

## 전도성 네피온필름-금 전극층 액츄에이터에 관한 연구

정원채<sup>1,a</sup>, 김형민<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 경기대학교 전자공학과

<sup>2</sup> 경기대학교 기계시스템공학과

## Study of a Conducting Nafion Film-Gold Electrode Actuator

Won-Chae Jung<sup>1,a</sup> and Hyung Min Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Electronic Engineering, Kyonggi University, Suwon 440-760, Korea

<sup>2</sup> Department of Mechanical System Design Engineering, Kyonggi University, Suwon 440-760, Korea

(Received February 28, 2013; Revised April 23, 2013; Accepted April 24, 2013)

**Abstract:** For conventional electrical actuators, the materials are mainly made up of metals, which mean they are prone to corrosion and electrical sparking. Replacing these systems with polymer metal composite based materials can be solved both problems. Considering their excellent electromechanical property, low device fabrication cost, light weight, and good electrical conductivity, the actuator based on ionic polymer metal composite (IPMC) was fabricated using Nafion film, NaOH 0.1 molar solution, and Au electrode. IPMCs exhibit good electrostatic property which means they can in principle be used in making actuators based on electromechanical motions. The resistance measurements of Nafion film after soaking in NaOH and deionized water were demonstrated and compared each other. The result of sample soaked in NaOH showed better electrical conductivity than in deionized water. The fabricated IPMC actuator exhibits a large deformation of bending displacement of approximately 9 mm with applied low AC voltage 6.89 V at 2.84 Hz. The result of computer simulation was also very similar and shown as a bending displacement of 8.6085 mm.

**Keywords:** Ionic polymer composite, Actuator, Displacement, Computer simulation

### 1. 서 론

Nafion 필름은 높은 이온 전도성을 나타내는 전기화학적인 cell에 있어서 특히 연료전지 (fuel cell)와 전해조에서

분리기 (separator)로 사용이 되어 진다 [9-11]. 이 필름의 밀도는 실온에서  $1.98 \text{ g/cm}^3$ 이고, 전기전도도는  $0.5 \sim 2.31 \times 10^{-3} [\text{m}\Omega]^{-1}$ 을 나타내고 있으며 membrane 형태의 Nafion 필름은 전해용액에 담그기 전까지는 매우 안정되어 화학적인 변화가 나타나지 않는다. 현재에 IMPC를 이용하여 전기적으로 작동하는 다양한 액츄에이터로 사용되고 있다 [1-8]. 인공근육, 의료용 눈, 압축 밴드를 가진 심장, 물속에서 움직이는 물고기, 비행기의 날개, 자동차, 산업체의 다양한 센서 (sensor) 및 우주선 등 여러 폴리머 MEMS (microelectro-mechanical

a. Corresponding author: [wjung@kgu.ac.kr](mailto:wjung@kgu.ac.kr)

Copyright ©2013 KIEEME. All rights reserved.  
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

system) 분야에서도 광범위하게 적용이 되고 있다 [4,7,13]. Nafion 필름에 물의 흡착 (adsorption)은 Nafion 필름의 표면을 소수성 (hydrophobic)에서 친수성 (hydrophilic)으로 바꾸는 원인이 된다. 물은 Nafion 필름의 표면에서 sulfonic acid들을 끌어서 당기는 작용을 나타내고 있다 [17]. 이러한 구조적인 변화는 Nafion에 물이 작용하면 큰 접촉각을 나타내었다 [17]. 따라서 물에 의한 표면 성질들은 Nafion 필름의 본질적인 변형을 일으키는 원인이 되고 있다. 실제적으로 다양한 화학적인 용액인 NaOH, LiOH와 HCL 등의 용액에 Nafion 필름을 담근 후에 Nafion 필름이 더 좋은 전기전도성을 띄고  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Li}^+$  및  $\text{H}^+$ 와 같은 캐티온 (cation)들은 그림 1에 나타낸 것처럼 외부의 마이너스 단자로 이끌려 가면서 bending 현상을 일으키게 한다 [18]. Shahinpoor과 Kim (2005) and Kim and Shahinpoor (2003) [2-4]들에 의해서 제안된 바와 같이 우수한 전기적인 소자들을 개발하기 위한 재료로서 Nafion과 같은 이온전도성의 재료들로 사용되고 있는데, 이 폴리머는  $\text{Na}^+$  캐티온 이온의 단원자가  $\text{H}^+$  이온과의 교환으로 인한 우수한 전기전도와 우수한 열적인 안정성을 가지고 있어서 IMPC 액츄에이터로서 활용할 수 있다고 할 수 있다. 또한 Nafion 필름은 물 ( $\text{H}_2\text{O}$ )에 노출되지 않으면 화학적으로 매우 안정되어 있고 일반적으로 어떠한 가스와의 반응하지 않으며  $160^\circ\text{C}$ 까지 열적으로도 안정적이다. 이런 특성을 가진 Nafion 필름은 물 ( $\text{H}_2\text{O}$ )의 증발로부터 전도성이 떨어지는 특성을 가지고 있어 건조기나 가습기를 제어하는 액츄에이터로 사용된다 [9-11].

본 연구에서는 Dupont사의 Nafion 폴리머 필름의 양면에 1,000 Å의 금 (Au) 전극층을 스프터링 방법으로 증착하여 전기적으로 활성화된 액츄에이터를 제작하여 실험하였다. 네피온 필름은 사용된 전도성 용액이나 외부 전극층의 재료에 따라서 기계적인 강도나 성질이 다르게 변하며 IPMC는 전자기계적인 변환에 기초를 둔 전기적인 스위치를 제작할 수 있는 우수한 정전기적인 성질을 나타내고 있음을 본 실험을 통해서 확인하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 폴리머액츄에이터의 제작과 측정

#### 2.1.1 광학적 및 전기적인 측정

IPMC는 전자기계적인 변환에 기초를 둔 전기적인

스위치를 제작할 수 있는 우수한 정전기적인 성질을 나타내고 있으며 이러한 시스템에 기본적인 동작 원리와 구조는 네피온 필름을 중심으로 바깥층 양면이 Au 전극층으로 증착된 이중층 구조로 이루어진 캐파시터 (capacitor)와 유사하다. 이러한 시스템의 캐파시턴스 (capacitance)는 간격  $d$ 로 수식 1에 나타내었다.

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (1)$$

여기서  $\epsilon$ 는 필름재료의 유전상수,  $A$ 는 전극 층 (electrode)의 면적을 각각 나타낸다. 이 시스템에서 캐파시턴스의 값은 면적  $A(x)$ 과 간격  $d(x)$ 의 변화로 변할 수가 있다. 캐파시턴스는 전하량  $Q$ 와 인가전압  $V$ 로 수식 2에 나타내었다.

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2)$$

캐파시터 (capacitor) 시스템에 작용하는 힘 (force)은 면적  $A$ 와 간격  $d$ 를 사용하여 정전에너지  $W$ 를 수식 3에 나타내었다.

$$W = F \cdot d(x) \quad (3)$$

두 개의 전극 층 사이에 축적된 전기적인 에너지는 수식 4로써 나타낼 수가 있다.

$$W = \frac{CV^2}{2} = \frac{\epsilon AV^2}{2d} \quad (4)$$

이 때 정전력에 기인하는 힘은 수식 5에 나타내었다.

$$F = \frac{dW}{dx} = \frac{\epsilon AV^2}{2d^2} = \frac{CV^2}{2d(x)} \quad (5)$$

캐파시터에 기반을 둔 전자기계적인 액츄에이터에서 전하량을 축적하는 폴리머에 부가적인 에너지축적을 미분하면 힘을 구할 수 있는데, 액츄에이터의 힘은 수식 5에 나타내고 있다. 폴리머 캐파시터의 전자기계적인 성질은 전기적인 스위치를 제작하는데 적용이 될 수 있다. 캐파시터 시스템의 스위칭 특성은 충전된 상태에서 전하들이 방전 동안에 빠르게 이동하여

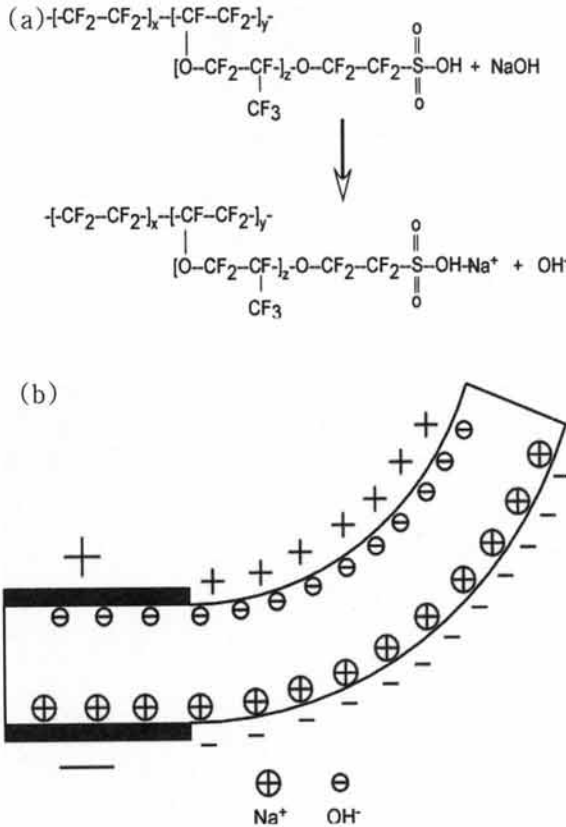


Fig. 1. (a) Structure of the Nafion in sodium hydroxide and (b) schematic diagram of IPMC deformation under external applied voltage.

구부러짐 (bending)과 변위 (displacement)에 영향을 미치게 한다. 수식 5에서 제안된 것 같이 충전/방전 과정 동안에 정전에너지의 이득/손실은 캐파시터 시스템이 수행하는 동안에 변위의 크기에 비례한다.

본 실험에서는 Dupont 회사의 Nafion film 117을 사용하여 Au 전극층을 스프터링 (sputtering)으로 Nafion film 양면에 증착한 다음 0.1 molar로 NaOH 전해용액에 담근 후에 전압을 인가하였을 때 분자 형태 (molecular formula)와 필름이 휘어지는 모양을 그림 1에 나타내었다.

본 실험에서 사용한 두께 183  $\mu\text{m}$ 인 Dupont사의 Nafion film N117 membrane 필름을 NaOH의 용액에 담근 후에 표면을 광학적인 현미경으로 측정한 그림을 그림 2에 나타내었다. 그림에서 약간의 굵은 자국들이 나타나 있지만 외부에서 걸어준 전압 후에 나타나는 그림 4의 표면과는 상대적으로 더 깨끗한 형태를 나타내고 있다.

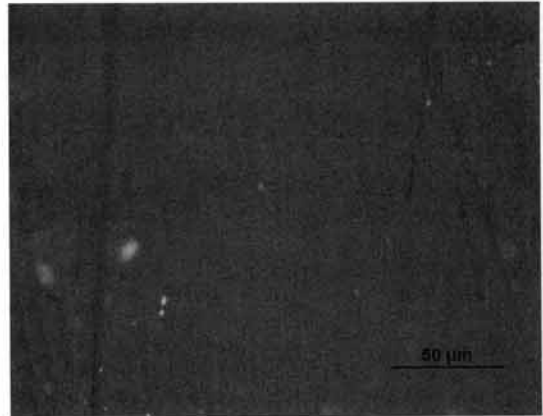


Fig. 2. The microscope image ( $\times 500$ ) of surface morphology of a Nafion film after soaking NaOH solution.

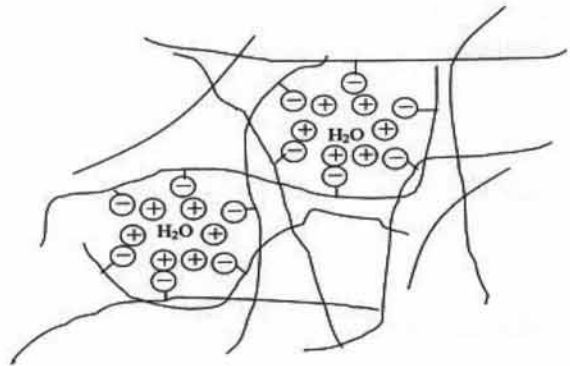


Fig. 3. Schematic illustration of the deformation of the polymer chains due to clustering of pendant ions.

그림 3은 순수한 물 ( $\text{H}_2\text{O}$ )로 부터 귀고리 형태의 이온들이 여러 개로 뭉쳐진 cluster 형태에 따른 폴리머의 변형된 모양을 그림 3에서 나타내고 있다. 따라서 Nafion 필름은 물 ( $\text{H}_2\text{O}$ )을 흡수함에 따라서 대략 22%까지 부풀어 오른다. 알코올에서는 88%까지 그 크기가 더 증가하게 된다. 전해질 NaOH 0.1 molar 용액에 담근 후에 폴리머 액츄에이터로서 움직인 후에 표면조직을 광학적인 현미경으로 측정한 그림을 그림 4에 나타내었다.

그림 4에서 나타나 있듯이 표면조직이 매우 거칠어져 있음을 확인할 수가 있다. 이러한 이유는 Nafion 필름이 활성화된 전도성을 띄면서 좌우로 진동하면서 역학적인 동적 움직임 때문에 표면의 조직이 그림 2에서와는 다르게 많은 굵은 선들로 표시된 굵은 자국 (scratch)들이 나타나 있다.



Fig. 4. The microscope image ( $\times 500$ ) of surface morphology of a Nafion film after soaking NaOH solution and flapped motions with the applied voltage.

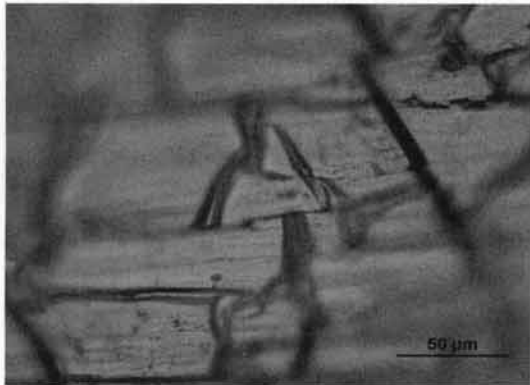


Fig. 5. The optical image ( $\times 500$ ) of the surface morphology of a Au electrode on a Nafion film.

그림 4에서 나타나 있듯이 Nafion 표면조직이 매우 거칠어져 있음을 알 수가 있다. 이러한 이유는 Nafion 필름이 활성화된 전도성을 띄면서 내부의 이온들의 이동성 때문에 좌우로 진동하면서 역학적이고 동적인 움직임 때문에 표면의 조직이 여러 개의 굵은 선들로 표시된 균열 자국이 나타나 있다. 즉 Nafion 필름 위에 스퍼터링 방법으로 증착된 표면의 조직과 접착특성 때문에 이러한 움직임은 액츄에이터에서는 금이 증착된 전극층의 표면에서 균열 현상이 나타남을 그림 5에서 확인할 수가 있었다. 이 이유는 IMPC 액츄에이터의 bending에서 반복된 수축 (contraction) 과 이완 (relaxation) 작용 때문에 전극층의 표면에 더 많은 균열을 발생시키고 또한 표면 전기전도성을 떨어지게 하는 원인이 되기 때문이라고 사료된다. Au

는 soft한 물질이므로 표면의 균열을 줄인다고 하지만 Au 전극 단층 구조인 경우 보다 여러 다층구조가 제안되고 있다 [18]. 따라서 발표된 논문 [18]에서는 여러 가지의 금속 Au, Pt의 층들을 증착하여서 IMPC 액츄에이터의 tip force와 표면 저항을 줄이는 개선한 결과들을 제시하였다. 그러나 더 많은 연구가 수행되어야 개선된 실험 방법을 구체적으로 제시할 수 있다고 사료된다.

### 2.1.2 변위측정 및 컴퓨터 시뮬레이션 결과

Nafion 폴리머 액츄에이터의 최대 변위를 실험적으로 측정하기 위해서 그림 6에 전기적인 장치들을 연결하였다. 그림 6에서 측정된 것처럼 폴리머 액츄에이터의 움직임을 사람의 눈으로 관찰하기 위해서는 일반적으로 1~10 Hz의 낮은 교류 주파수 대역에서만 가능하다. 왜냐하면 수십 또는 수백 Hz의 높은 주파수 대역에서는 너무 빠르게 움직이기 때문에 육안으로 관찰할 수는 없다. 실제적인 bending force를 구하기 위해서는 완전히 충전된 폴리머 액츄에이터의 측정된 캐파시턴스 값을 이용하여 다음과 같은 수식 6으로 구하였다.

$$F = \frac{1}{2} C \frac{V^2}{d} \quad (6)$$

실제로 측정된 값을 적용하면, 다음의 수식 7로 표현된다.

$$F = \frac{35.6 \times 10^{-9} \times (6.89)^2}{2 \times 183 \times 10^{-6}} = 4.618 mN \quad (7)$$

여기서  $35.6 \times 10^{-9}$  (F)는 전해용액 0.1 molar NaOH에 담근 후에 5 V로 충전한 다음에 5분 후에 꺼낸 폴리머 액츄에이터의 캐파시턴스의 측정값을 나타낸다. 샘플을 고정하는 집계의 면적은  $0.8 \times 0.8 \text{ cm}^2$ 이고, 길이는 48 mm를 나타내었다. 이 때 고정된 부분의 길이는 8 mm이고, 제작된 폴리머 액츄에이터의 치수는 그림 7에 나타내었다.

IMPC를 사용하여 제작된 Nafion 액츄에이터는 1~10 V의 영역에서 테스트 했을 때 그림 8(a)에 나타난 것처럼 2.84 Hz에서 AC 6.89 V 외부 전압을 인가했을 때 가장 큰 변위를 나타내는 bending 효과를 나타내었다. 그림 8(b)는 폴리머 액츄에이터의 변위를 실제적으로 측정 한 방법을 나타내었다.

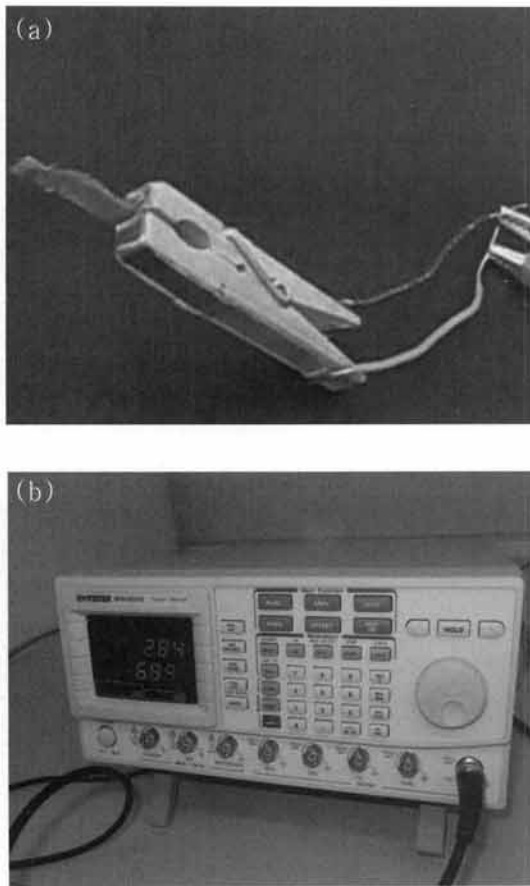


Fig. 6. Measurement tool and displayed the parameter of the displacement for the IMPC actuator. (a) fixed position and connected cable for the measurement, (b) displayed parameters using a function generator.

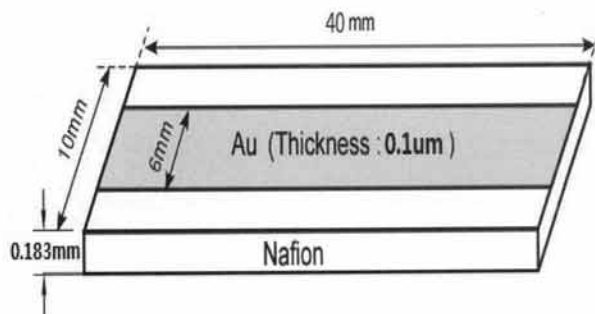


Fig. 7. Structure of the fabricated polymer actuator using a Nafion film.

출력 파장이 633 nm이고, 출력 파워가 0.5 mW를 나타내는 He-Ne laser를 사용하여 원래의 정지된 점으로부터 마지막으로 변위된 지점의 차이를 측정하여

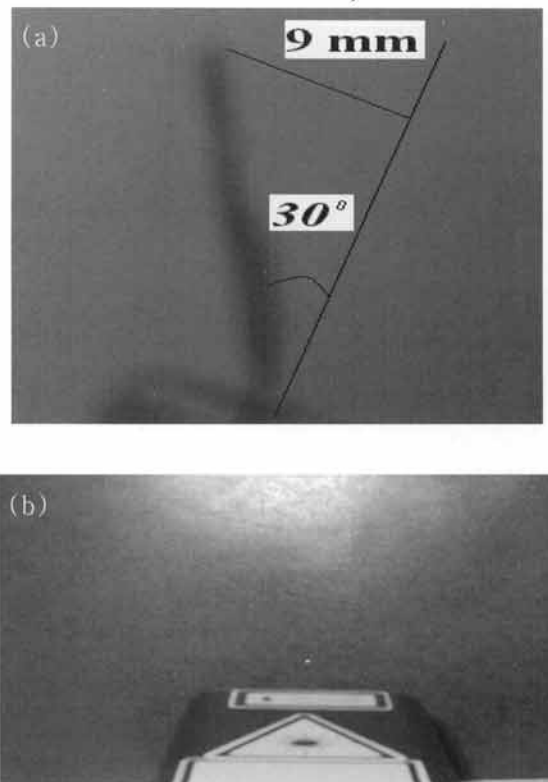


Fig. 8. The measured result of the displacement for the fabricated actuator with a He-Ne laser. (a) final position of vibrated polymer actuator, (b) measurement of the position by using a He-Ne laser.

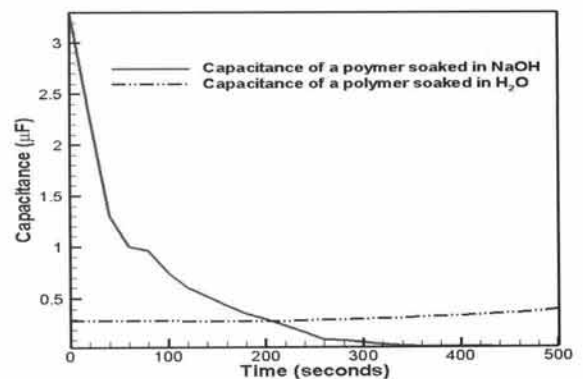


Fig. 9. Measurement of capacitance in the fabricated IPMC actuator.

9 mm의 변위를 나타내었다. D.I (deionized) water와 0.1 molar 전해용액 (NaOH) 에 30초 동안 각각 담근 후에 제작된 Nafion 필름 액츄에이터를 정확하게 30초

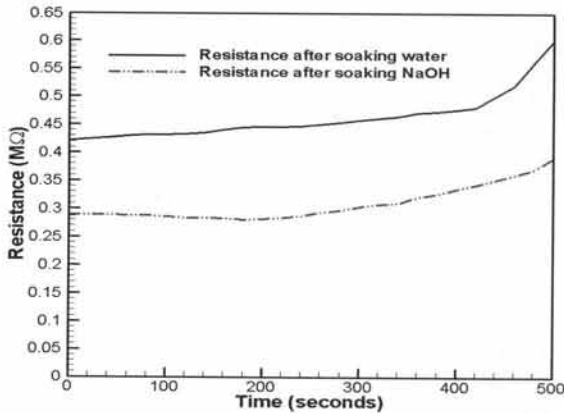


Fig. 10. Measurement of resistance in the fabricated IPMC actuator.

간격으로 측정된 캐파시턴스의 데이터를 서로 비교하여 그림 9에 나타내었다. 350초 후에는 캐파시턴스의 값이 매우 작은 값으로 떨어짐을 그림 9에서 확인할 수가 있다.

D.I (deionized) water와 전해용액 (NaOH)에 각각 담근 후에 제작된 Nafion 필름 액츄에이터를 30초 간격으로 시간이 경과함에 따라서 측정된 저항의 데이터를 그림 10에 서로 비교하여 나타내었다. 이 결과로부터 전도성 용액에 담근 후에 Nafion 폴리머의 저항이 작게 나타나서 전기적인 전도성의 측면에서 더 전기가 더 잘 흐름을 확인하였다. 그러나 500초가 경과한 부터는 Nafion 폴리머필름의 수분이 증발하기 때문에 필름이 건조되어 저항 값이 증가하는 결과를 나타내고 있다.

수식 7에서  $35.6 \times 10^{-9}$  (F)는 전해용액 NaOH에 담근 후에 주파수 1 kHz에서 5 V로 충전한 다음에 5분후에 꺼낸 폴리머 액츄에이터의 캐파시턴스의 측정 값을 나타내고 있는데, 이 값은 충전 후에 10분이 경과 하여도 그 값이 변하지 않고 안정된 값을 나타내었다. 따라서 이 값을 적용하여 액츄에이터의 힘을 계산할 수 있었다. 그림 8의 (a)에서 Nafion 폴리머 액츄에이터의 membrane flapping 후에 정지된 시간은 350초 후에 완전히 정지하는 상태를 나타내었다. 그림 9에서 나타난 그래프는 충전전의 캐파시턴스의 값인데 대략 350초에서 거의 0의 값을 나타내고 있다. 즉 시간이 경과함에 따라서 수분이 증발하여 캐파시턴스의 전하량은 감소하고 그림 10의 그래프처럼 저항 값은 매우 작은 값이지만 다소 증가함을 나타내고 있음을 확인할

Table 1. Applied material properties for the simulation.

Material	Young's Modulus [Pa]	Poisson's Ratio	Density [Kg/m <sup>3</sup> ]
Gold	7.8e10	0.4	19,300
Nafion	5.2e7	0.5	1,920

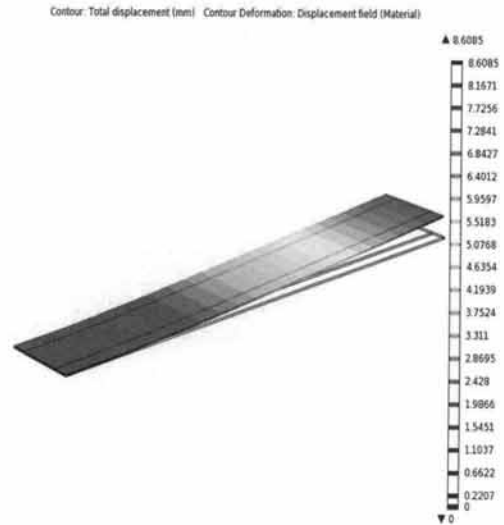


Fig. 11. The simulation result of contour displacement for the experimented actuator.

수가 있다. Nafion 폴리머 액츄에이터의 flapping 후에 정지된 다음에 나타난 변위를 해석적 결과와 비교 검토하기 위하여 COMSOL [12-16]을 이용한 해석을 수행하였다. 해석에 적용한 변수들은 표 1과 같으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 얻은 변위를 나타낸 것으로 고정점에서 끝점까지의 연속적인 변위를 그림 11에서 볼 수 있다. 해석 결과로부터 얻은 끝점에서의 최대 변위는 8.6085 mm이며 실제로 측정된 변위는 9 mm 인데 실제로 측정치에 비하여 다소 작은 변위를 나타내었다. 그러나 이론적으로 계산한 값이 대체적으로 실험적으로 얻어진 측정 결과와 유사함을 그림 8과 11에서 확인하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Dupont사의 Nafion 폴리머필름을 사용하여 전기적으로 활성화된 액츄에이터를 제작하였다. 이러한 필름을

사용하여 높은 이온의 전도도를 요구하는 액츄에이터를 실제로 제작하여 변위를 관찰하였다. 네피온 필름은 사용된 전도성 용액이나 외부 전극층의 재료에 따라서 기계적인 강도나 성질이 다르게 변한다. 초정밀 전자저울을 사용하여 순수한 물 ( $H_2O$ )에 담그기 전의 무게는 0.101 g이었고 물에 담근 후의 무게는 0.123 g을 나타내어 대략 10% 정도의 필름의 무게 차이가 나타남을 확인하였다. Nafion 필름의 두께 변화는 실온인 23°C에서 습도 RH (relative humidity) 50%에서 순수한 물 ( $H_2O$ )에 담근 후에 즉시 꺼내었을 때에 대략 10% 정도로 부풀러져서 나타났다. 물에 필름을 담근 시간이 오래됨에 따라서 더 크게 부풀어 올랐다. 또한 물 ( $H_2O$ )이 시간이 경과함에 따라서 서서히 증발되어 전도성이 떨어지게 되고 어떤 순간에 정지됨을 실험적으로 관찰하였다. 전해질 NaOH 용액에 담근 후 바로 측정된 저항 값은 0.288 M $\Omega$ 이었으나 500초 후는 0.39 M $\Omega$ 을 각각 나타내었다. 10분 후에는 수분이 완전히 증발되어 건조한 상태가 되어 저항 값이 매우 높은 1.15 M $\Omega$  값을 나타내었다.

#### 4. 결론

Dupont 회사의 Nafion film N117 membrane을 사용하여 전기전도성을 높이기 위해서 전해용액 0.1 molar NaOH에 담근 후에 저항 값과 캐파시턴스 값을 각각 측정하여 그림 9와 10에 각각 나타내었다. 금속 전극층으로 필름의 두께가 183  $\mu\text{m}$ 인 Nafion film 양면에 각각 1,000 Å의 두께로 금(Au)을 스프터링 방법으로 증착하였다. Au의 표면의 조직과 접촉 특성이 이러한 움직이는 액츄에이터에서는 표면의 균열현상이 나타남을 광학 image로 관찰하여 그림 5에 나타내었다. 폴리머 필름 위에 접착력이 좋은 전극층의 형성을 위해서는 다층의 구조의 전극층 형성 및 다양한 실험이 요구된다. Nafion 필름을 전해용액인 0.1 molar NaOH와 D.I (deionized) water에 따로 담근 후에 저항 값과 캐파시턴스 값들을 시간이 경과함에 따라서 각각 측정하여 관찰하였다. 그림 9에서 전해질에 담근 후의 캐파시턴스 (capacitance) 값은 200초 경과 후에 D.I (deionized) water에 담근 경우와 같은 값을 나타내었다. NaOH에 담근 후에 5분 간 5 V로 충전한 후에 주파수 2.84 Hz에서 AC 6.89 V 외부 전압을 인가했을 때 가장 큰 변위를 나타내는 bending 효과를 나타내었고 측정된 변위는 9 mm이고, 컴퓨터 시뮬레이션에서 계산된 변위는 그림 11에 나타낸 것처럼 8.6085 mm를 나타내었다. 약간의 변위 값에 대한 차이

가 나타났지만 대체적으로 실험 결과와 잘 일치하였다. 이 때 bending force는 4.618 mN을 나타내었다. 폴리머 멤브레인 (polymer membrane)의 3-D 구조에서 flapping 해석 및 폴리머 MEMS 구조들의 변위 해석에도 본 실험 데이터가 적용이 될 것으로 사료된다.

#### REFERENCES

- [1] C. K. Chung, P. K. Fung, Y. Z. Hong, M. S. Ju, C. C. K. Lin, and T. C. Wu, *Sensor. Actuat. B117*, 367 (2006).
- [2] M. Shahinpoor and K. J. Kim, *Smart Mater. and Structure*, 10, 819 (2001).
- [3] K. J. Kim and M. Shahinpoor, *Smart Mater. and Structure*, 12, 65 (2003).
- [4] M. Shahinpoor and K. J. Kim, *Smart Mater. and Structure*, 14, 197 (2005).
- [5] J. J. Park, S. E. Cha, H. J. Ahn, and S. K. Lee, *Intl. J. of Control Automation and Systems*, 4, 748 (2006).
- [6] J. Y. Li and S. Nemat-Nasser, *Mechanics of Mater.*, 32 303 (2000).
- [7] T. A. Kovacs, *Micromachined Transducers Source Book* (McGraw Hill, Boston, 1998) p. 278.
- [8] T. M. Adams and R. A. Layton, *Introductory MEMS Fabrication and Applications* (Springer, Terre Haute, Indiana 2010) p. 230.
- [9] F. Liu, B. Yi, D. Xing, J. Yu, and H. Zhang, *J. of Membrane Science*, 212 213 (2003).
- [10] L. Sun and T. Okada, *Analytica Chimica Acta*, 421, 83 (2000).
- [11] K. A. Mauritz and R. B. Moore, *Chem. Rev.*, 104, 4535 (2004).
- [12] D. Pugal, K. J. Kim, A. Punning, and H. Kasemagi, *J. of Appl. Phys.*, 103, 908 (2008).
- [13] A. A. Tseng, *Nanofabrication Fundamentals and Applications* (World Scientific, New Jersey, 2008) p. 544.
- [14] J. W. L. Zhau, H. Chan, T. K. H. To, W. C. Lai, and W. J. Li, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 9, 334 (2004).
- [15] R. Tiwari and K. J. Kim, *Smart Mater. Struct.* 19, 1 (2010).
- [16] Z. Zhu, H. Chen, Y. Wang, and B. Li, *Proc. SPIE*, (San Diego, 2012) p. 117.
- [17] S. Goswami, S. Klaus, and J. Benziger, *Langmuir*, 24, 8627 (2008).
- [18] S. G. Lee, H. C. Park, S. D. Panidita, and Y. Yoo, *Inter. J. Control Automation and Systems*, 4, 748 (2006).