Check for updates
Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 34(1) : 71~77, 2024
https://doi.org/10.5050/KSNVE.2024.34.1.071
한국소음진동공학회논문집 제 34 권 제 1호, pp. 71~77, 2024
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

미소 진동 측정을 위한 폴리머 진동센서 개발

Measurement of Low-frequency, Low-amplitude Vibrations

류 수 정† · 김 정 수* · 김 정 태** · 전 오 성*** · 정 갑 철****
Su Jung Lyu†, Jung Soo Kim*, Jeung Tae Kim**,
Oh Sung Jun*** and Gab Cheol Jeung****

(Received October 26, 2023 ; Revised November 30, 2023 ; Accepted December 8, 2023)

Key Words : Accelerometer(가속도센서), Heavy-weight Impact(중량 충격), Vibration(진동), Piezoelectic Sensor (압전센서), Polyvinylidene Fluoride(PVDF 폴리비닐리덴 플루오라이드)

ABSTRACT

Semi-rigid structures such as buildings and bridges produce low amplitude vibration responses when various forces are applied to them. The best way to monitor low level signals is to deploy piezo type accelerometers owing to the high sensitivity and frequency bandwidth. One of the problems with piezo type sensors is the high hardware cost. In the real world, it is rare to implement piezo accelerometers for applications where precision is not of the utmost importance. In the present work, a polymer sensor is developed for vibration measurement in buildings and bridges. The sensors generate a high electric output signal even if the actual response of the structure is on the order of background noise vibration levels. The performance of the proposed sensor is experimentally verified for a target frequency of a 30 Hz band signal generated from a semi-rigid concrete wall. The vibration level is in the range of 0.001 to 0.01 G. The evaluation utilizes the following parameters: vibration modes, relative response level, and repeatability. The laboratory test shows that the design specifications meet the required target frequency and signal output level rigorously. We conclude that the proposed polymer sensor aimed at the specific frequency band has numerous advantages for the vibration monitoring of semi-rigid structures such as floating floors in apartment housing units. It can also be a cost-effective solution for various field problems.

1. 서 론

압전소자를 이용한 가속도 센서는 스트레인 게이지를 이용한 가속도 측정의 한계로 인하여 1940년대 덴마크에서부터 제조업체가 생겨났다[1]. 센서의 작동 방식은 기본적으로 진동하는 물체의 표면에 부착하여 센서 내부의 전압변화를 측정하여 이를 가속도로 변환한다. 이때 전압변화를 측정하기 위해 정밀 세라믹 압전소자를 이용한 전자회로를 구성하고 이를 보호하기 위한 구조물이 결합된 형태로 제품화 되었다. 이러한 센서는 수 백 Hz 이상의 고주파 영역까지[2] 광범위하게 사용되며, 저주파 진동을 측정하기 위해서는 센서의 대형화가[3] 필요하다. 또한 센서의 출력을

† Corresponding Author ; Member, NOVA LAB Inc., Senior, Researcher
E-mail : mtkailas@naver.com
* Member, Department of Mechanical & System Design Engineering, Hongik University, Professor
** Member, NOVA LAB Inc., CEO
*** Member, NOVA LAB Inc., Senior Researcher
**** Member, S.I.PAN CO., LTD., Director of Research

‡ Recommended by Editor Seung Hyun Jeong
ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

관측하기 위해서는 필요에 따라서 전용 데이터 수집 장치가 필요하다.

건축/토목 구조물과 같이 저주파수 대역의 미소진동 특성을 가지고 있는 분야에서는[4] 저주파 영역에서 민감한 센서가 필요하며, 현대사회에서 일상생활과 밀접하게 연관된 공동주택과 같은 건축구조물의 바닥 진동도 이에 해당한다. 하지만 센서의 크기와 전용 데이터수집장치 사용의 어려움으로 인하여 적용하는 데에 애로사항이 있다. 일반적인 공동주택의 바닥은 30 Hz 부근에 1차 고유진동수가 있고, 공동주택 중량 충격에 의한 진동응답은 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ G/N 수준이며[5], 현재는 필요시 숙련된 시험자가 전문 측정 장비를 이용하여 계측하고 있다.

최근 전자산업 발전으로 인하여 전통적인 세라믹 피에조 센서 외에 반도체 기술을 이용한 MEMS 센서, 폴리머의 전기적인 특성을 이용한 PVDF 센서등이 개발되어 적용되고 있으며, 이 연구에서는 이들 센서의 특징을 살펴보고 위와 같은 저주파수 미소진동을 손쉽게 측정하기 위해 폴리머 센서를 개발하였다.

2. 본 론

2.1 가속도 센서 특성

이 연구의 대상인 가속도 센서는 크게 세라믹 피에조 센서, 반도체 센서, 폴리머 센서로 나눈다. 각 센서의 일반적인 사양은 Table 1과 같은 특징에 따른 장단점이 있다. 센서의 구조 및 작동 매커니즘에 따라 작동하는 방식이 다르기 때문이다.

먼저 세라믹 피에조 센서는 보통 Fig. 1과 같은 형태를 가지며[6], 크게 전기 신호 출력부 및 케이스, 내부 질량체, 세라믹 압전소자 및 절연체로 구성되어 있다. 센서 하부를 측정 대상에 부착하면 측정대상에 진동이 발생할 때 센서 내부 질량체가 같이 진동하며, 연결된 세라믹 피에조에 변형을 일으키고, 그에 따라 변화되는 전압을 출력한다. 이때 사용되는 피에조의 재료는 높은 신뢰성을 위하여 고순도의 석영(quartz)이 사용된다. 이 연구에서는 다른 센서와 구분하기 위해 세라믹 센서라 하였다. 세라믹 재료의 높은 강성의 특징으로 인하여 일반적으로 100 Hz 이상 주파수를 가지는 기계진동을 측정한다. 저주파수 측정을 위한 특수 사양의 센서도 있지만 질량이나 부피가 과도하게 크며, 미소진동을 측정하기에는 부적절하다.

반도체 센서는 MEMS 센서라고도 하며[7], 2000년대 들어 스마트폰의 발달과 함께 소형 센서의 수요가 발생하였으며, 반도체 제작 공정을 이용하여 정밀한 구조를 반도체칩 내부에 구현하였다. 센서는 전자기판에 부착되어 작동하고 전자기판이 진동할 때 Fig. 2와 같이 센서 중앙의 질량체가 좌우로 진동하며[8] 이때 질량체의 상하로 놓인 전극과의 간격에 따라 발생하는 저항의 차이로 진동을 측정한다. 전극의 간격에 따라 설계된 진동측정 범위 내에서 설정된 비트 수에 따라 단계별로 가속도 값을 출력한다. 위의 세라믹

Table 1 Characteristics of different sensors

Type	Frequency rage [Hz]	Amplitude [G]	Output	Temperature [℃]	Complexity cost
Ceramic	100 k ~ 10 k	0.001 ~ 100	AC	-50 ~ 150	High
Semiconductor	1 k ~ 1 k	1.5 ~ 100	AC, DC	-20 ~ 70	Middle
Polymer	1 ~ 100	0.001 ~ 10	AC	-20 ~ 60	Low

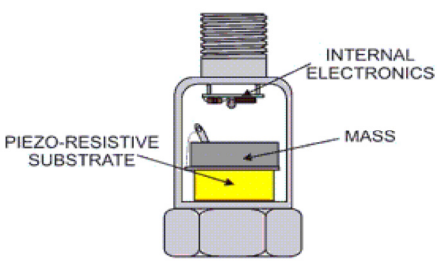

Fig. 1 Illustration of a ceramic acceleration sensor

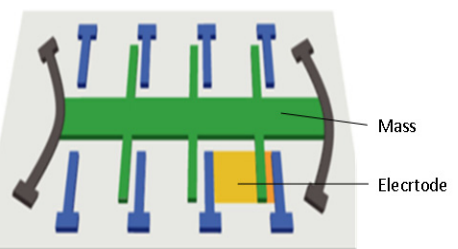

Fig. 2 Illustration of semiconductor sensor

센서에 비해 미소진동을 측정할 수 있을 정도로 소형화되었으나 통상 1.5 G 이상의 가속도 범위를 측정하도록 설계되어 있어서 미소진동을 측정하는데 한계가 있다.

마지막으로 이 연구의 대상인 폴리머 센서의 재료는 PVDF(polyvinylidene fluoride)를 많이 사용한다. PVDF는 1969년에 최초로 압전성이 발견되었으며, 이후 폴리머 화합물의 사슬구조에 따라 압전 성능이 변화하는 특성을 발견하고, 제조 공정을 개발하여 2000년대 들어 진동 측정 센서로 적용되고 있다. 폴리머 센서는 보통 Fig. 3과 같이 변형되는 제품의 길이 방향으로 부착하여 한쪽 끝단을 고정하고[9], 반대편에 질량체를 부착하여 질량에 의해 변형이 발생하면 폴리머 분자 사이의 거리에 따라 전압이 달라지는 압전 특성을 이용하여 전압을 측정한다[10].

이 연구에서는 공동주택 바닥의 30 Hz대 저주파수 미소진동 측정을 위하여 이러한 폴리머 센서의 특성을 효율적으로 이용하고 센서의 구조를 단순화하기 위한 외팔보 구조를 적용하여 특성을 관찰하였다.

2.2 폴리머 센서 개발

이 연구에서는 특정 대역 주파수의 미소 진동량을 측정하기 위해서, 적절한 감쇠를 갖는 소재를 사용하여 저주파 대역의 고유진동수를 갖는 센서를 개발하였다. 이 영역에서 출력 증폭비를 확인하여 현장에 활용하고자 하였다. 센서의 주재료인 PVDF는 센서 출력 전압 측정을 위한 전극과 외팔보 효과를 극대화하기 위한 질량체가 부착된 기성품을 활용하였다. Fig. 4와 같이 전체 크기는 약 18 mm이며, 외팔보의 한쪽은 전극이 부착되어 폴리머 압전소자에서 발생하는 전압을 바로 계측할 수 있다.

센서의 초기 사양은 Fig. 5와 같이 75 Hz 근처에서 고유진동수로 인한 최대 응답을 보이며, PVDF의 기계적인 물성치는 Table 2와 같다[11]. 강성은 재료 및 설계사양에 의해 결정되며 일반적인 생산품의 전압 출력의 크기는 4 V ~ 6 V 수준이다[12].

앞서 언급한 것처럼 연구대상 센서와 동일한 시스템의 외팔보에서 변형량은 재료역학에서 널리 알려진 것과 같이 식 (1)과 같으며,

$$\delta = PL^3/3EI \tag{1}$$

후크 법칙에서 하중 P는 스프링 상수와 변형량의 곱으로 정의되므로 식 (2)와 같으며,

$$k = \frac{P}{\delta} = \frac{P}{PL^3/3EI} = \frac{3EI}{L^3} \tag{2}$$

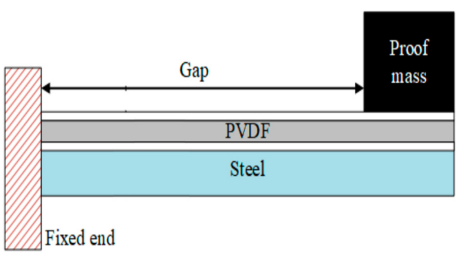

Fig. 3 Illustration of polymer acceleration sensor

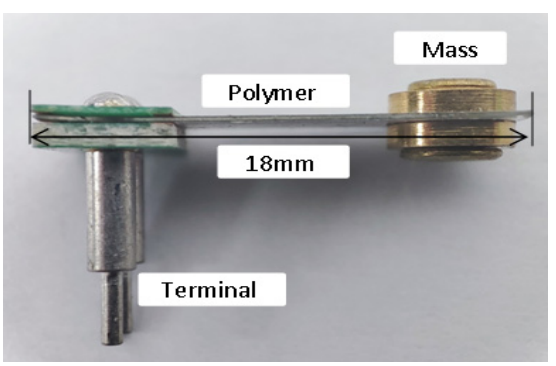

Fig. 4 Simplified diagram of the specimen

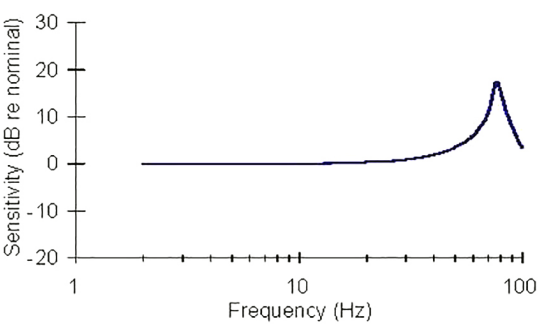

Fig. 5 Sensitivity of the acceleration sensor

Table 2 Mechanical property of PVDF

Property	PVDF	Unit
Young's modulus	$2 \times 10^9 \sim 4 \times 10^9$	[N/m^2]
Mass density	1780	[kg/m^3]

이와 같이 계산되는 스프링 상수를[13] 이용한 외팔보의 고유진동수는 식 (3)과 같다.

$$\omega = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{3}$$

폴리머 가속도 센서는 재료 변형에 의해 끝단 변형량의 크기가 길이의 3승에 비례하는 외팔보의 형태를 가지고 있다. 또한 단순한 구조로 인하여 고유진동수를 간편하게 예측할 수 있으며, 정해진 설계 사양에 질량을 추가하여 고유진동수를 변화하면 해당 주파수에서 높은 응답을 받아볼 수 있다.

위와 같은 식에서 고유진동수는 질량의 제곱근에 반비례 하므로, 센서의 질량이 네 배가 되면 고유진동수는 0.5배가 되며, 질량이 아홉 배가 되면 0.3배가 된다.

이 연구에서는 초기 사양 대비 외팔보의 끝단에 0.5 g, 1.3 g, 2.0 g의 질량을 추가한 FEM 모델을 이용하여 각각 고유진동수 변화를 확인하였으며, 1차 굽힘 모드의 고유진동수는 Table 3과 같이 초기 사양부터 시작하여 77.7 Hz, 47.3 Hz, 31.9 Hz, 26.8 Hz를 갖는 것을 확인하였다.

Fig. 6과 같이 외팔보의 길이 L의 끝단에 집중 질량을 부가하고, 반대편 지지부에 전극이 부착되어 상하 방향으로 가진되는 형상을 모델링 하였다. 가진력의 크기는 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ G/N를 기준으로하고 공동주택 실내 1 m 높이에서 체중 30 kg 어린이가 뛸 때 발생하는 충격하중으로 질량과 중력가속도, 위치에너지의 곱으로 계산되는 위치에너지의 약 세 배인 1000 N을 고려하여 최소치인 0.01 G(0.098 m/sec^2)를 가진하고 응답을 관찰하였다. 이때 나타나는 최대 변형량의 크기는 초기 사양 대비 질량을 추가한 모델에서 1.5배 ~ 2배 가량 증가하였으므로, 변형량에 따라 전압이 발생하는 피에조의 출력 효율 또한 증가할 것으로 예상되었다. 그 시뮬레이션 모델 및 FEM 해석 결과는 Table 3과 Fig. 7 그리고 Fig. 8과 같이 정리하였다.

Table 3 Response range of the PVDF sensor

Added mass [g]	1st resonance frequency [Hz]	Max. response [μm/m]
-	77.7	20.4
0.5	47.3	33.1
1.3	31.9	45.5
2.0	26.8	34.3

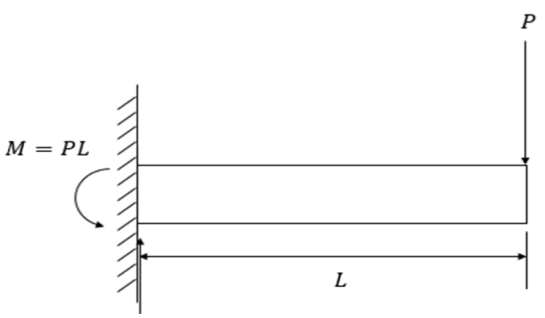

Fig. 6 Diagram of cantilever

시뮬레이션에는 범용 FEM 프로그램인 Abaqus를 활용하여 Fig. 4의 형상과 Table 2의 물성치를 이용한 mode 해석을 수행하고, 그 결과를 이용한 modal frequency response 해석에서 센서의 체결 및 신호 출력단인 terminal에 가진력을 부가하였다.

이렇게 이 연구의 목적인 30 Hz 근처 미소 진동을 계측하기 위한 센서를 개발하였다. 개발 과정에서 센서를 적용하는 방식에 따라 달라지는 응답을 관찰하였으며, 그 이유는 외팔보의 1차 굽힘 모드 방향과 가진 방향의 차이에 의한 것이다.

Fig. 9 및 Table 4와 같이 가진 방향인 z축을 기준으로 센서의 길이방향으로 적용된 각도에 따라 고유진동수는 동일하며, 이는 물체의 고유치가 변함없기 때문이다. 또한 빔의 각도에 따라 최대 변형량의 크기는 변화하며, 0도, 90도에서 유사한 수준이다. 다만 가진 방향에서 45도를 기점으로 응답의 크기가 달라지는 것을 확인할 수 있다. 이는 세라믹 가속도계와 같이 1방향의 변형에 의해 출력이 발생하는 압전소자의 특성에 기인한다. 향후 이에 주의하여 현장에 적용할 필요가 있다.

2.3 검증 실험

개발된 폴리머 센서의 특성을 검증하기 위해 다음과 같이 실험 장치를 구성하였다. 하나의 가진기에 세라믹 센서와 폴리머 센서를 거치하고 동시에 출력을 받을 수 있도록 장치를 구성하였으며, 비교 실험을 진행하였다. Fig. 10은 실험 환경 사진이다.

함수 발생기에서 입력 신호의 파형을 생성하고 파워앰프에서 입력 하중의 전기 신호를 생성하여 가진

기에 입력되며, 그 결과로 가진기는 상하 진동을하고 거치된 세라믹 센서와 폴리머 센서에서 전압 출력을 발생시킨다. 세라믹 센서의 출력은 진동 분석기를 이용하여 0.01 G로 유지되도록 파워앰프의 출력을 조정하며, 이때 폴리머 센서의 출력을 오실로스코프로 관찰하였다. 또한 함수 발생기를 이용하여 10 Hz ~ 50 Hz로 주파수를 변경하면서 이 과정을 반복하였으며, 가진기 및 함수발생기, 진동분석기는 모두 공인 기관의 교정을 받았다.

실험 결과인 개발 센서의 고유진동수는 Table 5와 같이 해석 결과와 비교하여 정리하였으며, 실험 및 해석 결과 고유진동수의 오차는 최대 10 % 정도로 신뢰성을 확인하였다.

함수 발생기를 이용해 관심 주파수 대역에서 주파수를 변경하면서 0.01 G의 가속도를 세라믹 센서로

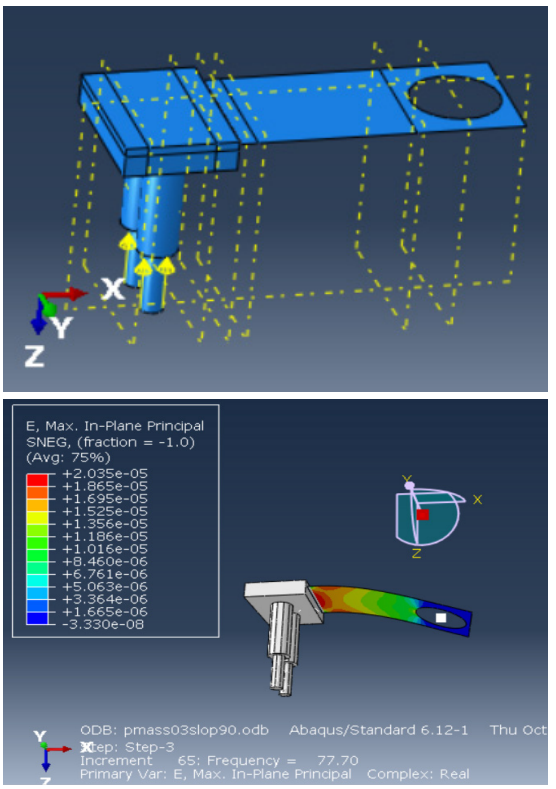

Fig. 7 Initial modeling and FEM analysis

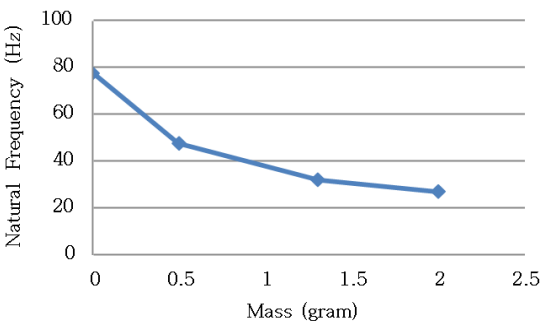

Fig. 8 Natural frequencies with various masses

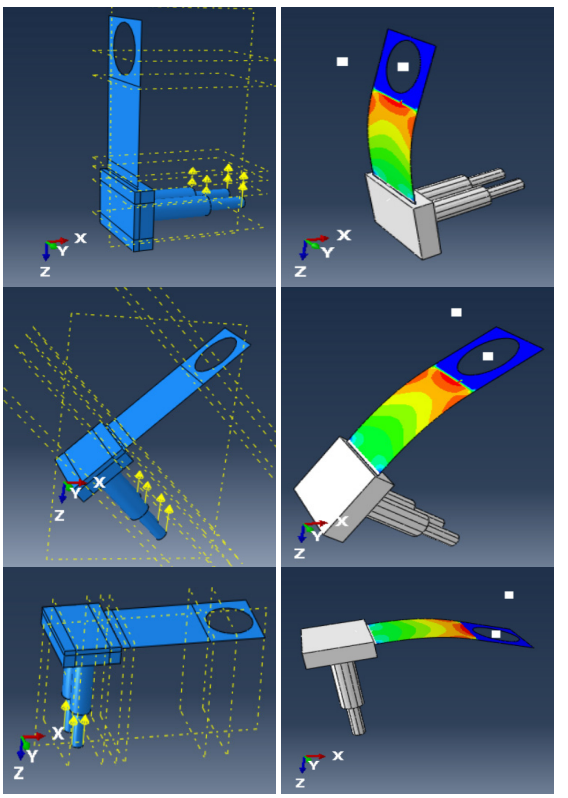

Fig. 9 Fem model & analysis result with added mass and tilted

Table 4 Strain response of cantilever beam while various degree of angle is exposed

Angle (dgree)	Max. response [μm/m]
0	50.8
15	40.6
30	27.8
45	13.0
60	11.1
75	43.5
90	53.0

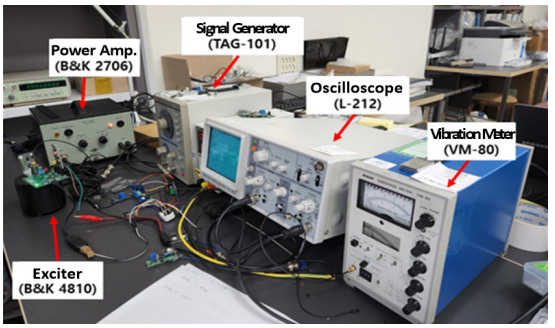

Fig. 10 Measurement set-up of test environment

Table 5 Comparison of test and computation results

Add mass [g]	Test [Hz]	Computation [Hz]	Error [%]
1.3	30	31.9	6.3
2.0	24	26.8	11.7

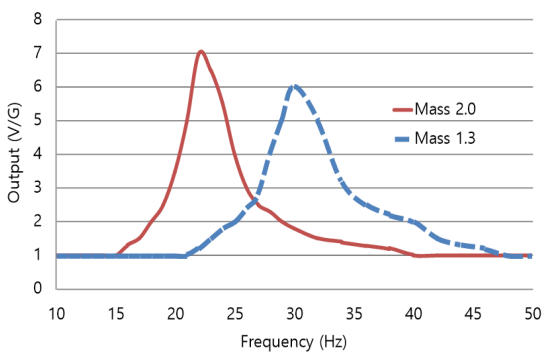

Fig. 11 Signal output response of the designed sensor type

확인하고, 그때 폴리머 센서의 출력 비교 실험 수행 결과 개발 센서 2종의 응답의 크기는 Fig. 11과 같다. 실험 결과로 앞의 해석 결과와 동일하게 질량이 커질수록 고유진동수가 작아지며, 출력의 크기가 커지는 경향을 확인할 수 있다.

3. 결 론

이 연구에서 30 Hz, 0.001 G ~ 0.01 G 진동신호를 계측하기 위하여 폴리머 센서의 최적설계를 통해 현장 활용이 가능한 사양을 도출하였다. 개발된 센서는 건축/토목 구조물등 저주파수에서 미소 진동이 발생하는 대상에 적용하여 실시간 진동 측정에 활용할 수 있다. 다만 개발된 폴리머 센서는 외팔보의 특성을 이용하므로 모드 형상을 고려하여 압전 효율이 최대화 되도록 설치할 필요가 있으며, 동일 사양에 따른 반복 측정을 통한 정밀성 및 동일 입력에 대한 재현성 확인과 교정이 필요하다.

또한 폴리머 센서는 세라믹 가속도계와 달리 그 신뢰성이 충분히 검증되지 않았으며, 폴리머 소재의 한계로 인하여 시간에 따른 경화/열화에 따른 응답전압 차이가 발생할 수 있을 것으로 예상된다. 그 외에 온도 및 반복 하중에 따른 내구 신뢰성 확인이 필요하므로, 추후 연구에서 이에 대한 보완이 이루어질 예정이다.

후 기

이 연구는 국토교통부 국토교통기술 기반 주거생활환경 문제해결 사업(RS-2022-00144050)의 연구비 지원으로 수행 되었으며, (주)에스아이판의 개술개발 필요성 및 개념과 시험 시설 지원으로 진행되었습니다.

References

(1) Walrer, P. L., 2007, The History of the Accelerometer, Sound and Vibration, Vol. 41, No.1, pp.84-92

(2) Brüel & Kjær Webpage, 2023, PIEZOELECTRIC CCLD / IEPE ACCELEROMETERS, Vibration Transducers of Brüel & Kjær an HBK Company, Virum, Denmark.

(3) PCB piezotronics Webpage, 2023, Sensors For Seismic Testing, Specification of PCB piezotronics an amphenol Company, NY, United States, Series 393, TM-VIB-Seismic lowres.

(4) Institut für Baustatik und Konstruktion, 1995, Vibration Problems in Structures, Birkhäuser, Basel, Switzerland, Chapter 1. Vibrations Induced by People, pp. 1~27.

(5) Mun, D. H., Oh, Y. K., Jeong, G. C. and Park, H. G., 2016, Floor Impact Noise Level for Concrete Slab Integrated with Floor Finishing Layers, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 26, No. 2, pp. 130~140.

(6) MASTEC Ltd. Webpage, 2023, How does a piezo-electric accelerometer work, Dataforth of the MASTEC Ltd., Auckland 2013, New Zealand.

(7) Seo, S.-Y., Bae, D.-M., Lee, J.-K. and Choi, B.-K., 2013, Optimum Design of 3-axis Sensor System for Vibration Measurement Using Piezoresistive Type MEMS Sensor, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 12, pp. 1082~1089.

(8) Pardeshi, S. S., Patange, A. D., Jegadeeshwaran, R. and Bhosale, M. R., 2022, Tyre Pressure Supervision of Two Wheeler Using Machine Learning, Structural Durability & Health Monitoring, Vol. 16, No. 3, pp. 271~290.

(9) Cepenas, M., Peng, B., Andriukaitis, D., Ravikumar, C. and Markevicius, V., et al., 2020, Research of PVDF Energy Harvester Cantilever Parameters for Experimental Model Realization, Electronics, Vol. 9, No. 12, 2030.

(10) Jung, I. B. and Roh, Y. R., 1997, Design and Fabrication of Piezoceramic Cantilever Type Vibration Sensors, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 377~386.

(11) Rajala, S. and Lekkala, J., 2010, PVDF and EMFi Sensor Materials - A Comparative Study, Procedia Engineering, Vol. 5, pp. 862~865.

(12) Smith, M. and Kar-Narayan, S., 2022, Piezoelectric Polymers: Theory, Challenges and Opportunities, International Materials Reviews, Vol. 67, No. 1, pp. 65~88.

(13) Hwang, H. J., Jung, Y., Choi, K., Kim, D., Park, J. and Choi, D., 2019, Comb-structured Triboelectric Nanogenerators for Multi-directional Energy Scavenging from Human Movements, Science and Technology of Advanced Materials, Vol. 20, No. 1, pp. 725~732.

Su Jung Lyu received the B.S., M.S., degrees at the Department of Mechanical Engineering, JeonBuk National University. He is enrolled in a doctoral program at Hongik University. He is now working at NOVA Lab.

Jung Soo Kim received the M.S., Ph.D., degrees at the Department of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley. He is a professor at the Department of Mechanical & System Design Engineering, Hongik University.

Jeung Tae Kim received the Ph.D., degree at the Department of Mechanical Engineering, M.I.T. He is a licensed Professional Engineer in Environmental Noise and Vibration. He is the CEO of NOVA Lab.

Oh Sung Jun received the M.S. and Ph.D. degrees at the Department of Mechanical Engineering, KAIST. He worked at Daewoo Heavy Ind., KRISS and Jeonju University. He is now working at NOVA Lab.

Gab Cheol Jeong received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees at the Department of Mechical Engineering, SoongSil University. He had worked for Daewoo Engineering and Construction Institute. He is now working at S.I.PAN.