

액체-고체 계면의 습윤성 의존 수계발전 기작과 전도성 고분자

Hydrovoltaic Power Generation Mechanism Dependent on Wettability at the Liquid-Solid Interface with Conducting Polymers

장지수¹ · 이준우² | Ji-Soo Jang¹ · Junwoo Lee²

¹Electronic and Hybrid Materials Research Center, Korea Institute of Science and Technology (KIST),
5 Hwarang-ro 14-gil, Seongbuk-gu, Seoul 02792, Korea

²Department of Molecular Science and Technology, Ajou University,
206, World cup-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi 16499, Korea
E-mail: junwoolee@ajou.ac.kr

1. 서론

수계발전은 물의 증발과 흐름 같은 자연적 과정을 활용하여 지속 가능한 전력을 생산하는 혁신적 기술로, 깨끗하고 재생 가능한 에너지를 제공할 가능성을 제시한다.¹ 이는 전 세계적으로 증가하는 에너지 수요를 해결할 수 있는 대안으로 주목받고 있으며, 물과 특정 나노물질 간의 상호작용을 통해 운동 에너지나 위치 에너지를 전기 에너지로 변환하는 방식을 따른다.² 흐름 유도 전기의 경우, 나노물질 표면 위를 흐르는 물이 전자를 이동시켜 전류를 생성하며,³ 확산 유도 방식에서는 나노물질로 코팅된 표면에서 물이 증발할 때 전하 이동으로 인해 전류가 발생한다.⁴ 이처럼 수계발전은 다양한 물질 및 설계 전략에 따라 성능이 달라질 수 있으며, 이를 기반으로 차세대 고효율 및 친환경 발전 장치의 연구와 응용을 촉진해야 한다.

발전 특성은 사용된 기관의 친수성 또는 소수성에 따라 크게 달라진다. 친수성 기관은 물과 강한 상호작용을 통해 물 분자를 균일하게 분포시켜 증발 속도를 높이고 발전 효율을 증대시킨다.^{5,6} 반면, 소수성 기관은 물과의 약한 친화력으로 인해 물방울 형태를 형성하며, 특정 영역에 전자 이동이 집중되어 빠른 증발로 높은 전류 밀도를 제공할 수 있다.^{7,8} 이러한 특성들은 기관 설계와 재료 선택의 중요성을 강조하며, 수계발전의 성능 최적화를 위한 핵심 요소로 작용한다.

이와 관련해 고분자 재료는 유연성과 가공성이 뛰어나 수계발전에 적합한 핵심 재료로 주목받고 있다. 고분자는 무기 재료에 비해 가볍고 유연하며, 복잡한 구조 구현과 높은 기계적 내구성을 동시에 제공한다.⁹ 특히, 고분자는 화학적 변형을 통해 물리적 및 화학적 특성을 정밀하게 조절할 수 있어 이온 선택투과성, 전도성, 안정성 등 수계발전에 필요한 물성을 최적화할 수 있다. 특히 전도성 고분자는 이온과 전자의 이동을 효과적으로 조절하여 전기적 성능을 향상시키며, 다양한 환경에서도 안정적으로 작동한다. 이러한 고분자의 특성은 수계발전 장치에서 전하 이동, 물리적 흡착, 에너지 변환 효율을 극대화하는 데 중요한 역할을 한다.

결론적으로, 고분자는 수계발전과 같은 신재생 에너지 분야에서 유망한 재료로 자리 잡고 있으며, 앞으로 정밀한 물질 설계와 공정 기술의 발전은 수계발전의 효율과 안정성을 크게 향상시켜 지속 가능한 에너지 기술 구현에 기여할 것이다.

Author



장지수

2014 한양대학교 신소재공학과 (학사)
2016 카이스트 신소재공학과 (석사)
2020 카이스트 신소재공학과 (박사)
2020-2021 예일대학교 화학환경공학과 (Post-Doc.)
2021-현재 한국과학기술연구원(KIST) 선임연구원



이준우

2015 전북대학교 고분자나노공학과 (학사)
2020 포항공과대학교 화학공학과 (박사)
2021-2024 예일대학교 화학환경공학과 (Post-Doc.)
2024-현재 아주대학교 응용화학/분자과학기술학과 조교수

2. 본론

2.1 수계발전 작동 기작

수계발전에서 가장 중요한 요소는 물과 고체 표면 간 계면에서 발생하는 반응이다. 따라서 물 분자와 고체 표면 간의 결합 특성을 먼저 고려하는 것이 필수적이다. 물의 에너지가 고체 표면으로 효과적으로 전달되는 방식을 이해하기 위해서는 표면 에너지에 따라 달라지는 물과 고체 표면 간의 상호작용 특성을 파악해야 한다. 고체 표면은 분자의 특성에 따라 서로 다른 표면 에너지를 가지며, 물이나 오일과 같은 액체와 접촉할 때 각기 다른 습윤성을 나타낸다. 일반적으로 높은 표면 에너지를 가진 고체는 물이 표면에 잘 퍼지는 습윤 특성(친수성)을 나타낸다(그림 1a). 반대로 낮은 표면 에너지를 가진 고체는 물의 습윤을 저항하는 특성(소수성)을 가진다. 이러한 습윤 특성은 물방울의 접촉각으로 측정되며, 접촉각이 낮으면 친수성을, 접촉각이 높으면 소수성을 나타낸다.

습윤 특성의 대표적인 지표 중 하나는 친수-소수 균형(hydrophilic-lipophilic balance, HLB)이다. HLB는 친수성과 소수성 간의 균형을 나타내며, 물과 오일이 얼마나 잘 혼합될 수 있는지를 설명한다. HLB 값은 0에서 20까지의 범위를 가지며, 낮은 값은 소수성이 강하고 오일과의 혼합성이 좋은 것을 의미하며, 높은 값은 친수성이 강하고 물과의 혼합성이 좋은 것을 의미한다. 이러한 특성은 분자 표면의 화학적 작용기에 의해 결정되며, 친수성 작용기를 기반으로 계산될 수 있다.

물과 고체 표면이 접촉할 때 형성되는 전기 이중층(electrical double layer, EDL)은 물 에너지 수확에 큰 영향을 미친다. EDL은 이온이 고체 표면에 흡착되는 표면층(stern layer)과 그러한 이온에 의해 유도된 반대 이온으로 구성된 확산층으로 이루어져 있다. EDL은 강한 전기장을 생성하고 전위 기울기를 형성하여 전기 에너지를 발생시킨다. 이 전위는 제타 전위(zeta potential)라고 하며, 고체의 표면 전하에 따라 달라진다.

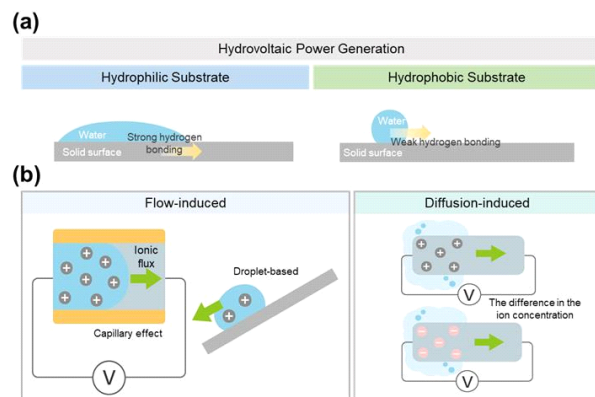


그림 1. (a) 친수성/소수성 기판에 따른 접촉각 차이. (b) 수계발전의 기작.

즉, 물과 고체 간의 상호작용은 고체의 표면 에너지에 의해 영향을 받고, 이러한 에너지는 습윤 정도에 영향을 미친다. 따라서, EDL에 의해 유도되는 전기 에너지는 표면 에너지 차이에 의해 영향을 받으며, 이러한 요소를 종합적으로 이해하는 것이 중요하다.

일반적으로 친수성 기판은 물과 더 강한 수소 결합을 형성하며, 소수성 기판은 상대적으로 약한 결합을 형성한다. 따라서 EDL 형성으로 인해 발생하는 잠재적 에너지는 일반적으로 친수성 기판에서 더 높다. 그러나 유체역학적 관점에서 보면, 물 분자는 기판과의 결합이 약한 소수성 기판 위에서 더 자유롭게 이동한다. 물 에너지 수확은 기판에서의 EDL 형성에 의해 생성된 잠재 에너지와 물의 이동성이라는 유체역학적 관점 모두에 영향을 받기 때문에, 적합한 기판의 선택은 특정 응용 분야에 따라 달라진다.

2.2 친수성/소수성 기판에서의 수계발전

친수성 기판은 물 분자와 결합하여 강한 수소 결합을 형성하며, 이는 수계발전에 활용된다.¹⁰ 친수성 기판을 이용한 수계발전의 메커니즘은 흐름(flow)과 확산(diffusion)으로 분류될 수 있다(그림 1b). 흐름 메커니즘은 장치 내 압력 차이를 유도하여 물의 움직임에 기반해 전력을 생성하는 방식이다.¹¹ 대부분의 흐름 유도형 수계발전에서, 모세관 힘에 의해 좁은 채널을 통해 유도된 물의 흐름은 채널 내 이온 플럭스를 유도하여 외부 회로에 전류를 발생시킨다.¹² 반면, 확산 메커니즘은 장치 내 이온 농도 차이에 의해 구동되며, 이는 공기로부터 수분이 흡착되거나 탈착되는 과정에서 발생한다. 이 메커니즘은 용매 내 이온 농도가 다를 때 고농도에서 저농도로 확산하여 평형을 이루는 현상에 기반한다. 이 메커니즘은 이온 흐름에 의존하여 전력을 생성한다.

소수성 물질을 통한 에너지 생성 현상은 표면 전기화(surface electrification)에서 비롯된다.¹³ 이는 소수성 물질이 물 분자와 상호작용하는 과정에서 발생한다. 접촉 시, 음전하를 띤 소수성 표면은 물방울에 존재하는 양이온을 끌어들이며 계면에서 전기 이중층을 형성한다.¹⁴ 이후 물방울이 움직이면, 소수성 표면-물방울 계면을 따라 전하가 이동하게 되고, 이 과정에서 전하 불균형이 해소되며 전류가 생성된다. 친수성 표면은 물 분자를 끌어당기는 힘을 통해 물 방울의 움직임을 유도하지만, 소수성 물질은 물방울을 움직이게 할 내재적 동력이 부족하다. 따라서 소수성 표면 위에서 물방울의 움직임은 장치의 기울기나 이동하는 물방울의 도입과 같은 외부 동력에 의존한다. 이러한 역동적인 과정이 수계 에너지 생성을 가능하게 한다.

2.3 수계발전 속 전도성 고분자 재료

재료의 전도 특성을 향상시키기 위해, 전도성 고분자가

표 1. 기작 및 재료에 따른 수계발전 비교

기판	기작	재료	전위 (V)	전류 (A)/ 전류밀도 (A cm ⁻²)
친수성	흐름	rGO	0.53	1.5 $\mu\text{A cm}^{-2}$
		Natural wood	0.3	10 μA
	확산	G. Sulfurreducens biofilm	0.53	2.28 μA
		Protein nanowire	0.53	250 nA
		Carbon black	0.43	10.05 μA
		GO	0.45	0.9 $\mu\text{A cm}^{-2}$
		PEDOT:PSS	0.55	22 $\mu\text{A cm}^{-2}$
소수성	흐름	PEDOT:PSS	0.58	4.2 $\mu\text{A cm}^{-3}$
		MoS ₂	5	5 nA
		PEDOT:PSS/CNTs/ Nanofiltration membrane	0.24	82.3 μA

유망한 후보로 떠오른다. 이러한 고분자는 용매 내에서의 용이한 분산을 제공하여 간소화된 공정 처리를 가능하게 한다. 또한, 고분자는 다양한 작용기와 물성을 도입할 수 있어 이온 선택투과성과 같은 뛰어난 장점을 제공한다. 더불어, 전도성 고분자는 수계발전기에 사용되는 다른 재료에 비해 우수한 전도성을 나타내며, 이를 통해 높은 전류 생성을 가능하게 한다(표 1).

그림 2a에서는 이온 선택투과성 셀룰로오스/PEDOT(poly(3,4-ethylenedioxythiophene)) 수계발전기가 조사되었다.¹⁵ PSS(polystyrene sulfonate)의 설펡산기에서 유래한 음전하는 PEDOT 막이 양이온과 상호작용하는 경향을 나타낸다. 이 상호작용은 정전기적 흡착을 통해 전하 밀도를 증가시키며, 물의 물리적 흡착 또한 포함된다. 이 장치의 성능은 저항에

따라 달라지며, 탈이온수(DI water)를 사용할 경우 약 $0.413 \mu\text{A cm}^{-3}$ 의 전류 밀도를 나타낸다. 그러나 LiCl 용액과 같은 전해질을 사용할 경우 에너지 밀도가 크게 증가한다(0.24 mA cm^{-3}). 연구진은 땀이나 해수와 같은 이온 용액이 더 높은 전기 성능을 발휘할 가능성이 있다고 제안한다.

그림 2b에서는 수평으로 배치된 PEDOT:PSS 및 흑연 코팅된 셀룰로오스 직물 전극이 수직형 실리콘 나노와이어와 결합되어 증발 및 전기 생성을 촉진하는 구성을 보여준다.¹⁶ 나무와 유사한 실리콘 나노와이어의 친수성은 높은 모세관 힘을 가능하게 한다. 셀룰로오스 직물의 표면적은 흑연을 반복적으로 적재하여 향상되었으며, 이는 BET(Brunauer-Emmett-Teller) 비표면적 분석을 통해 확인되었다. 전기 성능 측정 결과, 전압과 전류 밀도는 이 개념적 프레임워크에 따라 온도가 상승함에 따라 증가한다. 상온에서 이 장치는 약 0.5 V의 출력 전압과 $20 \mu\text{A cm}^{-2}$ 의 전류 밀도를 달성한다.

3. 결론

수계발전은 물과 고체 표면 간의 계면 반응을 활용하여 지속 가능한 전력을 생성하는 첨단 기술로, 표면 과학의 응용을 대표한다. 본 연구에서는 친수성 및 소수성 기판의 특성과 이를 활용한 흐름 및 확산 메커니즘을 중심으로 다양한 작동 원리와 재료 설계 전략을 제시한다. 또한, 고분자 재료의 활용을 통해 전기 성능을 향상시키고, 환경 친화적이고 지속 가능한 에너지 생산 기술로서의 가능성을 입증한다.

수계발전의 혁신성은 소재 선택의 범용성과 유연성에 있으며, 이는 상업화 가능성을 높이는 중요한 요소로 작용한다. 그러나 장기 안정성, 높은 성능 및 효율성, 수자원 관리와 같은 과제를 해결하는 것이 여전히 필요하다. 이러한 기술은 미래의 고효율, 친환경 에너지 시스템뿐만 아니라 다양한 센서 및 생체의학 응용으로 확장될 수 있는 잠재력을 지니고 있다.

참고문헌

1. J. Yin, J. Zhou, S. Fang, and W. Guo, *Joule*, **4**, 1852 (2020).
2. H. Su, A. Nilghaz, D. Liu, L. Dai, J. Tian, J. M. Razal, K. Tang, and J. Li, *Nano Energy*, **116**, 108819 (2023).
3. H. Wang, Y. Sun, T. He, Y. Huang, H. Cheng, C. Li, D. Xie, P. Yang, Y. Zhang, and L. Qu, *Nat. Nanotechnol.*, **16**, 811 (2021).
4. T. G. Yun, J. Bae, A. Rothschild, and I.-D. Kim, *ACS Nano*, **13**, 12703 (2019).
5. J. Drelich, E. Chibowski, D. D. Meng, and K. Terpilowski, *Soft Matter*, **7**, 9804 (2011).
6. G. Xue, Y. Xu, T. Ding, J. Li, J. Yin, W. Fei, Y. Cao, J. Yu, L. Yuan, L. Gong, J. Chen, S. Deng, J. Zhou, and W. Guo, *Nat. Nanotechnol.*, **12**, 317 (2017).

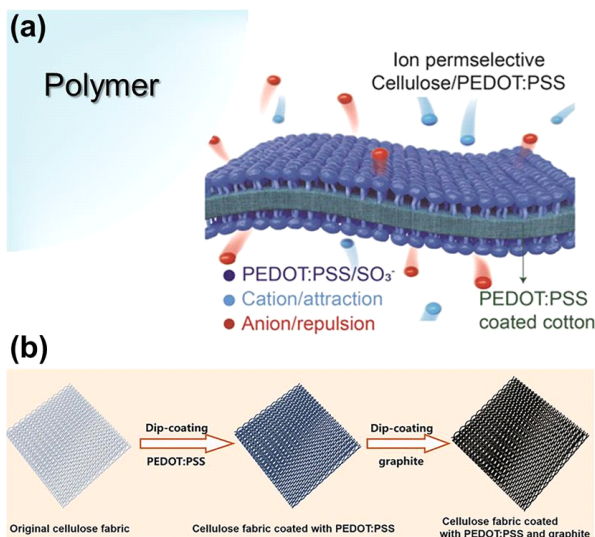


그림 2. (a) PEDOT:PSS의 이온 투과성을 이용한 수계발전, (b) 흑연-PEDOT:PSS 복합체를 이용한 수계발전.

7. F. Taherian, V. Marcon, N. F. van der Vegt, and F. Leroy, *Langmuir*, **29**, 1457 (2013).
8. A. S. Aji, R. Nishi, H. Ago, and Y. Ohno, *Nano Energy*, **68**, 104370 (2020).
9. Y. Yang, H. Deng, and Q. Fu, *Mater. Chem. Front.*, **4**, 3130 (2020).
10. J.-m. Zheng, W.-C. Chin, E. Khijniak, E. Khijniak Jr, and G. H. Pollack, *Adv. Colloid Interface Sci.*, **127**, 19 (2016).
11. G. A. H. Elton, *Nature*, **161**, 847 (1948).
12. H.-J. Butt and M. Kappl, *Adv. Colloid Interface Sci.*, **146**, 48 (2009).
13. I. Langmuir, *J. Am. Chem. Soc.*, **60**, 1190 (1938).
14. D. C. Grahame, *Chem. Rev.*, **41**, 441 (1947).
15. T. G. Yun, J. Bae, H. G. Nam, D. Kim, K. R. Yoon, S. M. Han, and I.-D. Kim, *Nano Energy*, **94**, 106946 (2022).
16. B. Shao, Z. Song, X. Chen, Y. Wu, Y. Li, C. Song, F. Yang, T. Song, Y. Wang, S.-T. Lee, and B. Sun, *ACS Nano*, **15**, 7472 (2021).