



## 전기 이중층의 역학적 변조를 이용한 진동 에너지 하베스팅

문종균, 박혁규\*

(UNIST 물리학과)

### 1. 역 일렉트로웨팅

전기로 물방울(droplet)의 표면 장력을 제어하는 일렉트로웨팅(electrowetting) 현상을 1870년 가브리엘 리프만(Gabriel Lippmann, 1845~1921)에 의해 처음 발견한 이후 1백년간 이 기술은 1 V 이하의 낮은 전압에서만 일어났기 때문에 별다른 진전을 이루지 못하다가 1990년 브루노 버지(Bruno Berge) 박사에 의해 높은 전압으로도 표면장력을 제어할 수 있는 일렉트로웨팅 현상이 발견됐다. 물에 전기를 통하면 표면장력이 변하는 이유는 그림 1에 나타낸바와 같이 물 분자 자체가 극성(+, -)을 갖고 있기 때문이다. 물 분자는 산소원자 하나와 수소원자 두 개로 구성돼 있는데, 수소원자가 104.5°의 각도를 이루며 붙어 있기 때문에 (+)인 쪽과 (-)인 쪽이 생긴다. 이 극성 때문에 전기가 흐르는 금속에는 더 끌리는 힘이 생겨 물과 바닥면 사이의 표면장력이 높아지는 것이다. 이때 그 사이에 얇은 절연체가 있으면 전기장의 영향은 받지만 전자를 주고받을 수 없어 분해되지 않고 높은 전압에서도 표면장력을 제어하는 것이 가능해진 것이다. 비록 일렉트로웨팅 현상에 대해 아직 정확한 이론적 정립이 이루어지지 않았지만 액체렌즈, 전자종이, 랩온어칩(lab on a chip) 등에 응용되고 있으며 최근에는 압전 효과(piezoelectric effect)와 같이 역으로 물방울에 기계

적 변형을 가했을 때 기전력이 발생하는 역 일렉트로웨팅 현상을 이용한 전력 생산에 관한 연구가 시작되었다. 그림 2에 나타낸바와 같이 이 물리적 현상을 이용하면 진동과 같은 반복적인 기계적 구동에 의해 전력 생산이 가능해진다.<sup>(2)</sup>

### 2. 전기 이중층의 역학적 변조

물과 같은 극성 매질과 고체의 표면이 접촉하면 보통 전하를 띤다. 이러한 전하들은 고체 표면 성분의 이온화, 매질 속 이온들의 표면 흡착, 또는 이온 용해 등과 같은 여러 과정에서 기인한다. 어떤 물질이 표면에 전하를 띤다는 것은 물질 내에서는 중성을 유지하고 있던 양이온과 음이온이 표면에서 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 그림 3처럼 전극의 표면 주위에는 표면 전하(surface charge)와 인력이 작용하는 반대 이온(counter ions)들로 이루어진 전기이중층(electric double layer)을 형성하게 된다.<sup>(1,2)</sup> 이러한 전기이중층은 기하학적인 구조와 전하분포의 대칭성으로 전기 이중층 축전기(electrical double layer capacitor; EDLC)라고도 한다.<sup>(4,5)</sup>

\* E-mail : hkpak@unist.ac.kr

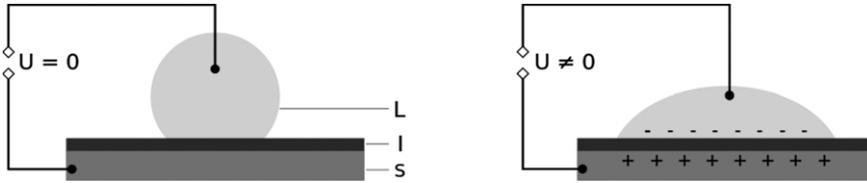


그림 1 일렉트로웨팅 현상<sup>(1)</sup>. 절연체를 사이에 둔 전도성 액체와 기판에 발생한 전압이 전도성 액체의 표면장력을 제어한다 (L: 전도성 액체, I: 소수성 절연층, S:기판).

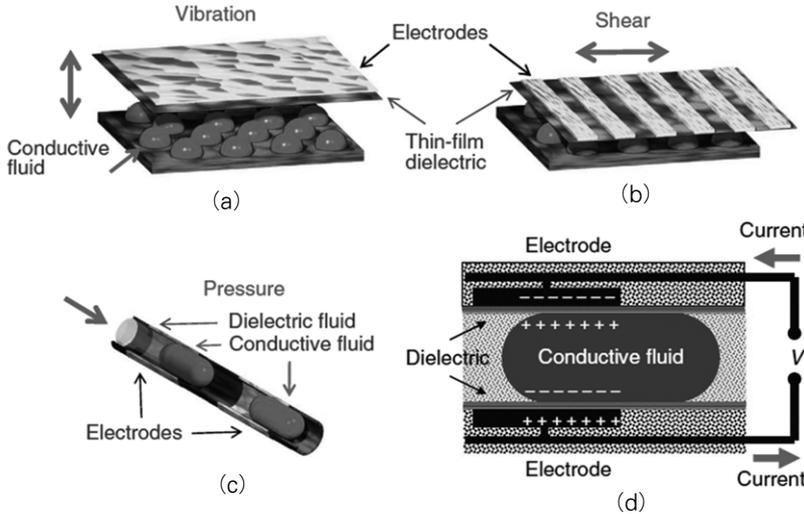


그림 2 역 일렉트로웨팅(reverse electro-wetting) 현상을 이용한 진동 에너지 하베스팅<sup>(2)</sup>

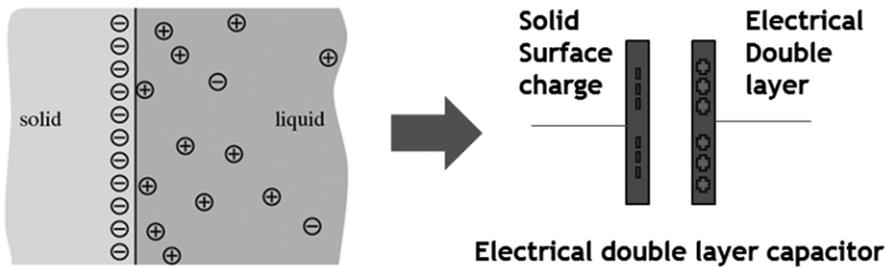


그림 3 전기 이중층 축전기

만약 두 전극판 사이에 liquid bridge 형태로 물방울이 존재하면 두 전극의 각 표면에는 전기가 이중층이 생기면서 직렬로 연결된 두개의 축전기 역할을 한다. 효율적인 전력 생산을 위해 아래에는 일반적인 ITO 전극판을 위치시키고 위쪽 전극판에는 poly tetra fluoro ethylene(PTFE)로 표면 처리한 ITO 전극판을 위치시켰다. PTFE는 소수성 성질을 가지고 있어서 물방울은 젖음(wetting)이 잘 되지 않기 때문에 아래 전극판의 진동에 따라 위쪽 전극판과 liquid bridge가 만드는 접촉 면

적이 많이 변하게 된다. 반면에 아래 ITO 전극판은 친수성 성질과 pinning effect에 의해 젖음 현상이 유지되면서 접촉 면적은 변하지 않게 된다<sup>(6)</sup>. 따라서 그림 4(a)처럼 아래 전극판을 진동시킨다면 그림 4(b)처럼 위쪽 전극표면의 소수성 성질 때문에 접촉면적이 시간에 따라 바뀌게 된다. 만약 그림 4(c)처럼 아무런 움직임이 없으면 직렬로 연결된 두 축전기 사이에 아무런 변화가 없기 때문에 전류가 흐르지 않는다. 하지만 그림 4(d)처럼 움직임이 있으면 접촉 면적 변화에 따라 위

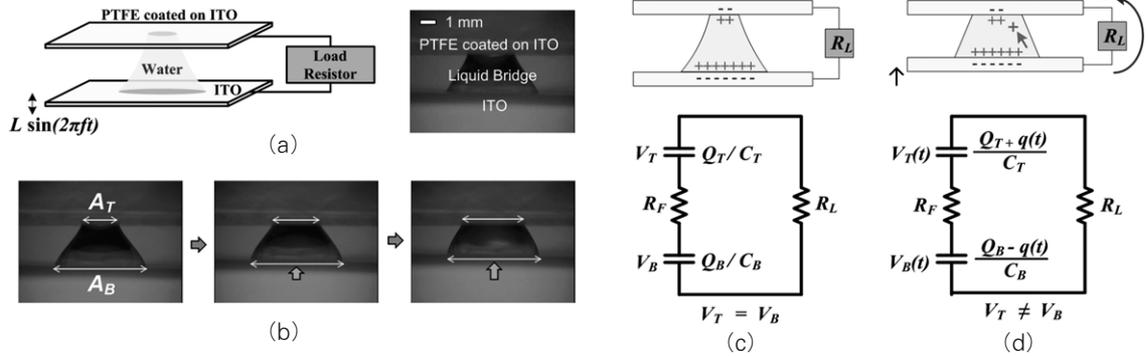


그림 4 전기이중층의 역학적 변조를 이용한 진동 에너지 하베스팅<sup>9)</sup>

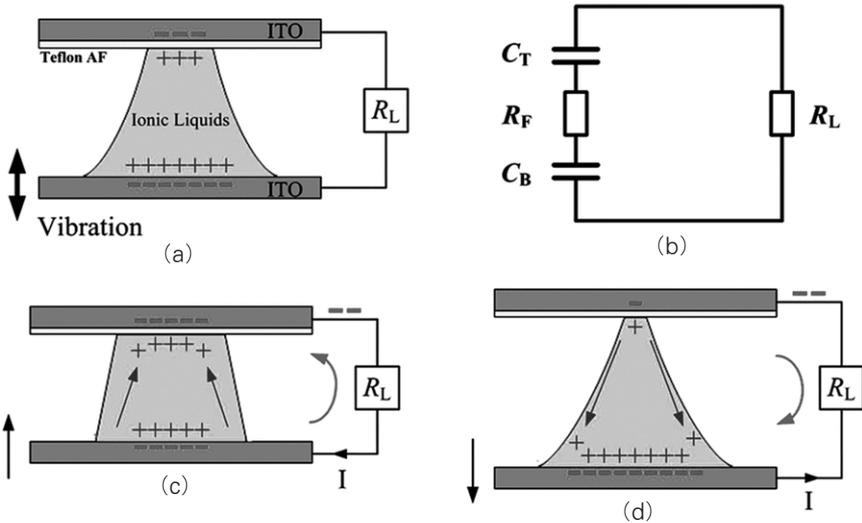


그림 5 Ionic 액체를 이용한 진동 에너지 하베스터<sup>9)</sup>

쪽 전기 이중층 축전기의 축전용량  $C_T$ 이 바뀌게 된다. 그러면 직렬로 연결된 두 축전기 사이에 전위차가 생기게 되어 전류가 흐르게 된다. 이러한 원리로 일정한 주기로 진동시키면 전기이중층 축전기의 축전용량이 일정한 주기로 바뀌게 되고 전위차 역시 일정한 주기로 바뀌게 되어 진동 주기와 일치하는 AC 전압을 생산할 수 있게 된다. 이때 그림 5와 같이 물을 사용하지 않고 이온 액체(ionic liquid)를 사용하여 성능을 개선하고자 하는 연구도 시도되고 있다.

### 3. 에너지 하베스팅 성능 실험

각 EDLC의 축전용량을 구하기 위해 위쪽 접촉

면적  $A_T$  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.

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

$$C_B \cong \frac{\epsilon_0 \epsilon_p}{\lambda_D} A_B$$

여기서  $d$ 는 위쪽 ITO판에 코팅된 유전물질의 두께이고  $\lambda_D$ 는 전기이중층의 두께,  $\epsilon_p$ 와  $\epsilon_d$ 는 각각 PTFE 및 물의 유전상수이다. 이 연구에서는  $d/\epsilon_p \gg \lambda_D/\epsilon_d$ 이기 때문에  $C_T$ 에 대한 근사를 사용할 수 있다<sup>(7,8)</sup>.

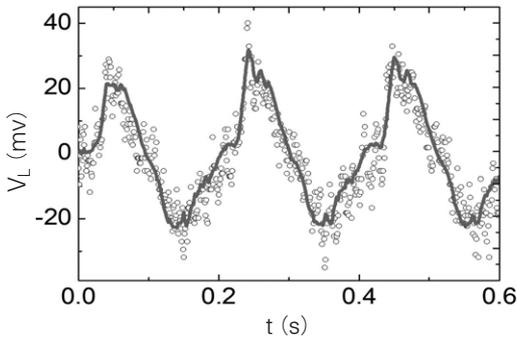


그림 6 시간에 따른 부하 저항  $R_L$ 에 걸리는 전압  $V_L$ 를 측정 한 결과. 원은 실험 결과 값이고, 선은 수치해석 결과를 나타낸다. 물방울의 부피는  $40 \mu\text{l}$ , 진동진폭은  $0.5 \text{ mm}$ , 부하저항은  $10 \text{ M}\Omega$ ,  $5 \text{ Hz}$  주기의 사인 함수 형태로 진동하고 있을 때 결과이다.<sup>(9)</sup>

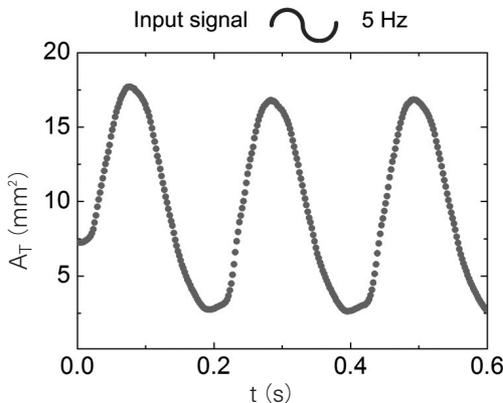


그림 7 고속카메라를 이용해 물방울과 위쪽 고체 표면사이의 시간에 따른 접촉면적 변화  $A_T(t)$ 를 측정한 결과<sup>(9)</sup>

이 연구에서는 전극판이 진동하는 동안 시간에 따라 변하는  $V_L$ 을 오실로스코프를 이용해 측정하였고 고속카메라를 이용해 위쪽 전극판과 물방울 사이의 접촉면적 변화  $A_T$ 를 측정하였다. 그림 6은 시간에 따라  $V_L$  값을 측정 한 실험 결과와 수치해석 결과이다. RC 회로로 간략하게 시스템을 표현했음에도 불구하고 실험 결과 값이랑 정확하게 일치함을 볼 수 있다. 그림 7은 고속카메라를 이용해 촬영하고 이미지 분석을 통해 구한 시간에 따른 물방울과 전극표면의 접촉면적  $A_T$  값들이다. 결과를 종합해보면 진동수, 부하저항, 진동진폭이 커질수록  $V_L$  값이 커짐을 알 수 있다.

한 개의 물방울에서 발생하는 전력은 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. 전력을 높이기 위해 물방울의 부피를 더 크게 하여 접촉면적의 변화량을 더 크게 할 수 있지만 부피가 커질수록 중력에 의한 효과가 커지게 되어서 접촉면적 변화량의 증가가 둔화 된다. 또한 큰 진폭으로 진동 시킬 경우 중력 효과에 의해 물방울이 위쪽 전극판에서 떨어져 liquid bridge를 형성하지 못하게 되어 전력을 증가시키는 효율은 떨어진다<sup>(6)</sup>.

이에 대한 해결 방법으로는 균일한 크기의 작은 물방울들을 두 전극판 사이에 나란히 위치시키는 것이다. 많은 수의 liquid bridge를 두 전극판 사이에 만들면 전기이중층 축전기들은 병렬로 연결된 상태가 된다. 따라서 각각의 작은 물방울에서 생산된 전류는 하나로 합쳐져 합성 전류를 증가시켜 전체적으로 전력을 증가 시키게 된다. 그림 8(a)는 물방울 개수가 증가함에 따라 전력이 증가 하는 것을 나타낸다. 이때 진동기의 진동수  $f = 30 \text{ Hz}$ , 진폭  $L = 0.6 \text{ mm}$ 로 고정시켰다. 물방울 개수가 많아짐에 따라 각 EDLC의 전위차에 의해 유도된 전류는 부하저항  $R$ 를 따라 흐르게 되어 있으므로 측정되는 전압은 각 EDLC의 전류가 일정하다면 물방울 개수에 선형적으로 증가하게 된다. 따라서 전력은 그림 8(a)의 실선처럼 물방울 개수에 따라 2차 함수 꼴로 증가하리라 예상할 수 있다. 하지만 실제 측정된 데이터는 물방울 개수가 17개 이하의 2차 함수를 잘 따르나 17개 이상이 되면 전력 값의 증가 폭이 감소함을 보이고 있다. 이러한 현상은 실험에서 만드는 liquid bridge의 크기와 모양이 똑같이 안기 때문이다. 따라서 진동을 할 때 위 접촉면적의 변화가 서로 동기화 되지 않고 조금씩 어긋나면서 각 EDLC에서 유도된 전류는 일정하지 않게 되어 예상했던 전력 증가 폭보다 감소하게 된다고 생각한다. 그림 8(b)는 물방울의 개수가 14개일 때 시간에 따른  $V_L$ 과 순간적인 전력을 나타낸 그래

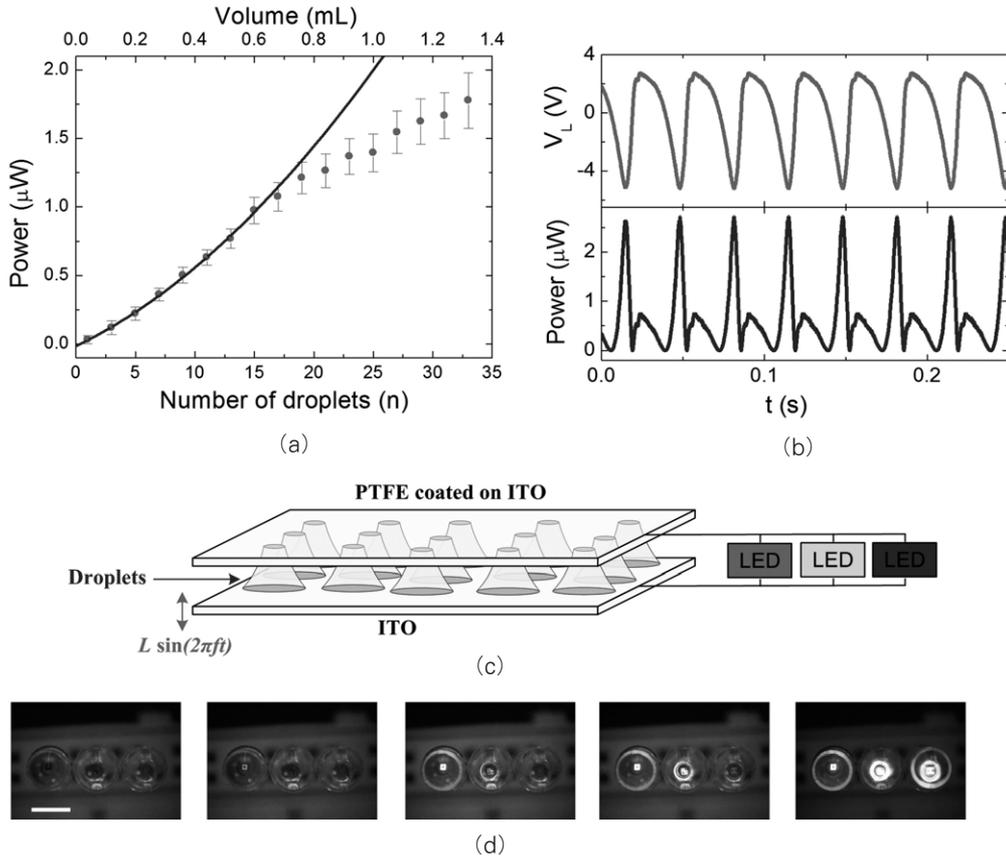


그림 8 다수의 물방울(droplet)을 이용한 전력 생산 결과

프이다.  $V_L$ 의 peak-to-peak 크기는 약 8 V 정도 되고 순간적인 전력은 약  $3 \mu\text{W}$ 까지 되는 것을 볼 수 있다. 따라서 이 정도의 전압과 전력이라면 실용성이 있다고 여겨진다. 그림 8(c)는 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 8(b)에서 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 8(c)와 같이 실험

장치를 구성한 다음 충분한 전력을 공급하기 위해 물방울 24개를 두 전극판 사이에 위치 시켰다. 물방울 하나의 부피가  $40 \mu\text{l}$ 이기 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 8(d)에서 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 밝

게 커지는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 맺음말

‘에너지 수확기술(energy harvesting)’이란 주위에 쉽게 버려지는 에너지를 전기에너지로 바꾸는 기술을 이야기한다. 예를 들어 마찰에 의한 에너지, 태양 에너지, 풍력 에너지, 공장의 폐열에너지, 생활 속 진동 에너지 등 주위에는 많은 에너지들이 알게 모르게 버려진다. 이러한 다양한 에너지를 전기에너지로 변환하는 기술이 최근 활발하게 개발되어지고 있다. 이 연구 역시 주위의 진동에너지를 전기적 에너지로 바꾸기 위해 소수성 표면의 전극과 물방울 사이의 접촉면적 변화를 이용하여 교류 전력을 생산 할 수 있었다. 좀 더 기술적인 면이 보강 된다면 새로운 형태의 친환경적 에너지 대체원으로 활용이 가능하다. 특히 일상 생활에서 흔히 쓰이는 휴대폰, 손목시계, MP3, 태블릿 PC 등에 배터리를 대신하거나 혹은 보조 배터리 장치로 활용 가능하며 적은 전력이 필요한 새로운 디자인의 소형전자기기 발전에 기여할 것으로 예상된다. [KSNVE](#)

#### 참고문헌

- (1) <https://en.wikipedia.org>
- (2) Bard, A. J. et al., 2001, Electrochemical

Methods: Fundamentals and Applications.

- (3) Israelachvili, J. N., 1992, Intermolecular and Surface Forces.
- (4) <http://electrochem.cwru.edu/encycl/art-c03-elchem-cap.htm>
- (5) Simon, P. et al., 2008, Nat. Mater., Vol. 7, pp. 845~854.
- (6) Sharma, P. et al., 2010, Energy Convers. Manage., Vol. 51, pp. 2901~2912.
- (7) de Gennes, P. G., 1985, Rev. Mod. Phys., Vol. 57, pp. 827~863.
- (8) Bazant, M. Z. et al. 2004, Phys. Rev. E, Vol. 70, pp. 021506.
- (9) Klarman, D. et al., 2011, Langmuir, Vol. 27, pp. 6031~6041.
- (10) Krupenkin, T. et al., 2012, Reverse Electrowetting as a New Approach to High-power Energy Harvesting, Nature Communications 2, Article Number 448.
- (11) Moon, J. K. et al., 2013, Electrical Power Generation by Mechanically Modulating Electrical Double Layers, Nature Communications 4, Article Number 1487.
- (12) Kong, W. et al., 2014, Ionic Liquid based Vibrational Energy Harvester by Periodically Squeezing the Liquid Bridge, RSC Adv., pp. 19356~19361.