

국내 수송환경에 적합한 마찰전기 나노발전기의 발전특성 분석

박종민¹ · 정현모^{2*}

Analysis of Power Generation Characteristics of TENG (Triboelectric Nanogenerator) Suitable for Domestic Transport Environment

Jong-Min Park¹ and Hyun-Mo Jung^{2*}

¹Dept. of Bio-industrial Machinery Engineering, Pusan National University

²Dept. of Logistics Packaging, Kyongbuk Science College

Abstract Sustainable energy supplies without the recharging and replacement of charge storage device have become increasingly important. Among various energy harvesters, the triboelectric nanogenerator (TENG) has attracted considerable attention due to its high instantaneous output power, broad selection of available materials, eco-friendly and inexpensive fabrication process, and various working modes customized for target applications. The TENG harvests electrical energy from wasted mechanical energy in the ambient environment. TENG devices are very likely to be used in next-generation renewable energy and energy harvesting. TENG devices have the advantage of being able to manufacture very simple power devices. In this experiment, various organic dielectrics and inorganic dielectrics were used to improve the open voltage of TENG. Among the various organic dielectrics, Teflon-based FEP, which has the highest electron affinity, showed the highest open voltage and Al electrode was fabricated on Teflon substrate by sputtering deposition process. And AAO (Anodized Aluminum Oxide) nanostructures were applied to maximize the specific surface area of the TENG device. The power generation of TENG within the acceleration level (0.25, 0.5, 1.0, 1.5 and 2 G) and the frequency range (5-120 Hz) of the domestic transport environment was up to 4 V.

Keywords TENG, Triboelectric, Nanogenerator, Energy harvesting, Transport

서 론

IT 산업의 발전에 따른 새로운 형태의 발전소자의 수요는 지속적으로 높아지고 있다. 현재 에너지 하베스팅(Energy Harvesting)이라는 새로운 전력 소자에 대한 연구개발은 전세계적으로 매우 활성화 되고 있으며, 주변환경에 존재하는 진동을 활용하여 전력을 생산할 수 있는 전력 소자는 기존의 태양전지, 풍력발전, 조력발전, 수력발전과 같은 신재생 에너지와는 달리 주변 환경의 제약 및 특수성에 대한 제약을 받지 않는다. 거의 모든 동력을 부수적으로 발생되는 진동, 늘임 및 기계적 변형을 활용하여 에너지를 전기 에너지로 변환할 수 있는 장점을 지니고 있다¹⁾. 에너지 하베스팅 소자는 과거 압전 현상을 활용한 강유전성(ferroelectric) 세

라믹 소재에 의존하여 제작되어, 플렉시블 소자로의 전환의 한계점과 공정비용 증가에 따른 경제적 문제점이 있었으나, 2012년 마찰 전기를 대전 유기 유전체의 접촉에 따른 대전 전하의 생성 및 소멸을 통한 새로운 형태의 에너지 하베스팅 소재 및 구조의 개발을 통해 다양한 플렉시블 소자로의 활용 가능성과 매우 경제적인 공정 처리가 가능하게 되었다. 이를 활용하는 소자를 Triboelectric Nanogenerator (TENG, 마찰전기 나노발전기) 소자라 하며, 다양한 환경에 최적화된 TENG의 개발 및 응용 기술에 대한 연구가 급격히 증가하였다²⁾.

TENG는 마찰에 의해서 발생된 전하가 유전체 표면에 모여서 발생시킨 전기장과 유전체간 정전기 유도의 결합으로 기전력을 전력 생산에 활용하는 장치이다. 외부 기계적 에너지를 전기로 변환하는 새로운 에너지 하베스팅 장치로 TENG는 2012년 조지아 공과 대학의 Zhong Lin Wang 등³⁾에 의해 처음으로 시연되었으며, 이것은 내부 회로에서 반대의 마찰 극성을 나타내는 2개의 얇은 폴리머/세라믹 필

*Corresponding Author: Hyun Mo Jung
Dept. of Logistics Packaging, Kyongbuk Science College, 634 Jinsan-ro, Kisan-myeon, Chilgok-gun, Gyeongbuk 39913, South Korea
Tel: +82-54-979-9558, E-mail: hmjung@kbsc.ac.kr

를 사이의 전하 상쇄 효과로 생성된 기전력을 만들어내는 소자이다. 만들어진 기전력을 통해 외부 회로에서는 전자가 전위의 균형을 맞추기 위해 각 필름의 후면에 부착된 각각의 전극 사이에서 흐르게 된다. TENG에 가장 유용한 재료는 고분자 유기 소재 필름이기 때문에 유기물 나노 발전기라고도 하며, 기존 에너지 하베스팅 소재가 세라믹 소재를 활용하는 점과 달리 유기 소재를 사용하는 최초의 유기물 기반의 에너지 하베스팅 소자이다. TENG는 다양한 구조로 제작이 가능하고 다양한 구조의 TENG들은 주요 동작 모드 중 수직 접점 분리 모드 (VCSTENG)가 차량의 진동에 의한 방식을 고려했을 때 가장 효율적인 동작 모드이다. 수직 접점 분리 모드 TENG의 작동 메커니즘은 두 마찰 시트의 표면에서 반대의 마찰 전기 전하의 순환 분리 및 재접촉에 의해 유도된 전위차의 주기적인 변화로 인해 기전력이 만들어지는 현상을 이용하는 것이다²⁰⁾.

본 기술개발에서 TENG의 주기적 전위차를 발생하기 위해 물류화물의 수송 중 발생하는 진동과 충격을 이용하게 되며, 이러한 진동은 걷기, 목소리, 엔진 진동, 자동차, 기차, 항공기, 바람 등 거의 모든 동작을 통해 얻어질 수 있다. 진동은 지구상 어디에서나 동작하는 상황에서는 항상 존재하며, 진동을 통한 에너지 하베스팅 기술은 특히 보편적인 균형 잡힌 에너지 하베스팅 기술과 함께 모바일 전자 기기에 전력을 공급할 수 있으며, 이는 상용화를 위한 수요에 매우 중요한 요인이다. 진동 에너지를 수확하기 위한 마찰 전기 발전기의 기본 원리에 기반한 다양한 기술이 입증되었으며, 향후 이를 위한 세부적인 연구개발을 통해 각 진동에 최적화된 TENG가 개발될 것으로 예측된다. 과거에는 TENG를 활용하여 다양한 형태의 전력소자를 개발하고 소재 선정과 발전 특성을 최적화 하는 연구개발^{4,6)}이 주로 진행되었으나, 현재는 명확한 응용 분야 적용 가능성을 확인하는 연구개발을 다수의 연구 기관에서 진행하고 있는 추세이다. TENG의 경우 새로운 소재를 적용하여 표면 전하 밀도를 극대화 할 수 있는 방안에 대한 제시와 차량 진동에 적절하게 반응할 수 있는 기계 구조를 제작해야만 최적의 발전 효과를 얻을 수 있다. 차량 진동에너지를 TENG 압력변화로 전환해야 하며, 이를 위해 다양한 실험을 수행하여 TENG 발전에 적합한 최적 압력변환의 구멍이 필요하다. 아울러 변환된 압력변화는 TENG에 전달되어 다시 전기에너지로 변환되는 일련의 변환과정이 필요하다. 단순히 TENG 소자의 최적화뿐만 아니라 진동을 압력으로 적절하게 변환시킬 수 있는 장치의 고안 및 최적화 또한 매우 중요한 부분이다^{7,8)}.

과거의 에너지 하베스팅의 연구분야는 주로 최적의 소자 개발에 국한된 연구개발을 진행하였다면, 본 연구에서는 TENG에 가해지는 압력의 균일도의 최적화와 더불어 다양한 진동 주파수에 적절히 대응할 수 있는 기구물에 대한

연구개발을 접목시키는 것으로, 국내 물류 수송차량에 대한 진동/충격 수준에서 국내 물류 수송환경으로 구동시킬 수 있는 TENG 소자를 탐색하며, 궁극적으로는 차량 이송 중 전력소비를 필요로 하는 RFID, GPS 및 환경계측 센서를 구동할 수 있는 진동 에너지 변환 전력 소자 개발 및 발전 특성을 분석하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 유기 유전체 소재 선정 및 전극 형성 실험

진동에 반응성이 매우 높고 유리한 수직 접점 분리 방식의 TENG를 선택하여 제작하였다. 이를 위해 유전체 소재 선정이 반드시 필요하며, 양극과 음극 분리가 원활한 소재를 선택하여 Voc를 높일 수 있도록 제작되어야 한다. 유전체 선정 시, 고려되어야 할 사양으로는 전기 부도체이어야 하며, 전극 형성 공정은 진공 증착 공정을 활용하기 때문에 진공 중에서 out-gassing이 없는 소재여야 한다. 또한, 증착 공정 중 수반되는 기판 온도 증가에 따른 열변형이 없어야 하고, 금속 전극 박막과의 접합력을 유지할 수 있는 물리적 안정성을 갖고 있어야 한다. 전극 형성을 위해 sputtering 공정이 가능한 소재를 선정하여 사용하였으며, 유기 유전체로는 PET(PolyEthylene Terephthalate), PEN(PolyEthylene Naphthalate), PVC(Polyvinyl chloride), Teflon(불소 계열 수지), Polytetrafluoroethylene, Perfluoroalkoxy alkane, Fluorinated ethylene propylene) 및 PI(Polyimide; Kepton)를 선정하였다. 본 연구에서는 디스플레이 공정 및 유기 박막 태양전지 공정에서 활용되었던 물리적으로 안정성이 확보된 소재들을 활용하여 전극 증착 공정을 수행하였으며, 전극으로 Al 박막이나 ITO(Indium Thin Oxide)를 sputter 장치(RF magnetron sputtering system)를 활용하였다.

2. 무기 유전체 소재 선정 및 제작

유전체 중 음전하 대전이 가능한 soda lime 유리 기판을 선정하여 시편의 특성을 확인하였으며, 유리 기판은 LCD 생산 공정에서 활용되는 ITO coated soda lime 유리를 활용하였다. 양전하 대전이 가능한 고분자 소재 대전체를 조합하여 수직 접합 분리 모드로 TENG를 제작한 뒤, 특성을 분석하였다. 제작 시, TENG의 크기는 $60 \times 50 \text{ mm}^2$ 으로 고정하여 시편을 제작하였으며, 제작된 ITO glass는 40 S의 면저항을 갖는 투명전극을 활용하였다.

무기 소재 중 유리 기판의 경우 나노 구조물 제작이 어려운 단점이 있다. 이를 해소하기 위해, AAO(Anodized Aluminum Oxide)를 제작하여 활용하였다. AAO 제작 시, 20%(w.b)의 oxalic acid에서 40 V의 양극 산화 전압을 인가하여 제작한 경우에는 갈색의 AAO 제작이 가능하였다. 제작된 AAO의 형태는 양극 산화 산화용매에 따라 특성이

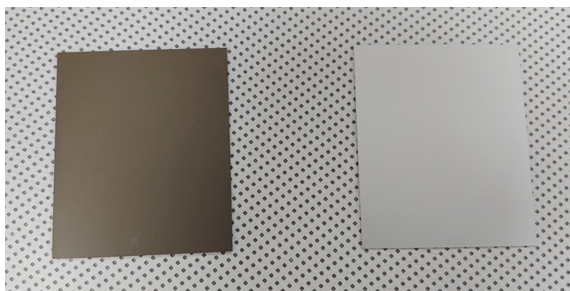


Fig. 1. 갈색 AAO(좌) $60 \times 50 \text{ mm}^2$ 과 백색 AAO(우) $60 \times 50 \text{ mm}^2$.

매우 크게 변하며, Fig. 1과 같이 갈색 AAO와 백색 AAO 두 가지 형태로 구분된다.

3. TENG 제작

본 연구에서는 수직 접합 분리 TENG 구조로 제작하였다. 시편의 크기는 $30 \times 30 \sim 50 \times 50 \text{ mm}^2$ 사이에서 고정하여 시편 간의 특성을 분석하였다. TENG는 우선 soda lime glass/ITO를 기준으로 다양한 PVC, PET, PI, PEN의 접합 및 분리에 따른 발전 특성을 분석하였다. PET의 경우에 한해서 전극을 ITO 및 Al 전극에 관한 특성을 분석하였으며, glass의 표면을 거칠게 연마하여 발전 전압 특성을 시험하였다.

AAO는 양극산화 공정 중 전압 및 에칭 용액의 종류에 따라 다른 형태의 나노 구조물로 제작이 가능하며, Fig. 2와 같이 백색 AAO과 갈색 AAO 기반의 TENG들을 제작하였다. 제작 시 PET/ITO 형태의 유기물 유전체를 활용하는 방안과 Teflon/Al 형태의 유기물 유전체를 활용하는 방안을 활용하였으며, 총 4가지 종류의 TENG를 제작하여 기초 실험을 실시하였다. 제작된 TENG는 Virtual bench를 활용하여 발생 전압을 측정하였으며, 시편의 크기는 $30 \times 30 \text{ mm}^2$ 와 $50 \times 50 \text{ mm}^2$ 로 하였다 (Fig. 2).

4. TENG 동작 특성 분석 및 진동 발생 장치

수직 접합 분리 구조로 제작된 다양한 소재의 TENG에



Fig. 3. 전자식 진동시험기 (LS-100).

대해서 virtual bench (National Instruments사, 2 channel)의 오실로스코프 모드로 측정을 시도 하였으며, 점점을 형성시키기 위해서 전극 연결 후, 4개의 다이오드를 활용한 정류 소자의 제작을 제외하면, 그 이외의 경우에는 개방 전압 형태로 측정하였다. TENG의 진동에 의한 전압발생 특성을 계측하기 위하여 Fig. 3과 같은 전자식 진동시험기 (LS-100, LING Electronics Inc. USA)를 활용하였다.

결과 및 고찰

1. 유기 유전체들과 ITO 유리 간 접합에 따른 발전 특성

다양한 유기물 유전체를 활용하여 제작된 TENG들의 발전 전압은 대체적으로 Fig. 4와 같이 PVC, PI, PEN, PET 순으로 높았다. 최대 발전 전압이 형성되었던 PET/ITO 유기물 유전체 조합의 경우 기전력은 -2 V 였다. 본 연구에서 다양한 유기물 유전체의 발전 전압에 영향을 미치는 요소는 매우 다양하다. 소재 자체의 work function(electron affinity)에 기인한 Voc 형성 특성뿐만 아니라, 유전체 표면의 흡착물의 종류와 이온 분포 상태 및 유전체의 두께가 매우 밀접한 영향을 미친다. 본 연구에서 진공 증착 과정에서의 표

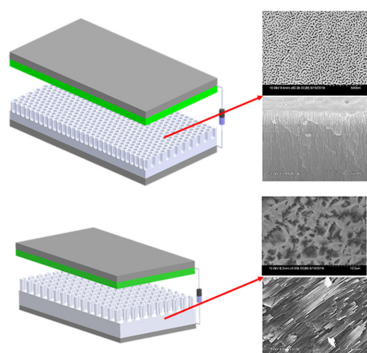


Fig. 2. 나노 구조물 AAO (좌: 갈색, 우: 백색) 유전체를 활용한 TENG

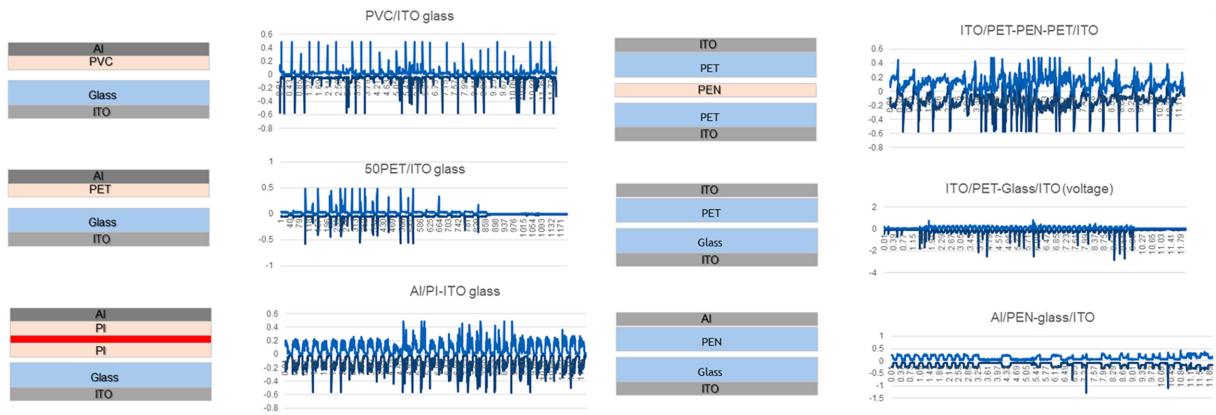


Fig. 4. 다양한 구조의 TENG의 접합 및 분리에 따른 발생 전압.

면 개질을 통한 특성 변화와 세정 정도 열처리 수행에 따른 표면 전하 축전 용량의 변화가 야기 될 수 있다. 이에 대해서 각 소재마다 동일한 온도에서의 증착 공정 동안 수반될 수 있는 표면 개질의 정도가 다를 수 있다. 아울러 ITO 증착 조건과 Al layer 증착 조건이 달랐으며, 분위기 가스의 종류 역시 다양하였기 때문에 본 실험을 통해 소재에 따른 명확한 결론을 유추하기에는 다른 변수가 많았다. 이를 바탕으로 TENG에 적합한 소재로 PET라고 결론 도출이 어려운 것으로 판단하였고, 그러나 유기 유전체 중에서 본 제작 공정에 가장 적합한 소재는 ITO/PET 공정이었다.

2. 개발 TENG의 발전 특성

PET/ITO 기반 및 AAO 유전체 기반의 TENG에 대한 실험 결과를 분석하였으며, 측정에 사용된 방법으로는 진동 시험기 상에 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ 의 시편 크기를 갖는 백색 및 갈색 AAO에 대해서 실험을 실시하였다. 유기 유전체의 종류는 ITO 전극이 증착된 PET를 기반으로 실험을 실시하였다. TENG 시편 위에 PET 발포 댄퍼와 금속 소재의 웨이트를 거치시켜 진동 발생 시 TENG에 균일한 압력을 부가하는 형태로 제작하였다. 또한, 본 연구에서는 차량 진동에

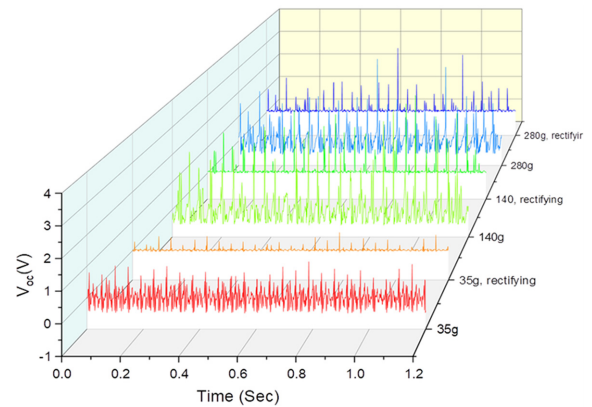


Fig. 6. 웨이트 무게에 따른 발전 특성.

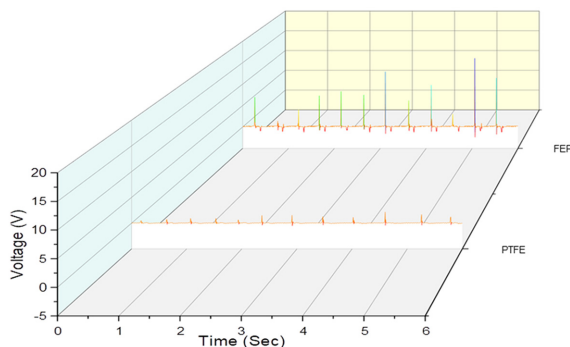


Fig. 5. 나노 구조물 테프론 종류별 외부 압력 변화에 따른 TENG 발전 특성.

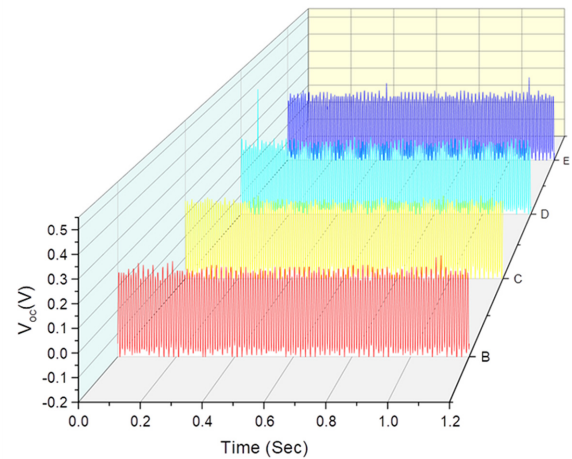


Fig. 7. TENG 재현성 특성.

반응하여 충전 소자를 구동 시킬 수 있는 전력을 얻기 위해서는 TENG 소자의 특성 변화가 요구되어, 이를 위해 테프론 소재를 활용하여 유기 유전체를 제작하여 실험하였다. 우선 $125 \mu\text{m}$ 의 두께를 갖는 Teflon 소재인 PTFE(Poly tetra

fluoro ethylene) 위에 Al 전극을 50 nm의 두께로 증착한 뒤, 유기 유전체 부품을 제작하였으며, 동일한 두께를 갖는 Teflon 소재인 FEP(Fluorinated ethylene propylene) 위에 Al 전극을 동일한 두께로 증착한 뒤, 유기 유전 부품을 제작하여 동일한 외부 압력에 따른 TENG의 발전 특성을 비교하였다.

Fig. 5에서 PTFE의 경우 1.2 V 수준의 낮은 전압이 발생되었으나, 반면 FEP의 경우 15 V 수준의 매우 높은 개방 전압을 보였다. 이는 갈색 AAO를 무기 유전체로 사용하였던 이전 실험에 비해 높은 개방 전압 특성이다. 이를 기준으로 시편을 제작하여 진동시험기를 이용하여 다양한 주파

수에서 발전 특성을 분석하였다.

Fig. 6에서는 갈색 AAO 및 FEP 필름을 활용하여 제작된 시편의 경우 진동에 반응하기 위해 대략 140 g의 웨이트를 부가한 경우 가장 높은 발전 전압을 보였다. 100 g 이하의 너무 가벼운 웨이트를 부가한 경우 TENG에 전달되는 압력이 상대적으로 낮은 문제점을 보였으며, 280 g의 웨이트의 경우 TENG에 전달되는 압력이 상대적으로 140 g의 웨이트 사용 조건에 비해 높았을 것으로 예상되나, 댐퍼의 두께 및 진동에 반응하는 주파수 등 다양한 요인들에 의해서 TENG의 발전 특성이 향상되지 못하고 압력 증가에 따른 개방 전압 향상이 관찰되지 않은 것으로 판단되었다.

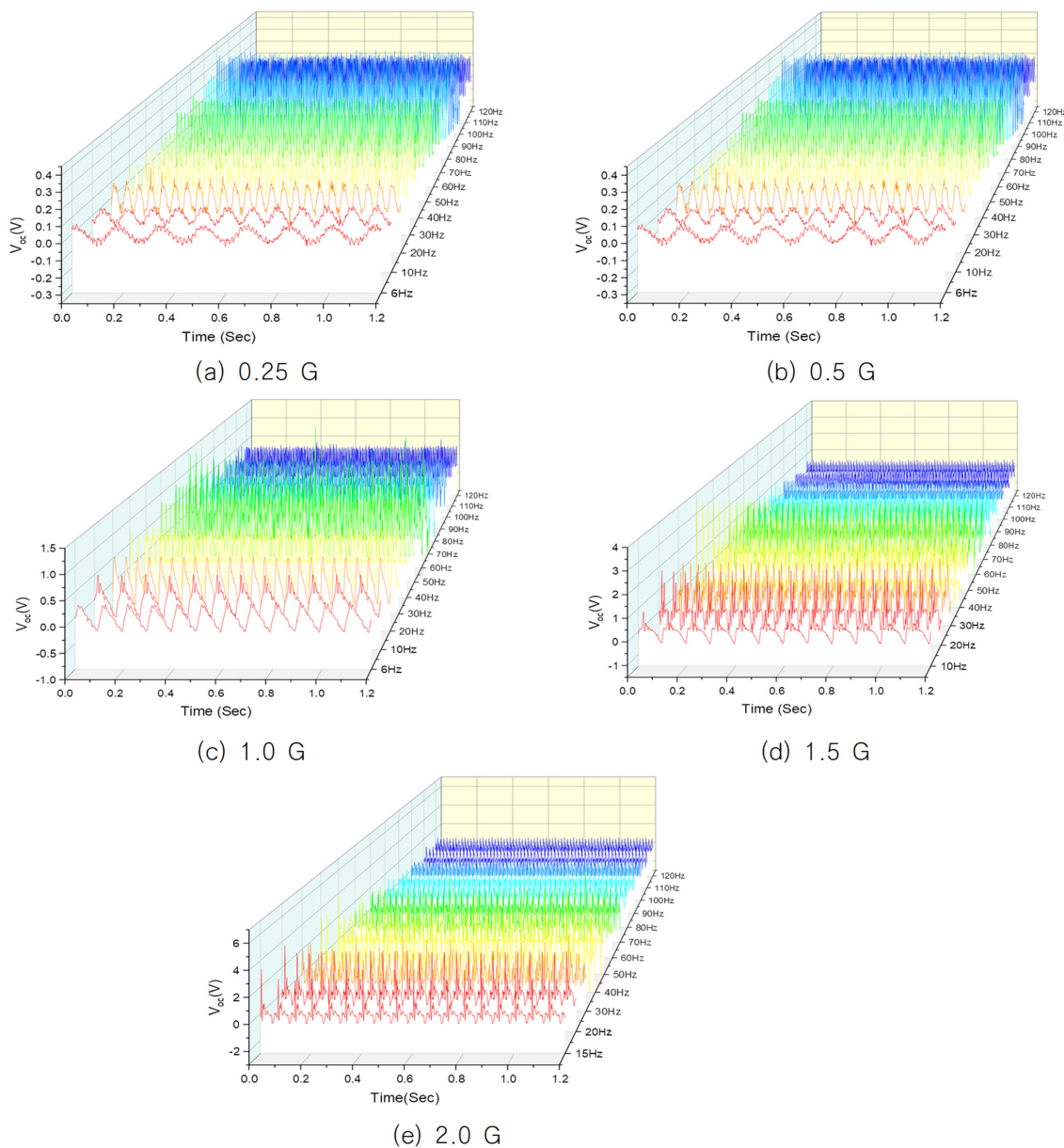


Fig. 8. 갈색 AAO 및 FEP 시편 TENG의 입력가속도 및 주파수 변화에 따른 발전 특성.

갈색 AAO 및 FEP 필름을 활용하여 제작된 시편의 경우 진동에 반응하는 주파수 및 재연성을 분석하기 위해 다수의 반복 시험을 실시하였으며, Fig. 7은 진동시험의 부가 가속도 수준 (G 값)의 변화에 따른 특성을 분석하기 위해 동일한 시편에 대해 진동시험기에서 다수의 실험을 시행한 결과이다.

총 4번의 실험을 통해 동일한 주파수에서 동일한 반응성의 결과를 얻을 수 있었고, 아울러 동일한 가속도 수준 0.5 G에서 동일한 개방 전압을 보임을 관찰 할 수 있었으며, 제작된 시편의 내구성 및 재현성을 분석하기 위해서 진동 시험기에서 발생 가능한 가장 높은 진동 주파수인 120 Hz 조건에서 0.5 G 수준에서 분석을 실시하였다. 갈색 AAO 및 FEP 필름을 활용하여 제작된 시편의 경우 기판과 AI 전극층의 박리 없이 측정이 이루어짐을 확인하였으며, 다양한 특성 분석 동안 동일한 조건의 실험이 가능함을 확인하였으며, 전술한 바와 같이 100 g 이상의 웨이트가 이상적이었기 때문에 측정 시, 웨이트의 무게를 140 g으로 고정하였고, 주파수 범위는 6~120 Hz, 가속도 수준은 0.25~2 G 범위에서 변화를 주어 실험하였다.

본 연구에서는 저주파 영역에서는 가속도 값이 1.5 G 인 경우 진동시험기의 물리적 한계를 고려하여 10~120 Hz, 2 G 인 경우는 15~120 Hz에서 분석을 실시하였다. Fig. 8은 개발된 TENG의 입력가속도 및 주파수별 발전 특성을 나타낸 것이다. 상기 실험 결과에 대한 분석을 통해, 동일한 웨이트와 댐퍼를 활용할 경우 가속도 증가 변화에 따라, TENG의 개방 전압이 증가함을 확인하였으며, 0.25 G의 가속도 수준의 저주파 영역에서는 0.1 V 수준의 매우 낮은 개방 전압이 발생됨을 확인하였다. 진동 주파수에 따라, TENG 발생 AC 전압의 주파수 역시 동일함을 확인 할 수 있었다. 이는 다양한 주파수를 갖는 진동이 발생되는 차량에 매우 적합한 발전 방식임을 확인 할 수 있었다. 진동 주파수가 높아질수록, 발생 개방 전압이 증가함을 확인하였다. 이 경우, 0.1에서 0.3 V로 증가함을 확인하였다. 개방 전압 증가는 110 Hz까지 증가하였으며, 120 Hz에서는 다소 감소함을 확인하였다. 실험 분석을 통해 전반적으로 0.25 내지 2 G 수준의 가속도 변화에서는 진동의 주파수에 대해서 TENG의 발생 AC 전압 주파수가 동일하게 관찰 되었으며, TENG의 발전 한계 주파수가 매우 큰 사실을 확인하였다. 또한, 입력가속도 G 값이 증가함에 따라, 전반적으로 TENG에서 개방 전압이 증가하여 차량에서 발생될 수 있는 최대 진동 가속도 2 G에서 4 V의 전압이 발생됨을 확인하였다. G 값이 증가함에 따라, TENG의 최대 개방 전압을 얻기 위한 최대 효율 진동 주파수가 감소함을 확인하였다. 2 G의 경우 15 Hz에서 가장 높은 전압이 발생되었으며, 1.5 G의 경우 20 Hz에서 가장 높은 전압이 발생되었다. 점진적으로 최대 효율 진동 주파수가 낮아지는 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 국내 수송환경에서 개발된 TENG의 발전량 분석을 통해 적용 가능성을 평가하기 위한 것이며, 이후 TENG의 발전 특성을 향상시키기 위하여 제작된 AAO의 에칭공정(pore widening) 및 수분함유량을 줄이기 위한 오존 UV처리 가공기법을 적용하여 발전량을 최대화가 필요할 것으로 판단되었다.

결 론

본 연구에서는 TENG에 가해지는 압력의 균일도의 최적화와 더불어 다양한 진동 주파수에 적절히 대응할 수 있는 기구물에 대한 연구개발을 접목시키는 것으로 국내 물류 수송차량에 대한 진동/충격 수준에서 국내 물류 수송환경으로 구동시킬 수 있는 TENG 소자를 탐색하여 발전 특성을 분석하여 최적의 구조설계 [웨이트 (140 g) + PET 발포 댐퍼 (1 mm) + AAO + Teflon]를 통해 TENG를 개발하였으며, 개발된 TENG에 대하여 국내 수송환경의 가속도 수준 및 주파수 범위 내에서의 발전 특성을 분석하였다. 그 결과, 개발한 TENG의 재현성이 우수하였고, 국내 수송환경의 조건에서 최대 4 V의 발전량이 계측되었다. 이후에 TENG의 발전량을 극대화하기 위하여 AAO의 수분함유량을 최소화할 수 있는 기법(pore widening, UV 오존 처리) 적용의 연구개발이 필요할 것으로 판단되었다.

감사의 글

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- Lee, J.H., Kim, J., Kim, T.Y., Hossain, M.S., Kim, S.W. and Kim, J.H. All-in-one energy harvesting and storage devices, *J. Mater. Chem. A.*, 4, 7983-7999.
- Niu, S., Liu, Y., Wang, S., Lin, L., Zhou, Y.S., Hu, Y. and Wang, Z.I. 2013. Theory of sliding-mode triboelectric nanogenerators, *Adv. Mater.*, 25, 6183-6193.
- Wang, Z.I., Chen, J. and Lin, L. 2012. Progress in triboelectric nanogenerators as a new energy technology and self-powered sensors, *Energy Environ. Sci.*, 8, 328-334.
- Wang, Z.I. 2015. Triboelectric nanogenerators as new energy technology and self-powered sensors - principles, problems and perspectives, *Faraday Discuss.*, 176, 447-458.
- Byun, K.E., Lee, M.H., Cho, Y., Nam S.G., Shin, H.J. and Park, S. 2017. Potential role of motion for enhancing maximum output energy of triboelectric nanogenerator, *Appl. Mater.*, 5, 74-107.
- Badatya, S., Bhowal, R., Mandal, K., Srivastava, A.K., Gupta, M.K. and Chopra, D. 2022. Poling-Polarization-Mediated

- Centrosymmetric Charge Transfer Organic Cocrystal Based Flexible Triboelectric Nanogenerator. *ACS Applied Electronic Materials*, 4(7), 3665-3678.
- Shi, Q., Zhang, Z., Yang, Y., Shan, X., Salam, B. and Lee, C. 2021. Artificial Intelligence of Things (AIoT) Enabled Floor Monitoring System for Smart Home Applications. *ACS Nano*, 15(11), 18312-18326.
- Kim, W.G., Kim D.W., Cho, I.W., Kim, J.K., Kim, M.S. and Choi, Y.K. 2021. Triboelectric Nanogenerator: Structure, Mechanism, and Applications. *ACS Nano*, 15(1), 258-287.
- 투고: 2022.11.30 / 심사완료: 2022.12.02 / 게재확정: 2022.12.06