

캐스팅 방법에 의해 제작한 이온성 고분자-금속 복합체 액추에이터의 기계적 특성 분석

論 文
52C-3-7

Analysis of Mechanical Characteristics of Ionic Polymer-Metal Composite Actuators Fabricated by Casting Method

李承起* · 金炳穆** · 金柄奎*** · 朴政浩§
(Seung-Ki Lee · Byung Mok Kim · Byungkyu Kim · Jungho Pak)

Abstract - IPMC(Ionic Polymer-Metal Composite) is promising candidate material for bio-related actuators mainly due to its biocompatibility and wet and soft properties. The widely used commercialized Nafion film has a few kinds of fixed thicknesses but more various film thicknesses are required for extensive applications. Especially for the enhanced force as an actuator, the thick film is essential. Various Nafion films with thickness of 0.4-1.2mm have been prepared by casting of liquid Nafion. Also, IPMC actuators using casted Nafion films have been fabricated and the basic mechanical properties such as stiffness, displacement and force were measured and analyzed. These results can be used for the optimized design of actuators for different applications.

Key Words : IPMC(Ionic Polymer Metal Composite), liquid Nafion, casting, actuators

1. 서 론

이온성 고분자-금속 복합체(IPMC: Ionic Polymer-Metal Composite)는 내피온(Nafion: perfluorosulfonate ionomer, Dupont社) 막의 양면에 백금 전극 층을 형성하여 액추에이터나 센서로 사용할 수 있는 새로운 기능성 재료이다. 고분자 자체가 갖는 생체 적합성이나 수분을 함유하며 부드러운 조직을 갖는 특성 등은 생체 모방 혹은 생체에 이용할 수 있는 액추에이터 물질로서 상당한 가능성을 갖는다고 볼 수 있다. 또한 IPMC는 가볍고 유연하다는 물리적 특성 외에도 1-2V의 낮은 전압에서 구동하고 빠른 반응시간(120Hz 이상)을 가지며 연속적인 구부러짐 동작(약 100,000회 이상) 및 비교적 큰 변위가 가능한 점, 그리고 마이크로 구조물로서의 제작이 용이하다는 점 등의 특징을 가지고 있다[1, 2].

IPMC를 이용한 응용 연구는 대부분이 액추에이터에 관한 것으로서 생체기계적(biomechanical) 응용 및 생체모방형(biomimetic) 응용 이외에도 인공근육처럼 작동하는 액추에이터를 제작하는데 사용되고 있다. 구체적인 예로는 Osada 등에 의한 내시경(catheter)에의 응용, 타원형의 마찰구동(EFD: Elliptical Friction Drive) 액추에이터 소자 등을 들 수 있다[3-9]. IPMC는 또한 생체 근육의 모방에도 응용할 수 있는데 Caldwell은 인공근육 액추에이터를 개발하였으며 Shahinpoor 등은 연동운동 형태의 펌프(peristaltic pump)와

인체 근육 강화를 위한 응용, 물고기 로봇(robot fish) 등의 응용을 제안한 바 있다[10-16]. Bar-Cohen 등은 IPMC 액추에이터를 우주 관련 응용(space-based applications)에 사용하고 있는데[17-20] 이러한 응용은 액추에이터의 구동부가 많이 필요하지 않으므로 유지보수가 어려운 환경에 이상적이라고 할 수 있다.

그러나 IPMC를 좀 더 다양한 형태로 응용하고 무엇보다 실제적인 구동효과를 얻기 위해서는 IPMC의 가장 큰 문제점인 약한 발생력을 증가시킬 필요가 있다. 이를 위해서는 다른 무엇보다 내피온 막의 두께를 증가시켜 좀 더 두꺼운 형태의 액추에이터를 제작하는 것이 직접적이고 간단한 방법이다. 현재 상용화 되어있는 내피온 막은 50-180 μ m 정도의 일정한 두께를 갖는데 이 정도의 두께에서는 재료 자체의 처리 공정 등을 개선해도 발생력의 증가에는 한계가 있다. 따라서 1mm 이상의 두꺼운 내피온 막을 액추에이터 응용에 사용할 필요가 있다. 그러나 무조건 두꺼운 내피온 막을 사용하는 것이 최선의 선택은 될 수 없으며 사용하고자 하는 용도에 따라 적절한 두께를 갖도록 고려하여야 한다. 이를 위해서는 내피온의 두께에 따른 기계적 특성, 즉 막의 강성도(stiffness)나 발생력, 변위 등의 변화와 같은 기본 자료들의 실험적 결과들이 필요하고, 이 결과를 다양한 액추에이터의 용도에 적합한 최적 설계에 이용하도록 하는 일련의 분석 과정이 필수적이라고 할 수 있다. 본 논문에서는 액상의 내피온으로부터 0.4-1.2mm 사이의 다양한 두께의 내피온 막을 캐스팅 방법에 의해 제작하고 막의 두께 및 인가하는 전압에 따라 발생하는 변위 및 발생력, 그리고 강성도 등의 기본 특성을 측정한다. 이러한 실험결과들은 기존의 상업화된 내피온 막보다 보다 두꺼운 두께를 갖는 IPMC 액추에이터의 설계에 필요한 기본 자료를 제공해 줄 수 있으며 이를 통해 보다 다양한 실제적인 응용이 가능할 것이다.

* 正會員 : 檀國大 전기전자컴퓨터공학부 副教授 · 工博
** 正會員 : 韓國科學技術研究院 委囑研究員
*** 正會員 : 韓國科學技術研究院 先任研究員 · 工博
§ 正會員 : 高麗大 電氣工學科 副教授 · 工博
接受日字 : 2002년 10월 1일
最終完了 : 2002년 11월 26일

2. 내피온 막 캐스팅 및 IPMC 액추에이터의 제작

상용화된 내피온 필름은 제조과정을 통해 필름의 두께가 고정되어 있으며 최대 약 180 μ m의 두께를 갖는다. 이보다 두꺼운 내피온 막을 원하는 두께로 조절하여 만들기 위해 액상의 내피온을 캐스팅하였다. 캐스팅 과정은 그림 1에 나타낸 바와 같이 몇 가지 단계(엄밀하게 구분하자면 마지막 단계는 무전해 도금 단계임.)로 구분할 수 있다.

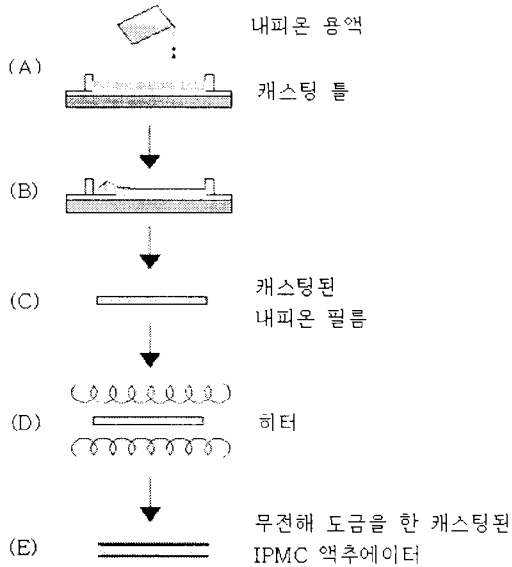


그림 1 내피온 막의 캐스팅 과정.

Fig. 1 Casting process of Nafion film.

우선 액상의 내피온 용액(EW 1000, Dupont)을 기포가 발생하지 않도록 주의하여 원하는 두께의 8-9배 정도의 양으로 캐스팅 틀 내에 붓는다. 이 용액의 용체가 적정량만큼 증발할 수 있도록 조절하며 상온에서 건조시킨 후 캐스팅 틀로부터 분리한다. 이러한 자연건조 과정 후에 100-160 $^{\circ}$ C의 온도에서 1시간 가량 열처리하여 고분자 결합구조를 강화시킴으로써 필름의 기계적 강도를 증가시켜 준다. 마지막으로 75-100 $^{\circ}$ C의 과산화수소수에서 1시간, 탈이온화수(DI water)에서 1시간 끓임으로써 캐스팅 공정을 완료하게 된다.

이렇게 제작한 내피온 막을 이용하여 IPMC 액추에이터를 제작하기 위해서는 내피온 막의 양면에 백금을 무전해 도금하는 과정이 필요하다. 백금의 무전해 도금을 통한 IPMC 액추에이터의 제작 과정은 다른 논문[21]에서 자세하게 기술한 바 있으며 본 논문에서는 자세한 언급을 생략하겠다. 이와 같이 제작한 다양한 두께를 갖는 IPMC 액추에이터는 양면에 인가하는 전계에 의해 수화된 양이온이 막 내부에서 이동하고 이에 따른 부피 변화가 발생하여 그림 2에 표시한 바와 같이 구부러짐 동작이 나타난다.

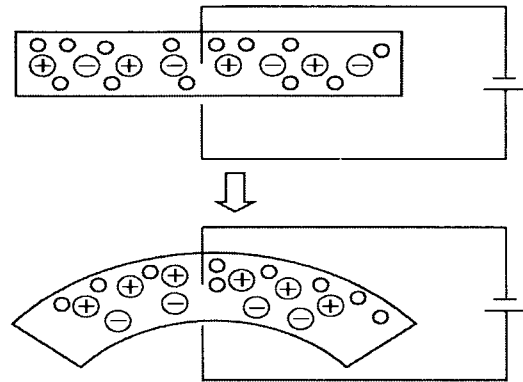


그림 2 전계에 의한 IPMC 액추에이터의 구부러짐 동작.

Fig. 2 Bending motion of IPMC actuator by applying the electric field.

3. IPMC 액추에이터의 특성 측정결과 및 분석

3.1 구동실험 및 측정장치

측정에 사용한 IPMC는 0.4-1.2mm 두께로 캐스팅한 내피온 막의 양면에 백금을 무전해 도금한 시편을 폭 4mm, 길이 30mm 규격으로 자른 스트립 형태이다. 이 시료를 D.I. water에 담귀 충분히 수화시켜 준 이후에 꺼내어, 표면의 수분을 간단히 제거한 후 그 변위 및 발생력을 측정하였다. 변위 측정은 식염수 내에서 하는 경우도 있다. 인가전압은 직류를 인가하는 경우와 교류를 인가하는 경우가 있는데 직류의 경우 1-3V, 교류의 경우 2-5V_{rms}, 0.5Hz의 구형파 전압을 인가하였다. 변위의 측정은 그림 3과 같이 레이저 변위 센서를 이용하여 측정하였고 측정결과를 메모리스크로프 상에 저장하여 입력전압과 함께 비교하였다. 발생력의 측정은 그림 4와 같이 로드셀을 이용하였는데 시료의 끝단에서 발생하는 발생력을 측정하였다. 따라서 시료 전체를 통해 외부에서 사용할 수 있는 힘의 크기는 측정된 값보다 더 클 것으로 판단된다.

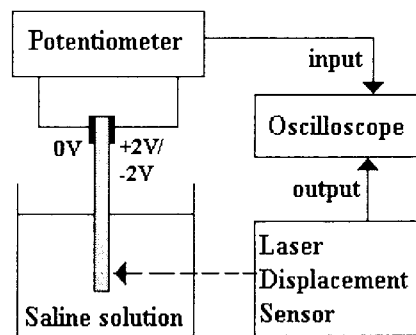


그림 3 IPMC 스트립의 변위 측정 장치 구성.

Fig. 3 Displacement measurement set-up of IPMC strip.

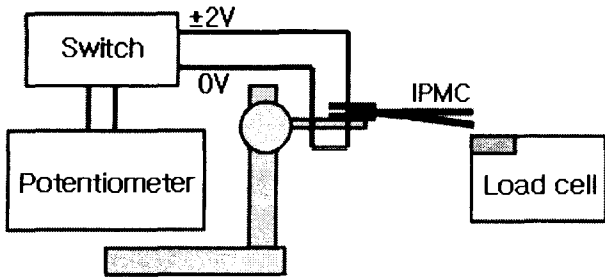


그림 4 IPMC 스트립의 발생력 측정 장치 구성.
Fig. 4 Force measurement set-up of IPMC strip.

3.2 캐스팅 막 및 IPMC 액추에이터의 강성도 측정

캐스팅에 의해 제작한 내피온 막은 수화과정 및 이온교환 과정을 거쳐 백금 무전해 도금을 하게된다. 이러한 전처리 공정과 도금 공정이 강성도에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 캐스팅 직후의 막, 캐스팅 후 수화와 이온교환 과정을 거친 막, 그리고 무전해 도금 공정이 완료된 막 등 세 가지 종류의 막에 대한 강성도를 측정하였다. 강성도의 측정은 빔 형태의 시료 끝단에 인가하는 하중을 변화시키며 그때의 변위를 측정하고 이를 아래의 외팔보의 하중과 변위에 관한 식에 대입함으로써 구할 수 있다.

$$\delta = \frac{PL^3}{3EI} \quad (1)$$

여기서 δ 는 빔 끝단의 변위, P 는 끝단에 인가되는 하중, L 은 빔의 길이, E 는 영률(Young's modulus), 그리고 I 는 관성모멘트를 각각 의미한다.

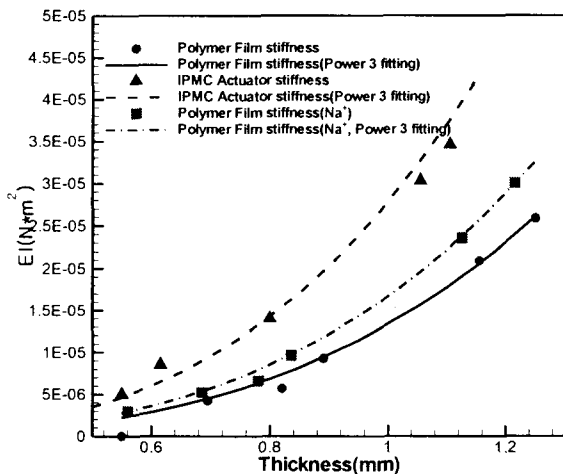


그림 5 내피온 막 및 IPMC 스트립의 강성도 측정 결과.
Fig. 5 Stiffness measurement of Nafion film and IPMC strip.

그림 5에는 다양한 두께를 갖는 캐스팅 직후의 막 (polymer film), 캐스팅 후 수화과정과 이온교환 과정을 거친 막(polymer film, Na'), 백금 무전해 도금 공정을 완료한 막(IPMC actuator)들에 대해 이와 같이 구한 강성도 측정 결과가 나타나있다. 영률과 관성모멘트의 곱 EI 로 표시되는 강성도는 아래의 식에 의해 빔 두께의 세제곱에 비례하는 관계를 갖는다.

$$EI = E \frac{bh^3}{12} \quad (2)$$

여기서 b 는 빔의 폭, h 는 빔의 두께를 의미한다.

따라서 측정된 강성도 값으로부터 각 시료의 영률을 구할 수 있다. 그림 5의 결과로부터 계산한 영률값은 수화과정과 이온교환 과정을 거친 내피온 막의 경우 약 50MPa, 도금 공정을 마친 IPMC 스트립의 경우 약 83.5MPa인 것으로 계산되었다. 그림에서 선으로 표시된 결과(power 3 fitting)는 이렇게 계산한 영률값을 대입하고 빔 두께의 세제곱에 해당하는 강성도의 계산결과이며, 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 측정된 강성도의 값이 두께의 세제곱에 비례하는 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 캐스팅 직후의 막과 캐스팅 후 수화과정 및 이온교환 과정을 거친 막의 강성도를 비교하면 큰 차이는 보이지 않으나 두께가 두꺼울수록 차이가 조금씩 증가함을 알 수 있다. 이는 두께가 증가할수록 수화되는 물의 양이나 교환되는 이온의 양이 점차 증가하게 되는 것에 기인한다고 생각할 수 있다. 이온교환에 의한 Na' 이온들이 물 분자에 둘러싸여 움직이므로 이 양이 많아질수록 강성도의 증가를 가져오게 된다. 그러나 무엇보다 강성도의 증가에 가장 큰 영향을 미치는 것은 백금의 무전해 도금이다. 그림 5의 결과는 이러한 예상과 잘 일치하는 결과이며 도금 공정 이후 두께에 상관없이 모두 강성도가 증가하고 있음을 알 수 있다.

이러한 결과를 통해, 캐스팅에 의한 내피온 막을 사용하여 IPMC 액추에이터를 제작할 경우 어느 정도의 강성도를 갖게 될 것인지를 예측할 수 있고 이를 액추에이터의 설계에 이용할 수 있을 것이다.

3.3 막 두께에 따른 액추에이터의 특성 변화

IPMC 액추에이터가 일반적인 외팔보와 동일한 특성을 갖는다고 가정할 때 생각할 수 있는 경향성은 두께가 두꺼워질수록 발생력이 증가하고 변위는 감소할 것이라는 점이다. 이때 두께에 따른 발생력이나 변위는 모두 식 (1)과 식 (2)의 관계로부터 두께의 세제곱과 관련이 있음을 알 수 있다. 즉 IPMC 액추에이터가 일반적인 외팔보에 관한 특성으로 해석될 수 있다면 발생력은 두께의 세제곱에 비례하여 증가할 것이고 변위는 두께의 세제곱에 반비례하는 경향을 보일 것이다.

그림 6에는 직류 전압을 인가했을 경우 두께에 따른 발생력의 변화를 측정된 결과가 나타나있다. 0.4-1.2mm의 두께를 갖고 백금 무전해 도금 공정이 완료된 IPMC 액추에이터에 3V의 직류 전압을 인가하여 스트립 형태의 시료 끝단에서 발생하는 최대 발생력을 측정된 결과이다. 최대 발생력은

직류 전압을 인가하고 수 초 정도 경과하면 나타나며 1.12 mm의 두께를 갖는 시료의 경우 4.55gf의 최대 발생력을 갖는 것으로 측정되었다. 그림 6에서 선으로 표시된 결과는 두께의 세제곱에 비례하는 계산에 의한 결과로서 최대 발생력이 두께의 세제곱에 비례하고 있음을 보여주고 있다.

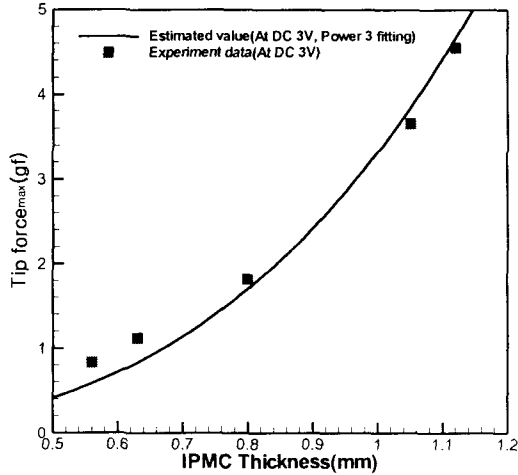


그림 6 막 두께에 따른 IPMC 스트립의 최대 발생력 변화 (직류전압 인가).

Fig. 6 Maximum force of IPMC strip with film thickness (dc voltage).

그림 7과 8에는 0.5Hz의 주파수를 갖는 구형파를 $\pm 1V(V_{p-p}=2V)$, $\pm 2V(V_{p-p}=4V)$, $\pm 2.5V(V_{p-p}=5V)$ 로 인가하였을 때의 변위와 발생력 측정 결과가 각각 나타나 있다. 그림 7의 변위의 경우를 보면 예상과 같이 캐스팅 한 막의 두께가 두꺼워짐에 따라 변위가 감소함을 알 수 있다. 선으로 표시된 결과는 두께의 세제곱에 반비례하는 계산 결과인데, 인가전압이 낮을수록, 막의 두께가 얇을수록 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 반면 전극의 양면에 걸리는 전압이 4V 이상이면 두께가 증가하면 계산결과로부터 벗어나는 경향을 볼 수 있다. 이에 대한 원인은 우선 인가되는 전압이 1.28V 이상이 되면 물의 전기분해 발생 전압조건이 되어 IPMC 액추에이터 내의 물이 전기분해 되기 시작하는 것을 들 수 있다. 이러한 전기분해 반응은 전압이 좀 더 증가하면 IPMC 액추에이터 내에서 고분자 물질 및 전극의 성질을 변화시키는 원인으로 작용하고 따라서 계산결과와 일치하지 않는 측정결과를 나타내게 된다. 또한 IPMC의 두께가 두꺼워지면 백금 전극의 무전해 도금 횡수가 그만큼 증가하고 이에 따른 전극 두께의 불균일성이 증가한다. 이는 전극 표면의 저항이 균일하지 않음을 의미하고 이에 따라 인가되는 전계 분포가 균일하지 않아 특성의 변화를 초래하게 된다. 이러한 두 가지 원인에 의해 전압이 크고 막의 두께가 두꺼운 경우의 특성변화가 나타난 것으로 판단된다.

그림 8의 발생력을 측정된 경우는 예상과 같이 두께 증가에 따라 발생력이 증가하는 것으로 나타나지만 그림 7의 경우와는 달리 막의 두께가 얇을수록 계산결과와 일치하지 않

는 경향을 보이고 전압이 큰 경우에 계산결과로부터 벗어나는 것은 동일한 경향을 나타내었다.

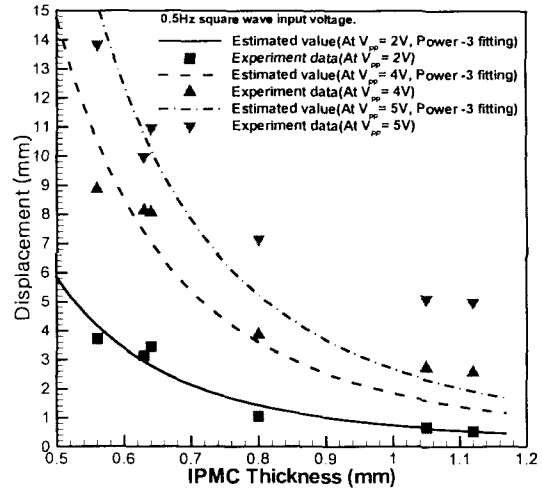


그림 7 막 두께에 따른 IPMC 스트립의 변위 변화.

Fig. 7 Displacement of IPMC strip with film thickness.

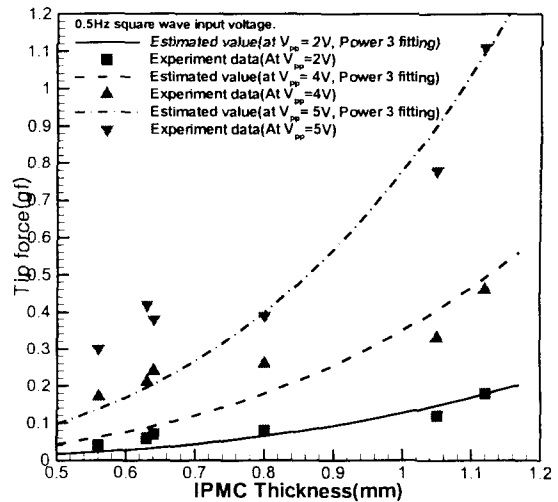


그림 8 막 두께에 따른 IPMC 스트립의 발생력 변화.

Fig. 8 Force of IPMC strip with film thickness.

전압이 클수록 전기분해 영향에 의해 계산결과와 달라지는 것은 변위의 경우와 마찬가지로 해석할 수 있으며, 두께 증가에 따른 전극 층의 불균일 특성 문제 역시 변위의 경우와 동일하게 발생한다고 볼 수 있다. 그럼에도 불구하고 두께의 영향이 변위의 경우와 발생력의 경우 상이하게 나타나는 것은, 변위의 경우 국부적인 물 분자의 집중 현상이 전체 IPMC 스트립의 구부러짐에 큰 영향을 미치게 되므로 두께가

두꺼워 전극 층의 불균일성이 커지는 경우 이론적인 계산과 일치하지 않게 될 가능성이 커지는 반면, 발생력의 경우 막의 두께가 얇으면 스트립의 끝단에서 순간적으로 측정되는 힘의 크기가 측정방법에 따라 상당히 다르게 나올 수 있기 때문인 것으로 판단된다. 실제로 스트립 끝단에서의 순간적인 발생력이 아닌 일정 시간이 경과한 후의 최대 발생력을 측정할 결과인 그림 6에서는 막의 두께에 관계없이 계산결과와 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

즉 액추에이터로서의 변위는 막의 두께가 얇을 때 재현성 있는 결과를 나타내었으며 발생력은 막이 두꺼울 때에 재현성을 보이고 있다고 정리할 수 있다. 이는 액추에이터로서 변위를 주로 이용하고자 하려면 얇은 막을 사용하는 것이, 그리고 발생력을 이용하고자 한다면 두꺼운 막을 사용하는 것이 변위나 발생력의 크기 면에서 유리할 뿐만 아니라 액추에이터의 신뢰성 측면에서도 유리하다는 사실을 실험적으로 검증하고 있는 결과이다.

3.4 인가전압에 따른 액추에이터의 특성 변화

그림 9와 10은 그림 7과 8의 결과를 인가전압에 대한 것으로 재구성한 결과이다. 인가전압이 증가할수록 변위나 발생력 모두 증가함을 알 수 있다. 그림 9와 10을 보면 변위와 발생력 모두 막이 얇을수록 전압에 따른 변화의 선형성이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 막의 두께가 얇을수록 전극 층의 두께 및 특성 균일성이 향상된 때문인 것으로 보인다. 즉 막의 두께가 얇으면 백금 무전해 도금의 횡수가 감소하여도 액추에이터 특성을 나타낼 수 있는 고분자-금속 복합물의 형성이 용이하다는 것을 의미한다. 실제로 막이 두꺼워지면 막의 부피에 대해 일정 비율의 백금 전극 층을 형성하기 위해 도금 횡수를 증가시켜야 액추에이터 동작이 나타남을 실험적으로 확인할 수 있었다. 즉 막이 두꺼울수록 고분자-금속의 복합물 형성이 쉽지 않음을 의미한다.

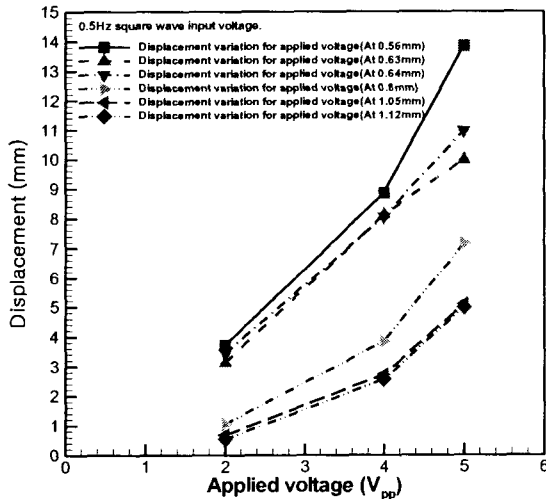


그림 9 인가전압에 따른 IPMC 스트립의 변위 변화.
Fig. 9 Displacement of IPMC strip with applied voltage.

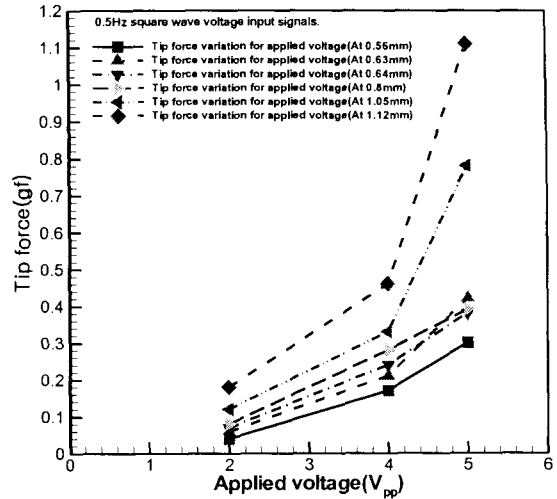


그림 10 인가전압에 따른 IPMC 스트립의 발생력 변화.
Fig. 10 Force of IPMC strip with applied voltage.

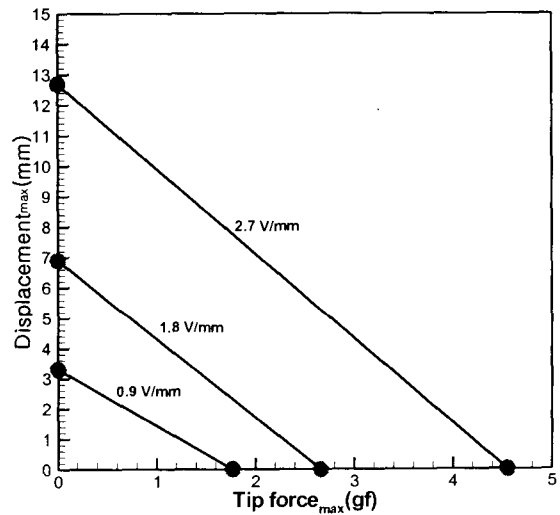


그림 11 전계 크기에 따른 최대변위와 최대발생력의 관계.
Fig. 11 Relation between maximum displacement and maximum force varying electric field.

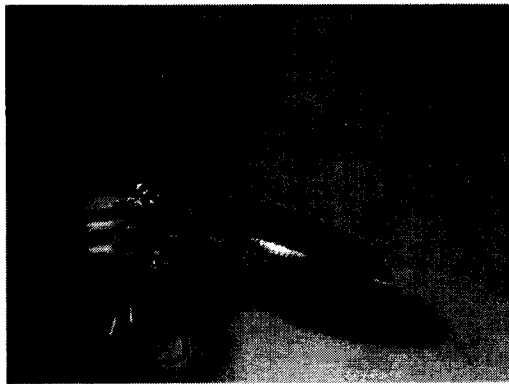
그림 11은 1.12mm의 두께를 갖는 IPMC 액추에이터에 1V, 2V, 3V의 직류 전압을 인가하여 최대 변위와 최대 발생력을 측정할 결과이다. 최대 변위는 시료의 끝단을 하중이 걸리지 않는 자유단으로 하여 충분한 시간이 지나 더 이상의 변위가 발생하지 않게 되었을 경우의 변위로 하였고, 최대 발생력은 끝단에 변위가 생기지 않도록 고정된 상태에서 발생하는 발생력을 측정하였다. 따라서 최대 변위는 발생력이 0인 y축 상에, 그리고 최대 발생력은 변위가 0인 x축 상에

표시하게 된다. 실제 액추에이터의 양단에 걸리는 전계를 기준으로 측정 결과를 표시하였다. 각 전계에 해당하는 직선들의 간격이 일정한 선형관계를 보이지 않는 것은 사용한 시료가 1.12mm의 두께를 갖는 두꺼운 경우이고 이 경우 그림 9와 10의 결과로부터 예상할 수 있듯이 전압, 즉 전계에 대한 선형성이 떨어지기 때문이다.

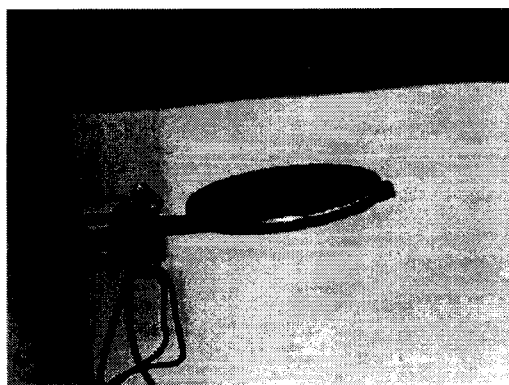
그림 11의 결과를 통해 IPMC 액추에이터로부터 사용할 수 있는 최대 에너지(일)를 계산할 수 있다. 이는 IPMC 스트립에 저장되는 기계적 에너지를 의미하며 대개 직선의 가운데 지점, 즉 최대 변위의 절반 정도에 해당하는 지점에서 계산되는 값이라고 생각할 수 있다.

3.5 제작한 IPMC 액추에이터의 동작

그림 12와 13에는 IPMC 액추에이터의 동작 예시로서, 제작한 IPMC 액추에이터를 이용하여 동전을 들어올리는 모습이 나타나있다.



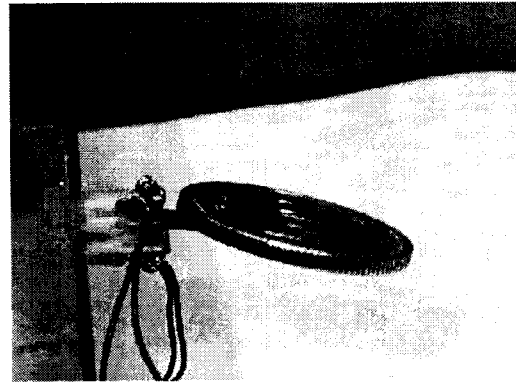
(a)



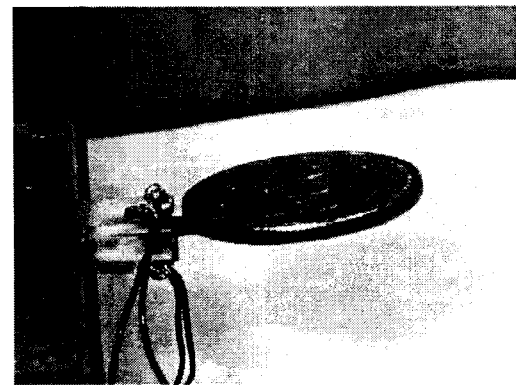
(b)

그림 12 IPMC 액추에이터의 동작 모습. (a) 전압인가 전, (b) 전압인가 후 (50원 동전).

Fig. 12 Actuation of IPMC actuator. (a) Before and (b) after applying voltage. (50 won coin).



(a)



(b)

그림 13 IPMC 액추에이터의 동작 모습. (a) 전압인가 전, (b) 전압인가 후 (500원 동전).

Fig. 13 Actuation of IPMC actuator. (a) Before and (b) after applying voltage. (500 won coin).

그림 12는 50원짜리 동전을 들어올리고 있는 모습으로 약 4gf의 힘에 해당한다. 그림 13은 500원짜리 동전으로 이는 약 7.7gf 정도의 힘에 해당한다. 동전은 시료의 끝단이 아닌 시료 전체에 놓여있다고 볼 수 있으므로 IPMC 액추에이터의 단위면적당 발생력을 계산해 볼 수 있다. IPMC 액추에이터의 크기는 1.12mm의 두께에 길이 30mm, 폭 4mm이므로 면적은 120mm이다. 따라서 이는 약 0.6kPa 정도의 힘에 해당한다. 이 정도 크기의 힘은 이와 같은 기능성 재료, 특히 고분자 재료를 이용하는 유사한 액추에이터인 전도성 고분자 액추에이터나 폴리머 젤 액추에이터보다 훨씬 큰 발생력이며 캐스팅에 의한 IPMC 액추에이터의 제작이 발생력 측면에서 실제 응용 가능성을 높일 수 있는 방법임을 실험적으로 보여주는 결과라고 할 수 있다.

4. 결 론

IPMC 액추에이터가 갖는 물질 자체로서의 많은 장점에도 불구하고 발생력이 크지 않은 점은 IPMC 액추에이터의 실제 응용을 제한하는 문제점으로 작용한다. 이러한 문제점은 IPMC 액추에이터의 두께를 증가시키면 가장 쉽게 해결

될 수 있으나 상용화된 내피온 막은 일정한 두께를 가지고 있으므로 액상의 내피온을 이용한 캐스팅 방법이 유일한 해결책이라고 할 수 있다. 그러나 액상의 내피온을 캐스팅하여 막으로 제작하는 과정은, 캐스팅된 막의 결정성이 확보되어야 IPMC 액추에이터로의 사용이 가능하기 때문에 간단한 공정이라고는 할 수 없다. 또한 캐스팅에 의해 무조건 두꺼운 시료를 얻는 것만이 해결책은 아니고 응용 조건에 따라 적절한 두께를 선정하는 과정이 필수적이다. 따라서 다양한 두께의 시료에 대한 액추에이터로서의 기본적인 기계적 특성은 액추에이터의 응용 분야 및 목적에 따른 설계 및 제작을 위해 반드시 필요한 기초 자료라고 할 수 있다.

본 논문에서는 액상의 내피온으로부터 0.4-1.2mm 사이의 다양한 두께의 내피온 막을 캐스팅 방법에 의해 제작하였다. 제작한 내피온 막은 수화 과정과 이온교환 과정을 거쳐 백금을 무전해 도금함으로써 액추에이터로 사용하게 되는데 이때 각 공정 단계에서의 막의 강성도를 측정함으로써 막의 처리 과정이 강성도에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 또한 막의 두께에 따라, 그리고 인가하는 전압의 종류 및 크기에 따라 발생하는 변위 및 발생력을 측정하였다. 이러한 결과들을 통해, 캐스팅에 의한 내피온 막을 사용하여 IPMC 액추에이터를 제작할 경우 어느 정도의 강성도를 갖게 될 것이며 어떠한 특성을 보이게 될 것인지를 예측할 수 있고 이를 액추에이터의 설계에 이용할 수 있을 것이다. 내피온의 캐스팅에 의해 실제 제작한 IPMC 액추에이터는 약 7.7gf 정도의 힘을 나타내어 기존의 상용화된 내피온 막을 이용한 경우에 비해 5-10배 이상 발생력의 증가를 가져온 것으로 측정되었다. 발생력 측면에서의 응용뿐만 아니라 변위 측면에서의 특성 향상 등을 위해서는 두꺼운 막의 캐스팅 외에도 얇은 막의 캐스팅도 필요하며 이를 마이크로 구조물 제작 공정과 결합하면 좀 더 다양한 응용도 가능할 것으로 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 polymers as artificial muscles - capabilities, potentials and challenges," Handbook on Biomimetics, Section 11, Chap. 8, pp. 1-13, 2000.
 [2] 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.
 [3] S. Guo, 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.

[4] S. Tadoko et. al., "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.
 [5] 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.
 [6] W. Zhou, W. J. Li, N. Xi and S. Ma, "Development of force-feedback controlled Nafion micromanipulators," *Proceedings of SPIE*, vol. 4329, pp. 401-410, 2001.
 [7] K. Jung et. al., "Experimental investigations on behavior of IPMC polymer actuator and artificial musclelike linear actuator," *Proceedings of SPIE*, vol. 4329, pp. 449-457, 2001.
 [8] 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.
 [9] 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.
 [10] 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.
 [11] M. Shainpoor and Kwang J Kim, "Novel ionic polymeric hydraulic actuators," *Proceedings of SPIE*, vol. 4329, pp. 164-173, 2001.
 [12] 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.
 [13] R. Lumia and M. Shahinpoor, "Microgripper design using electro-active polymers," *Proceedings of SPIE*, vol. 3669, pp. 322-329, 1999.
 [14] L. Ferrara, M. Shahinpoor et al., "Use of ionic polymer-metal composites(IPMCs) as a pressure transducer in the human spine," *Proceedings of SPIE*, vol. 3669, pp. 394-401, 1999.
 [15] 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.

- [16] G. Laurent, E. Piat., “Efficiency of swimming microrobots using ionic polymer metal composite actuators,” *Proceedings of the 2001 IEEE International conference on Robotics and Automation*, pp. 3914-3919, May 2001.
- [17] Y. Bar-Cohen et al., “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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Y. Bar-Cohen et al., “Challenges to the applications of IPMC as actuators of planetary mechanism.” *Proceedings of SPIE*, vol. 3987, pp.140-146, 2000.
- [21] 차승은, 박정호, 이승기, “백금의 무전해 도금에 의한 이온성 고분자-금속 복합물 액추에이터의 제작 공정 및 특성 측정,” *전기학회 논문지*, 제51권, 제9호, pp. 455-463, 2002.



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 : kimbrmk@hanmail.net



김 병 규(金柄奎)

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



박 정 호(朴政浩)

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

저 자 소 개



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 기계전자 공학과 특별연구원 (JSPS fellow), 1994년~현재 단국대학교 전기전자컴퓨터공학부 부교수

Tel : 02-709-2785
Fax : 02-795-8771
E-mail : skilee@dku.edu