



정전기반 에너지 하베스팅을 위한 대전체 소재 기술 동향

글 _ 백정민
울산과학기술원 신소재공학부

1. 서론

현재 세계는 기존에 사용되어 왔던 화석 연료의 고갈과 지구 온난화와 같은 이상 기후로 인해 에너지 부족 및 환경 오염 문제에 직면해 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해서 친환경 대체 에너지에 관한 연구가 많이 이루어졌고, 그 중에서도 친환경 에너지를 이용한 에너지 하베스팅이 많은 관심을 받고 있다. 자연에서 버려지는 에너지를 전기에너지로 변환하여 이용하는 에너지 하베스팅은 전 세계가 직면해 있는 에너지 부족을 해결할 수 있는 방법일 뿐만 아니라 유틸리티 시대에서 필수 요소인 소형전자기기의 전원공급 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 방법으로 제시되고 있다. 이러한 에너지 하베스팅 방법에는 태양광을 이용한 태양발전, 기계적인 에너지를 이용한 압전 및 정전발전, 기계적인 운동과 전자기적 현상을 이용한 발전 및 용량성(capacitive) 발전, 폐열을 이용한 열전발전 등이 있다. 각각의 방법은 장단점을 가지고 있으며 주어진 자연환경의 적합성을 따져서 여러 방법이 선택되고 이에 적용될 수 있다. 예를 들면, 태양발전의 경우 생성되는 에너지량은 크지만 흐린 날이나 실내에서는 사용할 수 없는 단점이 있다. 열전 재료를 이용해 에너지를 하베스팅하는 방식의 문제점은 에너지 하베스팅 장치의 안과 밖의 온도 차가 커야만 효과를 볼 수 있다는 것이다. 그러나 실제로 그 온도 차가 크지 않기 때문에 효율적으로 활용되지 못하고 있다. 또한 전자기적 현상을 이용한 발전 방식은 발전기 제작에 따른 소요

비용이 크다는 단점을 가지고 있다. 반면, 정전기반 에너지 하베스팅은 다른 발전방법에 비해 에너지 밀도가 높고, 일반적으로 정전기는 두 개의 서로 다른 물체가 접촉하였을 때 각각의 물질에서 전하들이 서로 다른 전하로 대전 되는 전기 이중층을 형성하게 된다. 그 후 물체가 분리 되면 전기 이중층의 존재로 전위차가 발생하고 이 전위차를 떼우고자 두 물체의 인접한 전극 간의 전자 이동이 발생한다. 대부분의 물질에서 정전기 효과가 나타날 수 있기 때문에 정전기를 이용한 에너지 하베스팅은 물질적인 제한과 기존의 압전 소재에서의 출력보다 더 높은 값을 예상할 수 있다. 또한 기후에 관계없이 실내·외 기계진동을 이용할 수 있고, 풍력, 바다의 파도 등 다양한 형태의 기계적 에너지를 전기에너지로 변환할 수 있어 전 세계적으로 많은 연구가 진행되고 있다.

1.1. Triboelectric effect

정전기는 일반적으로 서로 다른 두 물질의 접촉면에서 발생하게 되며, 고체 상호 간에서 뿐만 아니라 고체와 액체 간, 액체 상호 간, 액체와 기체 간에서도 발생할 수 있다. 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 낙뢰현상이다. 하지만 이러한 정전기 현상은 일상 생활이나 산업 현장에서 장애적인 요



	Polyformaldehyde 1.3-1.4	(continued)	
	Elycellulose	Polyester (Dacron)	
	Polyamide 11	Polyisobutylene	
	Polyamide 6-6	Polyurethane 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)	

Fig. 1. 다양한 물질들 사이에서 마찰에 의해 양·음 대전 효과를 보여주는 triboelectric series.

소로 여겨 이를 억제하는 방향으로 연구가 진행 되어왔다. 정전기가 일어날 때 대전물체 주위에는 정전계가 형성 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 일어난다. 이 방전현상에 의한 결과로 가연성 물질이 연소되어 일어나는 현상이 폭발, 화재이고 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 정전기로 발생된 전하는 지금까지는 부정적인 효과를 나타낸다는 것이 과학적인 연구와 기술적인 응용분야에서 보고되었다.

1.2. 정전기반 에너지 하베스팅

서로 다른 두 물질이 마찰이 용이하도록 소자를 제작하여 마찰 시 발생하는 정전기 효과를 이용한 소자를 정전기반 에너지 하베스터라고 하며¹⁻⁹⁾ 정전기반 에너지 하베스팅의 일반적인 메커니즘은 Fig. 2와 같다. 서로 다른 두 개의 물질이 접촉하면 마찰에 의해 두 물질 표면이 대전되는 현상이 나타난다. 두 물질의 분리가 시작 되면 정전기 유도 현상에 의해 위·아래 전극에 보상 전하가 축적되기 시작하고, 전하 균형이 맞을 때까지 외부 회로를 통해 전류가 흐르게 된다. 반대로 두 물질이 다시 가까워

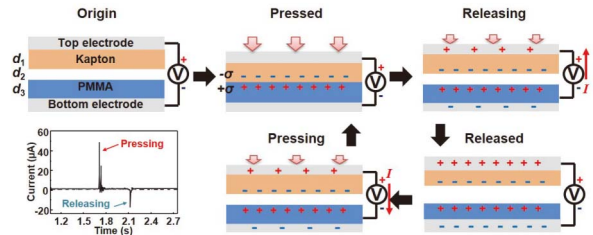


Fig. 2. 정전기반 에너지 하베스팅의 일반적인 메커니즘의 모식도.

지기 시작하면 축적되었던 보상 전하가 점점 사라져 처음과는 반대 방향의 전류가 외부 전극을 통해 흐르게 되며, 반복되는 접촉 및 분리 과정을 통해 양 전극간에 지속적으로 교류 전류(Alternating Current)가 흐른다.

이러한 정전기반 에너지 하베스팅 기술은 출력 값이 크고 모든 종류의 기계적 에너지를 에너지 하베스팅 분야에 접목시킬 수 있기 때문에 정전기반 에너지 하베스터 자체가 곧 응용 분야에 사용된다. 특히 정전기반 에너지 하베스터는 인간의 작은 움직임, 걷는 동작, 진동 및 회전 에너지, 풍력 에너지, 흐르는 물, 빗방울, 조류 및 파도 에너지 등으로부터 크고 작은 수준의 에너지 모두를 추출할 수 있다. 소자의 다양한 구조, 작동 모드와 표면의 형상을 이용하여 최적화된 소자는 압력센서, 화학센서 및 UV센서 등 다양한 자가발전 센서로의 응용이 가능하다.

1.3. 국내·외 정전기반 에너지 하베스팅 기술 수준 및 시장 동향

미국 Georgia Tech의 Zhong Lin Wang 교수가 2012년 최초로 발표한 정전기반 에너지 하베스팅 연구는 이제 막 연구가 시작된 상황임에도 전 세계적으로 매우 활발하게 연구가 태동하고 있으며, 관련 연구는 국내에서 KIST, UNIST 및 성균관대를 중심으로 경희대, 서울대, 연세대, 포항공대, GIST, KAIST 및 삼성전자 등에서 연구가 활발히 시작되고 있다. 국외에서는 미국 Georgia tech의 Zhong Lin Wang 교수 그룹이 세계 최초 발표 이후 이 분야의 세계 기술 흐름을 주도하고 있다. 기존의 압전 에너지 하베스팅, 태양전지 등 나노 물질을 이용한 에너지 발전과 관련된 연구능력을 기반으로 나노 물질을



이용한 정전기 발전에 대한 새로운 연구가 진행되고 있다. 서로 다른 triboelectric 성질을 가지는 두 개의 고분자 층을 정전 특성을 이용한 정전기반 에너지 하베스터 제작으로 휴대전화 배터리 충전 가능성을 제시했고,¹⁾ 투명한 폴리머 물질들을 이용한 유연하며 투명한 정전기반 에너지 하베스터를 보고해 유기 및 광학 전자 기기 전원으로의 응용 가능성을 보여줬다.¹⁰⁾ 또한, 물질의 표면 형태 제어와 두 소재 간 거리 조절 최적화 및 스프링사용을 통해 600개의 LED를 발광시킬 수 있을 정도의 충분한 출력을 보이고 있다.¹¹⁾

한편 다양한 소재, 응용분야 이외에도 구조적인 측면에서 연구가 진행되고 있다. 대전체 소재의 표면을 제어하여 표면적을 넓힘으로써 마찰 면의 증가를 유도하기 위해 sliding mode를 최초로 적용한 정전기반 에너지 하베스터,¹²⁾ 대면적 에너지 하베스팅을 가능케 하고 회전 동력을 에너지원으로 삼을 수 있는 분리된 디스크형태의 정전기반 에너지 하베스터 등이 보고 되었으며¹³⁾ 중국 북경 대학교에서 생체에 적용이 가능한 정전기반 에너지 하베스터를 개발하여, 다양한 응용분야 확대 및 상용화 가능성을 제시하였다.¹⁴⁾ 생체 미시체계에서 지속 가능하도록 구동되는 저주파수 정전기반 에너지 하베스팅은 미래 유망 산업인 바이오 관련 산업으로의 발전 가능성을 보이고 있다. 또한 Nylon과 나노선 패턴의 PTFE간의 큰 차이의 정전기를 이용한 박막형태의 정전기반 에너지 하베스터에 텍스타일을 부착하여 사용이 가능한 고출력, 대용량 정전기 소자 제작 가능성을 보여주었고,¹²⁾ ZnO 나노선과 PDMS, Nylon으로 구성된 3D 섬유유압·정전 하이브리드 에너지 하베스터 기반의 파워슈트를 제작하였고,¹⁵⁾ 사람 팔에 장착되어 팔의 구부림 및 이완 운동에 동작 되는 신축성 있는 정전기반 에너지 하베스터를 개발하였으며,¹⁶⁾ 또한, Nylon과 Polyester 섬유로 이루어진 텍스타일의 polyester의 슬라이딩 마찰 모드 또는 수직 접촉 마찰 모드로 출력을 내는 정전기반 에너지 하베스터를 제작하여¹⁷⁾ 웨어러블 소자 제작의 가능성을 보여주었다.

다만 웨어러블 에너지 하베스터 제작을 위한 요소기술들은 국내에서는 개념정리 단계로서, 독자적으로 혹은

외국 대학과의 협력을 통하여 소재를 개발 하고, 소재 차원에서 유연성 및 신축성을 확보하는 연구는 미비한 실정이다. 성균관대학교에서 PVDF-TrFE의 압전성과 그래핀의 신축성을 이용한 압전·초전기반 에너지 하베스터를 개발하여 구부림 및 스트레칭이 가능한 웨어러블 하베스터 개발의 가능성을 보여주었으며,¹⁸⁾ UNIST에서 높은 신축성을 갖고 다습 환경에서 발전이 가능한 방수 특성을 가진 섬유형 정전기반 에너지 하베스터를 개발하였고, 출력 값은 약 4 mW로 매우 신축성 있는 고출력 웨어러블 에너지 하베스터이다.¹⁶⁾

현재 국내 시장의 경우, 압전 관련 기업이 많이 부족할 뿐만 아니라 그냥 보여주기 식의 제품만을 생산하는 곳도 있고 응용되는 제품들이 많이 부족한 실정이다. 즉, 국내의 압전기반 에너지 하베스팅 시장이 작아서 대량 생산이 이루어지지 못하고, 미래의 국내 압전 시장 규모를 예측한 통계자료가 전무하다. 분산 전원용 매크로 에너지 하베스팅의 국내 시장은 형성되지 않았지만 일본, 이스라엘, 미국 등에서 연구 적용되고 있기 때문에 2016년엔 관련 시장이 형성될 것으로 기대가 되며, 압전기반 에너지 하베스터는 전체 에너지 하베스팅 시장에 비해 아직 시장 규모가 작고 지배적 사업자가 없어 향후 독점적 지위 확보가 가능하다.

국내 대기업에서 생산되는 스마트폰 및 관련 휴대용 전자기기가 세계 시장에서 큰 점유율을 차지하고 있는 만큼 마이크로 에너지 하베스팅 소자의 개발은 즉시 적용되어 상품화 될 것으로 예상되며, 웨어러블 디바이스는 스마트폰의 포화로 급증할 것으로 예상되며 나이키, 아디다스, 제일 모직 등 신발과 의류 산업에 적용이 가능하여 큰 부가가치 산업이 될 것으로 기대가 된다.

2 정전기반 에너지 하베스팅을 위한 소자 구조

다른 두 가지의 물질이 서로 마찰되었을 때, 화학 결합이 두 가지의 물질의 표면에서 형성 되고 두 물질 사이에서 생성된 전하가 전기화학적 포텐셜 평형을 맞추기 위하여 이동하고 이동된 전하는 전자 또는 이온이나 분자가 될 수 있다. 두 개의 서로 다른 물질이 분리되면 한 물질

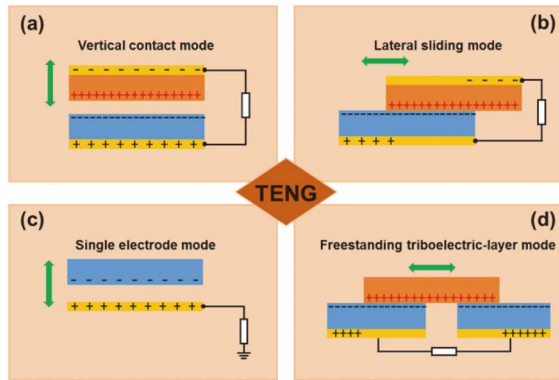


Fig. 3. 마찰전기 발전소자의 4가지 기본 구조들. (a) Vertical contact mode, (b) Lateral sliding mode, (c) Single electrode mode, (d) Freestanding triboelectric-layer mode.

은 전자를 받아 표면이 음전하로 대전되고, 다른 한 물질은 전자를 잃게 되어 표면이 양전하를 띠게 된다. 대전된 물질이 이격 될 때, 각 물질의 표면에 정전 전하의 존재로 인해 전위차가 생성 되고 균형을 맞추기 위해 외부 전극을 통해 전류가 흐르게 되고 이 대전과 정전기 유도의 커플링 원리를 바탕으로 한 정전기만 에너지 발전소자는 기본적으로 4 가지의 구조가 주로 연구되고 있다.

2.1. Vertical contact-separation mode

정전기반 에너지 하베스터의 초기 모델은 수직 마찰 모드 (Vertical contact-separation mode)로 서로 다른 유전체 박막 및 금속 박막이 일정한 간격으로 이격되어 서로 마주하고 있으며, 상하부 전극이 각각의 물질의 뒤편에 위치하고 있다.(Fig. 2a) 수직인 방향으로 외부 하중이 적용되었을 때, 이격되어 있던 서로 다른 두 물질은 마찰하게 되며 각각의 표면에 양·음전하를 생성시킨다. 외부 하중이 제거 되면, 전하를 띠는 각각의 표면이 다시 이격되어 하베스터 내부에 전위차를 생성하게 된다. 이때, 소자 내부의 전하 평형을 유지하기 위해 외부 회로를 통해 상하부 전극 사이에 전자들이 이동하여 출력 전류를 생성하게 된다. 위의 메커니즘을 기반으로 반복적인 외부 하중을 적용하여 지속적인 출력 생산이 가능하다.

2.2. Lateral sliding mode

슬라이딩 마찰 모드(Lateral sliding mode) 방식도 수직 마찰 모드와 같은 원리로 구동되며, 접촉하고 있는 서로 다른 유전체 박막 및 금속 박막에 수평 방향으로 외부 하중이 작용 되면, 접촉하고 있는 면 사이에 마찰이 발생하게 되고 각각의 표면에 양·음전하들이 생성이 된다. (Fig. 2b) 수직 마찰 모드와 마찬가지로 내부의 전하 평형을 위해 외부 회로를 통해 전자들이 이동하여 출력 전류를 생성한다. 슬라이딩 모드의 경우, 단순한 평면 구조뿐 아니라 디스크 형태와 실린더 형태의 회전 구조가 개발되어, 위의 구조를 가지는 슬라이딩 모드의 경우, 작은 외부 하중에 작동하기 때문에 수직 마찰 모드보다 에너지 변환 효율이 높고, 두 물질 사이를 이격시킬 필요가 없어 제작이 간편하다. 하지만 현재까지 주로 사용되는 유기물 기반의 폴리머들의 낮은 마모 저항에 의해 반복 실험에 의해 마찰 표면의 손상으로 출력의 안전성 확보에 대한 어려움이 있다.

2.3. Single electrode mode

싱글 전극 모드(Single electrode mode)는 위의 슬라이딩 마찰 모드와는 다르게 접지와 연결된 하부 전극과 유전체와의 마찰을 이용하는 구조다.(Fig. 2c) 절연체와 하부 전극 사이에 마찰이 발생하여 마찰 표면에 양·음전하를 생성하게 되고 이때 하부전극에 발생하는 양전하에 대한 전하 평형을 형성하기 위해 접지를 통한 외부 회로로부터 전자들이 이동하여 출력 전류를 생성한다. 기존 구조들과는 다르게 상·하부전극이 회로로 연결되어 있지 않기 때문에 웨어러블 디바이스등과 같이 다양한 응용분야에 적용이 가능하다.

2.4. Free-standing triboelectric-layer mode

최근에 가장 많이 연구되고 있는 마찰전기 발전소자 구조로서 프리스탠딩 마찰 모드(Free-standing triboelectric-layer mode)는 기존의 싱글 전극 모드에서 하부 전극에 연결된 접지 부분에 상부 전극을 수평하게 연결한 구조다.(Fig. 2d) 구동 방식은 싱글 전극 모드와 유사하게 별도의 유전체 박막이 위의 상·하부 전극 표면에 마찰하여 각각의 표면에 양·음전하를 발생시키며 이때 수



평으로 위치한 두 전극 사이에 전하 평형을 형성하기 위해 외부 회로로 전자들이 이동하여 출력 전류를 생성시킨다.

3. 정전기반 에너지 하베스팅을 위한 소재

3.1. 양전하 대전체 (Positively charged materials)

다른 두 가지의 물질이 서로 마찰되었을 때 Fig. 1의 triboelectric series에서 상대적으로 윗 쪽에 위치한 물질 즉, 전자를 상대 물질에게 주어 표면 자체가 양전하로 대전되는 물질을 흔히 양전하 대전체 (Positively charged material) 라고 한다. 이 양전하 대전체로 가격이 저렴하고 일함수 (Work function) 가 상대적으로 낮은 값을 갖는 알루미늄(4.06eV)이 많이 사용 되고 있다. 2013년도 Georgia tech에서 알루미늄 호일을 전극으로 이용하고 음전하 대전체 물질로 금속 나노입자 템플릿을 코팅하여 에칭 공정을 통해 나노선 기반의 PTFE박막을 사용하여 이 두 물질간의 수평방향의 슬라이딩 기반의 움직임을 통한 마찰로 인해 출력 전압 및 전류를 생산하였다. (Fig. 4.)¹⁹⁾ 이 정전기반 에너지 하베스터는 출력 전압 및 전류가 각각 1100 V, 6 mA/m² 이며, 이 출력을 이용하여 100개의 초록색 LED를 구동시켰다.

정전기반 에너지 하베스팅에서 출력을 증가시키기 위한 방법으로 알루미늄 호일에 나노 구조를 도입하여 마찰 시 접촉되는 면적을 증가시키는 방법이 최근에 많이 연구되었다. 최근 섬유 구조의 하베스터를 서로 짜서 매

우 신축성 있는 직물 기반의 정전기반 에너지 하베스터가 개발되었는데,¹⁶⁾ 양전하 대전체 물질로 알루미늄 와이어를 사용하였고, 이 와이어의 표면적을 증가시키기 위해 ZnO 나노선을 성장시킨 후 금을 증착하였다. 출력은 최대 45 V, 210 μA이며, 신축률은 25 %로 높은 신축성을 보였다. 이 직물 기반 정전기반 에너지 하베스터는 팔꿈치 패치 및 파워 카펫으로 응용되었고 약 20여개의 LED를 구동시켜, 웨어러블용 정전기반 에너지 하베스터 개발에 큰 가능성을 보여주었다.

3.2. 음전하 대전체 (Negatively charged material)

성질이 다른 두 가지의 물질이 서로 마찰되었을 때 전자를 상대 물질로부터 빼앗아 표면 자체가 음전하로 대전되는 물질을 흔히 음전하 대전체 (Negatively charged material) 라고 한다. 정전기반 에너지 하베스팅 분야에서 음전하 대전체의 경우, 현재 많은 기본적인 물질들에 대한 연구가 이루어지고 있는데, 정전기반 에너지 하베스터가 구동 되는 온도, 습도와 같은 외부 환경, 소자 구조, 양전하 대전체 종류에 따라서 그 특성에 적합한 음전하 대전체가 선택이 되고 있다. 주로 사용되는 물질로는 PTFE, PDMS, PI, PMMA 등이 있으며 각 물질이 음전하 대전체로 사용된 정전기반 에너지 하베스터 연구의 제작 방법, 대전 및 출력 특성, 발전 소자로의 적용 등과 같은 연구를 간략히 소개하고자 한다.

3.1. Polytetrafluoroethylene (PTFE)

PTFE 물질은 triboelectric series에서 마찰 시 다른 물질로부터 전자를 빼앗아 물질 표면이 음전하로 대전되는 성질이 가장 큰 물질로 알려져 있으며, 2013년도에 Georgia tech의 Zhong Lin Wang 그룹에서 처음 사용이 되었다.²⁰⁾ 이 PTFE의 경우 물질 자체가 내마모성 및 낮은 마찰계수의 특징을 가지고 있어 잦은 마찰 분위기에서도 출력의 안정성을 보여준다.

이 보고된 연구에서 PTFE를 대전시키는 양전하 대전체로 사용된 상부 전극은 알루미늄, PTFE 표면에 대전된 전하를 이용하여 정전기 유도되는 하부 전극으로 구리가 사용되었으며 정전 출력 값을 증가시키기 위해서

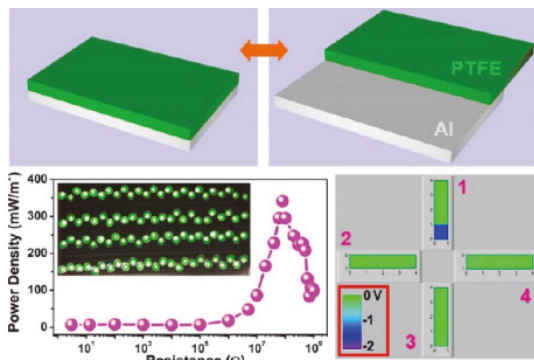


Fig. 4. 알루미늄 호일을 이용한 슬라이딩 정전기반 에너지 하베스터 모식도 및 변위 벡터 센서 시스템.

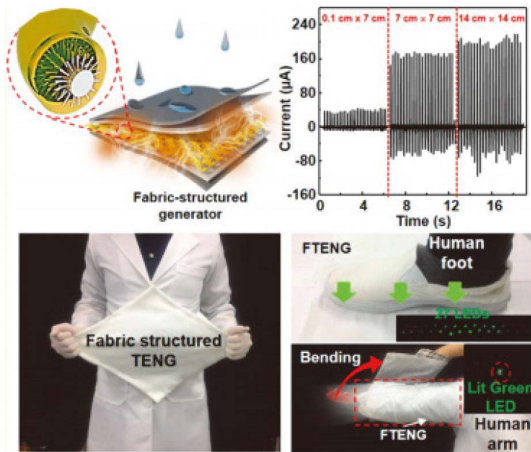


Fig. 5. 금 코팅된 알루미늄 와이어를 이용한 직물 구조의 정전기 반 에너지 하베스터 모식도, 출력 및 응용.

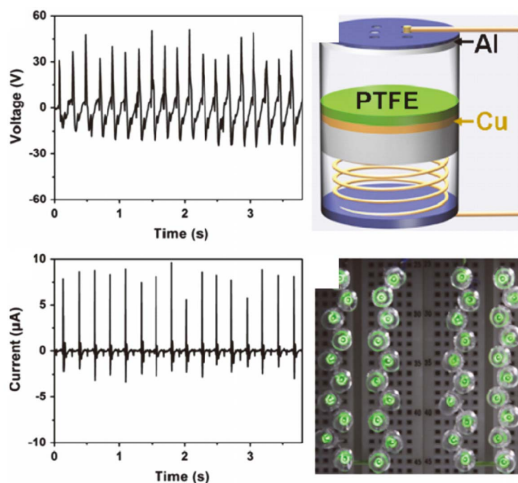


Fig. 6. PTFE로 제작된 정전기반 에너지 하베스터를 이용한 에탄올 농도 센서 출력 및 LED 이미지.

AAO를 통해 표면적을 증가시키는 나노 기공을 PTFE 표면에 생성시켰다. 출력 전압 및 전류는 최대 57 V, 6 µA이며, 상대습도와 에탄올 농도를 변화시켜 출력의 변화를 이용하는 센서로서 응용되었고, 낮은 단가, 간단한 제작 방법, 우수한 성능으로 인해 환경 모니터링 및 대량 생산이 가능한 자가 발전의 능동 센서 개발의 가능성을 보여주었다.

3.2. Polydimethylsiloxane (PDMS)

2012년도에 PDMS는 정전기반 에너지 하베스터의 음

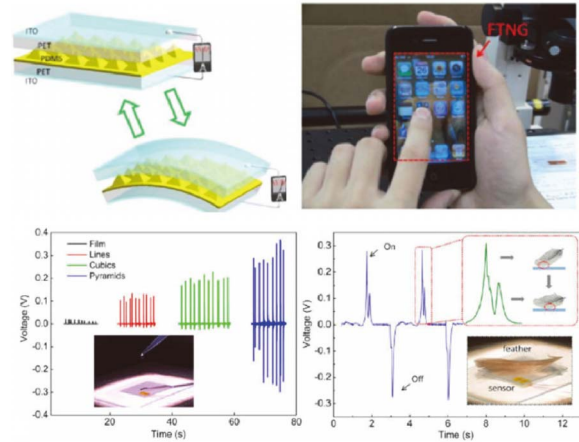


Fig. 7. 피라미드 패턴을 갖는 PDMS 기반 정전기반 에너지 하베스터 모식도 및 이를 이용한 압력 센서.

전하 대전체로서 가장 기본적인 물질로 처음 사용되었다. PDMS의 경우 소수성 및 고온 저항성, 내산화 특성 그리고 다양하고 열악한 환경에서 사용이 되며 오랜 시간의 마찰 분위기에서도 안정적인 출력을 보여준다. 하지만 PDMS 표면 자체의 끈적끈적한 특성으로 인해서 슬라이딩 구조 및 프리스탠딩 구조에서는 적합하지 않은 소재로 수직 마찰 분리 모드에 특화된 음전하 대전체이다. Fig. 5는 PDMS를 이용한 유연하고 투명한 정전기반 에너지 하베스터를 보여준다.²⁾

PDMS 표면에 선, 큐브, 피라미드 패턴을 각각의 물드를 통해 제작하고 이 패턴 모양에 따라 출력을 비교하였고, 상·하부 전극은 모두 PET/ITO가 사용되었으며 피라미드의 패턴을 갖는 PDMS의 경우가 가장 높은 출력인 18 V, 0.7 µA를 보여주었다. 게다가 간단하고 저렴한 제작 과정으로 인해서 대량 생산이 가능하며 실생활에 적용하는 가능성을 보여주었다.

3.3. Polymethyl methacrylate (PMMA)

아크릴 계열의 PMMA 물질도 음전하 대전체로서 이용이 되었다. PMMA는 투명한 액체를 기판에 코팅하여 응고시켜서 두께 조절이 가능하며 내마모성뿐만 아니라 Polycarbonate (PC)에 성분 중 하나인 bisphenol-A와 같은 해로운 물질이 함유되어 있지 않아 큰 인장강도가 필요 되지 않는 환경에서는 오히려 PMMA가 사용이

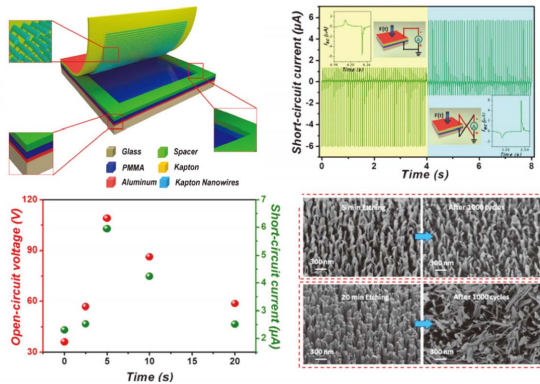


Fig. 8. PMMA 기반 정전기 기반 에너지 하베스터 모식도 및 측정 시간에 따른 출력 전류.

될 만큼 많이 사용되고 있다. 2012년도에 처음으로 PMMA 물질을 이용한 정전기 기반 에너지 하베스터가 개발되었다.²¹⁾ 두 개의 폴리머 물질 사이에 공간을 스페이서를 통해서 형성시켜 외부 힘에 의한 상 하부 폴리머 간의 마찰 후에 자동적으로 분리가 되도록 제작하였다. 상부에 위치한 폴리머의 경우 nanowire가 표면에 배열되어 있는 Kapton이고, 이 정전기 기반 에너지 하베스터 역시 매우 쉬운 제작 방법 및 조작법, 우수한 성능, 저렴한 비용 등의 많은 장점을 가지고 있고, 최대 전력은 31.2 mW/cm^3 이다. 이 정전기 기반 에너지 하베스터를 통해 미세한 결정립 사이즈를 갖는 은 마이크로 구조의 전기도금에 필요한 전력을 공급하였고, 이 연구를 시작으로 하여 본격적으로 정전기 기반 에너지 하베스터가 전력 공급으로 응용되

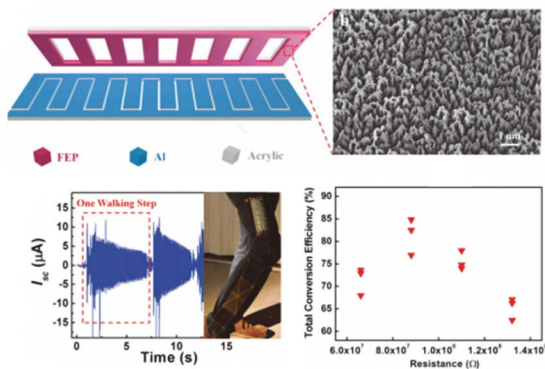


Fig. 9. FEP 물질을 이용한 Interdigitated 패턴과 free-standing mode가 융합된 정전기 기반 에너지 하베스터 모식도 및 응용.

었다.

3.4. Fluorinated ethylene propylene (FEP)

그 외 폴리머로 Fluorinated ethylene propylene (FEP)가 마찰 시 전자를 받아 음전하로 대전되는 물질로 사용이 되었다. 2014년도에 처음 사용이 되었고 여기서 사용된 구조는 free-standing 구조에 interdigitated 패턴을 융합하였다.²²⁾ 이 때 총 에너지 변환 효율이 85%에 달했다. 이 정전기 기반 에너지 하베스터를 가지고 사람의 손, 자동차의 가속, 사람의 걸음 등과 같은 일상 생활에서 자주 사용되는 에너지원을 효율적으로 이용할 수 있게 되었다.

4. 소재 패턴 공정을 통한 정전기 기반 에너지 하베스팅 효율 향상

정전기 기반 에너지 하베스터의 출력 전류는 서로 다른 두 물질이 마찰되었을 때 생기는 물체 표면의 대전되는 양의 큰 영향을 받는다. 위에서 언급한 양전하 대전체와 음전하 대전체의 경우에 특정 물질을 선택하였을 때, 이 특정 두 물질이 마찰되었을 때 대전되는 양은 고정되어 있어, 더 특성이 좋은 물질을 새로 합성하거나 발견하지 않는다면 물체 표면에 대전되는 음·양전하의 양은 정해져 있어, 출력 특성이 좋은 물질 쌍만 사용하게 된다. 즉 재료 선택의 다양성이 없고 한계성이 있다. 정전기 기반 에너지 하베스터의 출력 전류 값을 결정하는 또 다른 요소로 접촉 면적 변화가 있고 접촉 되는 면적이 클수록 대전되는 양이 크다. 마찰 시 접촉된 면적을 증가시키는 방법으로 소재 패턴 공정이 있고 이러한 패턴 공정을 통해서 출력 전류를 증대시킬 수 있고 이와 관련된 연구가 계속해서 보고되고 있다. 여기에서는 앞서 언급한 접촉 면적을 증가시키기 위한 소재 패턴 공정에 대해서 설명할 것이며, 소재 패턴 모양에 따른 접촉 면적의 정도 및 출력 영향에 대해서 깊이 있게 알아보려고 한다.

4.1. 라인, 큐브, 피라미드 모양 패턴

Fig. 10은 유연하고 투명한 PDMS 물질 표면의 패턴

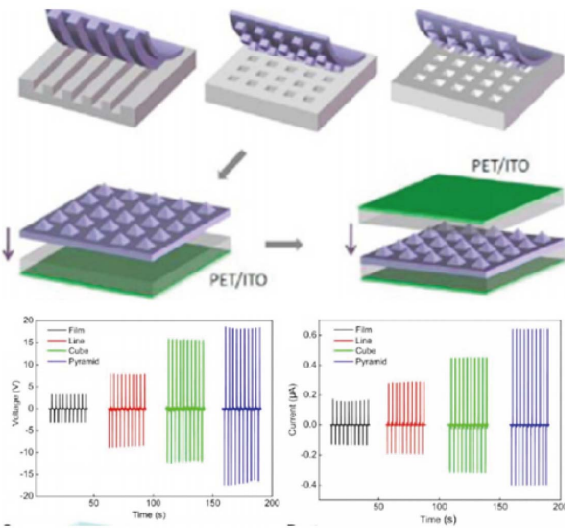


Fig. 10. 라인, 큐브, 피라미드 패턴을 갖는 PDMS 기반 정전기반 에너지 하베스터 제작 방법 및 출력 값 비교

공정을 통해 여러 가지 패턴을 갖는 정전기반 에너지 하베스터 제작 방법 및 그 제작된 하베스터의 출력 전압 및 전류 값 비교를 나타내고 있다. 이 정전기반 에너지 하베스터는 PDMS 물질 표면의 나노 패턴 공정을 통해서 떨어지는 빗물의 압력에도 출력을 내는 매우 민감한 압력 센서로 응용되었다.¹⁰⁾ PDMS 표면은 몰딩 방법을 통해 라인, 큐브, 피라미드 패턴을 제작하였다. 포토리소그래피 방법과 건식·습식 식각 등의 공정을 통해서 마이크로단위의 실리콘 몰드가 제작이 되었다. 제작하여 얻은 각각의 모양으로 패턴 된 실리콘 몰드에 액상의 PDMS를 부어 균일 코팅을 위한 스핀코팅 후에 건조시켜 제작한다. 여기에서 사용된 상·하부 기판 및 전극은 모두 PET/ITO가 사용되었고 이 제작된 정전기반 에너지 하베스터에서 각각 모양이 다른 패턴이 된 PDMS필름에 따라 출력 전압 및 전류를 비교하였다. 피라미드의 패턴이 가장 높은 출력인 18 V, 0.7 μ A를 보여주었다.

피라미드 패턴의 경우 일반 박막과 비교했을 때 더 많은 마찰 면적의 증가로 정전기적 효과에 의한 출력 전류를 증대시키며, 높은 유효유전상수와 마찰 시 공간의 생성으로 정전용량 변화가 향상되어 출력 전류가 커진다. 피라미드 모양 패턴은 완벽한 기하학적 구조와 날카로운 팁을 가지고 있어 일반 박막 대비 6배 이상의

출력을 보여주고 게다가 간단하고 저렴한 제작 과정으로 인해서 대량 생산이 가능하며 실생활에 적용하는 가능성을 보여주었다.

4.2. 점, 곡선, 그물망 모양 패턴

Fig. 11은 실리카 표면의 BCP 자가조립공정을 통해서 여러 모양의 패턴을 갖는 정전 기반 에너지 하베스터 모식도를 나타낸다.²³⁾ 이 연구에서는 블록 혼성 중합체 (Block copolymer, BCP)의 자가 조립 공정을 통하여 접촉되는 표면의 모양을 점, 곡선, 그물망으로 제작하고 이 형상의 표면적 특성과 출력 특성을 분석하여 고효율 정전기반 에너지 하베스터를 보고하였다. PS-b-PDMS BCP 혼합액을 Au/Kapton/PI/Glass silica위에 스핀코팅하고 BCP필름의 마이크로상분리 유도를 위한 열적 및 용매 증기 어닐링 과정을 통해서 실리카를 자가조립시킨다. 각각의 형상에 따라서 정전기반 에너지 하베스터를 제작하여 출력 전류 및 전압을 확인하였고 넓어진 표면적이 증가함에 따라 출력 값도 증가하였다. 그물망 모양의 형상의 경우 넓어진 표면적 비율이 70 %로 계산되며, 일반 박막에 비해 2.5배의 해당하는 증대된 출력 전류를 나타내었다. 내구성 측면에서 보면 약 70 kgf 하중의 10000 번의 접촉에도 출력의 저하를 나타내지 않았다.

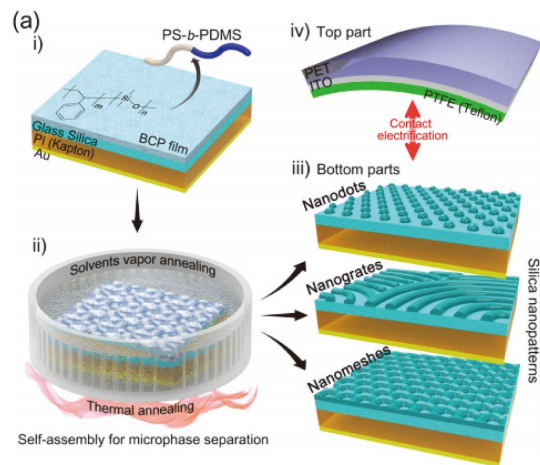


Fig. 11. 자가조립공정을 통한 다양한 표면 형상을 갖는 정전기반 에너지 하베스터 제작 방법 및 모식도

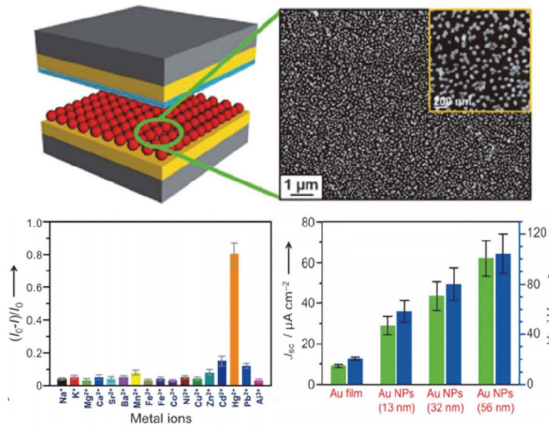


Fig. 12. 금 나노입자를 이용한 정전기반 에너지 하베스터 모식도 및 수은 감지 센서 응용, 금 나노입자 크기와 출력 전압 및 전류.

4.3. 금 나노입자 크기의 영향

금 나노입자의 경우 다른 금속 나노입자와 달리 매우 안정하고 기능화를 통해 표면 제어가 가능하며 정확한 크기 조절이 가능하다.²⁴⁾ 이를 이용하여 금 나노입자 코팅을 통해 금 박막의 엠보싱 표면 형상을 갖는 정전기반 에너지 하베스터에 관한 연구가 보고되었고 이 하베스터를 통해서 출력 향상의 가능성 및 수은 감지 센서로서의 응용을 보였다. (Fig. 12) 1,3-propanedithiol을 통해 13, 32, 56 nm의 다양하고 각각 크기가 균일한 금 나노입자를 제작하였으며 각 크기에 따라서 정전 출력 특성을 비교하였다. 56 nm의 금 나노입자가 코팅된 금 박막을 이용한 정전기반 에너지 하베스터의 경우 출력이 100 V, 60 μA/cm²로 일반 금 박막과 비교하였을 때 약 5배 정도의 출력 값을 보였다. 금 나노입자의 크기가 증가할수록 더 큰 출력을 얻었으며 이는 같은 밀도의 금 나노입자가 코팅되었을 때 더 큰 금 나노입자가 코팅이 된 경우가 더 큰 표면적을 가지기 때문이다.

5. 맺음말

정전기반 에너지 하베스팅은 다른 발전방법에 비해 에너지 밀도가 높고, 대부분의 물질에서 정전기의 효과를 볼 수 있기 때문에 정전기를 이용한 에너지 하베스팅은

물질적인 제한과 기존의 다른 에너지 하베스팅의 출력들보다 더 높은 값을 예상할 수 있다. 또한 기후에 관계없이 실내 외 기계진동을 이용할 수 있고, 풍력, 바다의 파도 등 다양한 형태의 기계적 에너지를 전기에너지로 변환할 수 있다는 많은 이점들을 가지고 있다. 정전기반 에너지 하베스터의 출력과 응용 가능성을 높이고자 소자 구조 부분에서는 vertical contact separation mode, sliding mode, single electrode mode, free-standing mode 등의 구조들이 개발되어 왔고, 출력 값과 비례 관계에 있는 마찰 면적을 증가시키기 위하여 나노 패턴 공정을 통해 피라미드, 큐브 등과 같은 나노 구조를 물질 표면에 생성시키는 방법 및 표면에 나노입자를 코팅하는 방법으로 정전기반 에너지 하베스터의 출력을 증대시킬 수 있다. 하지만 대부분의 연구들이 소자 구조 개발 중심으로 편향되어 발전 소자 및 소재의 원천적인 연구가 아직도 많이 부족한 실정이다. 소재 관련 연구들은 PTFE, PDMS, PMMA, PI, FEP 등의 물질들이 대부분 사용되어 왔으며, 최근에서야 소재의 원천적인 연구가 시작하는 단계이며, 정전기반의 에너지 하베스팅의 기본적인 문제점들의 해결 및 출력 향상을 위해 소재들(양전하 및 음전하 대전체)의 원천적인 연구 및 물질 합성 등을 통한 신소재 개발이 필요한 실정이다. 특히, 미래에는 사물 인터넷(IoT)의 시대가 도래하여 모든 사물에 네트워크가 형성되기 때문에 무선 통신 기술과 정보 기술이 통합된 창조적 융합 기술인 ICT가 새로운 산업 분야로 자리매김할 것이다. 따라서 대전력 청정 에너지원의 개발과 이동형 자가 발전 시스템을 동시에 요구하고 있기 때문에 이 두 가지를 동시에 해결이 가능한 웨어러블 에너지 하베스팅 소자의 실용화는 사물인터넷의 실현에 큰 기여를 하게 될 것이다. 이를 위해선 정전 기반 웨어러블 에너지 하베스팅 소자의 개발 및 제작 비용 절감과 고효율화를 위한 노력 및 연구가 더 진행되어야 할 것이다. 또한 에너지 하베스팅에 대한 연구가 전 세계적으로 진행되고 있지만 아직 시작 단계이기 때문에 원천 기술 확보 및 국가의 경제력 향상을 위한 국가 차원의 연구비 지원과 상용화 연구 발전을 위해 업체, 연구소, 학교 간의 공동연구 추진 및 산업에 적용하기 위한 노력이 지속되어야 할 것으로



전망된다.

참고문헌

1. F.-R. Fan, Z.-Q. Tian, and Z. L. Wang, "Flexible Triboelectric Generator," *Nano Energy*, **1** [2] 328-34 (2012).
2. Z. L. Wang, "Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology and Self-Powered Sensors-Principles, Problems and Perspectives," *Faraday Discuss.*, **176** 447-58 (2014).
3. P. Bai, G. Zhu, Q. Jing, J. Yang, J. Chen, Y. Su, J. Ma, G. Zhang, and Z. L. Wang., "Membrane-Based Self-Powered Triboelectric Sensors for Pressure Change Detection and Its Uses in Security Surveillance and Healthcare Monitoring," *Adv. Funct. Mater.*, **24** [37] 5807-13 (2014).
4. Z.-H. Lin, G. Zhu, Y. S. Zhou, Y. Yang, P. Bai, J. Chen, and Z. L. Wang, "Water-Solid Surface Contact Electrification and its Use for Harvesting Liquid-Wave Energy," *Angew. Chem. Int. Ed.*, **52** [48] 5065-69 (2013).
5. Z.-H. Lin, Y. Xie, Y. Yang, S. Wang, G. Zhu, and Z. L. Wang, "Enhanced Triboelectric Nanogenerators and Triboelectric Nanosensor Using Chemically Modified TiO₂ Nanomaterials," *ACS Nano*, **7** [5] 4554-60 (2013).
6. S. Wang, Y. Xie, S. Niu, L. Lin, and Z. L. Wang, "Free-standing Triboelectric-Layer-Based Nanogenerators for Harvesting Energy from a Moving Object or Human Motion in Contact and Non-contact Modes," *Adv. Mater.*, **26** [18] 2818-24 (2014).
7. J. Chun, J. W. Kim, W. Jung, C.-Y. Kang, S.-W. Kim, Z. L. Wang, and J. M. Baik, "Mesoporous Pores Impregnated with Au nanoparticles as Effective Dielectrics for Enhancing Triboelectric Nanogenerator Performance in Harsh Environments," *Energy Environ. Sci.*, **8** 3006-12 (2015).
8. G. Zhu, J. Chen, T. Zhang, Q. Jing, and Z. L. Wang, "Radial-Arrayed Rotary Electrification for High Performance Triboelectric Generator," *Nat. Commun.*, **5** 3426-34 (2014).
9. C. Zhang, T. Zhou, W. Tang, C. Han, L. Zhang, and Z. L. Wang, "Rotating-Disk-Based Direct-Current Triboelectric Nanogenerator," *Adv. Energy Mater.*, **4** [9] 1301798-805 (2014).
10. F.-R. Fan, L. Lin, G. Zhu, W. Wu, R. Zhang, and Z. L. Wang, "Transparent Triboelectric Nanogenerators and Self-Powered Pressure Sensors Based on Micropatterned Plastic Films," *Nano Lett.*, **12** [6] 3109-14 (2012).
11. G. Zhu, Z.-H. Lin, Q. Jing, P. Bai, C. Pan, Y. Yang, Y. Zhou, and Z. L. Wang, "Toward Large-Scale Energy Harvesting by a Nanoparticle-Enhanced Triboelectric Nanogenerator," *Nano Lett.*, **13** [2] 847-53 (2013).
12. Y. Yang, S. Wang, Y. Zhang, and Z. L. Wang, "Sliding-Triboelectric Nanogenerators Based on In-Plane Charge-Separation Mechanism" *Nano Lett.*, **13** [5] 2226-33 (2013).
13. L. Lin, S. Wang, Y. Xie, Q. Jing, S. Niu, Y. Hu, and Z. L. Wang, "Segmentally Structured Disk Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Rotational Mechanical Energy," *Nano Lett.*, **13** [6] 2916-23 (2013).
14. X.-S. Zhang, M.-D. Han, R.-X. Wang, F.-Y. Zhu, Z.-H. Li, W. Wang, and H.-X. Zhang, "Frequency-Multiplication High-Output Triboelectric Nanogenerator for Sustainably Powering Biomedical Microsystems," *Nano Lett.*, **13** [3] 1168-72 (2013).
15. X. Li, Z.-H. Lin, G. Cheng, X. Wen, Y. Liu, S. Niu, and Z. L. Wang, "3D Fiber-Based Hybrid Nanogenerator for Energy Harvesting and as a Self-Powered Pressure Sensor," *ACS Nano*, **8** [10] 10674-81 (2014).
16. K. N. Kim, J. Chun, J. W. Kim, K. Y. Lee, J.-U. Park, S.-W. Kim, Z. L. Wang, and J. M. Baik, "Highly Stretchable 2D Fabrics for Wearable Triboelectric Nanogenerator under Harsh Environments," *ACS Nano*, **9** [6] 6394-400 (2015).
17. T. Zhou, C. Zhang, C. B. Han, F. R. Fan, W. Tang, and Z. L. Wang, "Woven Structured Triboelectric Nanogenerator for Wearable Devices," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6** [16] 14695-701 (2014).
18. J.-H. Lee, K. Y. Lee, M. K. Gupta, T. Y. Kim, D.-Y. Lee, J. Oh, C. Ryu, W. J. Yoo, C.-Y. Kang, S.-J. Yoon, J.-B. Yoo, and S.-W. Kim, "Highly Stretchable Piezoelectric-Pyroelectric Hybrid Nanogenerator," *Adv. Mater.*, **26** [5] 765-69 (2014).
19. Y. Yang, H. Zhang, J. Chen, Q. Jing, Y. S. Zhou, X. Wen and Z. L. Wang, "Single-Electrode-Based Sliding Triboelectric Nanogenerator for Self-Powered Displacement Vector Sensor System," *ACS Nano*, **7** [8] 7342-51 (2013).
20. H. Zhang, Y. Yang, Y. Su, J. Chen, C. Hu, Z. Wu, Y. Liu, C. P. Wong, Y. Bando, and Z. L. Wang,



- “Triboelectric Nanogenerator as Self-Powered Active Sensors for Detecting Liquid/Gaseous Water/Ethanol,” *Nano Energy*, **2** [5] 693-701 (2013).
21. G. Zhu, C. Pan, W. Guo, C.-Y. Chen, Y. Zhou, R. Yu, and Z. L. Wang, “Triboelectric-Generator-Driven Pulse Electrodeposition for Micropatterning,” *Nano Lett.*, **12** [9] 4960-65 (2012).
22. Y. Xie, S. Wang, S. Niu, L. Lin, Q. Jing, J. Yang, Z. Wu, and Z. L. Wang, “Grating-Structured Freestanding Triboelectric-Layer Nanogenerator for Harvesting Mechanical Energy at 85% Total Conversion Efficiency,” *Adv. Mater.*, **26** [38] 6599-607 (2014).
23. C. K. Jeong, K. M. Baek, S. Niu, T. W. Nam, Y. H. Hur, D. Y. Park, G.-T. Hwang, M. Byun, Z. L. Wang, Y. S. Jung, and K. J. Lee, “Topographically-Designed Triboelectric Nanogenerator via Block Copolymer Self-Assembly,” *Nano Lett.*, **14** [12] 7031-38 (2014).
24. Z.-H. Lin, G. Zhu, Y. S. Zhou, Y. Yang, P. Bai, J. Chen, and Z. L. Wang, “A Self-Powered Triboelectric Nanosensor for Mercury Ion Detection,” *Angew. Chem. Ed. Int.*, **52** [19] 5065-69 (2013).

◎◎ 백정민



- 2006년 포항공과대학교 재료공학과 박사
- 2009년 산타바바라 대학 연구원
- 2010년 금오공과대학교 조교수
- 2013년 울산과학기술원 조교수
- 2014년 울산과학기술원 부교수