

표면전극 형성 방법과 이온-교환막 두께가 이온성 고분자-금속 복합체(IPMC) 구동에 미치는 영향

차국찬[†] · 송점식 · 이석민 · 문무성

재활공학연구소

(2006년 3월 15일 접수, 2006년 10월 25일 채택)

Effect of the Surface Electrode Formation Method and the Thickness of Membrane on Driving of Ionic Polymer Metal Composites (IPMCs)

Gook Chan Cha[†], Jeom Sik Song, Sukmin Lee, and Mu Seong Mun

Korea Orthopedics & Rehabilitation Engineering Center (KOREC),

47-3, Kusan-dong, Bupyung-ku, Incheon 403-120, Korea

(Received March 15, 2006; accepted October 25, 2006)

초록 : 이온성 고분자-금속 복합체(ionic polymer metal composite, IPMC)는 낮은 구동 전압에서도 비교적 빠른 응답 속도를 갖는 전기활성고분자(electro active polymer, EAP) 재료이다. IPMC는 인간의 근육과 유사한 인성 및 변형 특성을 나타내므로 최근 인공근육용 구동체 개발을 위한 많은 연구들이 진행되어 왔으며, 또한 우주항공, 센서 및 펌프 등의 다양한 분야에서 적용가능성이 조사되고 있다. 본 연구에서는 액상 내피온을 이용하여 용액 캐스팅 방법으로 다양한 두께의 내피온 막을 제조하는 방법을 도입하였다. IPMC 제조방법은 Oguro가 제안한 방법을 기초로 하여 도금온도를 변화시켜 무전해 도금법을 이용하여 내피온 내부로의 1차 전극을 형성시켰으며, 형성된 1차 전극의 안정성과 표면전기저항을 낮추기 위하여 이온빔보조증착법(ion beam assisted deposition, IBAD)을 도입하여 금과 이리듐을 1차 전극표면 위에 증착하여 2차 전극을 형성시켰다. 1, 2차 무전해 도금한 IPMC와 2차 IBAD 코팅한 IPMC 전극의 표면과 단면 형상을 SEM으로 관찰하였으며, 전압을 인가할 때 IPMC 내부의 수분증발 및 이온전도도의 변화를 조사하였다. 또한 다양한 두께의 IPMC를 제조하여 두께변화에 따른 변위와 구동력을 측정하였다.

Abstract : Ion exchange metal composite(IPMC) has toughness equivalent to the range of human's muscle, transformation-actuation force by relatively low voltage and the fast response time. Thus, as a new method for preparing thicker IPMC, the solution casting method to make the films of various thicknesses out of liquid nafion was attempted in this study. To reduce the surface resistance of electrode, the first plated electrode prepared by Oguro method was replated with Au and Ir using ion beam assisted deposition(IBAD). The microstructures of electrode surfaces before and after IBAD plating were investigated using SEM. The change of water and ion-conductivity in IPMC were measured under applied voltage. The displacement and driving force of IPMCs with various thicknesses were measured to evaluate the driving properties.

Keywords : nafion, IPMC (ion exchange metal composites), artificial muscle, IBAD (ion beam assisted deposition), electro-mechanical.

서 론

전기활성고분자(electro active polymer, EAP)는 유연한 전도성 재료로서 양 단에 전압을 인가하면 고분자 자체가 변형을 일으키는 특성을 지닌다. 이들은 형상기억합금(SMA)이나 전기활성세라믹(EAC)에 비해 더 큰 변형을 보인다. 전기활성고분자 중 주목받는 재료의 하나인 이온성 고분자-금속 복합체(ionic polymer

metal composite, IPMC)는 낮은 구동 전압에서도 큰 변형과 빠른 응답속도를 가진 구동체로서, 이를 이용하여 인공근육용 구동체, dynamic sensor 및 연료전지 등의 다양한 분야에서 적용가능성을 찾기 위한 연구들이 진행되고 있다.¹⁻¹⁸ 특히 IPMC 고분자 구동체는 맴스(micro-electro-mechanical system, MEMS) 공정으로 소형화가 가능하고 가공성이 좋은 스마트 소재로서 발전 가능성이 매우 크다.

IPMC의 구동 메카니즘은 균일한 표면전극 양단에 전압을 인가하면 제조시 포함되는 이온-수분 클러스터의 형태인 양이온들이

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: gccha@iris.korec.re.kr

양극에서 음극으로 이동하고, 음극에서는 전극의 팽창과 양극에서는 수축이 발생하여 전체적으로 전극간의 체적의 변화가 발생하고 따라서 고분자막의 변형이 일어나게 된다.^{2,6,7} 구동 전압 범위 내에서 IPMC 내부에 존재하는 물의 전기분해가 일어나며, 이들 전기분해 반응에 의해 고분자막 내부의 수분 감소 현상이 발생하여 구동 변위와 구동력을 감소시키는 요인으로 작용한다.

현재 주로 사용하는 IPMC는 거의 기존 상업화된 고분자막인 내피온을 사용하는데, 두께가 180 μm로써 큰 변위와 빠른 응답 속도는 낼 수는 있지만 구동력이 낮기 때문에 응용할 수 있는 범위가 좁다. 이를 개선하기 위하여 여러 IPMC를 적층하여 구동력을 높이려고 시도된 바 있으며, 이 기술은 복합적인 기술과 부차적인 공정을 필요로 하기 때문에 한계가 있다. 따라서 기존의 IPMC의 낮은 구동력의 문제점을 해결하고 구동력을 높이기 위한 방법으로 액상 내피온을 이용하여 두꺼운 IPMC를 제조하는 연구가 활발히 이루어지고 있으나, 이에 관련한 정밀한 제조기술이 요구되며 또한 일정한 두께의 IPMC를 만들기가 쉽지 않다.¹⁹

본 연구에서는 전극형성 과정의 반응온도를 높여 제조시간을 단축시킬 수 있는 새로운 IPMC의 제조방법을 시도하였으며, 새로이 고안된 방법으로 1, 2차 무전해 도금에 의하여 전극을 형성시켰다. 또한 1차 형성된 전극의 안정성과 표면전기저항을 낮추기 위하여 이온빔보조증착법(ion beam assisted deposition, IBAD)을 이용하여 금과 이리듐을 1차 전극표면 위에 진공증착하고 2차 표면전

극을 형성시켰다. 제조된 전극의 형상을 SEM으로 미세구조를 관찰하였으며, 내피온 막의 이온전도도, 수분함량 변화 및 구동 특성을 조사하였다. 또한 액상 내피온을 이용하여 다양한 두께의 내피온을 제조하는 방법을 도입하였으며, 새로운 방법으로 제조된 IPMC의 두께에 따른 변위와 구동력의 변화를 조사하였다.

실 험

시약 및 재료 이온교환막 제조에 사용한 액상 내피온은 DuPont사의 DE-1020을 사용하였다. 제조한 이온 교환막의 유기물질을 제거하기 위해 10% 과산화수소(DAEJUNG, Co.)를 사용하였으며, 이온교환막인 내피온의 표면전극을 형성시키기 위하여 백금화합물([Pt(NH₃)₄Cl₂], Aldrich Co.)을 사용하였다. 환원제로는 주기율표에서 1족 원소로 이루어진 화합물은 모두 사용 가능하지만 보편적으로 값이 저렴한 붕소화합물(NaBH₄, Duksan, Co.)을 사용하였다. 2차 전극형성을 위한 IBAD 증발 타겟으로는 금(순도 99.999%, 3~6 mm pieces, Super Conductor Materials, Inc.)과 이리듐(순도 99.95%, 3~6 mm pieces, Super Conductor Materials, Inc.)을 사용하였다.

액상 내피온을 이용한 다양한 두께의 이온교환막 제조 액상 내피온은 물과 부탄올이 혼합된 용액에 10~12% 정도 녹아 있기 때문에 Figure 1과 같이 여러 가지 조건을 변화시켜 가면서 반복 실험을 통해 새로이 제안된 캐스팅 법으로 두꺼운 내피온을 제작하였다.

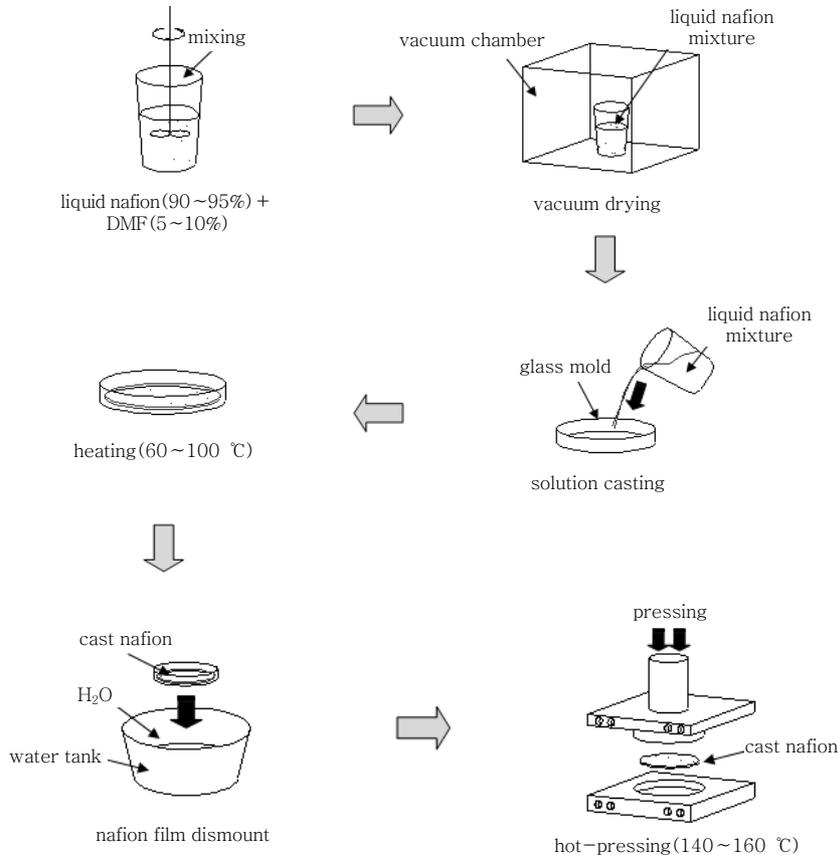


Figure 1. Scheme of the preparation of thick ion-exchange membrane using the liquid nafion solution.

특히 액상 내피온 자체만으로 캐스팅하게 되면 물과 알코올의 낮은 끓는점 때문에 빨리 증발하여 필름에 크랙이 생길 수 있기 때문에 반드시 끓는점이 높은 5~10 wt% 정도의 아미드 계통의 용제를 첨가하여 필름의 안정성을 확보하여야 한다. 또한 일정한 두께의 필름을 얻기 위해 유리 몰드에서 캐스팅된 필름을 떼어낸 후, 평판 금속몰드를 이용하여 온도는 140~160도, 압력은 200~250 kgf/cm²로 hot-pressing 하여 두께가 일정한 500, 700, 1000, 및 2000 μm 인 이온교환막을 제조하였다.

IPMC 제조. 본 연구에서는 Oguro가²⁰ 제시한 IPMC 제조 방법을 바탕으로 하여 여러 가지 조건들을 변화시켜 가면서 새로운 제조방법을 설계하였다. IPMC를 제조하기 전 먼저 이온교환막을 70도의 과산화수소(10%)에 1시간 동안 침지하여 표면의 유기 물질을 완전히 제거한 후 초순수로 3~5회 세척하였다. 세척된 내피온을 백금화합물과 초순수가 2 mg/1 mL의 비율로 만들어진 용액에 함침시켰다. 특히 Oguro가 제시한 1차 도금 방법은 크게 이온교환 반응과 환원 반응으로 나눌 수가 있으며, 본 연구와 주요한 차이점은 이온교환 과정에서의 반응 온도이다. Oguro는 이온교환 반응을 상온에서 실시하였으나, 본 연구에서는 Figure 2와 같이 온도에 따른 변위 측정 실험 결과를 바탕으로 60~70도의 고온에서 반응을 진행하였다. 이러한 이유는 Figure 3과 같이 반결정성 고분자인 내피온의 열적 성질을 측정하였을 때 T_g 가 60~70도에서 관찰되었고, 고분자 사슬이 유리상에서 고무상으로 분자운동이 활발해

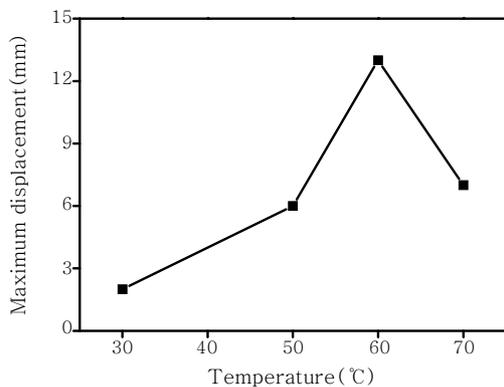


Figure 2. Maximum displacements of IPMC prepared at the different temperatures of ion-exchange reactions.

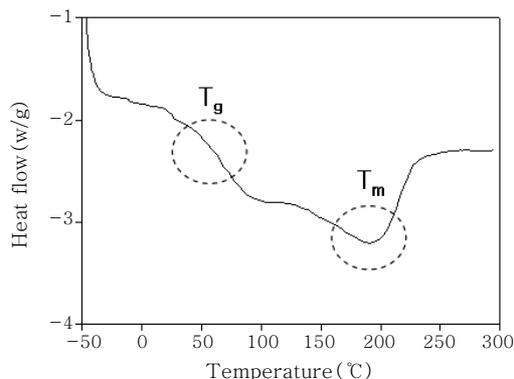


Figure 3. Thermal analysis of nafion using the DSC.

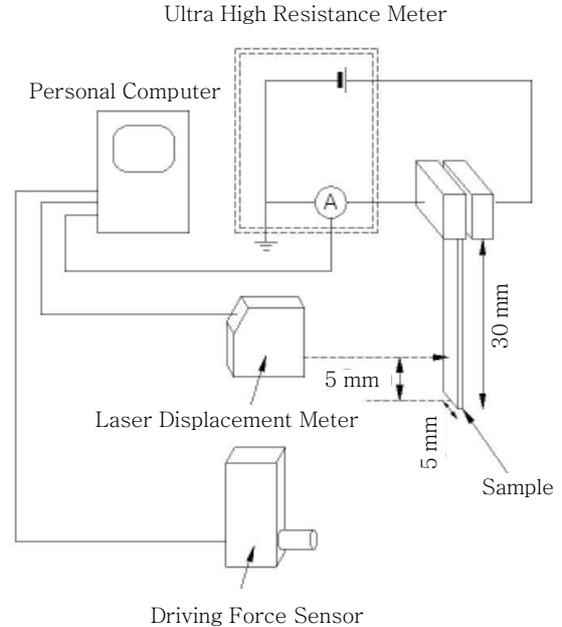


Figure 4. Scheme of apparatus for measuring displacement and driving force of IPMC.

지는 이 온도 이상에서 백금이 내피온 내부로 더 깊이 침투할 수 있으며, 백금과 내피온이 혼재하는 층, 즉 백금 확산 층이 더 잘 형성되기 때문이다. 이온교환 반응 시간은 overnight이었다. 환원 반응은 상온에서 실시하였으며, 5% 환원 용액을 30분 간격으로 2 mL씩 7회 첨가한 후, 20 mL를 더 첨가하여 온도를 서서히 60도까지 올리면서 90분 동안 반응을 시킨 다음, 초순수로 여러 번 세척한 후에 미반응 환원 용액을 제거시켜 counter cation이 Na⁺-form인 IPMC를 제조하였다. 도금은 1차와 2차로 두 차례 실시하였으며, 1차 도금은 백금 확산층을 잘 형성시키기 위함이고, 2차 도금은 이온교환 반응 온도를 상온으로 유지하여 표면전극의 비중을 높이기 위한 공정이다. 또한 2차 도금은 본 연구에서는 IBAD(SYSTEM-C9038, Korea Vacuum Tech., Ltd, Korea) 방법으로 금과 이리듐을 500 Å 두께로 증착하였다.

측정 및 분석 방법. 제조된 IPMC의 표면과 절단 단면은 FESEM I(JSM6700F, Jeol, Tokyo, Japan)을 이용하여 관찰하였으며, 내피온 필름의 열적 성질과 구동 시간에 따른 수분 함량의 변화는 열분석기(DSC 2010, TA Co., USA)를 사용하여 측정하였다. 표면전기저항은 2-probe를 이용한 multi-meter를 사용하여 5×40 mm의 IPMC에서 5 mm 간격으로 측정하고 거리에 따른 표면전기저항의 변화를 측정하였다. 표면전극형성 방법에 따른 이온전도도를 Solartron SI-1260(Solartron Co., USA)을 이용하여 분석하였다. 또한 IPMC의 구동 특성인 변위와 구동력 측정은 자체 제작한 Figure 4와 같은 장비를 이용하여 측정하였다.

결과 및 토론

IPMC의 표면 및 단면 특성 분석. Figure 5는 각각의 전극 형성 방법에 의해 제조된 IPMC의 표면(배율: 50000X)과 단면(배율: 30000X)을 SEM으로 관찰한 사진이다. (a)-1은 백금으로 무전

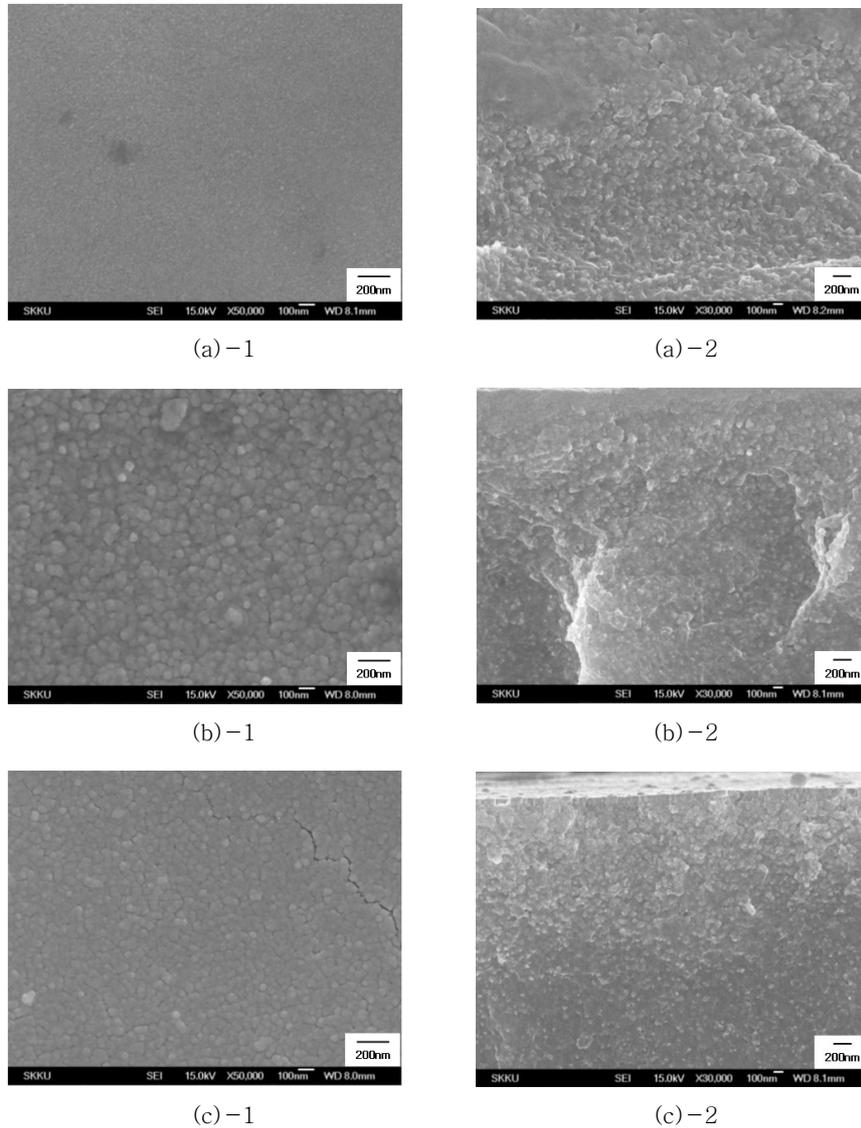


Figure 5. Microstructure of surfaces and cross sections of IPMC by the SEM. (a)-1: platinum-surface, (a)-2: platinum-cross section, (b)-1: gold-surface, (b)-2: gold-cross section, (c)-1: iridium-surface, and (c)-2: iridium-cross section.

해 도금을 2회 반복해서 전극을 제조한 표면부의 사진이며, (b)-1과 (c)-1은 각각 금과 이리듐을 IBAD로 증착시킨 표면을 관찰한 것이다. 무전해 도금법에 의해 형성된 전극은 내피온 내부로 확산되어 전극이 형성되므로 이온성 고분자와 금속 복합체 사이에 일부 저항이 존재할 수 있으므로 (a)-1에서 보는 바와 같이 매끄러운 조도를 나타내지만 완벽한 표면전극은 형성되기 어렵다. (b)-1과 (c)-1의 경우는 무전해 도금법으로 형성된 1차 전극 표면 위에 IBAD로 전기 전도성이 뛰어난 금과 이리듐을 500 Å 두께로 증착한 표면으로 증착시 박막의 성장에서 나타나는 표면구조를 나타낸다. Figure (a)-2, (b)-2, 및 (c)-2는 IPMC의 백금-확산층 단면사진을 보여주며, 모두 1차 도금은 무전해 도금법으로 전극을 형성시켰기 때문에 백금이 이온교환막 안으로 침투하여 확산층을 이루고 있는 모습들을 볼 수 있으며, 내피온 내부로 들어갈수록 침투된 백금의 양이 감소하는 것을 알 수 있다.

IPMC의 표면 저항 특성. Figure 6은 무전해 도금법에 의해 전극을 형성한 IPMC와 IBAD법으로 금과 이리듐을 증착시킨 IPMC의 표면전기저항 특성을 나타낸 것이다. IBAD법에 의한 2차 전극을 증착한 것이 표면전기저항 값이 현저하게 낮게 나타난 것을 알 수 있으며, 특히 금으로 증착한 전극의 표면전기저항 값은 아주 낮게 나타났다. 이는 1차 도금에서 생성된 불안정한 표면전극이 IBAD 방법으로 인해 물리적으로 안정된 표면전극이 형성되었기 때문이다.

IPMC의 이온전도도 특성. 이온전도도(σ)는 벌크저항 값을 측정하여 다음과 같은 관계식으로 구할 수 있다.

$$\sigma = \frac{t}{R_b A}$$

여기서, t 는 IPMC의 두께, R_b 는 벌크저항 값, A 는 IPMC의 단면

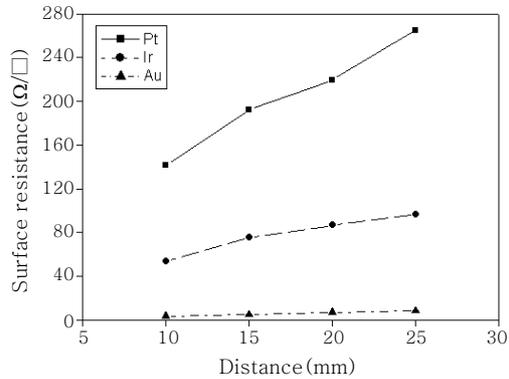


Figure 6. Surface resistances of IPMC measured at various positions of strip. The distance is a length from an end of the strip.

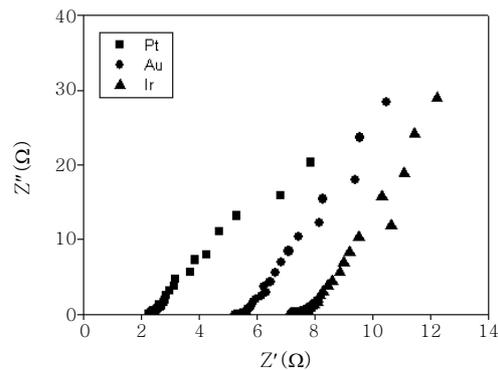


Figure 7. Results of bulk resistance measurement in IPMC.

적을 나타내며, 이온전도도는 벌크저항 값에 반비례한다. 따라서 제조된 IPMC의 이온전도도는 단면적과 두께가 비슷하기 때문에 벌크저항 값에 크게 좌우된다. Figure 7은 각각의 표면전극형성 방법에 따른 벌크저항을 측정한 것으로 각 곡선이 X축과 만나는 점에서의 값을 벌크저항 값으로 얻게 된다. 이 값을 위의 식에 대입하여 이온전도도 값을 계산하여, 각각 $Pt=2.2 \times 10^{-3}$ S/cm, $Au=3.7 \times 10^{-3}$ S/cm, $Ir=5.9 \times 10^{-3}$ S/cm를 얻었으며, 벌크저항 값이 가장 낮은 백금으로 무전해 도금한 IPMC의 이온전도도가 가장 우수하였다. IBAD법으로 증착하여 표면전극을 형성한 경우는 이온전도도가 상대적으로 낮게 나타났는데, 그 이유는 IBAD법은 고진공(3×10^{-6} Torr) 조건에서 증착이 진행되기 때문에 1차 도금에 의해 화학적으로 생성된 네피온 내부의 이온-수분 클러스터들과 수분이 증발하게 되어 다시 재공급을 하더라도 완전 충전이 되지 않기 때문으로 사료된다.

표면전극에 따른 구동 특성. Figure 8은 180 μ m 두께의 이온교환막을 이용하여 2차 표면전극을 다르게 형성시킨 IPMC에 대한 구동특성을 측정한 결과이다. IPMC를 5×40 mm 크기로 샘플링한 후, 2 V의 직류 전압을 인가하여 시간에 따른 변위와 응답 속도를 알아보았다. Figure 8(a)는 전압을 14초 동안 인가하면서 측정한 결과로서 백금으로 1, 2차 무전해 도금시킨 IPMC가 금과 이리듐으로 IBAD 2차 증착시킨 시편보다 빠른 응답 속도와 큰 변위를 보여주고 있다. IBAD 증착이 앞의 실험 결과와 같이 표면

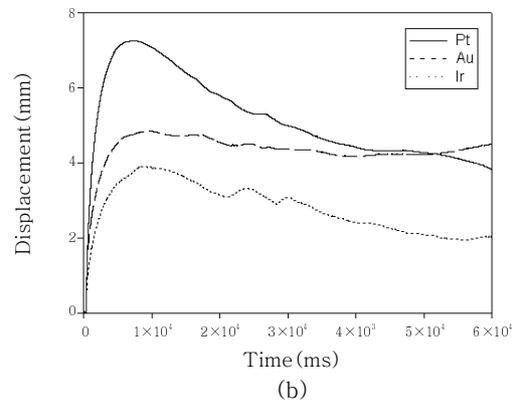
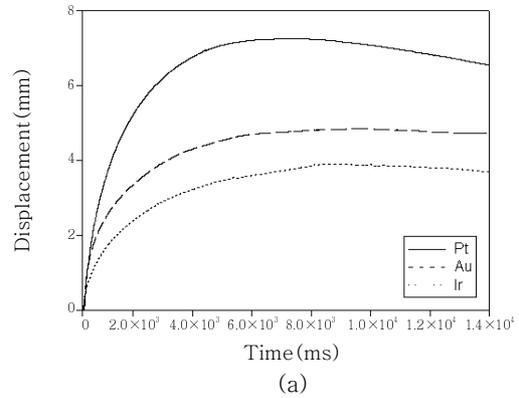


Figure 8. Displacements of IPMCs with different surface electrode during driving times of (a) 14000 ms, and (b) 60000 ms. Metals deposited as second layer were indicated in the figure.

전극의 안정성과 저항을 개선시키는 방법으로는 효과가 있었지만 10초 이내인 초기의 구동 특성을 향상시키지는 못했다. 그러나 60초 동안 인가하면서 측정한 결과인 Figure 8(b)의 경우에는 보는 바와 같이 1, 2차 무전해 도금시킨 IPMC는 변위가 최대 값을 지나 급격히 감소하는 경향을 나타내는 반면, 금으로 IBAD 증착한 IPMC는 초기부터 같은 변위를 유지하면서 안정된 구동 특성을 보였고, 이리듐으로 IBAD 증착한 IPMC는 1, 2차 무전해 도금시킨 IPMC보다는 안정된 변위 특성을 나타냈지만 금에 비해 떨어지는 경향을 보였다. 이는 이리듐이 금보다 전기전도 특성이 낮아 초기 구동 반응속도가 낮고, IBAD에 의한 증착층의 경도가 금보다 이리듐이 높아 변위에 대한 저항으로 작용하여 변위 특성이 떨어진 것으로 생각된다. 따라서 물리적으로 IBAD 증착한 IPMC의 2차 표면전극 두께로 인해 초기 변위가 감소했지만, 시간이 지나면서 표면전극의 안정성 때문에 1, 2차 무전해 도금한 IPMC보다 안정한 구동 특성을 나타낸 것으로 판단된다.

구동 시간에 따른 수분 함량의 변화. Figure 9는 1, 2차 무전해 도금시킨 IPMC의 구동 시간에 따른 수분 함량의 변화를 알아보기 위해 DSC를 이용하여 질소 분위기 상태에서 10 $^{\circ}$ C/min의 승온 속도로 -50° ~ 200° 까지 승온하면서 열분석한 결과이다. 10초 동안 1 Hz, 교류 2 V의 전압을 인가한 후 샘플링해서 측정한 결과를 보면 이온-수분 클러스터를 형성한 물은 0도 부근에서 녹

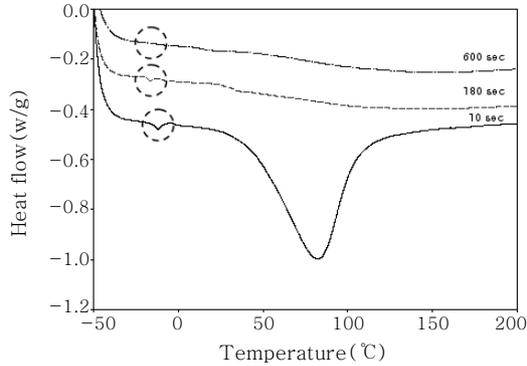


Figure 9. Changes of water content of IPMC after actuation for different driving times which were marked on the curves.

는점으로 보이는 작은 열량 피크를 나타내었으며,²¹ 내피온 내부에 존재하는 물은 100도 부근에서 열량 피크 곡선을 나타내었다. 동일한 IPMC를 180초 동안 전압을 인가하였을 때 변위가 서서히 줄어드는 현상이 나타났으며, 이때 샘플링해서 측정한 결과를 보면 내부에 존재하는 물(100도 피크)은 거의 증발하였고, 이온-클러스터를 형성한 물(0도 피크)은 그대로 남아 있는 것을 알 수 있다. 다시 600초 동안 전압을 인가하면 IPMC가 거의 구동이 되지 않으며, 이때 샘플링해서 측정한 결과를 보면 열량 곡선에서 아무런 피크가 나타나지 않았다. 이는 이온-클러스터를 형성하고 있는 물이 내피온 내부에 존재하는 물보다 IPMC 구동에 더 중요한 요인으로 작용함을 보여준다. IPMC에 전압을 인가하게 되면 내피온 내부의 물은 전기분해를 하여 증발하게 되고, 수분의 증발량에 따라 변위도 감소한다.

IPMC 두께에 따른 구동 특성. Figure 10은 구동력을 향상시키기 위하여 액상 내피온을 이용하여 이온교환막의 두께를 500, 700, 1000, 및 2000 μm 로 캐스팅한 후에 1, 2차 무전해 도금법으로 5×40 mm 크기의 IPMC를 제조하여 DC 2V의 전압을 인가하였을 때 발생한 변위[Figure 10(a)]와 구동력[Figure 10(b)]의 최대값을 나타낸 것이다. 이온교환막의 두께가 증가함에 따라 변위는 감소하고, 구동력은 증가하는 것을 알 수 있다. 변위의 경우는 200 μm 와 500 μm 사이에서 크게 감소하였으며, 구동력은 200~700 μm 까지 두께가 증가함에 따라 크게 증가하였으며, 그 이상의 두께의 증가에서도 구동력의 변화는 거의 없었다. 변위와 구동력의 적절한 조합을 이용하여 적용분야를 좀 더 확대할 수 있을 것으로 사료된다.

결 론

이온교환막인 내피온의 열분석을 통해 기존의 제조법을 보완하여 새로운 IPMC제조법을 도입하였으며, 구동력을 높이기 위해 액상 내피온을 이용한 필름 캐스팅 방법을 사용하였다. IBAD로 금과 이리듐을 이용하여 2차 표면전극을 증착한 IPMC는 표면전극을 안정화시키고, 표면전기저항을 낮출 수 있었다. 또한 IBAD를 이용한 전극의 표면특성의 개선으로 이온전도도와 초기 구동 특성은 유지하면서도 장시간 구동 시 일정한 변위를 지속적으로 얻을 수 있는 구동 내구성을 확보하였다. 열분석을 통해 IPMC가 구동시에 작

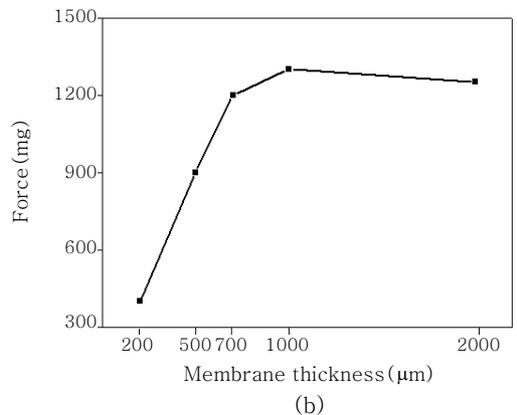
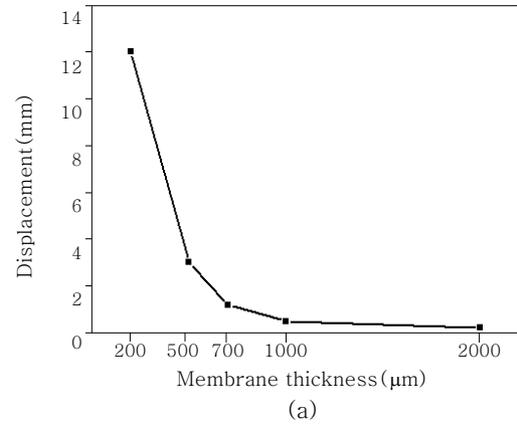


Figure 10. (a) Displacements and (b) driving forces of IPMCs with different thicknesses.

용하는 이온-수분 클러스터의 존재를 확인하였다. 또한 다양한 두께로 제조된 IPMC는 두께가 증가할수록 변위는 감소하고 구동력은 증가하는 경향을 보였다.

감사의 글: 본 연구는 보건복지부 의료공용합기술개발사업(과제번호: 02 PJ3 PG6 EV03-0004, A020603)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

1. M. Shahinpoor, *System and Control*, World Scientific, New York, p 31 (1998).
2. Y. Bar-Cohen, S. Leary, M. Shahinpoor, J. O. Harrison, and J. Smith, *Proc. of SPIE*, **3669**, 57 (2000).
3. Furukawa and J. X. Wen, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **23**, 677 (1984).
4. I. W. Hunter and S. Lafontaine, *IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, p 165 (1992).
5. R. Pelrine, R. Kornbluh, and J. Joseph, *Proc. of First Int. Micromachine Symp.*, p 143 (1995).
6. J.-H. Lee, J.-D. Nam, H. R. Choi, H. M. Kim, J. W. Jeon, H. K. Kim, and Y.-S. Tak, *1st Int. Microsystem Symp.*, p 183 (2001).

7. J.-H. Lee, J.-D. Lee, H.-R. Choi, H. M. Kim, J. W. Jeon, H. K. Kim, and Y.-S. Tak, *Proc. of SIPE*, **4329**, 63 (2001).
8. K. J. Kim, M. Shainpoor, and A. Razami, *Proc. of SPIE*, **315**, 3987 (2000).
9. Y. Osada and M. Hasebe, *Chem. Lett.*, **12**, 1285 (1985).
10. I. Masahiro, *Macromolecules*, **24**, 2890 (1985).
11. Kurauchi, T. Shiga, H. Hirose, and A. Okada, *Jpn. Polym.*, **36**, 2894 (1987).
12. Y. Bar-Cohen, T. Xue, M. Shainpoor, J. Simpson, and J. Smith, *Robotics 98: The 3rd Conference and Exposition/ Demonstration Sponsored by American Society of Engineers*, pp 26-30 (1998).
13. E. T. Enikov and B. J. Nelson, *Proc. of SPIE*, **3987**, 129 (2000).
14. M. Shainpoor *Polymer Sensors and Actuators*, **12**, 325 (1999).
15. S. Nemat-Nasser and J. Y. Li, *J. Appl. Phys.*, **87**, 3321 (2000).
16. Y. Bar-Cohen, *Handbook on Biomimetics*, NTS Inc., New York, Section 11, Chap. 8, pp. 1-13 (2000).
17. M. Shainpoor and K. J. Kim, *Smart Mater. Struct.*, **9**, 543 (2000).
18. B. Scrosati, *Application of Electroactive Polymers*, Chapman & Hall, London (1993).
19. M. Shainpoor and K. J. Kim, U. S. Patent 2002050454 (2002).
20. M. Shainpoor and K. J. Kim, *Smart Mater. Struct.*, **10**, 819 (2001).
21. J. H. Lee and D. S. Lee, *Polymer(Korea)*, **26**, 105 (2002).