

대한기계학회 주최

제12회 전국학생설계경진대회(2022년)

설계 최종 보고서

| | | | | | |
|--------------|---------------------------------|----------------|-----------|--------|----|
| 참가부 | 대학부 (O) | | | | |
| 참가분야 | 공모주제 (O) / 자유주제 () | | | | |
| 참가팀명 | PEEB! | | | | |
| 설계제목 | 압전센서의 공진주파수를 이용한 자가발전 긴급 정지 시스템 | | | | |
| 지도교수/교사 | (소속)고려대학교 (성명)이병양 | | | | |
| 대표자 (신청인) | 성명 | 소속 | 연락처 (휴대폰) | E-mail | 주소 |
| | 김현승 | 고려대학교 기계공학부 | | | |

참가팀원 인적사항

| NO | 성명 | 소속 / 학년 | E-MAIL |
|----|-----|-------------------|--------|
| 1 | 김승래 | 고려대학교 기계공학부 / 4학년 | |
| 2 | 고택수 | 고려대학교 기계공학부 / 4학년 | |
| 3 | 이창원 | 고려대학교 기계공학부 / 4학년 | |
| 4 | 김도균 | 고려대학교 기계공학부 / 4학년 | |
| 5 | | | |
| 6 | | | |

설계 요약문

| | |
|--------------------------|--|
| 참가분야 | 공모주제 (<input checked="" type="radio"/>) / 자유주제 (<input type="radio"/>) |
| 참가팀명 | PEEB! |
| 설계제목 | 압전센서의 공진주파수를 이용한 자가발전 긴급 정지 시스템 |
| 대표자명 | 김현승 |
| 요약문 | <p>연구개발특구진흥재단에 의하면 지난 2019년 CNC 공작기계 시장은 23억달러로 조사되었다. 이 규모로 보았을 때, CNC 공작 기계에서 소음으로 인해 49,032MWh의 에너지가 버려지고 있는 것으로 추정된다. 이는 우리나라 최대 원자력 발전소인 울진 원자력 발전소 발전량의 0.5%에 달하는 양으로 결코 무시할만한 수준이 아니다. 따라서 이렇게 버려지는 에너지를 압전 소자를 통해 수집하고 유용하게 사용하는 방안을 모색하고자 본 설계를 진행하게 되었다.</p> <p>‘압전센서의 공진주파수를 이용한 자가발전 긴급 정지 시스템’은 건설현장이나 기계 장치로부터 소리 에너지를 받아 이를 전기 에너지로 비축 및 작동하는 시스템이다. 이번 설계에서는 CNC 밀링 장치의 정상 운행과 비정상 운행 구별하고 비상 정지시키는 것을 목표로 한다.</p> <p>본 시스템은 수신부, 회로부, 구동부 세 가지 부분으로 구성되어 있다.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 수신부에서는 외부 신호를 받아 정상 운행과 비정상 운행 신호를 다른 채널로 받아 구분한다. 또, PZT를 이용하여 소리 신호를 이용해 구동부의 작동 전력을 공급한다. 2) 회로부는 대상 장비의 정상 운행과 비정상 운행 상태에 따른 신호 필터링 및 전원 공급을 MCU 없이 기계적으로 수행하는 부분이다. 소프트웨어의 연산을 거치지 않고 기계식으로 작동하므로 빠른 반응 속도를 확보할 수 있고, 이는 사용자를 더 안전하게 보호할 수 있는 원동력이 된다. PZT로부터 공급되는 전기 에너지를 저장하고, 적시에 방출함으로써 원하는 출력을 가능하게 하는 부분으로 정의된다. 3) 구동부에서는 비정상 운행 인지했을 때 신호를 받아 긴급 정지 장치를 누른다. |
| 설계프로젝트의 입상 이력 | <p>※ 교외 출품실적이 있는 경우 작성</p> <ul style="list-style-type: none"> - 출품작명 : - 출품대회명 : - 수상 내역 : <p>※ 기 입상 프로젝트의 설계내용 및 차별설에 관한 세부사항은 별지(자유양식)를 사용하여 기술할 것</p> |

압전센서의 공진주파수를 이용한 자가발전 긴급 정지 시스템

김현승*·김도균*·김송래*·고택수*·이창원*·이병양**
*고려대학교 기계공학부·**고려대학교 기계공학부

Self-powered Emergency Brake System Using Resonance of Piezoelectric Sensor

Hyun Seung Kim*, Do-kyun Kim*, Song Rae Kim*, Tak Su Ko*, Chang-won Lee*,
Byung-yang Lee**†

* School of Mechanical Engineering, Korea University

** School of Mechanical Engineering, Korea University

Key Words: Emergency Break(비상 제동 장치), Energy Harvest(에너지 수확), Machine Vibration(기계 진동)
Piezoelectric(압전소자)

초록: 본 연구는 매년 공사장이나 공업 단지 등 반복적인 소음이 존재하는 곳에서 에너지 하베스팅을 통해 버려지는 에너지를 재활용하는 것을 목적으로 하며, 압전소자를 이용하여 비정상 운영을 감지하는 동시에 비상정지장치를 작동시킬 수 있는 에너지를 얻는 것을 목표로 하였다. PZT 소자를 이용하여 신호를 받아 CNC 뿐만 아니라 각종 산업 기계 전반에 적용될 수 있도록 범용성까지 갖춘 설계를 할 수 있도록 하였다. 압전소자를 이용하여 발전한 전력을 축전한 뒤 기계 결함 발생 시 rpm이 감소하는 것을 트리거로 하여 방전된 전력으로 비상정지장치를 작동한다. 자체 발전을 통해 독립적인 장치로서 작동한다는 점에서 기존 메커니즘과 차이를 갖는다. 본 연구를 통해 산업 전반에 걸쳐 작업자의 안전이 증진될 것으로 기대된다.

Abstract: This paper aims to show the harvesting of waste energy to detect malfunctions and actuate the emergency break at construction sites or factories. By using PZT, it is possible to have a versatile design that can be applied to not only CNC machines but also to various manufacturing machines. After fully charging the power through PZT, a reduction in rpm from a machine malfunction, triggers the discharged power and actuates the emergency stop. This differs from other existing mechanisms, as it operates as an independent device with self-generation. This study is expected to improve workers' safety across the industry.

1. 서론

연구개발특구진흥재단에 따르면(2021), 2019년 국내 공작기계 시장 규모는 23억 달러로 집계되었다. 약 6만 3천대의 CNC 공작기계의 거래가 이루어졌음을 확인할 수 있다. 해당 산업기계에서의 진동과 소리로 인해 발생한 에너지는 약 5,900kW⁽¹⁾로 추산된다. 이는 국내 최대 울진원자력 발전기 평균 전력의

† Corresponding Author, blee@korea.ac.kr

0.5%에 해당하는 수치이다. 이처럼 매년 산업단지나 건설현장에서 발생하는 반복적인 소음에서 버려지는 에너지를 재활용함에 본 연구의 목적이 있다.

압전 물질(piezoelectric materials)는 기계적인 에너지를 전기적 에너지로 변환시킬 수 있으며, 반대의 과정(전기 에너지에서 기계적인 에너지로) 또한 가능하다. 다시 말해서 압전 물질에 교류 전압을 인가하면 물질이 진동하는 과정도 가능하며, 압전 물질 자체를 초음파(supersonic)로 진동시킨다면 표면에 전위차가 발생하는 과정이 모두 가능한 물질이다. 따라서 최근까지 여러 연구기관에서 이를 활용한 연구를 진행해 왔다.(e.g. energy harvester⁽²⁾, supersonic sensor⁽³⁾). 더 나아가 초소형 기전공학(MEMS) 분야에서도 활발히 이루어지고 있으며, 구조와 구성 물질을 변경하며 압전 물질의 민감도(sensitivity)를 향상시키기 위한 연구도 활발하게 진행되고 있다.⁽⁴⁾ 추가적인 외부 전력 없이 기계적인 자극에 대해 전위차를 만들어 낼 수 있으며 압전효과 계수(piezoelectric constant)의 단위가 [C/N]임에서 알 수 있듯이 이상적인 등방성 물질(isotropic)한 물질에 대해 선형성을 나타낸다. 따라서 많은 바이오-메디컬(bio-medical) 분야를 포함한 초소형 기전공학 분야에서도 압력 센서로서도 활용됨을 알 수 있다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾

본 연구에서 우리는 압전 물질의 구조를 이용한 산업기계의 진동 상태를 구분하는 센서(sensor)와 동시에 이로부터 나오는 전위(voltage)를 활용하여 에너지 하베스팅(energy harvesting)이 가능한 시스템에 대해 연구하였다. 산업 장비의 정상 운영 시 발생하는 진동의 주파수가 넓기 때문에, 기존의 폭이 일정한 단순한 외팔보(cantilever) 구조의 에너지 하베스터가 아닌 폭이 길이에 따라 변하는 외팔보를 이용하여 다중 공진주파수를 가지는 외팔보를 설계하였다. 이를 이용하여 산업기계가 정상적으로 작동할 때 발생하는 진동 범위에서 공진할 수 있다. 압전 물질로는 압전효과 계수가 높은 압전 세라믹(piezoelectric ceramic)인 PZT-5H(Piezoelectric Lead Zirconate Titanate, $Pb(Zr_{0.53}Ti_{0.47})O_3$)를 이용하였다. PZT-5H의 경우 제조공정에 요구되는 장비의 문제로 인하여 오픈마켓(open-market)에서 구매하였다.

센서/에너지하베스터의 공진에서 나오는 비교적 높은 전위를 활용하여 커패시터(capacitor)를 충전(charging)하였다. 비정상 작동 시 나오는 낮은 전위에서는 릴레이 소자(relay element)를 활용하여 충전 회로를 단락시켜 충전된 커패시터를 방전시켜 산업 장비를 멈출 수 있도록 시스템을 구상하였다.

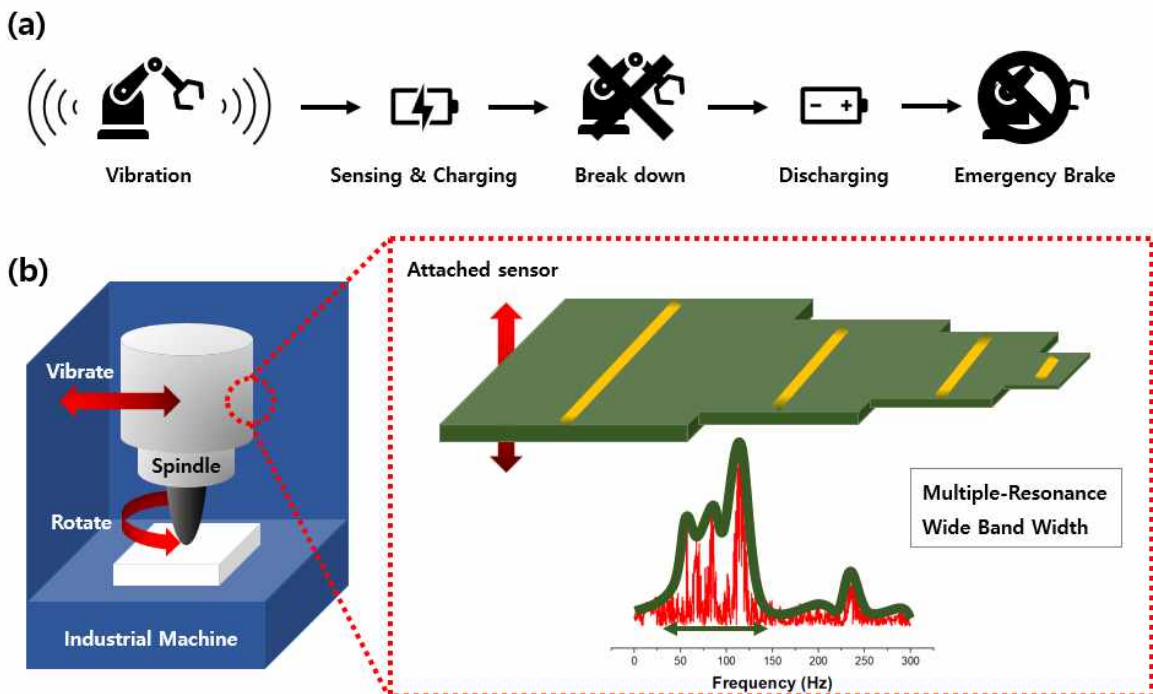


Fig. 1. Overall schematic concept of study. (a) Overall process of system. I)Vibration of the industrial machine charging the capacitor by energy harvester while the machine normally operating. II)When the sensor detects a machine failure, the capacitor discharged. III)Discharged voltage from capacitor brake the machine. (b) Multiple-resonance sensor/energy harvester with wide bandwidth.

2. 센서 / 에너지 하베스터 및 회로 설계 방법

2.1 압전세라믹 (Piezoelectric Ceramics)

압전소자는 기계적인(mechanical) 에너지를 전기적인(electrical) 에너지로 상호 변환시킬 수 있는 소자로서 여러 자가발전 센서(self-powered sensor)와 에너지 하베스터(energy harvester)에 이용 · 연구되어왔다. 그 예시로, Stevens Institute of Technology에서 연구된 Yong Shi 교수 팀의 PZT nanofiber를 이용한 에너지 하베스터(nano generator)⁽⁷⁾, 압전 고분자 물질 및 세라믹 재료들에 대해서도 활발하게 연구가 이루어지고 있다.⁽⁸⁾ 이 외에 압전 세라믹의 높은 강성(stiffness)로 인하여 초음파, 가속도 센서에도 이용된다. 압전세라믹에서 기계적인 자극을 전기적 신호로 변환되는 원리는 <Fig. 2>를 통해 확인할 수 있다. <Fig. 1a>는 본 연구에서 이용할 재료인 티탄산 지르코산 연(Lead Zirconate titanate, 약:PZT)의 결정구조와 인장(tensile), 기계적인 자극을 가했을 때 거동에 대해 설명하고 있다. 중립 상태의 PZT는 아무런 전기적 신호도 띄지 못하지만, 인장(tensile) 혹은 압축력(compression)을 PZT에 인가하면 결정구조의 중심에 양의 전하를 가지고 있는 Ti^{4+} , Zr^{4+} 가 상하로 이동하며 PZT 표면에 $\delta +/ -$ 를 형성한다. <Fig. 1b> PZT 표면의 전위를 측정하는 방식으로 기계적 자극을 계측하는 방식으로 센서에 이용할 수 있다. <Fig. 2b> 표면에 전위가 형성된다는 것은 기계적인 에너지를 전기적 에너지로 변환시켜주는 에너지 하베스터의 역할을 할 수 있음을 의미한다.

PZT-5H는 세라믹이기 때문에 제작 후 가공성이 매우 떨어지며, 원하는 모양대로 만들기 위해서는 MEMS 장비들이 필요하하므로 모든 설계 및 제작은 구매 가능한 PZT를 기준으로 진행되었으며, 구매처로부터 제공받은 주요 물성으로는, 압전효과 계수, $d_{33} = 400 * 10^{-12}$ [m/V] 이다. 총 3가지 PZT 판을 구매하였으며, 두께는 0.2mm로 동일하고 규격은 각각 17.5×17.5 , 13.5×13.5 , 5×1.2 mm 이다.

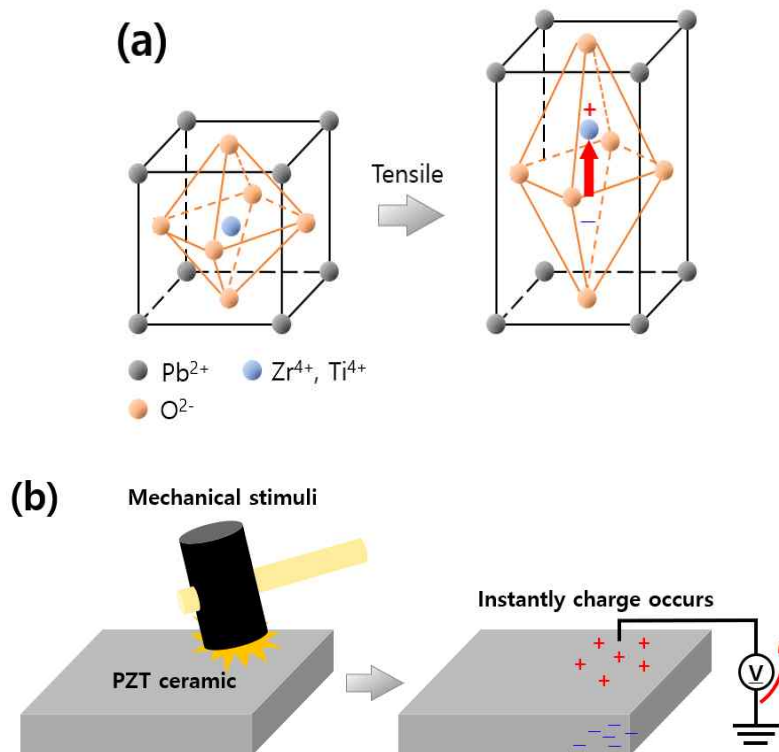


Fig. 2. (a) Structure of PZT ceramic, (b) The voltage occurs instantly over the surface of PZT ceramic when mechanical stimuli(e.g. pressure) is applied on PZT

2.2 진동 특성 (Vibration Characteristics)

본 연구에서 하베스팅 및 계측하고자 하는 에너지원은 스피들(spindle)이 회전하며 재료를 절삭하는 산업 기계이다. CNC 가공을 하는 경우 재료의 물성(e.g. stiffness, hardness ...)과 절삭하고자 하는 깊이, 속도에 따라서 가공 방식이 상이하게 달라진다. 따라서 발생하는 소음과 진동 특성이 같은 정상 작동일지라도 차이가 크다고 할 수 있다.(7) 본 연구는 진동의 특성을 정규화(normalize)하여 본 시스템의 가능성을 제시하고자 한다.

산업 기계에서 발생하는 진동의 원인으로 스피들의 회전중심과 무게중심 사이의 오차를 들 수 있다. <Fig 3b>를 참고하면, 스피들의 척(chuck) 부분에 센서를 부착할 때 스피들의 회전에 의한 진동은 센서 기준, 기저 진동(base excitation)으로 모델링 할 수 있다. 스피들에 센서를 정확하게 고정(fix constraint) 시켜둔다면 스피들과 센서를 하나의 강체로 모델링 하여 아래의 식에 따라 스피들의 조화진동(harmonic excitation)이 센서에 그대로 전달되는 상황을 가정할 수 있다. 일반적으로 스피들의 작동 RPM은 1,000 ~ 12,000 RPM이며, 스피들의 무게는 39kg이다(MM Korea Co., LTD). 스피들의 회전중심과 무게중심 사이의 거리는 0.5mm로 가정하였다. 이는 실측이 이루어지지 않은 값이지만 모든 진동하는 소형 및 대형 산업기계, 소형기계에도 충분히 고려 가능한 수치이다.

센서에 전달되는 진동 특성은 $F = mrw^2(\sin wt)$ 로 정의하여 <Table 1>에 정리하였다. 변위 전달률(displacement transmissibility)은 아래의 식을 따른다.

$$\frac{X}{Y} = \sqrt{\frac{(2\zeta r)^2 + 1}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}}$$

스피들과 센서가 하나의 강체처럼 움직인다는 가정 하에 스프링의 강성(k, stiffness)가 0이므로 진동수비(frequency ratio)가 0에 근사하여 변위 전달률은 1이 된다. 이는 회전중심과 무게중심 사이의 오차 거리 0.5mm의 진폭(amplitude)를 가지고 센서가 진동함을 의미한다. 또, 정상 작동 범위에서의 운전 진동수는 104 ~ 1256 Hz로 계산된다.

Table. 1. RPM(Revolutions Per Minute) and force transmitted to the sensor

| RPM | Force (N) | RPM | Force (N) |
|-------|-----------|--------|-----------|
| 1,000 | 214 | 7,000 | 10,500 |
| 2,000 | 855 | 8,000 | 13,700 |
| 3,000 | 1,920 | 9,000 | 17,300 |
| 4,000 | 3,420 | 10,000 | 21,400 |
| 5,000 | 5,350 | 11,000 | 25,900 |
| 6,000 | 7,770 | 12,000 | 30,800 |

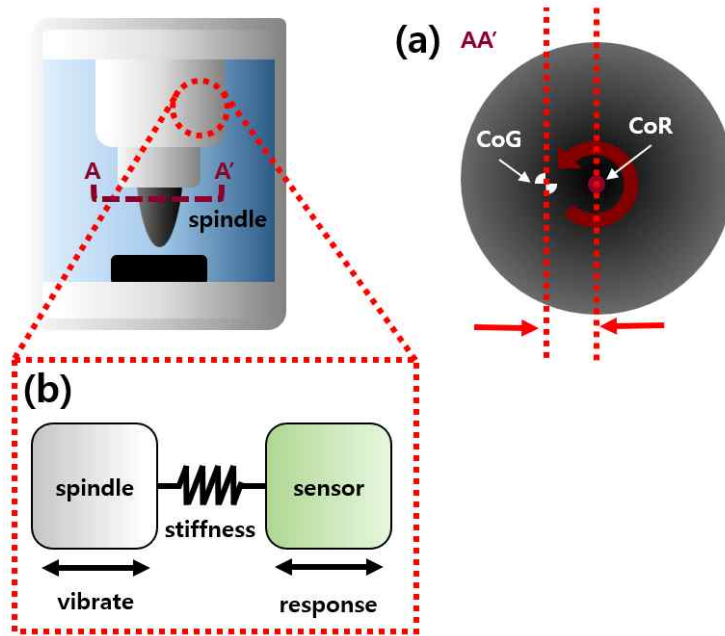


Fig. 3. (a) Top view of the spindle. Error between the CoR(Center of Rotation) and CoG(Center of Gravity) caused the vibration of industrial machine. (b) Modeling of system(sensor is attached on the side of chuck). The system is regarded as m-k system with base excitation.

2.3 단순 외팔보와 다중-공진주파수 외팔보의 비교 (Comparison of simple cantilever and multi-resonance cantilever)

길이 방향 폭(width)이 일정한 단순 외팔보의 공진주파수는 아래의 식으로 계산된다. 외팔보의 길이는 L , 단면 2차 모멘트(second moment of area) I , 그리고 외팔보 재료의 탄성계수(Young's modulus) E , 폭은 w 이다.

$$f = \frac{3.52}{\pi} \sqrt{\frac{EI}{wL^4}}$$

재료의 물성(탄성계수, 밀도)은 이미 결정되어 있으므로 외팔보의 공진주파수를 조절할 수 있는 지배적인(dominant) 요인으로는 외팔보의 두께와 길이가 있음을 알 수 있다(second moment of area는 외팔보 두께의 4 제곱에 비례하므로, 공진주파수는 두께², 길이⁻², 폭⁻¹에 비례한다). 주파수 대역은 저속운전 1,000 RPM을 기준, 약 100Hz 근처에서 다중 공진주파수를 가지는 구조를 제작하는 것을 목표로 한다. 같은 저속운행을 하여도 절삭 깊이와 절삭 재료 등에 따라서 진동의 주파수가 변하게 되므로, 100Hz 근처에서 다중 공진주파수를 가지는 구조를 통해 정상 작동 시에 항상 공진이 일어날 수 있도록 한다.

<Fig 4b>에서, 일반적인 폭이 일정한 외팔보에 대한 고유진동수 해석(eigenfrequency analysis)를 FEM 해석 소프트웨어 COMSOL을 이용하여 진행하였다. 해당 외팔보는 총 길이가 150mm, 폭 10mm, 두께 5mm를 가지고 있으며, substrate 재료로는 탄성계수는 117[GPa], 밀도는 8730[kg/m³]으로 가정하였다. 해석 결과에서 알 수 있듯이, 1차 공진은 대략 114.44Hz에서 나타났으며, 2차는 811.99Hz, 3차는 2356.4Hz에서 발생하였다. 1차 공진주파수는 목표했던 주파수인 100Hz 근처에서 발생하였으나, 모드의 차수가 높아질수록 공진주파수가 높아지는 경향을 보인다. 따라서 외팔보가 공진하는 주파수 대역이 지나치게 높아지고 그 사이의 간격(frequency domain) 또한 지나치게 넓어져 목표했던 100Hz 근처에서 다중 공진주파수를 가지지 못한다.

<Fig 4a>의 좌측 그림은 다중 공진주파수를 가지는 센서를 위에서 본 단면이다. 이 센서 역시 COMSOL FEM 프로그램을 이용하여 공진주파수에 대한 해석을 진행하였다. 가공된 PZT에 대한 배치와 함께 COMSOL을 이용하여 100Hz 근처에서 다중 공진주파수를 가지는 구조가 나오도록 반복진행을 통한 해석방법을 사용하였다. 해석 결과를 통해 폭이 일정한 외팔보에 비해서 공진 주파수 사이의 거리를 대폭 줄일 수 있었다. 1 ~ 101Hz 범위에서 200N의 외력으로 진동시킬 때, 센서의 표면 중앙부(Terminal electrode)에서 전위(electrical potential)을 COMSOL 해석 툴을 이용하여 측정해본 결과, <Fig 4d>에서 알 수 있듯이 91Hz와 101Hz에서 상대적으로 높은 전위가 나타남을 알 수 있다.

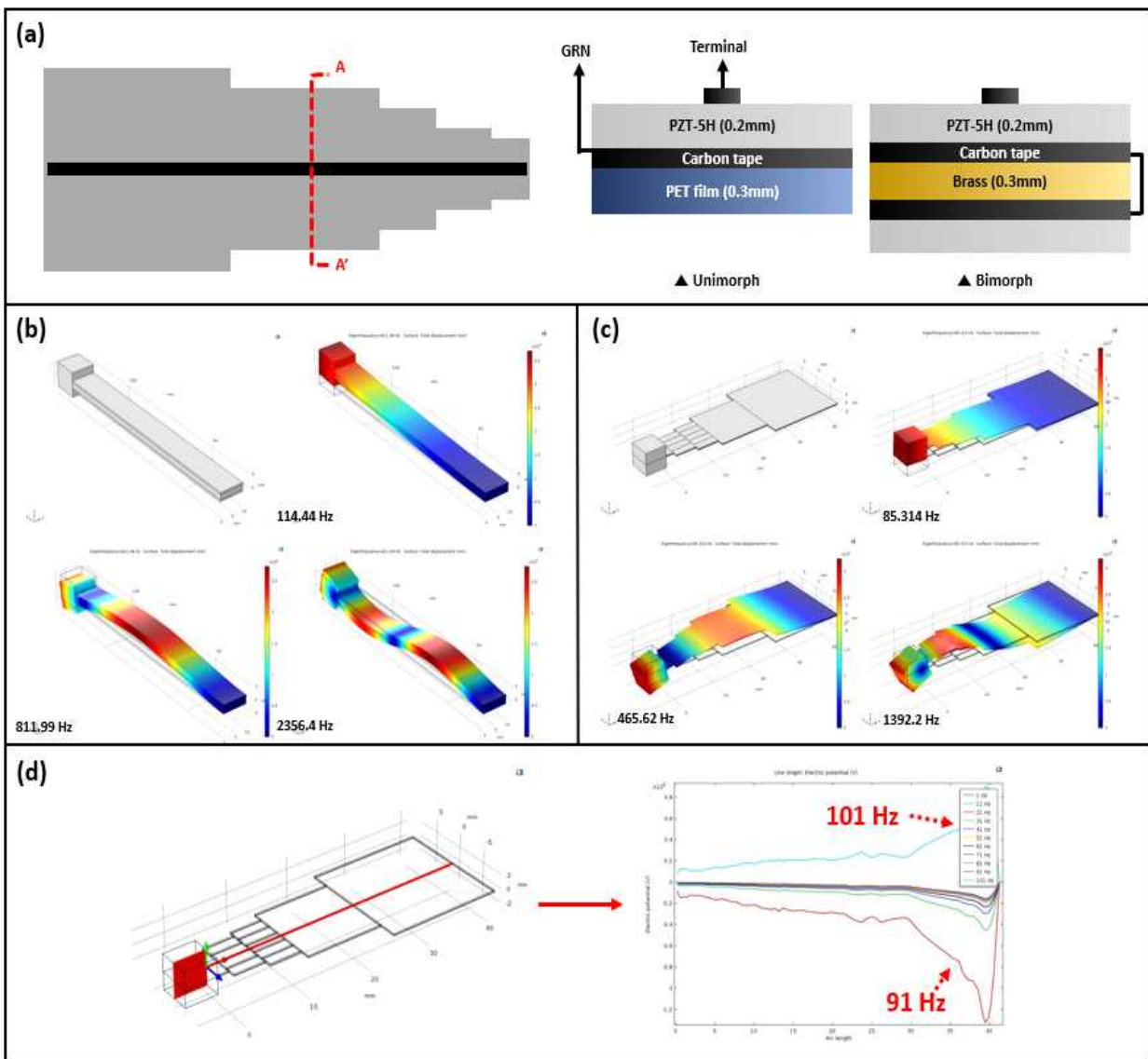


Fig. 4. (a) Left; Top view of multiple-resonance structure sensor. Right; The cut view of the multiple-resonance structure. Unimorph and Biomorph version. (b) Structure with a constant width. It can be seen that the range of resonance frequencies becomes very wide as the order of modes increases. (c) Structure with a variable width. The range of resonance frequencies is narrower than the constant width one. It satisfies the target frequency (about 100Hz) and has multiple-resonance frequency near the target frequency. (d) Frequency-domain analysis from finite element method (FEM) Software, COMSOL. In particular, we focused on the potential of the central surface, where we will attach the carbon tape as output electrode (terminal).

2.4 회로 설계 (Circuit Analysis)

설계를 만족하기 위해서 각 부분에 대한 설계 목표를 설정하였다. 1) 수신부에서는 정상 운행과 비정상 운행을 구별하기 위해 다양한 주파수에서 공진할 수 있는 구조를 갖도록 한다. 또, 소리 신호를 받아 축전지를 충전해야 하므로, 효율적인 구조를 만들고 electrode를 적절하게 배치하도록 한다. 2) 회로는 정상 운행과 비정상 운행을 구별할 수 있도록 설계한다. 정상 운행 시 축전지가 충전될 수 있어야 하며, 비정상 운행 시에는 축전지를 방전시켜 구동부가 긴급 정지 장치를 누를 수 있도록 전력을 공급해야 한다. 3) 구동부는 전력을 효율적으로 사용하여 긴급 정지 장치를 누를 수 있어야 한다. 비교적 적은 전력으로도 장치를 멈출 수 있어야 하므로 트리거(trigger)를 사용할 수 있도록 한다.

회로 구성은 <Fig 5b>와 같이 진행하였다. PZT에서 발생한 교류 전원을 입력받아 다이오드 브릿지를 통해 정류한다. 정상 작동 시에는 릴레이에 전원이 공급되므로 NO쪽 회로가 연결되어 구동부에는 전력이 공급되지 않고 축전기를 충전한다. 기계가 오작동 시 V1과 V2의 전원이 모두 차단되므로 릴레이가 미작동하여 NC쪽으로 스위칭(switching)되고 축전기가 방전되며 구동부에 전력을 공급하는 방식이다. 4.7uF 50V 축전기를 사용하여 저전력으로 빠른 시간 내에 충전될 수 있도록 하였으며, 정격전압이 2V인 LED 7개를 직렬로 연결하여 스위칭 될 때 발광하는 것을 확인하였다.

EMR(Electromechanical Relay)의 경우 RIF-1-RSC-LDP-24DC/1X21AU(2903354) 릴레이모듈을 사용하여 24VDC의 적은 전압에서도 작동할 수 있도록 하였다. 18mA의 낮은 전류로 작동이 가능하며, V2로부터 나오는 교류 전원을 직류로 공급하기 위해서 D17, D18, D19, D20의 다이오드 브릿지와 C8의 평활회로를 사용하였다. <Fig 5c>의 승압 회로를 이용하여 EMR에 V2 전압이 충분히 높은 수준으로 공급하도록 설계하였다.

‘에너지 하베스팅을 이용한 무전원 방식의 무선 비상콜 시스템(ECO-CALL SYSTEM)’의 경우 본 연구와 유사한 특허로, 비상 호출기들에 전원공급 없이 작동하는 무선 비상콜 시스템을 구성하였다.<Fig 5a> 기계 장치의 진동을 이용하여 발전하고, 다이오드 브릿지를 통해 정류한 뒤 IC 칩을 사용하여 충전 회로와 방전 회로를 스위칭 하는 방식이다. 발전 방식에 있어 유사성을 보이지만 사용자에게 알림을 주되 즉각적인 대처나 예방이 미흡하여 본 연구와 차이를 보인다. 상기의 특허는 감지장비로서의 사용 가능성은 높지만 실제 산업 안전 환경 증진에 있어 본 연구는 좀 더 발전된 내용을 확보하여 회피 전략을 세웠다.

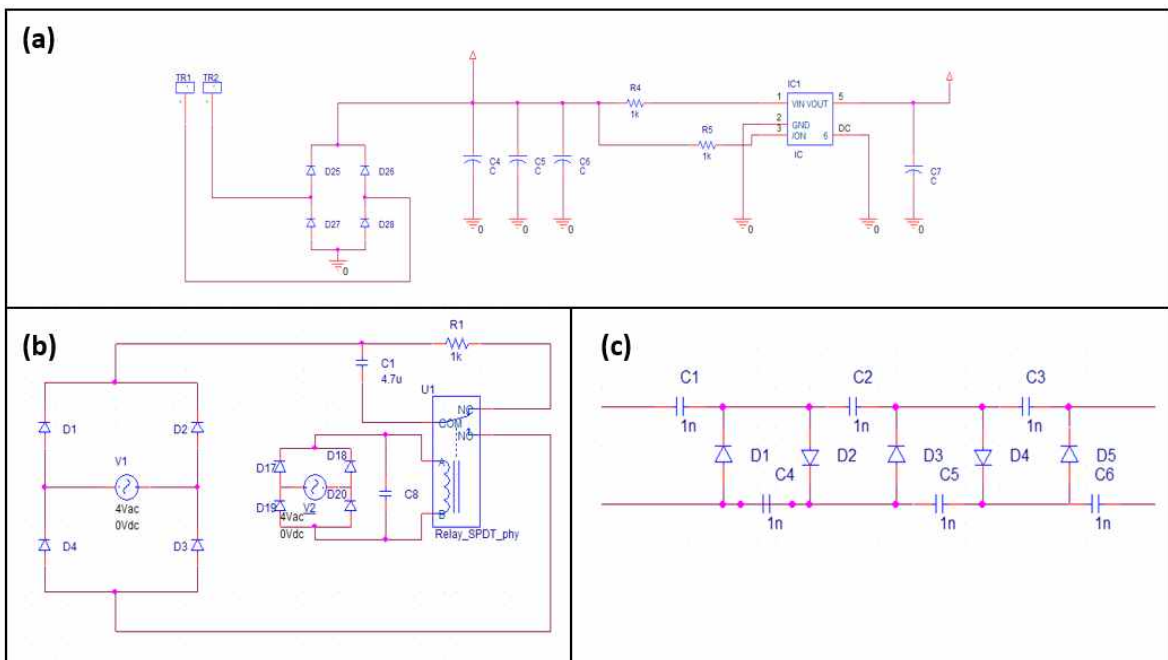


Fig. 5. (a) Circuit diagram of ECO-CALL SYSTEM patent. (b) Circuit which can charge capacitor when machine works normally and discharge when machine malfunctions by using Electromechanical Relay. (c) Circuit that can make higher voltage using diodes and capacitors.

3. 실험장비 세팅 및 실험방법

3.1 센서/에너지하베스터 제작 (Fabrication of Sensor/Energy harvester)

센서의 구조는 <Fig 4>의 구조를 토대로 제작하였다. 압전소자로 PZT-5H를 사용하였으며, 바닥면(substrat)은 0.3mm PET 필름을 이용하였다. PET 필름과 PZT-5H 사이의 접착(adhesion)과 동시에 전극의 역할을 하도록 카본 테이프(carbon tape)를 깔아 이용하였다. 유니모르프(unimorph) 형태의 에너지 하베스터를 제작하여 형상을 단순화하였다.

바이모르프(bimorph) 형태의 에너지 하베스터에서는 바닥면을 황동 판(brass plate) 0.3mm를 이용하였으며, 유니모르프 형태와는 다르게 바닥면 양쪽으로 PZT-5H를 부착하며, 양 방향 PZT-5H의 그라운드(ground)가 전기적으로 연결되도록(electrical routing) 카본 테이프를 부착하였다. 각 PZT-5H의 끝면(terminal) 또한 연결되도록 구리 와이어(Copper wire)를 연결하였다.

3.2 실험장비 세팅 1 : 공진주파수 분석 (Frequency Domain Analysis)

제작한 센서의 공진주파수를 분석하기 위해서 센서에 가진기를 이용하여 1~300Hz 까지 주파수를 스위프(frequency sweep)한다. 100초 동안 1Hz부터 300Hz까지 주파수를 올려 1Hz부터 초당 3Hz씩 증가하는 사인파 함수(sinusoidal)를 이용하였다. 함수 발생기(function generator)를 가진기에 연결하여 주파수를 조절하였으며, 오실로스코프(oscilloscope)에 센서를 연결하여 주파수 스위프 동안 발생하는 센서 표면의 전위차를 측정한다. 폭이 일정한 외팔보와 공진주파수 특성을 비교하기 위해 동일한 조건에서 제작한 센서와 함께 공진 주파수를 분석하였다.

3.3 실험장비 세팅 2 : 공진주파수 하 축전기 충전 분석 (Analysis of Capacitor Charging at Resonance Frequency)

앞서 분석한 공진주파수를 바탕으로 가진기에 공진주파수를 입력하여 센서가 공진주파수에서 작동할 수 있도록 한다. 또, 센서와 축전기를 병렬로 연결하여 센서가 공진주파수에서 작동하는 동안 축전기의 과도 해석(transient analysis)을 추가적으로 진행하였다. 축전기 양단에 오실로스코프 장비를 연결하여 축전기 양단의 전위차를 시간 영역(time domain)으로 측정하였으며, 장비의 다른 채널을 이용하여 센서에서 발생하는 전위차를 동시에 측정하였다. 실시간으로 축전기 양단의 전위차를 확인하며 축전기의 전위차가 포화(saturate) 되었다고 판단될 때까지 측정하였다.

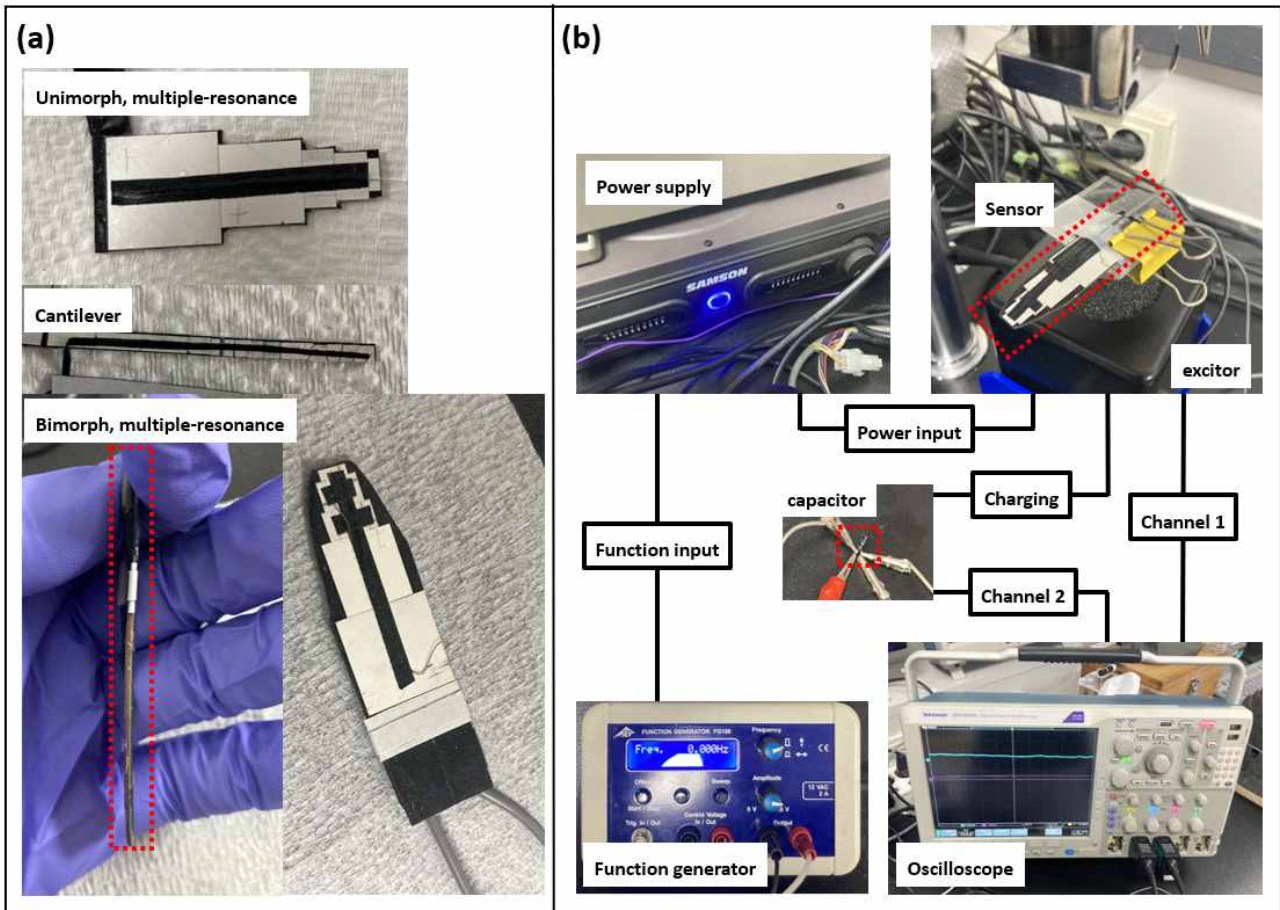


Fig. 6. (a) Photograph of manufactured sensors. in order from the top; Unimorph multi-resonance sensor with PET film substrate / Simple cantilever structure with constant width along the length / Bimorph multi-resonance sensor with Brass plate substrate. (b) Experimental settings. Function generator and power supply make excitor to generate sinusoidal excitation. The sensor suffer base excitation from excitor. Finally the voltage above the sensor is measured by oscilloscope. Simultaneously charging the capacitor. (pass through the didode bridge)

4. 실험 결과 및 토의

4.1 공진주파수 분석 (Frequency Domain Analysis)

총 3가지 타입의 외팔보에 대해서 공진주파수 분석을 진행하였다. <Fig 7a> 첫 번째 유니모르프 형태의 다중 공진주파수 센서에서는 56.7Hz/67.5Hz/84.3Hz/114.9Hz에서 공진이 발생했다. 따라서 초기에 목표로 하였던 100Hz 근처에서 다중 공진주파수를 가지는 구조임을 확인할 수 있었다. <Fig 7b> 두 번째 폭이 일정한 외팔보 형태의 센서에서는 매우 좁은 대역폭(bandwidth)을 가진 것을 확인했고, 1 ~ 300 Hz 사이에서 총 7개의 모드가 관측되었다. 따라서 공진주파수 사이의 거리가 너무 넓어 동작기계의 특정한 운전 상태를 판별하기에는 어려움이 있을 것으로 판단하였다. <Fig 7c> 마지막으로 바이모르프 형태의 다중 공진주파수 센서에서는 63Hz/75.4Hz에서 공진이 발생했다. 원래의 목표 주파수였던 100Hz 근처에서 공진이 발생함을 확인할 수 있었으며, 대역폭(bandwidth)을 계산하였다. 공진 시에 발생하는 전위는

431.46mV로 일반적으로 주파수 응답에서 대역폭을 계산하는 방식인 -3dB을 적용하여 계산하였다. 데시벨(decibel)의 계산 식은 아래와 같다. 따라서 기준전압(V_{ref})에 공진시 발생하는 전위 431.46mV를 넣어 계산하면 약 305.1mV의 전위에서 응답의 크기가 -3dB 감소함을 알 수 있다. 305.1mV 기준으로 해당 센서의 대역폭은 20Hz로 계산할 수 있다.

$$dB = 20 \log \frac{V}{V_{ref}}$$

폭이 일정한 외팔보 형태에서는 특정 운전을 계측하기에는 무리가 있음을 알 수 있으며, 다중-공진주파수 구조의 센서로서 효용성을 확인할 수 있었다.

PET 필름의 탄성계수는 4GPa, 황동판의 탄성계수는 100GPa, 그리고 PZT-5H의 탄성계수는 71GPa이므로 유니모르프 형태에서는 PET 바닥면의 강성이 PZT-5H보다 더 낮았다. 따라서 PZT-5H에 충분한 응력(stress)이 전달되기 전에 PET가 먼저 휘어버리는 현상이 발생하였고, 매우 낮은 전위차로 인하여 에너지 하베스터로서의 효용성이 없어져 이를 개선하고자 강성이 더 높은 황동판을 바닥면으로 만든 바이모르프 형태의 센서 모듈(sensor module)을 제작하여 이용하였다. 또한 유니모르프(PET substrate) 형태에서는 대략 1mV로 매우 낮은 전위가 나타났고, 이를 보완하고자 개선했던 바이모르프(Brass substrate) 형태에서는 약 400mV의 전위가 나타나 개선되었음을 확인할 수 있었다. 예상대로 PZT-5H 보다 높은 강성을 가진 황동판을 이용하고, 양 쪽에 PZT 세라믹을 부착한 바이모르프 형태에서 훨씬 더 많은 전위차가 계측되었음을 확인할 수 있었다.

따라서 본 실험을 통해 바이모르프 형태의 다중-공진주파수 구조를 가진 센서/에너지 하베스터의 효용성을 확인할 수 있다.

4.2 공진주파수 하 축전기 충전 분석 (Analysis of Capacitor Charging at Resonance Frequency)

바이모르프 형태의 센서에 대해서 정상 운행 시 축전기 충전 특성에 대해 실험을 진행하였다. <Fig 7d> 공진주파수 분석 시에 이용하였던 실험 장비 세팅을 유지한 채, 해당 센서의 공진주파수인 63Hz를 인가하며 캐패시터의 충전 특성을 확인하였다. 충전 시작(기기 작동 시작)부터 41.8초 이후에 완충이 되는 것을 확인할 수 있었다.

4.3 단위면적 당 전위차 (Voltage Output per Unit Area)

바이모르프 센서에 사용한 PZT는, 17.5mm * 17.5mm 1개 / 13.5mm * 13.5mm 1개 / 5mm * 1.2mm 10개를 결합하여 이용하였다. 따라서 PZT-5H의 총 면적은 548.5mm²이다. 공진 시 발생하는 전위는 431.46mV이므로 단위면적 당 발생하는 전위차는 78.66 mV/cm²이다.

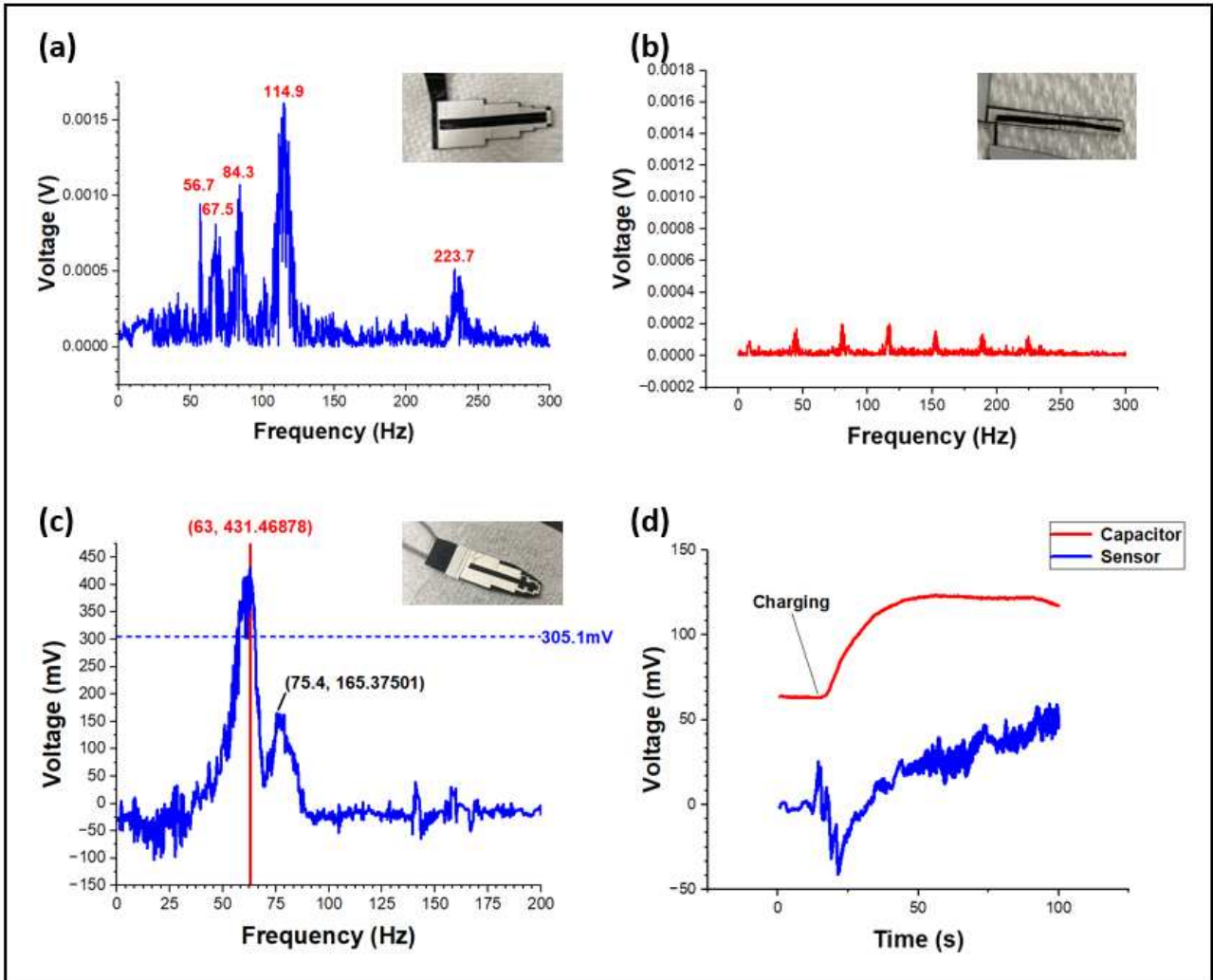


Fig. 7. (a) Unimorph multiple-resonance structure sensor, frequency domain analysis. Resonance frequencies are observed around the 100Hz(target frequency). (b) Simple, constant width cantilever, frequency domain analysis. 7 number of resonance frequencies are observed. Voltage output almost 0. (c) Bimorph multiple-resonance structure sensor, frequency domain analysis. The resonance frequency is observed at 63Hz. Considering -3dB, the bandwidth is about 20Hz. It is possible to detect the operation state of the machine. (d) Charging characteristic of capacitor. it decays within about 40 seconds.

5. 결론

본 연구를 통해 산업기계의 정상 운전상태에서 작동 가능한 센서/에너지 하베스터 모듈을 제작하였다. 다중 공진주파수를 가진 구조를 활용하여 기존의 동일한 너비의 에너지 하베스터에 비해 넓은 공진주파수를 가져 센서로서의 역할과 에너지 하베스터로서의 역할을 동시에 수행하였다. 압전소자의 재료로는 PZT-5H를 이용하였으며, 유니모르프가 아닌 바이모르프 구조로 제작하여 출력되는 전압을 높여 에너지 하베스터로서의 효율을 높였다. 기존의 길이방향으로 너비가 일정한 외팔보와 달리, 길이 방향으로 너비가 점점 좁아지는 구조를 이용하여 제작한 바이모르프 센서는 63Hz에서 공진하며, 공진주파수에서 진동시 출력되는 전압은 431.46mV로, 센서의 면적 548.5mm² 임을 고려하면 양호한 성능을 나타낸다. 주파수 응답 특성에서 대역폭은 -3dB 기준, 20Hz 정도로 단순 외팔보에 비해 넓은 대역폭을 가지는 구조임을 알 수 있다.

본 연구에서는 수행하지 못하였지만, 우리가 제작한 소형의 센서 여러 개를 직렬로 연결한다면 직접

장비를 멈추는 단순한 브레이크 시스템까지 구성할 수 있을 것으로 기대한다. 더 나아가서 MEMS 분야로 확장하여 적용한다면 더욱 정밀하고 높은 출력을 가지는 센서를 제작한다면, 산업기계의 작동 이상 유/무를 실시간으로 센서가 계측하고, 아날로그(analog) 회로를 통해 작업자가 직접 기계를 멈추는 방식에 비해 훨씬 빠른 속도로 장비를 정지시킬 수 있을 것이다. 산업기계에서 나오는 막대한 양의 진동에너지를 자가발전을 통해 고장난 장비가 더 돌아가 부품의 파손 또한 방지할 수 있다. 이로 인해 산업기계 장비 사고를 줄일 수 있으며, 고비용의 부품의 고장 또한 감소시킬 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 연구를 통해 산업 전반에 걸친 안전장치에 대해 구상해보았다. 빛이나 열, 소음 등 버려지지만 재활용하기 어려운 에너지를 하베스팅을 사용하여 기존 안전장치와는 차별점을 두었는데, 외부 전력을 사용하지 않고 사고 발생 전 그 징후를 알아차리는데 차별점을 두었다. 진단과 발전을 동시에 수행할 수 있는 센서를 설계하는 것은 쉽지 않았지만 산업 현장 안전 증진을 목표로 하여 성과를 보였다는 점에서 긍정적인 결과를 얻을 수 있었다. 본 과제에서는 CNC 장비만을 목표로 하였지만 추후 개발을 통해 다양한 산업 기계에 적용 가능한 장치를 만들어 산업 전반에 걸쳐 안전 환경 증진을 이루어 낼 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) Józwik, J., Wac-Włodarczyk, A., Michałowska, J., & Kłoczko, M. (2018). Monitoring of the noise emitted by machine tools in industrial conditions. *Journal of Ecological Engineering*, 19(1), 83-93.
- (2) Sezer, N., & Koç, M. (2021). A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting. *Nano Energy*, 80, 105567.
- (3) Xiong, S., Kawada, H., Yamanaka, H., Matsushima, T., & Muralt, P. (2007, May). Highly sensitive PZT thin film ultrasonic micro-sensors with grooved diaphragm. In 2007 Sixteenth IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics (pp. 707-710). IEEE.
- (4) Koka, A., & Sodano, H. A. (2013). High-sensitivity accelerometer composed of ultra-long vertically aligned barium titanate nanowire arrays. *Nature communications*, 4(1), 1-10.
- (5) Kutiš, V., Dzuba, J., Paulech, J., Murín, J., & Lalinský, T. (2012). MEMS piezoelectric pressure sensor-modelling and simulation. *Procedia Engineering*, 48, 338-345.
- (6) Wang, T. W., & Lin, S. F. (2020). Wearable piezoelectric-based system for continuous beat-to-beat blood pressure measurement. *Sensors*, 20(3), 851.
- (7) Chen, X., Xu, S., Yao, N., & Shi, Y. (2010). 1.6 V nanogenerator for mechanical energy harvesting using PZT nanofibers. *Nano letters*, 10(6), 2133-2137.
- (8) Tressler, J. F., Alkoy, S., & Newnham, R. E. (1998). Piezoelectric sensors and sensor materials. *Journal of electroceramics*, 2(4), 257-272.