

초고속 카메라를 이용한 스페클 패턴 기반 미소 진동 분석

Analysis of Micro-vibrations Based on Speckle Patterns using a High-speed Camera

박태정* · 한성민* · 양희란* · 최장훈**

송준영** · 최성록*** · 이치범†

Taejung Park*, Seongmin Han*, Heeran Yang*, Janghoon Choi**,
June-young Song**, Sunglok Choi*** and Chibum Lee†

(Received January 19, 2024 ; Revised March 17, 2024 ; Accepted March 21, 2024)

Key Words : Vibration Measurement(진동 측정), Low Amplitude(미소 진폭), High Speed Camera(초고속 카메라), Speckle Pattern(스페클 패턴), Steerable Pyramid(스티어러블 피라미드)

ABSTRACT

In this study, we present a method for measuring small amplitude vibrations using a high-speed camera. We project a laser onto an object to generate a speckle pattern that is then magnified using a lens and analyzed using a steerable pyramid. This vibration measurement method allows us to separate and measure vibrations based on the direction of the image. We demonstrated the effectiveness of our method by comparing it with traditional methods that do not generate a speckle pattern. Furthermore, we confirmed the validity of our methodology through frequency comparison experiments with a piezo accelerometer that is commonly used for vibration measurements. This novel approach to vibration measurement methodology can significantly advance research in this field.

기 호 설 명

- A : 이미지의 진폭(amplitude)
- P : 이미지의 위상(phase)
- r : 이미지 스케일 상수
- S : 복원된 신호
- t : 이미지 순서
- x : 이미지의 수평 방향
- y : 이미지의 수직 방향

θ : 필터의 방향

1. 서 론

진동 측정은 공학 분야에서 광범위하게 이용되는 중요한 기술이다. 진동 측정을 통해 기계의 고장 진단, 성능 향상, 구조물의 안전성 평가 등 다양한 분야에서 활용되는 방법으로 진동 측정은 매우 중요한 역할을 한다.

† Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Professor
E-mail : chibum@seoultech.ac.kr

* Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Student

** Digital Science & Structural Analysis Cell, Hyundai Mobis, Principal Research Engineer

*** Department of Computer Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Assistant Professor

A part of this paper was presented and selected as one of best papers at the KSNVE 2023 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor CHAN JUNG KIM

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

구조물은 외부 요인이나 내부 결함으로 인해 진동이 발생할 수 있다. 진동은 구조물의 안전성을 위협할 수 있으며, 측정된 진동 데이터를 통해 구조물의 안전성을 평가할 수 있다. 건축물의 지진에 대한 강도와 안전성을 평가하기 위해 진동 측정이 이용될 수 있다. 또한, 진동 측정은 고장 진단에도 활용된다⁽¹⁾. 기계나 장비의 고장은 종종 진동 변화로 나타날 수 있다. 진동 측정을 통해 기계나 장비의 진동 상태를 모니터링하고, 이상 진동 패턴을 탐지하여 고장 전에 문제를 발견할 수 있다⁽²⁻⁴⁾.

가속도계를 이용한 접촉식 진동 측정이 일반적이지만, 탈부착에 번거로움이 많고, 가속도계의 무게에 따른 mass loading의 문제가 발생할 수 있다⁽⁵⁻⁷⁾. 측정에 사용되는 가속도계의 질량은 시험 구조물의 질량과 함께 고려되어야 하는데, 이는 문제점으로 작용할 수 있다. 일부 연구에서는 센서의 질량이 시험 구조물의 질량에 비해 무시할 수 있다는 가정^(8,9)하에 진행되기도 하지만, 최근의 차량 부품과 같이 경량화된 구조물에서는 무시하기 어려울 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 laser doppler vibrometer(LDV)와 같은 비접촉 변위 센서를 사용하기도 한다. 그러나 이 방법은 큰 비용을 요구하며, 주변 환경에 민감한 단점이 있다.

접촉식 진동 측정 방법의 한계를 극복하기 위한 다양한 대안적인 방법들이 연구되고 있는 가운데, 특히 초고속 카메라를 이용한 진동 측정 방법이 주목받고 있다^(10,11). 이는 구조물의 안전성 평가⁽¹²⁾, 폭발이나 충격 관찰 등에 있어서 중요한 연구 도구의 역할을 하고 있다. 초고속 카메라는 짧은 시간 동안 발생하는 빠른 진동을 정확하게 측정할 수 있어, 이를 통해 진동 현상을 더 자세하게 분석하는 데 큰 도움이 된다. 그러나 측정하고자 하는 물체의 진동 변위가 미세하거나 카메라와 측정 대상 사이의 거리에 따라, 움직임이 카메라에 작게 표현되어 포착하기 어려울 수 있다. 다양한 방법을 통해 초고속 카메라를 이용하여 작은 진동을 측정하는 연구가 진행되고 있다. 육안으로 보이지 않는 움직임을 증폭하여 영상에 선명하게 나타내는 연구가 진행되었다^(13,14). 또한, 초고속 카메라를 여러 개 사용하여 카메라가 바라보는 평면의 진동뿐만 아니라 그에 수직 방향의 진동을 측정하기 위한 연구도 진행되고 있다⁽¹⁵⁾. 픽셀 이하의 작은 움직임을 복원하기 위해 서브 픽셀링 기법을 사용

하여 진동을 측정하는 연구도 진행되었다⁽¹⁶⁻¹⁹⁾. 이러한 연구들은 이미지에 표현되지 않는 미세한 변위를 정밀하게 측정하는 데 도전하고 있다. 그러나 아직 미세한 변위를 정밀하게 측정하는 데는 많은 도전이 남아있다.

이 연구에서는 미세하게 진동하는 물체를 초고속 카메라를 이용한 비접촉 방식으로 측정하는 새로운 방법론을 제안하고자 한다. 기존의 초고속 카메라를 이용한 진동 측정 방법에 더하여, 레이저가 반사되어 발생하는 스펙클 패턴을 렌즈를 이용하여 확대하고, 초고속 카메라로 연속적인 이미지를 촬영하여 steerable pyramid로 분석하는 방법론을 제안하고자 한다. 레이저를 측정하고자 하는 대상에 투영하여 대상에서 반사되는 빛을 초고속 카메라로 촬영하는 방식이다. 이때 초고속 카메라에 사용되는 렌즈를 조절하면 스펙클 패턴을 확대 및 축소할 수 있다. 측정하고자 하는 물체 위에 있는 레이저에 초점을 맞추면 패턴은 작게 형성되지만, 렌즈를 조절하여 초점을 다른 지점에 맞추게 된다면 스펙클 패턴을 확대할 수 있고, 이를 통해 작은 변위의 움직임을 초고속 카메라로 촬영할 수 있다.

2. 영상 기반 진동 분석 연구 배경

2.1 디지털 영상 처리

진동을 복원하기 위해 가장 기본적으로 2D FFT(2D fast Fourier transform)를 사용한다. 2D FFT는 디지털 영상 처리에서 널리 사용되는 방법으로, 일반적인 푸리에 변환과 유사하게 2차원 공간에 있는 이미지를 주파수 도메인으로 신호를 변환하는 과정을 거친다. 이를 통해 각 픽셀의 변화량을 분석할 수 있고, 주파수 성분으로 이미지의 특성을 나타낼 수 있다. 즉, 주파수 도메인에서 나타난 이미지는 일종의 패턴을 표현하는 수단이 될 수 있다. 예를 들어 Fig. 1의 왼쪽 사진에 2D FFT의 결과는 오른쪽 두 개의 사

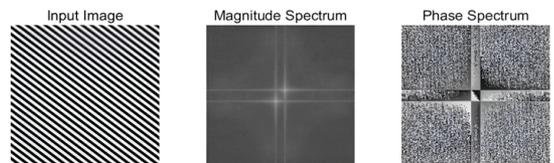


Fig. 1 2D FFT example

진과 같이 주파수 성분의 진폭과 위상으로 나타낸다. 진폭은 주파수의 강도를 의미하며, 위상은 이미지에서 주파수 성분의 위치나 패턴을 나타낸다. 이러한 주파수 도메인을 이용한 분석은 이미지의 주파수 구성 요소를 분석하여 더 많은 정보를 얻을 수 있다.

2D FFT의 또 다른 특징은, 변환된 이미지에서 중심에 가까울수록 저주파 성분을 갖게 된다는 것이다. 표준 테스트 이미지인 barbara 이미지를 통해 확인한다면 다음과 같다. 가장자리의 고주파 성분을 제거해 2D IFFT(2D inverse fast Fourier transform)를 하면 Fig. 2(a)와 같은 저주파 성분의 이미지만 남게 된다. 그 반대인 저주파 성분을 제거한 경우에는 Fig. 2(b)와 같이 줄무늬만 남게 된다.

위 방법을 통해 이미지 내부에 존재하는 다른 정보들을 활용하는 것은, 이미지의 변화를 다양하게 추출하고 이로 인해 미세한 진동까지도 측정할 수 있도록 한다. 이 연구는 움직이는 물체에서 발생한 반사된 일정 패턴의 이미지를 2D FFT로 변환하고 진폭과 위상을 이용하여 정보를 추출하여 진동을 복원하고자 한다.

2.2 Steerable Pyramid

Steerable 필터는 방향성을 지니는 wavelet 함수의 선형 조합으로 이루어지며, 영상 처리에서 특징을 원하는 방향 성분으로 분해할 수 있으며, 이미지 향상과 특징 추출에 사용된다. 이미지 pyramid는 영상 처리에서 영상을 다층으로 서브샘플링하여 공간 스케일에 무관하게 특징을 추출하기 위해 널리 사용된다. 최근에 많은 연구들은 이 둘을 조합한 steerable pyramid를 통하여 2D 영상에서 방향성과 스케일에 무관하게 특징을 찾아내고 이를 활용하여 진동 신호를 추출하는 데 사용된다⁽²⁰⁾.

Steerable pyramid를 이용한 기존 연구 사례에서는

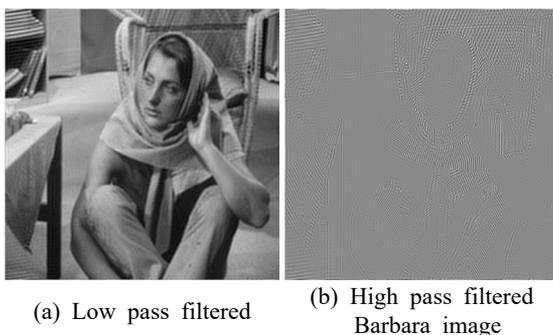


Fig. 2 2D FFT image filtering example

초고속 카메라를 이용해 음압에 의한 진동을 촬영한 뒤 음원을 복원하는 연구를 진행하였다⁽²¹⁾. 기존의 연구에서 음원 복원을 하는 방법은 다음과 같다. 이미지에 2D FFT를 적용하고, 이미지의 위상과 진폭을 분리하였다. 분리한 이미지의 방향을 구분하는 일종의 필터를 적용해 다단계의 피라미드를 구성하여 정보를 추출한다. 그리고 분리한 방향으로의 정보들을 모두 합쳐 진동을 복원한다. 즉, 이미지 내에서 갖는 특성을 2D FFT와 2D IFFT를 이용하여 추출하고 조작하여 해당 이미지에서의 고유한 정보를 측정할 수 있다.

이 연구에서는 steerable 필터가 방향성을 추출할 수 있다는 점에 착안하였다. 기존의 연구⁽²¹⁾에서는 영상에서 진동의 특징을 찾고 이 변화를 확대하기 위해 Fig. 3과 같이 방향별 wavelet 함수를 선형 조합하여 이미지에 적용하였다. 방향 1은 이미지의 가로 방향(x축)의 성분을 추출하는 필터로 사용되고, orientation이 증가함에 따라 시계방향으로 추출하는 성분의 방향이 변하는 것이다. 방향 7은 이미지의 세로방향(y축)의 성분을 의미한다. 이 연구에서는 이를 Fig. 3의 방향 1과 방향 7번만 별도로 처리하여 x, y 방향의 진동을 구분하여 얻을 수 있었다.

3. 스펙클 패턴의 활용

3.1 기존 복원 방식의 한계

기존의 진동하는 대상을 직접 촬영해서 복원하는 방식은 카메라와 렌즈의 WD(working distance)에 영

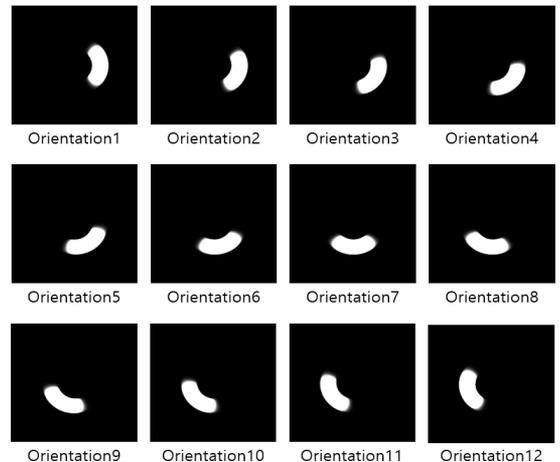


Fig. 3 Steerable pyramid filter

향을 받는다. 렌즈의 설정에 따라 Fig. 4(a)와 같은 가까운 이미지에서는 가진기 위 대상의 진폭이 상대적으로 크게 나타나지만, Fig. 4(b)와 같이 거리가 멀 경우에는 진폭이 작게 나타나기 때문에 진동 복원의 어려움이 있다. 매크로 렌즈를 통해 확대하는 경우에도 미소 진동의 경우 영상 픽셀의 변화가 작은 경우가 많으므로 미소 진동의 경우 관찰하기가 어렵다.

또한 초고속 카메라로 촬영할 시 짧은 노출 시간으로 인하여 광량이 큰 광원이 필요하고, 이를 생각하기 위한 팬의 동작으로 소음과 진동이 발생한다. 이 연구에서는 이러한 한계를 보완하기 위해 작은 진폭을 확대할 수 있고, 분석하고자 하는 방향으로의 진동을 쉽게 파악할 수 있도록 스페클 패턴(speckle pattern)을 사용하기로 하였다. 즉, 기존 연구에서 제시된 steerable pyramid 방식에 스페클 패턴을 추가로 활용해 각 방향별로 미소 진폭을 측정해 복원하는 세분화된 연구를 진행하였다.

3.2 스페클 패턴 특징

스페클 패턴(speckle pattern)은 레이저 포인터의 광원이 물체의 표면 거칠기에 의해 반사되고 산란하면서 형성되는 광학 현상을 의미한다. 이는 레이저가 불규칙한 물체 표면에 닿게 되면, 간섭 현상으로 인하여 일부는 밝고 일부는 어두운 일종의 패턴 형식으로 나타난다. Fig. 5(a)와 같이 스페클 패턴은 무작위한 점들의 패턴으로 이루어져 있다. 스페클 패턴은 입사광에 대한 중요한 정보를 포함한다. 따라서 이러한 스페클 패턴이 투영된 물체를 촬영해서 해당 물체의 진동을 측정할 수 있다.

스페클 패턴은 촬영하는 초점 상태에 따라 다르게 관찰할 수 있다. 초고속 카메라 렌즈의 초점을 물체

에 맞추면, Fig. 5(b)와 같이 일반적으로 우리가 보는 레이저 포인터의 형상과 비슷하게 나타난다. 그러나 렌즈의 초점이 레이저 포인터에 맞춰지지 않는 경우, Fig. 5(a)와 같이 보이도록 확대할 수 있다. 이러한 특징을 활용하여 아주 작은 변위를 갖는 진동의 움직임을 알고리즘상으로 관찰하여 진동을 측정하는 것이 가능하다. 이 연구에서는 스페클 패턴의 특징을 최대한 활용하기 위해 렌즈의 초점을 의도적으로 디포커싱(defocusing)하여 스페클 패턴을 확대하여 촬영하였다.

3.3 측정 장비 구축

스페클 패턴의 특징을 추출하고 촬영하기 위해 Fig. 6과 같은 장비를 구축하였다. 관심 영역(region of interest, ROI) 설정을 통해 약 2000 fps 이상의 이미지 촬영 속도를 지원하는 초고속 카메라 MV-XG51 (Mindvision사, 중국)를 이용해 레이저 포인터를 촬영하였다. 레이저는 4.5 mW, 532 nm 파장을 갖는 녹색 레이저(CPS532, Thorlabs사, 미국)를 사용하였다. 빔 스플리터(PBSW-532R, Thorlabs사, 미국)를 사용하여 레이저를 물체 방향으로 투사하고, 물체에서 스페클 패턴이 생성되고 반사된 빛이 초고속 카메라를 통해 들어와 스페클 패턴이 촬영되도록 하였다. 스페

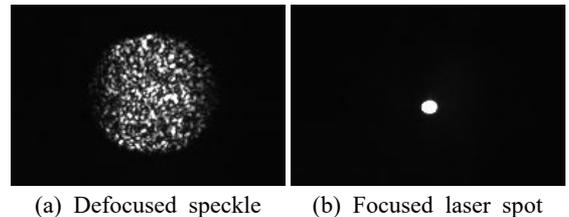


Fig. 5 Speckle pattern

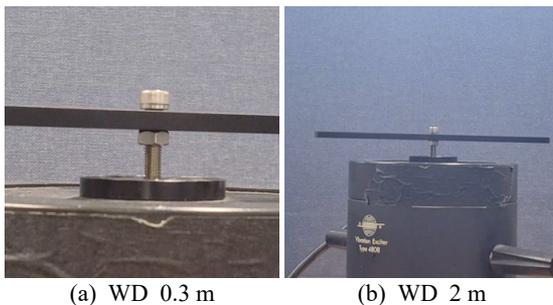


Fig. 4 Steerable pyramid with speckle pattern

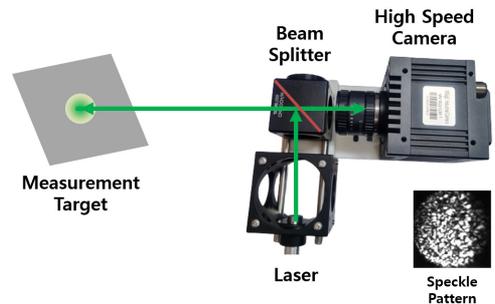


Fig. 6 System description

클 패턴의 디포커싱을 위해 초점 거리가 8 mm인 렌즈(M0814-MP2, Computar사, 일본)를 사용했다.

3.4 진동 복원 과정

이 연구에서 제안한 영상 획득의 과정부터 진동을 추출하는 방법은 다음과 같다. 구축한 측정 장비로 측정 대상 표면에서 반사되는 스페클 패턴의 영상을 얻고, 이를 이미지 여러 개로 나눈 후 steerable pyramid에 적용하였다. 복원하고자 하는 방향으로 필터를 설정해서 각 방향마다의 이미지의 진폭과 위상을 구한다. 위 과정을 통해 이미지에서 발생한 진폭과 위상을 식 (1)의 계산을 통해 진동을 복원한다⁽²¹⁾.

$$S(r, \theta, t) = \sum_{x,y} A(r, \theta, x, y)^2 P(r, \theta, x, y, t) \quad (1)$$

x축, y축으로 구분하여 steerable pyramid를 이용해 복원하는 과정은 Fig. 7과 같다.

여기서 A는 이미지에서 분리한 진폭, P는 이미지

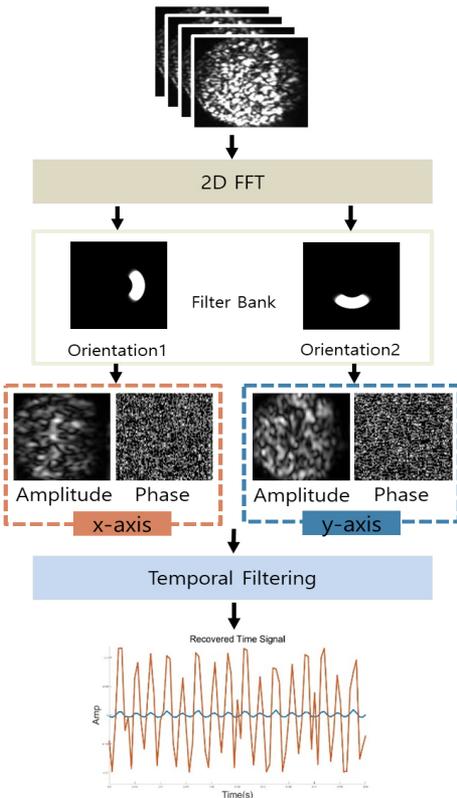


Fig. 7 Steerable pyramid with speckle pattern

에서 분리한 위상이다. 이미지의 모든 수평, 수직 방향 x,y에 대해 필터의 방향 θ 와 이미지 스케일 값 r을 통해 복원된 이미지 S를 생성한다.

4. 실험

이 연구의 제안 방법을 검증하기 위해 세 가지의 실험을 진행하였다. 첫 번째로, 스페클 패턴을 이용해 복원한 진동이 실제 가진기(Vibration Exciter 4808, B&K, 덴마크)에 입력한 진동과 동일한 주파수를 가지고 진동하는지 확인하였다. 두 번째는 x축, y축 방향으로 분리된 진동을 각각 복원했을 때 가속도계의 측정과 동일한 결과를 갖는지 확인하였다. 마지막은 스페클 패턴을 이용하지 않고 물체의 형태를 직접 촬영해 복원하는 방식과 비교해 측정 물체가 미소 진폭일 경우 이 연구에서 제안한 방식이 어떠한 이점을 가지는지 확인하였다.

세 가지 실험 모두 가진기를 사용하였고, Fig. 8과 같이 가진기 상부의 나사 구멍에 M6 볼트를 체결하여 진동을 직접 전달하였다. 이 볼트에 반사 테이프를 부착하였다. 직접 구축한 측정 장비를 통해 Fig. 9와 같이 테이프가 부착된 곳에 1 m 거리에서 레이저

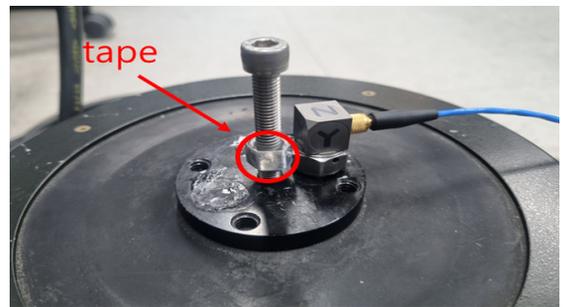


Fig. 8 Shaker and accelerometer



Fig. 9 Experimental environment

를 투영하고 생성된 스페클 패턴을 카메라로 촬영할 수 있도록 하였다.

4.1 가속도계와 스페클 패턴 복원 비교

가진기 위 볼트에서 형성된 스페클 패턴으로 측정된 진동을 검증하기 위해 Piezo 가속도계(Model 356A15, PCB Piezotronics사, 미국)를 사용하였다. 1000 Hz 이하의 주파수를 가진기에 입력하고 가속도계에서 측정된 주파수와 스페클 패턴으로 측정된 주파수를 비교함으로써 이 연구에서 제안한 방법의 정확성과 유효성을 검증하고자 하였다.

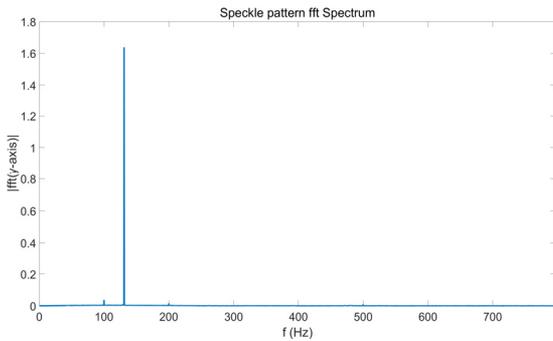
131 Hz를 가진기에 입력하고 가속도계와 스페클 패턴으로 진동을 복원해 FFT(fast fourier transform)를 그래프로 나타낸 결과는 Fig. 10과 같다. Fig. 10(a)는 스페클 패턴을 촬영한 영상을 복원 과정을 거쳐 130.9 Hz가 검출되었고, Fig. 10(b)는 가속도계로 측정된 가진기의 진동을 복원해 131 Hz로 검출된 것을 볼 수 있다. Table 1은 여러 단일 주파수 검출 성능을 확인

하기 위해 131 Hz, 242 Hz, 353 Hz, 464 Hz, 575 Hz, 686 Hz, 797 Hz를 입력한 뒤, 각 주파수를 가속도계와 스페클 패턴으로 측정하고 FFT를 통해 측정된 주파수의 결과이다.

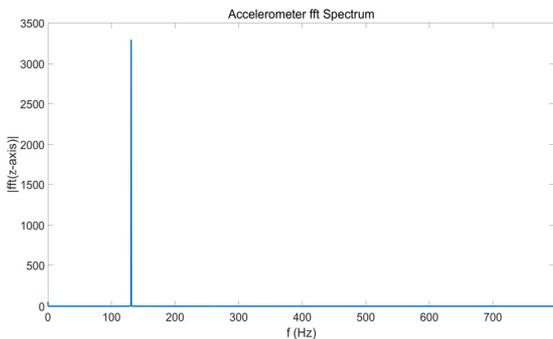
스펙클 패턴을 이용해 측정된 결과와 가속도계를 이용해 측정된 결과를 비교하면 최대 0.0826%의 오차를 갖는다. 그리고 각 Hz에서 측정된 결과에서 볼 수 있듯이 측정 가능한 최대 주파수 부근에서도 1 Hz 이내의 측정 정밀도를 가진다. 이를 통해 카메라를 이용한 진동 측정방식의 정확성, 정밀성 그리고 유효성을 검증하였다.

4.2 X, Y축 진동 측정

Steerable pyramid에서 분리한 x축, y축의 진동을 검증하기 위해 가속도계와 비교하는 실험을 진행하였다. Fig. 11과 같이 촬영된 스페클 패턴의 가로축을 x축으로 하고, 세로축을 y축이라고 지정했다. 가속도계의 x축을 이미지의 x축과 일치시키고, 가속도계의



(a) FFT using speckle pattern at 131 Hz



(b) FFT by accelerometer at 131 Hz

Fig. 10 FFT result using steerable pyramid and accelerometer at 131 Hz

Table 1 Comparison results according to input frequency

Hz	Accelerometer [Hz]	Camera system [hz]	Error rate [%]
131	131.0	130.9	0.0763
242	242.0	241.8	0.0826
353	353.0	352.8	0.0567
464	464.0	463.8	0.0431
575	575.0	574.7	0.0522
686	686.0	685.7	0.0437
797	797.0	796.6	0.0502

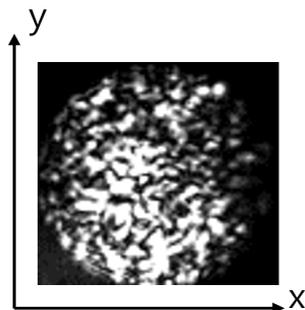


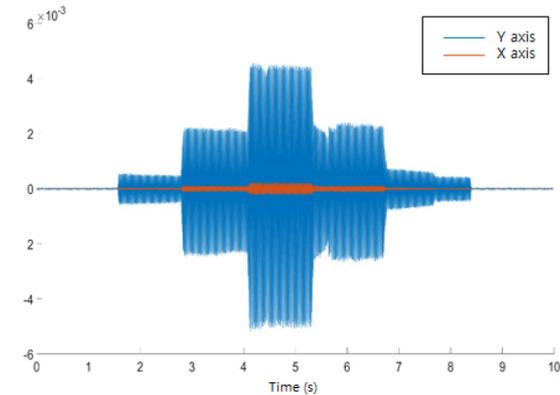
Fig. 11 Axis of the image

z축을 이미지의 y축과 일치하도록 가속도계를 가진기에 부착한 뒤, 가진기 입력의 진폭을 바꾸어 가면서 진폭을 측정하였다.

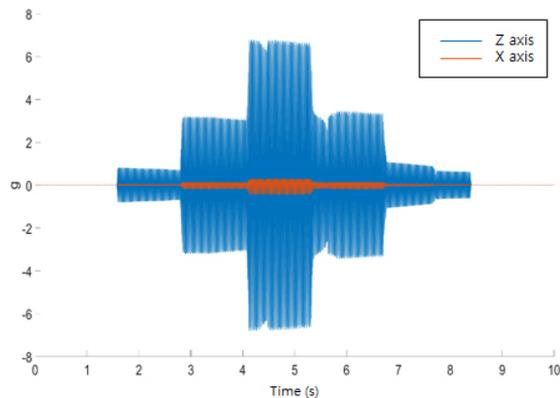
Fig. 12(a)는 스페클 패턴을 이용한 결과로 파란색 선이 y축, 붉은색 선이 x축으로의 픽셀 변위 값을 나타낸다. Fig. 12(b)는 가속도계를 이용한 결과로 파란색 선은 z축, 붉은색 선은 x축으로의 가속도 값을 나타낸다. 가진기에서 y축 방향으로 진동하지만, x축 방향으로도 진동이 발생하는 것을 가속도계에서도 확인할 수 있고, 가속도계와 steerable pyramid에 의한 그래프는 비슷한 형상을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 분리하고자 하는 각 방향으로의 진동 복원이 가능함을 알 수 있다.

4.3 실제 이미지와 스페클 패턴 복원 비교

단일 주파수 복원에 대한 검증 후에 스페클 패턴사



(a) Signal from the speckle pattern images



(b) Signal from the accelerometer

Fig. 12 Axis-separated measurement results

용 유무에 따른 성능을 확인해보고자 비교 실험을 진행하였다. 스페클 패턴을 사용하지 않고 초고속 카메라만을 이용하는 방법은 동일한 카메라에 매크로 렌즈 (MLH-10X, Computar사, 일본)를 이용해 대상을 확대하였다. 또 카메라의 노출 시간이 짧은 특성상 500 W급 할로겐 조명을 이용해 진동하는 물체의 실사 이미지를 촬영할 수 있도록 하였다. 초고속 카메라만을 사용하는 실험환경은 Fig. 13과 같다. Fig. 14는 스페클 패턴을 사용하지 않고 초고속 카메라로 촬영한 가진기 상단에 체결된 볼트의 모습이다. 동일한 환경에서 가진기의 진폭을 조절해 진폭이 큰 경우와 작은 경우를 각각 촬영해 진동을 측정하고, 비교하였다.

실험에서 가진기의 입력으로 드라마 ‘오징어 게임’의 OST인 ‘way back then’을 재생하였다. 해당 신호는 700 Hz 이하로 구성되어 있어 실험에서 사용하는 초고속 카메라로 모두 측정이 가능하였다. Fig. 15는 입력 음원을 short time fourier transform(STFT)로 나타낸 것이다. 그래프를 통해 입력 신호가 약 500 Hz 대역에서 특정 음들이 반복되는 패턴임을 알 수 있다.

동일한 음원을 재생하면서 증폭비를 조절하여, Fig. 16은 최대 1.3 g의 상대적으로 높은 진폭을 갖는



Fig. 13 Experimental environment without speckle pattern

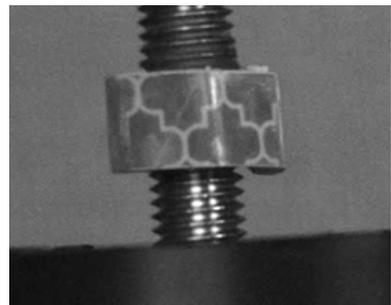


Fig. 14 Captured image with macro lens

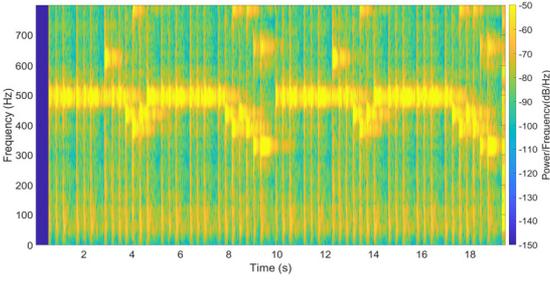
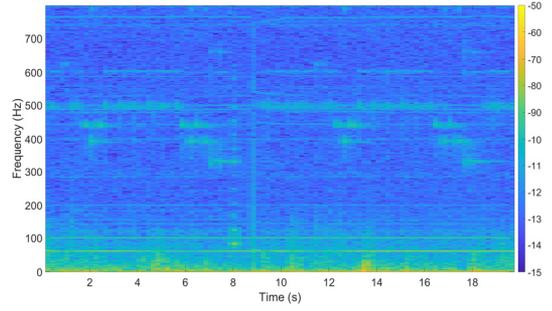
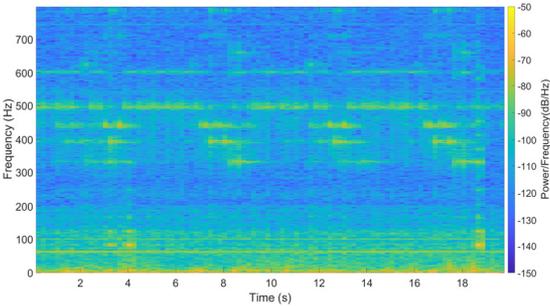


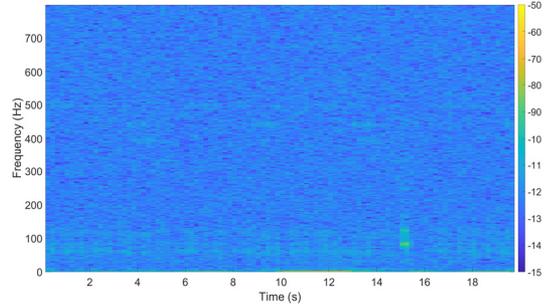
Fig. 15 STFT result of the input signal



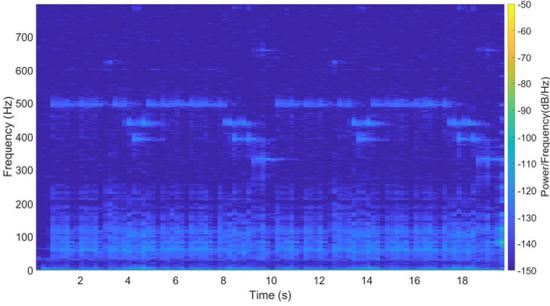
(a) STFT from speckle pattern video



(a) STFT from speckle pattern video



(b) STFT from macro lens video



(b) STFT from macro lens video

Fig. 17 Measurements of vibrations with low amplitude

영한 결과인 Fig. 17에서는 스펙클 패턴을 사용한 결과에서만 주파수 성분이 나타나며, 실사 촬영에서는 노이즈만 나타나는 것을 볼 수 있다.

이를 통해 스펙클 패턴을 이용하면 미소 변위의 진동을 측정함에 있어서는 스펙클 패턴을 이용하지 않는 방식에 비해 상대적으로 유리하다는 것을 입증할 수 있었다.

Fig. 16 Measurements of vibrations with high amplitude

진동을 촬영한 영상을 분석한 결과이고, Fig. 17은 최대 0.3 g의 상대적으로 낮은 진폭을 갖는 진동을 촬영한 영상을 분석한 결과이다. 이때 1.3 g, 0.3 g은 가속도계로 측정된 값이다. 높은 진폭과 낮은 진폭 결과 모두 Fig. 17(a)는 스펙클 패턴을 이용해서 촬영된 영상의 진동을 복원한 결과이고, Fig. 17(b)는 레이저를 사용하지 않고 초고속 카메라만을 이용하여 실사를 촬영한 영상의 진동을 복원한 결과이다. 높은 진폭을 측정된 결과인 Fig. 16에서는 스펙클 패턴의 사용 여부와 관계없이 입력과 유사한 주파수 성분이 측정된 것을 볼 수 있다. 하지만 낮은 진폭을 갖는 진동을 촬영

5. 결 론

이 연구에서는 레이저와 초고속 카메라를 이용하여 물체에서 발생하는 스펙클 패턴을 촬영하고, 이를 steerable pyramid를 활용하여 진동 신호를 측정하는 방법에 대해 설명하였다. 이 방법은 작은 진폭의 진동 측정에 있어서 기존의 방법보다 명확한 이점이 있다는 것을 실험적으로 확인하였다. 주파수 측정 실험을 통해, 가속도계와 같은 기존의 측정 도구와 비교하여 이 새로운 방법론이 유사한 성능을 보여주었다. 이는 비접촉 방식으로 작은 진폭의 진동을 측정하는 새로운 방법론에 대한 중요한 발전으로 볼 수 있다. 이러한 연구 결과는 과학 및 엔지니어링 분야에서 물

체의 진동을 측정하는 데 새로운 방법을 제시하였다 고 할 수 있다.

그러나 아직 극복해야 할 한계점이 존재한다. 하드웨어적인 측면에서는 기존의 접촉식 측정 방식인 가속도계와 비교했을 때, 시스템의 크기에서 큰 차이가 난다. 카메라의 성능에 따라 측정 가능한 최대 주파수가 달라지기 때문에 높은 주파수를 측정하기 위해서는 프레임 속도가 빠른 큰 초고속 카메라를 사용해야 한다. 따라서 협소한 공간에서는 큰 카메라를 이용한 측정이 어려울 수 있다. 또한 스펙클 패턴이 물체 표면에서 반사되어 카메라에 상이 맺히려면 표면이 평면에 가까워야 한다는 제한 사항도 있다. 내부 알고리즘의 측면에서는 steerable pyramid를 이용하면 이미지에서의 진폭과 위상 정보의 변화에 따라 변위가 나타나게 된다. 미소 변위를 찾아내는 장점이 있으나, 진동의 크기를 정확하게 측정하는 것은 어려운 점이 있다.

이런 한계점들을 고려하여, 향후에는 카메라를 이용하여 작은 진폭의 변위를 더욱 정확하게 측정하는 연구가 필요함을 제안한다. 이후에 연구가 진행된다면, 이 방법론의 한계점을 해결하고 더욱 정밀한 비접촉 진동 측정 방법을 개발하는 데 기여할 것으로 기대한다.

References

(1) Lu, S., Zhou, P., Wang, X., Liu, Y., Liu, F. and Zhao, J., 2018, Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Motor Bearings using Undersampled Vibration Signals from a Wireless Sensor Network, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 414, pp. 81~96.

(2) Zhao, D., Wang, T., Gao, R. X. and Chu, F., 2019, Signal Optimization based Generalized Demodulation Transform for Rolling Bearing Nonstationary Fault Characteristic Extraction, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 134, 106297.

(3) Yang, Y., Yang, W. and Jiang, D., 2018, Simulation and Experimental Analysis of Rolling Element Bearing Fault in Rotor-bearing-casing System, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 92, pp. 205~221.

(4) Dolenc, B., Bošković, P. and Juričić, D., 2016, Distributed Bearing Fault Diagnosis based on Vibration Analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 66, pp. 521~532.

(5) Lee, J. Y., 2015, Model Updating in Small Structural Dynamics Model by Elimination of Mass Loading Effect of Accelerometer, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 25, No. 1, pp. 40~47.

(6) Parnell, L. A. and Cobble, M. H., 1976, Lateral Displacements of a Vibrating Cantilever Beam with a Concentrated Mass, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 44, No. 4, pp. 499~511.

(7) Chen, Y., 1963, On the Vibration of Beams or Rods Carrying a Concentrated Mass, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 30, No. 2, pp. 310~311.

(8) Alsaif, K. and Foda, M. A., 2002, Vibration Suppression of a Beam Structure by Intermediate Masses and Springs, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 256, No. 4, pp. 629~645.

(9) Yadav, A. and Singh, N. K., 2020, Investigation for Accelerometer Mass Effects on Natural Frequency of Magnesium Alloy Simply Supported Beam, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 28, No. 4, pp. 2561~2565.

(10) Ehrhardt, D. A., Allen, M. S., Yang, S. and Bebermiss, T. J., 2017, Full-field Linear and Nonlinear Measurements using Continuous-scan Laser Doppler Vibrometry and High Speed Three-dimensional Digital Image Correlation, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 86, pp. 82~97.

(11) Bebermiss, T. J. and Ehrhardt, D. A., 2017, High-speed 3D Digital Image Correlation Vibration Measurement: Recent Advancements and Noted Limitations, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 86, pp. 35~48.

(12) Bregar, T., Zaletelj, K., Čepon, G., Slavič, J. and Boltežar, M., 2021, Full-field FRF Estimation from Noisy High-speed-camera Data using a Dynamic Substructuring Approach, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 150, 107263.

(13) Wu, H.-Y., Rubinstein, M., Shih, E., Guttag, J., Durand, F. and Freeman, W., 2012, Eulerian Video Magnification for Revealing Subtle Changes in the World, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 31, No. 4, pp. 1~8.

(14) Wadhwa, N., Rubinstein, M., Durand, F. and Freeman, W. T., 2013, Phase-based Video Motion Processing, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 32, No. 4, pp. 1~10.

(15) Bebernis, T. J. and Ehrhardt, D. A., 2017, High-speed 3D Digital Image Correlation Vibration Measurement: Recent Advancements and Noted Limitations, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 86, pp. 35~48.

(16) Diamond, D. H., Heyns, P. S. and Oberholster, A. J., 2017, Accuracy Evaluation of Sub-pixel Structural Vibration Measurements through Optical Flow Analysis of a Video Sequence, *Measurement*, Vol. 95, pp. 166~172.

(17) Wang, X., Yu, J., Feng, N. and Zhang, Y. 2021, Improved Subpixel Amplitude Measurement of Canny Operator in Ultrasonic Frequency Vibration, *Proceedings of 2021 7th Annual International Conference on Network and Information Systems for Computers*, pp. 276~281.

(18) Serio, B., Hunsinger, J. J., Teyssieux, D. D. and Cretin, B., 2005, Phase Correlation Method for Subpixel In-plane Vibration Measurements of MEMS by Stroboscopic Microscopy, *Proceedings SPIE 5856, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IV*.

(19) Mas, D., Espinosa, J., Roig, A. B., Ferrer, B. and Perez, J., 2014, Image based Subpixel Techniques for Movement and Vibration Tracking, *Proceedings of the 11th European Conference on Non-destructive Testing (ECNDT 2014)*.

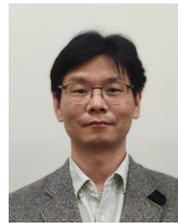
(20) Zhou, M., 2016, Vibration Extraction using Rolling Shutter Cameras, *Doctoral Dissertation, University of Ottawa, Ottawa, Canada*.

(21) Davis, A., Rubinstein, M., Wadhwa, N., Mysore, G. J., Durand, F. and Freeman, W. T., 2014, The

Visual Microphone: Passive Recovery of Sound from Video, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 33, No. 4, pp. 1~10.



Taejung Park received the Bachelor's degree in the Mechanical System Design Engineering from Seoul National University of Science and Technology in 2021. Since 2022, he has been pursuing his Master's degree while conducting various studies on mechanical vibration measurements.



Chibum Lee received his B.S. and M.S. degrees in mechanical design and production engineering from Seoul National University, Seoul, Korea, in 1998 and 2000, respectively. His Ph.D. degree was in mechanical science and engineering from the University of Illinois, Urbana-champaign, IL, USA in 2010. From 2000 to 2005, he was with Hyundai Mobis, Korea as a dynamics and control engineer. He was a control engineer with Samsung information systems America, CA, USA, from 2010 to 2011. Since 2011, he is at Seoul National University of science and technology and currently a full professor. His research interests are dynamic analysis and control of mechanical systems.