

# 다방향 진동에 대응 가능한 정전용량형 2축 에너지 포집기의 개발 Development of 2-axis electrostatic energy harvester applicable to diverse direction of vibration

\*정봉원<sup>1</sup>, 권지한<sup>1</sup>, 이재익<sup>1</sup>, 백대현<sup>1</sup>, #김종백<sup>1</sup>

\*Bongwon Jeong<sup>1</sup>, Jihan Kwon<sup>1</sup>, Jae-ik Lee<sup>1</sup>, Dae-Hyun Baek<sup>1</sup>, #Jongbaeg Kim(jbkim@yonsei.ac.kr)<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> 연세대학교 기계공학과

Key words : Energy harvester, Power MEMS, Energy conversion, 2-axis resonator

## 1. 서론

마이크로·나노 기술의 발전은 기존의 매크로 단위의 소자를 대체하는 고성능·초소형 소자의 개발을 촉진하였다. 현재 개발된 대다수의 마이크로 소자는 전기를 에너지원으로 하고 있으나, 배터리 등의 기존의 에너지 공급원은 부피가 크고 정기적인 교체가 요구되기 때문에 마이크로 소자의 소형화 및 반영구적인 독립구동을 저해하는 요소이다 [1]. 기존의 에너지 공급원을 대체할 소자로 에너지 포집기(energy harvester)가 있다. 에너지 포집기는 주변 환경에 존재하는 에너지를 전기 에너지로 전환하는 소자로, 대표적인 예로 태양 전지가 있다. 태양 전지의 전환 에너지원인 광학 에너지 외에도, 열, 진동 등의 다양한 에너지원이 존재하며, 이를 전기 에너지로 전환하기 위한 에너지 포집기를 개발하려는 노력이 지속되고 있다.

진동에너지는 주변에서 쉽게 찾을 수 있는 에너지 원이다. 진동 에너지 포집기의 전환 메커니즘은 크게 압전형, 정전용량형, 전자기형으로 나뉜다[2]. 이 중 정전용량형은 구성 및 공정이 간단하고 에너지 공급 대상이 되는 소자와 일괄 공정이 가능하다는 장점이 있다. 외부 전압을 통한 초기 대전의 필요성은 정전용량형의 단점이나, 전석(electrets)을 통해 초기 대전 없이 반영구적으로 구동이 가능한 포집기들이 개발되고 있다[3].

정전용량형 에너지 포집기에서 에너지의 변환은 탄성 시스템이 진동에 의해 구동될 때 발생하는 캐패시턴스 변화를 통해 이루어지며, 전환되는 에너지량은 캐패시턴스 변화량과 비례한다. 캐패시터 구조로 콤팩터 배열(combfinger array)이 주로 사용되며, 구동 방식에 따라 크게 간격변화형(gap-closing)과 면적변화형(overlapping)으로 나뉜다[4]. 간격변화형은 콤팩터 사이의 간격을 외부 가진을 통해 변화하는 방식으로, 콤팩터 간의 중첩 영역의 변화를 통한 방식인 면적변화형에 비해 캐패시턴스 변화의 폭이 크기 때문에 우수한 에너지 전환 효율을 나타낸다.

현재까지 개발된 정전용량형 에너지 포집기는 단일 축으로만 구동이 가능하다. 주변에 존재하는 진동 에너지원의 공진 주파수 및 가진 방향 등의 진동 특성이 기계의 마모 등과 같은 주변 환경의 변화에 의해 바뀔 수 있음을 상기해볼 때, 실질적인 포집기의 운용을 위해선 다변 환경에 적응 가능한 소자를 개발하는 것이 요구된다.

본 연구에서는 가변 진동 특성 중 가진 방향에 초점을 맞추어 2축 정전용량형 에너지 포집기를 개발하고자 한다. 설계한 에너지 포집기에 대한 시뮬레이션을 통해 진동 특성을 파악하고자 하며, 캐패시턴스 변화를 측정하여 에너지 포집기로서의 가능성을 확인한다. 또한, 제시된 에너지 포집기의 문제점을 살펴보고, 향후 개선 방향을 제시한다.

## 2. 소자 설계

정전용량형 에너지 포집기는 특정 공진 주파수를 가지는 탄성 구조물로 구성된다. 1 자유도를 갖는 단순 보 구조를 탄성체로 사용한 기존의 1축 에너지 포집기와 달리, 본 연구에서 개발한 소자는 시스템에 2 자유도를 부여하기 위해 서펜타인(serpentine) 보 구조를 탄성체로 사용하였다. 수

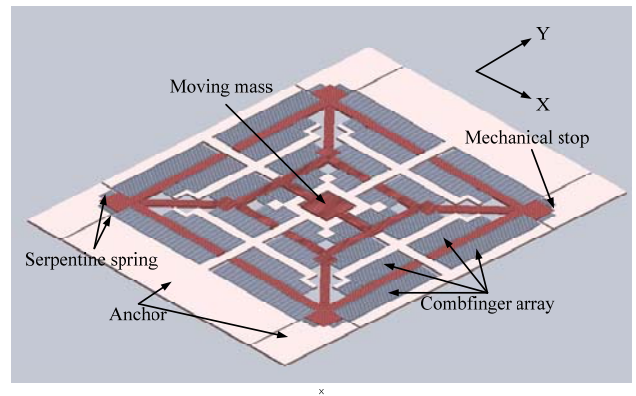


Fig. 1 Design of 2-axis electrostatic energy harvester

식을 통해 계산된 서펜타인 탄성체의 탄성계수는 x, y 방향에 대하여 각각 34 N/m 와 68 N/m 이다[5]. 서펜타인 탄성체는 대칭 구조로 총 8 개가 배치되었으며, 총체적으로 하나의 축에 대해 412 N/m 의 탄성계수를 가진 탄성체로 작용한다.

그림 1 은 설계된 소자를 나타낸다. 서펜타인 탄성체와 연결된 부분은 탄성 시스템의 질량으로, 외부 진동에 의해 구동되어 고정 전극과 쌍을 이루고 있는 콤팩터 캐패시터 내부에 캐패시턴스 변화를 일으킨다. 캐패시턴스 변화는 최적화된 콤팩터 배치를 통해 증가하고, 이를 위해 각각 450um 과 250um 길이의 콤팩터를 물고기뼈(fishbone) 구조로 배치하였다. 콤팩터 배열의 캐패시턴스 변화는 1 장에서 언급된 간격변화형과 면적변화형의 복합적인 형태로 유도되나, 본 에너지 포집기에서는 에너지 전환 효율이 우수한 간격변화 방식을 중점으로 고려하였다[4].

## 3. 제작 공정

본 연구에서 설계된 소자는 SOI 웨이퍼를 기반으로 제작되었다. 20um 두께의 소자층과 1um 두께의 산화층으로 구성된 SOI 웨이퍼의 전면과 후면에 습식 산화를 통해 산화층을 생성한 후, 리소그래피 공정과 RIE 를 통해 산화막을 패터닝한다. 패터닝 산화막은 DRIE 를 위한 마스크로 사용되어 웨이퍼의 전면과 후면에 대한 고정밀 식각이 가능하도록 한다. DRIE 를 통해 웨이퍼 전면과 후면의 실리콘층을 식각한 후, 마지막으로 불산을 통해 간층 산화막을 제거하여 소자의 공정을 완료한다.

## 4. 시뮬레이션 및 실험 결과

실험에 앞서, 본 연구에서 설계된 2축 에너지 포집기의 진동 특성을 파악하기 위해 ANSYS 를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션의 편의를 위해 구동 질량 및 고정 전극에서 콤팩터 배열을 제거하여 해석하였고, 공기 등에 의한 감폭 효과는 무시되었다. 우선 제작된 소자의 수평 거동이 발생하는 모드와 공진주파수를 탐지하기 위해 모드 해석을 수행하였다. 시뮬레이션 결과, x 축 방향 수평 거동 모드의 공진 주파수는 11.3 kHz 로 나타났고, y 축 방향

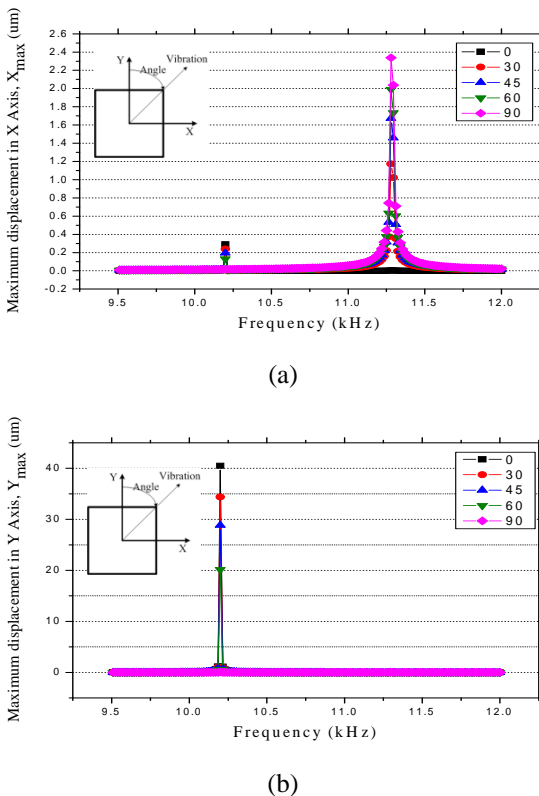


Fig. 2 Simulated frequency response of the developed energy harvester for (a) maximum displacement in x axis, (b) maximum displacement in y axis

수평 거동 모드의 공진 주파수는 10.2 kHz로 관찰되었다. 그림 2는 3g의 진동이 각기 다른 각도에서 주어졌을 때 나타나는 각 축의 주파수 응답 특성을 나타내는 시뮬레이션 결과이다. x축과 y축의 최대 변위의 피크 값과 공진 주파수가 다르게 나타나는 것이 관찰되는데, 이는 설계된 소자가 완전히 대칭된 구조가 아니라 y축에 대한 선대칭 구조로, 구동 질량의 좌측 분면과 우측 분면의 독립 구동을 방지하기 위해 구조물을 서로 연결한 데서 기인한다.

시뮬레이션 결과를 검증하기 위해 다른 각도에서 가진이 주어졌을 때 나타나는 캐패시턴스의 절대 변화를 측정하였다. 측정 장비로는 HIOKI사의 3532-50 LCR HITESTER가 사용되었다. 실험 결과는 그림 3과 같다. 실험 결과에서 나타난 공진 주파수는 각각 10.4 kHz와 11.6 kHz로, 시뮬레이션에서 나타난 공진 주파수와 비교할 때 각각 1.9%와 2.7%의 오차를 보이며 근사하게 나타난다. 그러나 실험 결과에서는 이론 상 존재하지 않아야 할 주파수 응답이 0°와 90°에서 나타난다. 0°와 90°에서는 1축 방향, 즉 x나 y축 중 하나의 방향에서만 가진이 주어지기 때문에 캐패시턴스 변화의 피크가 1개만 관찰되어야 하나, 실제 실험 결과에서는 2개가 모두 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 실제 가진기의 구동에서 가진 축 외 타 축으로 미세한 가진이 이루어지기에 발생하는 것으로 예상된다. 또한, 시뮬레이션 결과에서는 y축 방향의 최대 변위가 x축 방향의 최대 변위의 약 20배로 큰 차이가 나타나나, 실험 결과에서는 상대적으로 적은 차이를 보인다. 첫 번째 원인으로 시뮬레이션에서 무시되었던 공기에 의한 감폭 효과가 있다. 다른 원인으로, 최대 변위가 발생하는 부분이 상대적으로 전체 캐패시턴스 변화에 큰 영향을 끼치지 못하는 면적변화 방식이 활성화되는 지점에 위치한다는 점이다. y축 방향의 가진을 가정할 경우, 소자의 상단과 하단에 위치한 콤팩트 배열에서는 면적변화 방식을 통해, 소자의 좌단과 우단에 위치한 콤팩트 배열에서는 간격변화 방식을 통해 캐패시턴스 변화가 발생한다. 이 때 최종 캐패시턴스

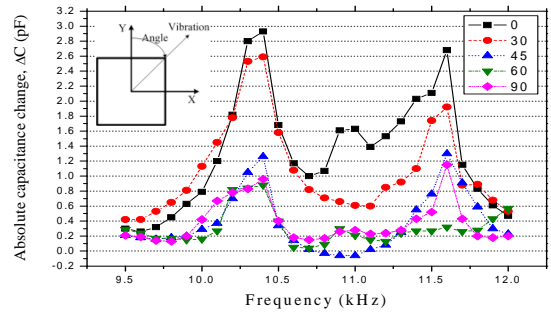


Fig. 3 Experimental measurement of frequency spectrum for absolute capacitance change

변화량을 결정짓는 것은 간격변화형 콤팩트 배열이다. 좌단과 우단에서 발생하는 변위는 최대 변위에 비해 작으므로, 실제 캐패시턴스 변화는 주파수 변위 응답 특성과 다르게 나타날 가능성이 크다.

시뮬레이션 결과와 실험 결과를 종합해 볼 때, 본 연구에서 제시된 에너지 포집기는 제한적인 2축 구동은 가능하나 고효율의 구동은 어렵다. 이는 x축과 y축 방향의 공진 주파수가 일치하지 않는 데서 발생하는 문제로, 각각의 공진 주파수에서 설계된 전체 콤팩트 중 절반만이 간격변화형으로 활성화되는 데서 기인한다. 향후 설계에서는 소자의 x축과 y축의 진동 특성을 일치시키고, 이를 통해 전체 콤팩트를 활성화하여 효율을 높이려는 시도가 요구된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 다방향 진동에 적용할 수 있는 2축 에너지 포집기를 제시하였고, 이에 대한 시뮬레이션과 실험을 수행하고 결과를 분석하였다. 제시된 에너지 포집기는 서펜타인 탄성체를 이용하여 2축 구동이 가능하도록 하였고, 에너지 전환 효율의 최적화를 위해 간격변화 방식에 중점을 두고 콤팩트를 배치하였다. 개발된 소자는 다방향 진동에서 캐패시턴스 변화를 나타내어 2축 에너지 포집의 가능성을 제시하였으나, 성능이 제한되어 향후 개선이 요구된다. 이는 소자의 x축과 y축 진동 특성의 일치화를 통해 가능할 것으로 예상된다.

### 후기

본 연구는 서울시 신기술 연구개발 지원사업(11032)의 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. J. A. Paradiso, T. Starner, "Energy scavenging for mobile and wireless electronics", *Pervasive computing*, Jan.-Mar. 2005, pp. 18-27.
2. S. P. Beeby, M. J. Tudor and N. M. White, "Energy harvesting vibration sources for Microsystems applications", *Meas. Sci. Technol.*, 17, 2006, R175-R195.
3. T. Sterken, P. Fiorini, K. Baert, R. Puers, G. Borghs, "An electrets-based electrostatic u-generator", *Transducers 2003*, pp. 1291-1294.
4. S. Roundy, P. K. Wright, K. S. J. Pister, "Micro-electrostatic vibration-to-electricity converter", *Proc. IMECE '02, IMECE2002-34309*.
5. G. Barillaro, A. Molfese, A. Nannini, F. Pieri, "Analysis, simulation and relative performances of two kinds of serpentine springs", *J. Micromech. Microeng.* 15, 2005, pp. 736-746.