


COMSOL Multiphysics를 활용한 도체-유전체 형태 마찰전기 발전기의 전위차 해석 시뮬레이션

손용훈, 황건태 

부경대학교 재료공학과

초록: 4차 산업혁명 시대에서 전자기기는 공간적 제약을 극복하기 위해 점점 더 소형화되고 경량화되고 있으며, 이러한 소형 전자기기들은 적은 전력을 필요로 한다. 마찰전기 에너지 발전소자는 기계적 운동 에너지를 전기 에너지로 변환할 수 있어, 소형 전자기기에 적합한 소규모 발전기로 활용될 수 있다. 최근에는 마찰전기 나노 발전기의 출력을 극대화하기 위한 다양한 재료 및 구조가 연구되고 있으며, 이를 보다 정확하게 분석하기 위해 이론적 구조 해석 소프트웨어의 중요성이 증가하고 있다. COMSOL Multiphysics 소프트웨어는 마찰전기 발전소자의 전기적 특성을 정밀하게 시뮬레이션할 수 있는 방법을 제공한다. 이 tutorial status report에서는 COMSOL Multiphysics를 활용하여 마찰전기 에너지 발전소자를 모델링하고, 그 전기적 출력을 분석하는 방법을 소개한다.

키워드: COMSOL Multiphysics, 유한요소 해석, Tribo-electric nanogenerator (TENG)

Simulation of Potential Difference Analysis in Conductor-Dielectric Type Triboelectric Generator Using COMSOL Multiphysics

Yong Hoon Son and Geon-Tae Hwang

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

(Received September 3, 2024; Revised September 12, 2024; Accepted September 12, 2024)

Abstract: In the era of the Fourth Industrial Revolution, electronic devices are becoming increasingly miniaturized and lightweight to overcome spatial limitations, necessitating lower power consumption. Triboelectric nanogenerators (TENGs), which convert mechanical energy into electrical energy, offer an ideal solution as small-scale power generators for these compact devices. Recent research has focused on various materials and structural designs to maximize the output of triboelectric energy harvesters, highlighting the growing importance of theoretical structure analysis software for precise evaluation. COMSOL Multiphysics software provides an accurate method for simulating the electrical characteristics of TENGs. This Tutorial Status Report introduces the process of modeling TENGs and analyzing their electrical output using COMSOL Multiphysics

Keywords: COMSOL Multiphysics, Finite element analysis, Tribo-electric nanogenerator (TENG)

1. 서론

✉ Geon-Tae Hwang; gthwang@pknu.ac.kr

Copyright ©2024 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.

■ 사물 인터넷(internet of things, IoT) 기술은 4차 산업혁명의 핵심 기술 중 하나로 떠오르고 있다. 이는 다양한 전자기기들이 무선 통신을 통해 서로 연결되어 데이터를 주고받는 기술로, 스마트 홈, 스마트 시티, 의료 기

기, 환경 모니터링 등 다양한 분야에서 새로운 혁신을 이끌고 있다 [1]. IoT 기기들은 점차 소형화되고 경량화되면서, 이러한 기기들에 적합한 소형 전력원의 필요성이 대두되고 있다. 특히, IoT 기기의 수가 기하급수적으로 증가하면서, 이러한 기기들이 요구하는 전력의 크기는 작아지지만, 동시에 경제적이고 효율적인 소규모 에너지 발전에 대한 요구는 점점 더 커지고 있다 [2]. 에너지 자원의 고갈과 환경 오염 문제는 지속 가능한 에너지 발전의 필요성을 부각시키고 있으며, 이에 따라 에너지 하베스팅(energy harvesting) 기술이 주목받고 있다 [3]. 에너지 하베스팅은 일상생활에서 버려지는 다양한 형태의 에너지를 수집하여 유용한 전기에너지로 변환하는 기술로, 저전력 전자기기의 전원으로써 중요한 역할을 할 수 있으며, 충전과 교체가 필요한 배터리와 달리 장기간 안정적으로 에너지를 공급할 수 있는 장점이 있어 많은 연구가 이루어지고 있다.

- 마찰전기 나노 발전기(triboelectric nanogenerator, TENG)는 다양한 에너지 하베스팅 기술 중에서도 기계적 운동 에너지를 전기 에너지로 변환하는 데 있어 효과적인 기술로 주목받고 있다 [4]. TENG는 서로 다른 두 재료 간의 마찰에 의해 발생하는 접촉 전하 생성(contact electrification)과 전자 이동(triboelectric effect)을 이용하여 전력을 생성한다. 이러한 특성으로 인해 TENG는 저전력 IoT 기기를 포함하여 웨어러블 디바이스 등 다양한 응용 분야에서 유망한 기술로 평가받고 있다. 이 기술은 구조가 간단하고 저비용으로 제작할 수 있으며, 다양한 환경에서 에너지를 수집할 수 있는 장점이 있다. 예를 들어, 건물이나 교량 등에서 발생하는 진동 에너지를 수집하거나, 전기 장치의 전선 주변에서 발생하는 자기장을 이용해 에너지를 생성하는 방식이 연구되고 있다 [5]. 이러한 TENG의 효율성을 높이기 위해, 다양한 재료를 활용한 TENG 소자가 연구되고 있다. 그중 가장 기본적인 조합 중 하나는 도체-유전체 재료를 사용한 형태이며, 발전 소자의 출력을 예측하기 위해 두 대전체 사이에서 발생하는 전기 에너지 출력 등을 이론적으로 분석하는 과정이 수반된다 [6]. 이를 예측하고 최적화하기 위해 유한요소 해석(finite element analysis, FEA)과 같은 컴퓨터 시뮬레이션 기법이 사용된다.
- 유한요소 해석은 구조물을 작은 유한한 요소로 분할한 후, 각 요소에 대한 편미분 방정식을 여러 연립방정식으로 계산하여 수렴하는 근사해를 추정하는 방법이다 [7]. 이 방법은 특정 물리적 현상에 대한 편미분 방정식을 적용함으로써 비교적 정확한 해를 얻을 수 있다는 이

점이 있다. 특히, COMSOL Multiphysics는 유한요소 해석을 이용해 다양한 물리학적 현상 해석에 사용되도록 개발되었으며, 이는 마찰전기 발전소자의 전기적 특성을 분석하는 데도 널리 사용되고 있다. 본 tutorial status report에서는 COMSOL Multiphysics 프로그램을 활용하여 도체-유전체 형태 TENG에서 발생하는 전위차를 이론적으로 예측하는 방법을 제시한다. 이를 위해, 소프트웨어의 컴퓨터 지원 설계(computer-aided design and drafting, CAD) 도구를 사용하여 2차원(2D) 영역에서 TENG의 구조를 설계하고, 각 영역에 필요한 물성치를 설정하였다. 마지막으로, 도체와 유전체 간의 전위차 형성 과정을 확인하였다.

2. 본문

- COMSOL Multiphysics는 이공학 연구 과정을 그래픽 사용자 인터페이스(graphic user interface, GUI)를 통해 모사할 수 있도록 다양한 도구를 제공한다. 전처리와 후처리 과정의 해석이 하나의 통합된 환경에서 이루어지며, 다중 물리 현상에 의해 유도되는 모든 방정식을 동시에 처리하여 원하는 물성 및 경계 조건을 설정할 수 있다. 이를 통해 TENG의 전기적 해석을 실제에 가까운 형태로 구현할 수 있다.
- 본 tutorial status report에서는 그림 1에 제시된 순서를 따라 도체-유전체 형태의 TENG 시뮬레이션 모델을 구현하고자 한다. 모델링 순서는 COMSOL Multiphysics에서 제공하는 GUI 도구를 단계적으로 설정하는 과정과 일치하며, 빈 모델 화면에서부터 시작하여 TENG 시뮬레이션 모델을 구축한다. TENG 시뮬레이션 모델은 2D 환경에서 구현되며, 이를 위해 2D component로 설계되었다.

2.1 'Geometry' part (구조체 설계)

- 'Geometry' 도구는 CAD 기능을 활용하여 분석하려는 영역을 설계할 수 있도록 지원한다. COMSOL Multiphysics에서는 1차원(1D), 2차원(2D), 3차원(3D)의 구조체를 구현할 수 있으며, 각 차원에 따라 기본적으로 제공되는 구조체 형태를 활용하여 해석에 필요한 형상을 만들 수 있다. 2D의 경우, 점, 직선, 원, 사각형 등의 그리기 도구를 사용하여 영역을 구성할 수 있다. 또한, AutoCAD와 같은 다른 CAD 소프트웨어에서

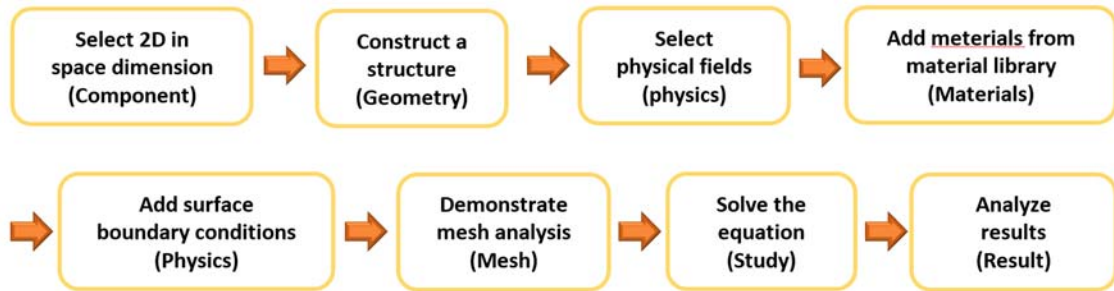


Fig. 1. A modeling flowchart of COMSOL Multiphysics.

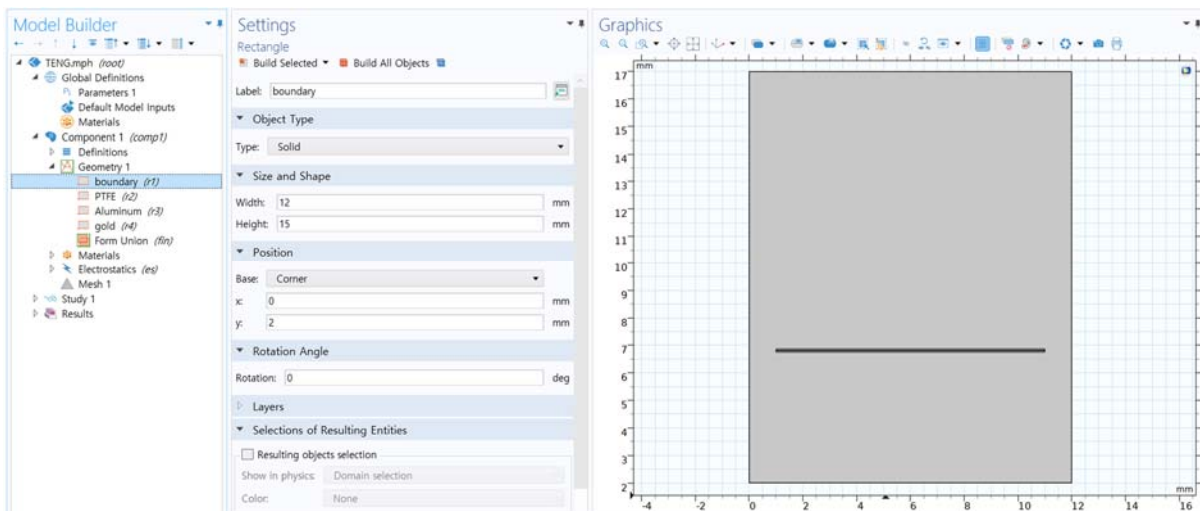


Fig. 2. Structure of TENG drawing by the rectangular geometry tool.

생성된 CAD 파일을 불러와 사용할 수 있으며, 교집합, 차집합, 합집합 등의 연산 도구를 제공하여 영역 간의 편집을 편리하게 할 수 있다. 이러한 CAD 도구를 활용하여, 모델링하려는 영역의 크기와 위치를 설정하여 필요한 영역을 구현할 수 있다.

- 도체-유전체 구조의 TENG를 구현하기 위해 'rectangle' (사각형 그리기) 도구를 이용하여 boundary [$12\text{ (L)} \times 15\text{ (T)}\text{ mm}^2$] 안에 상, 하부 도체 [$10\text{ (L)} \times 0.05\text{ (T)}\text{ mm}^2$] 그리고 두 도체 사이에 유전체 [$10\text{ (L)} \times 0.02\text{ (T)}\text{ mm}^2$]를 상부 도체에 접촉시켜 구조를 설계하였다. 왼쪽 하단 꼭짓점을 기준으로 boundary 좌표($x: 0, y: 2$), 하부 도체 좌표($x: 1, y: 6.75$) 그리고 접촉되어 있는 상부 도체와 유전체 층 좌표는 각각 ($x: 1, y: 6.82+y1$), ($x: 1, y: 6.80+y1$)로 설정하였다. 여기서 $y1$ 은 이후 시뮬레이션 진행 시 parametric sweep을 하기 위한 최소한의 parameter 값이며 최솟값($y1=5e-7\text{ m}$)에서 최댓값($y1=0.0055\text{ m}$)

으로 좌표가 이동한다. COMSOL Multiphysics에서는 그림 2와 같이 구현된 모델을 그래픽을 통해 시각적으로 확인할 수 있다. 설계된 부분을 도메인(domain)이라 부르며, 각 도메인에 대해 시뮬레이션을 실행하기 위해 지배 방정식을 선택하고, 그 방정식에 필요한 종속 변수와 물성 값을 설정하는 과정을 거친다.

2.2 'Physics' part (지배식 선택)

- COMSOL Multiphysics에서는 다양한 물리적 현상을 모델링하기 위해 각 영역에 대한 GUI와 지배 방정식을 제공한다. 이 도구는 프로그램 내에서 'physics'라고 불린다. 지배 방정식은 물리적 현상을 해석하기 위해 사용되는 편미분방정식 등을 의미하며, 동일한 'physics' 내에서도 물성 해석 방식에 따라 서로 다른 지배 방정식을 제공하는 경우도 있다.

■ 본 tutorial status report에서 해석하려는 것은 도체-유전체 형태의 TENG에 두 가지 다른 재료가 접촉하고 분리될 때, 마찰전기 물질의 분극 특성 변화에 의해 기전력이 발생하는 마찰전기 효과 현상이다. 따라서 COMSOL Multiphysics 프로그램 내에서 마찰전기 효과를 해석하기 위해서는 전기적 특성 분석을 위한 ‘electrostatics’ 모듈 지배 방정식이 필요하다. ‘Electrostatics’는 정전기적 물리 현상을 해석하기 위한 모듈로 마찰전기 현상을 해석하기 위해서는 다음과 같은 방정식이 필요하다.

$$E = -\nabla V \tag{1}$$

$$n \cdot (D_1 - D_2) = \rho_s \tag{2}$$

여기서 E는 전기장 벡터, V는 전위(전압), n은 경계 면에 수직인 단위 벡터, D1과 D2는 경계 면 양쪽에서의 전기 변위 벡터, ρs는 경계 면 위에 있는 표면 전하 밀도로 정의된다.

2.3 ‘Materials’ part (물성 부여)

■ 지배 방정식을 해석하기 위해서는 ‘geometry’로 구성된 영역에 지배 방정식의 종속 변수에 해당하는 물성을 부여하는 과정이 필요하다. COMSOL Multiphysics 소프트웨어의 ‘materials’ 항목은 설계된 영역에 물성을 지정하는 도구로 사용된다. 각 물성은 ‘physics’에서 사용하는 지배 방정식에 필요한 정보를 제공하며,

COMSOL Multiphysics는 일반적으로 사용되는 다양한 물질에 대한 주요 물성 데이터를 제공하여, ‘add material from library’ 도구를 통해 쉽게 불러올 수 있다. 필요로 하는 물성은 ‘physics’의 설정이나 지배 방정식에 따라 다를 수 있으며, 필수적인 물성이 입력되지 않았을 경우 해석 과정에서 오류가 발생할 수 있다. 따라서 필요한 물성은 사전 조사를 통해 정확하게 입력해야 한다. 또한, 물성에는 특정한 값이 아닌 종속 변수를 사용한 수식을 적용할 수도 있으며, 이를 통해 온도나 주파수 변화에 따른 특성을 쉽게 설정할 수 있다.

■ 본 tutorial status report에서는 도체-유전체 형태 TENG의 해석을 위해 하부 도체층의 재료로 Al을 상부 도체층의 재료로 Au를 사용하였다. 유전체층으로 우수한 마찰전기 재료로 널리 쓰이는 테프론(polytetrafluoroethylene, PTFE)의 물성을 부여하였으며 그림 3과 같이 설정되었다. 테프론의 밀도(density)는 2,200 kg/m³, 비유전율(relative permittivity)은 2로 적용되었다.

2.4 ‘Physics’ part (경계 설정)

■ ‘Physics’에서 제공하는 시뮬레이션 조건의 구현을 위해 각 물리현상에서 사용될 수 있는 다양한 도구들을 제공한다. ‘Electrostatics’ 지배식은 전하 분포가 명시적으로 규정된 조건에서 유전체의 전기장, 전기 변위장 및 전위 분포를 계산하는 데 사용된다. ‘Charge conservation’, ‘zero charge’, ‘initial values’ 도구

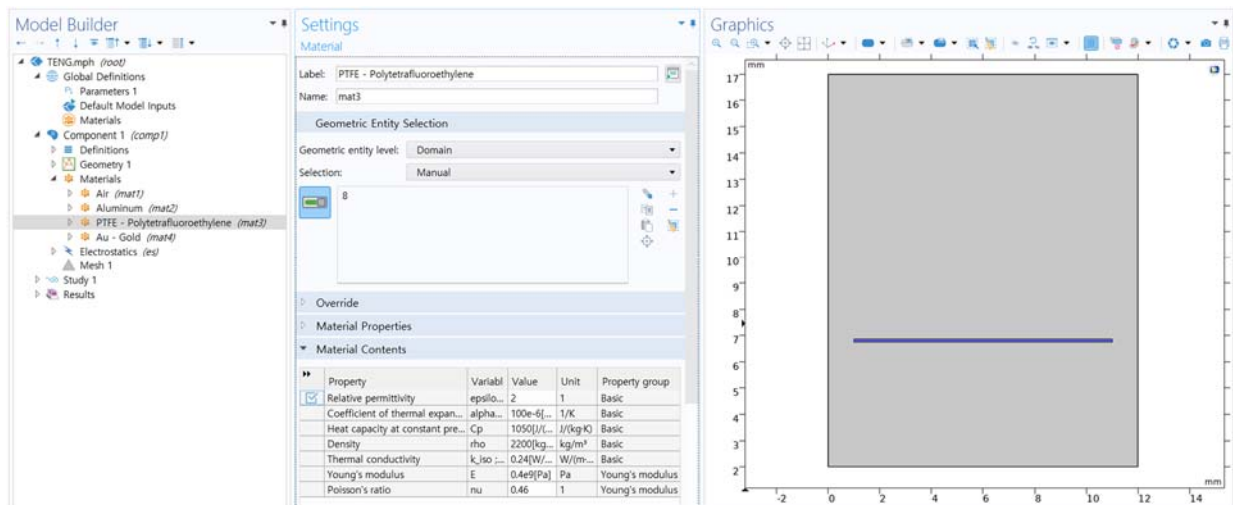


Fig. 3. Added ‘PTFE’ material properties in the ‘materials’ menu.

는 ‘electrostatics’ 지배식 영역에서의 해석을 위하여 불러오는 도구이다.

- 도체-유전체 형태의 TENG에서 전기적 특성 발현은 유전체와 유전체와 맞닿게 되는 하부 금속층에서 이루어지므로, 해석 영역을 그림 4와 같이 PTFE와 Al에 적용하였다. 경계 영역의 테두리 부분에서 발생하는 기전력의 상대적인 크기를 0으로 만들기 위해 해당 부분을 ‘ground’ (접지)로 설정하였으며, 유한요소 해석으로 Al과 PTFE 사이의 2차원 전위 발생 분포를 확인하기 위하여 ‘surface charge density’를 맞닿는 두 층에 각각 설정해 주었다. 도체-유전체 형태의 TENG는 하부 금속층인 Al이 고정된 상태에서 상부 Au 금속층 및 이와 결합된 유전체인 테프론이 함께 y축을 기준으로 범위 내에서 이동을 반복하며 물질 간의 마찰을 통해 전

하를 생성하고, 이 전하의 이동을 이용해 전기를 발생시킨다. ‘Global definitions’의 ‘parameters’ 도구를 이용하여 이동하는 y축 범위의 시작점을 변수 y1으로 설정하였으며 이를 그림 5에 나타내었다. 여기에 적용한 상수는 이후 ‘study’에서 parametric sweep 기능을 이용해 범위를 정해 계산을 진행할 수 있다.

2.5 ‘Mesh’ part (메시 구성)

- ‘Mesh’는 유한요소 해석을 위해 분석하려는 영역을 기하학적 노드와 요소로 세분화한 영역을 나타낸다. COMSOL Multiphysics에서는 해석에 필요한 방정식에 맞춰 자동으로 mesh를 생성할 수 있는 ‘physics-controlled mesh’ 도구를 제공하며, 이 도구는 9가지

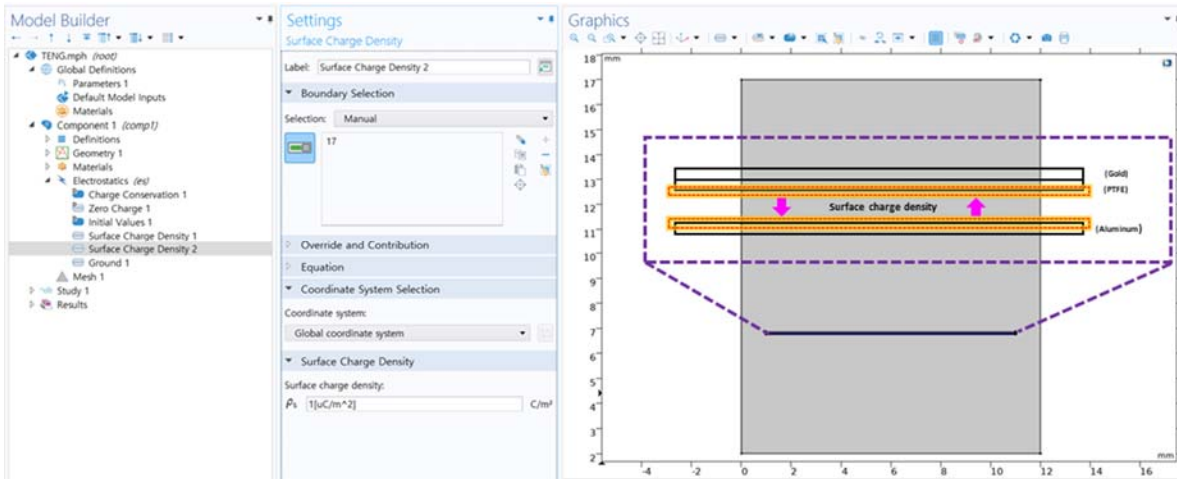


Fig. 4. ‘Surface charge density’ function in ‘electrostatics’.

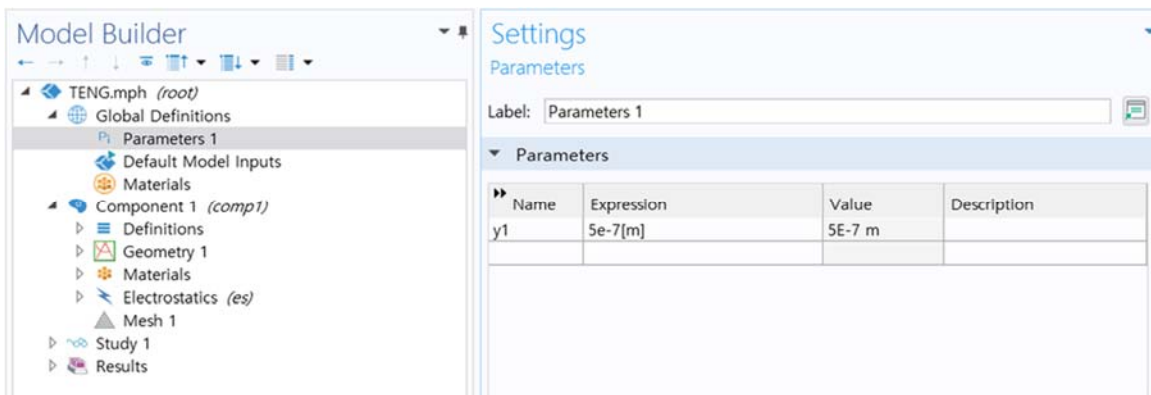


Fig. 5. Variable for distance (y1) in the ‘global definitions’ menu.

의 서로 다른 요소 크기를 지원한다. 일반적으로 mesh 크기가 작아질수록 해석의 분해능이 높아져 오류에 대한 민감도가 커지지만, 지나치게 작은 mesh는 해석에 필요한 요소 수를 증가시켜 계산 시간이 상당히 늘어날 수 있다.

- 그림 6은 시뮬레이션 모델에서 ‘physics-controlled mesh’의 ‘normal’ 옵션을 사용하여 생성된 mesh의 분포와 그 확대된 모습을 나타낸다. 또한, 영역의 경계면에서는 서로 다른 물성을 계산해야 하므로 상대적으로 더 촘촘한 mesh가 설정되며, COMSOL Multiphysics는 사용자가 필요에 따라 원하는 크기로 mesh를 조정할 수 있는 도구를 제공한다.

2.6 ‘Study’ part (해석)

- ‘Study’는 구성된 모델을 해석하는 단계로, COMSOL Multiphysics에서는 다양한 해석 유형에 따라 설정된 지배 방정식을 계산할 수 있도록 지원한다. ‘Study’는 ‘step’과 ‘solver configuration’으로 구성되며, ‘step’은 수행할 해석 단계를 나타내고, ‘solver configurations’은 각 해석 단계에서 적용되는 ‘solver’와 처리 과정을 설정하는 역할을 한다.
- 본 tutorial status report에서는 도체-유전체 형태의 TENG에서 마찰 대전체 간 거리와 발생하는 전위차의 상관관계를 확인하고자 하며, 이를 위한 ‘study’로

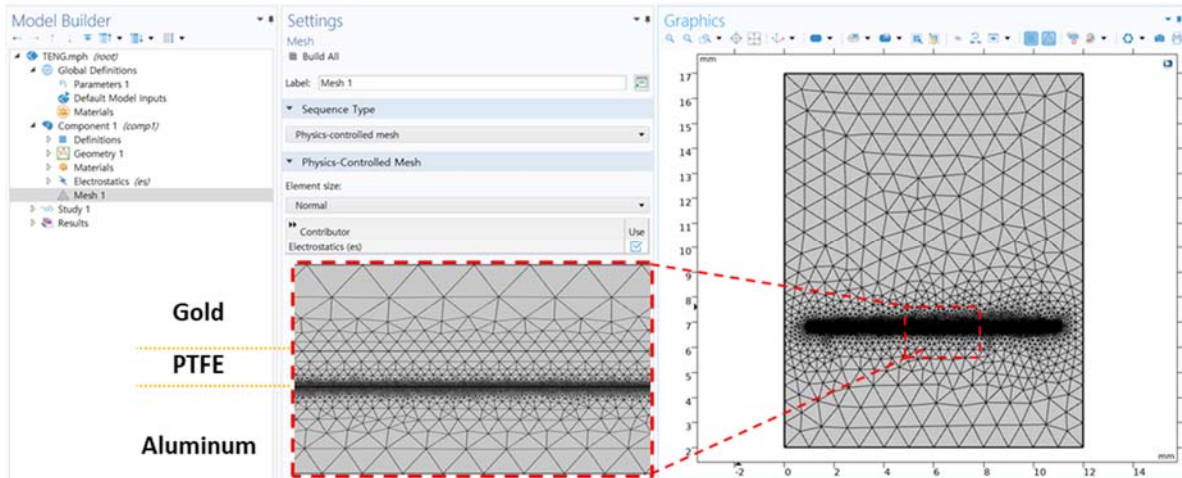


Fig. 6. Mesh formation of TENG.

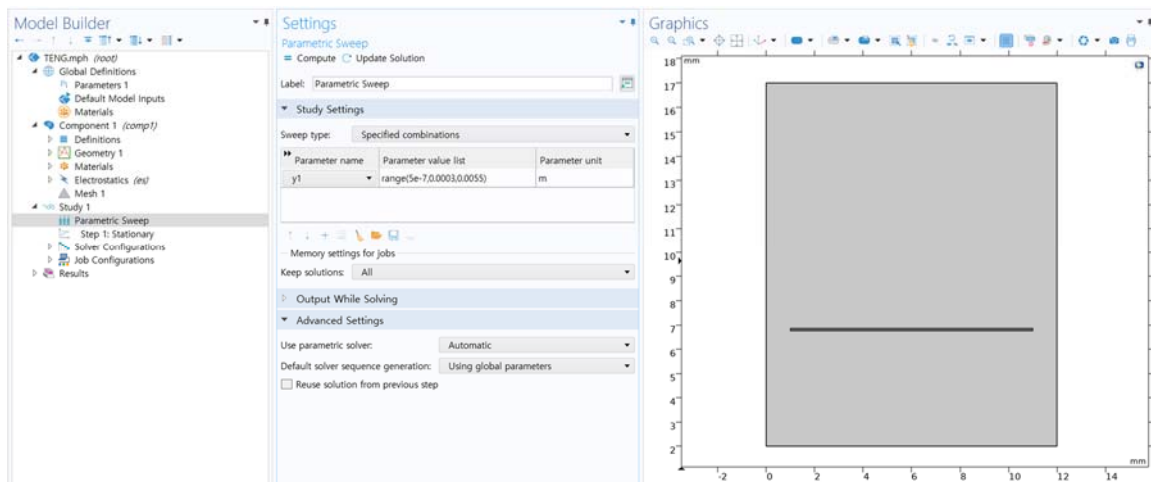


Fig. 7. Input of ‘parametric sweep’ y1 values by function of ‘study’.

'stationary'를 선택하였다. 'Study'에서 'parametric sweep' 기능을 이용하여 'parameters'에서 정의한 변수에 대한 원하는 값과 범위 설정이 가능하다. TENG 대전체의 y축 방향으로 거리 변수를 주기 위해 그림 7과 같이 y1 값을 'range' 함수를 이용하여 시작 지점인 $5E-7$ m에서 0.0055 m까지 0.0003 m 간격으로 범위를 지정해 주었다.

2.7 'Results' part (결과)

■ 해석이 완료되면 'results' 항목에서 1D, 2D, 3D에 따라 다양한 해석 결과를 확인할 수 있다. 'Study'를 통해 수행된 해석 결과는 각 해석에 대한 정보가 파일 내에 저장되며, 해석 결과는 다음과 같은 여러 도구를 통해 시각화될 수 있다. 'Data sets'는 해석된 정보를 포함하며, 'derived values'는 테이블 형식으로 해석 결과를 데이터로서 확인할 수 있다. 'Plot groups'는 해석 후 기본적으로 표시되는 메뉴로, 이미지와 그래프를 통해 시뮬레이션 결과를 시각적으로 표현할 수 있다. 'Export'는 데이터를 외부로 내보내는 기능으로 동영상, 이미지, 데이터를 추출하거나 저장할 수 있으며, 마지막으로 'reports'는 문서 편집 소프트웨어가 지원하는 파일 형식으로 데이터를 정리하여 저장할 수 있게 한다. 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 공

간, 면, 선, 그래프의 형태로 표현한다. 이때 해석의 결과는 'expression' 기능을 통해 불러올 수 있다.

■ 그림 8은 'result' 메뉴에서 '2D plot groups'를 이용해 구현한, 금속-유전체로 구성된 두 대전체의 거리에 따른 전위차를 보여준다. 그림 8에서 거리에 따른 전위 발생 분포 확인을 위해 'parameter value [y1 (m)]' 값을 조정해 주었다. 전위 크기에 따른 색은 'electric potential (es)'의 'surface' 도구로 표현되었으며, 'selection' 도구를 활용해 보이거나 하는 영역을 선택해 주었다. 서로 다른 대전체가 접촉함에 따라 마찰 대전체 표면의 국부적 분극현상에 따라서 'electric charge'가 생성된다.

■ 그림 8은 마찰 대전체의 접촉 이후 분리되는 거리에 따른 'electric potential'의 변화를 나타낸다. 그림 8(a)는 접촉 직후 'electric potential'의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 접촉 직후 두 대전체 간 거리가 거의 0에 수렴하기 때문에 전기적 중성을 이뤄 'electric potential' 0에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이후 대전체 간 거리에 비례하여 'electric potential'이 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 마찰 대전체 간 거리가 늘어남에 따라 전위차가 증가하기 때문이다. 그 결과 전위차의 변화($0.001\sim 400$ V)를 (a)~(c)의 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있다.

■ '1D plot groups'에서는 원하는 영역을 선택해 그 지점에 대한 결과값을 그래프로 표현 가능하다. 우선 'datasets'에서 'parameter solution' 선택 후 도체-유전체 접촉면들의 경계선을 설정해 준다. 그 후 'join'

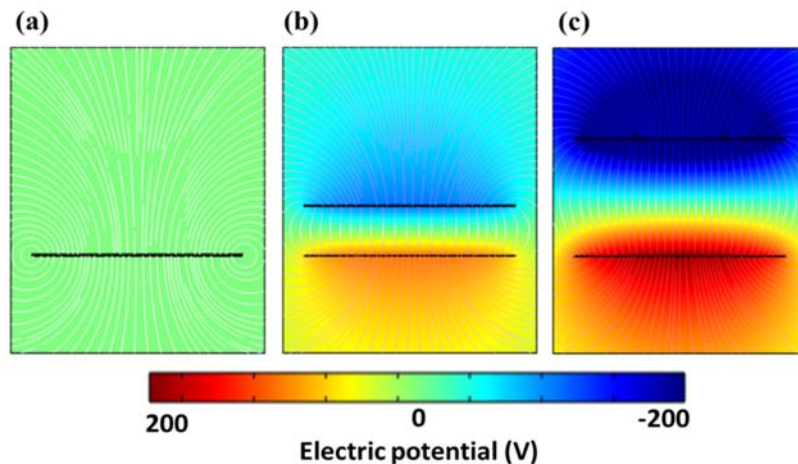


Fig. 8. Electric potential distribution for conductor-dielectric mode TENG considering difference of separation distance: (a) considering minimum separation distance between conductor-dielectric layers ($y1=5e-7$ m), (b) considering separation between conductor-dielectric layers ($y1=0.003$ m), and (c) considering maximum separation between conductor-dielectric layers ($y1=0.005$ m).

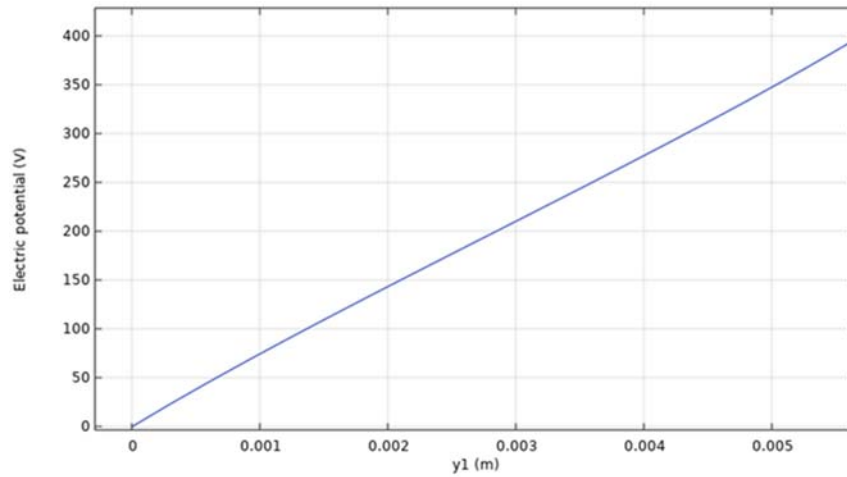


Fig. 9. Calculated maximum electric potential values of the conductor-dielectric layer as a function of applied separation distance.

을 사용해 합쳐 주고, ‘derived values’에서 ‘line average’로 들어가 ‘expression’ 값을 electric potential (V)로 잡아 준다. 마지막으로 1D plot 도구를 이용하면 그림 9와 같이 대전체의 거리에 따른 전압 값의 변화를 확인할 수 있다.

- 시뮬레이션 결과에 따르면 TENG에서 유전체와 도체 사이의 거리가 증가할수록 전위차는 선형적으로 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 구조 해석의 결과를 바탕으로, 모델링 된 TENG의 출력 예측이 가능하며, 더 나아가 다양한 구조와 재료를 적용하여 최적의 출력 성능을 달성할 수 있는 구조와 재료를 탐색하는 데 활용될 수 있을 것이다.

3. 결론

- TENG은 자연에서 발생하는 진동 에너지나 자기장 등과 같은 버려지는 기계적 에너지를 전기 에너지로 효율적으로 변환할 수 있는 에너지 하베스팅 장치로, 소규모 전자 소자의 전력 공급원으로서 지속적인 연구 대상이 되고 있다. TENG의 출력 향상을 위해 다양한 재료 및 구조를 가진 소자가 개발되고 있으며, 이러한 연구 결과를 검증하고 보완하기 위해 시뮬레이션 프로그램을 활용한 성능의 이론적 분석이 널리 이루어지고 있다.
- COMSOL Multiphysics는 다양한 물리적 현상을 해석하기 위한 도구를 제공하며, 이를 활용하여 본 tutorial status report에서는 도체-유전체 구조의 TENG을 모델링 하였다. 지배식 선택 후 물성을 부여하여 구조 해

석을 하였으며, 마찰 대전체 간의 거리에 따른 전기적 출력을 확인하였다. 테프론과 AI 사이의 거리가 증가함에 따라 유도된 전위차는 선형적으로 비례하여 커지는 것을 확인하였다. 마찰 대전체 간의 거리에 따른 전기적 출력의 상관 관계를 확인하는 시뮬레이션 방법은 마찰전기 소자의 구조 개선 및 재료에 따른 출력 향상과 수명 개선 등의 연구에도 기여를 할 수 있을 것으로 예상된다 [8,9].

ORCID

Geon-Tae Hwang

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

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2022R1A2C4001497).

REFERENCES

- [1] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, *Future Gener. Comput. Syst.*, **29**, 1645 (2013). doi: <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- [2] R. Haight, W. Haensch, and D. Friedman, *Science*, **353**, 124 (2016). doi: <https://doi.org/10.1126/science.aag0476>

- [3] D. Miorandi, S. Sicari, F. De Pellegrini, and I. Chlamtac, *Ad Hoc Networks*, **10**, 1497 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.02.016>
- [4] M. S. Kwak, K. W. Lim, H. Y. Lee, M. Peddigari, J. Jang, C. K. Jeong, J. Ryu, W. H. Yoon, S. N. Yi, and G. T. Hwang, *Nanoscale*, **13**, 8418 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1039/D1NR01336J>
- [5] S. Priya and D. J. Inman, *Energy Harvesting Technologies* (Springer, New York, 2009) p. 4.
doi: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-76464-1>
- [6] 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>
- [7] W.B.J. Zimmerman, *Introduction to Comsol Multiphysics*, Series on Stability, Vibration and Control of Systems, Series A, 1-26 (2006).
doi: https://doi.org/10.1142/9789812773302_0001
- [8] J. M. Park, S. Kim, Y. Na, and K. I. Park, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **35**, 119 (2022).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2022.35.2.2>
- [9] H. Choi, J. Ryu, W. H. Yoon, and G. T. Hwang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **35**, 322 (2022).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2022.35.4.2>