

백금 무전해 도금 방법의 변화에 따른 이온성 고분자 및 금속 복합체 액추에이터의 특성 분석

論 文
51C-12-7

Characterization of Ionic-Polymer Metal Composite Actuators Varying Electroless Plating Method of Platinum

車 承 恩* · 金 炳 穆** · 趙 成 桓*** · 李 承 起§ · 朴 政 浩§§ · 金 柄 奎§§§

(Seung-Eun Cha · Byung Mok Kim · Sung-Hwan Cho · Seung-Ki Lee · Jung-Ho Pak · Byung-Kyu Kim)

Abstract IPMC(Ionic Polymer Metal Composite)actuators were optimized for producing improved forces by changing multiple parameters including repetition of number of plating, surface electroding and additive(PVP)-treatment on reduction. The platinum electrode is deposited on the surface of the material where platinum particle stay in a dense form that appears to introduce a significant level of surface-electrode resistance. Actuation tests were performed for such IPMC actuators under a low voltage. The test results show that the lower surface-electrode resistance generates higher actuation capability in the IPMC actuators. In order to investigate relaxation behavior of bending and repeatability in dry condition, the IPMC was coated by rubber(KRATON™) to minimize the effect of water evaporation from IPMC. This actuator can be used in air with surface coating to avoid membrane drying.

Key Words : IPMC(Ionic Polymer Metal Composite), surface electroding, PVP(polyvinylpyrrolidone), KRATON™

1. 서 론

이온성 고분자 및 금속 복합체(IPMC : Ionic Polymer Metal Composite)는 두 개의 얇은 백금판(두께 1 μ m 이하) 사이에 놓인 내피온(Nafion®: perfluorosulfonate ionomer, Dupont社)막으로 구성되어 있으며 낮은 전압과 저항에서 큰 변형을 보이는 고감도 센서 및 액추에이터이다.

고분자-금속 복합물의 개발은 1939년 경 기질에 콜로이드상의 은을 침전시키는 것으로부터 시작되었다. 그러나 이 방법은 금속도금이 얇은 층으로 갈라지는 문제가 있었다. 이후 스퍼터링(sputtering) 방법을 이용하여 복합물을 형성 하였으나 이 방법 역시 금속이 얇은 층으로 갈라지는 문제점이 발견되었다. 1960년대 후반에는 Dow Chemical社에서 이온성 수지의 선택투과적 특성이 수소화붕소나트륨(sodium borohydride: NaBH₄)이나 히드라진(hydrazine: N₂H₄)과 같은 환원제로 이온 교환 막의 표면에 금속 염의 선택적 환원의 촉진을 가능하게 해준다는 사실을 발표하였다. 이후 1980년대에 들어서 이 방법은 Hitachi, Takenaka 등과 같은

일본의 여러 연구자들에 의해 내피온 및 그와 유사한 특성을 가지는 막의 응용에 사용되었으며 더 나아가서 Millet 등에 의해 IPMC 제작 방법 및 도금 메카니즘의 개선이 이루어졌다 [1].

IPMC는 그 두께 방향으로 전기장을 가하면 큰 변형이 일어난다. 역으로, IPMC가 갑자기 구부러지면 그 표면을 통하여 전압이 생성된다[2, 3]. 이러한 특성 때문에 bending 액추에이터 및 센서로 사용될 수 있다. 따라서 종종 “soft actuators-sensors” 또는 “artificial muscles”로 불리기도 한다.

IPMC는 다른 물질에 비해 다양한 장점을 가지고 있는데 그 예로써는 가볍고 유연하다는 물리적 특성 외에도 1-2V의 낮은 전압 하에서 구동, 빠른 반응시간(120Hz 이상), 연속적인 bending(약 100,000회 이상) 및 비교적 큰 변위의 산출, 그리고 마이크로 구조물로의 제작이 용이하다는 점 등이 있다[4, 5].

현재까지 알려진 IPMC를 이용한 응용 연구는 생체기계적(biomechanical) 응용 및 생체모방형(biomimetic) 응용 이외에도 인공근육처럼 작동하는 액추에이터를 제작하는데 사용되고 있다. 응용 사례로는 Osada등에 의한 도노관(catheter), 타원형의 마찰구동(EFD: Elliptical Friction Drive) 액추에이터 소자 등이 있다[6-12].

IPMC는 또한 생체 근육의 모방에도 응용할 수 있는데 Caldwell은 인공근육 액추에이터를 개발했으며 Shahnipoor 등은 연동운동형태의 펌프(peristaltic pump)와 인체 근육 강화를 위한 응용에서부터 물고기 로봇(robot fish)까지의 응용을 제안하였다[13-19]. Bar-Cohen 등은 IPMC 액추에이터를 우주 응용(space-based applications)에 사용하고 있는데 [20-23] 이러한 응용은 액추에이터의 구동부가 많이 필요하

* 非會員 : 高麗大 半導體技術研究所 研究員
** 正會員 : 한국과학기술연구원 마이크로시스템연구센터 연구원
*** 準會員 : 高麗大 電氣工學科 碩士課程
§ 正會員 : 檀國大 전기전자컴퓨터공학부 副教授 · 工博
§§ 正會員 : 高麗大 電氣工學科 副教授 · 工博
§§§ 正會員 : 한국과학기술연구원 마이크로시스템연구센터
선임연구원 · 工博
接受日字 : 2002年 9月 4日
最終完了 : 2002年 10月 31日

지 않으므로 유지보수가 어려운 환경에 이상적이다. 또한 IPMC는 진동 센서로서의 응용을 제공한다.

이들 특별한 응용 외에도 IPMC는 연료전지 막(fuel cell membrane), 전기화학적 감지(electrochemical sensing) 및 전기합성(electrosynthesis)등의 여러 응용분야를 찾을 수 있다[24].

IPMC는 기본구성물질의 특성 상 다른 물질에 비해 힘의 산출력이 상당히 떨어진다. 따라서 IPMC를 이용한 다양한 형태의 이동형 액추에이터의 설계 및 제작 과정에서 가장 큰 문제점으로 확인된 것은 기본 구성 물질인 내피온의 물성에 기인한 IPMC 자체의 약한 발생력이었다.

본 연구에서는, IPMC의 발생력 증가를 위한 공정 개선에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해 지금까지의 IPMC 제작 공정을 면밀히 검토하고 각 단계에서 재료 자체의 물성을 개선할 수 있는 다양한 방법을 시도하였는데 흡착/환원 과정 반복의 기본적인 공정 외에도 표면 전극화 과정의 반복에 의한 낮은 표면저항 산출, 1차 환원 과정에 확산제 도입을 통한 작고 균일한 백금입자 형성 그리고 제작된 IPMC 액추에이터의 표면 코팅을 통한 수분 증발 억제 등의 방법을 수행하여 그 결과를 분석함으로써 발생력 증가를 위한 최적의 공정방법을 제시할 수 있도록 하였다.

2. IPMC 동작 원리

IPMC의 변형을 유도하는 기본 원리는 이온을 포함한 액체로 채워진 내피온의 양 표면에 전기장이 가해졌을 때 막 내부에 채워진 양이온이 음극(cathode) 방향으로 이동하는 전기-삼투(electro-osmosis) 현상으로부터 얻어진다. 따라서 IPMC 동작에는 이온의 수화가 중요한 요소로 작용한다.

내피온을 비롯한 대부분의 이온 교환성 고분자 막(ion exchange polymeric membrane)은 용매 내에서 팽창하고 친수성을 띄게 되며 이러한 막의 이온성이 전기장에서 조절 가능한 능력의 원인이 된다. 더 나아가서 막의 양 표면에 근접하게 두 개의 전극을 위치시키고 전압을 가하면 막을 통과하는 용액 내부에서 미세한 단위의 이온 전이가 가능해진다. 이러한 현상을 이용하여 막 표면 위에 전도성 물질을 도금하는 것과 같은 방법을 통해 물과 같은 용매에 대하여 막의 부분적 팽창과 비팽창 정도를 막에 근접한 전극의 극성도에 따라 조절할 수 있다. 백금(platinum)은 그러한 전도체의 하나로 사용되며 IPMC 제작 시 내피온 내부 그물망 또는 외부의 표면에 증착시킬 수 있다.

IPMC의 기본 구성 물질인 내피온은 소수성(hydrophobic)을 띄는 플루오로화탄소 기본사슬(backbone fluorocarbon)로 구성된 고분자가 친수성(hydrophilic)인 클러스터(cluster)로부터 분리되어있는 구조로 되어있으며[3] 일반적인 내피온의 화학구조는 그림 1과 같다.

내피온은 PTFE(polytetrafluoroethylene)의 3차원 구조로 되어있으며, 여기에 부분적으로 술폰산 이온기(sulfonic ionic functional group: $-SO_3H$)가 곁가지처럼 매달려 규칙적으로 공간을 차지하고 있다.

전기장 하에서 양이온은 재배치되며 음극방향으로 이동한다. 이러한 이온의 재배치 현상은 고분자-금속 복합물을 부분적으로 붕괴시키거나 팽창시키게 되며 물리적으로 막의 부분적인 특성(특히 양극과 음극 부분)을 변화시켜 강한 변

형을 유발하고 구부러지게 된다. 따라서 낮은 전압에서 신호를 가해줌으로써 인가한 신호의 진동수 및 진폭에 비례하는 막 진동을 얻을 수 있다.

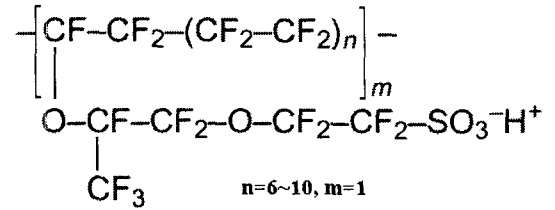


그림 1 내피온의 화학구조.

Fig. 1 Chemical structure of Nafion.

그림 2 에서와 같이 제작된 IPMC의 양 표면에 전기장을 가하면 양이온이 물분자와 함께 음극 쪽으로 이동하게 된다. 따라서 음극 면에서 물분자의 증가에 의해 부피가 팽창하고 반대로 양극(anode)면에서 물분자의 감소에 의한 수축이 일어나게 되며 결국에는 막이 양극 쪽으로 구부러지게 된다[2, 12].

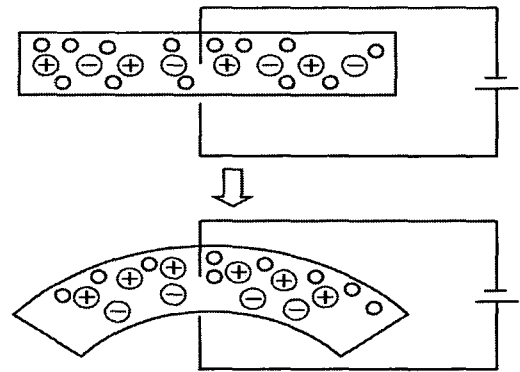


그림 2 전기장 내에서의 IPMC 시편의 움직임.

Fig. 2 Bending of IPMC strip under the electric field

3. IPMC 제작 공정 및 측정 방법

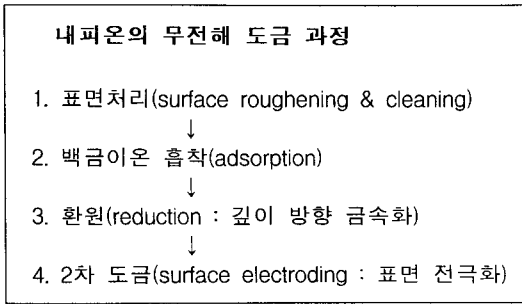
3.1 무전해 도금 공정 절차

액추에이터로서의 용도로 내피온을 금속화하는 방법은 변형(deformation)이 중요하므로 고분자 내부에 전극을 주입시키는 것이 중요하다.

내피온에 백금 전극을 형성하는 방법은 내피온 내부에 백금전극을 형성하는 과정(검은색의 백금입자 형성)과 내피온 외부, 즉 표면에 백금 전극을 형성하거나(흰색 또는 금속성을 띄는 백금입자 형성) 기타 다른 금속을 피복하는 방법의 두 가지로 생각할 수 있다.

IPMC 제작 과정은 일반적으로 내피온 필름의 표면 처리(surface roughening), 백금이온 흡착(adsorption), 흡착된 백금이온의 환원(reduction)의 기본 공정에 추가적으로 표면 금속화 과정(surface electroding)을 거친 후 원하는 금속 양이온으로 교환(ion exchange)하는 다섯 단계로 간단히 설명

할 수 있다. 기본적인 도금과정을 요약하면 다음과 같다.



본 실험에서는 위에 언급된 공정방법을 기본으로 하여 추가적으로 흡착/환원 공정의 반복(6회~8회)을 비롯한 표면금속화 과정의 반복 공정을 응용하였으며 환원과정 중에 확산제를 첨가하여 백금입자의 생성을 균일하게 하는 방법 그리고 제작이 완료된 IPMC의 표면을 고분자 물질로 코팅하는 방법 등을 시도하였다.

3.2 구동실험 및 측정장치

측정에 사용한 IPMC를 폭 4mm, 길이 30mm 규격의 리본 형태로 잘라서 D.I. water에 담귀 충분히 수화시켜 준 이후에 꺼내어, 표면의 수분을 간단히 제거한 후 그 변위 및 발생력을 측정하였다. 인가전압 및 주파수는 교류 4V_{p-p}, 0.5Hz로 고정시켰으며 측정장치의 구성은 그림 3(식염수 내 측정의 예)과 그림 4에 간단히 나타내었다.

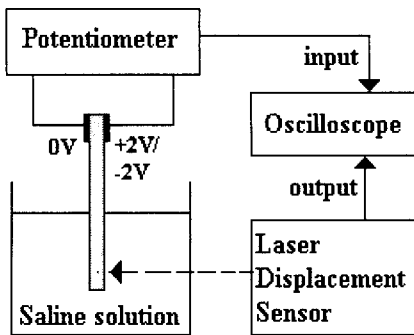


그림 3 IPMC의 변위 측정 장치 구성.
Fig. 3 Displacement measurement set-up of IPMC strip.

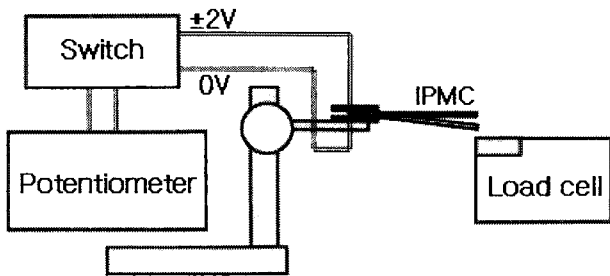


그림 4 IPMC의 발생력 측정 장치 구성.
Fig. 4 Force measurement set-up of IPMC strip.

4. 특성 분석 결과 및 고찰

본 연구에서는 내피온 117(두께 180 μ m)을 사용하였으며 IPMC 제작의 기본공정에 응용한 실험 결과 및 측정 자료들을 바탕으로 하여 IPMC의 발생력 증가에 초점을 맞추어 각각의 공정 변수들의 영향을 해석하고자 한다.

4.1 흡착/환원(1차 도금) 반복

흡착/환원의 무전해 도금을 통한 고분자-백금 화합물 형성 과정은 고분자의 깊이 방향으로의 전극화 과정이며 고분자-복합물 형성의 중요한 과정이다. 따라서 흡착/환원 과정을 IPMC 성능을 결정짓는 가장 중요한 과정으로 볼 수 있다. 실험에서는 내피온에 흡착된 백금 이온을 환원시켜 백금 금속으로 석출시키는 과정을 반복하여 수행함으로써 커패시턴스가 증가하는 효과를 가져올 수 있도록 하였다[12, 25].

그림 5는 흡착/환원 과정을 1회 시행 및 6회 시행하여 제작한 IPMC의 발생력과 변위를 측정하여 비교한 결과이다. 실험 결과 발생력 및 변위 모두 흡착/환원 과정의 반복에 의해 증가하였으며, 변위는 약 7.1%, 발생력은 약 41% 정도 증가하여 발생력의 증가 효과가 더 큰 것으로 나타났다.

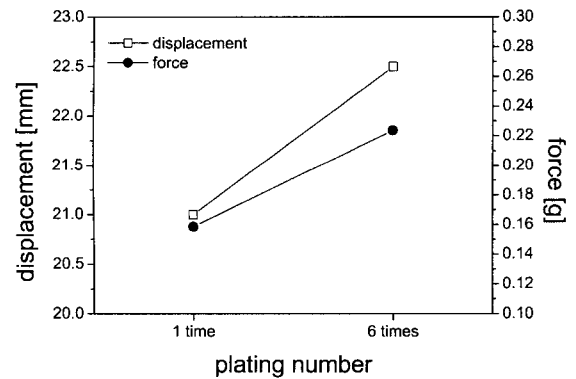


그림 5 흡착/환원 횟수 증가에 따른 변위와 발생력 변화.
Fig. 5 Variation of IPMC displacement and force with increase of plating times.

4.2 표면 전극화(surface electroding : 2차 도금) 반복

표면 전극화 과정은 흡착/환원의 1차 도금 후 깊이 방향으로 전극화가 된 고분자의 표면 도금을 강화하여 표면 전극화를 가져오기 위한 방법이다. 즉 1차 도금 후 생성된 고분자 표면의 백금층 위에 금속을 추가하는 과정으로서 IPMC 제작 공정의 최종 과정이라고 할 수 있다.

표면 전극화 과정을 적절하게 조절하거나 응용하면 고분자-백금 복합물의 표면 비저항 감소 등에 직접적인 영향을 미칠 수 있으며 이를 통해 액추에이터로서의 특성을 향상시킬 수 있다[26].

그림 6은 흡착/환원 과정을 거쳐 제작된 IPMC에 표면 금

속화 과정을 반복시켜가며 그 반복 횟수에 따른 표면 저항 값을 측정 한 결과이다.

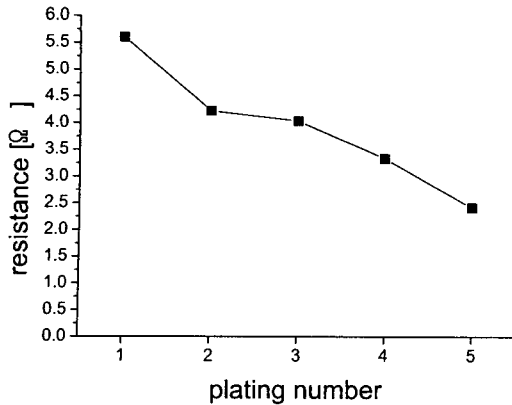


그림 6 IPMC 표면 전극화 반복에 대한 표면저항 의존도.
Fig. 6 IPMC surface resistance with the repetition of developing process.

표면 전극화 과정의 반복 횟수에 비례하여 IPMC 표면 전극의 저항값이 점차 감소하는 것을 볼 수 있으며 이러한 결과로 미루어볼 때 발생력 또한 표면 전극화 과정의 반복 횟수에 비례할 것으로 생각된다.

실제 측정 결과 표면 전극화 과정을 5번 거친 IPMC 액추에이터가 1번의 표면 전극화 과정을 수행한 액추에이터에 비해 발생력이 약 98% 정도 증가하였으며 그 결과를 그림 7에 나타내었다.

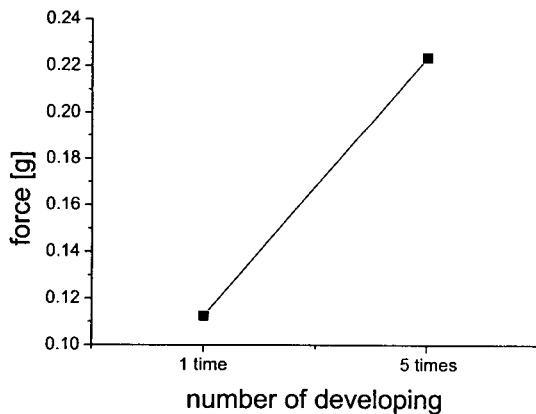


그림 7 표면 전극화 과정의 반복에 대한 발생력 의존도.
Fig. 7 Effect of the repetition of developing process on IPMC force

4.3 확산제의 첨가

IPMC 동작의 원동력은 수분 및 이온 함유량이다. 따라서 높은 발생력을 갖는 IPMC를 만들기 위한 가장 중요한 문제는 표면 전극 외부로 물이 새는 현상(water leakage)이 생기는 것을 없애거나 감소시키는 것이다.

IPMC 내부에 형성된 초기의 백금 입자들은 환원 과정을

거치는 동안 응고되면서 크게 성장하게 되며 결국 IPMC 구동 시 막 내부의 수분이 외부로 쉽게 빠져나가게 하는 단점이 있다. 따라서 환원 과정에서 백금의 평균 입자크기를 작게하고 균일하게 분포시키는 것이 매우 중요하다.

도금 시 표면전극과 고분자막의 경계영역(near-boundary region) 내부에 백금입자를 잘 확산시키면 IPMC 내부의 물의 전이가 좀 더 효율적으로 이루어져서 동작이 잘 될 것이다. 결국 잘 분산된 백금 입자가 탭과 같은 역할을 하여 IPMC 동작 시 표면 전극으로부터 외부로 물이 빠져나가는 현상(water leakage)을 없애거나 감소시켜 물의 이동이 좀 더 효율적으로 이루어짐으로써 액추에이터의 성능이 향상될 수 있다.

생성된 백금의 확산 정도 및 백금 입자의 크기는 도금 조건 및 표면처리 방법에 따라 달라지며 Shainpoor 등에 따르면 형성된 백금입자의 크기가 작을수록 IPMC 구동 시 막 내부의 수분이 외부로 빠져나가지 않도록 탭의 역할을 하며 최대 힘을 갖는 IPMC 제작을 위한 백금 입자의 크기는 평균 0.047 μ m 이어야 한다고 한다[27-29].

본 실험에서는 확산제의 일종으로 알려져 있는 PVP(polyvinylpyrrolidone)를 1차 환원과정에 도입하여 좀더 균일하고 작은 백금 입자가 형성될 수 있도록 하였다.

그림 8은 IPMC 제작 과정 중 1차 환원 과정에 확산제를 도입한 경우와 그렇지 않은 경우의 시편에 대한 발생력 측정 결과를 나타내었다. 실험 결과 확산제를 도입한 공정을 거친 시편의 발생력이 약 84.5% 증가하였다.

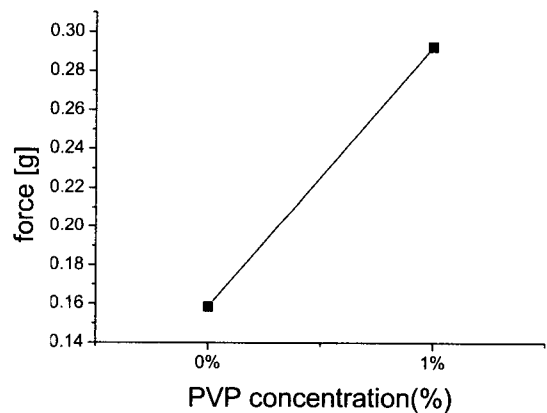


그림 8 확산제(PVP) 첨가가 IPMC 구동에 미치는 영향.
Fig. 8 Influence of PVP on IPMC performance.

4.4 IPMC 표면 코팅

IPMC의 주요한 작동원리는 전기영동(electrophoresis)이므로 이온 함유량 및 이온의 수화가 중요한 요소로 작용하며 따라서 습한 환경에서 최고의 작동조건을 갖는다.

수화된 IPMC를 공기 중이나 건조한 상태에서 동작시킬 경우 액추에이터 내부의 수분이 모두 증발하게 되면 액추에이터의 동작이 제대로 이루어지지 않는다.

본 실험에서는 이러한 문제점의 해결 방안으로서 제작이 완료된 IPMC의 표면을 Rubber 계열의 폴리머로 코팅하는 방법을 적용하였다[30].

실험에 사용한 코팅 물질은 폴리스티렌계 열 성형 고무 중합체인 KRATON™ polymer이다.

그림 9는 제작된 IPMC의 표면에 KRATON™을 코팅하여 그 발생력 및 변위를 측정된 결과이다.

그림에서 알 수 있듯이 KRATON™ 코팅 후 발생력은 20% 가량 증가하는 반면 변위는 약 80% 가량 감소하는 것으로 나타났는데 이러한 원인으로는 KRATON™ 코팅이 IPMC 수분 증발을 억제하는 효과는 있으나, 코팅 후 KRATON™ 자체의 강성(stiffness)으로 인해 전체 IPMC의 강성이 증가하기 때문인 것으로 보인다. 따라서 전체 막의 강성은 증가시키지 않으면서 효율적으로 수분 증발을 억제할 수 있는 코팅 물질에 관한 체계적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

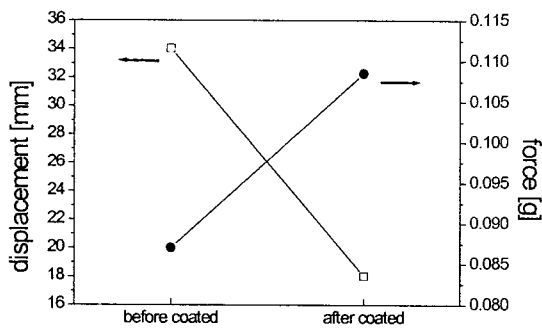


그림 9 IPMC의 기계적 특성에 미치는 코팅 효과.
Fig. 9 Mechanical properties depending on coating treatment.

이러한 코팅 효과는 IPMC 구동시 내부의 수분이 공기 중으로 유출되는 것을 막아줘서 공기 중에서 액추에이터의 동작수명을 증가시키는 결과를 가져다 준다.

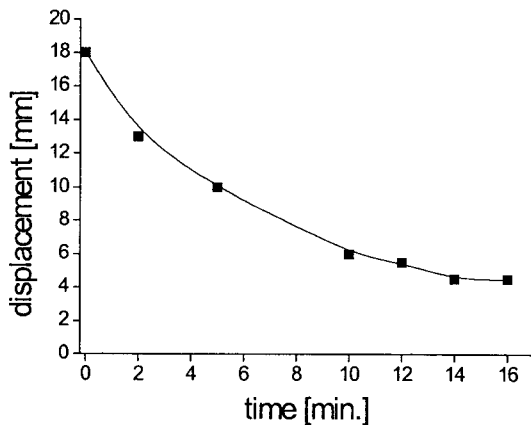


그림 10 코팅물질에 대한 IPMC의 시간에 따른 경향.
Fig. 10 Performance variation of coated IPMC with time.

제작 완료된 IPMC의 표면을 KRATON™으로 코팅한 후 공기 중에서 동작시키면 코팅 전에 비해 작동 수명이 상당히 연장되는데 그림 10에서 보는 바와 같이 구동 후 변위가

점차 감소하여 약 10분 후에는 최대 변위의 반으로 포화상태에 이른 후 지속적으로 동작하게 된다. 이때 변위의 감소는 코팅 전에 비해 좀 더 느린 속도로 나타난다 [25].

또한 전압을 가해 지속적으로 액추에이터를 동작시키게 되면 코팅물질이 녹거나 부풀어오르게 되며 4V 이상의 높은 전압을 가하면 이러한 현상이 뚜렷이 나타난다.

코팅 물질에 대한 이러한 단점들을 보완하면 IPMC의 동작시간의 연장 및 발생력 증가에 상당한 발전이 있을 것이라 생각된다.

5. 결 론

IPMC가 액추에이터로서 최대의 구동력 및 발생력을 갖도록 하기 위해서는 내부에 함유된 수분의 외부유출을 최대한 차단하는 것과 표면 전극의 저항을 낮추는 것, 그리고 내부 이온 함유량을 적절하게 유지시켜 커패시터로서의 역할을 증대시키는 것이라고 할 수 있다. 이상의 관점으로 볼 때 내피온을 무전해 도금하여 다공성 백금 전극을 형성하는데 있어서 액추에이터의 동작 및 발생력에 영향을 미치는 가장 중요한 세 가지 요인은 백금입자의 크기(size)와 분포(distribution), 그리고 침투(penetration)라고 할 수 있겠다.

본 실험에서는 IPMC의 기본 제작 공정 과정에 대한 다양한 응용 및 시도를 통하여 발생력을 80% 이상 증가시키는 것이 가능하였다. 이러한 공정 개선의 노력에는, 흡착/환원과정 반복의 기본적인 공정 외에 표면 전극화 과정의 반복에 의한 낮은 표면 저항 산출, 1차 환원 과정에 확산제 도입을 통한 작고 균일한 백금 입자 형성, 그리고 제작된 IPMC 액추에이터의 표면 코팅을 통한 수분 증발 억제 등의 다양한 시도를 포함하였다.

이 외에도 내피온 막의 직접 제작을 통한 원하는 막 두께의 조절 및 이 과정에 흡습성이 강한 물질(Li⁺ 이온)을 첨가하여 내피온의 이온함유량을 강화하는 등의 여러 가지 다양한 응용을 시도하고 있는 중이며 이를 통하여 높은 발생력을 가진 액추에이터의 개발이 가능할 것이라고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어 개발 사업 중 “지능형 마이크로시스템 개발 사업단”의 연구비 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Bar-Cohen, "Electroactive polymer[EAP] actuators as artificial muscles," SPIE Press, 139-191, 2001.
- [2] M. Shahinpoor, "Ion-exchange polymer-metal composites as biomimetic sensors and actuators," Polymer Sensors and Actuators, Chap. 12, pp.325-356, 1999.
- [3] S. Nemat-Nasser and J. Y. Li, "Electromechanical response of ionic polymer-metal composites," *Journal*

- of *Applied Physics*, vol. 87, pp. 3321-3331, 2000.
- [4] Y. Bar-Cohen, "Electroactive polymers as artificial muscles-capabilities, potentials and challenges," *Handbook on Biomimetics*, Section 11, Chap. 8, pp. 1-13, 2000.
- [5] R. Kanno, S. Tadokoro, T. Takamori and K. Oguro, "3-Dimensional dynamic model of ionic conducting polymer gel film(ICPF) actuator," *Proceedings of IEEE International Conference on systems, Man and Cybernetics*, pp. 2179-2184, 1996
- [6] S. Gio, T. Fukuda, T. Nakamura, F. Arai, K. Oguro and M. Negoro, "Micro active guide wire catheter system-characteristic evaluation, electrical model and operability evaluation of micro active catheter," *Proceedings of the 1996 IEEE International conference on Robotics and Automation*, pp. 2226-2231, April 1996.
- [7] S. Tadokoro, S. Yamagami and T. Takamori., "Development of a distributed actuation device consisting of soft gel actuator elements," *Proceedings of the 1998 IEEE International conference on Robotics and Automation*, pp. 2155-2160, May 1998.
- [8] M. Konyo, S. Tadokoro, and T. Takamori, "Artificial tactile feel display using soft gel actuators," *Proceedings of the 1998 IEEE International conference on Robotics and Automation*, pp. 3416-3421, April 2000.
- [9] W. Zhou, W. J. Li, N. Xi and S. Ma, "Development of force-feedback controlled Nafion micro-manipulators," *Proceedings of SPIE*, Vol. 4329, pp. 401-410. 2001.
- [10] K. Jung, S. Ryew, J. Jeon, H. Kim, J. Nam and H. Choi, "Experimental investigations on behavior of IPMC polymer actuator and artificial musclelike linear actuator," *Proceedings of SPIE*, Vol. 4329, pp. 449-457, 2001.
- [11] K. Oguro, N. Fujiwara, K. Asaka, K. Onishi and S. Sewa, "Polymer Electrolyte Actuator with Gold Electrodes," *Proceedings of SPIE*, Vol. 3669, pp. 64-71, 1999.
- [12] K. Onishi, S. Sewa, K. Asaka, N. Fujiwara and K. Oguro, "Bending response of polymer electrolyte actuator," *Proceedings of SPIE*, vol. 3987, pp. 121-128, 2000.
- [13] M. Shahinpoor and Kwang J. Kim, "Design, development and testing of a multi-fingered heart compression/assist device equipped with IPMC artificial muscles," *Proceedings of SPIE*, Vol. 4329, pp. 411-420, 2001.
- [14] M. Shainpoor and Kwang J Kim, "Novel ionic polymeric hydraulic actuators," *Proceedings of SPIE*, Vol. 4329, pp. 164-173, 2001.
- [15] A. Keshavarzi, M. Shahinpoor, Kwang J. Kim and J. Lantz, "Blood pressure, pulse rate, and rhythm measurement using ionic polymer-metal composites sensors," *Proceedings of SPIE*, Vol. 3669, pp. 369-376, 1999.
- [16] R. Lumia and M. Shahinpoor, "Microgripper design using electro-active polymers," *Proceedings of SPIE*, Vol. 3669, pp. 322-329, 1999.
- [17] L. Ferrara, M. Shahinpoor, Kwang. J. Kim, B. Schreyer, A. Keshavarzi, E. Benzel and J. Lantz., "Use of ionic polymer-metal composites (IPMCs) as a pressure transducer in the human spine," *Proceedings of SPIE*, Vol. 3669, pp. 394-401, 1999.
- [18] M. Shahinpoor, Y. Bar-Cohen, J. O. Simpson and J. Smith, "Ionic polymer-metal composites(IPMCs) as biomimetic sensors, actuators and artificial muscles-a review," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 7, R15-R30, 1998.
- [19] G. Laurent and E. Piat., "Efficiency of swimming microrobots using uonic polymer metal composite actuators," *Proceedings of the 2001 IEEE International conference on Robotics and Automation*, pp. 3914-3919, May 2001.
- [20] S. Tadokoro, M. Fukuhara, Y. Bar-Cohen, K. Oguro and T. Takamori, "A CAE approach in application of Nafion-Pt composite(ICPF) actuators -analysis for surface wipers of NASA MUSES-CN nanorovers." *Proceedings of SPIE*, Vol. 3987, pp. 262-272, 2000.
- [21] Y. Bar-Cohen, T. Xue, M. Shainpoor, J. Simpson and J. Smith, "Flexible, low-mass robotic arm actuated by electroactive polymers and operated equivalently to human arm and hand," *Robotics 98: The 3rd Conference and Exposition/Demonstration on Robotics for Challenging Environments Sponsored by American Society of Civil Engineers*, April 1998.
- [22] Y. Bar-Cohen, S. Leary, M. Shainpoor, J. O. Harrison and J. Smith, "Electro-active polymer(EAP) actuators for planetary applications," *Proceedings of SPIE*, Vol. 3669, pp. 57-63, 1999.
- [23] Y. Bar Cohen, S. Leary, A. Yavrouian, L. K. Oguro, S. Tadokoro, J. Harrison, J. Smith and J. Su, "Challenges to the applications of IPMC as actuators of planetary mechanism." *Proceedings of SPIE*, Vol. 3987, pp.140-146, 2000.
- [24] Kwang J. Kim, M. Shahinpoor and A. Razani, "Preparation of IPMC for use in fuel cells, electrolysis and hydrogen sensors," *Proceedings of SPIE*, Vol. 3987, 311-320, 2000.
- [25] 차승은, 안호정, 박정호, 이승기, "IPMC(Ionic polymer metal composite) 액추에이터의 제작 및 전기-기계적 반응," 제 3회 한국 MEMS 학술대회 초록집, pp. 44-49, 2001.
- [26] M. Shainpoor and Kwang J Kim, "The effect of surface-electrode resistance on the performance of ionic polymer-metal composite(IPMC) artificial

muscles," *Smart Mater. Struct.* Vol. 9, pp. 543-551, 2000.

- [27] M. Shainpoor and Kwang J Kim, "Novel physically loaded and interlocked electrode developed for ionic polymer metal composites(IPMC's)," *Proceedings of SPIE*, Vol. 4329, pp.174-181, 2001.
- [28] M. Shainpoor and Kwang J Kim, "Ionic polymer metal composites : I. Fundamentals," *Smart Mater. Struct.* Vol. 10, pp. 819-833, 2000.
- [29] M. Shainpoor and Kwang J Kim, "The synthesis of nano scaled platinum particles(NSPP)-their role in performance improvement of polymer-metal composite(IPMC) artificial muscles," *Proceedings of SPIE*, Vol. 4329, pp. 189-198, 2001.
- [30] M. Uchida and M. Taya, "Solid polymer electrolyte actuator using electrode reaction," *Polymer* Vol. 42, pp. 9281-9285, 2001.



조 성 환 (趙 成 桓)

1977년 2월 15일생, 2001년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업. 현재 고려대학교 대학원 전기공학과 석사과정.
Tel : 02-3290-3238
Fax : 02-921-0544
E-mail : umjigolmoo@hanmail.net



이 승 기 (李 承 起)

1963년 5월 15일생. 1986년 서울대학교 전기공학과 졸업(학사), 1988년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 1992년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1992년~1993년 일본 Tohoku 대학교 기계전자공학과 특별연구원 (JSPS fellow), 1994년~현재 단국대학교 전기전자컴퓨터공학부 부교수
Tel : 02-709-2785, Fax : 02-795-8771
E-mail : skilee@dku.edu

저 자 소 개



차 승 은 (車 丞 恩)

1972년 1월 22일생, 1994년 경원대학교 화학과 졸업. 1996년 동 대학원 화학과 졸업(석사). 현재 고려대학교 반도체기술연구소 연구원
Tel : 02-3290-3799, Fax : 02-921-0544
E-mail : amadeus21c@yahoo.co.kr



박 정 호 (朴 政 浩)

1960년 2월 5일생, 1985년 미국 Purdue 대 전기공학과 졸업(학사), 1988년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 1992년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1992년~1995년 미국 Intel사 책임연구원, 1995년~1998년 고려대학교 전기공학과 조교수, 1998년~현재 고려대학교 공대 전기공학과 부교수
Tel : 02-3290-3238, Fax : 02-921-0544



김 병 목 (金 炳 穆)

1974년 11월 24일생. 1993년 원광대학교 반도체학과 졸업(학사), 1999년 전북대학교 반도체과학기술학과 졸업(석사), 2001년~현재 한국과학기술연구원 마이크로시스템연구센터 연구원
Tel : 02-958-5613, Fax : 02-958-6910
E-mail : kimbm@hanmail.net



김 병 규 (金 柄 奎)

1965년 2월 7일생. 1997년 Univ. of Wisconsin 기계공학과 (공학박사). 2000년~현재 한국과학기술연구원(KIST) 선임연구원. 관심분야는 마이크로 로봇, Micro Actuator, MEMS Simulation