

제 5 장 Triboelectric 에너지 하베스팅

기존의 화석 연료의 고갈과 환경 오염 문제로 인하여, 전 세계적으로 지속 가능한 친환경 에너지의 확보가 중요한 문제로 떠오르고 있으며, 미래 산업 발전에 큰 영향을 끼칠 것으로 보고 있다. 한편 이런 문제의 해결책으로, 우리의 주변 환경에 존재하는 빛, 열, 기계적 (바람, 파도, 음파, 미세진동 등), 전자기, 화학, 그리고 바이오 등과 같은 다양한 형태의 에너지원에서 에너지를 수확하는 에너지 하베스팅이 떠오르고 있다. 특히 이 중에서도 마찰전기 현상을 활용한 'Triboelectric 에너지 하베스팅'이 최근 들어 큰 주목을 받고 있다. Triboelectric 에너지 하베스팅은 주변에서 흔히 볼 수 있는 마찰·정전기 현상을 에너지원으로 삼아 전기 에너지를 수확하는 개념의 차세대 친환경 에너지 발전 소자로, 필요한 전원을 배터리나 외부 전원 없이 반영구적으로 공급할 수 있는 자가 충전 (self-powering)이 가능한 웨어러블 전자기기나 센서 네트워크, 생체 이식형 소자 등을 구동할 수 있는 에너지원으로 많은 연구가 진행되고 있다.

1. Triboelectric effect

정전기는 일반적으로 서로 다른 물질의 접촉면에서 발생하게 되며, 고체 상호 간에서만뿐만 아니라 고체와 액체 간, 액체 상호 간, 액체와 기체 간에서도 발생한다. 정전기 현상의 발견에 대한 기록은 고대 그리스의 철학자 탈레스가 호박을 양피에 마찰해 정전기를 발생시킨 것이 시초였으며, 이러한 정전기 현상은 고분자 물질을 많이 취급하는 우리 생활 주변에서 빈번히 발생 될 뿐만 아니라 자연 현상에서도 많이 볼 수 있는데 그 대표적인 예는 구름에 의한 번개 낙뢰현상 이다. 하지만 이러한 정전기 현상은 실상 생활이나 산업 현장에서 장애적인 요소로 여겨 이를 억제하는 방향으로 연구가 진행되어 왔다. 정전기가 일어날 때 대전물체 주위에는 정전계가 형성하게 되고 이 정전계의 강도는 물체의 대전량에 비례하지만 이것이 점점 커지게 되어 결국, 공기의 절연 파괴 강도 (약 30 KV/cm)에 도달하게 되면 공기의 절연 파괴 현상, 즉 방전이 일어나게 되는 것이다. 따라서 이 방전현상에 의한 결과로 가연성 물질이 연소되어 일어나는 현상이 폭발, 화재 이고 또 다른 자연재해로는 전격이 있다.

우리가 흔히 정전기라고 느끼는 것은 대전된 인체에서 도체로 또는 대전물체에서 인체로

방전되는 현상에 의해 인체 내로 전류가 흘러 나타나는 현상이다. 이와 같은 이유로 인해 triboelectric으로 발생된 전하는 지금까지는 부정적인 효과를 나타낸다는 과학적 연구나 기술적인 응용분야에서 언급되어왔다. 그러나, 2012년 조지아 공대의 Zhong Lin Wang 그룹에서는 triboelectric의 특성을 이용하여 효과적인 방법으로 소자를 제작하여 triboelectric으로 발생한 전하를 이용한 triboelectric nanogenerator를 보고 하였다.

2. Triboelectric mechanism

2.1 마찰전기(triboelectricity)와 정전기(static electricity)

플라스틱 책받침을 헝겊으로 문지르면 마찰로 에너지를 받아, 헝겊이란 물질 안에서 원자를 구성하고 있던 전자는 궤도에서 벗어나 플라스틱을 구성하고 있는 원자쪽으로 이동하게 된다. 전자는 마이너스 전기를 가지고 있으므로 결과적으로 플라스틱 책받침 전체는 마이너스 전기를 가지게 된다. 한편 전자를 잃은 헝겊은 마이너스 전기가 없어져 버렸기 때문에, 전기적으로 플러스 성질을 갖게된다. 마이너스 전기와 플러스 전기는 서로 끌어당기는 성질이 있기 때문에, 마이너스 전기의 책받침과 플러스 전기의 헝겊은 붙어 버리게 되는 것이다. 그렇다면 반대로 서로 같은 종류의 전기끼리는 어떻게 될까? 말할 필요도 없이 서로 반발하여 밀어내게 된다. 그러나 이렇게 발생한 전기는 언제까지나 지속력을 갖는 것은 아니다. 점점 전기가 도망해 버리기 때문이다. 따라서 전자의 증감에 의해서 불안정하게 되어 있던 원자는 전자가 도로 이동하여 옴에 따라 다시 원래의 상태로 되돌아가게 된다. 이와 같이 마찰전기는 두 물질 사이에서 발생한 마찰 에너지에 의해서 생기는 현상이다. 즉 어느 한 쪽 물질의 전자가 다른쪽 물질로 이동함으로써 전기가 생기게 되는 것이다. 물론 이때 어느 쪽의 전자가 어느 쪽으로 이동하느냐는 두 물질의 성질에 따라 다르다. 물체가 전자를 얻거나 잃었을 때, 이 물체는 전기를 띠고 있다. 또는 대전(帶電)되었다고 하며, 대전된 물체를 대전체(帶電體)라고 한다.

겨울철에는 왜 정전기가 자주 발생할까?

꺼입던 옷을 벗을 때나 문을 열기 위해 손잡이를 잡는 순간 손이 따끔거리는 것을 우리는 느껴본 적이 있을 것이다. 혹은 옷이 몸에 착 달라붙어 떨어지지 않거나 머리를 빗자 머리가 사방으로 솟구쳐 오르는 등의 경험은 누구나 한번쯤은 겪어봤을 것이다. 이와 같

은 현상을 정전기 현상이라고 한다. 정전기란 발생한 전기가 한 물체에서 금방 다른 물체로 이동하지 않고 머물러 있기 때문에 붙여진 이름이다. 대부분의 정전기는 물체가 서로 마찰할 때 생기기 때문에 마찰전기라고도 부른다. 정전기가 발생하는 원인 일반적으로 물체는 같은 양의 양(+전하)와 음(-전하)을 가지고 있어 전기적으로는 중성이다. 하지만 두 물체가 서로 접촉하거나 분리하게 되면 그 경계면에서 전하의 이동이 생겨서 각각 물체에 같은 양의 과잉 양전하와 과잉 음전하, 즉 정전기가 발생하게 되는 것이다. 정전기는 이러한 접촉분리에 의한 것 이외에도 태양광선 중의 자외선, 높은 주파수, 고전압, 방사선에 의해 공기분자가 절연파괴를 일으키면서 이온화 하여 주위 환경을 (+)이온이나 (-)이온을 과다하게 발생시킴으로써 균형을 파괴하여 정전기를 발생시키기도 한다. 정전기는 고체뿐만 아니라 액체나 기체인 모든 물체에 관계되어 있는데, 두 물체의 마찰, 박리, 파괴, 충돌, 액체의 유동, 기체의 분출 등 발생원인이 되는 물질 상태는 틀리나 발생 원리는 똑같다.



그림 1. 정전기 발생의 대표적인 예

정전기는 언제 잘 일어날까요?

정전기 현상은 건조한 날에 특히 잘 일어난다. 이는 물의 전기친화성에서 그 이유를 찾을 수 있다. 습한 날에는 공기 중의 수증기가 전기를 흡수하기 때문에 정전기 현상이 일어나지 않는다. 또한 건성 피부인 사람이 정전기 현상을 더 크게 느끼게 되는데 이는 그 사람의 손에 정전기 유도현상이 일어났기 때문이다. 예를 들어, 어떤 물체가 (-)로 대전되어 있다면, 사람의 손에 있는 전자들이 척력에 의해 밀려서 (+)극을 띠게 되므로 전압이 생긴다. 그리고 합성섬유로 만든 치마가 자꾸 몸에 붙는 현상 역시 마찰에 의해 양쪽에

반대 전하가 생기고, 그 인력 때문에 생기는 현상이다. 또한 겨울철에 머리를 빗고 나면 머리카락이 사방으로 솟구쳐 오르는 것 역시 머리카락이 같은 전하로 대전되어 척력이 작용했기 때문이다. 정전기는 높은 전압을 가지고 있기 때문에, 컴퓨터의 주요 부품을 훼손하기도 하고, 가스나 휘발유가 있는 곳에 정전기 불꽃이 튀면 불이 나기도 한다.

정전기 발생을 막으려면?

정전기가 생기지 않게 하려면 (+)와 (-)로 대전되는 물체 사이를 전기가 잘 통하는 도선으로 연결해 주면 된다. 매우 가는 도선을 섬유와 함께 섞어 옷감을 짜거나 옷에 얇은 금속 막을 입히면 옷에 정전기가 생기는 것을 막을 수 있다. 예를 들어 유조차가 쇠사슬을 땅에 끌고 다니는 것도 차와 땅 사이를 도선으로 연결해 정전기가 생기지 않도록 하기 위함이다.

2.2. Triboelectric series

서로 다른 triboelectric 특성을 가지는 두 개의 물질을 이용하여 기계적 운동에너지를 인가하면 표면에서 마찰이 발생하게 된다. 물질을 이루는 원자는 (+)전기를 띤 원자핵과 (-)전기를 띤 전자로 되어 있다. 어떤 원자가 전자를 잃으면 (+)전기를, 반대로 전자를 얻으면 (-)전기를 띠게 된다. 보통 때는 전기적으로 중성인 물체도 서로 마찰시키면 한쪽 물질의 전자가 다른 물질로 이동하기 때문에 두 물질은 각각 (+) 또는 (-) 전기를 띠게 된다. 여기서 전자를 잃기 쉬운 물질 또는 얻기 쉬운 물질에 따라 순서로 짝 나열한 것을 "Triboelectric series, 대전열"이라 한다.

따라서 이 대전열만 알면 두 물질을 문지를 때 어느 쪽이 (+)가 될지 어느 쪽이 (-)가 될지 미리 판단 할 수 있다. 대전열이 크다는 것은 전자를 잃어버리기 쉽다는 의미이며, 즉, (+)로 대전되기 쉽다는 뜻이다. 초등학교 교과서에도 나오는 대전열을 살펴보면 아래와 같다.

털가죽 > 상아 > 유리 > 명주 > 나무 > 고무 > 플라스틱 > 유황 > 에보나이트

좀 더 상세한 대전열을 그림 2에 나타내었다.

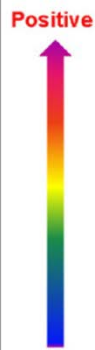

 Positive	Polyformaldehyde 1.3-1.4	(continued)	 Negative
	Etylcellulose	Polyester (Dacron)	
	Polyamide 11	Polyisobutylene	
	Polyamide 6-6	Polyuretane flexible sponge	
	Melanime formol	Polyethylene Terephthalate	
	Wool, knitted	Polyvinyl butyral	
	Silk, woven	Polychlorobutadiene	
	Aluminum	Natural rubber	
	paper	Polyacrylonitrile	
	Cotton, woven	Acrylonitrile-vinyl chloride	
	Steel	Polybisphenol carbonate	
	Wood	Polychloroether	
	Hard rubber	Polyvinylidene chloride (Saran)	
	Nickel, copper	Polystyrene	
	Sulfur	Polyethylene	
	Brass, silver	Polypropylene	
	Acetate, Rayon	Polyimide (Kapton)	
	Polymethyl methacrylate (Lucite)	Polyvinyl Chloride (PVC)	
	Polyvinyl alcohol	Polydimethylsiloxane (PDMS)	
	(continued)	Polytetrafluoroethylene (Teflon)	

그림 2. Triboelectric series

서로 다른 두 물질을 마찰시키면 대부분 마찰전기가 발생하지만, 에너지 하베스팅 관점에서 봤을 때, 동일한 기계적 에너지에서 보다 많은 전기를 생산할 수 있는 소재의 발굴 및 조합이 매우 중요한 요소 중에 하나이다. 따라서 최근에는 그림 2와 같이 다양한 소재의 마찰전기력을 정량적으로 측정하여 제작된 Triboelectric series도 보고되고 있다.

<https://www.trifield.com/content/tribo-electric-series/>

예를 들어, 그림 2의 결과를 살펴보면, 동일한 (-) 극성을 띄는 소재라 할지라도 PET 기판의 경우 -40 nC/J 정도의 전자 친화도를 가지는 반면, Teflon의 경우 -190 nC/J을 가지기 때문에 마찰전기 나노발전기 소자 제작 시 큰 차이를 일으키게 된다.

Polyurethane foam	+60	+N	All materials are good insulators (>1000 T ohm cm) unless noted.
Sorbothane	+58	-W	Slightly conductive. (120 G ohm cm).
Box sealing tape (BOPP)	+55	+W	Non-sticky side. Becomes more negative if sanded down to the BOPP film.
Hair, oily skin	+45	+N	Skin is conductive. Cannot be charged by metal rubbing.
Solid polyurethane, filled	+40	+N	Slightly conductive. (8 T ohm cm).
Magnesium fluoride (MgF2)	+35	+N	Anti-reflective optical coating.
Nylon, dry skin	+30	+N	Skin is conductive. Cannot be charged by metal rubbing.
Machine oil	+29	+N	
Nylatron (nylon filled with MoS ₂)	+28	+N	
Glass (soda)	+25	+N	Slightly conductive. (Depends on humidity).
Paper (uncoated copy)	+10	-W	Most papers & cardboard have similar affinity. Slightly conductive.
Wood (pine)	+7	-W	
GE brand Silicone II (hardens in air)	+6	+N	More positive than the other silicone chemistry (see below).
Cotton	+5	+N	Slightly conductive. (Depends on humidity).
Nitrile rubber	+3	-W	
Wool	0	-W	
Polycarbonate	-5	-W	
ABS	-5	-N	
Acrylic (polymethyl methacrylate) and adhesive side of clear carton-sealing and office tape	-10	-N	Several clear tape adhesives are have an affinity almost identical to acrylic, even though various compositions are listed.
Epoxy (circuit board)	-32	-N	
Styrene-butadiene rubber (SBR, Buna S)	-35	-N	Sometimes inaccurately called "neoprene" (see below).
Solvent-based spray paints	-38	-N	May vary.
PET (mylar) cloth	-40	-W	
PET (mylar) solid	-40	+W	
EVA rubber for gaskets, filled	-55	-N	Slightly conductive. (10 T ohm cm). Filled rubber will usually conduct.
Gum rubber	-60	-N	Barely conductive. (500 T ohm cm).
Hot melt glue	-62	-N	
Polystyrene	-70	-N	
Polyimide	-70	-N	
Silicones (air harden & thermoset, but <i>not</i> GE)	-72	-N	
Vinyl: flexible (clear tubing)	-75	-N	
Carton-sealing tape (BOPP), sanded down	-85	-N	Raw surface is very + (see above), but close to PP when sanded.
Olefins (alkenes): LDPE, HDPE, PP	-90	-N	UHMWPE is below. Against metals, PP is more neg than PE.
Cellulose nitrate	-93	-N	
Office tape backing (vinyl copolymer ?)	-95	-N	
UHMWPE	-95	-N	
Neoprene (polychloroprene, <i>not</i> SBR)	-98	-N	Slightly conductive if filled (1.5 T ohm cm).
PVC (rigid vinyl)	-100	-N	
Latex (natural) rubber	-105	-N	
Viton, filled	-117	-N	Slightly conductive. (40 T ohm cm).
Epichlorohydrin rubber, filled	-118	-N	Slightly conductive. (250 G ohm cm).
Santoprene rubber	-120	-N	
Hypalon rubber, filled	-130	-N	Slightly conductive. (30 T ohm cm).
Butyl rubber, filled	-135	-N	Conductive. (900 M ohm cm). Test was done fast.
EDPM rubber, filled	-140	-N	Slightly conductive. (40 T ohm cm).
Teflon	-190	-N	Surface is fluorine atoms-- very electronegative.

그림 3. Quantized Triboelectric series,

Col 1: Insulator Name, Col 2: Charge affinity (nC/J), Col 3: Charge acquired if rubbed with metal (W=weak, N=normal, or consistent with the affinity), Col 4: Notes.

두 물질 간에 서로 다른 triboelectric series에 따라 표면 전하가 발생하게 되며 같은 양이지만 서로 다른 반대의 (+), (-) 전하가 생성되며 정전기가 형성된다. 생성된 서로 반대의 전하가 layer나 물질 간의 접점에 존재하게 되어 triboelectric potential을 가지게 되며,

외부의 응력이 제거 되었을 때, 그림 4와 같이 전자가 외부 회로로 흐르게 함으로서 전류의 이동이 가능해지는 것이다. 전류의 흐름, 즉 전기를 의미하며, 접촉할 때와 떨어질 때 한번씩 서로 다른 방향

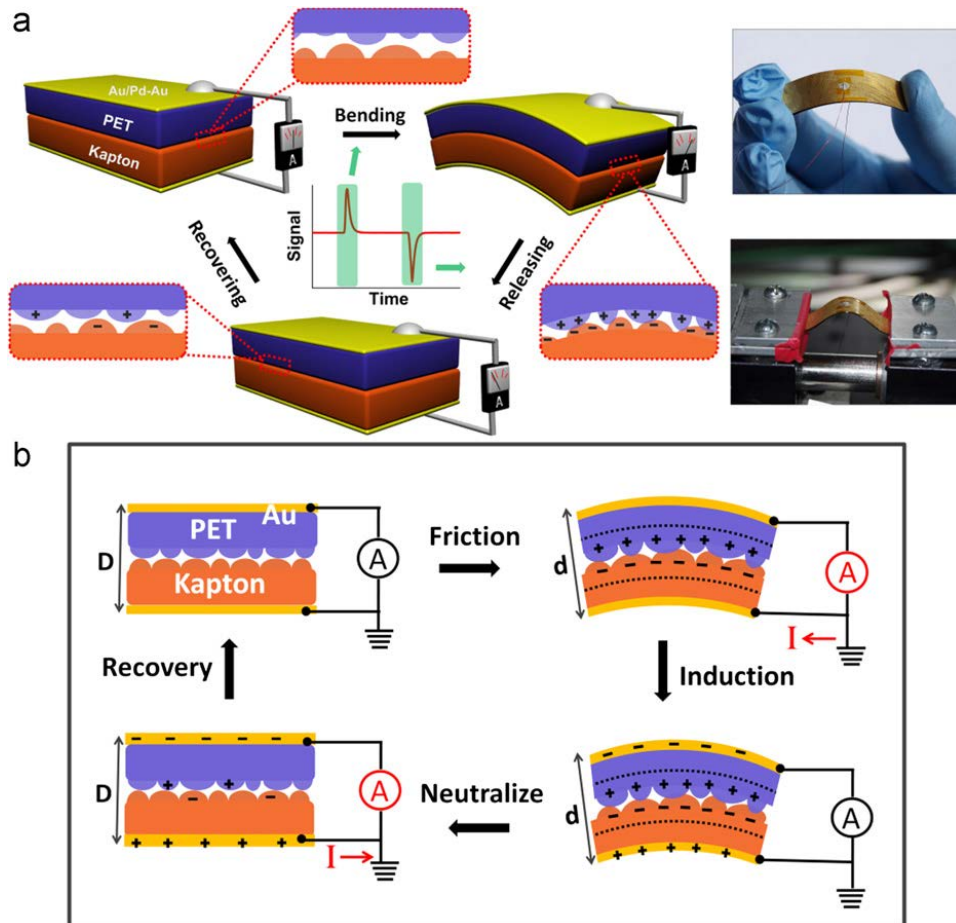


그림 4. Schematic illustration of the structure and working principle of the triboelectric generator. (a) The structure of an integrated generator in bending and releasing process and related electrical measurement tests. Photographic images of a flexible TEG and mechanical bending equipment. (b) Proposed mechanism of a TEG: charges are generated by friction of two polymer films, which results in the creation of a triboelectric potential layer at the interfacial region (indicated by dashed lines); a mechanical compression results in a change in the distance between the two electrodes (from D to d), thus, under the driving of the triboelectric potential, a change in system capacitance leads to the flow of current in the external load which drives the flow of the free electrons across the electrodes to minimize the total energy of the system.