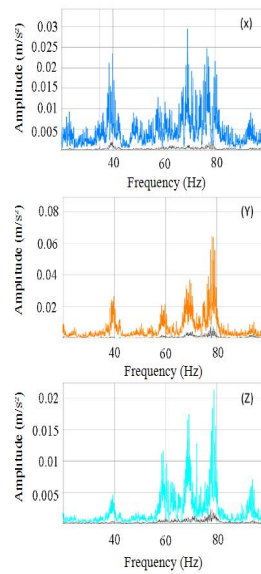


Fig. 7 FFT results of acceleration responses in the X, Y, and Z-directions for Case 5

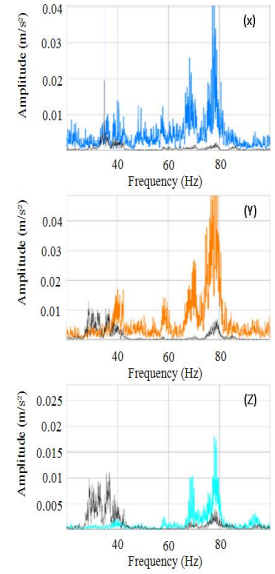


Fig. 8 FFT results of acceleration responses in the X, Y, and Z-directions for Case 6

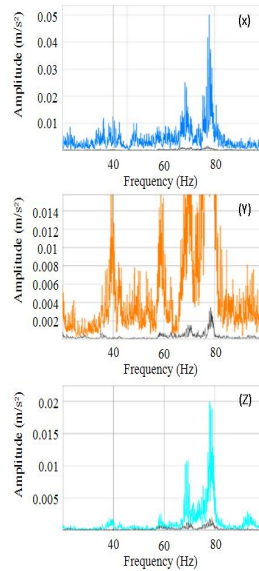


Fig. 9 FFT results of acceleration responses in the X, Y, and Z-directions for Case 7

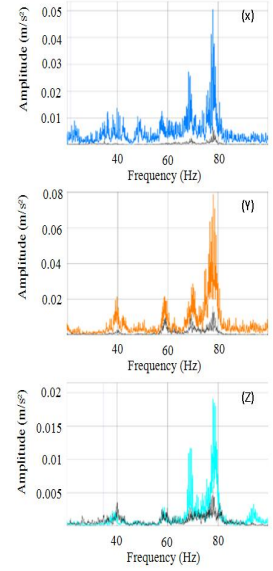


Fig. 10 FFT results of acceleration responses in the X, Y, and Z-directions for Case 8

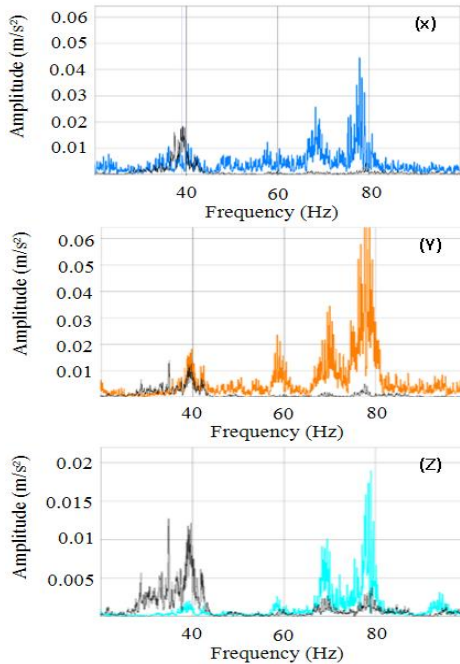


Fig. 11 FFT results of acceleration responses in the X, Y, and Z-directions for Case 9

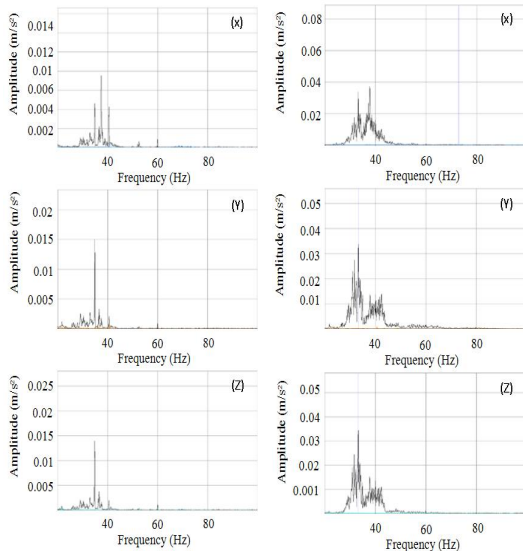


Fig. 12 FFT results of acceleration responses in the X, Y, and Z-directions for Case 10

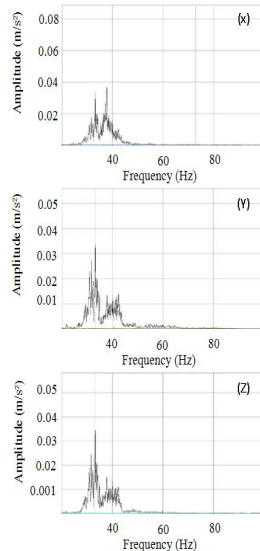


Fig. 13 FFT results of acceleration responses in the X, Y, and Z-directions for Case 11

4. 결 론

본 연구에서는 로봇 기반 검사 시스템의 진동 특성을 분석하기 위해 FFT 및 주파수 응답 함수(FRF)를 이용하여 입력과 출력 간의 주파수 응답 특성을 비교하였다. 이를 통해 시스템의 공명 발생 메커니즘을 규명하고 검사 불량과의 연관성을 분석하였다.

1. 대부분의 시험 조건에서 입력과 출력 간 진폭 차이는 크지 않았으며, 시스템은 전반적으로 안정적인 응답 특성을 유지하였다.
2. 그러나 일부 조건에서는 약 80 Hz 부근에서 출력 진폭이 입력 대비 뚜렷하게 증가하는 현상이 관찰되었으며, 이는 해당 주파수 영역에서 구조 동특성과 외부 가진이 상호작용하면서 동적 증폭 현상이 나타난 결과로 해석된다.
3. 해당 대역에서는 입력 크기와 무관하게 출력 응답이 증대되는 특성이 나타났으며, 이는 시스템의 진동 거동이 외부 가진보다 구조 고유 특성의 영향을 더 크게 받을음을 보여준다.
4. 이러한 경향은 FRF 분석 결과와 일관되게 나타났다으며, 특정 주파수에서 동적 전달 특성이 강화됨을 확인하였다.
5. 종합하면, 본 시스템에서 관찰된 진동 특성은 로봇 구동 조건 자체보다는 구조적 동특성과 밀접하게 연관되어 있으며, 향후 설계 단계에서 공명 주파수 예측 및 회피 설계를 반영하는 것이 진동 저감과 검사 신뢰성 확보에 효과적일 것으로 판단된다.

구조물의 지배적 동특성 영역에 외부 가진이 작용할 경우 진동 응답이 증가할 가능성이 존재하며, 이는 검사 공정의 정밀도와 신뢰성 저하로 이어질 수 있다. 이에 따라 설계 초기 단계에서 주요 동특성을 사전 예측하고 운전 조건과의 상호 연관성을 함께 검토하는 과정이 필요하다.

REFERENCES

1. Inman, D. J., Engineering Vibration, 4th ed., Pearson Education, Boston, 2014.
2. Ewins, D. J., Modal Testing: Theory, Practice and Application, 2nd ed., Research Studies Press, Hertfordshire, 2000.
3. Craig, R. R. and Kurdila, A. J., Fundamentals of Structural Dynamics, 2nd ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2006.
4. Maia, N. M. M. and Silva, J. M. M., "Modal analysis identification techniques," Philosophical Transactions of the Royal Society A, Vol. 359, No. 1778, pp. 29-40, 2001.
<https://doi.org/10.1098/rsta.2000.0712>
5. Allemang, R. J., "The modal assurance criterion- twenty years of use and abuse," Sound and Vibration, Vol. 37, No. 8, pp. 14-23, 2003.
6. Bendat, J. S. and Piersol, A. G., Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 4th ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2010.