

다중벽 탄소나노튜브 및 산화그래핀 층간 적층 코팅을 이용한 하이드로볼타익 발전기 연구

오지수* · 황희재*[†]

The Study on Hydrovoltaic Generator using Multi-Walled Carbon Nanotube and Graphene Oxide Layer-by-Layer Method

Ji-Soo Oh*, Hee Jae Hwang*[†]

ABSTRACT: Hydrovoltaic technology is an emerging energy harvesting approach that generates direct-current electricity from a single carbon-based device by utilizing the potential difference between wetted and non-wetted regions. In this work, we fabricated hydrovoltaic generators by layer-by-layer (LbL) assembly of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) and graphene oxide (GO) on cellulose-based Korean traditional paper (Hanji), whose strong capillarity promotes efficient water transport. The alternating stacking of highly conductive MWCNTs and oxygen-functionalized GO forms a hierarchical architecture that optimizes charge generation and transport. The device with three MWCNT/GO bilayers (MC-G#3) delivered a peak short-circuit current of 15.55 μA with only 20 μL of water, representing a 2.55-fold enhancement over the MWCNT-only device (MWCNT#3). The correlation between the capacitance ratio (wet vs dry) and output current further highlights the role of the electrical double layer (EDL), while multi-device connection and external-load matching experiments demonstrated a maximum load-delivered power of 0.05897 μW at 47 k Ω , indicating the potential of this system as a practical miniaturized power source.

초 록: 하이드로볼타익(Hydrovoltaic) 기술은 탄소 기반 소자를 활용하여 소자 내 젖음-비젖음 영역 간 전위차를 통해 DC 전기를 발생시키는 유망한 에너지 하베스팅 기술이다. 본 연구에서는 우수한 모세관 현상을 지닌 셀룰로오스 기반 한지에 다중벽 탄소나노튜브(MWCNT)와 산화그래핀(GO)을 Layer-by-Layer(LbL) 방식으로 적층하여 하이드로볼타익 소자를 제작하였다. 특히, 전도성이 뛰어난 MWCNT와 산소작용기가 풍부한 GO를 교차 적층함으로써 두 물질의 특성을 상호보완하고, 전하 생성과 수송을 최적화한 계층적 구조를 구현하였다. MWCNT/GO를 3번 교차 코팅한 소자(MC-G#3)는 단 20 μL 의 물만으로 15.55 μA 의 피크 단락전류를 발생시켰으며, 이는 MWCNT 단독 3회 코팅 소자(MWCNT#3) 대비 2.55배 향상된 수치이다. FE-SEM 분석과 라만 분광 분석을 통해 견고한 계면 적층을 확인하였으며, 젖음 상태와 건조 상태에서의 정전용량비를 측정하여 전기이중층(EDL) 강도와 소자 출력간의 상관관계를 간접적으로 제시하였다. 더 나아가, 다중 소자 직/병렬 연결을 통해 선형적인 출력 스케일업을 증명하였고, 외부 부하 매칭 실험에서 47 k Ω 일 때 0.05897 μW 의 최대 부하 전달 전력을 달성하여 실질적인 전원으로서의 잠재력을 입증하였다.

Key Words: 하이드로볼타익(Hydrovoltaic), 에너지 하베스팅(Energy harvesting), 층간 적층(Layer-by-Layer), 다중벽 탄소나노튜브(Multi-walled carbon nanotube), 산화그래핀(Graphene oxide)

1. 서 론

화석 연료 고갈과 환경 문제로 인해 주변 환경에 버려지는 에너지를 수확하여 전기에너지로 변환하는 에너지 하베스팅 기술의 중요성이 대두되고 있다[1-3]. 그중에서도 지구 표면의 막대한 면적을 차지하는 물의 순환, 특히 물의 증발을 이용하는 수분 유도 발전(Hydrovoltaic power generation)은 시간과 장소에 구애받지 않고 연속적인 에너지 생산이 가능하다는 점에서 차세대 친환경 에너지원으로 각광받고 있다. 수력 발전 소자의 핵심 구동 원리는 다공성 매질 내에서 물 분자가 모세관 현상에 의해 이동할 때 발생하는 고체-액체 계면에서의 상호작용에 기반한다. 물이 매질을 통과하면서 표면의 관능기가 해리되고 전기이중층(Electric Double Layer, EDL)이 형성되며, 이때 유체의 흐름에 의해 이온이 비대칭적으로 분포하면서 유동 전위(Streaming potential) 및 유동 전류가 발생한다. 이러한 유동 전위는 고체 표면의 제타 전위(Zeta potential)와 유체의 흐름 속도에 비례하므로, 따라서 소자의 출력 성능을 높이기 위해서는 물의 이동 통로가 되는 다공성 구조의 제어와 계면에서의 이온 분리를 극대화할 수 있는 표면 특성 설계가 필수적이다[4,5]. 본 연구에서는 강력한 모세관 현상을 제공하는 한지(Hanji)를 기판으로 채택하였다. 셀룰로오스 기반의 한지는 친수성을 띠고 있어 합성 고분자 기판 대비 수분과의 상호작용에 유리한 이점을 지닌다. 여기에 전기 전도성이 뛰어난 MWCNT와, 친수성 산소 작용기가 풍부하여 물과의 상호작용에 유리한 GO[6,7]를 Layer-by-Layer(LbL) 방식으로 교차 적층하여 이온 이동에 최적화된 계면 구조를 설계하였다[8,9]. 이를 통해 단일 소재가 갖는 형태학적, 전기적 한계를 보완하고, 계면에서의 전하 생성과 수송을 동시에 향상시킬 수 있는 하이브리드 소자 설계 방안을 제시하고자 한다.

2. 실험 방법

기판으로는 유연성과 기계적 강도가 뛰어난 상용 한지를 2.5 cm × 4 cm 크기로 재단하여 사용하였다. 활성 물질인 다중벽 탄소나노튜브(MWCNT)와 Hummers 법으로 합성된 산화그래핀(GO) 분말을 각각 탈이온수에 투입하여 0.5 wt% 농도의 분산액을 제조하였으며, 입자 응집을 위해 초음파 분산기(Ultrasonic Homogenizer)로 약 60분간 분산 처리하였다. 다층 구조를 갖는 수력발전 소자는 Fig. 1의 모식도와 같이 딥코팅(Dip-Coating) 공정을 통해 제작되었다.

소자 제작에 앞서 한지 표면의 불순물 제거 및 나노 물질 결합력 향상을 위해 O₂ 플라즈마 전처리를 진행하였다. 본 연구에서는 MWCNT/GO 기반 전도성 네트워크 형성과 한지 기판의 모세관 수분 이동성을 동시에 고려하여 코팅 횟

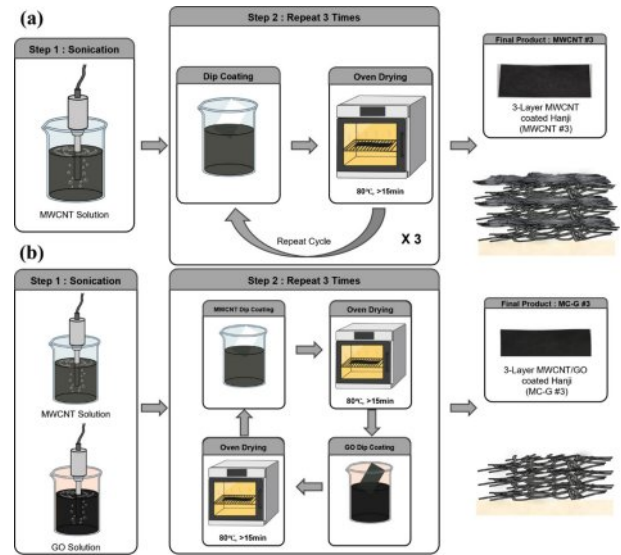


Fig. 1. Schematic illustration of the fabrication process for (a) the 3-layer MWCNT-coated Hanji (MWCNT#3) and (b) the layer-by-layer 3-layer MWCNT/GO-coated Hanji (MC-G#3) using a dip-coating method

수를 2회 및 3회로 설정하였다. 1회 코팅의 경우 한지 섬유 표면에 MWCNT와 GO가 부분적으로만 부착되어 연속적인 전도성 경로 및 MWCNT/GO 간 계면 네트워크 형성이 충분하지 않을 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 한지 표면에 안정적인 탄소 기반 네트워크가 형성될 수 있는 최소 반복 조건으로 2회 코팅을 설정하였으며, 추가 적층에 따른 전하 수송성 향상 여부를 비교하기 위해 3회 코팅 조건을 함께 평가하였다. MWCNT 단일 코팅 소자(MWCNT#2, MWCNT#3)는 전처리된 한지를 0.5 wt% MWCNT 용액에 완전히 침지 후 오븐에서 건조하는 과정을 2~3회 반복하여 제작하였다. 반면 MWCNT/GO 적층 소자(MC-G#2, MC-G#3)는 한지를 MWCNT 용액에 침지 및 건조한 후, 이어서 GO 용액에 침지 및 건조하여 덮는 과정을 1 사이클로 설정하여 각각 2회 및 3회 반복하였다. 이때 수분 접촉을 극대화하기 위해 최상단 표면은 항상 GO 층으로 마감되도록 설계하였다. 매 코팅 후 80°C 이상의 오븐 건조 과정은 수분을 완전히 증발시켜 물질 간의 물리적 결합을 고정하는 역할을 한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전하 분업 매커니즘 및 전기적 출력 특성

Fig. 2는 소자에 수분이 공급되었을 때 각 소자의 전기적 출력 특성, 내부 저항 및 피크 기반 계산 전력 지표를 비교한 결과이다. Fig. 2(a)의 측정 실사 사진에서 볼 수 있듯이, 외부 전력 공급 없이 소자의 한쪽 표면에 일정량(20 μ L)의 탈이온수를 적서 유도된 모세관 현상을 바탕으로 성능을 측

정하였다. Fig. 2(b)와 (c)는 수분 접촉 직후 발생하는 실시간 전압 및 전류의 변화를 보여준다.

전류의 경우 물방울이 닿는 즉시 급격한 피크 상승을 보인 후 안정기에 접어드는 경향을 보였는데, 특히 MC-G#3 소자가 물방울 투하 직후 가파른 상승세를 보이며 가장 높은 피크 단락전류를 기록하였다. 이는 Fig. 2(d)에서 극명하게 나타난다. MC-G#3 샘플의 피크 전류는 약 15.55 μA 에 도달하여, 동일 횟수로 코팅된 MWCNT#3 소자(6.11 μA) 대비 2.55배에 달하는 비약적인 성능 향상을 이루었다. 비록 전압 피크 측면에서는 MC-G 샘플이 MWCNT 단독 샘플과 유사하거나 소폭 낮게 형성되는 현상이 관찰되었으나, 전류량의 증가가 이를 압도하였다. 이는 최외각의 GO 층이 물을 넓게 흡수하여 다량의 이온을 해리하고, 하단의 전도성 MWCNT 네트워크가 이를 빠르게 수송하는 전하 생성 및 수송의 분업화가 성공적으로 이루어졌음을 의미한다.

이러한 시너지 효과는 Fig. 2(e)에서도 확인된다. MC-G #3 소자는 상대적으로 낮은 전기전도성을 갖는 GO가 반복적으로 적층되었음에도 불구하고, 하부 MWCNT 네트워크의 전도성 경로 형성으로 인해 시스템 전체의 내부 저항이 낮게 유지되었다. 결과적으로 Fig. 2(f)에서 확인할 수 있듯이, 높은 피크 단락전류(I_{SC})와 낮은 내부 저항을 확보한 MC-G#3

소자는 비교군 중 가장 높은 피크 기반 계산 전력 지표를 나타냈다. 여기서 Fig. 2(f)의 4.869 μW 는 외부 부하 저항을 연결하여 측정된 실제 부하 전달 전력이지, 개별 소자의 피크 개방전압과 피크 단락전류를 바탕으로 산출한 상대 비교용 지표이다. 즉, Fig. 2(f)의 전력 지표는 $P = V_{max} \times I_{max}$ 로 계산되었으며, 이는 각 소자의 순간적인 전압 및 전류 생성 능력을 비교하기 위한 값이다. 따라서 이 값은 소자 간 출력 성능을 비교하기 위한 지표로 사용되며, Fig. 4(d)의 외부 부하 매칭 실험에서 산출된 최대 부하 전달 전력과 구분된다. MC-G#3 샘플의 피크 기반 계산 전력 지표는 4.869 μW 로, MWCNT#3의 2.173 μW 대비 2배 이상 높게 나타났다.

3.2 계면 결합 및 미세 구조 분석

Fig. 3는 MWCNT와 GO의 분말과 코팅이 완료된 소자의 FE-SEM 이미지 및 라만 분광 스펙트럼 분석 결과를 보여준다. Fig. 3(a)의 FE-SEM 이미지를 통해 MWCNT 분말은 가느다란 1차원 실 형태를 띠고 있으며, GO 분말은 넓고 평평한 2차원 면 구조를 가짐을 확인했다. 코팅된 소자의 표면을 비교해 보면, Fig. 3(b)의 MWCNT 단일 코팅 샘플은 한 지의 섬유를 따라 1차원의 MWCNT가 불규칙하게 엉겨 붙

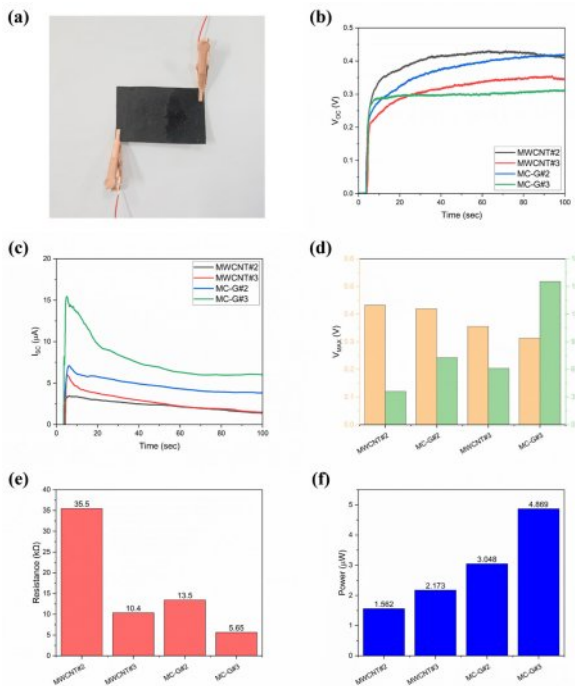


Fig. 2. Electrical output performance of the hydrovoltaic generators. (a) Photograph of the fabricated device. (b) Open-circuit voltage (V_{OC}) and (c) short-circuit current (I_{SC}) generation curves of the MWCNT#2, MWCNT#3, MC-G#2, MC-G#3 samples over time. (d) Comparison of peak V_{OC} and peak I_{SC} values. (e) Internal resistance and (f) peak-based calculated power index of the different samples

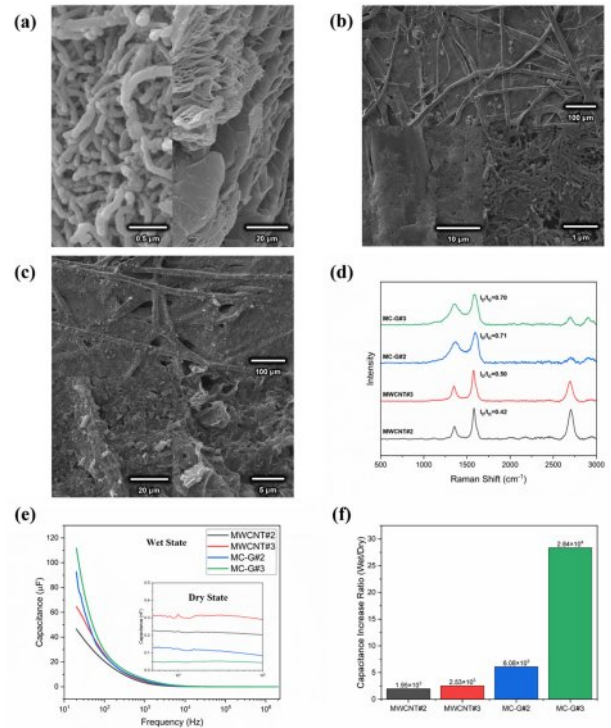


Fig. 3. Morphological, structural, and capacitance analyses. (a) FE-SEM images of MWCNT and GO powders. Surface FE-SEM images of (b) MWCNT#3 and (c) MC-G#3 coated Hanji. (d) Raman spectra. (e) Capacitance-frequency curves in wet and dry states. (f) Capacitance ratio (C_{wet}/C_{dry})

어 표면 네트워크를 형성하고 있다. 반면 Fig. 3(c)의 MWCNT-GO 복합 코팅 샘플에서는 MWCNT 네트워크의 빈 공간을 2차원의 GO 시트가 막처럼 덮고 있어 다리 역할을 수행하며 훨씬 매끄럽고 조밀한 다공성 표면을 형성한 것을 알 수 있다.

두 물질의 성공적인 적층과 특성 변화는 라만 스펙트럼 데이터를 통해 증명된다. Fig. 3(d)의 분석 결과, MWCNT#2 및 #3 샘플의 I_D/I_G 비율은 0.42 및 0.50으로 상대적으로 낮게 나타나 MWCNT 특유의 우수한 결정성을 유지하고 있음을 보였다. GO가 적층된 MC-G#2 및 MC-G#3 샘플의 경우 I_D/I_G 비율이 각각 0.71 및 0.70으로 상승하였다. 이는 GO 시트 표면과 가장자리에 다량 존재하는 산소 함유 작용기 (-COOH, -OH 등)가 sp^2 탄소 격자의 결함(Defect) 부위를 증가시켰기 때문이다[10].

수분 흡수에 따른 소자의 동적 전기화학 거동과 전하 분업 메커니즘을 규명하기 위해 주파수에 따른 정전용량(Capacitance) 변화를 분석하였다. Fig. 3(e)의 삽입 그래프(Inset)에서 볼 수 있듯, 수분이 없는 건조(Dry) 상태에서는 절연성 산소 작용기를 지닌 GO 층이 저항 성분으로 작용하여 MC-G 코팅 소자의 정전용량이 순수 MWCNT 소자보다 다소 낮게 측정되었다. 그러나 수분이 공급된 습윤(Wet) 상태(Fig. 3(e) 메인 그래프)에서는 이러한 경향성이 완전히 역전되어 MC-G#3 소자가 가장 높은 정전용량을 기록하였다. 이는 LbL 공정으로 도입된 GO 층이 전기의 흐름을 방해하는 한계를 뛰어넘어, 오히려 풍부한 친수성 작용기를 통해 모세관 현상을 극대화하는 역할을 수행했음을 입증한다. GO의 강력한 친수성 덕분에 수분이 3D 다공성 네트워크 깊숙이 침투하여 거대한 전기이중층을 성공적으로 형성한 것이다. 특히 Fig. 3(f)에서 확인할 수 있듯, MC-G#3 소자의 건조 상태 대비 수분 공급 시 정전용량 증가율(Capacitance increase ratio)은 약 2.36×10^4 배에 달하며 대조군 중 가장 큰 변화를 보였다. 결론적으로, MC-G#3 소자는 건조 상태에서 정적인 전하 저장 능력은 다소 낮게 나타날지라도, 실제 발전 환경에서는 극대화된 유동성(Streaming)과 거대한 EDL 형성을 통해 본 연구에서 가장 높은 피크 단락 전류($15.55 \mu A$)를 달성할 수 있는 핵심 시너지를 제공한다.

한편, 코팅 횟수가 4회 이상으로 증가할 경우 성능 향상이 선형적으로 지속되기는 어려울 것으로 예상된다. 한지는 셀룰로오스 섬유가 얇은 다공성 구조를 가지며, 이러한 구조는 수분의 빠른 흡수와 모세관 이동을 가능하게 하는 본 소자의 핵심 기관 특성이다. 코팅 횟수 증가는 초기에는 MWCNT 네트워크의 연결성을 향상시켜 전하 수송에 유리하게 작용할 수 있다. 그러나 일정 횟수 이상에서는 탄소 기반 코팅층의 두께가 증가하면서 한지 섬유 사이의 미세 기공이 부분적으로 덮이거나 막힐 수 있으며, 이로 인해 한지가 본래 가지는 수분 흡수성, 모세관 이동성 및 증발 특성이 저하될 가능성이 있다. 또한 MC-G 구조에서는 최상

단 GO 층이 수분 흡수와 이온 해리에 기여하지만, GO는 산소 함유 작용기로 인해 상대적으로 낮은 전기전도성을 가지므로 과도한 GO 적층은 내부 저항 증가와 전하 수송 지연을 유발할 수 있다. 따라서 본 연구에서 MC-G#3가 가장 높은 출력을 보인 것은 단순히 코팅량 증가에 따른 결과라기보다, MWCNT 네트워크에 의한 전하 수송성과 GO 층에 의한 수분-계면 상호작용, 그리고 한지 기관의 모세관 수분 이동성이 균형을 이룬 결과로 예상된다. 향후 연구에서는 4회 이상의 반복 코팅 조건에서 한지 기공 구조의 변화, 수분 이동성, 증발 특성, 내부 저항 및 출력 안정성을 정량적으로 비교하여 최적 적층 조건을 추가적으로 검증할 필요가 있다.

3.3 소자 스케일업 및 임피던스 매칭

에너지 하베스터로서의 상용화 및 실질적 응용 가능성을 평가하기 위해, 본 연구에서 가장 높은 출력 특성을 보인 MC-G#3 소자를 이용하여 스케일업 및 부하 임피던스(Load Impedance) 실험을 진행하였다.

먼저 소자의 발전 용량 스케일업을 확인하기 위해 직렬 및 병렬 연결 시험을 수행하였다. Fig. 4(a)에서 확인할 수 있듯이, 소자를 직렬로 연결한 경우 연결된 소자의 개수에 비례하여 출력 전압이 계단식으로 상승하는 거동을 보였다. 반대로 병렬 연결 시에는 전압은 일정하게 유지되나, Fig. 4(b)에 나타난 바와 같이 단락 전류가 소자 개수에 비례하여 선형적으로 증가하였다. 이는 본 하이드로볼타익 소자가 일관된 극성을 가지며, 옴의 법칙을 따르는 안정적인 전력원으로서 회로 구성을 통해 기기가 요구하는 규격의 전압과 전류를 출력해낼 수 있음을 입증한다.

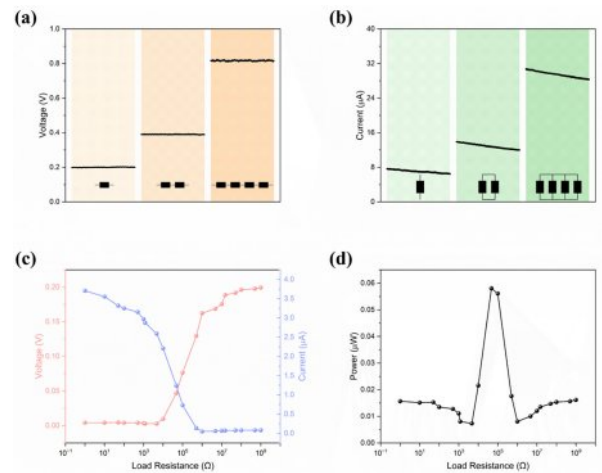


Fig. 4. Scalability and practical load-delivered power evaluation of the hydrovoltaic generator. Output (a) voltage and (b) current of multiple devices connected in series and parallel, respectively. (c) Output voltage and current, and (d) load-delivered power of the device as a function of external load resistance

또한, 외부 기기 구동 시 실제로 전달되는 전력을 평가하기 위해 가변 저항기를 활용한 부하 매칭 분석을 수행하였다. Fig. 4(c)는 외부 부하 저항값의 증가에 따른 실험 전압과 전류의 변화 추이를 보여준다. 부하 저항이 증가할수록 전류는 점진적으로 감소하고 전압은 상승하여 개방 회로 상태에 수렴하는 전형적인 전원 장치의 거동을 나타냈다. Fig. 4(d)의 전력은 외부 부하 저항을 실제로 연결한 상태에서 부하 양단의 V_{rms} 와 I_{rms} 를 이용하여 산출한 부하 전달 전력(load-delivered power)이다. 부하 전달 전력은 $P = V_{rms} \times I_{rms}$ 로 계산되었으며, 소자 고유의 내부 저항과 외부 부하 저항이 매칭되는 47 k Ω 부근에서 최대값을 보였다. 이때 단일 소자의 최대 부하 전달 전력은 0.05897 μ W로 측정되었다. 이 값은 Fig. 2(f)의 피크 기반 계산 전력 지표와 달리, 외부 부하에 실제로 전달 가능한 전력을 의미한다. 따라서 Fig. 2(f)의 4.869 μ W와 Fig. 4(d)의 0.05897 μ W는 산출 목적과 측정 조건이 서로 다른 값이며, 직접 비교되는 동일한 의미의 최대 전력이 아니다.

4. 결 론

본 연구에서는 전도성과 친수성이라는 상충되는 특성을 이상적으로 결합하기 위해, 다공성 한지 기반 위에 0.5 wt% 농도의 MWCNT와 GO를 교차 적층(LbL)하는 딥코팅 공정을 성공적으로 구현하였다. 라만 분광 분석을 통해 sp^2 탄소 격자에 산소 작용기가 안정적으로 도입되며 물질 간의 강력한 결합 네트워크가 형성되었음을 확인하였다. 전기적 출력 평가 결과, 최상단을 GO로 마감한 MC-G #3 소자는 최외각 GO 층의 폭발적인 수분 흡수 및 이온(H^+) 해리 능력과 내부 MWCNT 층의 효율적인 전하 수송 능력이 상호보완적으로 작용한 것으로 확인되었다. 특히 수분 공급 시 정전용량 증가율(Wet/Dry ratio)이 극대화되어 전기이중층 형성과 유동 전위 생성이 촉진된 것으로 해석된다. 결과적으로 GO의 친수성과 MWCNT 네트워크의 효율적인 전하 수송 능력이 조화를 이루어, 단순 MWCNT 3회 코팅 소자 대비 약 2.55배 향상된 15.55 μ A의 피크 단락 전류와 최저 수준의 내부 저항을 달성하였으며, 비교군 중 가장 높은 피크 기반 계산 전력 지표를 나타냈다. 또한, 다중 소자의 직렬 회로 구성을 통한 출력 스케일업과 외부 부하 임피던스 매칭을 통해 47 k Ω 에서 0.05897 μ W의 최대 부하 전달 전력을 입증하였다. 본 연구는 복잡한 장비 없이 전통적인 친환경 소재(한지)와 단순한 딥코팅 방식만으로 고효율 수력발전 소자를 설계하는 방법론을 제시하며, 향후 자가 발전 기반의 센서 및 웨어러블 디바이스를 위한 차세대 친환경 전력원 개발에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2025년도 교육부 및 경상북도의 재원으로 경북 RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)-(아이디어창업밸리) (2025-rise-15-105) 및 한국연구재단 세종과학펠로우십 RS-2022-NR072480)의 결과입니다.

REFERENCES

1. Zhang, Z., Li, X., Yin, J., Xu, Y., Fei, W., Xue, M., Wang, Q., Zhou, J., and Guo, W., "Emerging hydrovoltaic technology," *Nature Nanotechnology*, Vol. 13, No. 12, 2018, pp. 1109–1119.
2. Xue, G., Xu, Y., Ding, T., Li, J., Yin, J., Fei, W., Cao, Y., Yu, J., Yuan, L., Gong, L., Chen, J., Deng, S., Zhou, J., and Guo, W., "Water-evaporation-induced electricity with nanostructured carbon materials," *Nature Nanotechnology*, Vol. 12, No. 4, 2017, pp. 317–321.
3. Shen, D., Li, F., Zhao, J., Wang, R., Li, B., Han, Z., Guo, L., Han, P., Yang, D., Kim, H.H., Su, Y., Gong, Z., and Zhu, L., "Ionic Hydrogel-Based Moisture Electric Generators for Underwater Electronics," *Advanced Science*, Vol. 11, No. 43, 2024, 2408954.
4. Ko, H., Son, W., Kang, M.S., Lee, H.U., Chung, C.Y., Han, S., Choi, C., and Cho, S.B., "Why does water in porous carbon generate electricity? Electrokinetic role of protons in a water droplet-induced hydrovoltaic system of hydrophilic porous carbon," *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 11, No. 3, 2023, pp. 1148–1158.
5. Zheng, C., Chu, W., Fang, S., Tan, J., Wang, X., and Guo, W., "Materials for evaporation-driven hydrovoltaic technology," *Interdisciplinary Materials*, Vol. 1, No. 4, 2022, pp. 449–470.
6. Xu, T., Ding, X., Shao, C., Song, L., Lin, T., Gao, X., Xue, J., Zhang, Z., and Qu, L., "Electric power generation through the direct interaction of pristine graphene-oxide with water molecules," *Small*, Vol. 14, No. 14, 2018, 1704473.
7. Kim, M.S., Lee, H.Y., and Choi, S.W., "Research on Physicochemical Properties of Graphene Oxide (GO) and Reduced Graphene Oxide (R-GO)," *Composites Research*, Vol. 36, No. 3, 2023, pp. 167–172.
8. Wu, M., Liang, Z., Peng, M., Zhao, B., Li, D., Zhang, J., Sun, Y., and Jiang, L., "High evaporation rate and electrical conductivity synergistically boosting porous rGO/CNT Film for water evaporation-driven electricity generation," *Nano Energy*, Vol. 116, 2023, 108771.
9. Kim, J., Kim, J., Yoon, H., Park, M., Novak, T., Ashraful, A., ... and Jeon, S., "Simultaneous Exfoliation and Dispersion of Graphene/Carbon Nanotube via Intercalation Reaction and Its Application as Conductive Composite Film," *Composites Research*, Vol. 29, No. 3, 2016, pp. 104–110.
10. Lopez-Diaz, D., Delgado-Notario, J.A., Clerico, V., Diez, E., Merchan, M.D., and Velazquez, M.M., "Towards understanding the Raman spectrum of graphene oxide: the effect of the chemical composition," *Coatings*, Vol. 10, No. 6, 2020, 524.