

표면 조도에 따른 이온성 고분자-금속 복합체의 구동특성

정성희[†] · 송점식 · 김규석 · 이석민 · 문무성

재활공학연구소

(2006년 4월 14일 접수, 2006년 9월 21일 채택)

Effect of Surface Roughness on the Actuation of Ionic Polymer Metal Composites

Sunghee Jung[†], Jeomsik Song, Guosuk Kim, Sukmin Lee, and Museong Mun

Korea Orthopedics & Rehabilitation Engineering Center (KOREC), Incheon 403-712, Korea

(Received April 14, 2006; accepted September 21, 2006)

전기활성 고분자로서 이온성고분자-금속복합체(Ionic Polymer metal Composites, IPMC)는 화학적 환원방법으로 비교적 쉽게 제조하여 낮은 구동전압에서도 큰 변위를 낼 수 있는 유연성을 지니는 스마트 소재(soft smart material) 중의 하나이다. 제조 시의 화학적 환원방법은 용액 내에서 반응시킴으로써 결과적으로 형성되는 다공성 고분자 막의 표면의 거칠기 때문에 구동체로서의 IPMC의 동작특성에 결함을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 IPMC의 표면의 거칠기에 대한 구동 특성을 비교하고 표면 조도를 향상시키는 방안으로 표면 이온빔 보조 증착법으로 표면을 개질하였다. 이러한 표면 개질 효과로 인해 IPMC 전극의 표면 저항을 낮추고 반응 속도를 증가시킬 수 있었고, 표면 조도, 모폴로지, 구동력 등을 측정하여 향상된 구동 현상을 나타내는 제조방법에 대한 연구를 하였다.

As one of electro active polymers for soft smart materials, the ionic polymer metal composites (IPMC) are easy to produce through chemical reduction processing and show high displacements at low voltage. When the IPMC actuates, the deformation depends on a few factors including the structure of based membrane, species and morphology of the metal electrodes, the nature of cations and the level of hydration. As previously published, we have been studying on improvement of actuation through surface electrode modification of IPMC to grasp the effect of electrode morphology on actuation. This study is comparative experiments through the chemical reaction and deposition by ion beam assisted deposition (IBAD) in order to prepare the very thin and homogeneous surface electrode of IPMC. The IPMCs were prepared with different surface roughness of polymer membrane, and the influence of the surface roughness on the actuation was studied. By investigating the electrical properties and driving displacement, the actuating properties of IPMC with different surface roughness were studied.

Keywords: IPMC, artificial muscle, electro-mechanical actuator, IBAD

1. 서 론

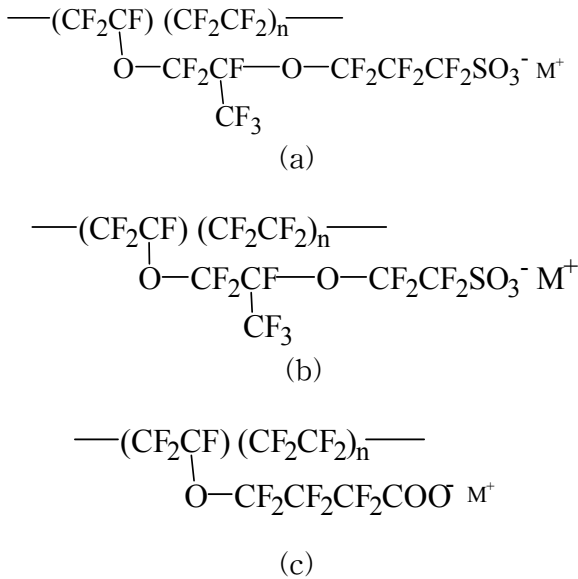
최근 인간의 근육과 유사한 변형특성을 나타내는 인공근육(artificial muscle)으로 사용하기 위한 구동체의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이 중 전기활성 고분자(electro active polymer, EAP)의 한 종류인 이온성 고분자-금속 복합체(ionic polymer metal composites, IPMC)가 인공근육용 구동체로서 주목을 받고 있다[1,2].

IPMC는 수화된 양이온을 가진 이온성 고분자 막에 백금과 같은 귀금속을 화학도금 방법에 의해 도금하여 제조한다. 이것은 비교적 제조가 간단하며, 전압 인가에 따른 빠른 반응속도와 큰 변위를 나타내며, 물의 전기분해가 일어나지 않는 낮은 전압에서 구동이 가능하기 때문에 인공근육 뿐만 아니라 soft robotic actuator 및 dynamic sensor 등과 같이 광범위한 적용가능성을 보이고 있다[2-6]. IPMC의 구동은 균일한 표면전극에 전압이 인가될 때 수화된 상태에서 고분자막 내부

의 양이온 클러스터들이 물과 함께 음극방향으로 이동하게 됨으로써 양극에서는 수축이, 음극에서는 팽창이 일어나 변형이 일어나게 된다. IPMC의 전기장에 대한 응답은 기본 골격을 형성하고 있는 고분자와, 균일하고 전기전도성이 좋은 표면전극과 수화상태 및 용매의 종류에 의존한다[2,5,6].

기본을 이루는 고분자 매트릭스는 Aciplex, Nafion, Flemion 등의 상품명으로 판매되고 있는 말단기가 carboxylic acid 또는 sulfonic acid로 구성된 테프론계 불소화합물이다. 이들의 화학구조는 Figure 1과 같다. 표면전극을 구성하는 원소로는 백금, 금과 같은 귀금속류를 이용하는데 이들은 전압 인가 시 낮은 저항과 빠른 응답특성을 낼 수 있는 장점이 있다. 이 금속을 테프론계 불소화합물인 다공성 고분자 막에 도포함으로써 고분자-금속 복합체를 형성하게 된다. 이 복합체가 수화된 상태에서 내부의 이온들(counter cation)은 이온-클러스터의 형태를 하고 있으며 그들의 수화에 의해 구동체의 구동현상이 영향을 받게 된다. Figure 2에는 IPMC에 전압을 인가하였을 때 IPMC가 구동되는 메카니즘을 나타내었다.

[†] 주 저자 (e-mail: shjung@korec.re.kr)



M⁺ : Metal cation in neutralized group, H⁺ in acid

Figure 1. Perfluorinated ionomers used in IPMC manufacturing (a) Nafion (Dupont), (b) Aciplex (Ashahi Chemical), (c) Flemion (Ashahi Glass).

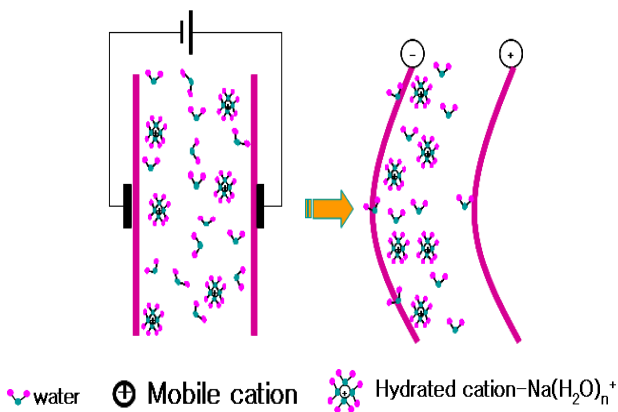


Figure 2. Actuation mechanism of IPMC by electric stimuli.

IPMC는 백금화합물과 환원제를 이용한 화학적 환원과정을 통해 무전해 도금법으로 제조되며 Shainpoor[1,2,7], Nemat-Nasser[4,8,9], Asaka, Oguro[3,9] 등 많은 연구자들에 의하여 연구되고, 구동특성을 향상시키기 위한 방법을 강구하는 연구가 주로 이루어졌다.

본 연구에서는 IPMC의 구동 특성에 영향을 줄 수 있는 고분자 막의 표면 조도를 변화시켜 여러 개의 IPMC를 제조하고 각각 다른 표면 조도에 따른 전기적 그리고 기계적 특성을 비교 분석하였다.

2. 실험

2.1. Materials

IPMC 제조를 위한 고분자막은 주로 사용되는 고분자 막으로 두께가 약 178 μm인 Nafion 117 (H⁺형, EW 1100, DuPont)을 사용하였다. 고분자-금속복합체의 표면전극을 형성시키기 위하여 백금화합물

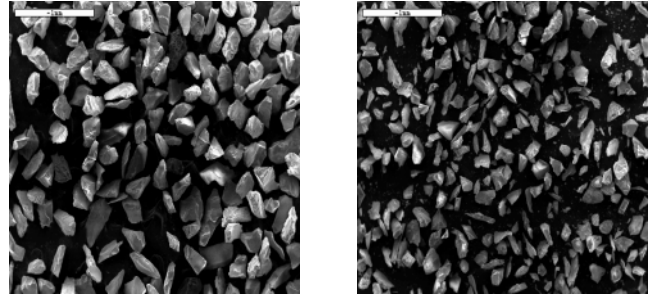
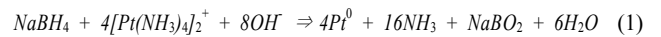


Figure 3. Fine particles used in pretreatment of nafion surface (a) 80 mesh sand (×35) (b) 100 mesh sand (×35).

([Pt(NH₃)₄Cl₂], Aldrich Co.)을 사용하였으며, 환원제로는 붕소화합물 (NaBH₄)을 사용하여 다음 반응식에 의해 counter cation이 Na⁺-형인 IPMC를 제조하였다[2].



2.2. IPMC의 제조

IPMC의 제조는 화학적 환원 방법인 무전해 전기도금법을 사용하였고, Oguro[3,9-11]가 제시한 IPMC 제조방법으로 복합체를 형성했다. 제조과정은 두 단계를 거치는데 실험과정 I은 초기 복합체형성 과정으로 고분자 막을 일정 농도의 백금 용액에 침지하여 막 내부의 H⁺ 이온과 백금 이온을 이온교환 시킨 후 환원용액인 NaBH₄를 이용하여 위의 환원반응식 (1)에 의해 고분자 막과 금속의 복합체를 형성한다. 실험과정 II는 표면전극형성 과정으로 1차 단계에서 형성된 복합체의 전기적 특성을 향상시키기 위한 과정이다. 이 연구에서는 표면 전처리 과정의 표면 조도에 따른 특성을 고려하였으므로 실험과정 II의 과정은 생략하였다.

2.3. 표면 조도의 변화

화학적 환원 방법으로 IPMC를 제조 할 때에 고분자 막 위에 금속 전극을 최대한 많은 양을 도금하고 결합력을 높이기 위해 표면의 전처리 과정을 거쳐야 한다. 고분자 분리막으로 사용되는 Nafion의 표면은 매우 매끄럽기 때문에 도금에 앞서 표면 전처리 과정을 거쳐 표면의 거칠기를 증가시킨다. 이를 위한 방법으로 연마지를 이용하는 방법과 모래 입자를 분사함으로써 표면의 거칠기를 증가시키는 샌드블라스트 방법이 주로 사용되며, 본 연구에서는 샌드블라스트 방법을 채택하였다[11]. Figure 3은 사용된 입자들의 전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM, JSM-5310, JEOL, Tokyo, Japan) 사진으로 (a)는 샌드블라스트 과정에 사용된 80 mesh의 금강사로 그 입자는 대략 200~500 μm의 아주 거친 입자이고 (b)는 100 mesh 금강사로서 그 입자는 80 mesh의 입자보다 작은 100~300 μm이다. 본 실험에서는 샌드블라스트 처리법으로 크기가 다른 두 입자를 이용하여 같은 압력에서 처리한 것과 80 mesh 입자를 이용하여 압력을 다르게 하여 처리한 것을 비교하였다.

3. 물리적 성질의 측정

고분자막을 전처리 후 달라진 표면과 IPMC를 제조하였을 때의 표면의 조도(roughness, Ra)를 확인하기 위해 표면굴곡측정기(surface profiler, P-10, Tencor, Santa Clara, CA, USA)를 이용하여 각각의 시편

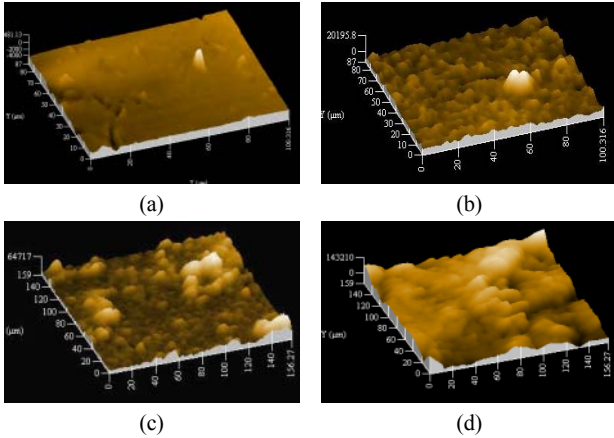


Figure 4. Surface roughness of nafion by surface treatment each other size or pressure; (a) bared nafion, (b) 100 mesh, 4 kg/cm², (c) 80 mesh, 4 kg/cm², (d) 80 mesh, 6 kg/cm².

에 대해 2D와 3D법으로 관찰하였고 전극의 두께 및 형태를 확인하기 위해 IPMC의 단면을 전자현미경에 장착된 EDX system (Oxford Instruments, Bucks, UK)으로 백금의 형성과정과 분포도를 확인하였다.

IPMC의 구동 특성은 본 연구를 위해 제작한 변위 측정기(Displacement measuring system, DMS)를 이용하여 변위, 힘 및 응답시간을 측정하였다. 변위측정은 DMS에 연결된 레이저 변위기(Keyence LK CCD Laser displacement sensor)로 측정하였으며, 구동력(force)은 load cell에 IPMC를 0.1 gf 힘으로 초기 힘을 가한 후, 전압을 인가하여 IPMC가 구동될 때의 최대 힘을 측정하였다. 제조 방법에 따른 IPMC의 전기적 특성을 알아보기 위하여 시편은 길이 20 mm, 너비 5 mm의 크기로 준비하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. IPMC의 표면 특성

IPMC의 구동성은 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용을 하며, 그 중에서도 전극표면의 조도는 특성을 결정하는데 중요한 역할을 한다. 전극형성과정에서 Nafion의 표면적을 넓히고 표면 전극의 재료인 백금의 흡착 양을 증가시키기 위하여 표면 처리를 하는데 80 mesh와 100 mesh의 금강사를 이용하여 같은 압력에서 처리한 것과 80 mesh 입자로 보다 높은 압력에서 처리한 것으로 분류하였다. Figure 4는 IPMC를 제조하기 전 표면 전처리를 거친 상태의 Nafion들의 표면 조도를 나타낸 것이다.

Figure 4의 (a)는 구입 상태의 Nafion 표면 형상으로 조도는 약 0.03 μm로 상당히 매끄러운 표면을 지니고 있고, (b)는 100 mesh 입자를 이용하여 4 kg/cm²의 압력으로 처리한 것으로 표면 조도는 약 0.5 μm이다. (c)와 (d)는 80 mesh의 동일한 입자를 이용하여 4 kg/cm²과 6 kg/cm²의 서로 다른 압력으로 처리한 것으로 그 표면 조도는 각각 대략 0.6 μm와 2.5 μm로 같은 크기의 입자라도 분사 압력에 따라 표면 조도가 상당한 차이가 남을 알 수 있다.

표면조도가 서로 다른 Nafion에 화학적 환원방법으로 백금을 도금하여 IPMC를 제조한 후 표면의 조도와 형상을 확인하여 그의 조도와 모폴로지를 Figure 5에 나타내었다.

Figure 5(a)는 전처리를 하지 않고 백금을 도금한 IPMC의 표면으로 표면조도가 약 0.07 μm이고 표면에 백금의 도금이 아주 균일하게

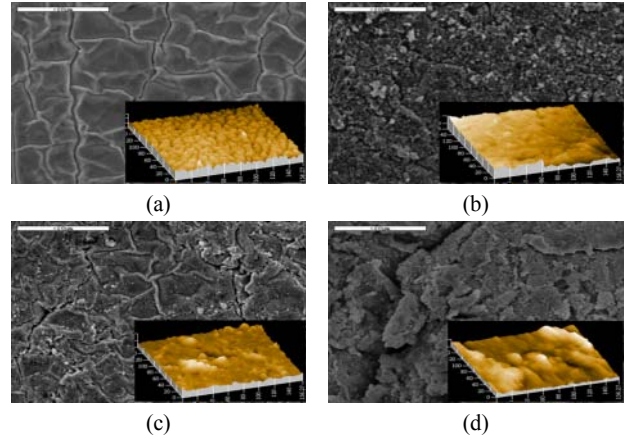


Figure 5. SEM morphology and surface roughness of plated IPMC by for the preparation of composite on the surface treated nafion each other size or pressure ; (a) bared nafion, (b) 100 mesh, 4 kg/cm², (c) 80 mesh, 4 kg/cm², (d) 80 mesh, 6 kg/cm².

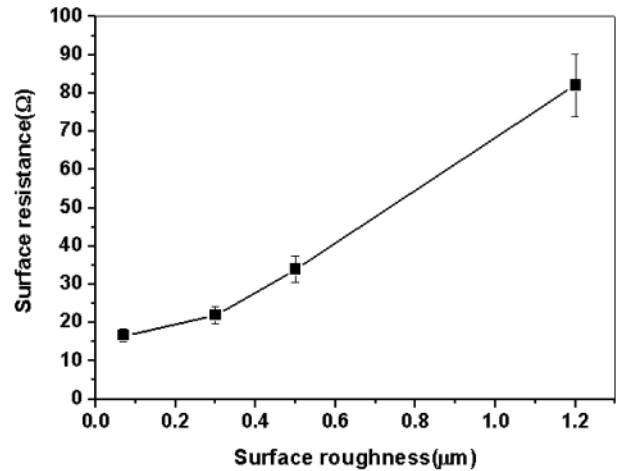


Figure 6. Surface resistance of the surface roughness on IPMC.

형성된 것을 보여준다. (b)는 100 mesh 입자를 분사압 4 kg/cm² 로 샌드블라스트 한 Nafion위에 백금을 도금한 것으로 표면조도는 약 0.4 μm이고, (c)와 (d)는 80 mesh 입자로 각각 4 kg/cm², 6 kg/cm²로 샌드블라스트 처리 후 제조한 IPMC로 표면 조도는 약 0.5 μm, 1.2 μm이다. 동일 분사 압력에서 입자의 크기만 다르게 처리한 (b)와 (c)는 표면 조도나 표면 형상에서 큰 차이는 나타나지 않는다. 그러나 동일 입자 크기를 이용하여 분사압력을 다르게 처리한 (c)와 (d)에서는 (d)의 표면 형상이 아주 거칠게 나타나고 표면조도도 대략 2 배 정도 차이가 남을 알 수 있다. 이것은 표면 저항에도 영향을 줄 수 있으며(Figure 6) 초기 응답시간의 지연과 구동변위도 현저히 떨어지게 하는 원인이 된다.

Figure 4(d)와 Figure 5(d)에서 표면 조도가 많이 차이 나는데 그 이유는 Nafion이 부드러운 고분자 막이기 때문에 표면 처리된 Nafion의 거친 요철부는 제조 과정 중에서 다소 완화되어 IPMC로 제조되었을 때의 표면 조도가 더 감소하는 것으로 판단된다.

Figure 6은 위에서 관찰한 표면 조도에 따라 표면 저항의 차이를 알아보기 위해 2-probe 탐침형 multi meter를 이용하여 4개의 시편을 동일한 길이로 표면 저항을 측정한 결과이다.

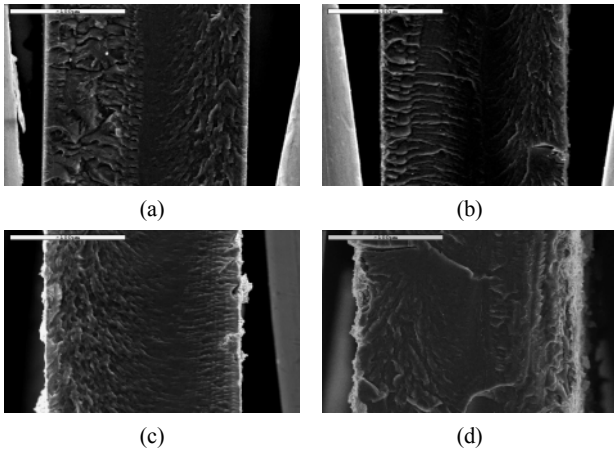


Figure 7. SEM morphology in cross section of plated IPMC by for the preparation of composite on the surface treated nafion each other size or pressure ; (a) bared nafion, (b) 100 mesh, 4 kg/cm², (c) 80 mesh, 4 kg/cm², (d) 80 mesh, 6 kg/cm².

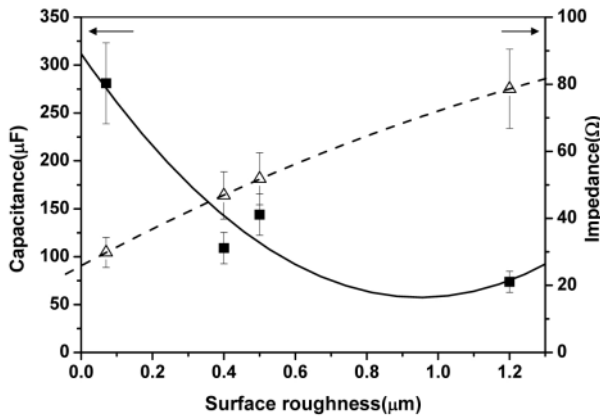


Figure 8. Electric characterization depending on the surface roughness of IPMC.

표면 전처리 하지 않은 Nafion 위에 백금을 도금한 IPMC의 표면 저항은 약 20 Ω이고 샌드블라스트 처리한 Nafion의 IPMC들은 표면 조도의 증가에 따라 표면저항이 증가하는 경향을 나타낸다. 이 연구에서는 IPMC의 표면 조도에 대한 영향만을 고려한 것으로서 표면전극 형성과정을 생략하였기 때문에 표면 저항은 다소 높게 나타났으나 이는 표면 개질에 의해 약 10 Ω 정도로 낮출 수 있다[10].

4.2. 표면 조도에 따른 표면 전극 형상

표면의 전 처리 과정은 고분자 막 위에 백금 전극을 도금하기 위해서 진행되는 과정으로 표면적을 넓혀 보다 많은 양의 백금을 올릴 수 있게 하는 과정이다. 즉, 고분자 막 내부부의 백금의 침투 깊이를 조절할 수 있고 그에 따른 구동 특성을 조절 할 수 있다. 특히, 필름 상으로 공급되는 고분자 막은 생산과정에서 발생하는 처리에 의해 고분자 막 표면과 막 내부의 물리적인 성질이 달라진다. 이것은 IPMC를 제조하였을 때 재료의 stiffness로 작용하여 구동현상에 영향을 줄 수 있다.

표면 조도에 따른 백금의 침투 깊이를 알아보기 위해 제조된 IPMC의 단면을 전자현미경과 EDX System으로 측정하여 Figure 7에 나타내었다.

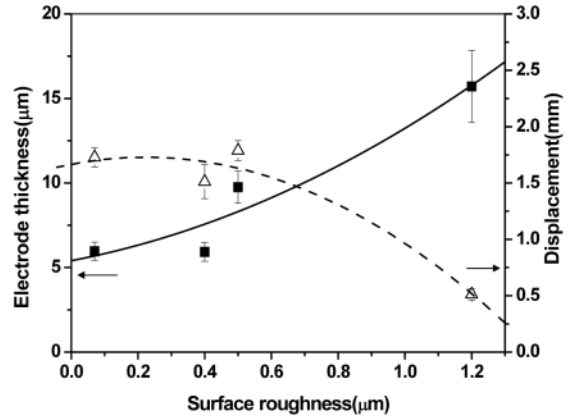


Figure 9. Pt electrode thickness and displacement as surface roughness of IPMC.

각 시편들을 × 500 배율로 측정하여 전체 두께와 백금의 침투 깊이를 확인하였다. Nafion의 두께는 약 178 μm이고 IPMC를 제조하는 과정에서 막의 팽창과 백금이온의 침투로 인해 그 두께가 다소 증가하게 된다. 표면에 샌드블라스트 처리를 하면 Nafion의 두께는 줄어들어 처리하지 않은 Nafion의 IPMC보다 두께는 감소한다. 따라서 전체 두께는 (a)가 가장 크고 고압으로 처리한 (d)의 두께가 가장 작다. 위의 사진들에서 양 끝단이 백금영역인데 표면 조도에 따라 백금의 침투 깊이도 차이가 나는 것을 보여준다. (c)와 (d)의 사진에서는 표면의 거칠기가 다른 두께의 것과 차이가 나는 것을 알 수 있고 특히 (d)에서는 표면의 상태와 단면의 상태가 상당히 불안정한 것을 확인할 수 있다. 이렇게 백금의 침투 깊이가 표면 조도에 따라 차이가 나는 이유는 고분자 막의 제조과정에서 발생하는 표면의 물리적 특성 때문에 막 내부로 백금의 침투현상이 달라지는 것이다.

4.3. 전기-기계적 변형 특성

IPMC는 인가된 전압 하에서 양 극 사이에서 팽창과 수축이 발생하여 변형이 일어난다. Figure 2에서와 같이 IPMC에 전압을 인가하게 되면 막 내부의 양이온 클러스터들이 음극으로 재배열이 일어나면서 음극에서는 팽창이, 양극에서는 수축이 일어나 양극 방향으로 IPMC가 구부러지는 현상을 나타낸다. 이러한 변형을 유도하는 요인들로서는 고분자 막의 종류와 구조, 표면 전극의 종류 및 형상과 전도도, 양이온의 성분, 그리고 막 내부의 수분양 등이 있다[3,4,6,8,9,12]. 본 연구에서는 이러한 요인들 중 표면 조도에 따라 백금 전극의 형상이 다르게 나타나는 것을 이용하여 그들의 전기적-기계적 변형 특성을 비교하였다.

IPMC의 전기적 특성과 전기-기계적 특성을 측정 비교하여 Figure 8과 Figure 9에 나타내었다. Figure 8은 표면 조도에 따른 IPMC의 전기용량과 내부저항을 나타낸 결과이다.

Figure 8에서 실선은 전기용량이고 점선은 내부저항을 나타내는데 이들은 서로반비례 관계에 있다. 표면 조도에 따라 전기용량은 점차로 감소하고 내부 저항은 점차로 증가한다. 표면 조도가 비슷하면 전기용량과 내부저항은 크게 차이가 나지 않는 것을 확인할 수 있는데 이것은 표면으로 침투 되는 백금의 양이 서로 비슷하여 표면전극의 두께가 비슷하기 때문으로 사료된다[3,9]. 이것은 Figure 9에서도 설명될 수 있다.

Figure 9는 표면 조도에 따라 IPMC의 백금 침투 깊이와 그에 대한

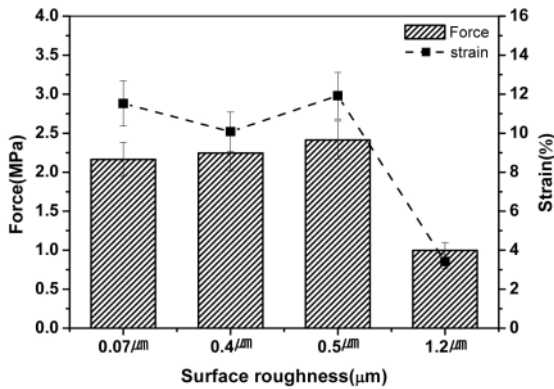


Figure 10. Actuation force and strain dependent on surface roughness.

전기용량을 나타낸 결과이다. Figure 9에서 실선은 표면 조도에 대한 백금 전극의 두께이고 점선은 변위를 나타낸 것이다. 고분자 막 내부로 침투된 백금 전극의 두께는 표면조도가 증가함에 따라 증가하지만 그 변위는 표면 조도가 1.2 μm의 위치에서만 급격히 떨어지는 것을 보여준다. 침투된 백금의 두께가 일정 두께 이상으로 두꺼워지면 백금간의 거리가 짧아지게 되어 오히려 다른 전기적 특성이 떨어져 전기-기계적 변위가 떨어짐을 알 수 있다. 그리고 Figure 7의 (d)에서 표면 조도가 1.2 μm인 IPMC의 단면은 백금의 침투가 매우 불규칙한 것을 볼 수 있는데 이것 또한 전기-기계적 특성을 저하시키는 원인이 된다.

Figure 10은 IPMC가 구동될 때의 작용력과 그 변위에 대해 나타난 결과이다. 표면 처리를 하지 않은 시편과 낮은 분사압으로 표면 처리한 시편의 구동력은 표면 조도에 따라 미소량으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 변위는 크게 차이 나지 않는 것으로 나타난다. 표면 조도가 1.2 μm인 것은 작용력과 변위 모두 낮은 것을 보여주는데 이런 결과들은 위의 전기적 특성 결과에 부합된다. 여기서 표면처리 하지 않은 시편의 모든 전기-기계적 특성은 우수한 것으로 나타나지만 이것은 선행 연구에서 발표한 결과에 의하면 과도한 전류량으로 인해 시편에 손상을 주므로 내구성이 떨어지는 단점이 있다. 따라서 표면의 전처리를 통하여 백금 전극을 형성하면 안정적인 구동 특성을 얻을 수 있다.

4. 결 론

전기활성 고분자인 IPMC는 인공근육용 구동체 소재로 활용할 수 있다. IPMC의 구동 특성에 영향을 줄 수 있는 많은 요인들 중 표면 조도에 따른 전기-기계적 특성에 대한 연구를 위하여 3가지의 다른 표면 조도를 가질 수 있는 처리 방법을 적용하여 그들을 비교하였다.

표면 조도에 관한 정확한 관찰을 위하여 표면전극형성 과정은 생략하고 고분자 막과 백금과의 복합체만 형성하여 실험하였으므로 수치적 결과 값에 약간의 차이가 날 수 있다.

표면 전처리 과정으로 샌드블라스트 건식처리를 하였는데 이것은 전극의 표면적을 넓게 하여 이온교환 과정 후 이온의 재배치 과정에서 보다 많은 양의 이온고분자-금속 복합체가 형성할 수 있었다. 표면 조도는 샌드블라스트 처리를 하지 않은 시료를 기준으로 100 mesh, 80 mesh 입자로 분사압을 다르게 처리할수록 증가하였다. 표면 조도의 차이로 표면 저항이 증가하고 백금의 침투 깊이도 차이가 나는 것을 확인하였다. 이것은 IPMC의 전기적, 기계적 특성에 밀접하게 관련되어 인가 전압 하에서의 구동성에 영향을 준다. 고분자 막의 표면 처리 과정에서 표면 조도는 0.3~0.5 μm 정도를 유지하는 것이 적당하다. 이 구간에서는 표면 형상과 백금의 침투 깊이, 전기적, 기계적 특성이 모두 유사하게 나타나지만 표면 조도가 너무 커지게 되면 다공성 고분자 막 내부로의 백금의 침투가 불균일하게 생성되어 될 수 있으며 이것은 전기적 특성에 악영향을 미쳐 구동성을 떨어뜨리는 결과를 초래하였다.

감사의 글

본 연구는 보건복지부 의료공학융합기술개발사업(과제번호: 02-PJ3-PG10-31402-0001)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

1. M. Shahinpoor and K. J. Kim, *Smart Mater. Struct.*, **9**, 543 (2000).
2. M. Shahinpoor and K. J. Kim, *Smart Mater. Struct.*, **10**, 819 (2001).
3. K. Onishi, S. Sewa, K. Asaka, N. Fujiwara, and K. Oguro, *Electrochim. Acta*, **46**, 1233 (2001).
4. S. Nemat-Nasser, *J. Appl. Phys.*, **92**, 1 (2001).
5. M. Uchida, C. Xu, M. Le Guilly, and M. Taya, *Smart Mater. Struct. Proc. SPIE* **4695**, 57 (2002).
6. S. Her, K. J. Kim, and J. W. Paquette, *J. Control, Automation, Systems Eng.*, **10**, 11, 981 (2004).
7. M. Shahinpoor and K. J. Kim, *Sens. Actuators, A*, **96**, 125 (2002).
8. S. Nemat-Nasser and Y. Wu, *J. Appl. Phys.*, **93**, 5255 (2003).
9. K. Oguro, S. Sewa, K. Asaka, N. Fujiwara, and K. Onishi, *Electrochim. Acta*, **46**, 737 (2000).
10. S.H. Jung, M. J. Lee, J. S. Song, S. Lee, and M. S. Mun, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **16**, 527 (2005).
11. S. E. Cha, J. H. Pak, and S. K. Lee, *Trans. KIEE.*, **51C**, 9, 455, (2002).
12. M. D. Bennett and D. J. Leo, *Proc. IMECE* 2003-**43551**, 1 (2003).