

열압착으로 나노구조가 도입된 나피온을 이용한 고성능 이온성 고분자-금속 복합체 구동기

한동현[#] · 최재원^{##} · 오승주 · 윤재욱 · 우인선 · 김진아 · 배진우[†]

한국기술교육대학교 에너지신소재화학공학부 미래융합공학전공

*전주대학교 탄소융합공학과

(2022년 3월 28일 접수, 2022년 5월 15일 수정, 2022년 5월 18일 채택)

High Performance Ionic Polymer-Metal Composite Actuators Based on Nanopatterned Nafion by Thermal Imprinting Lithography

Dong-Heon Han[#], Jaewon Choi^{##}, Seung-Ju Oh, Jae-Uk Yoon, In-Sun Woo, Jinah Kim, and Jin Woo Bae[†]

Multifunctional Organic Polymer Laboratory, Future Convergence Engineering, School of Energy,
Materials and Chemical Engineering, Korea University of Technology and Education, Cheonan 31253, Korea

*Department of Carbon Convergence Engineering, Jeonju University, Jeonju 55069, Korea

(Received March 28, 2022; Revised May 15, 2022; Accepted May 18, 2022)

초록: 액추에이터로서 이온성 고분자-금속 복합물(ionic polymer metal composite, IPMC)은 가벼운 무게, 빠른 응답 속도 그리고 낮은 전압에서의 큰 기계적 변형특성으로 인해서 최근 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 이온교환막과 전극 사이의 계면 면적을 증가시킴으로써 IPMC의 구동 특성을 개선시킬 수 있다. 본 연구에서는 열압착 나노임프린트 리소그래피(thermal imprint lithography, TIL)법으로 Nafion 이온교환막 표면에 나노기둥을 도입하였고, 이를 IPMC에 적용하였다. TIL법의 시간이 증가함에 따라서 나노기둥의 길이가 증가하는 것을 확인하였고, 이를 무전해 도금법으로 백금 전극을 이온교환막 표면에 형성하여 IPMC를 제작하였다. 결과적으로 나노기둥이 도입된 IPMC는 구동변위와 구동속도 및 구동력이 모두 증가하였다. 이러한 특성은 이온교환막과 전극 사이의 넓어진 계면에서 전기활성 대전 특성이 우수하기 때문이었다.

Abstract: Ionic polymer-metal composite (IPMC) has attracted attention as one of actuators due to their light weight, fast response rate, and large deformation at low voltage. Especially, the operating properties of IPMC can be improved by increasing interfacial area between an ion exchange membrane and electrodes. In this study, IPMC was fabricated using nanorod-imprinted Nafion ion exchange membrane through thermal imprint lithography (TIL). It was confirmed that the length of nanorods onto the membrane gradually increased with increasing the time of thermal imprinting. Then, the IPMCs were fabricated by electroless plating method where the Pt electrode was coated onto the nanorod-imprinted membrane. As a result, nanorod-imprinted IPMCs showed outstanding displacement, response rate, and driving force rather than IPMC with untreated ion exchange membrane. It is because the nanorod-imprinted IPMCs have outstanding electroactive charging characteristics with the electrolyte at the interface.

Keywords: ionic polymer-metal composite, thermal imprint lithography, nanorod-imprinted membrane.

서 론

이온성 고분자-금속 복합물(ionic polymer-metal composite, IPMC)은 정전기력에 의해 구동되는 생체 모방형 구동체(biomimetic actuator) 소재로서 가벼운 무게와 빠른 응답속도,

낮은 전압에서 우수한 구동력으로 인해 각광받고 있다.¹⁻³ 또한 인공근육을 비롯한 인공심장, 스마트 피부 등의 여러 분야에서 적용이 가능하기 때문에 많은 연구가 이루어지고 있다.^{4,10} IPMC는 Pt와 같은 금속전극을 이온교환막의 표면에 도금함으로써 제작할 수 있으며, Figure 1과 같이 IPMC 구동체의 양쪽 표면전극에 전위차를 인가하면, 수화된 이온교환막 내부의 양이온 클러스터들은 전기삼투현상에 의해서 물과 함께 음극으로 이동하게 되고, 이 때 양극의 수축과 음극의 팽창으로 인해 IPMC 구동체의 기계적 굽힘이 발생한다.¹¹⁻¹⁵

[#]These authors contributed equally to this work.

[†]To whom correspondence should be addressed.

jwbae@koraetech.ac.kr, ORCID[®] 0000-0001-7166-9201

©2022 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

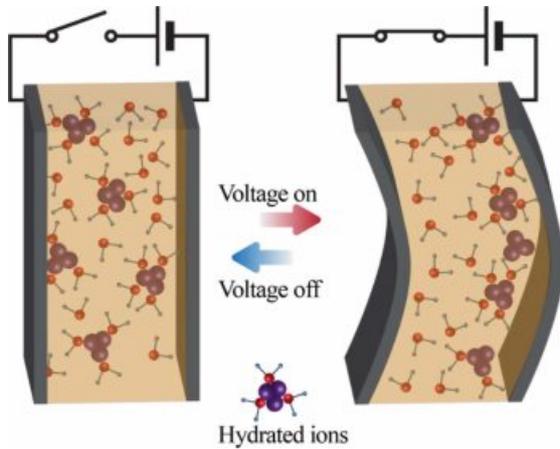


Figure 1. A schematic representation of a typical IPMC.

최근 나노분산된 전극을 IPMC에 도입하면 큰 표면적과 높은 정전용량으로 동일한 전위차에서 수화된 이온을 끌어들이고 이온 수송을 촉진하는 데 유리하여 IPMC 구동체의 구동 변위와 성능을 모두 개선시킬 수 있다고 보고되고 있다.¹⁶⁻²⁰

본 연구에서는 열압착 나노임프린트 리소그래피법(thermal imprint lithography, TIL)을 사용하여 이온교환막인 Nafion membrane의 표면에 수백 나노미터에서 수 마이크로미터 높이의 나노기둥 구조를 도입하여 전극과 맞는 이온교환막의 표면적을 확대시키고자 하였다. 열압착 시간이 증가함에 따라서 나노기둥의 길이가 증가하는 것을 확인하였고, 이를 무전해 도금법으로 백금(Pt) 전극을 이온교환막 표면에 형성하여 IPMC를 제작하였다. 나노기둥이 도입된 IPMC 구동체를 나노기둥이 도입되지 않은 IPMC 구동체와 비교하여 전기기계적 특성에 미치는 영향을 알아보았다.

실 험

재료. IPMC의 이온교환막은 듀폰사(USA)에서 제작된 약 180 μm 두께의 Nafion 117을 사용하였으며, 이를 전처리하기 위해서 증류수와 대정사(Korea)의 과산화수소(H_2O_2 , 30%), 황산(H_2SO_4 , 98%)을 사용하였다. 이온교환막의 표면에 나노기둥 구조를 도입하기 위해서 와트먼사(UK)에서 지름 200 nm 이고, 두께 60 μm 를 갖는 상용화된 양극 산화 알루미늄 템플레이트인 anodic aluminum oxide(AAO)를 사용하였으며, 에칭 과정에서는 대정사(Korea)의 수산화나트륨(NaOH)을 사용하였다.

IPMC의 표면전극을 형성시키기 위하여 알드리치사(USA)의 백금화합물($[\text{Pt}(\text{NH}_3)_4\text{Cl}_2]$, 98%)과 붕소화합물(NaBH_4 , 98%)을 사용하였으며, 제조된 IPMC의 내부이온을 치환하기 위해서 알드리치사(USA)의 염화리튬(LiCl , 98%)을 사용하였다.

샘플의 조성 및 제조. TIL법을 이용하여 나노기둥 구조가 도입된 이온교환막을 제조하기 위해서 200 나노 pore 구조를

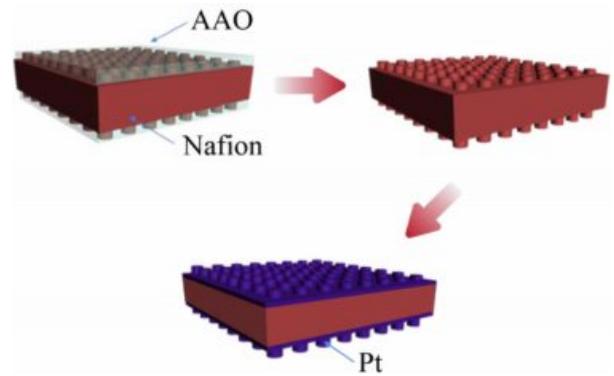


Figure 2. Schematic illustration for the fabrication of the IPMC with the Nafion membrane nanorod-imprinted by TIL.

갖는 AAO를 이온교환막을 양쪽 사이에 두고, 시간별로 진공오븐에서 180 $^{\circ}\text{C}$, 30 bar의 조건으로 열압착하였다. AAO를 에칭하기 위해 70 $^{\circ}\text{C}$ 의 1 M의 수산화나트륨 수용액에서 24시간 동안 처리한 후, 1시간씩 70 $^{\circ}\text{C}$ 의 증류수에서 3번 끓였다. 이온교환막의 전처리를 위해서 1시간 동안 80 $^{\circ}\text{C}$ 의 5 wt% 과산화수소 수용액에서 이온교환막 표면의 유기물질을 제거하였으며, 1시간 동안 80 $^{\circ}\text{C}$ 의 증류수로 처리한 후, 1시간 동안 80 $^{\circ}\text{C}$ 의 0.5 M의 황산 수용액에서 이온교환막 내의 술포기(SO_3^-)의 Na^+ 를 H^+ 로 치환하였다. 이후 이온교환막에 존재하는 과량의 황산을 제거하기 위해 1시간 동안 80 $^{\circ}\text{C}$ 의 증류수에서 처리한 후, 증류수에 이온교환막을 보관하였다.

나노기둥이 도입된 이온교환막 표면에 Pt를 효과적으로 도금시키기 위해서 무전해 도금법으로 IPMC를 제조하였다. 2 mg/mL 농도의 백금화합물 수용액에 이온교환막을 24시간 담지한 후, 표면을 증류수로 세척하였다. 40 $^{\circ}\text{C}$ 증류수가 들어 있는 용기에 옮긴 후 30분마다 5 wt%의 붕소화합물 수용액을 5 mL씩 첨가하면서 총 4시간 동안 Pt 환원을 진행하였다. 무전해 도금과정을 4회 반복하여 이온교환막 표면에 Pt를 환원시켜 표면전극을 형성하였으며, Figure 2와 같이 나노기둥 구조의 IPMC를 제작하였다. 제작된 IPMC를 증류수로 세척한 다음, 염화리튬(LiCl) 포화 수용액에 24시간 동안 담지시켜 내부 이온을 리튬 이온으로 치환시켰다.

샘플 분석. Nafion 이온교환막 표면의 나노기둥 및 무전해 도금법을 이용하여 제작된 IPMC의 표면에 대해서 FE-SEM 장비(Apreo S HiVac, FEI Company, USA)를 이용하여 각각 10000배의 배율로 형상을 촬영하였다. IPMC의 구동 시험은 Figure 3와 같이 전원 공급장치, 레이저 변위 측정기, 로드셀(load cell), 그리고 이들을 제어할 수 있는 컴퓨터로 구성된 측정기를 제조하여 측정하였다. 구동성능은 레이저 변위 측정기를 이용하여 일정한 전압 하에서 IPMC의 변위와 반응 속도를 측정하였고, 로드셀을 이용하여 구동력을 측정하였다. 제조된 IPMC를 길이 4 cm, 너비 0.5 cm로 절단한 후, 1 cm는 전압을 가해주는 클램프에 위치하게 하고 나머지 3 cm 길

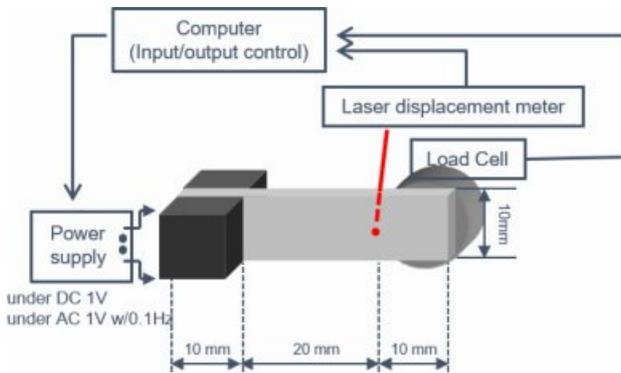


Figure 3. Apparatus to measure the displacement and driving force of IPMC.

이의 IPMC가 굽힘 운동하는 변위를 측정하였다. 구동 전압은 물이 전기분해되는 1.23 V 이하에서 측정하고자 IPMC에 1 V의 전압이 인가되었고, 교류의 경우 계단파(square wave)가 사용되었다. 변위 및 구동력을 측정하는 지점은 전압이 가해지는 IPMC의 말단 지점과 1 cm 떨어진 지점에서 측정하였다. 구동력은 로드셀을 이용하여 끝단에서 미는 힘이 steady-state 값이 되는 경우를 최대 발생 힘으로 결정하였다. 구동 결과는 시편당 10번의 측정에 대한 평균값을 사용하였다. 제조된 IPMC들의 전기적 특성을 분석하기 위해서 순환전압전류 측정법(cyclic voltammetry, CV)을 수행하였다. CV 곡선은 potentiostat/galvanostat(IM-6, Zahner, USA)를 이용하여 50 mV/s의 주사속도로 표준 수소전위 기준 0 V부터 1 V 사이에서 전류밀도를 측정하였다.

결과 및 토론

나노기둥 구조의 이온교환막 표면분석. 넓은 표면적을 갖는 이온교환막을 제조하기 위해서 TIL법으로 이온교환막 표면에 나노기둥 구조를 도입하였다. TIL법의 시간에 따라서 나노기둥 구조가 도입된 이온교환막을 확인하기 위한 FE-SEM 분석 결과를 Figure 4를 통해서 확인할 수 있었다. 1시간 동안 TIL법으로 이온교환막을 제작했을 때 500 nm 높이의 나노기둥을 확인할 수 있으며, 시간에 따라서 나노기둥의 높이가 증가하는 것을 확인하였다. 또한 TIL법에 의해 제조된 나노기둥 구조는 뭉침(collapsed) 현상을 보였으며, 더욱이 시간이 길어짐에 따라서 뭉침 현상이 증가하였고, 나노기둥 구조를 유지하지 못하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이는 AAO 템플레이트를 에칭하고 FE-SEM 측정을 위한 건조과정에서 Nafion 이온교환막의 낮은 자체 탄성률(elastic modulus)과 높은 모세관 접착력(capillary adhesion)으로 인해 발생하는 것으로 판단되었다. 결과적으로 TIL법으로 시간을 조절함으로써 Nafion 이온교환막 표면에 다양한 높이의 나노기둥을 도입하여 표면적을 향상시켜줄 수 있었다. 하지만 일

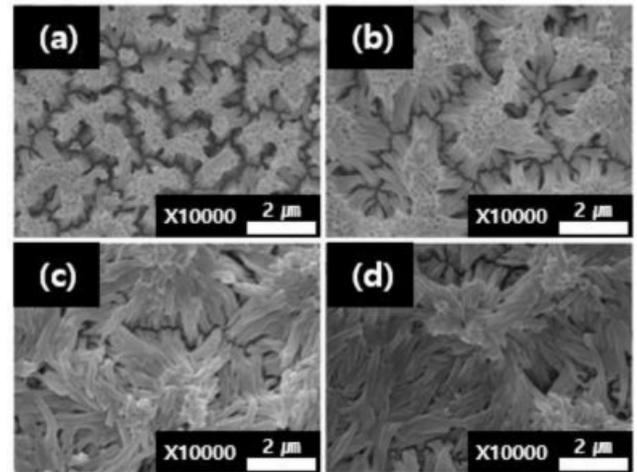


Figure 4. FE-SEM surface images of the Nafion membrane thermally imprinted by AAO for different time: (a) 1 h; (b) 2 h; (c) 4 h; (d) 8 h, respectively.

정이상 높이의 나노기둥은 자체의 물성으로 인해 쉽게 뭉쳐 버려 표면적이 감소될 수 있음을 알 수 있었다.

나노기둥 구조의 IPMC 표면분석. 나노기둥 구조가 도입된 Nafion 이온교환막 양쪽 면에 무전해 도금법으로 Pt를 환원시켜 IPMC를 제조하였다. TIL법으로 1, 2, 4, 8시간에 따라 나노기둥 구조가 도입된 Nafion 이온교환막을 이용하여 제조된 IPMC의 표면을 Figure 5에 나타냈다. Figure 5(a)와 (b)에서 확인할 수 있듯이, 짧은 시간의 TIL법으로 제조한 Nafion 이온교환막을 이용하여 IPMC를 제조할 경우 Nafion 이온교환막 표면에 등방성 나노기둥 구조의 Pt 전극이 대면적으로 고르게 생성되어 있음을 확인할 수 있었다. 이는 무전해 도금이 수용액 상에서 화학적인 방법으로 제조됨에 따라 Nafion 이온교환막 표면에서 일정 길이 이하로 제조된 나노기둥은 수용액 상에서 나노기둥 간의 모세관 접착력이 감소되었기 때문에 뭉침 현상이 감소된 것으로 판단된다. 또한 Nafion 이온교환막의 나노기둥 표면에 Pt가 그대로 도금되고, 결과적으로 Pt의 단단함(stiffness) 때문에 뭉침 현상이 감소된 것으로 판단된다. 하지만, Figure 5(c)와 (d)에서 확인할 수 있듯이, 4시간 이상 TIL법을 이용하여 나노기둥 구조가 도입된 Nafion 이온교환막으로 제조한 IPMC는 나노기둥 구조를 유지하지 못하였으며, Pt가 무전해 도금된 뒤에도 서로 뭉쳐 지거나 무너진 채로 환원되어 전극을 이루고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 Pt가 IPMC의 전극으로 환원되었지만, 나노기둥 높이가 길어져서 Nafion 이온교환막의 자체 탄성률을 버티지 못하고 무너진 것으로 판단된다. 더욱이 Figure 5(d)에서 확인할 수 있듯이, 8시간 TIL법으로 나노기둥 구조가 도입된 Nafion 이온교환막을 이용하여 제조된 IPMC의 표면은 Pt 전극이 뭉친 상태이며, 수많은 크랙들이 발견되었다. 이것은 나노기둥 높이가 너무 길어 Nafion 이온교환막의 자

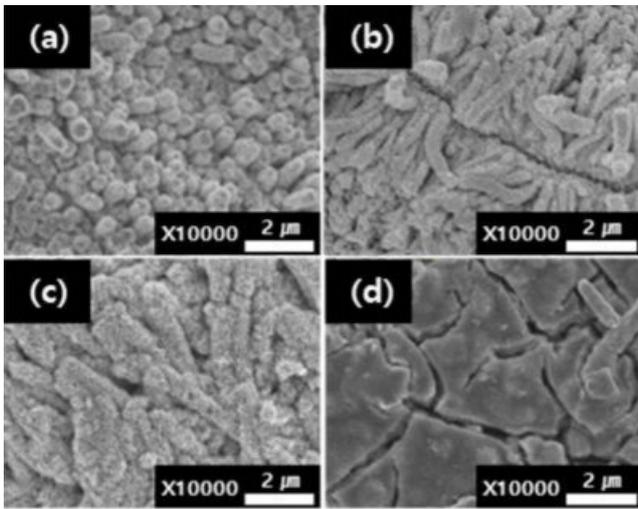


Figure 5. FE-SEM surface images of the IPMCs electroless-plated with thermally imprinted Nafion membranes for different time (a) 1 h; (b) 2 h; (c) 4 h; (d) 8 h, respectively.

체탄성률을 버티지 못하고, 무전해 도금의 수용액 상에서도 분리되지 않으며 뭉쳐져 무너진 상태 그대로 Pt 전극이 환원된 것으로 판단된다.

나노기둥 구조의 IPMC 구동 특성 분석. IPMC는 인가된 전압 하에서 이온교환막 내의 수화된 양이온이 음극으로 이동하여 양극은 수축되고 음극은 팽창하여 변형이 일어난다. 나노기둥이 도입된 이온교환막들을 이용하여 제조된 IPMC의 구동변위 응답곡선을 Figure 6에 나타냈다. 나노기둥이 도입되지 않은 이온교환막으로 제조된 IPMC의 구동변위가 최대 5 mm로 매우 작음을 알 수 있다. 반면에 나노기둥을 도입된 이온교환막을 이용하여 제조된 IPMC는 구동변위가 증

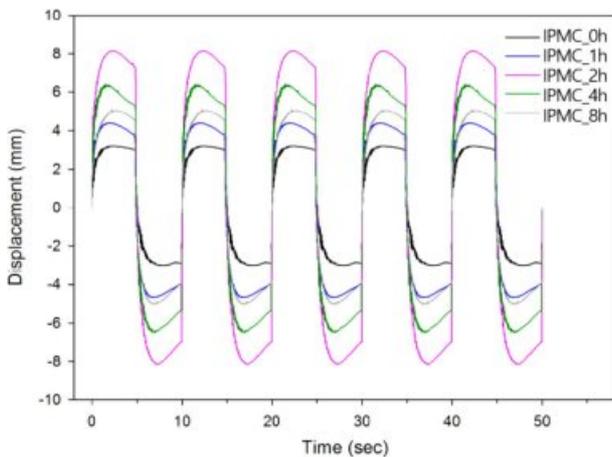


Figure 6. Time-displacement curves of IPMCs recorded for 50 s under AC 1 V and 0.1 Hz. IPMCs were prepared with Nafion membrane and thermally nanorod-imprinted Nafion membrane for different time: 0, 1, 2, 4, 8 h, respectively.

가하였으며, 구동 반응속도 역시 증가한 것을 확인할 수 있었다. 이러한 나노구조가 도입된 이온교환막으로 제조된 IPMC의 구동변위 및 구동반응 속도는 1시간과 2시간 동안 TIL법을 이용하여 제조된 나노기둥 구조의 경우에는 점차 증가하였으나, 4시간과 8시간의 경우에는 점차 감소한 것을 확인할 수 있었다. 이는 상대적으로 짧은 시간동안 TIL법으로 제조한 나노기둥 구조의 IPMC는 서로 개별적으로 나노기둥이 뭉침 현상이 감소하였기 때문에 Pt 전극이 잘 환원되어 생성된 계면 면적이 증가하였지만, 오랜시간 동안 TIL법으로 제조된 IPMC는 나노기둥 구조가 너무 길어 쉽게 뭉치거나 무너진 채로 Pt 전극이 환원되어 오히려 생성된 계면 면적이 감소한 것으로 판단된다. 그러므로 TIL법으로 제조된 나노기둥의 구동변위는 생성된 계면 면적에 비례하여 증가한 것으로 판단되며, 이는 FE-SEM 결과와 일치하였다.

이렇게 Figure 6로부터 얻은 IPMC의 구동변위와 함께 나노기둥이 도입된 이온교환막을 이용하여 제조된 IPMC는 구동력을 Figure 7에 함께 정리하여 나타냈다. 나노기둥이 도입되지 않은 IPMC보다 나노기둥이 도입된 IPMC는 구동변위가 증가함과 동시에 구동력 역시 비슷한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 늘어난 계면 면적으로 인하여 동일한 전위차에서 수화된 이온을 끌어들이고 이온 수송을 촉진하는 데 유리하기 때문에 IPMC 구동체의 구동변위와 구동력이 모두 개선된 것으로 판단된다.¹⁶⁻²¹

나노기둥 구조가 도입된 IPMC의 전기적 특성 분석. TIL법을 이용한 나노기둥이 도입된 이온교환막을 이용하여 제조된 IPMC의 전기적 특성을 확인하기 위해서 CV법으로 측정하여 Figure 8에 나타냈다. IPMC에서 Pt 전극과 Nafion 전해질 사이의 인터페이스는 전기화학적 커패시터로 해석될 수 있으며, 이중층 커패시턴스는 전극-전해질 인터페이스에서 이동 이온을 수용하는 능력으로 반영될 수 있다.^{16,22,23} 이는 IPMC 작동 성능에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 CV 측정으

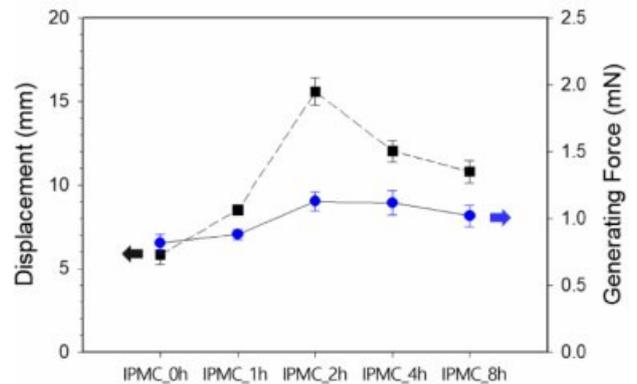


Figure 7. Maximum time-displacements of IPMCs recorded under an applied alternative current (AC) of 1 V at a frequency of 0.1 Hz and maximum blocked force of IPMCs under an applied direct current (DC) of 1 V.

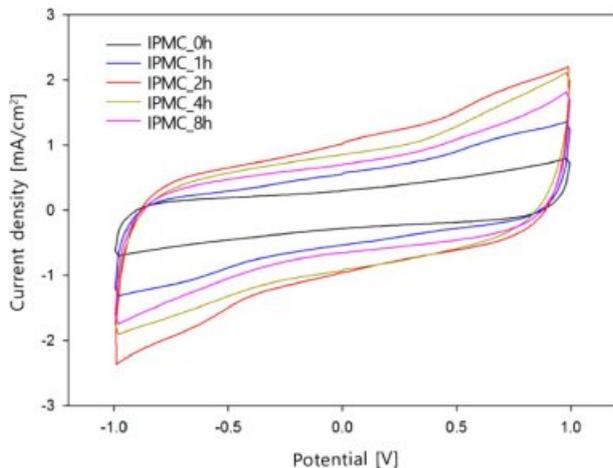


Figure 8. CV curves of IPMCs prepared with Nafion membrane and thermally nanorod-imprinted Nafion membrane for different time: 0, 1, 2, 4, 8 h, respectively.

로 IPMC의 커패시턴스를 비교하였다. 나노기둥이 도입되지 않은 이온교환막으로 제조된 IPMC보다 1시간과 2시간 동안 TIL법을 이용하여 나노기둥 구조가 도입된 이온교환막으로 제조된 IPMC의 커패시턴스는 점차 증가하였다. 하지만, 4시간과 8시간 동안 TIL법을 이용하여 나노기둥 구조가 도입된 이온교환막으로 제조된 IPMC의 커패시턴스는 점차 감소하였다. 그러므로 2시간 동안 TIL법으로 제조된 나노기둥 구조의 IPMC에서 가장 많은 수의 전하가 이동하여 전기 이중층을 형성하고 있음을 알 수 있었다. 이를 통해서 나노기둥 구조를 갖는 IPMC의 Pt 전극이 큰 계면 영역을 갖는 높은 정전용량을 제공할 수 있음을 입증하였으며, 이를 통해서 IPMC 구동변위 및 구동력의 작동 성능이 개선된 것으로 판단되었다.^{16,20,24}

결 론

본 연구에서는 IPMC용 이온교환막의 표면적을 증가시키기 위해서 TIL법의 시간에 따라서 Nafion 이온교환막 표면에 나노기둥 구조를 도입한 후 Pt 전극을 이온교환막에 화학적으로 환원시켜 IPMC를 제조하였다.

TIL법에 의해 나노기둥이 도입된 IPMC는 나노기둥이 도입되지 않은 IPMC에 비해 전기적 자극에 의한 구동 응답속도와 구동변위 그리고 구동력이 모두 개선되었다. 또한 나노기둥이 도입된 IPMC는 높은 정전용량을 갖는 것도 확인할 수 있었다. 이러한 특성은 나노구조가 도입된 이온교환막과 Pt 전극 사이의 계면 면적이 증가한 것을 통해서 확인할 수 있었다. 특히 2시간 동안 TIL법을 통해서 제조된 Nafion 이온교환막은 전극과의 계면 면적을 효과적으로 개선시키면서 높은 정전용량으로 동일한 전압에서도 IPMC 구동체의 구동

변위 및 구동력을 모두 개선시킬 수 있었다.

감사의 글: 2021년도 과학기술정보통신부와 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2021R1A2C2011898)와 BK21 FOUR 사업, 그리고 2022년도 한국기술교육대학교의 교수교육연구진흥과제 및 공용장비센터 지원에 의한 연구임.

이해상충: 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

참 고 문 헌

- Shahinpoor, M.; Bar-Cohen, Y.; Simpson, J. O.; Smith, J. Ionic Polymer-metal Composites (IPMCs) as Biomimetic Sensors, Actuators and Artificial Muscles-a Review. *Smart Mater. Struct.* **1998**, *7*, 15-30.
- Lee, S. J.; Han, M. J.; Kim, S. J.; Jho, J. Y.; Lee, H. Y.; Kim, Y. H. A New Fabrication Method for IPMC Actuators and Application to Artificial Fingers. *Smart Mater. Struct.* **2006**, *15*, 1217-1224.
- Lee, J. W.; Kim, W. S.; Yoo, Y. T. Preparation and Actuation Performance of Ionic Polymer-Metal Composite Actuators Based on Nafion-Alumina Composite Membranes. *Polym. Korea* **2009**, *33*, 377-383.
- Jung, Y. H.; Lee, J. W.; Yoo, Y. T. High-performance Ionic Polymer-metal Composite Actuators Based on Nafion/Conducting Nanoparticulate Electrospun Webs. *Polym. Korea* **2012**, *36*, 434-439.
- Hao, M.; Wang, Y.; Zhu, Z.; He, Q.; Zhu, D.; Luo, M. A Compact Review of IPMC as Soft Actuator and Sensor: Current Trends, Challenges, and Potential Solutions From Our Recent Work. *Front. Robot. AI* **2019**, *6*, 129.
- Kengne Fotsing, Y.; Tan, X. Bias-dependent Impedance Model for Ionic Polymer-metal Composites. *J. Appl. Phys.* **2012**, *111*, 124907.
- Palmre, V.; Hubbard, J. J.; Fleming, M.; Pugal, D.; Kim, S.; Kim, K. J.; Leang, K. K. An IPMC-enabled Bio-inspired Bending/Twisting Fin for Underwater Applications. *Smart Mater. Struct.* **2013**, *22*, 014003.
- Jeong, H. M.; La, Y. S. The Effect of Crosslinking on the Actuation of Electroactive IPMC Prepared with Fluoroalkyl Methacrylate/Acrylic Acid/HEMA Copolymer. *Polym. Korea* **2005**, *29*, 463-467.
- Jeong, H. M.; Byung, C. K.; Young, S. la Properties and Performance of Electroactive Acrylic Copolymer-Platinum Composite Modified with Sodium Montmorillonite. *Polym. Korea* **2005**, *29*, 380-384.
- Cha, G. C.; Song, J. S.; Lee, S. M.; Mun, M. S. Effect of the Surface Electrode Formation Method and the Thickness of Membrane on Driving of Ionic Polymer Metal Composites (IPMCs). *Polym. Korea* **2006**, *30*, 471-477.

11. Song, D. S.; Han, D. G.; Rhee, K.; Kim, D. M.; Jho, J. Y. Fabrication and Characterization of an Ionic Polymer-metal Composite Bending Sensor. *Macromol. Res.* **2017**, *25*, 1205-1211.
12. Tiwari, R.; Kim, K. J. IPMC as a Mechanoelectric Energy Harvester: Tailored Properties. *Smart Mater. Struct.* **2013**, *22*, 015017.
13. Lee, J. W.; Yoo, Y. T. Preparation and Performance of IPMC Actuators with Electrospun Nafion[®]-MWNT Composite Electrodes. *Sens. Actuators B Chem.* **2011**, *159*, 103-111.
14. Branco, P. J. C.; Dente, J. A. Derivation of a Continuum Model and its Electric Equivalent-circuit Representation for Ionic Polymer-metal Composite (IPMC) Electromechanics. *Smart Mater. Struct.* **2006**, *15*, 378-392.
15. Jung, S. Y.; Park, J. O.; Park, S. Replacement of Surface Roughening Using Polyvinyl Alcohol Coating in the Fabrication of Nafion-based Ionic Polymer Metal Composite (IPMC) Actuators. *J. Polym. Res.* **2016**, *23*, 1-6.
16. Wang, H. S.; Cho, J.; Song, D. S.; Jang, J. H.; Jho, J. Y.; Park, J. H. High-Performance Electroactive Polymer Actuators Based on Ultrathick Ionic Polymer-Metal Composites with Nanodispersed Metal Electrodes. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2017**, *9*, 21998-22005.
17. Noh, T. G.; Tak, Y.; Nam, J. D.; Choi, H. Electrochemical Characterization of Polymer Actuator with Large Interfacial Area. *Electrochim. Acta* **2002**, *47*, 2341-2346.
18. Akle, B. J.; Leo, D. J.; Hickner, M. A.; McGrath, J. E. Correlation of Capacitance and Actuation in Ionomeric Polymer Transducers. *J. Mater. Sci.* **2005**, *40*, 3715-3724.
19. Tiwari, R.; Kim, K. J. Effect of Metal Diffusion on Mechanoelectric Property of Ionic Polymer-metal Composite. *Appl. Phys. Lett.* **2010**, *97*, 244104.
20. Aureli, M.; Lin, W.; Porfiri, M. Capacitance Boost in Ionic Polymer Metal Composites Due To Electrode Surface Roughness. *Proc. SPIE Conf. on Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)* **2009**, 7287, 72871A.
21. Porfiri, M. Influence of Electrode Surface Roughness and Steric Effects on the Nonlinear Electromechanical Behavior of Ionic Polymer Metal Composites. *Phys. Rev. E* **2009**, *79*, 041503.
22. Porfiri, M. An Electromechanical Model for Sensing and Actuation of Ionic Polymer Metal Composites. *Smart Mater. Struct.* **2009**, *18*, 015016.
23. Aureli, M.; Lin, W.; Porfiri, M. On the Capacitance-boost of Ionic Polymer Metal Composites Due To Electroless Plating: Theory and Experiments. *J. Appl. Phys.* **2009**, *105*, 104911.
24. Inamuddin; Khan, A.; Luqman, M.; Dutta, A. Kraton Based Ionic Polymer Metal Composite (IPMC) Actuator. *Sens. Actuator A Phys.* **2014**, *216*, 295-300.

출판자 공지사항: 한국고분자학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.