

반응성 마그네트론 스퍼터링을 이용한 전이금속 질화물 이중층 전극 제작 및 음이온 교환막 수전해 적용

박주훈^{1,2} · 서종수^{1†}

¹한국에너지기술연구원 수소연구단, ²연세대학교 일반대학원 화학과

Fabrication of Transition Metal Nitride Bilayer Electrodes via Reactive Magnetron Sputtering and Their Application to Anion Exchange Membrane Water Electrolysis

JU HUN PARK^{1,2}, JONGSU SEO^{1†}

¹Hydrogen Research Department, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 34129, Korea

²Department of Chemistry, Yonsei University, Seoul 03722, Korea

[†]Corresponding author :
jsseo@kier.re.kr

Received 29 January, 2026
Revised 13 February, 2026
Accepted 20 February, 2026

Abstract >> Transition metal nitrides (TMNs) are promising catalysts for the hydrogen evolution reaction (HER), however, their conventional synthesis typically involves toxic ammonia gas. In this study, TMNs/Ni (TMNs = Ni₃N, CoN, and Cu₃N) bilayer electrodes are fabricated via reactive magnetron sputtering without the use of ammonia gas. Compared with single layer TMN electrodes, TMNs/Ni bilayer electrodes show significantly improved HER activity and reduced charge transfer resistance under alkaline conditions. Notably, Ni₃N/Ni electrode exhibits enhanced performance and stability, achieving a 100 mV lower cell voltage in an anion exchange membrane electrolysis cell (AEMEC). These results demonstrate the potential of sputtered TMN bilayer electrodes for efficient AEMEC applications.

Key words : Transition Metal Nitrides(전이금속 질화물), Electrocatalyst(전기화학 촉매), Hydrogen Evolution Reaction(HER)(수소 발생 반응), Magnetron Sputtering(마그네트론 스퍼터), Anion Exchange Membrane Electrolysis Cell(음이온 교환막 수전해)

1. 서론

산업혁명 이후 급격히 증가한 에너지 수요로 인해, 무분별한 화석 연료의 사용은 대기 중 온실가스 농

도를 급격히 증가시켜 지구온난화의 주요 원인으로 지목되고 있다. 지구온난화로 인한 기후 위기에 대응하기 위해 전 세계적으로 다양한 노력이 이루어지고 있으며, 이중 수소는 지속 가능한 에너지 사회를 구

현하기 위한 핵심 요소로 여겨지고 있다. 특히 재생 에너지 전력을 이용하여 물을 전기분해하여 얻는 그린수소는 탄소 배출이 없는 깨끗한 수소로서, 탄소중립을 이루기 위한 중요 열쇠로 활발히 연구가 진행되고 있다¹⁾.

수전하는 물을 전기분해하여 수소를 생산하는 기술이며, 구성요소 및 작동 환경에 따라 알칼라인 수전해(Alkaline Water Electrolysis Cell, AKLEC), 양성자 교환막 수전해(Proton Exchange Membrane Water Electrolysis Cell, PEMEC), 음이온 교환막 수전해(Anion Exchange Membrane Electrolysis Cell, AEMEC) 및 고체산화물 수전해(Solid Oxide Electrolysis Cell, SOEC) 등으로 나누어진다. 이 중 음이온 교환막 수전해는 알칼라인 수전해 기술과 양성자 교환막 수전해의 장점을 모두 아우르는 차세대 기술로서, 재생 에너지 전력의 특징인 부하변동 환경에서의 운전이 용이하고, 알칼라인 환경에서 작동하기 때문에 비귀금속 계열의 소재를 활용할 수 있어 가격이 저렴하다는 장점을 지닌다^{2,3)}. 하지만, 실제 물 분해 반응이 일어나는 전극 촉매의 경우 비귀금속 계열의 촉매는 여전히 귀금속 계열의 촉매 대비 저조한 성능 및 내구성을 보여 음이온 교환막 수전해의 상용화 촉진을 위해 비귀금속 기반의 고성능/고내구성의 촉매를 개발하는 것은 절실한 상황이다.

귀금속 촉매를 대체하기 위해, 전이 금속, 산화물, 황화물, 인화물 및 질화물 등 다양한 비귀금속 기반의 물질을 활용하여 전극 촉매를 개발하고자 하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다⁴⁾. 이중 전이 금속 질화물(Transition Metal Nitrides, TMNs)은 우수한 내식성뿐만 아니라, 질소와 금속 사이의 결합 제어를 통한 전자 구조 제어를 통해 전기화학적 활성이 크게 향상될 수 있어 최근 많은 관심을 받고 있다⁵⁻¹¹⁾. 하지만 TMNs을 합성하기 위해 대표적으로 활용되는 합성 방법인 암모니아 주입을 통한 고온 열처리 기법은 유독하고 부식성이 강한 암모니아를 사용한다는 점에서 장비의 부식 문제뿐만 아니라 인체에 유해한 공정이라는 한계를 지니고 있다.

최근 이러한 문제를 극복하기 위해 PVD 방식의

반응성 마그네트론 스퍼터링 공정을 도입하는 시도가 이루어지고 있다¹²⁾. 스퍼터링 기법은 반도체, 디스플레이, 태양전지 등 다양한 산업에서 활발하게 사용되고 있는 공정일 뿐만 아니라, 반응성 스퍼터링 기법을 활용하여 TMNs을 암모니아 가스 없이 안전하게 합성할 수 있다는 장점이 있다. Siva Karuturi 연구진은 반응성 스퍼터링 기법을 활용하여 질소의 유량 제어를 통해 우수한 성능을 지니는 Ni₃N 전극을 제작하였다. 또한, Ni₃N과 Ni을 함께 순차적으로 증착하여 이중층 구조(bilayer)의 전극을 제작하여 적층 구조에 따른 성능평가를 통해 질화물 기반의 우수한 전극을 보고하였다¹³⁾. 하지만 아직까지 스퍼터링 기법을 활용하여 TMNs을 물 분해 촉매로 활용한 연구는 제한된 소재에만 국한되어 있어, 다양한 소재에 관한 연구가 활발히 이루어지지 않은 실정이다.

본 연구에서는 반응성 마그네트론 스퍼터링 기법을 활용하여 세 종류의 Ni₃N, CoN, Cu₃N을 합성하고, 이를 1M KOH 조건에서의 수소 발생 반응(Hydrogen evolution reaction, HER)에 대한 촉매 활성을 분석하였다. 뿐만 아니라 각각에 대해서 Ni과의 이중층 구조(TMNs/Ni)를 제작하여 단일층 및 이중층 구조에서의 HER 활성을 비교 분석하였다. 이를 통해 이중층 구조가 수소 발생 반응에 미치는 영향을 고찰하고, 전이금속 질화물 기반 전극의 음이온 교환막 수전해 전극으로서의 활용 가능성을 확인하였다.

2. 실험

2.1 TMNs(Ni₃N, CoN, Cu₃N) 전극 및 TMNs/Ni 이중층 전극 제조

Ni₃N, CoN, Cu₃N 박막은 Ar(순도 99.999%)와 N₂(순도 99.9999%) 혼합 가스 분위기에서 Ni 타겟(순도 99.95%), Co 타겟(순도 99.95%), Cu 타겟(순도 99.95%)을 사용하여 마그네트론 스퍼터링으로 Ni foam 기판 위에 직접 증착하였다. Ni foam 기판은 증착 전 오염물 제거를 위해 80°C의 25 wt% NaOH 용액과 25°C의 20 wt% HCl 용액에 각각 1분 30초씩

담근 후 증류수로 세척하였다. 스퍼터링 전, 공정 챔버의 진공 압력은 10^{-5} Pa 이하로 유지하였다.

Ni 박막은 증착 압력 5 mTorr, 기판 온도 25°C, 직류(DC) 전력 150 W, Ar 유량 50 sccm으로 증착하였다. Ni₃N, CoN, Cu₃N박막은 증착 압력 10 mTorr, 기판 온도 200°C, 직류(DC) 전력 150 W, 총 유량 50 sccm의 Ar-N₂ 혼합 가스를 사용하여 증착하였다. 각 질화물 박막의 Ar/N₂ 비율은 Ni₃N의 경우 30/20, CoN의 경우 10/40, Cu₃N의 경우 40/10으로 조절하였다.

2.2 전극 특성 평가

박막의 표면 및 단면 구조는 주사전자현미경(SEM; S-4800, Hitachi)을 이용하여 분석하였으며, 전극의 결정 구조는 X선 회절 분석기(XRD, Ultima IV, Rigaku)를 통해 분석하였다. 전기화학적 특성 평가는 Potentiostat/galvanostat (Biologic VSP-300)을 사용하여 3 전극 시스템에서 수행하였다. 전해질로는 1M KOH 용액을 사용하였으며, 기준전극과 상대전극으로 각각 Hg/HgO 전극과 흑연을 사용하였다. 선형 주사 전위법(LSV, Linear Sweep Voltammetry)은 0.1 V(vs. RHE)에서 -0.5 V (vs. RHE)까지 스캔 속도 2 mV/s로 측정하였다. 모든 전위는 아래 식을 통해 표준수소전극(RHE) 기준으로 보정하였다¹⁴⁾.

$$E_{(V \text{ vs. RHE})} = E_{(V \text{ vs. Hg/HgO})} + 0.098 + 0.059 \times \text{pH} \quad 14$$

3. 결과 및 고찰

3.1 물리화학적 특성 평가

Fig. 1은 제작된 Ni₃N, CoN 및 Cu₃N의 XRD 패턴을 나타낸다. 마그네트론 스퍼터링을 통해 합성된 Ni₃N (#10-0280)은 육방정계(Hexagonal) 구조를 가지며, (110), (002), (111), (200), (300) 면의 회절 피크가 확인되었다. CoN (#16-0116)은 입방정계(Cubic) 구조로 (111), (200), (220) 면을 형성하였고, Cu₃N(#47-1088) 역시 입방정계(Cubic) 구조로 (100), (110), (111), (200),

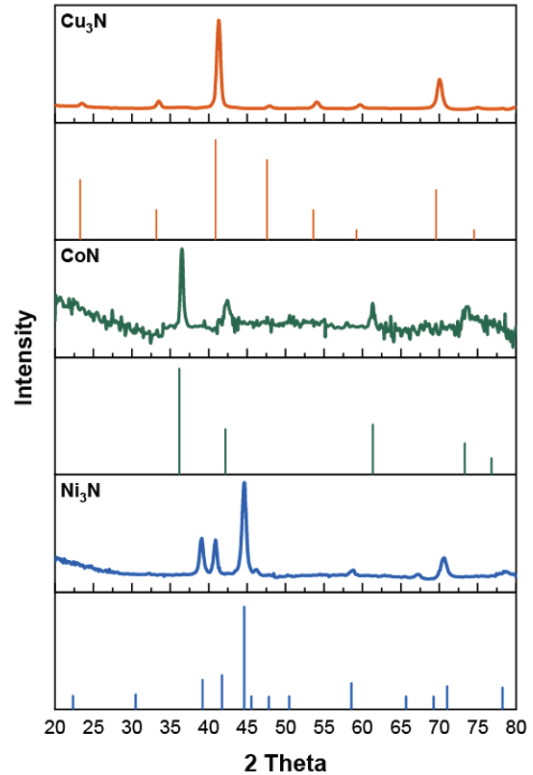


Fig. 1. X-ray diffraction(XRD) patterns of Ni₃N, CoN and Cu₃N films deposited on Si wafers via magnetron sputtering

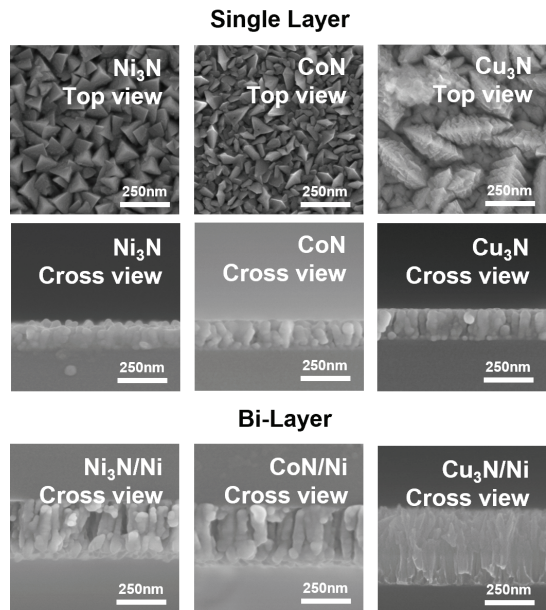


Fig. 2. SEM images of top and cross view of Ni₃N, CoN and Cu₃N films deposited on Si wafers

(210), (211), (220)면의 회절 피크가 관찰되었다. 이러한 XRD 분석 결과를 통해 단일 원소 타겟과 질소 가스를 활용한 마그네트론 스퍼터링 공정으로 각 전이금속 질화물이 성공적으로 합성되었음을 확인 할 수 있었다.

Fig. 2는 Ni, Co, Cu 타겟과 혼합가스를 활용하여 증착한 박막의 표면 및 단면 SEM 이미지를 보여준다. Fig. 2에서 확인 할 수 있듯이, 증착된 각 질화물이 균일하게 증착되었음을 알 수 있었다. 증착 두께를 검증하기 위해 단면 SEM 분석을 수행한 결과, 모든 박막이 균일하게 150 nm 두께로 형성되었음을 확인하였다. 또한, Ni이 삽입된 이중층 구조(TMNs/Ni)의 단면 역시 균일하게 형성되었음을 확인 할 수 있었다. 이러한 SEM 및 XRD 분석 결과를 통해 반응

성 스퍼터링 기법을 통해 전이금속 질화물(TMNs) 박막 및 이중층 구조가 성공적으로 제작되었음을 확인하였다.

3.2 전기화학적 특성 평가

다양한 조성으로 제작된 질화물 박막의 수소 발생 반응(HER)에 대한 활성을 평가하기 위해 전기화학적 특성 평가를 수행하였다.

Fig. 3은 Bare Ni foam과 Ni foam 위에 150 nm 두께의 질화물이 코팅된 전극에 대해 HER 영역에서의 선형주사전위법(LSV)분석 결과를 나타낸다. -10 mV/cm²에서 과전압을 비교해보면, Bare Ni foam (-297 mV)에 대비하여 Ni₃N (-208 mV), CoN (-279

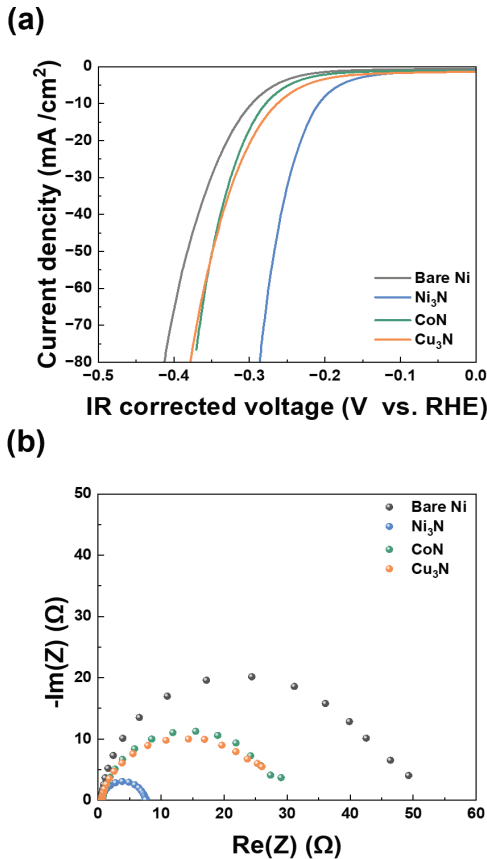


Fig. 3. Electrochemical performance of the prepared TMNs single layer electrodes for HER. (a) HER LSV curves and EIS Nyquist plots in 1 M KOH electrolyte

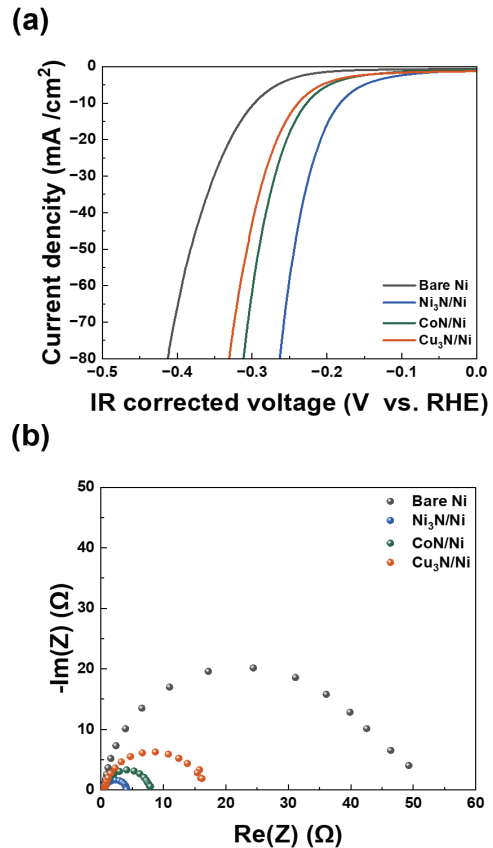


Fig. 4. Electrochemical performance of the prepared TMNs/Ni bilayer electrodes for HER. (a) HER LSV curves and EIS Nyquist plots in 1 M KOH electrolyte

mV), Cu₃N (-263 mV)으로 질화물이 증착된 모든 전극에서 HER 성능이 향상되었으며, 특히 Ni₃N의 경우 가장 낮은 과전압을 지니는 것을 확인하였다. 보다 자세한 분석을 진행하기 위해, 전기화학 임피던스 분광법(EIS) 분석을 수행하였다. 그 결과 Ni₃N이 가장 낮은 전하전달저항(Charge Transfer Resistance)을 나타내었고, 그 다음으로는 Cu₃N, CoN, Bare Ni foam 순으로 확인되어 Ni₃N이 가장 우수한 활성을 보이는 것을 관찰하였다.

Fig. 4에서는 Ni이 삽입된 이중층 구조의 질화물 박막의 전기화학적 특성 평가 결과를 제시하였다. -10 mA/cm²에서 과전압을 비교한 결과, Ni₃N/Ni (-183 mV), CoN/Ni (-227 mV), Cu₃N/Ni (-239 mV)를 나타내어, 제작된 이중층 구조의 전극 모두 단일층 전극 대비 낮은 과전압을 보이는 것을 확인하였다. 흥미로운 점은 단일층 구조의 전극 대비 이중층 구조에서의 과전압 감소율을 비교하였을 때 Ni₃N, CoN, Cu₃N 각각의 경우 약 12%, 18%, 9%로 과전압 감소율은 CoN에서 가장 높은 것을 확인하였다. EIS 분석에서도, Ni₃N/Ni, CoN/Ni, Cu₃N/Ni의 전극저항이 단일층 구조 대비 각각 약 30%, 70%, 30% 만큼 감소하는 것을 통해 CoN에서 단일층 구조 대비 이중층 구조에서 전극 성능 향상이 극대화되었음을 알 수 있었다. Ni₃N/Ni 이중층 전극의 경우 단일층 구조 대비 Ni이 삽입되게 됨으로써 전자 전도도를 향상시키고, 박막의 응력을 완화하여 HER 성능이 보고된다고 알려져 있다. 또한 Siva Karuturi 연구팀은 이중층 구조에서 Top layer와 bottom layer 사이의 적절한 전자 교환을 통해 HER 활성이 촉진된다고 보고하였다. 이러한 관점에서, CoN에서 높은 성능 향상을 보인 이유는 전도도 향상뿐만 아니라 CoN 층과 Ni 층 사이의 적절한 전자 교환으로 인한 전자 구조 변화로 인해 성능 향상이 이루어진 것으로 예상된다^{13,15-17}.

Fig. 5에서는 하프셀 테스트를 통해 가장 우수한 활성을 보인 Ni₃N/Ni 전극을 실제 음이온 교환막 수전해(AEMEC) 셀에 적용한 결과를 보여준다. 성능 평가는 제로갭(Zero-gap) 타입의 셀을 활용하여 수행

하였다. 전극의 활성 면적은 4 cm²이며, 음극으로는 Ni₃N/Ni을 증착한 Ni foam을, 양극으로는 Ni felt를 사용하였다. 분리막은 FAA-3-50 (Fumasep)을 활용

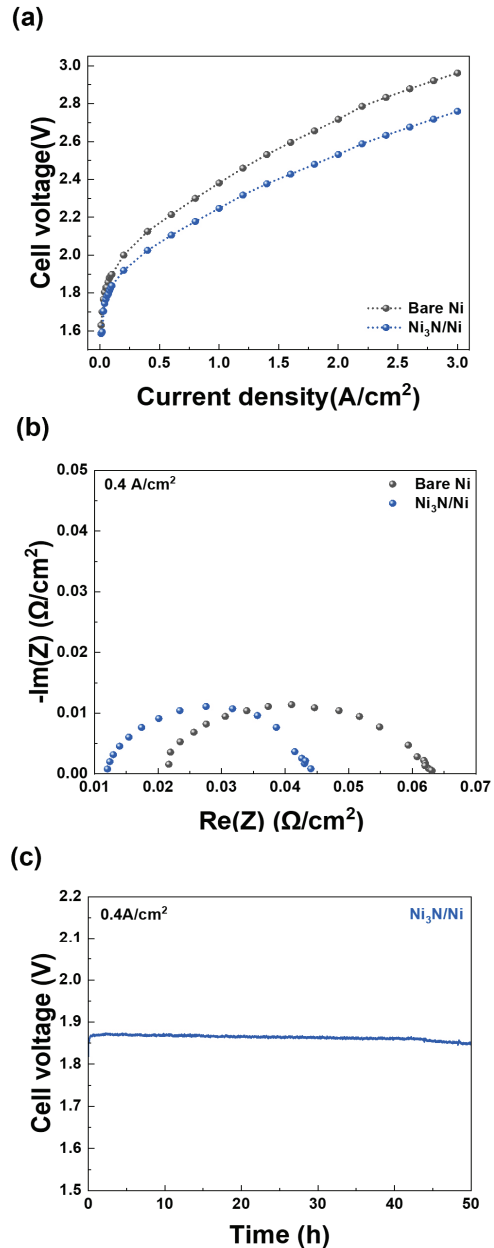


Fig. 5. Single-cell electrochemical evaluation of Ni₃N/Ni bi-layer electrodes (a) performance measured by I-V curves, (b) charge transfer resistance at 0.4 A/cm² analyzed by electrochemical impedance spectroscopy(EIS), (c) durability test over 50 hours

하고 1 M KOH 용액을 200 ccm/min으로 양극과 음극에 공급하였다. 각각에서 얻어진 I-V curve 비교 결과, 0.4 A/cm²의 전류 밀도에서 Bare Ni 전극의 전압은 2.1 V였으나, Ni₃N/Ni 전극이 도입된 경우 2.0 V로 감소하는 것을 알 수 있었다. 이러한 성능 향상을 자세히 분석하기 위해 0.4 A/cm²에서 EIS 분석을 수행하였다. 그 결과 Ni₃N/Ni이 도입된 경우 접촉 저항 및 전해질 등의 저항으로 결정되는 고주파 영역의 저항값이 감소하였을 뿐만 아니라, 전극 반응 및 물질전달 등으로부터 기인하는 반원의 크기 또한 Bare Ni foam 대비 15% 감소한 것을 확인하였다. 뿐만 아니라 0.4 A/cm²에서 50시간 동안의 내구성 평가 결과, Ni₃N/Ni 전극을 활용한 셀에서 성능 저하 없이 우수한 내구성을 보이는 것을 확인하였다. 이를 통해 스퍼터링 기법을 통해 제작된 TMNs이 AEMEC 전극으로 높은 적용 가능성을 지니는 것을 확인하였다.

이러한 결과를 바탕으로 향후 다양한 조성의 TMNs를 적용하는 것뿐만 아니라, 이중층 구조 내에 삽입되는 소재에 대한 체계적인 스크리닝이 병행되어 다양한 소재 조합군에 대한 최적화가 이루어진다면, 스퍼터링 기반의 우수한 전극을 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 반응성 마그네트론 스퍼터링 공정을 이용하여 다양한 조성 및 구조의 전이금속 질화물 전극을 합성했다. 또한 제작된 전극의 수소 발생 반응에 대한 활성을 평가하고, 음이온 교환막 수전해 (AEMEC) 전극에 도입하여 성능을 평가하였다. 그 결과 제작된 이중층 구조의 TMNs는 HER 반응에 대해서 우수한 활성을 보이는 것을 확인하였으며, 50 시간의 AEMEC 운전에서도 성능 열화 없이 안정적인 내구성을 보이는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 마그네트론 스퍼터링 공정이 AEMEC 수전해용 전극 촉매물질로 유망한 TMNs을 암모니아 가스 기반의 유해 합성 공정 없이 구현할 수 있는 유망한 기술임을 시사한다.

후 기

본 연구는 산업통상부의 한국산업기술진흥원 소재 부품 산업기술개발기반구축사업(RS-2024- 00487529)의 지원을 통해 수행되었습니다.

References

1. J. Brauns and T. Turek, "Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: a review", *Processes*, Vol. 8, No. 2, 2020, pp. 248, doi: <https://doi.org/10.3390/pr8020248>.
2. J. Seo, S. Lee, C. Lee, J. H. Lee, M. Kim, S. K. Kim, Y. Choi, and H. S. Cho, "Trends in the development of water electrolysis technology for green hydrogen production", *News & Information for Chemical Engineers*, Vol. 40, No. 3, 2022, pp. 254-270, doi: <https://kiss.kstudy.com/Detail/Ar?key=3949657>.
3. N. I. Kim, J. Lee, S. Jin, J. Park, J. Y. Jeong, J. Lee, Y. Kim, C. Kim, and S. M. Choi, "Synergistic effects in LaNiO₃ perovskites between nickel and iron heterostructures for improving durability in oxygen evolution reaction for AEMWE", *Small Methods*, Vol. 8, No. 9, 2024, pp. 2400284, doi: <https://doi.org/10.1002/smt.202400284>.
4. C. Hu, C. Lv, N. Zeng, A. Liu, Y. Liu, L. Hu, P. Li, Y. Yao, J. Cai, and T. Tang, "Recent advances in Ni-based electrocatalysts for hydrogen evolution reaction", *Energy Technology*, Vol. 11, No. 1, 2023, pp. 2201048, doi: <https://doi.org/10.1002/ente.202201048>.
5. J. Li, Z. Zhu, Y. Huang, F. Wang, and M. S. Balogun, "Ni₃N: a multifunctional material for energy storage and electrocatalysis", *Materials Today Energy*, Vol. 26, 2022, pp. 101001, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2022.101001>.
6. R. Jamil, R. Ali, S. Loomba, J. Xian, M. Yousaf, K. Khan, B. Shabbir, C. F. McConville, A. Mahmood, and N. Mahmood, "The role of nitrogen in transition-metal nitrides in electrochemical water splitting", *Chem Catalysis*, Vol. 1, No. 4, 2021, pp. 802-854, doi: <https://doi.org/10.1016/j.checat.2021.06.014>.
7. Y. Wu, Y. Xie, S. Niu, Y. Zang, J. Cai, Z. Bian, X. Yin, Y. Fang, D. Sun, D. Niu, Z. Lu, A. Mosallanezhad, H. Wang, D. Rao, H. Pan, and G. Wang, "Accelerating water dissociation kinetics of Ni₃N by tuning interfacial orbital coupling", *Nano Research*, Vol. 14, No. 10, 2021, pp. 3458-3465, doi: <https://doi.org/10.1007/s12274-021-3562-1>.
8. C. Zhu, A.-L. Wang, W. Xiao, D. Chao, X. Zhang, N. H. Tiep, S. Chen, J. Kang, X. Wang, J. Ding, J. Wang, H. Zhang, and H. J. Fan, "In situ grown epitaxial heterojunction exhibits high-performance electrocatalytic water splitting", *Advanced Materials*, Vol. 30, No. 13, 2018, pp. 1705516, doi: <https://doi.org/10.1002/adm>

- a.201705516.
9. A. Sajeev, A. M. Paul, R. Nivetha, K. Gothandapani, T. S. Gopal, G. Jacob, M. Muthuramamoorthy, S. Pandiaraj, A. Alodhayb, S. Y. Kim, Q. V. Le, P. L. Show, S. K. Jeong, and A. N. Grace, "Development of Cu_3N electrocatalyst for hydrogen evolution reaction in alkaline medium", *Scientific Reports*, Vol. 12, No. 1, 2022, pp. 2004, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05953-x>.
 10. G. Wu, Z. Mo, P. Sun, Z. Cao, X. Zhu, Y. Song, Y. Wei, X. She, H. Li, and H. Xu, "Improved atomic hydrogen desorption by Cu_3N with suitable electronic structure to enhance photocatalytic H_2 evolution", *Materials Today Energy*, Vol. 29, 2022, pp. 101111, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2022.101111>.
 11. D. Wang, C. Zhang, J. Hu, T. Zhuang, and Z. Lv, "Nitriding-reduction fabrication of coraloid $\text{CoN}/\text{Ni}/\text{NiO}$ for efficient electrocatalytic overall water splitting", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 655, 2024, pp. 217-225, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.11.018>.
 12. Z. Qi, Y. Zeng, Z. Hou, W. Zhu, B. Wei, Y. Yang, B. Lin, and H. Liang, "Heterointerface engineering of $\text{Ni}/\text{Ni}_3\text{N}$ hierarchical nanoarrays for efficient alkaline hydrogen evolution", *Nano Research*, Vol. 16, No. 4, 2023, pp. 4803-4811, doi: <https://doi.org/10.1007/s12274-022-5339-6>.
 13. D. Zhang, H. Li, A. Riaz, A. Sharma, W. Liang, Y. Wang, H. Chen, K. Vora, D. Yan, Z. Su, A. Tricoli, C. Zhao, F. J. Beck, K. Reuter, K. Catchpole, and S. Karuturi, "Unconventional direct synthesis of $\text{Ni}_3\text{N}/\text{Ni}$ with N-vacancies for efficient and stable hydrogen evolution", *Energy & Environmental Science*, Vol. 15, No. 1, 2022, pp. 185-195, doi: <https://doi.org/10.1039/d1ee02013g>.
 14. K. Kawashima, R. A. Márquez, Y. J. Son, C. Guo, R. R. Vaidyula, L. A. Smith, C. E. Chukwunke, and C. B. Mullins, "Accurate potentials of Hg/HgO electrodes: practical parameters for reporting alkaline water electrolysis overpotentials", *ACS Catalysis*, Vol. 13, No. 3, 2023, pp. 1893-1898, doi: <https://doi.org/10.1021/acscatal.2c05655>.
 15. B. Das, M. V. Reddy, P. Malar, T. Osipowicz, G. V. Subba Rao, and B. V. R. Chowdari, "Nanoflake CoN as a high capacity anode for Li-ion batteries", *Solid State Ionics*, Vol. 180, No. 17-19, 2009, pp. 1061-1068, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2009.05.007>.
 16. X. Y. Fan, Z. J. Li, A. L. Meng, C. Li, Z. G. Wu, and P. X. Yan, "Study on the structure, morphology and properties of Fe-doped Cu_3N films", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 47, No. 18, 2014, pp. 185304, doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/18/185304>.
 17. A. Jiang, M. Qi, and J. Xiao, "Preparation, structure, properties, and application of copper nitride (Cu_3N) thin films: a review", *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 34, No. 9, 2018, pp. 1467-1473, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.02.025>.