


COMSOL Multiphysics를 활용한 캔틸레버 형태의 압전 에너지 하베스터 구조 해석 시뮬레이션

곽민섭, 황건태 

부경대학교 재료공학과

Structural Analysis Simulation of Cantilever Shaped Piezoelectric Energy Harvester Using COMSOL Multiphysics

Min Sub Kwak and Geon-Tae Hwang

Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

(Received September 25, 2021; Revised October 1, 2021; Accepted October 6, 2021)

Abstract: In the 4th industrial age, electronic devices are becoming smaller and lighter with a low power consumption to overcome spatial limitation. The piezoelectric energy harvesters can convert mechanical kinetic energy into electric energy; thus, enabling the operation of small electronic devices. Recently, various piezoelectric harvesters have been reported and the electric output from these harvesters could be anticipated by theoretical analysis methods. For example, COMSOL Multiphysics software provides a theoretical simulation of piezoelectric effect with a combination of mechanical and electrical phenomena in the piezoelectric materials. This article introduces a brief modeling of piezoelectric harvester to investigate mechanical stress and electrical output of harvesting devices by the COMSOL Multiphysics software.

Keywords: COMSOL Multiphysics, Finite element analysis, Piezoelectric energy harvester

1. 서론

무선 통신을 통해 각종 전자기기를 연결하는 사물 인터넷(internet of things, IoT)은 4차 산업시대의 가장 중요한 기술 중 한 가지로 부각되고 있다 [1]. IoT에 사용되는 전자기기들은 공간적인 한계를 극복하기 위해 계속해서 소형화, 경량화 되고 있으며, 소형화된 장치가 요구하는 전력의 크기가 작아짐에 따라 경제적인 소규모 발전에 대한 관심이 증가하고 있다.

✉ Geon-Tae Hwang; gthwang@pknu.ac.kr

Copyright ©2021 KIEEME. All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

에너지 자원의 고갈과 환경 오염 문제로 인하여 일상생활에서 버려지는 에너지를 유용한 전기에너지로 변환시켜 주는 에너지 하베스팅은 저전력 소규모 전자기기의 전원으로서 많은 연구가 이루어지고 있다 [2,3]. 에너지 하베스팅의 에너지원으로 열 [4], 풍력 [5], 진동 [6], 자기장 [7] 등이 있으며 충전과 교체가 필요한 배터리와 달리 장기간 동안 안정적으로 에너지를 공급할 수 있다는 장점이 있다.

기계적 운동 에너지를 전기 에너지로 변환시키는 압전 에너지 하베스터(piezoelectric energy harvester, PEH)는 에너지 변환 효율이 크고 소재의 유연성으로 인하여 다양한 영역에 적용이 가능하다는 장점이 있어 지속적으로 연구가 이루어지고 있다 [6,8-10]. 압전효과란 결정 구조가 비대칭 격자를 가질 때 자발 분극이 발생하며 기계적 변형을 가했을 때 자발 분극 크기의 변화에 의해 압전체 내부

에 기전력이 발생하는 현상을 의미한다.

결정 구조의 변형을 일으키기 위한 에너지 원에 따라 도로, 교각, 건물 등의 구조물에서 발생하는 진동 에너지를 이용하는 진동형 압전 에너지 하베스터 [6,11], 전기 장치에 전원을 공급하기 위해 연결되는 전선의 주변에서 발생한 자기장에 자석을 이용하여 진동 에너지를 발생시키는 자기-기계-전기(magneto-mechano-electric, MME) 압전 에너지 하베스터 등의 형태로 연구되고 있다 [12-16].

같은 크기의 에너지원에서 더 큰 진동을 만들어 내거나 더 효율적으로 진동 에너지를 압전체에 전달하기 위하여 다양한 구조의 에너지 하베스터가 연구되고 있다. 그중 캔틸레버(cantilever) 구조는 한쪽 끝을 고정하고 반대쪽 끝에 힘을 가했을 때 더 큰 변형을 일으킬 수 있는 구조로 많은 연구가 이루어졌다.

캔틸레버 구조의 압전 에너지 하베스터 연구에는 구조에 가해지는 힘에 따른 응력과 기계적 변형률, 그에 따른 전기 에너지 출력 경향성 등을 이론적으로 예측하는 과정이 수반된다 [17,18]. 이러한 구조 해석을 위하여 컴퓨터의 발달과 함께 유한요소해석(finite element analysis, FEA)을 적용한 상용 소프트웨어가 지속적으로 개발되었다.

유한요소해석이란 구조물을 가상의 유한한 크기의 요소로 분할하고 이러한 요소에 대한 편미분방정식을 여러 개의 연립방정식으로 계산하여 수렴하는 근사해를 추정하는 방식이며 원하는 물리 현상에 대한 편미분방정식을 적용 가능하며 각 요소에 대해 비교적 정확한 해를 구할 수 있다는 장점이 있다.

COMSOL Multiphysics는 유한요소해석을 이용하여 다양한 물리학적 현상의 해석에 사용되도록 개발되었다. 특히, 물리 영역 간의 상호작용을 효과적으로 모사하는 기능이 제공되어 다양한 다중물리현상의 해석이 필요로 할 때 많이 활용되며, 이는 기계적 운동에너지와 전기적 특성이 결합된 압전 소자의 특성을 분석하는 데도 널리 사용되고 있다 [19].

본 Tutorial Status Report에서는 대표적인 유한요소 해석 프로그램인 COMSOL Multiphysics를 이용하여 압전체와 기판이 조합된 캔틸레버 구조의 압전 에너지 하베스터를 이론적으로 해석하여 전기적 출력을 예측하는 방법을 제시한다. 이를 위해 소프트웨어에서 제공하는 컴퓨터 지원설계(computer-aided design and drafting, CAD) 도구를 이용하여 2차원(2D) 영역에서 압전 에너지 하베스터의 구조를 설계하고 각 구역에 해석에 필요한 물성치를 부여하였다. 최종적으로 캔틸레버의 끝에 물리적인 힘을 가했을 때 캔틸레버 구조 전체의 응력 분포와 압전 재료 내부의 기전력의 변화를 확인하였다.

2. 본 문

COMSOL Multiphysics는 사용자의 편의성을 위하여 그래픽 사용자 인터페이스(graphical user interface, GUI)에서 이공학 분야의 실제 연구 과정을 모사할 수 있도록 다양한 도구를 제공한다. 전처리과정 및 후처리과정 해석이 하나의 환경에 통합되어 구현되어 있으며 다중물리 현상에서 유도되는 모든 방정식을 동시에 해석하며 원하는 형태의 물성과 경계조건을 부여할 수 있다. 이를 통해 기계적 구조 해석-전기적 해석의 다중물리 특성을 가진 압전 효과에 대해서도 실제와 가까운 형태를 고려하여 구현 가능하다.

본 Tutorial Status Report에서는 그림 1에 나타낸 순서와 같이 압전 에너지 하베스터의 시뮬레이션 모델을 구현하고자 한다. 모델링의 순서는 COMSOL Multiphysics에서 제공하는 GUI 도구를 차례대로 설정하는 순서와 같으며 시작 화면인 빈 모델의 화면에서부터 구성하는 것으로 가정한다. 압전 에너지 하베스터 시뮬레이션 모델은 2D에서 구현되기 위해 2D component로 제작되었다.

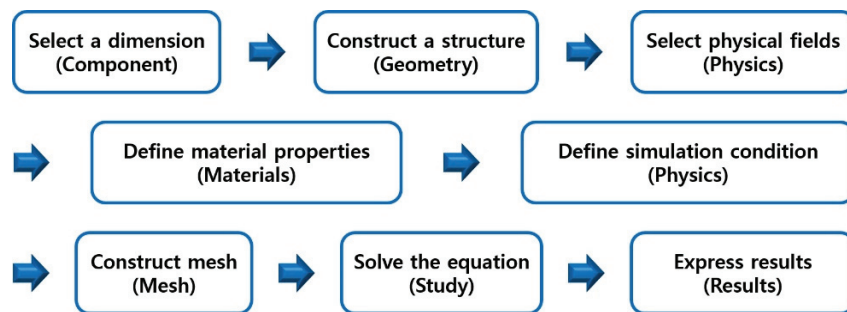


Fig. 1. A modeling flowchart of COMSOL Multiphysics.

2.1 구조체 설계('geometry' part)

'Geometry' 도구는 CAD 도구를 이용하여 분석하고자 하는 영역을 설계할 수 있도록 지원한다. 영역을 만들기 위하여 1차원(1D), 2차원(2D), 3차원(3D)의 구조체를 구현할 수 있으며 2D에서는 직선, 사각형, 원 등의 그리기 도구를 이용하여 영역을 구성할 수 있다. 또한 Auto CAD 등의 타 CAD 소프트웨어에서 제공하고 있는 CAD 파일을 불러와서 사용할 수도 있으며, 만들어진 영역 간의 교집합, 차집합, 합집합 등의 편의성을 가진 도구를 제공한다. 이러한 CAD 도구를 활용하여 모델링을 원하는 영역의 크기와 위치를 설정하여 영역을 구현한다.

캔틸레버 구조의 압전 에너지 하베스터를 구현하기 위해 'rectangle' (사각형 그리기) 도구를 이용하여 기판[65 (L) x 0.3 (T) mm²] 위에 압전층[30 (L) x 0.2 (T) mm²]의 구조를 설계하였다. COMSOL Multiphysics에서는 그래픽을 통하여 그림 2와 같이 구현된 모델을 확인할 수 있다. 설계된 영역을 도메인(domain)이라고 지칭하며 각 영역에 대하여 시뮬레이션 하기 위해서 지배식을 선택하고 지배식에 필요한 종속 변수들과 물성 값을 부여하는 과정을 거친다.

2.2 지배식 선택('physics' part)

COMSOL Multiphysics에서는 광범위한 물리 현상을 모델링 하기 위하여 각각의 영역에 대한 GUI와 지배식을 제공하며, 프로그램 내에서는 이 도구를 'physics'라고 지

칭한다. 지배식이란 물리적 현상을 해석하기 위해 이루어진 편미분방정식 등을 지칭하는 단어로 물성의 해석방식에 따라 같은 'physics'에서도 서로 다른 지배식을 제공하는 경우도 있다.

본 Tutorial Status Report에서 예시로 해석하고자 하는 것은 캔틸레버형 압전 에너지 하베스터에 기계적 변형이 일어났을 때, 압전물질의 유전 분극 특성 변화에 의해 기전력이 발생하는 압전효과 현상이다. 따라서 COMSOL Multiphysics 프로그램 내에서 압전효과를 해석하려면 구조 해석을 위한 'solid mechanics' 지배식과 전기적 특성을 해석하기 위한 'electrostatics' 지배식이 동시에 필요하며, 두 'physics'를 결합한 multiphysics 형태인 'piezoelectric effect' 지배식을 이용하면 된다.

'Solid mechanics'는 구조에 대한 기계적 운동 현상을 해석하기 위한 모듈이며, 물체의 운동상태가 시간에 따라 변화하지 않고 그대로인 정상상태(stationary state)에서 압전현상을 해석하기 위한 'solid mechanics'의 지배방정식은 아래의 식과 같이 정의된다. S 는 응력, F_v 는 단위 변형 체적당 힘, ρ_v 는 단위 변형 체적당 전하 농도, D 는 전기 선속 밀도, C 는 탄성 텐서, ϵ 는 유전율, ϵ 는 변형률로 정의된다.

$$0 = \nabla * S + F_v \quad (1)$$

$$\nabla * D = \rho_v \quad (2)$$

$$S = S_0 + C : \epsilon_{el} - \frac{1}{3}(\epsilon_{vol} + \epsilon_w)C : l - E * e, \quad \epsilon_{el} = \epsilon - \epsilon_{inel}, \quad \epsilon_{inel} = \epsilon_0 + \epsilon_{th} \quad (3)$$

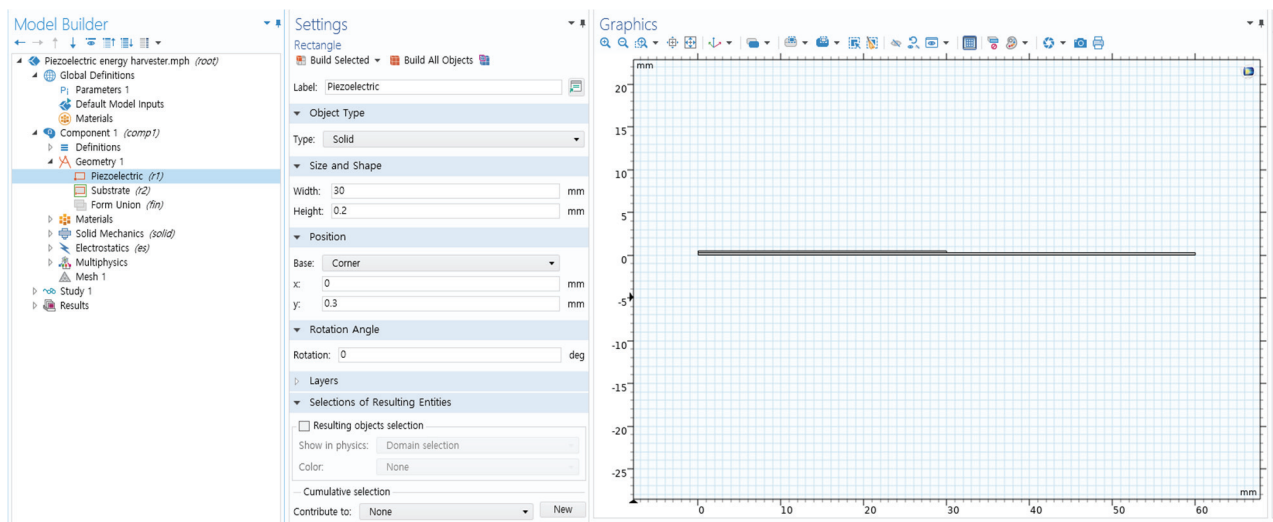


Fig. 2. Structure of piezoelectric harvester drawing by the rectangular geometry tool.

$$C = C(c_E), e = e(e_{ES}) \tag{4}$$

$$\epsilon = \frac{1}{2}[(\nabla u)^T + \nabla u] \tag{5}$$

$$D = D_r + \epsilon_{0,vac}E + P(E) + e : \epsilon_{el} \tag{6}$$

‘Electrostatics’는 정전기적 물리 현상을 해석하기 위한 모듈로 정상상태에서 압전현상을 해석하기 위한 지배 방정식은 다음과 같다. 지배방정식에서 x 는 전기 감수율로 정의된다.

$$D = \epsilon_0 E + \epsilon_0 \chi_{rs} E + P_e(\epsilon_{elast}) \tag{7}$$

$$E = -\nabla V \tag{8}$$

2.3 물성 부여(‘materials’ part)

지배식을 해석하기 위하여 ‘geometry’로 구성된 영역에 지배식의 종속변수에 해당하는 물성을 부여해야 한다. COMSOL Multiphysics 프로그램 내의 ‘materials’ 항목은 설계된 영역에 물성을 부여하는 도구이다. 각 물성은 ‘physics’의 지배식이 요구하는 정보를 제공하며 COMSOL Multiphysics에서는 기본적으로 널리 쓰이고 있는 다양한 물질에 대한 주요 물성 정보를 제공해 주어 ‘add material from library’ 도구를 통해 불러올 수 있다. 요구되는 물성은 ‘physics’의 설정(또는 지배식)에 따라 달라질 수 있으며 필요한 물성이 기입되지 않았을 때 해석이 정상적으

로 이루어지지 않는 오류를 야기할 수 있으므로, 필수적인 물성은 조사를 통해 기입해야 한다. 물성에는 특정한 값이 아닌 종속변수를 이용한 수식을 적용할 수도 있으며, 이를 활용하면 온도나 주파수에 따라 달라지는 특성 등을 설정하기에 용이하다.

본 Tutorial Status Report에서는 캔틸레버형 압전 에너지 하베스터의 해석을 위해 기판의 물질로 titanium을 사용하였으며, 힘을 가했을 때 기계적 응력을 해석하기 위해 titanium 기판에 요구되는 물성의 종류와 시뮬레이션에 입력된 물성 값은 표 1과 같다.

압전층에는 우수한 압전재료로 널리 쓰이는 $PbZr_xTi_{1-x}O_3$ (PZT)-5H의 물성을 부여하였으며, 그림 3과 같이 설정되었다. 이때 초록색 박스 표시는 지배식의 해석을 위해 요구되는 물성을 나타낸다. 밀도(density)는 $7,500 [kg/m^3]$, 비유전율(relative permittivity)은 $\{\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{33}\} = \{1,704.4, 1,704.4, 1,433.6\}$ 이 적용되었다.

COMSOL Multiphysics 프로그램 내에서 압전물질은 ‘stress-charge form’ (응력-전하형태) 및 ‘strain-charge form’ (변형률-전하형태)의 두 종류의 방법을 이용하여 물성 해석을 진행할 수 있다. 본 Tutorial Status Report에서는 ‘stress-charge form’을 이용하여 압전

Table 1. Material properties of titanium for simulation.

	Density	Young’s modulus	Poisson’s ratio
Titanium	4.51 [g/cm ³]	120 [GPa]	0.34

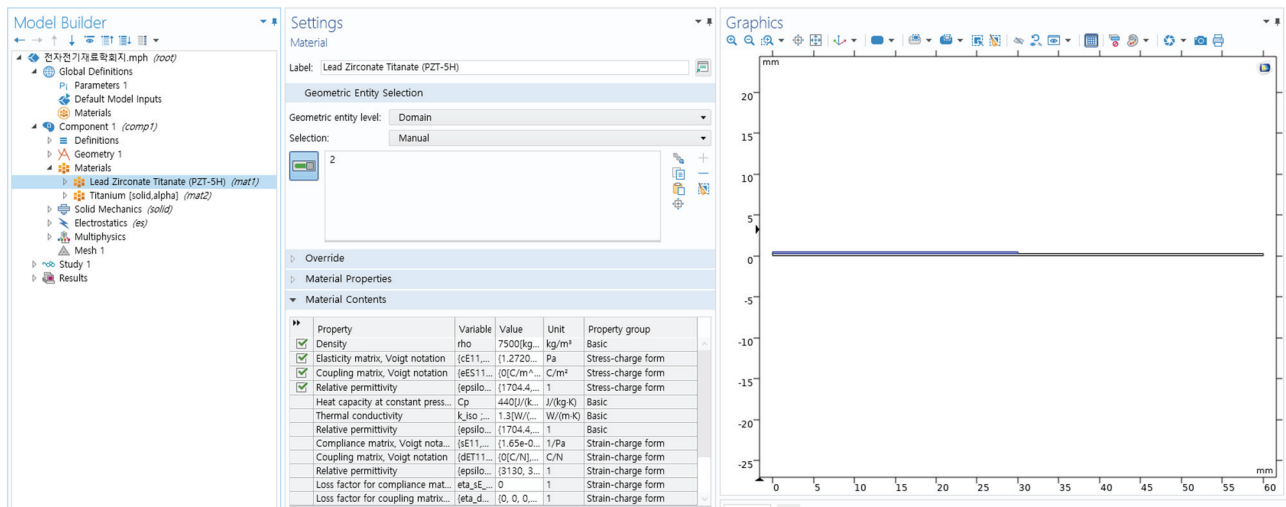


Fig 3. Added ‘PZT-5H’ material properties in the ‘materials’ menu.

효과를 해석하고자 하며 해석을 위해 요구되는 ‘elasticity matrix’ (c_E)와 ‘coupling matrix’ (e_{ES})는 표 2, 3과 같다.

Table 2. ‘Elasticity matrix’ (c_E) of PZT-5H.

1.27e2 [GPa]	8.02 [GPa]	8.47 [GPa]	0	0	0
	1.27e2 [GPa]	8.47 [GPa]	0	0	0
		1.17e2 [GPa]	0	0	0
			2.30 [GPa]	0	0
				2.30 [GPa]	0
					2.35 [GPa]

Table 3. ‘Coupling matrix’ (e_{ES}) of PZT-5H.

0	0	0	0	17.03 [C/m ²]	0
0	0	0	17.03 [C/m ²]	0	0
-6.62 [C/m ²]	-6.62 [C/m ²]	23.24 [C/m ²]	0	0	0

2.4 경계 설정(‘physics’ part)

‘Physics’에서 제공하는 GUI는 시뮬레이션 조건의 구현을 위해 각 물리현상에 사용될 수 있는 다양한 도구들을 제공한다. ‘Solid mechanics’는 일반적인 구조 해석을 하는데 있어, 고체역학과 함께 기계적인 힘을 분석하기 위한 구성을 제공한다. 먼저 ‘linear elastic material’, ‘free’, ‘initial values’ 도구는 구조 해석을 위하여 물성의 정보를 불러오기 위한 도구이다. 그 다음, 발생하는 기계적 응력이 압전체를 통해 해석될 수 있도록 ‘piezoelectric material’ 도구에서 CAD로 형태가 구현된 압전층을 선택한다.

캔틸레버 구조의 압전 에너지 하베스터는 외팔보 형태로, 한쪽 끝이 고정되어 있고 다른 쪽 끝은 자유롭게 움직이며 압전체에 기계적인 변형을 유발하는 구조이다. 캔틸레버 구조에 가해지는 힘에 따라 압전체에서 발생하는 응력 및 기전력을 해석하기 위하여 그림 4와 같이 압전층이 위치하고 있는 한쪽 끝(압전층과 금속기판의 좌측 경계)을 ‘fixed constraint’ 도구로 고정하고 압전층이 없는 반대쪽 끝은 ‘point load’ 도구를 이용하여 아래방향(-y 방향)으로 힘을 가하였다. 가해 주는 힘의 크기는 변수 F로 설정하였으며 ‘global definitions’의 ‘parameters’ 도구를 이용하여 F를 정의하는 방법을 그림 5에 나타냈다. 압전층의 물성을 분석하기 위해 CAD 영역에서 PZT-5H로 지정한 부분을 ‘piezoelectric material’ (압전층)으로 설정해 준다.

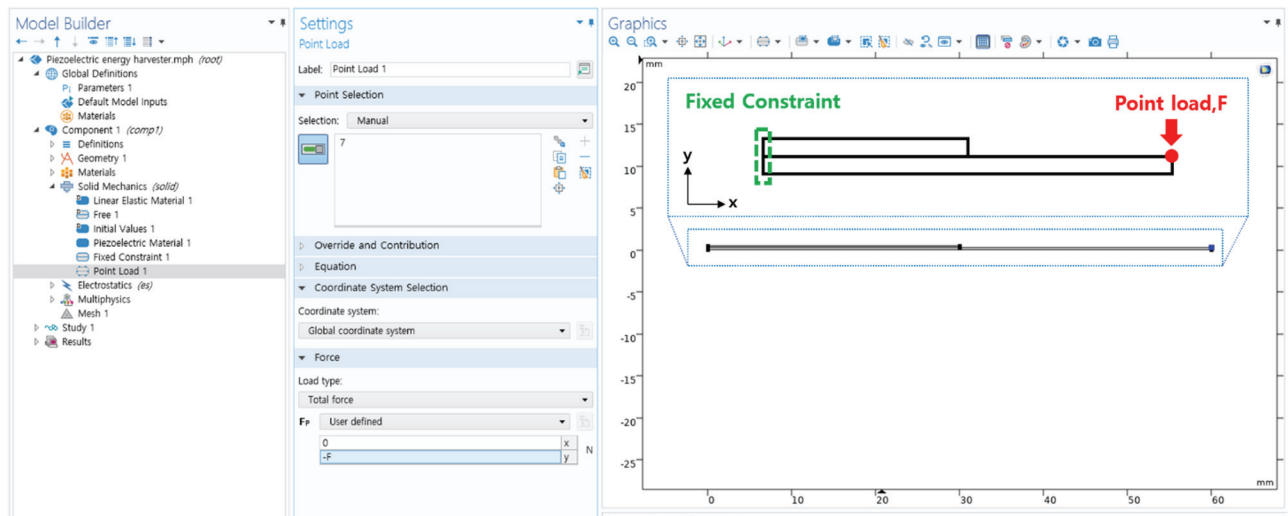


Fig. 4. ‘Fixed constraint’ and ‘point load’ function in the ‘solid mechanics’.

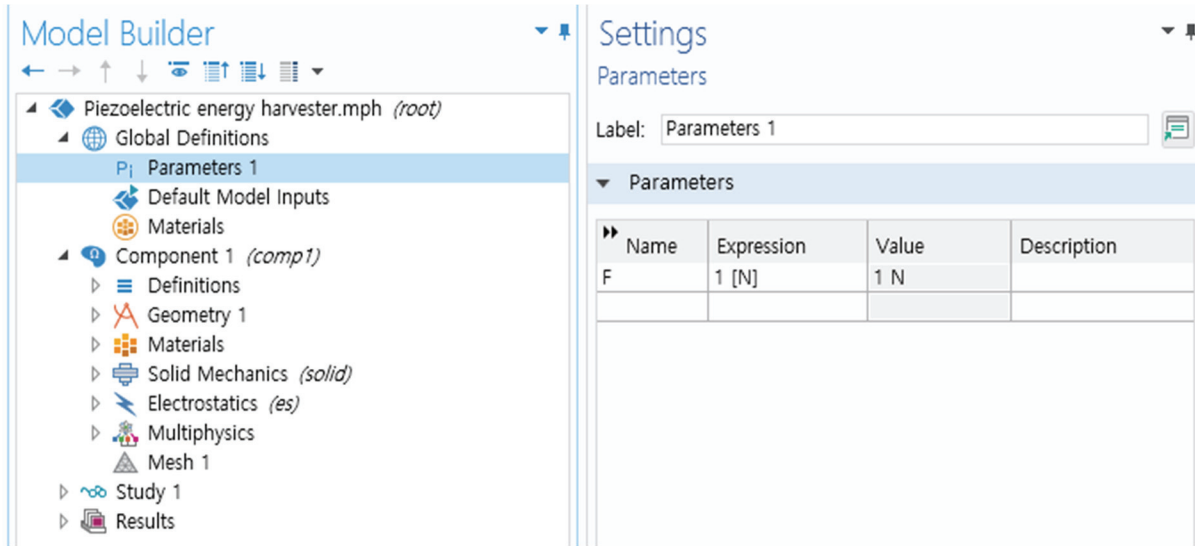


Fig. 5. Variable for force (F) in the ‘global definitions’ menu.

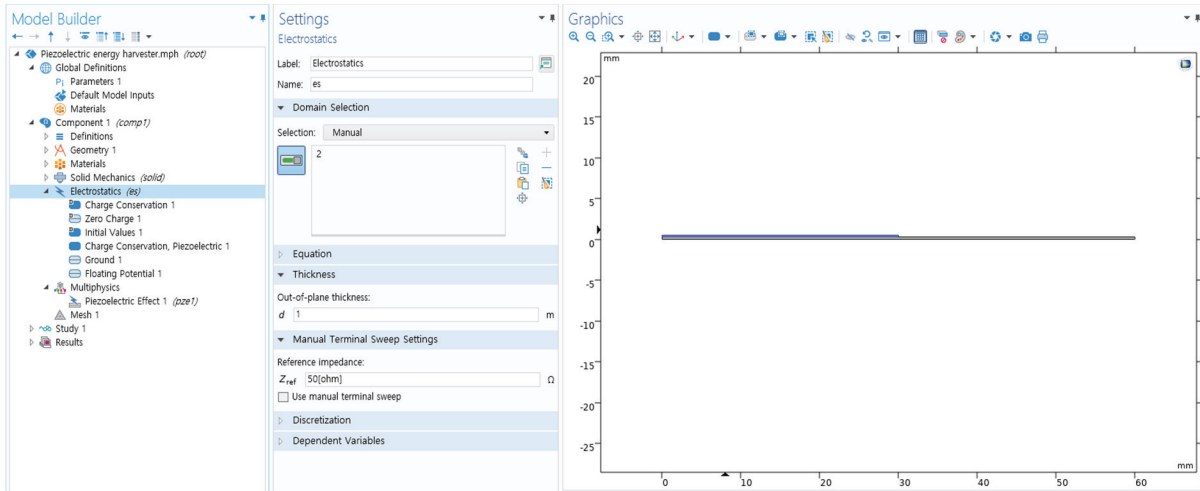


Fig. 6. Domain selection for calculation of electric properties.

‘Electrostatics’ 지배식은 전하 분포가 명시적으로 규정된 조건에서 유전체의 전기장, 전기 변위장 및 전위 분포를 계산하는 데 사용된다. ‘Charge conservation’, ‘zero charge’, ‘initial values’ 도구는 ‘electrostatics’ 지배식 영역에서의 해석을 위하여 물성을 불러오는 도구이다.

압전 에너지 하베스터에서 전기적 특성 발현은 압전층에서만 이루어지므로 해석 영역을 그림 6과 같이 압전층만 적용하였다. 또한 ‘charge conservation, piezoelectric’ 도구에서도 압전층이 선택되어 있는지 확인해야 한다. 하부전극에 해당되는 영역에서 압전체에서 발생하는 기전력

의 상대적인 크기를 0으로 설정하고자 ‘ground’ (접지)로 설정하고, 유한요소해석으로 하부전극 영역부터 상부전극에 해당하는 영역까지의 2차원 전위 발생 분포를 확인하기 위하여 ‘floating potential’ (플로팅 전위)을 압전체의 상부영역에 설정한다.

‘Multiphysics’는 각각 다른 두가지의 지배식을 결합하여 해석하기 위한 도구이다. 이러한 이유로 ‘piezoelectric effect’를 해석하기 위하여 ‘solid mechanics’와 ‘electrostatics’의 지배식이 자동으로 연결되어 ‘multiphysics’를 구성한다.

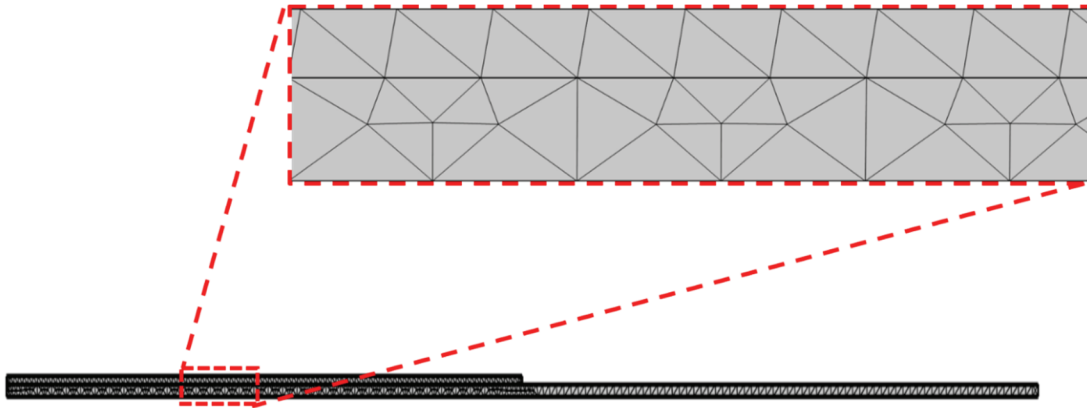


Fig. 7. Mesh formation of piezoelectric energy harvester.

2.5 메시 구성('mesh' part)

'Mesh'는 유한요소해석으로 계산하기 위하여 해석하고자 하는 영역을 기하학적 노드와 요소로 분할한 구역을 의미한다. COMSOL Multiphysics에서는 해석하는 식에 맞추어서 mesh가 자동으로 구성될 수 있도록 'physics-controlled mesh' 도구를 제공하고 있으며 이는 9가지의 다양한 요소 크기를 지원한다. 이때 mesh의 크기가 작을수록 해석하는 영역의 분해능이 커지게 되어 오류에 민감하게 대응할 수 있다. 그러나 너무 작은 mesh를 구성하고자 하면 해석 요소가 많아지므로 해석하는 데 소요되는 시간이 큰 폭으로 증가될 수 있다.

그림 7은 시뮬레이션 모델에서 'physics-controlled mesh'의 'extra fine' 도구로 구성된 mesh의 분포와 이를 확대한 모습을 보여주고 있다. 영역의 경계면에서는 서로 다른 물성이 계산되기 때문에 상대적으로 더 조밀한 메시가 설정되며 COMSOL Multiphysics에서는 제공하는 도구를 이용하여 시뮬레이션 수행자(user)가 임의의 크기의 메시를 제작할 수 있도록 지원하고 있다.

2.6 해석('study' part)

'Study'는 구성된 모델을 해석하기 위한 단계로 COMSOL Multiphysics에서는 다양한 해석 타입을 바탕으로 설정된 지배식을 계산할 수 있게 제공한다. 'Study'는 'step'과 'solver configurations'로 구성된다. 'Step'은 계산하고자 하는 해석 단계를 나타내며 'solver configurations'은 해석 단계별로 적용되는 'solver' 및 처리과정을 설정한다. 'Solver'의 계산 방식은 총 4가지로 분류할 수 있으며 'direct', 'iterative', 'fully coupled',

'segregated'의 조합으로 이루어진다. 여기서 'fully coupled'는 모델에 적용된 모든 종속변수를 동시에 계산하는 방식이며 'segregated'는 순차적으로 계산하는 방식이다.

본 Tutorial Status Report에서는 특정한 힘이 가해질 때 정적인 상태에서 압전 에너지 하베스터에 가해진 스트레스와 출력의 상관관계를 시연하고자 하며, 이를 위한 'study'로 정상상태의 해석을 위한 'stationary'를 선택하였다. 이때 'solver'의 계산 방식은 'direct'와 'fully coupled'의 조합으로 설정된다.

'Study'를 구성할 때 변수에 대한 'auxiliary sweep' 기능을 이용하여 'parameters'에서 정의한 변수를 원하는 값 또는 범위로 설정할 수 있다. 압전 에너지 하베스터에 다양한 힘을 가해 주기 위해 그림 8과 같이 'point load'에서 지정한 힘 F 를 'range' 함수를 이용하여 0 N에서 10 N까지 1 N 간격으로 범위를 지정해 주었다.

2.7 결과('results' part)

해석을 완료하면 'results' 항목에서 1D, 2D, 3D에 따라 다양한 해석 결과를 볼 수 있다. 'Study'를 통한 해석이 완료되면 각 해석에 대한 결과가 파일 내에 저장된다. 해석된 결과는 다음의 다양한 도구를 통해 표현될 수 있는데, 'data sets'는 해석에 대한 정보를 포함하며, 'derived values'는 해석된 결과를 테이블로 정리하여 볼 수 있다. 'Plot groups'는 이미지와 그래프를 통하여 시뮬레이션 결과를 표현할 수 있으며, 'export'는 다양한 확장자로 그림, 동영상, 데이터 등을 추출/저장할 수 있게 해주며, 마지막으로 'reports'는 문서편집 소프트웨어가 지원하는 파일로 데이터를 정리할 수 있다.

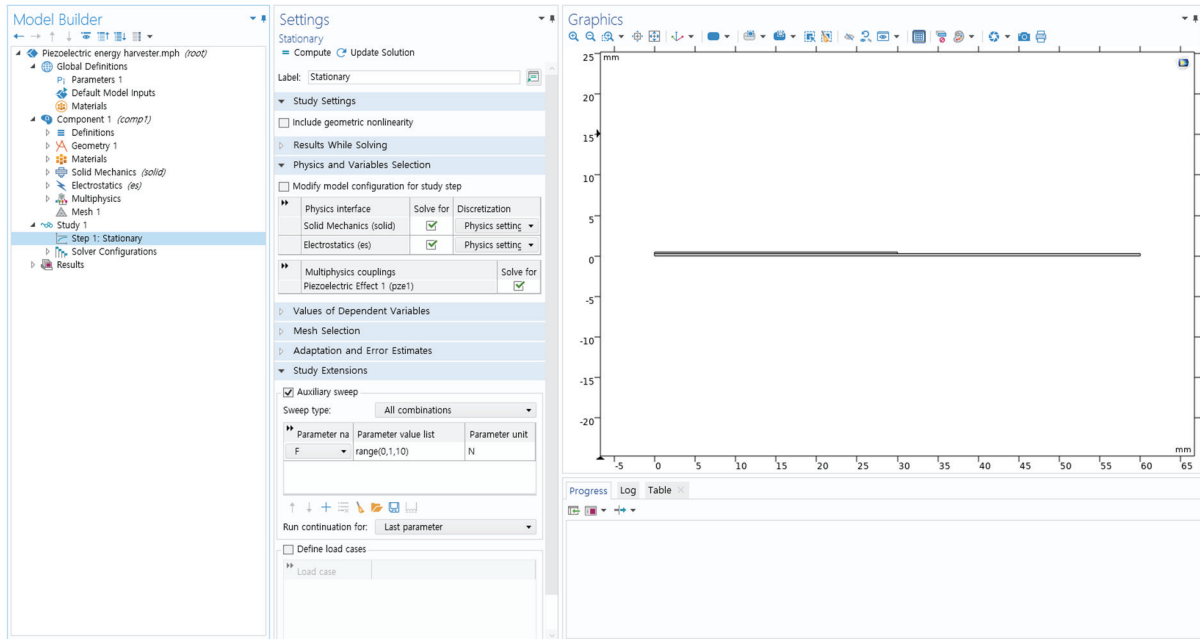


Fig. 8. Input of 'point load' F values by function of 'auxiliary sweep'.

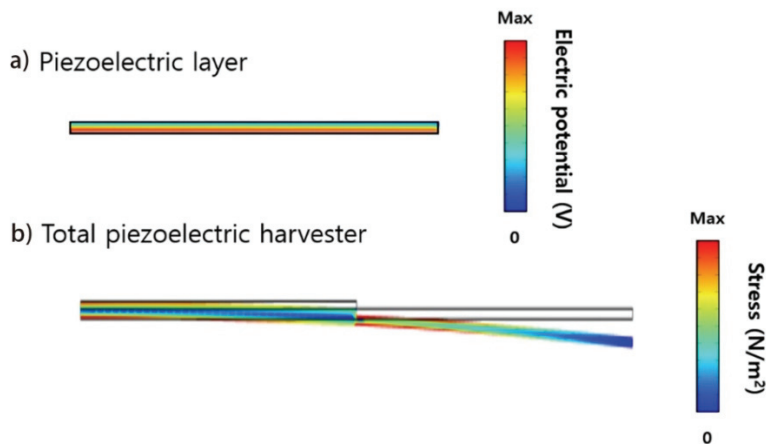


Fig. 9. Distributions of piezopotential inside the piezoelectric material (a) and mechanical stress of piezoelectric harvester and (b) drawing by the '2D Plot groups' function.

지배식을 해석하여 얻어 낸 결과를 그림과 그래프로 표현하기 위하여 'plot groups' 도구를 이용하여 결과로 나타냈다. 'Plot groups'는 하위 도구로 3D, 2D, 1D 형태로 결과를 표현할 수 있도록 제공하며 각각 공간, 면, 선 그래프의 형태로 표현한다. 이때 해석의 결과는 'expression' 기능을 통하여 불러올 수 있다.

그림 9(a)와 (b)는 'results' 메뉴에서 '2D plot groups'를 이용하여 구현한, 압전체에 발생하는 전압과 압전 에

너지 하베스터 소자 전체에 발생된 응력 분포를 보여준다. 그림 9(a)에서 압전체 내부의 기전력 분포를 표현하기 위하여 'selection' 도구를 이용하여 보이교자 하는 영역을 선택하였으며, 색의 표현은 'surface' 도구로 구현되었다. 압전체에 가해진 응력에 대해 발생한 기전력은 ground로 설정된 상부전극에서 0 V로 표시되고, 하부전극으로 갈수록 값이 증가하며 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 그림 9(b)에서 나타난 캔틸레버의 굽힘 형태는 'deformation'

도구로 구현되었다. 해석 결과로 그림으로 표현된 응력분포를 통하여 캔틸레버 구조체의 고정부에 작용하는 응력이 반대쪽의 자유부보다 더 큰 것을 알 수 있다.

‘1D plot groups’에서는 원하는 영역을 선택하여 그 지점에 대하여 저장된 결과를 그래프로 표현할 수 있다. ‘Line graph’는 지정된 모서리 또는 선에서 길이(또는 위치)에 대한 계산된 결과값을 얻을 수 있으며, ‘point graph’는 지정된 점에 대한 계산 결과를 표현할 수 있다. ‘Global graph’는 전역변수에 대한 그래프를 보고자 할 때 사용할 수 있는데, 전역변수는 구조를 모델링할 때 ‘geometry’, ‘materials’, ‘physics’ 등에서 지정될 수 있다.

시뮬레이션의 결과에 대하여 ‘point graph’ 도구를 이용하여 고정된 부분의 한 점을 지정한 뒤 그림 10에서와 같이 가해 준 힘에 따른 최대 응력값을 그래프로 표현하였다. 그림 11은 ‘1D plot groups’의 ‘global graph’ 도구를 이

용하여 ‘electrostatics’ 모듈의 ‘floating potential’ 도구에서 계산된 주어진 힘에 따른 기전력을 보여준다.

시뮬레이션 결과를 통하여 압전 에너지 하베스터의 자유부에 힘이 강하게 작용할수록 발생하는 응력과 및 기전력이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이러한 구조 해석 결과를 통하여 모델링 된 압전 에너지 하베스터의 출력을 예상하고 나아가 다양한 구조 및 재료를 적용하였을 때 최대 출력을 발생시키는 최적화된 구조 및 재료의 탐색에 적용이 가능할 것이다. 또한 응력의 분포와 크기를 확인하여 구조의 취약한 부분을 확인하고 수명 개선 등의 발전에 응용 가능할 것으로 예상된다.

3. 결론

압전 에너지 하베스터는 자연적인 진동 에너지나 자기장 등의 버려지는 기계적 에너지를 전기적인 에너지로 효율적으로 변환할 수 있는 에너지 발전 소자이며, 소규모 전력을 생산하는 전원으로써 지속적으로 연구되고 있다. 압전 에너지 하베스터의 출력을 향상시키기 위하여 다양한 구조의 소자가 연구되고 있으며 이러한 연구 결과를 뒷받침하기 위하여 시뮬레이션 프로그램을 통한 이론적 해석이 중요시되고 있다.

COMSOL Multiphysics는 다중물리현상을 해석하기 위한 도구를 제공해 주며, 이를 바탕으로 본 Tutorial Status Report에서는 캔틸레버 구조의 압전 에너지 하베스터를 모델링하였다. 구조 해석을 위하여 원하는 지배식을 선택하고 물성을 부여하였으며, 다양한 힘을 가했을 때 정상상태에서의 기계적인 특성의 변화와 전기적 출력을 확인하였다. 캔틸레버의 끝에 더 강한 힘을 가했을 때 압전체의 표면에 가해지는 응력의 크기가 선형적으로 비례하여 커지는 것을 확인하였으며, 또한 압전체 내부에 더 큰 기전력이 발생됨을 확인할 수 있었다.

압전 에너지 하베스터의 구조와 힘 그리고 출력의 상관관계를 밝히기 위한 해석 방법은 향후 압전 소자의 구조 개선 및 물성 향상을 통한 출력 향상과 수명 개선 등의 연구에 많은 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

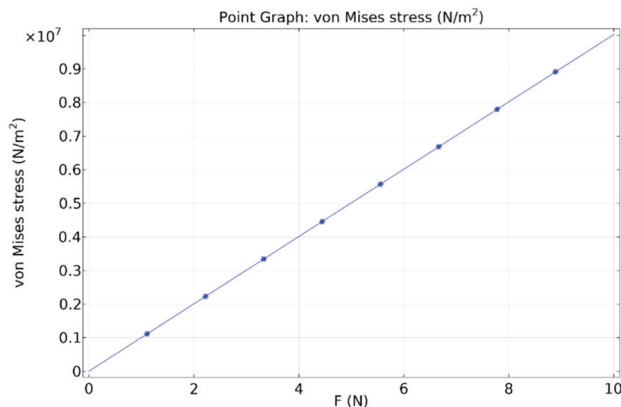


Fig. 10. Calculated maximum stress values of the piezoelectric layer as a function of applied force at the tip mass.

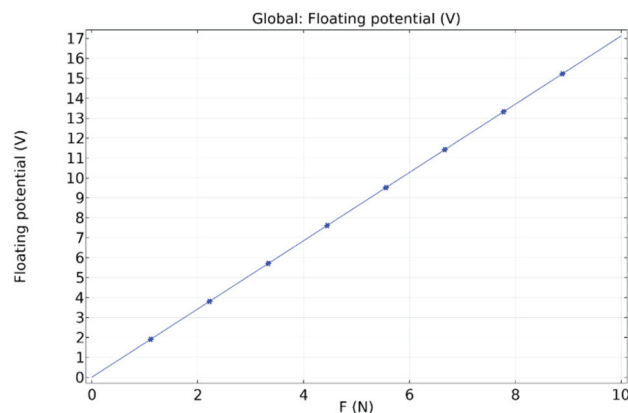


Fig. 11. Calculated maximum piezopotential values of the piezoelectric layer as a function of applied force at the tip mass.

ORCID

Geon-Tae Hwang

<https://orcid.org/0000-0001-6151-3887>

REFERENCES

- [1] M. Kocakulak and I. Butun, *Proc. 2017 IEEE 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)* (IEEE, Las Vegas, USA, 2017), p. 1. [DOI: <https://doi.org/10.1109/CCWC.2017.7868374>]
- [2] H. Wang, A. Jasim, and X. Chen, *Appl. Energy*, **212**, 1083 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.125>]
- [3] S. Yun, Y. Zhang, Q. Xu, J. Liu, and Y. Qin, *Nano Energy*, **60**, 600 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.03.074>]
- [4] L. S. Zhang, B. Yang, S. P. Lin, T. Hua, and X. M. Tao, *Nano Energy*, **76**, 105117 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105117>]
- [5] A.G.A. Muthalif and N.H.D. Nordin, *Mech. Syst. Signal Process.*, **54**, 417 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2014.07.014>]
- [6] H. S. Kim, J. H. Kim, and J. Kim, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, **12**, 1129 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-011-0151-3>]
- [7] K. W. Lim, M. Peddigari, C. H. Park, H. Y. Lee, Y. Min, J. W. Kim, C. W. Ahn, J. J. Choi, B. D. Hahn, J. H. Choi, D. S. Park, J. K. Hong, J. T. Yeom, W. H. Yoon, J. Ryu, S. N. Yi, and G. T. Hwang, *Energy Environ. Sci.*, **12**, 666 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1039/C8EE03008A>]
- [8] G. T. Hwang, H. Park, J. H. Lee, S. K. Oh, K. I. Park, M. Byun, H. Park, G. Ahn, C. K. Jeong, K. No, H. S. Kwon, S. G. Lee, B. Joung, and K. J. Lee, *Adv. Mater.*, **26**, 4880 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201400562>]
- [9] M. Safaei, H. A. Sodano, and S. R. Anton, *Smart Mater. Struct.*, **28**, 113001 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-665x/ab36e4>]
- [10] Z. Yang, S. Zhou, J. Zu, and D. Inman, *Joule*, **2**, 642 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.03.011>]
- [11] M. Peddigari, G. Y. Kim, C. H. Park, Y. Min, J. W. Kim, C. W. Ahn, J. J. Choi, B. D. Hahn, J. H. Choi, D. S. Park, J. K. Hong, J. T. Yeom, K. I. Park, D. Y. Jeong, W. H. Yoon, J. Ryu, and G. T. Hwang, *Sensors*, **19**, 2196 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.3390/s19092196>]
- [12] V. Annapureddy, M. Kim, H. Palneedi, H. Y. Lee, S. Y. Choi, W. H. Yoon, D. S. Park, J. J. Choi, B. D. Hahn, C. W. Ahn, J. W. Kim, D. Y. Jeong, and J. Ryu, *Adv. Energy Mater.*, **6**, 1601244 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.201601244>]
- [13] V. Annapureddy, S. M. Na, G. T. Hwang, M. G. Kang, R. Sriramdas, H. Palneedi, W. H. Yoon, B. D. Hahn, J. W. Kim, C. W. Ahn, D. S. Park, J. J. Choi, D. Y. Jeong, A. B. Flatau, M. Peddigari, S. Priya, K. H. Kim, and J. Ryu, *Energy Environ. Sci.*, **11**, 818 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1039/C7EE03429F>]
- [14] M. G. Kang, R. Sriramdas, H. Lee, J. Chun, D. Maurya, G. T. Hwang, J. Ryu, and S. Priya, *Adv. Energy Mater.*, **8**, 1703313 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.201703313>]
- [15] J. Ryu, J. E. Kang, Y. Zhou, S. Y. Choi, W. H. Yoon, D. S. Park, J. J. Choi, B. D. Hahn, C. W. Ahn, J. W. Kim, Y. D. Kim, S. Priya, S. Y. Lee, S. Jeong, and D. Y. Jeong, *Energy Environ. Sci.*, **8**, 2402 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1039/C5EE00414D>]
- [16] H. Song, D. R. Patil, W. H. Yoon, K. H. Kim, C. Choi, J. H. Kim, G. T. Hwang, D. Y. Jeong, and J. Ryu, *Energy Environ. Sci.*, **13**, 4238 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1039/D0EE01574A>]
- [17] S. Ravi and A. Zilian, *Mech. Syst. Signal Process.*, **114**, 259 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.05.016>]
- [18] L. Wang, L. Zhao, Z. Jiang, G. Luo, P. Yang, X. Han, X. Li, and R. Maeda, *AIP Adv.*, **9**, 095067 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5119328>]
- [19] N. Sivakumar, H. Kanagasabapathy, and H. P. Srikanth, *Mater. Today: Proc.*, **5**, 12025 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.177>]