전기 이중층의 역학적 변조를 이용한 전력 생산

DOI: 10.3938/PhiT.22.016

문종균·박혁규

Electrical Power Generation by Mechanically-modulating Electrical Double Layers

Jong Kyun MOON and Hyuk Kyu PAK

Most objects in contact with a liquid acquire some electronic charges on their surfaces. These charges on the surface attract counter ions from the liquid, and those counter ions electrically screen the surface charges. However, because of the thermal effect, the counter ions are not firmly anchored on the surface. Instead, they are distributed near the surface, with an exponential decrease in the electrical potential with increasing distance from the surface. This complex system is called an electrical double layer (EDL). Because its geometry and structure are similar to those of an electric capacitor, it is also called an electrical double layer capacitor (EDLC). Numerous studies on the EDL have explained many electrokinetic phenomena, such as electro-osmosis, electrophoresis, streaming current, etc. Here, we review a new method of AC electrical power generation by mechanically-modulating the EDLs at the interfacial areas of a liquid bridge between two conducting plates. When the height of the liquid bridge is mechanically modulated, the EDLCs formed by the two interfacial areas are continuously charged and discharged at different phases from each other, generating an AC electric current across the plates. An RC circuit model is used to explain the results of this experiment. This phenomenon could be useful for constructing a micro-fluidic power generation system in the future.

저자약력

문종균 박사는 2013년 부산대학교 물리학과에서 박사학위를 받고, 현재 부산대학교 연체 물리 연구실에서 전기 이중층의 역학적 변조를 이용한 전력 생산 기술 및 고체, 액체 계면에서의 이온 분포에 대한 연구를 진행 중이다.

박혁규 교수는 1992년 미국 피츠버그 대학교 물리학과에서 박사학위를 받고, 미국 듀크 대학교와 캔자스 주립대학교에서 박사후 연구원을 거친 후 1995년부터 부산대학교 물리학과에서 교수로 재직 중이다. (hkpak@pusan.ac.kr)

전기이중층이란?

물과 같은 극성 매질과 접하고 있는 물질의 표면은 보통 전하를 띤다. 전하의 발생은 물질의 표면에 있는 성분의 이온화, 매질 속에 있는 이온 성분의 물질 표면 흡착, 이온 용해 등과 같은 여러 과정에서 기인한다. 어떤 물질이 전하를 띤다는 것은 가까이 있어서 중성을 유지하고 있던 양이온과 음이온이 서로 멀어지면서 각각 이온 구조를 나타내는 것을 의미한다. 실제 수용액 내에는 전하를 갖는 물질 표면 근처에 많은 수의 이온쌍이 존재한다. 이들 사이에는 전하끼리 서로 끄는 인력과 서로 밀어내는 반발력이 복합적으로 작용하여 그 결과로 물질의 표면 주위에는 표면 전하(surface charge)와 인력이 작용하는 반대 이온(counter ions)들로 이루어진 전기이중층(electric double layer)이 형성하게 된다.^[1,2]

전기이중층에서의 전하의 분포에 대한 초기 이론으로 1879년 발표된 Helmholtz 모델이 있다^[3](그림 1a). 이 모델에서는 + 전하와 - 전하의 두 층이 가까운 거리에서 서로 마주보고 있는 모양이고 전기퍼텐셜의 크기는 한 층에서 다른 층으로 가는 거리에 따라 선형적으로 변한다. Helmholtz 모델은 전기이중층 상태를 아주 간단하게 나타낸 것이어서 수학적 해석은 용이하지만 실제 상태와는 거리가 멀다.

실제 상태는 주위 온도에 따른 열운동으로 표면 주위에 있는 반대 전하의 일부가 표면에서 떨어져 매질의 내부로 확산, 이동하려는 경향을 보인다. Gouy와 Chapman만은 이러한 상태를 나타내는 새로운 모델 즉 확산전기이중층(diffuse double layer) 모델을 제시하였다.^[4] 이 모델은 반대이온을 점전하로 가정하고, 이온 분포는 Boltzmann 분포를 따른다고 가정한 것이다. 따라서 반대이온의 농도는 표면에서 멀어지면서 매우 빠르게 감소하다가 점차 서서히 감소한다(그림 1b). 이 모델은 전하밀도가 낮은 경우나 표면에서 떨어진 부분에 대해서는 잘 들어맞는다. 확산전기이중층을 분석하기 위해서 두 가지 기본 방정식이 쓰이는데 첫 번째는 Poisson 방정식이다.

REFERENCES

- [1] A. J. Bard, et al., *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications* (2001).
- [2] J. N. Israelachvili, *Intermolecular and Surface Forces* (1992).
- [3] H. L. F. Helmholtz, Ann. Physik. **7**, 337 (1879).
- [4] G. Gouy, Comt. Rend. **149**, 654 (1909), D. L. Chapman, Phil. Mag. **25**, 475 (1913).

Fig. 1. Models of the double layer as historically developed: a) Helmholtz model b) Gouy-Chapman model of the diffuse layer c) Stern's model, combining (a) and (b).^[5]

Fig. 2. Schematic diagram of electrical double layer capacitor.

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0} \quad (1)$$

여기서 ρ 는 전하밀도, ϕ 는 전기퍼텐셜, ϵ 는 액체의 유전상수이고 ϵ_0 는 진공의 유전율이다. 다른 하나의 방정식은 Boltzmann 방정식이다.

$$c_{\pm} = c_0 \exp\left(\frac{\mp z_{\pm} e \phi}{k_B T}\right) \quad (2)$$

여기서 c 는 확산층 이온의 농도이고 c_0 는 표면에서 멀리 떨어진 용액내부(bulk) 상태의 농도이다. 그리고 z 는 이온의 하전가(valency)를 나타내고, e 는 기본전하량, k_B 는 Boltzmann 상수, T 는 온도를 나타낸다. 전해질이 균형을 이룬다면 $c_+ = c_- = c$, $z_+ = -z_- = z$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 전체 전하밀도는 다음과 같다.

$$\rho = ze(c_+ - c_-) = -2cze \sinh\left(\frac{ze\phi}{k_B T}\right) \quad (3)$$

만약 표면이 평면일 경우에는 표면에서부터 거리 x 에 따른 확산전기이중층을 식 (2)와 식 (3)으로부터 다음과 같은 Poisson-Boltzmann 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d^2 \phi}{dx^2} = \frac{2cze}{\epsilon \epsilon_0} \sinh\left(\frac{ze\phi}{k_B T}\right) \quad (4)$$

만약 $|ze\phi| \ll k_B T$ 라면 Poisson-Boltzmann 방정식은 다음과 같이 근사를 할 수 있다(Debye-Hückel 근사).

$$\frac{d^2 \phi}{dx^2} \approx \frac{2cz^2 e^2}{\epsilon \epsilon_0 k_B T} \phi \quad (5)$$

식 (5)의 해를 구하면 다음과 같다.

$$\phi = \phi_0 e^{-\kappa x}, \quad \kappa \equiv \sqrt{\frac{2cz^2 e^2}{\epsilon \epsilon_0 k_B T}} \quad (6)$$

이 식에 따르면 전기 퍼텐셜은 표면에서 멀어질수록 지수 함수적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 여기서 특성화 감소 길이 $1/\kappa$ 를 확산전기이중층 길이, 혹은 Debye 길이 λ_D 로 정의한다. 농도가 진할수록 κ 가 커지는 것을 알 수 있고, 따라서 Debye 길이 λ_D 는 작아짐을 알 수 있다. 농도가 진해질수록 고체 표면 전하들 근처에는 액체 속에 있는 반대 이온들이 더 많이 분포하게 되어서 차폐효과(screening effect)가 더 커지게 된다. 따라서 전기퍼텐셜은 표면에서부터 빠르게 감소하게 되므로 Debye 길이 λ_D 도 더 작아진다고 볼 수 있다.

Gouy-Chapman 모델에서는 이온의 실제 크기를 고려하지 않고 점전하로 가정하였기 때문에, 전하 밀도가 높거나 표면과 매우 가까운 부분에서는 잘 들어맞지 않는다. 실제 이온은 물과 같은 매질 내에서 수화(hydration)된 상태에 있어서 이온 반지름보다 더 가깝게 표면으로 접근할 수 없다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 Stern은 표면으로부터 수화된 이온반경만큼 떨어진 면(Stern면) 내부와 면 외부의 확산이중층의 두 부분으로 전기이중층이 이루어져 있는 모델을 제안하였다^[6](그림 1c). Stern면 안에서는 Helmholtz 모델과 같이 반대이온들이 표면에 강하게 결합되어 있고 그 밖에서는 Gouy-Chapman 모델과 같이 확산층을 형성하고 있다고 생각한 것이다. 따라서 이 모델은 Stern면 안쪽에서는 Helmholtz 모델과 같이 전기퍼텐셜이 급격하게 감소하고, Stern면 바깥쪽인 확산층에서는 Gouy-Chapman 모델과 같이 Boltzmann 분포에 따라서 서서히 감소한다는 수학적 접근을 한다.

전기이중층 변조

(Modulating electrical double layers)

앞에서 설명한 것과 같이 물과 같은 액체에 금속전극이 접촉하면 전극의 표면이 전기를 띤다. 이로 인해 그림 2처럼 전극의 표면 근처에 전기이중층(electrical double layer)을 형성

REFERENCES

- [5] <http://electrochem.cwru.edu/encycl/art-c03-elchem-cap.htm>.
- [6] O. Stern, Z. Electrochem. **30**, 508 (1924).
- [7] P. Simon, *et al.*, Nat. Mater. **7**, 845 (2008).
- [8] P. Sharma, *et al.*, Energy Convers. Manage. **51**, 2901 (2010).

하게 된다. 이러한 전기이중층은 기하학적인 구조와 전하분포의 대칭성으로 전기이중층 축전기(electrical double layer capacitor; EDLC)라고도 한다.^[7,8]

만약 두 전극판 사이에 liquid bridge 형태로 물방울이 존재하면 두 전극의 각 표면에는 전기이중층이 생기면서 직렬로 연결된 두 개의 축전기 역할을 한다. 정량적인 실험을 위해 아래에는 표면 처리를 하지 않은 ITO 전극판을 위치시키고 Poly Tetra Fluoro Ethylene(PTFE)로 표면 처리한 ITO 전극판을 위쪽에 위치시켜 liquid bridge를 만들었다. PTFE는 소수성 성질을 가지고 있어서 물방울은 젖음(wetting)이 잘 되지 않기 때문에 두 전극판 사이의 거리에 따라 위쪽 전극판과 liquid bridge가 만드는 접촉 면적이 많이 변하게 된다. 반면에 아래 ITO 전극판은 친수성 성질 때문에 물방울은 젖음이 잘 된다. 그리고 pinning effect에 의해 아래 전극판과 liquid bridge가 만드는 접촉 면적은 변하지 않게 된다.^[9] 따라서 그림 3a처럼 아래 판을 진동시킨다면 그림 3b처럼 전극표면의 특성 때문에 아래 접촉면적은 일정하고 위쪽 접촉면적이 시간에 따라 바뀌게 된다. 결론적으로 그림 3c처럼 아무런 진동이 없으면 직렬로 연결된 두 축전기 사이에는 전위차가 없어서 전류가 흐르지 않는다. 하지만 그림 3d처럼 진동이 있으면 액체와 위쪽 전극판의 접촉면적이 변하게 되어 위쪽 전기 이중층 축전기의 축전용량 C_T 가 바뀌게 된다. 그러면 직렬로 연결된 두 축전기 사이에 전위차가 생기게 되고 결국 전위차가 없어지는 방향으로 전류가 흐르게 된다. 이러한 원리로 일정한 주기로 진동시키면 액체와 전극판 사이에 형성된 전기이중층 축전기의 축전용량이 바뀌고 동시에 두 축전기 사이에 전위차가 생겨 비평형상태가 되고 평형상태로 가기 위해 전위차가 없어지는 방향으로 전하들이 이동할 것이다. 하지만 주기적인 진동이 계속 있다면 평형 상태로 가지 못하고 비평형 상태를 유지하게 되어 각 전극판은 주기적으로 충전과 방전을 계속하게 된다.

각 EDLC의 축전용량을 구하기 위해 위쪽 접촉면적 A_T 과 아래쪽 접촉면적 A_B 변화를 고려한다면 유전 물질이 코팅된 위쪽 전극판의 전기용량 C_T 와 아래 전극판의 전기용량 C_B 는 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$C_T(t) \cong \epsilon_0 A_T(t) \left(\frac{d}{\epsilon_p} + \frac{\lambda_D}{\epsilon_d} \right)^{-1} \cong \frac{\epsilon_0 \epsilon_p}{d} A_T(t),$$

$$C_B \cong \frac{\epsilon_0 \epsilon_d}{\lambda_D} A_B \quad (7)$$

여기서 d 는 위쪽 ITO판에 코팅된 유전물질의 두께이고 λ_D 는 전기이중층의 두께, ϵ_p 와 ϵ_d 는 각각 PTFE 및 물의 유전상수이다. 본 연구에서는 $d/\epsilon_p \gg \lambda_D/\epsilon_d$ 이기 때문에 C_T 에 대한 근사를 사용할 수 있다.^[10,11]

Fig. 3. Schematic diagram of the experiment and resistor-capacitor circuit model. (a) Experimental setup and (b) video images of water bridge over time. Scale bar, 1 mm. Charge distributions on EDLCs and corresponding equivalent electrical circuits (c) when the water bridge height is fixed in time (equilibrium state) and (d) at the very moment when the two plates are approaching each other (non-equilibrium state). Within a couple of periods after the vibration starts, the system reaches a steady state.^[12]

저항-축전기 회로 모델(RC circuit model)

그림 3d의 아래 그림처럼 등가전기회로로 생각하고 Kirchhoff 법칙을 이용해 식을 세워보면 다음과 같은 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$(R_F + R_L) \frac{dq(t)}{dt} = V_B(t) - V_T(t)$$

$$= \frac{Q_B - q(t)}{C_B} - \frac{Q_T + q(t)}{C_T(t)} \quad (8)$$

초기 조건은 $q(t=0) = 0$ 이다. 이 등가전기회로 모델은 liquid bridge의 수력학적 변형과 진동하는 동안 형성되는 EDL의 동역학적 변화는 고려되지 않았다. 하지만 시스템을 가장 알기 쉽게 이해할 수 있는 모델이기 때문에 이점이 많다고

REFERENCES

- [9] P. G. de Gennes, Rev. Mod. Phys. **57**, 827 (1985).
- [10] M. Z. Bazant, et al., Phys. Rev. E **70**, 021506 (2004).
- [11] D. Klarman, et al., Langmuir **27**, 6031 (2011).
- [12] J. K. Moon, et al., Nat. Commun. **4**:1487 doi:10.1038/ncomms2485 (2013).

Fig. 4. Voltage drop $V_L(t)$ across R_L as a function of time t . Experiment (open circles), numerical calculations using Eq. (2) (solid curves). Square wave inputs at (a) $f=1$ Hz and (b) $f=10$ Hz where the contact area $A_T(t)$ increases sharply, stops and maintains its value for a half period, and then changes direction. (c) Sawtooth input at $f=1$ Hz where $A_T(t)$ slowly increases linearly with time and then decreases sharply. (d) Triangular input at $f=5$ Hz. Sine wave inputs at (e) $f=5$ Hz and (f) $f=10$ Hz. For all graphs the droplet volume $V=40 \mu\text{l}$ and oscillation amplitude $L=0.5$ mm. For (a)-(e) $R_L=10 \text{ M}\Omega$ and (f) $R_L=1 \text{ M}\Omega$. Dips in (f) arise from an imperfect sinusoidal pattern in $A_T(t)$ (see arrows in Fig. 6f).^[12]

할 수 있다. 식 (8)에서 보듯 전류 흐름의 원인은 두 EDLC 전압의 전위차에 의한 것이기 때문에 다음과 같이 두 EDLC 전압의 전위차를 정의할 수 있고 측정하는 전압 V_L 은 부하 저항 R_L 에 걸리는 전압이므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta V(t) \equiv V_B(t) - V_T(t), \quad V_L(t) = \Delta V(t) \frac{R_L}{R_F + R_L} \quad (9)$$

본 연구에서는 진동하는 동안 시간에 따라 변하는 V_L 을 직접 측정하였고, 또한 고속카메라를 이용해 물방울과 위쪽 전극 표면의 접촉면적 A_T 를 시간에 따라 측정하였다. 시간에 따른 접촉면적 변화 값을 안다면 식 (7), (8), (9)를 이용한 수치해석 결과와 실험에서 구한 V_L 값을 직접 비교할 수 있다. 그림 4는 시간에 따라 V_L 값을 측정한 실험 결과와 수치해석 결과이다. RC 회로로 간략하게 시스템을 표현했음에도 불구하고 실험 결과 값이랑 정확하게 일치함을 볼 수 있다. 그림 5는 고속 카메라를 이용해 촬영하고 이미지 분석을 통해 구한 시간에 따른 물방울과 전극표면의 접촉면적 A_T 값들이다. 그림 6은 여러 다른 변수(진동수 f , 부하저항 R_L , 진동진폭 L)들에 대한 측정을 V_L 의 RMS(root mean square) 값으로 결과를 구한 것이다. 결과를 종합해보면 진동수, 부하저항, 진동진폭이 커질수록 V_L 값이 커짐을 알 수 있다.

물방울로 LED를 켤 수 있을까?

그림 6b는 그림 6a에서 측정한 결과에서 계산한 것으로 부피가 $40 \mu\text{l}$ 인 물방울 하나의 전력을 나타낸 데이터이다. 전력

Fig. 5. $A_T(t)$ measurements using high speed camera. There is a one-to-one correspondence between Fig. 4 and Fig. 5.^[12]

Fig. 6. V_{rms} and power output under various conditions. (a) V_{rms} and (b) power versus frequency f and N , for a sinusoidal input, with $L=0.6$ mm and $R_L=10 \text{ M}\Omega$. The vibration frequency $f \sim 67$ Hz corresponds to $N \sim 1$. (c) V_{rms} vs. R_L for 3 different input frequencies with $L=0.6$ mm. (d) V_{rms} vs. vibration amplitude L for 3 different input frequencies with $R_L=10 \text{ M}\Omega$. Here, the droplet volume is $40 \mu\text{l}$ and the solid curves correspond to the numerical calculations. Data show mean $\pm$ s.d.^[12]

이 수십 nW 정도 되는데 실제 생활에 쓰기에는 많이 부족한 전력 수치이다. 대부분의 작은 스케일의 미세 장치들은 최소 $1 \mu\text{W}$ 이상의 전력을 필요로 한다. 따라서 실생활에 응용하기 위해서는 전력을 높일 필요가 있다. 물방울의 부피를 더 크게 하면 접촉면적의 변화량을 더 크게 할 수 있어 전력을 증가시킬 수 있지만 부피가 커질수록 중력에 의한 효과가 커지게 되어서 물방울이 반구 형태의 모양에서 윗면이 평평한 형태의 팬케익 모양으로 바뀌게 된다. 이렇게 되면 위쪽 전극판과 접촉이 되었을 때 초기 면적이 크게 되어 접촉면적 변화량의 증가가 둔화된다. 또한 큰 진폭으로 진동시킬 경우 중력 효과에 의해 물방울이 위쪽 전극판에서 떨어져 liquid bridge를 형성하지 못하게 된다.^[9]

이에 대한 해결 방법은 적절하고 균일한 크기의 물방울 수

Fig. 7. Micro-Watt power generation. (a) Power vs. number of bridges for a sinusoidal input with $f=30$ Hz, $L=0.6$ mm and $R_L=10$ M Ω (solid dots). Solid curve represents a parabolic fit. Volume of each single droplet is 40 μ l. Data show mean $\pm$ s.d. (b) Voltage drop V_L and instantaneous power with time for the case of a 14 droplet system with the same conditions as (a). (c) Experimental set-up for enhanced power generation. Three different LEDs are connected in parallel. (d) LEDs are lit up using 24 bridges for a sinusoidal input with $f=30$ Hz. Total volume of droplets is about 1 ml. Scale bar, 5 mm. The threshold voltage of the red, green, and blue LED is 1.8 V, 3 V, and 3.2 V, respectively.^[12]

를 늘이는 것이다. 많은 수의 liquid bridge를 두 전극판 사이에 만들면 축전기들은 병렬로 연결된 상태가 된다. 따라서 각각의 물방울에서 생산된 전류는 하나의 저항에서 합쳐져 전체적으로 전력을 증가시키게 된다. 그림 7a는 물방울 개수가 증가함에 따라 전력이 증가하는 것을 나타낸다. 이때 진동기의 진동수 $f=30$ Hz, 진폭 $L=0.6$ mm로 고정시켰다. 물방울 개수가 많아짐에 따라 각 EDLC의 전위차에 의해 유도된 전류는 부하저항 R 을 따라 흐르게 되어 있으므로 측정되는 전압은 각 EDLC의 전류가 일정하다면 물방울 개수에 선형적으로 증가하게 된다. 따라서 전력은 그림 7a의 실선처럼 물방울 개수에 따라 2차 함수 꼴로 증가하리라 예상할 수 있다. 하지만 실제 측정된 데이터는 물방울 개수가 17개 이하는 2차 함수를 잘 따르나 17개 이상이 되면 전력값의 증가 폭이 감소함을 보이고 있다. 이러한 현상은 실험에서 만드는 liquid bridge의 크기와 모양이 똑같지 않기 때문이다. 따라서 진동을 할 때 위 접촉면적의 변화가 서로 동기화되지 않고 조금씩 어긋나면서 각 EDLC에서 유도된 전류는 일정하지 않게 되어 예상했던 전력 증가 폭보다 감소하게 된다고 생각한다. 그림 7b는 물방울의 개수가 14개일 때 시간에 따른 V_L 과 순간적인 전력을 나타낸 그래프이다. V_L 의 peak-to-peak 크기는 약 8 V 정도 되고 순간적인 전력은 약 3 μ W까지 되는 것을 볼 수 있다. 따라서 이 정도의 전압과 전력이라면 실용성이 있다고

여겨진다. 그림 7c는 저항을 대신해 다른 종류의 LED 3개를 병렬 연결한 개요도이다. 두 전극판 사이에 다른 어떠한 전기 소자도 쓰지 않고 직접 LED를 연결시켜 작동을 시켜 보았다. 빨간색 LED는 1.8 V, 녹색 LED는 3 V, 파란색 LED는 3.2 V의 문턱 전압 값을 가지고 있다. 따라서 두 전극판 사이의 전위차가 3.2 V 이상이 되고 (peak to peak 전압은 6.4 V 이상) 전류가 충분히 흘러야지만 3개의 LED에 불이 들어오게 된다. 이미 그림 7b에서 본 것과 같이 V_L 전압은 약 8 V 정도가 되기 때문에 LED 문턱 전압을 충분히 넘는 것을 볼 수 있고 순간 전력도 충분하다는 것을 볼 수 있다. 따라서 그림 7c와 같이 실험 장치를 구성한 다음 충분한 전력을 공급하기 위해 물방울 24개를 두 전극판 사이에 위치시켰다. 물방울 하나의 부피가 40 μ l이기 때문에 물방울의 전체 부피는 약 1 ml 정도가 된다. 진동수 f 를 30 Hz로 고정시킨 다음 진동 진폭 L 을 증가시키면 두 전극판 사이의 전위차는 증가하게 된다. 그림 7d에서 보듯이 두 전극판 사이의 전위차가 3.6 V 이하에서는 LED에 불이 들어오지 않다가 3.6 V가 넘어가는 순간 빨간색 LED에 불이 들어오기 시작한다. 그리고 전위차가 더 증가하면 빨간색 LED의 밝기(intensity)가 점점 증가함을 볼 수 있다. 그리고 전위차가 6 V 이상이 되는 순간 녹색 LED에 불이 들어오기 시작하고 6.4 V 이상이 되는 순간 파란색 LED에 불이 들어오기 시작한다. 점점 진동 진폭을 크게 하여 전위차를 증가시켜 나가면 결국 세 가지 색깔의 LED가 밝게 켜지는 것을 볼 수 있다.

끝마치며...

주위에 쉽게 버려지는 에너지를 전기에너지로 바꾸는 ‘에너지 수확기술(Energy Harvesting)’이 최근 큰 주목을 받고 있다. 예를 들어 태양광, 공장의 폐열, 생활 속 진동 등 주위의 다양한 에너지를 전기에너지로 변환하는 기술이 개발되어지고 있다. 본 연구는 압전 효과에서 전기-기계적 에너지가 상호 변환되는 것과 유사하게 전극 사이에 있는 물방울의 물리적인 변화에 의한 역학적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 것을 이론적, 실험적으로 규명하였다. 이 연구에서 제안하는 기술은 물방울을 이용해 교류전력을 생산할 수 있는 새로운 패러다임의 에너지 수확기술로서 기술적인 면이 보장된다면 휴대용 소형 전자기기에서 새로운 형태의 친환경적 에너지 대체원으로 활용이 가능하다. 특히 휴대폰, 손목전자시계, MP3, 태블릿 PC 등에 배터리를 대신하거나 혹은 보조 장치로 활용 가능하며 적은 전력이 필요한 새로운 디자인의 소형전자기기 발전에 기여할 것으로 예상된다.