

역전기습윤현상을 이용한 소형 에너지 수확장치

조진현* · 김길연** · 최상백*** · 전태준***† · 김선민**†

Micro Energy Harvesting System Based On Reverse Electro Wetting On Dielectric (REWOD)

Jin Hyun Cho*, Gil Yeon Kim**, Sang Beak Choi***, Tae-joon Jeon***†, Sun Min Kim**†

Key Words : Dielectric Materials(유전물질), Energy Harvesting(에너지 수확), Reverse Electrowetting on Dielectric(역전기습윤현상)

ABSTRACT

In this study, we attempted to harvest energy using water droplet based on Reverse Electro Wetting On Dielectric (REWOD) phenomenon between water droplet and dielectric surface without external bias. REWOD device can be fabricated via simple coating process, which is highly economic and easy. We believe that our system is well-suited for IoT(Internet of Things) embedded electronics that require low but consistent electricity. Moreover, our device can be integrated with window to generate electricity upon raindrops.

1. 서론

에너지 하베스팅(Energy harvesting)기술은 주변에 활용되지 않고 버려지는 빛에너지, 열에너지, 운동에너지 등을 수집하여 재사용하는 것을 뜻한다. 활용의 번거로움에 비해 출력이 낮아 그간 관심을 받지 못하고 있었으나, 최근 사물인터넷(Internet of things, IOT)이나 유비쿼터스(Ubiquitous) 기술의 발달로 저출력임에도 지속적인 전원공급이 가능한 에너지 하베스팅 기술이 주목 받고 있다.

역전기습윤현상(Reverse electro wetting on dielectric, REWOD)은 물과 같은 극성물질이 폴리머(Polymer)와 같은 유전물질(Dielectric materials)과 접할 때, 물은 평소에 전하를 띠지 않음에도 불구하고, 두 물질의 경계면에서 서로 다른 전하를 띠게 되는데, 이를 REWOD현상이라고 부르며, 이러한 전기적 현상으로 전자의 이동을 유도할 수 있어 전류를 만들 수 있다.⁽¹⁻³⁾

본 연구에서는 실험용 슬라이드 글라스(Slide glass) 위에 전극, 유전물질층, 소수성층이 차례로 코팅한 REWOD장

치를 제작하여 물방울의 움직임을 이용한 에너지 하베스팅을 시도하였다. 본 연구의 REWOD장치는 외부전원이 필요하지 않고, 단순코팅공정을 통해 만들 수 있기 때문에 쉽고 경제적인 장점이 있다. 또한 주변에서 쉽게 볼 수 있는 물방울의 움직임을 이용해 역학적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 장점이 있다. 비록 현재는 그 출력이 낮고 전기에너지 생산되는 것을 확인하는 수준이나, 지속적인 기술개발이 이루어진다면, 에너지 소모는 적지만 장기간 에너지를 필요로 하는 센싱 기술(Sensing technology)이나 웨어러블 디바이스(Wearable device)에서 전원공급장치로서 배터리를 대신할 수 있을 것으로 생각된다.

2. 역전기습윤현상

물은 대표적인 극성물질로 평소는 아무런 전하를 띠지 않지만, 유전물질과 만나게 되면, 물과 유전물질사이 경계면에서 물은 양전하를 띠고 유전물질은 음전하를 띠는 전기이중층(Electrical double layers, EDL)을 형성하게 된다.⁽⁴⁾ 유

* 삼성전자 영상디스플레이 사업부(Samsung Electronics, Visual Display Division)

** 인하대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Inha University)

*** 인하대학교 생명공학과(Department of Biological Engineering, Inha University)

† 교신저자, E-mail : tjjeon@inha.ac.kr, sunmk@inha.ac.kr

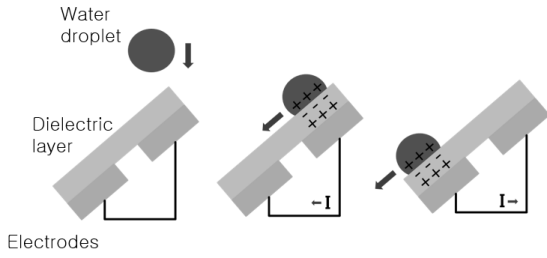


Fig. 1 Working mechanism of REWOD⁽²⁾

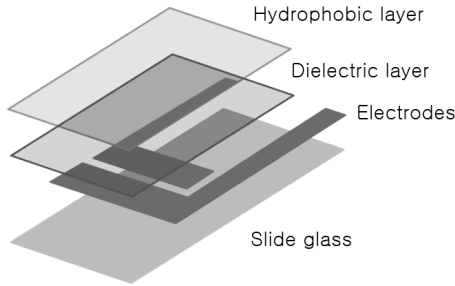


Fig. 2 Schematic of REWOD device

전물질 표면이 음전하로 대전됨과 동시에, 유전물질 내부에서는 유전분극이 일어나고 전극과 닿는 면은 양전하를 띠게 된다. 이로 인해 유전물질 아래 전극을 통해 전자의 이동이 일어나 전류가 흐르게 된다. 이를 역전기습윤현상이라 부른다.

Fig. 1⁽²⁾은 REWOD장치에서 물방울의 움직임에 의해 전기가 생산되는 작동원리를 설명하고 있다. REWOD장치는 전극, 유전물질층, 소수성층이 코팅되어 있는 간단한 장치이다. REWOD장치를 코팅면이 위로가게 기울여 놓고, 그 위로 물방울을 REWOD장치를 향해 자유낙하 시킨다. 물방울이 유전물질과 닿으면 두 물질의 경계면에서 물방울은 양전하를 띠고, 유전물질은 음전하를 띠는 전기이중층을 형성한다. 유전물질 내부에서는 유전분극이 일어나고 전극과 닿는 면은 양전하를 띤다. 이 양전하가 전극의 전자이동을 유도하고 도선에서 전류가 흐르게 된다. 이어 중력에 의해 물방울이 아래쪽 두 번째 전극과 닿으면 마찬가지로 현상이 발생하고 처음과 반대방향으로 도선에 전류가 흐르게 된다. 이러한 원리로 REWOD장치를 통해 전원을 생산할 수 있다.

3. 실험방법

Fig. 2는 REWOD장치의 모식도를 나타내고 있다. 사진에서 가장 아래는 슬라이드 글라스, 그 위로 전극, 유전물질층 그리고 소수성층이 코팅되어 있다. REWOD장치는 가로 25 mm, 세로 75 mm 크기의 슬라이드 글라스를 기반으로 제작되었다. 그 위로 한 쌍의 전극이 코팅되어 있고, Poly(4-vinyl phenol)로 코팅된 유전물질층과 EKG-6015N으로 코팅된 소수성층으로 이루어져 있다.

전극은 슬라이드 글라스 아래 부분에 가로질러 한 쌍으로 이루어져있으며, 양쪽 면을 따라 외부와 연결을 위한 연장선이 코팅되어있다. 전극의 크기는 폭 7 mm이고 두 전극사이의 간격은 2 mm로 물방울의 크기를 고려하여 결정되었다.

유전물질층은 물방울과 만나, 그 사이에서 전기이중층을 형성하는 중요한 층으로, 전극이 코팅된 슬라이드 글라스 위에 코팅되었고, 투명하기 때문에 보이지 않는다. 다양한 폴리머가 사용될 수 있으며, 특히 PTFE(Poly Tetra Fluoro Ethylene), FEP(Fluorinated Ethylene Propylene copolymer) 등의 불소계 폴리머들이 많이 사용되어진다.⁽⁵⁾ 본 연구에서는 Poly(4-vinyl phenol)를 유전물질로 사용하였다.

소수성층은 REWOD장치의 가장 위층으로 물방울과 직접적으로 닿는 층이다. 소수성층도 마찬가지로 투명해서 보이지 않는다. 소수성층은 REWOD장치가 물에 젖는 것을 막아주고 물방울이 REWOD장치 위를 부드럽게 지나갈 수 있게 만들어 준다.

3.1 제 작

3.1.1 전극코팅

전극은 Gold sputtering machine을 이용해 코팅하였다. Gold sputtering machine은 전체 면적에 금을 흩뿌려주는 기계로 전극모양대로 코팅을 하기 위해서는 마스킹이 필요하다. 마스킹은 레이저 조각기(laser engraving machine)를 이용하여 1 mm 두께 아크릴을 잘라 만들었다. 슬라이드 글라스위에 레이저 조각기로 잘라 만든 아크릴 마스킹을 올려놓은 후, Gold sputtering machine을 이용하여 2분간 금 코팅을 하였다.

3.1.2 유전물질코팅

Poly(4-vinyl phenol), Poly(melamine-co-formaldehyde) methylated, Propylene glycol monomethyl ether acetate(PGMEA)를 무게비 2 : 1 : 17로 혼합한 후, 전극 코팅된 시편위에 스펀코팅을 하였다. 스펀코팅은 3000 rpm에서 35초간 진행하였다. 이후 코팅의 안정화를 위해 30분간 자외선 처리와 200℃에서 20분간 건조를 하였다. 유전물질코팅에서 Poly(4-vinyl phenol)은 유전물질로서 실질적으로 표면에 코팅되는 물질이다, Poly(melamine-co-formaldehyde) methylated는 Poly(4-vinyl phenol)와 크로스링크(Cross link)를 하기 위한 물질이고, 이 두 물질은 무게비 2:1로 크로스링크하기 때문에 2:1의 무게비로 혼합하였다.⁽⁶⁾ Propylene glycol monomethyl ether acetate(PGMEA)는 용해제로 사용되었고, 건조처리에서 증발하게 된다.

3.1.3 소수성코팅

소수성층 코팅은 나노캡 발수코팅(EKG-6015N)이라는

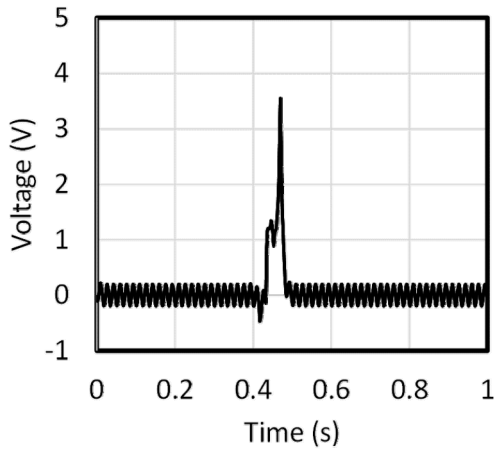


Fig. 3 Output voltage measured with a single droplet

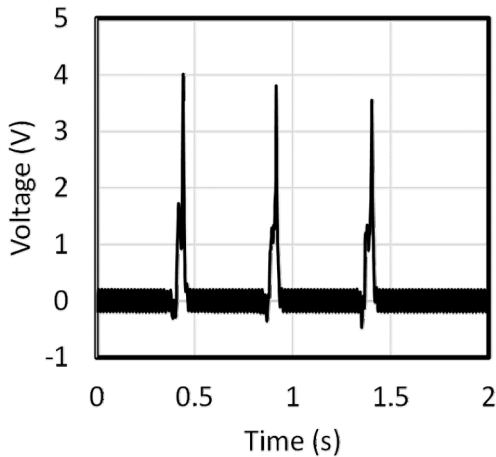


Fig. 4 Output voltage measured with 3 droplets

표면에 나노크기의 돌기를 형성하는 실리카무기계의 상업적 발수코팅 제품을 이용하였다. 제품을 마른 천에 적셔 표면을 문질러 준 후, 안정화를 위해 하루 동안 상온에 보관하였다.

4. 실험결과

위 공정으로 제작된 REWOD장치를 Fig. 1과 같이 지면과 45° 기울여 중력에 의해 물방울이 REWOD장치 위를 흘러내릴 수 있도록 설치하였다. 지면과 이루는 기울기가 클수록 물방울이 REWOD장치 위를 흐르는 속도가 빨라지나 너무 기울기가 클 경우 물방울이 REWOD장치 위를 흐르지 않고 튕기는 현상이 발생할 수 있으므로 장치를 큰 기울기로 배치하지 않았다. 주사기펌프(Syringe pump)를 이용하여 60 μl의 물방울을 만들도록 설정한 후 REWOD장치 위 약 30 cm에서 물방울을 떨어뜨렸다. REWOD장치와 물방울의 높이 또한 물방울의 속도와 관련이 있고 너무 높은 곳에서 떨어뜨릴 경우 속도가 너무 증가하여 물방울이 REWOD장치와 만나는 순간 부서져 REWOD장치의 전극 위를 제대로 흐르지

못하는 경우가 발생할 수 있기 때문에 물방울이 부서지지 않을 높이에 실험을 진행하였다.

REWOD장치의 전극을 각각 전압측정장치(VersaSTAT4, Princeton Applied Research)의 양극과 음극에 연결하였다.

REWOD장치를 설치한 후, 주사기펌프로 물방울을 떨어뜨려주면서 전압측정장치에 표시되는 전위차를 컴퓨터로 기록하였다.

Fig. 3, 4는 REWOD장치 위에서 물방울이 움직일 때 REWOD장치에서 발생하는 전위차를 시간에 따른 그래프로 나타낸 것이다.

Fig. 3은 물방울 하나의 움직임에 의해서 전위차가 발생하는 것을 보여주고 있다. 물방울이 떨어지고 소수성코팅과 유전물질로 코팅된 전극과 닿는 순간, 물방울과 유전물질이 닿는 계면에서 물방울은 양전하를 띄고 유전물질은 음전하를 띄게 된다. 유전물질 표면에서의 음전하로 인해 유전물질 내부에서 유전분극이 발생하게 된다. 이 유전분극은 그 유전물질 아래의 전극에 전자의 흐름을 유도하여 도선에 전기가 흐르게 된다. 물방울이 전극 위를 통과하는 시간은 약 0.1초였고, 이 때 순간 최대 약 4 V의 전위차를 발생시키는 것을 확인할 수 있었다. 물방울과 전극의 면적의 크기를 변화시키면 더 큰 전위차를 얻을 수 있다.

Fig. 4는 주사기펌프를 이용하여 일정한 간격으로 물방울을 만들어 흘려주었을 때, 물방울의 떨어지는 주기에 따라 전위차가 발생하는 것을 확인할 수 있었고, REWOD장치의 크기나 물방울의 크기 및 개수를 증가시킬 수 있는 가능성이 있음을 보여준다. 또한, 주사기펌프를 통해 일정한 주기로 물방울이 장치에 떨어지므로 이를 통해 전기발생 주기등을 조절 할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 역전기습윤현상을 기반으로, 한 쌍의 전극 위에 유전체물질과 소수성물질을 코팅한 REWOD장치를 제작하였다. 이렇게 제작된 REWOD장치 위로 물방울을 흘려주어 역학적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 에너지 하베스팅을 시도하였고, 하나의 물방울로 약 4 V의 전위차 발생을 확인하였다.

본 연구의 장점은 제작공정 및 최종 결과물이 어렵거나 복잡하지 않고 단순코팅공정을 통해서 만들어져 쉽고 경제적이며, 어디서나 쉽게 볼 수 있는 물방울을 이용해 에너지 하베스팅을 시도하였다는 점이다. 이러한 장점은 건물 유리에 접목해 빗방울을 이용하거나, 바다에서 파도를 이용하여 전기를 생산하는 새로운 개념의 에너지 하베스팅을 제안하고 있다.

아직은 그 출력이 약해 실용화하기 어렵겠지만, 전극배열의 설계와 유전물질과 소수성물질에 대한 연구를 통해 출력

이 향상된다면, 현재 주목받고 있는 IOT, 센서기술, 웨어러블 장비와 같은 특히 전력소비가 크진 않지만 지속적으로 전력공급이 필요한 전자장비들에 배터리를 대신해 전원공급장치로의 역할을 할 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

이 논문은 2015년도 삼성전자(주)의 일반수탁연구지원사업을 통해 연구되었음.

References

- (1) Krupenkin, T. and Taylor, J. A., 2011, "Reverse electrowetting as a new approach to high-power energy harvesting", *Nature Communications*, Vol. 2. No. 448, pp. 1~7.
- (2) Kwon, S. H., et al., 2014, "An effective energy harvesting method from a natural water motion active transducer", *Energy & Environmental Science*, Vol. 7, No. 10, pp. 3279~3283.
- (3) Zhu, G., et al., 2014, "Harvesting water wave energy by asymmetric screening of electrostatic charges on a nanostructured hydrophobic thin-film surface", *ACS Nano*, Vol. 8, No. 6, pp. 6031~6037.
- (4) Moon, J. K., Jeong, J., Lee, D., and Pak, H. K., 2013, "Electrical power generation by mechanically modulating electrical double layers", *Nature Communications*, Vol. 4. No. 1487, pp. 1~6.
- (5) Park, J., Yang, Y., Kwon, S. H., and Kim, Y. S., 2015, "influences of surface and ionic properties on electricity generation of an active transducer driven by water motion", *Journal of Physical Chemistry Letters*, Vol. 6, No. 4, pp. 745~749.
- (6) Lim, M. H., Jung, W. S., and Park, J. H., 2013, "Curing temperature- and concentration-dependent dielectric properties of cross-linked poly-4-vinylphenol (PVP)", *Current Applied Physics*, Vol. 13, No. 8, pp. 1554~1557.