

나피온/전도성 나노입자 전기방사 웹을 이용한 고성능 이온성 고분자-금속 복합체 구동기의 제조

정요한 · 이장우* · 유영태†

건국대학교 공과대학 신소재공학과, *한국과학기술연구원 나노하이브리드연구센터
(2011년 12월 7일 접수, 2012년 2월 2일 수정, 2012년 2월 8일 채택)

High-Performance Ionic Polymer-Metal Composite Actuators Based on Nafion/Conducting Nanoparticulate Electrospun Webs

Yo-Han Jung, Jang-Woo Lee*, and Young-Tai Yoo†

Department of Materials Chemistry and Engineering, Konkuk University, 1 Hwayang-dong, Gwangjin-gu, Seoul 143-701, Korea
*Nano Hybrids Center, Korea Institute of Science and Technology, Hwarangno 14-gil 5, Seongbuk-gu, Seoul 136-791, Korea
(Received December 7, 2011; Revised February 2, 2012; Accepted February 8, 2012)

초록: 이온성 고분자-금속 복합체(ionic polymer-metal composite, IPMC) 구동기의 구동성능 향상을 위해 전기방사를 통해 제조된 나피온/전도성 나노입자 웹을 나피온 필름의 양면에 접합시켜 전해질막을 개질하였다. 전도성 나노입자는 다층탄소나노튜브(multiwalled carbon nanotube, MWNT)와 은 나노입자가 사용되었으며, 이를 각각 나피온 용액에 분산시켜 전기방사하였다. 개질된 IPMC는 향상된 구동변위, 응답속도 및 구동력을 나타내었으며 은 나노입자에 비해 MWNT가 더욱 뛰어난 구동변위와 구동력을 유도하였고, 전도성 나노입자가 포함되지 않은 전기방사 웹을 적용한 경우에도 성능향상이 관찰되었다. 제조된 IPMC의 우수한 구동성능은 전기방사 웹의 다공성에 의한 전해액 이동의 용이성, 고분산된 전도성 나노입자에 의해 유도된 높은 전기용량 및 낮은 전극 저항 때문인 것으로 분석되었다.

Abstract: To improve the performance of ionic polymer-metal composite (IPMC) actuators, Nafion films sandwiched with Nafion/conducting nanoparticulate electrospun webs were used as polymer electrolytes of IPMC. Multiwalled carbon nanotube (MWNT) and silver were the conducting nanoparticulates and the nanoparticles dispersed in a Nafion solution were electrospun. IPMCs with the Nafion/conducting nanoparticulate electrospun webs displayed improved displacements, response rates, and blocking forces. MWNT was superior to silver in terms of displacement and blocking force, and the webs without the conducting fillers also caused enhanced performances compared with the conventional IPMCs. These improvements were attributed to an elevated electrolyte flux through highly porous interlayers and capacitance induced by well dispersed conducting fillers, and low interfacial resistance between electrolyte and electrodes.

Keywords: ionic polymer-metal composites, actuator, electrospinning, multiwalled carbon nanotube, Nafion.

서 론

이온성 고분자-금속 복합체(ionic polymer-metal composites, IPMC) 구동기는 외부의 전기적인 자극에 의하여 형상이 변화하는 전기활성 고분자(electroactive polymer, EAP)의 하나로서 이온전도성 고분자의 양쪽 면에 전극 층이 입혀진 구조로 되어 있다. IPMC는 세라믹 구동기와는 달리 고분자물질로 구성되어 가볍고 유연하며 낮은 전압(1~5 V)에서 큰 변형,

빠른 응답속도 및 무게대비 큰 구동력을 나타내는 장점을 지니며 작동기 뿐만 아니라 구조적으로 유사한 센서, 슈퍼캐패시터 등 다양한 분야에 활용이 가능하다.¹⁻³

IPMC는 양쪽 전극에 전압이 인가되면 고분자 전해질 내부에 존재하는 수화된 양이온이 음으로 하전된 전극 층으로 이동하면서 수반되는 양 전극간 부피변화 차이에 의해 변형이 발생하는 구동 메커니즘을 갖는다. IPMC의 상업화를 위해서는 IPMC를 구성하는 각각의 요소들의 개질 및 전기적/기계적 물성의 최적화를 통한 구동특성의 개선이 시급하다. 따라서 기본 메커니즘을 바탕으로 금속성 나노입자와 같은 전도성 물질을 통한 전극개질, 새로운 전도성 고분자의 합성 및

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: ytyoo@konkuk.ac.kr

하이브리드화, 이온성 액체와 같은 새로운 전해액의 도입 등 IPMC를 구성하는 전극, 고분자 전해질, 전해액 각각에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁴⁹

본 연구는 IPMC의 고분자 전해질을 개질하여 전극과 전해질 사이의 계면적을 증가시킴으로써 구동성능을 향상시키는 것을 목표로 하였다. IPMC는 고분자 전해질의 양면에 한 쌍의 전극 층이 접합된 형태를 갖기 때문에(Figure 1), 전극/고분자 전해질 사이의 계면적이 넓을수록 계면적으로 보다 많은 양이온과 전해액이 이동하게 되고 이로 인하여 구동변위가 넓어짐으로써 우수한 구동성능을 발휘할 수 있다.

따라서 IPMC의 전기역학적 특성을 향상시키기 위해 고분자 전해질 및 전극의 개질 또는 고분자 전해질에 전도성 물질의 도입과 같은 복합화 방법을 통해 전극/전해질의 계면적을 넓히려는 시도가 계속되고 있다. 이러한 노력의 일환으로 Noh 등은 식각된 알루미늄 전극을 IPMC에 적용하여 전기용량을 향상시켰고, 이에 따른 우수한 구동특성을 확인하였다.¹⁰ Chung 등은 캐스팅 방법으로 제작된 나피온/은 복합막을 IPMC에 도입하여 금속전극과 고분자 전해질 사이의 계면특성을 향상시켜 구동변위를 증가시켰다.¹¹ 뿐만 아니라 Lee와 Yoo는 다층탄소나노튜브(multiwalled carbon nanotube, MWNT)/나피온 전기방사 웹을 상용 나피온 필름의 양면에 접합한 후, Au sputtering을 이용하여 전극 층을 형성시킴으로써 IPMC 구동기를 완성하였다. MWNT의 함량이 높아질수록 IPMC의 전류밀도, 초기 변위속도, 최대 변위가 증가되는 경향을 보이는 것을 확인하였고, 또한 Au/MWNT/나피온의 구조를 갖는 IPMC가 기존 백금의 무전해도금법으로 제작된 IPMC보다 에너지 효율 측면에서 매우 뛰어나다는 것을 확인하였다.¹²

전기방사(electrospinning)는 고분자용액이 들어있는 실린지 말단의 분사 노즐과 콜렉터 사이에 고전압을 인가하면 비표면적이 매우 큰 나노크기의 직경을 가지는 섬유와 섬유 사이의 공극률이 매우 큰 나노섬유 웹을 쉽게 제조할 수 있는 방법이다. 또한 입자의 분산성 측면에서도 유리한 기술로 필터, 바이오케미컬, 배터리, 센서 등 많은 분야의 연구에 광범위하게 활용되고 있다.¹³⁻¹⁵ 본 연구에서는 이러한 전기방사법을 이용하여 나피온/MWNT, 나피온/은 그리고 전도성 나노입자가 포함되지 않은 나피온 웹을 각각 제조하고, 이를 상용 나피온 필름에 접착시킴으로써 고분자 전해질을 준비하였고, 무전해도금법을 이용하여 준비된 고분자 전해질의 양면에 백금전극을 형성시켜 IPMC를 완성하였다. 이어서, 나피온/전도성 나노입자 전기방사 웹의 모폴로지와 표면저항 그리고 IPMC의 물리적/전기적 특성, 전기역학적 특성이 평가되었다.

실 험

재료. 전기방사를 통한 나피온/전도성 나노입자 전기방사

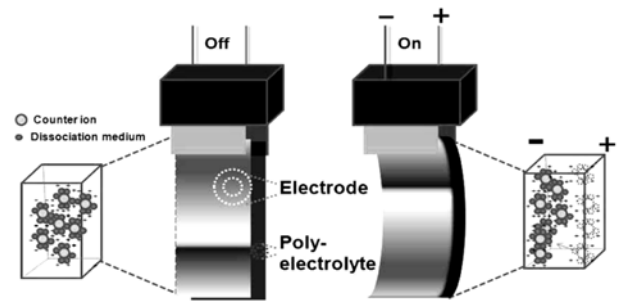


Figure 1. Structure and bending mechanism of IPMC actuator.

웹을 제조하기 위해 다층탄소나노튜브(multiwalled carbon nanotube, MWNT, purity: >95%, CM-95, Hanhwa Nanotech Co.), 은나노입자(particle size: <100 nm, purity: 99.5%, Aldrich), 나피온 용액(acid capacity: 0.95 meq/g, DE-2021, DuPont), poly(ethylene oxide) (PEO, M_n : ~400000, Aldrich)가 사용되었다. IPMC 제작을 위해 상용 나피온 필름(acid capacity: 0.89 meq/g, thickness: 183 μm , N-117, DuPont)이 IPMC의 고분자 전해질로 사용되었으며 무전해도금 시 전극물질로 백금염(tetraammineplatinum(II) chloride hydrate, 98%, Aldrich)을 사용하였고 환원제와 보조환원제로 각각 NaBH_4 와 NH_4OH 가 사용되었다.

나피온/전도성 나노입자 전기방사 웹 제조. 본 연구에서 전기방사는 Doshi의 방법을 이용하여 수행되었다.¹⁶ 전기전도성 물질인 MWNT와 은 입자를 나피온/PEO 혼합용액에 0.5, 5, 1 wt%(나노입자/나피온/PEO)의 조성으로 혼합하여 방사용액을 제조하였고 전도성 나노입자들의 고른 분산을 위해 초음파균질기가 사용되었다. 준비된 용액을 DC high voltage generator(CPS-40 K 03 VIT, Chungpa-EMT), 실린지펌프(KDS100, KD Scientific), 플라스틱 실린지, steel needle(21 gauge), 콜렉터(collector) 등으로 구성된 일반적인 방사 시스템을 이용하여 전기방사를 진행하였다. 나피온/MWNT 전기방사 웹의 경우 전압 11 kV, flow rate 0.4 mL/h, TCD(needle-to-collector distance) 10 cm 조건에서 12시간 동안 방사하였고, 나피온/은 전기방사 웹의 경우 전압 11 kV, flow rate 0.2 mL/h, TCD 10 cm 조건에서 24시간 동안 방사하였다. 전도성 나노입자가 포함되지 않은 순수한 나피온 웹의 경우 전압 13 kV, flow rate 0.2 mL/h, TCD 10 cm 조건에서 12시간 동안 방사하였다.

나피온/전기방사 웹 전해질 제조. 3% H_2O_2 , 2 NH_4Cl , 탈이온수로 각각 세척한 후 진공오븐 안에서 건조시킨 상용 나피온 막(N-117)의 양 표면은 한 쌍의 나피온/전도성 나노입자 전기방사 웹으로 적층되었다. 적층은 130 $^\circ\text{C}$, 30 kgf/cm^2 의 열압착 조건에서 이루어졌다. 그 제작과정은 Figure 2에 요약하였다. 이렇게 준비된 접합필름의 표면저항은 digital multi-meter(34411A, Agilent)를 이용하여 평가되었다.

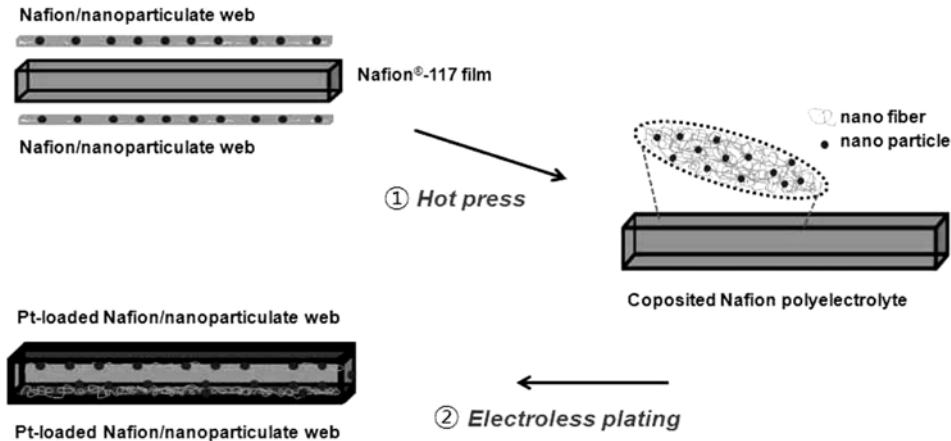


Figure 2. Fabrication procedure of IPMC actuators based on Nafion/conducting nanoparticulate electrospun webs.

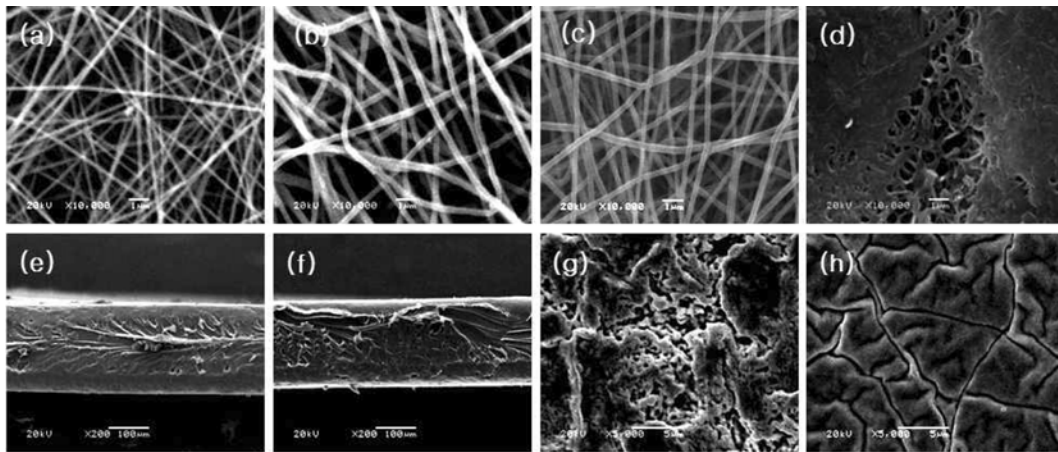


Figure 3. SEM images of IPMCs based on Nafion/conducting nanoparticulate electrospun webs: (a) Nafion/Ag electrospun web; (b) Nafion/MWNT electrospun web (10 wt% nanoparticulate filler per Nafion weight); (c) electrospun Nafion/Ag on Nafion film; (d) electrospun Nafion/MWNT on Nafion film (after heat treatment); (e) and (f) are cross sections of electrospun Nafion/Ag on Nafion film and electrospun Nafion/MWNT on Nafion film, respectively; (g) and (h) are surface morphologies of IPMCs completed after Pt deposition with Nafion/MWNT web and pristine Nafion web, respectively.

IPMC 제작 및 평가. 전기방사 웹/나피온 접합필름을 백금 염에 하루 동안 담지한 뒤 환원제와 보조환원제인 NaBH_4 와 NH_4OH 를 이용하여 백금이온을 환원시키는 방법으로 표면에 백금전극 층을 형성시켜 IPMC를 완성하였다.⁵ 각각의 IPMC는 성능향상을 위해 2 N LiOH 용액에 하루 동안 담지하여 짝이온을 Li^+ 로 이온교환시켰다. 전기방사 웹과 IPMC의 모폴로지는 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM, JSM-6380, Jeol)을 통해 관찰하였고, ac source/analyzer(6811B, Agilent), 레이저센서(LB-11, Keyence), data acquisition(DAQ) system(SCB-68, National Instruments)을 이용하여 IPMC의 구동변위를 평가하였고, 구동력은 로드셀(CB1-G150, Dacell)을 이용하여, 전기적 특성평가는 potentiostat(VMP3, BioLogic Science Instruments)을 통해 수행되었다.

결과 및 토론

모폴로지 분석. 제작된 IPMC 구동기의 모폴로지는 SEM을 통해 관찰되었고, 그 결과는 Figure 3에 나타내었다. 일반적으로, 고분자용액을 사용하여 전기방사된 나노섬유는 부드러운 표면을 가진다. 하지만 전도성 나노입자가 첨가되어 전기방사된 나노섬유는 표면이 상대적으로 거칠었다. 또한 일부 영역에서 응집되거나 불규칙적인 나노섬유의 형태가 관찰되었는데 이는 나노입자들 사이의 강한 상호작용에 의한 것이다.¹⁷ 섬유의 직경은 나피온/은 전기방사 웹이 가장 얇아 150~200 μm , 나피온/CNT 전기방사 웹과 나피온 전기방사 웹은 250~500 μm 였다. 전기방사 웹을 나피온 필름의 양면에 접합하여 제작한 모든 고분자 전해질 막들은 열압착시켜 제조되었지만 표면에 눌러진 형태의 섬유가 일부 남아 있었다. 즉,

Table 1. Composition, Thickness and Electrolyte Uptake of IPMCs

Sample	Composition of web (weight ratio)	Thickness ^a (mm)	Electrolyte uptake (wt%)	Note
Ag web	Nafion/PEO/Ag=5/1/0.5	0.21	20.6	
MWNT web	Nafion/PEO/CNT=5/1/0.5	0.22	20.9	
Bare web	Nafion/PEO=5/1	0.22	22.3	
Nafion film		0.20	16.8	Reference sample

^aThickness in the water-swollen state.

공극률이 향상된 고분자 전해질 막이 얻어졌다. 압착된 나피온/전도성 나노입자 전기방사 웹 층의 두께는 5~10 μm 였다.

전해액 흡수도 측정. 고분자 전해질의 공극률 향상은 Table 1에 나타난 전해액 흡수도(electrolyte uptake)를 통해 확인할 수 있었다. 상용 나피온 필름으로 제작된 일반적인 IPMC의 경우 16.8 wt%의 전해액 흡수도를 보인 반면 전기방사 웹이 적용된 IPMC는 모두 20 wt% 이상의 전해액 흡수도를 보였다. 특히, 나피온 전기방사 웹이 부착된 IPMC에서 22.3 wt%의 가장 높은 전해액 흡수도를 보였는데, 이는 은, MWNT와 같은 전도성 나노입자가 나노섬유 내에 존재하는 경우 나피온을 주성분으로 하는 나노섬유의 친수성 저하가 필연적으로 일어났기 때문인 것으로 판단되었다.

표면저항 측정. 나노섬유 내에 분산된 전도성 나노입자는 이로부터 얻어진 필름의 표면저항의 감소에 기여하였다. 나피온/전도성 나노입자 전기방사 웹이 양면에 접합된 나피온 필름의 표면저항은 디지털 멀티미터를 이용하여 2-probe 방식 (probe 사이의 거리: 1 cm)으로 측정되었고, 그 결과를 Figure 4에 나타내었다. 14 M Ω 으로 평가된 상용 나피온 막과 비교하여, 나피온/MWNT 전기방사 웹은 330 K Ω 으로 40배 이상 낮았고 나피온/은 전기방사 웹의 경우에도 2.8 M Ω 으로 표면저항이 감소되었다. 이는 전도성 나노입자가 나피온 나노섬유의 내부에만 위치하는 것이 아니라 섬유의 표면에도 일부

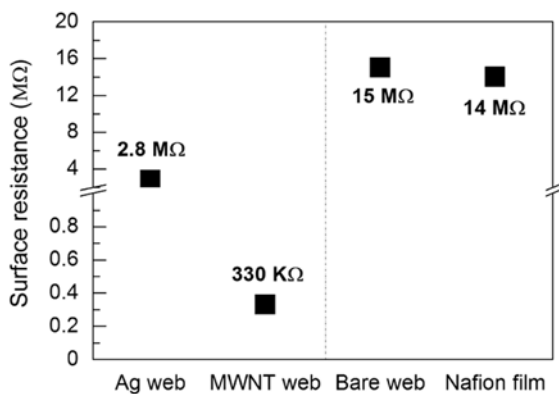


Figure 4. Surface resistance of polyelectrolytes with Nafion/conducting nanoparticulate electrospun webs and Nafion film.

위치하여 나노입자들간의 연결을 부분적으로 가능하게 했기 때문으로 보인다. 특히, 종횡비(aspect ratio)가 매우 큰 MWNT의 경우에는 입자간 연결성이 높아 표면저항이 크게 감소한 것으로 판단된다.

IPMC 구동기의 성능평가. Figure 5(a)와 5(b)는 각각 직류(3 V)의 인가전압 하에서의 말단변위(tip displacement)와 교류(3 V, 1 Hz)의 인가전압 하에서의 변위(시편그립으로부터 10 mm 떨어진 지점에서 측정)의 시간추이를 보여주고 있다.

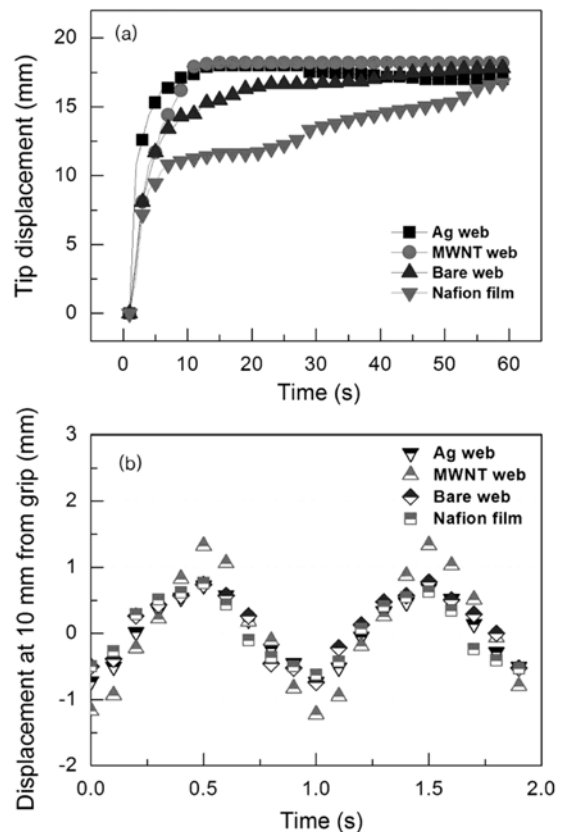


Figure 5. Bending performance of IPMCs based on Nafion/conducting nanoparticulate electrospun webs and Nafion film: (a) tip displacement under DC 3 V; (b) horizontal displacement at 10 mm distance from the grip under AC 3 V square waves at a frequency of 1 Hz.

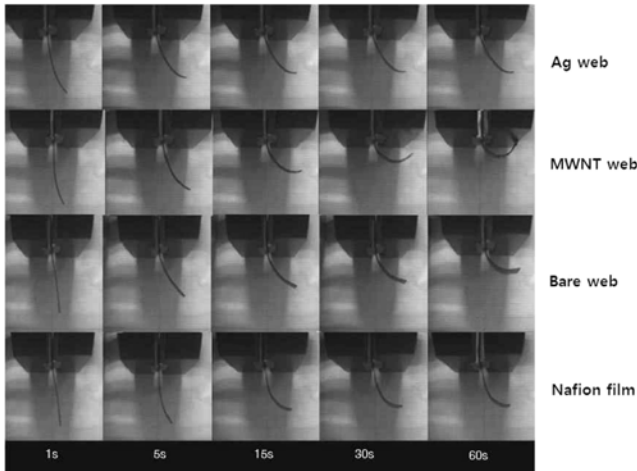


Figure 6. Time-dependent bending deformation of IPMCs based on Nafion/conducting nanoparticulate electrospun webs and Nafion film under DC 3 V.

Figure 6은 3 V의 직류 전압 하에서 시간별로 촬영한 IPMC 구동기의 이미지를 보여주고 있다. 직류전압 하에서의 변위는 웹이 부착되지 않은 기존 IPMC가 가장 작았고, 나피온/MWNT 전기방사 웹이 부착된 IPMC가 가장 컸다. 나피온/MWNT-IPMC의 곡률은 매우 커서 직류 3 V에서 1분 경과 후 IPMC의 말단이 시편그립에 도달하였다. 나피온/은 전기방사 웹과 나피온 전기방사 웹이 부착된 경우에도 기존 IPMC에 비해 향상된 구동변위를 보여주었다. 이러한 구동변위 경향은 구동력 테스트 결과(Figure 7)에서도 동일한 경향을 나타내었다. 즉, 나피온/MWNT 전기방사 웹 > 나피온/은 전기방사 웹 > 나피온 전기방사 웹 > 나피온 필름 순이었다. 직류 3 V의 인가전압 하에서, 나피온/MWNT-IPMC의 최대 구동력은 1.03 gf였다. 측정시편의 크기(25 mm × 5 mm; free length: 20 mm)와 두께(0.22 mm)를 고려할 때 본 연구의 나피온/MWNT-IPMC 구동기로부터 평가된 성능, 특히 구동력 실험 결과는 매우 고무적이다. 나피온/은 전극 층을 나피온 필름의 양면에 적층시킨 구조의 IPMC와 비교하였을 때, 구동변위, 응답속도, 구동력 모두 본 연구의 나피온/MWNT-IPMC가 훨씬 뛰어났다.¹¹ 나피온/MWNT 전기방사 웹을 나피온 필름의 양면에 적층시킨 후 Au sputtering을 이용하여 전극 층을 형성시켜 완성된 IPMC(말단변위: 16.7 mm, 작동력: 0.34 gf)에 비해서도, 본 연구의 나피온/MWNT-IPMC 구동기는 우수한 말단변위와 작동력을 보여주었다(말단변위: 18.2 mm, 작동력: 1.03 gf).¹² 교류전압 하에서 평가된 초기응답속도 역시 전기방사 웹의 도입으로 향상되었다. IPMC에 전압을 인가하면 전극/전해질 사이의 계면으로 전해질 내부의 이온과 외부로부터의 전자가 쌓여 계면에 전기이중층(electric double layer)을 형성하게 된다.¹² IPMC의 구동변위 및 구동력은 전극/전해질 계면으로 이동한 이온의 양이 많을수록 커지므로,

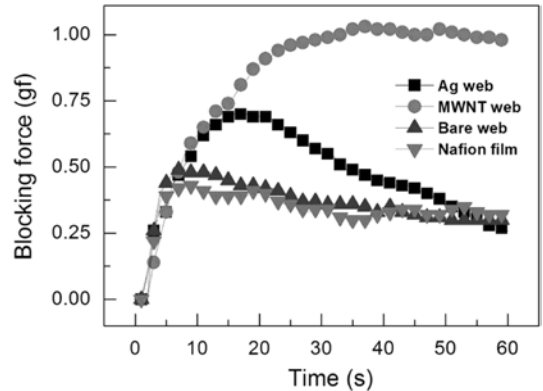


Figure 7. Blocking force of IPMCs based on Nafion/conducting nanoparticulate electrospun webs and Nafion film under DC 3 V.

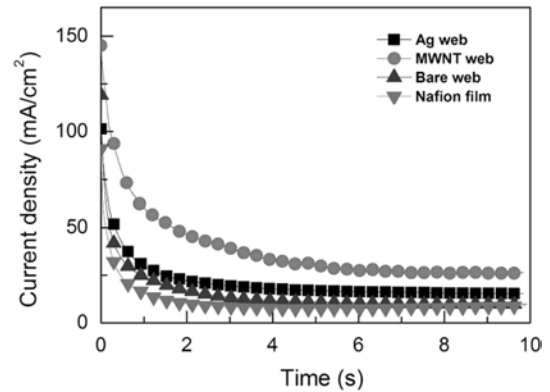


Figure 8. Potentiostatic analysis for IPMCs based on Nafion/conducting nanoparticulate electrospun webs and Nafion film. The measurement was performed for 10 s under a constant potential of 3 V.

전극/전해질 사이의 계면적이 커야 큰 변위 및 힘을 기대할 수 있다. 상술한 내용을 바탕으로, 본 연구의 나피온 전기방사 웹이 적용된 IPMC 구동기의 경우 나노섬유의 구조적 특징 즉, 넓은 표면적과 높은 공극률로 인해 무전해도금 시 기존 나피온 필름에 비해 보다 넓은 전극/전해질 계면을 형성하였을 것이다. 그 중에서도, 매우 큰 종횡비를 가진 MWNT로 나노섬유를 제조한 경우 무전해도금 과정에서 더욱 잘 발달된 전기이중층계면을 형성하였을 것으로 판단된다.

전기방사 웹이 적용된 IPMC 구동기는 방사 웹의 공극에 전해액을 저장할 수 있으므로 전기방사 웹이 적용되지 않은 경우에 비해 높은 전해액 흡수도를 나타내었고, 이렇게 형성된 수화공극채널은 이온 및 전해액의 확산을 용이하게 하므로, 이 또한 구동기의 성능향상에 영향을 끼쳤을 것이다. 이를 확인하기 위해 IPMC에 직류 3 V를 10초 동안 인가하고 이 때 얻어진 전류밀도(current density)를 시간에 따라 기록하였다(Figure 8). Figure 8에서 볼 수 있듯이, 본 연구의 IPMC 구동기는 직류 인가전압 하에서 시간에 따라 지수적으

로 감소하는 전류밀도 거동을 나타내었다. 이는 전기이중층 캐패시터(electric double-layer capacitor)의 전형적인 특징이다.¹⁸ 따라서 본 연구의 IPMC 구동기는 전하의 축적량에 비례하여 변형량이 증가하는 전기용량성 구동기(capacitive actuator)임을 알 수 있었다. 전류밀도는 나피온/MWNT 전기방사 웹이 적용된 IPMC의 경우에 가장 높았고, 나피온/은 전기방사 웹, 나피온 전기방사 웹, 나피온 필름 순으로 그 뒤를 따랐다. 3 V 하에서 10초 동안 IPMC의 전극/전해질 계면에 축적된 전하밀도(charge density)는 전류밀도를 시간으로 적분하여 계산되었고, 그 값은 나피온/MWNT 전기방사 웹, 나피온 전기방사 웹, 나피온 전기방사 웹 그리고 나피온 필름이 각각 379, 207, 150, 106 mC/cm²로 나타났다. 나피온/MWNT 전기방사 웹이 적용된 IPMC는 3 V의 인가전압 하에서 나피온 필름으로 제작된 기존 IPMC에 비해 3.5배의 전하를 축적하였고, 나피온/은 전기방사 웹이 적용된 IPMC의 경우 1.9배 그리고 나피온 전기방사 웹이 적용된 IPMC의 경우에도 1.4배의 전하를 축적하였다. 이 potentiostatic analysis 결과는 나피온/전도성 나노입자 전기방사 웹의 IPMC 적용이 전도성 나노입자를 전극 전해질 계면에 잘 분산시켜 낮은 계면저항 뿐만 아니라 높은 전기용량을 갖게 하여 결과적으로 기존 IPMC에 비해 뛰어난 구동성능을 나타내는 것을 보여 준다. 특히, 높은 중횡비를 가지는 MWNT가 은 나노입자에 비해 더욱 큰 효과를 나타냈는데, 이는 MWNT의 양자화학 효과(quantum chemical effect) 또한 IPMC 구동기의 구동 메카니즘에 기여했기 때문인 것으로 판단된다.¹⁹ 전도성 나노입자가 포함되지 않은 전기방사 웹이 적용된 경우에도 전기방사 나노섬유 웹 고유의 구조적 특징으로 물리적, 전기적 특성 및 전기역학적 특성을 향상시켰다.

결 론

본 연구에서는 IPMC 구동기의 성능향상을 위해, 나피온/전도성 나노입자 전기방사 웹이 나피온 필름의 양면에 접합된 고분자 전해질 막을 이용하여 IPMC 구동기를 제작하였다. MWNT와 은이 전도성 나노입자로서 사용되었다. 고표면적을 가진 다공성 나피온-전기방사 웹은 고분자 전해질인 나피온 필름에 부착되어 전해액 흡수도를 향상시켰다. 또한 나피온 나노섬유의 내부와 표면에 잘 분산된 상태로 존재하는 MWNT, 은 나노입자는 전해질 막의 표면저항을 효과적으로 감소시켰다. 나피온/전도성 나노입자 전기방사 웹이 적용된 본 연구의 IPMC 구동기는 구동변위, 구동력, 응답속도 측면에서 전기방사 웹이 적용되지 않은 기존 IPMC의 성능을 크게 뛰어넘었다. 그 중에서도 중횡비가 매우 큰 MWNT의 경우 은에 비해 구동성능 향상에 더욱 효과적이었다. 전도성 나노입자가 포함되어 있지 않은 나피온 전기방사 웹이 적용된

경우에도 기존 IPMC에 비해 우수한 구동성능을 나타내었다. 구동성능 향상의 원인으로서는 다공성 전기방사 웹을 통한 이온/전해액 이동의 용이성, 고분산 전도성 나노입자에 의해 유도된 높은 전기용량, 낮은 전극 저항 등을 들 수 있으며 이와 같은 요인들이 복합적으로 작용하여 IPMC의 구동성능이 향상됨을 본 연구에서 확인하였다.

감사의 글: 본 연구는 2010년도 건국대학교 학술진흥연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. M. Shahinpoor and K. J. Kim, *Smart Mater. Struct.*, **13**, 1362 (2004).
2. Y. B. Cohen, S. Leary, A. Yavrouian, K. Oguro, S. Tadokoro, J. Harrison, J. Smith, and J. Su, *Proc. MRS Symposium*, Boston, USA, 1999.
3. M. Shahinpoor and K. J. Kim, *Smart Mater. Struct.*, **10**, 819 (2001).
4. M. D. Bennett and D. J. Leo, *Sens. Actuators A*, **115**, 79 (2004).
5. J. W. Lee, W. S. Kim, and Y. T. Yoo, *Polymer(Korea)*, **33**, 377 (2009).
6. K. Onishi, S. Sewa, K. Asaka, N. Fujiwara, and K. Oguro, *Electrochim. Acta*, **46**, 737 (2000).
7. M. Luqman, J. W. Lee, K. K. Moon, and Y. T. Yoo, *J. Ind. Eng. Chem.*, **17**, 49 (2011).
8. M. J. Han, J. H. Park, J. Y. Lee, and J. Y. Jho, *Macromol. Rapid Commun.*, **27**, 219 (2006).
9. J. W. Lee, J. H. Kim, N. S. Goo, J. Y. Lee, and Y. T. Yoo, *J. Bionic Eng.*, **7**, 19 (2010).
10. T. G. Noh, Y. S. Tak, J. D. Nam, and H. R. Choi, *Electrochim. Acta*, **47**, 2341 (2002).
11. C. K. Chung, P. K. Fung, Y. Z. Hong, M. S. Ju, C. C. K. Lin, and T. C. Wu, *Sens. Actuators B*, **117**, 367 (2006).
12. J. W. Lee and Y. T. Yoo, *Sens. Actuators B*, **159**, 103 (2011).
13. Z. M. Huang, Y. Z. Zhang, M. Kotaki, and S. Ramakrishna, *Compos. Sci. Technol.*, **63**, 2223 (2003).
14. S. W. Choi, S. M. Jo, W. S. Lee, and Y. R. Kim, *Adv. Mater.*, **15**, 2027 (2003).
15. S. Rana and J. W. Cho, *Fibers and Polymers*, **12**, 721 (2011).
16. J. Doshi and D. H. Reneker, *J. Electrostat.*, **35**, 151 (1995).
17. G. Kickelbick, Ed., *Hybrid Materials-Synthesis, Characterization, and Applications*, 1st ed., Wiley-VCH, Weinheim, 2007.
18. T. Sugino, K. Kiyohara, I. Takeuchi, K. Mukai, and K. Asaka, *Sens. Actuators B*, **141**, 179 (2009).
19. R. H. Baughman, C. Cui, A. A. Zakhidov, Z. Iqbal, J. N. Barisci, G. M. Spinks, G. G. Wallace, A. Mazzoldi, D. D. Rossi, A. G. Rinzler, O. Jaschinski, S. Roth, and M. Kertesz, *Science*, **284**, 1340 (1999).