

공간 진동 주파수 분포를 이용한 플랜트 배관 진동 감시 기술

Monitoring Plant Piping Vibration through Spatial Frequency Distribution

최영철[†] · 정변영^{*} · 전지현^{**}

Young-Chul Choi[†], Byun-Young Chung^{*} and Ji-Hyun Jun^{**}

(Received April 23, 2024 ; Revised July 9, 2024 ; Accepted July 15, 2024)

Key Words : Vibration(진동), Image Signal(영상), Monitoring(감시), Plant Piping(플랜트배관), Frequency Distribution(주파수 분포)

ABSTRACT

In industrial plants, numerous pipelines experience vibrations due to internal flow, which vary in frequency depending on support conditions and faults. Monitoring pipe vibration is crucial for preventing accidents. Traditional sensors like accelerometers are impractical for simultaneous monitoring of multiple pipelines. This paper proposes a method using CCTV cameras to spatially visualize vibration frequency distributions. This technique processes video signals to display frequency distributions, similar to thermal cameras showing temperature distributions. Verification experiments demonstrated the method effectively identifies vibrating pipelines and their frequencies. The approach is limited by camera frame rates, making it suitable for low-frequency monitoring across multiple pipelines.

기 호 설 명

- $f(t)$: 순간주파수
- $h(t)$: 시간변화에 따른 영상 색상 크기
- $\bar{h}(t)$: $h(t)$ 의 힐버트변환한 값
- $z(t)$: 복소함수
- $\phi(t)$: 위상
- $\omega(t)$: 각속도

1. 서 론

원자력발전소, 화력발전소 등 플랜트에서는 Fig. 1(a)와 같이 많은 배관들이 존재한다. 이들 배관은 내부 유

동에 의해 진동이 발생하게 되고, 지지조건 및 고장 등에 의해 다양한 진동 주파수가 발생한다. 예를 들어 특정 배관에 이상상태가 발생하게 되면 진동 주파수가 변하기 때문에 이러한 주파수 변화를 신속히 감지한다면 사고를 미연에 방지할 수 있다. 하지만, Fig. 1(a)와 같이 많은 배관들이 존재할 경우 기존의 가속도계를 모든 배관에 붙여서 감시하기에는 현실적으로 힘들기 때문에 광대역 감시가 어려운 점이 있다.

배관 결함을 광대역으로 감시하기 위해 CCTV 카메라 영상을 이용하여 배관 결함을 측정하는 방법들이 연구되어져 왔다. 카메라 영상신호 분석을 통해 배관 누설 결함을 검출하는 연구와⁽¹⁾ 진동을 측정하는 연구가 수행되었다⁽²⁾. 영상을 이용하여 진동을 측

[†] Corresponding Author ; Member, Korea Atomic Energy Research Institute, Principal Researcher

E-mail : cye@kaeri.re.kr

^{*} Member, Korea Atomic Energy Research Institute, Principal Researcher

^{**} Member, Korea Atomic Energy Research Institute, Senior Researcher

[‡] Recommended by Editor Cheolung, Cheong

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

정할 경우 카메라 해상도 문제로 인하여 정밀도가 떨어지는 단점이 존재하는데, 커브피팅을 이용하여 정밀도를 향상시키는 연구를 수행하였다⁽³⁾.

영상을 이용하여 진동을 측정하는 기존의 방법들은^(3,4) 특정 배관의 진동 크기를 직접적으로 측정할 뿐, 배관 진동주파수를 공간적으로 보여주지는 않는다. 많은 배관들이 존재하는 플랜트 내에서 진동 크기만을 감시한다면 고진동이 발생하는 문제의 배관을 찾는 것은 어려울 수 있다. 만약 배관의 진동 주파수를 공간상으로 보여준다면 고진동이 발생하는 문제의 배관을 쉽게 찾을 수 있다.

Fig. 1은 플랜트내 배관 진동 감시에 관한 예를 보여주고 있다. Fig. 1(a)와 같이 플랜트의 많은 배관들

중 고진동이 발생할 경우 CCTV 원 영상이나 진동 크기만을 보여준다면, 문제가 되는 배관을 쉽게 찾을 수 없다. 사양이 다른 배관과 같은 배관이라도 지지 조건이 달라지면 공진주파수가 달라질 수 있다는 점에서 각 배관의 진동 주파수를 표시해 준다면 문제가 되는 배관을 쉽게 찾을 수 있을 것이다. 예를 들어 그림 Fig. 1(b)와 같이 고진동이 발생하는 배관의 주파수를 보여준다면 어느 배관이 진동문제가 발생하는지 쉽게 찾을 수 있을 것이다.

이 논문에서는 마치 열화상카메라가 온도 분포를 공간상에 보여주는 것처럼 일반 CCTV 카메라를 이용하여 배관 진동 주파수 분포를 공간적으로 표현하는 방법을 제안한다.

2. 영상을 이용한 진동주파수 분포 추정 알고리즘

2.1 기본 아이디어

Fig. 2는 영상신호를 이용하여 진동 주파수 분포를 나타내는 기본 아이디어를 설명하고 있다. 카메라의 픽셀이 (M, N) 일 경우 측정된 영상은 Fig. 2(a)와 같이 $M \times N$ 의 영상신호가 시간에 따라 프레임별로 저장된다. 임의의 (M, N) 픽셀에서 시간에 따른 색상 크기를 Fig. 2(a)의 하단 그림처럼 그리면 시간에 따른 색상크기 변화 그래프로 나타내어진다. 이때 (M, N) 픽셀에서의 색상크기는 RGB 3개의 색상 크기를 평균한 값을 취하고, 시간 길이(프레임 수)는 주파수 해상도를 고려하여 $(\Delta f = \frac{1}{T})$ 사용자가 선정한다.

각 픽셀에서 시간에 따른 크기변화를 주파수 변환하여 가장 진동크기가 큰 대표 주파수값을 Fig. 2(b)와 같이 다시 각 픽셀에 프레임별로 넣어 준다면 공간에서 주파수분포가 보이게 된다. 즉, 시간변화에 따라 공간 주파수 분포를 보여줄 수 있게 된다.

2.2 주파수 변환

주파수 변환 방법으로는 크게 푸리에 변환(Fourier transform)과 순간주파수(instantaneous frequency) 방법 등이 있다.

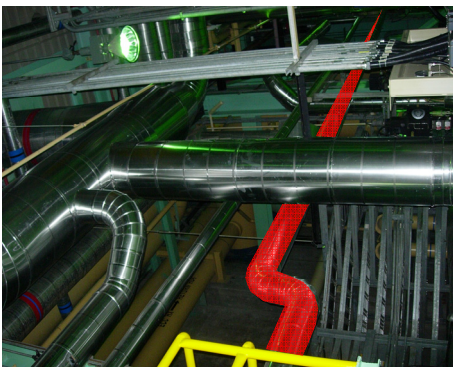
순간주파수(instantaneous frequency)는 신호의 시간변화에 따른 순간 주파수 값을 나타내는 것으로



(a) Original image

Vibration Frequency

0 Hz 15 Hz 30 Hz



(b) Example for spatial frequency visualization

Fig. 1 Example of piping monitoring using frequency visualization

FFT 분석과는 달리 x 축은 시간, y 축은 주파수 값을 나타낸다. 따라서, 순간주파수는 시간에 따른 주파수값을 읽을 수 있으므로 신호의 과도 현상에 대한 특성을 분석할 때 유용하게 적용할

수 있다.

순간주파수는 다양한 방법을 통해 구할 수 있는데, 이 연구에서는 힐버트(Hilbert) 변환을 이용하여 순간주파수를 계산하는 방법을 적용하였다^(5,6).

Fig. 2(a) 아래 그림의 픽셀에서 시간에 따른 색상 변화를 $h(t)$ 라고 하면 복소함수 $z(t)$ 는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$z(t) = h(t) + j\bar{h}(t) \tag{1}$$

여기서 j 는 복소수이며 $\bar{h}(t)$ 는 $h(t)$ 의 힐버트 변환한 값을 의미한다.

식 (1)에서 $h(t)$ 의 파형과 위상은 식 (2)와 식 (3)으로 나타낼 수 있으며,

$$|z(t)| = \sqrt{h^2(t) + \bar{h}^2(t)} \tag{2}$$

$$\phi(t) = \tan^{-1} \left[\left[\frac{\bar{h}(t)}{h(t)} \right] \right] \tag{3}$$

각속도 $\omega(t)$ 는 위상식 (3)을 미분하면 되므로 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\omega(t) = \frac{d\phi}{dt} = \frac{\bar{h}(t)h(t) - h(t)\bar{h}(t)}{|z^2(t)|^2} \tag{4}$$

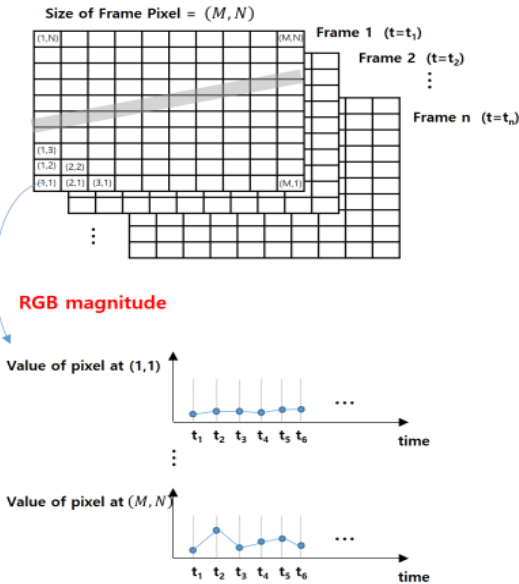
따라서, 순간주파수는 각속도를 2π 로 나눈값이므로 식 (5)와 같이 된다.

$$f(t) = \frac{\omega(t)}{2\pi} \tag{5}$$

힐버트 변환을 통한 순간주파수 신호처리 방법은 시간에 따라 주파수가 변하는 신호에 대해서는 유용하게 적용할 수 있는 장점이 있지만, 식 (4)와 같이 위상을 미분하기 때문에 잡음신호(noise)에 민감하다는 단점이 있다.

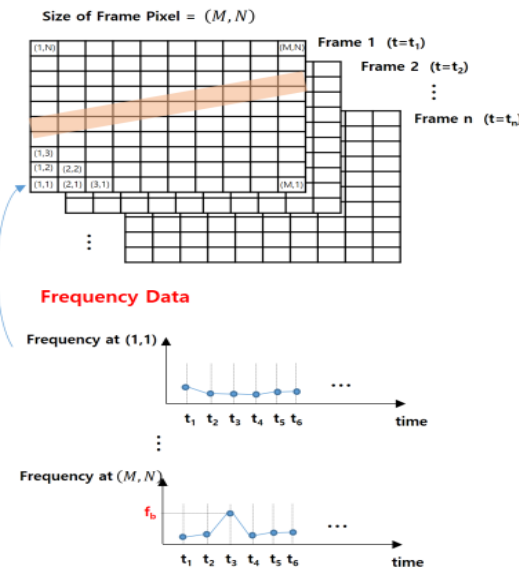
주파수 변환으로 가장 널리 사용되는 방법으로 푸리에 변환을 통해 스펙트럼을 구하는 방법이 있다. Fig. 2(a)의 시간별 색상크기 데이터의 스펙트럼을 계산 한 후 주파수영역에서 가장 큰 값에 해당하는 주파수값을 Fig. 2(b)와 같이 넣어서 공간 주

Original image



(a) Original image

Distributed frequency image



(b) Image of frequency distribution

Fig. 2 Basic idea for monitoring vibration using frequency visualization

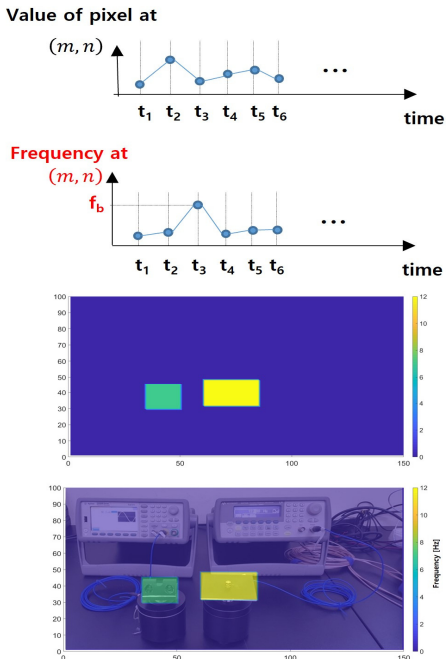
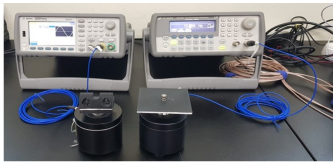
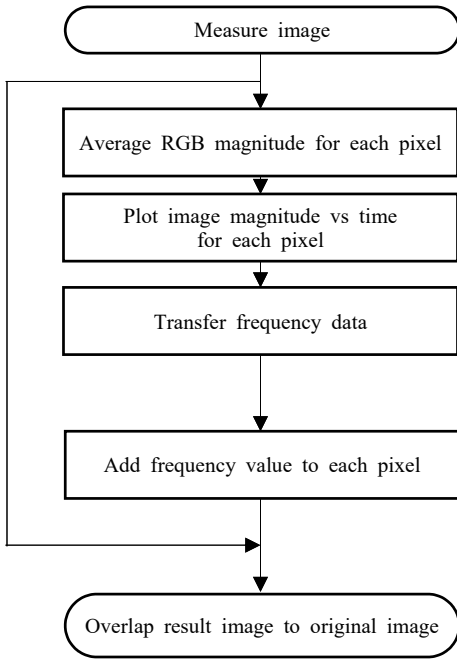


Fig. 3 Flow chart of the proposed image signal processing

과수 분포를 표현할 수 있다. 순간주파수 신호처리 방법에 비해 잡음에 강하지만, 시간에 따라 주파수가 변화하는 물체에 대해서는 정확하게 찾지 못하는 단점이 있다.

2.3 영상 신호처리 방법

Fig. 3은 제안된 공간상 주파수 분포 기법의 신호처리 방법을 설명하고 있다. 우선 CCTV 카메라를 이용하여 진동하는 물체의 영상을 측정한다. 측정된 원영상을 각 픽셀별로 RGB 값의 평균을 취한 후 프레임별, 즉 시간에 따른 변화를 그린다. 이때 시간은 주파수 해상도를 고려하여 결정한다.

영상의 각 픽셀에 대한 시간데이터를 순간주파수 또는 푸리에 변환을 통해 주파수 데이터로 변환한다. 이때, 물체의 진동 주파수가 시간에 따라 민감하게 변화한다면 순간주파수 분석방법을 적용하고 잡음이 많고 시간에 따라 주파수 변화가 크지 않다면 푸리에 변환을 통한 스펙트럼으로 계산한다.

이렇게 계산된 가장 큰 값을 가진 주파수를 다시 공간상의 픽셀에 넣어서 그래프를 그리면 공간상에서 진동하는 물체의 주파수 분포를 보이게 된다. 마지막으로 진동하는 물체의 정확한 위치를 사용자가 쉽게 파악할 수 있도록 주파수 분포 결과와 카메라 원영상을 겹쳐서 최종 결과를 보여준다.

예를 들어 Fig. 3 그림과 같이 두 개의 다른 주파수로 진동하는 평판을 CCTV 카메라로 촬영하여 각 픽셀에 대해 제안된 기법을 적용한 후 공간상 주파수 분포를 계산하면 Fig. 3 하단 두 번째 그림과 같이 된다. 이 결과 그래프를 원 영상과 겹치게 되면 Fig. 3 하단 그림과 같이 두 개의 평판이 어떤 주파수로 진동하는지 쉽게 알 수 있다.

3. 실험을 통한 알고리즘 검증

영상을 이용한 공간상 진동 주파수 분포 측정 방법을 검증하기 위해 가진기를 이용한 배관 시험과 실제 배관 진동시험을 수행하였다.

3.1 가진기를 이용한 검증시험

서로 다른 주파수로 진동하는 배관을 모사하기 위해 Fig. 4와 같이 3개의 얇은 배관을 이용하여 실험을 수행하였다. Fig. 4에서 첫 번째 배관은 움직

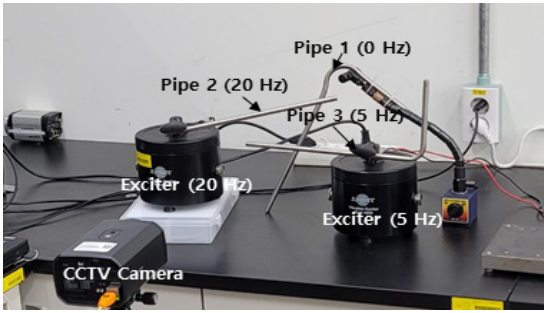
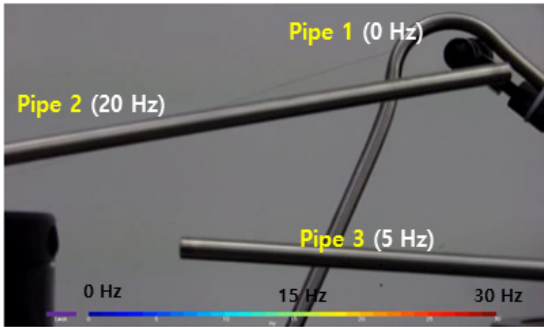
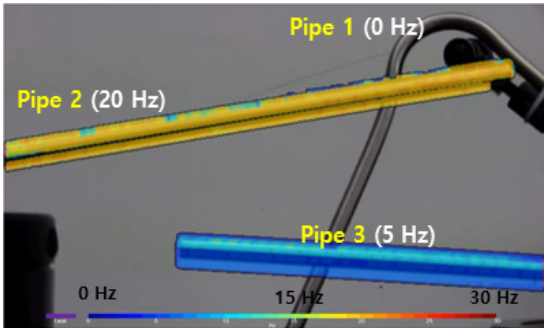


Fig. 4 Verification experimental setup for beam test with different frequencies



(a) Original image



(b) Image result from proposed image processing

Fig. 5 Experimental result

이지 않으며, 두 번째 배관은 가진기를 이용하여 20 Hz로 진동하고, 세 번째 배관은 5 Hz로 가진하는 상황을 CCTV 카메라를 이용하여 60 프레임으로 촬영하였다.

Fig. 5(a)는 카메라 원영상을 보여주고 있으며, Fig. 5(b)는 1초 간격(60 프레임)으로 영상처리하여 공간상의 배관 진동 주파수 분포를 나타내었다. Fig. 5(b)의 배관 2는 20 Hz인 노란색으로 표시되며, 배관 3은 5 Hz

파란색으로 주파수 크기를 표현하고 있다. 배관 2의 결과를 자세히 보면 노란색 경계부분에 다른 색, 즉 다른 주파수로 나타나는데, 이것은 엷지 부분의 픽셀에서의 계산 오차로 추정된다. Fig. 5의 진동 배관은 상하로 움직이는데, 움직인 범위 전체에 대해 진동 주파수를 계산하기 때문에 실제 배관에 비해 진동 주파수를 나타내는 결과가 좀 더 크게 표현된다. 따라서, 영상에서 실제 배관에 비해 진동 주파수 분포가 넓을수록 배관에서 고진동이 발생함을 알 수 있다.

촬영된 원영상을 동영상으로 플레이하여 자세히 관찰하면 배관 2와 배관 3이 진동하는 모습을 볼 수 있으나, 진동 주파수는 알 수 없다. 하지만, 제안된 방법으로 영상신호처리한 결과인 Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이 각 배관의 진동주파수를 직관적으로 한눈에 볼 수 있다는 장점이 있다.

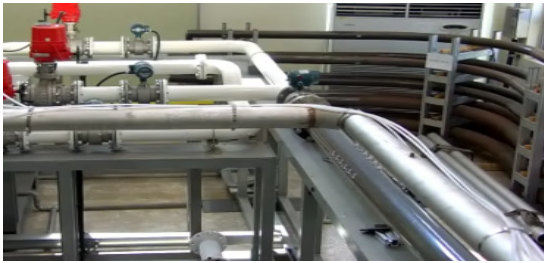
앞서 설명하였듯이 플랜트 내부에는 많은 배관들이 존재하고, 배관 사양, 지지 조건 등이 다르기 때문에 배관들은 각각 다른 주파수로 진동하게 된다. 따라서 사용자가 지정한 진동크기 제한치를 초과할 경우 제안된 방법으로 영상신호 처리한다면 많은 배관들 중 어느 배관이 고진동 결함이 발생할 수 있는지 쉽게 찾을 수 있는 장점이 있다.

3.2 테스트베드 루프배관 진동 검증시험

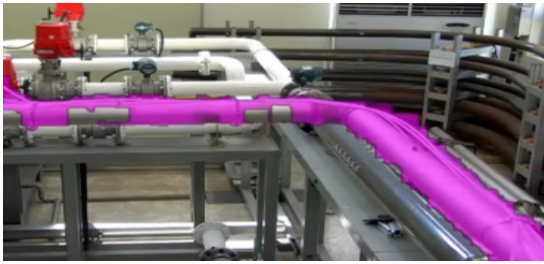
앞 절에서는 조명 환경이 좋은 실험실 수준에서 실험한 결과를 보여주고 있다. 카메라 영상은 조명 환경에 민감하기 때문에 실제 산업현장에서 제안된 방법을 검증할 필요가 있다.

Fig. 6은 원전 1차 계통 모사 1/4 축소 테스트베드에서 배관 진동 실험한 결과를 보여주고 있다. Fig. 6(a)는 진동하는 배관을 CCTV 카메라로 촬영한 원영상을 보여주고 있고, Fig. 6(b)는 제안된 영상신호처리 기법을 이용하여 공간상의 진동주파수 분포를 보여주고 있다. 이때 CCTV 카메라는 60 프레임으로 촬영하였고, 1초 간격으로 신호처리를 하였기 때문에 주파수 영역에서의 해상도는 1 Hz 간격으로 표현된다. 결과 그 래프에서 볼 수 있듯이 진동하는 배관이 보라색으로 표시되며, 이것은 4 Hz로 배관이 진동함을 표현하고 있다.

제안된 방법으로 예측한 배관의 진동 주파수가 4 Hz가 맞는지 확인하기 위해 Fig. 7(a)와 같이 기존의 진동 가속도계를 부착하여 배관의 진동을 측정하였다. Fig. 7(b)

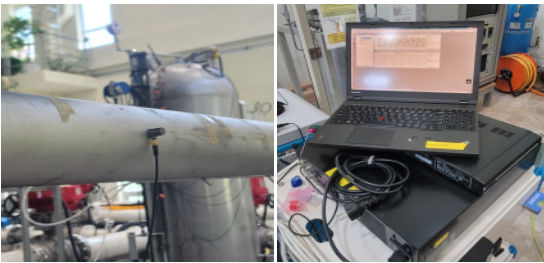


(a) Original image

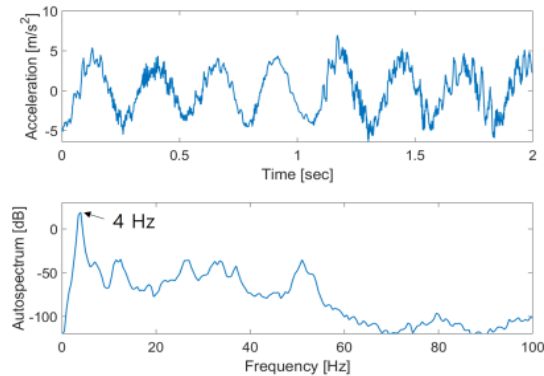


(b) Image result from proposed image processing

Fig. 6 Experimental result in loop test bed



(a) Picture of experimental setup



(b) Measured acceleration time data and autospectrum for the pipe

Fig. 7 Measurement pipe vibration using conventional accelerometer

위 그림은 배관 사이즈를 고려하여 샘플링 주파수를 1024 Hz로 가속도를 측정된 결과이고, Fig. 7(b) 아래 그래프는 측정된 가속도 신호를 2초 간격으로 앙상블 평균(ensemble mean)을 통해 스펙트럼을 계산한 결과이다. 계측 결과에서 알 수 있듯이 고주파 성분이 있긴 하지만, 제안된 영상을 이용하여 예측한 배관 중심 주파수가 4 Hz와 같음을 알 수 있다.

Fig. 5와 같이 좋은 조명에서 가까이서 촬영한 영상 결과에 비해 Fig. 6(b)의 결과는 해상도가 조금 떨어지지만 어느 배관이 진동이 발생하는지 쉽게 알 수 있는 장점이 있다.

4. 결 론

이 논문에서는 CCTV 카메라의 영상신호를 이용하여 공간 주파수 분포를 구함으로써 플랜트 내 배관진동을 감시하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 영상 화면의 각 픽셀에 대해 시간에 따른 색깔 크기를 주파수 분석 또는 순간주파수 분석을 한 후 그 결과를 다시 영상 화면에 뿌려 줌으로써 공간상의 주파수분포를 보여준다. 제안된 방법을 검증하기 위해 가진기를 이용한 배관 진동실험 및 실제 테스트루프 배관진동실험을 수행한 결과 배관의 진동을 잘 검출할 수 있었으며, 또한 진동하는 배관들의 주파수분포를 보여주기 때문에 많은 배관들 중 어떤 배관에서 문제가 발생하는지 쉽게 판단할 수 있다.

제안된 방법은 CCTV 카메라의 프레임 수에 따라 측정가능한 주파수범위가 결정된다는 단점이 있다. 예를 들어, 카메라의 프레임수가 60이면 1초에 60장의 이미지를 찍기 때문에 최대 30 Hz의 주파수까지 측정가능하기 때문에 높은 주파수로 진동하는 물체는 일반 CCTV 카메라에 제안된 방법을 적용하더라도 측정할 수 없는 한계가 있다. 하지만, 플랜트의 대형 배관들과 같이 저주파수로 진동하는 물체를 감시하는 곳에서는 효과적으로 적용 가능할 것으로 보인다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2022-00144206).

References

- (1) Choi, Y.-C., Son, K.-S., Jeon, H.-S. and Park, J.-H., 2010, Steam Leak Detection by using Image Signal, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 9, pp. 828~833.
- (2) Son, K.-S., Jeon, H.-S., Park, J.-H. and Park, J. W., 2013, A Technique for Measuring Vibration Displacement using Camera Image, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 9, pp. 789~796.
- (3) Jeon, H.-S., Choi, Y.-C. and Park, J. W., 2009, Measuring Structural Vibration from Video Signal using Curve Fitting, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 9, pp. 943~949.
- (4) Jeon, H.-S., Choi, Y.-C. and Park, J. W., 2008, Displacement Measurement of Multi-point using a Pattern Recognition from Video Signal, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 9, pp. 1256~1261.
- (5) Mark, W. D., 1972, Characterization of Stochastic Transients and Transmission Media: The Method of Power-moments Spectra, Journal of Sound and Vibration, Vol. 22, No. 3, pp. 249~295.
- (6) Kim, J. and Lim, B., 1994, Application of Instantaneous Frequency Analysis(I) -Algorithm Performance

and Noise Effects-, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 18, No. 4, pp. 1050~1056.



Young-Chul Choi received B.S. from Pusan National University in 1998. He then received his M.S. and Ph.D. degrees from KAIST in 2000 and 2005 respectively. Dr. Choi is currently a principal researcher at Korea Atomic Research Institute.



Byun-Young Chung received B.S. from Chung-nam National University in 2008. He then received his M.S. degree from Chung-nam National University in 2019. He is currently a principal engineer at Korea Atomic Research Institute.



Ji-Hyun Jun received B.S. from Hanyang University in 2015. She then received his Ph.D. degree in Convergence Mechanical Engineering from Hanyang University in 2021. She is currently a senior researcher at Korea Atomic Energy Research

Institute.