

# 전도성 폴리아닐린(Polyaniline)을 이용한 전기작동 종이(EAPap)의 굽힘변형 개선

## Bending Displace Improvement of Electro-active Paper Using Conductive Polyaniline Coating

김 주 형\* · 윤 성 룰\*\* · 김 재 환†

Joo-Hyung Kim, Sungyuel Yun and Jaehwan Kim

(2008년 9월 23일 접수 ; 2008년 11월 17일 심사완료)

**Key Words :** EAPap(전기작동종이), Conductive Polymer(전도성 고분자), Polyaniline(PANI), Bending Displacement(굽힘변형), Tri-layer(삼층구조)

### ABSTRACT

Bi-layer and tri-layer structures of electro-active paper(EAPap) using conductive polyaniline(PANI) coating were investigated to improve bending displacement of cellulose EAPap. Two different counter ions, perchlorate( $\text{ClO}_4^-$ ) and tetrafluoroborate( $\text{BF}_4^-$ ), are used as dopant ions in the PANI processing. The actuation performances of bi-layer and tri-layer structure are evaluated in terms of tip displacement, blocked force, strain energy density and power output density. The actuation performance of the tri-layer actuator was better than the bi-layer structure, and the maximum displacement and blocked force of tri-layer  $\text{ClO}_4^-$  doped-PANI-EAPap were 13.2 mm and 0.15 mN, respectively. Also the power output of the actuator is similar to the required power of biological muscle application.

### 1. 서 론

지난 수십 년 동안 전기장에 의해 기계적 구동이 발생하는 전기작동 고분자(electro-active polymer, EAP)는 커다란 기계적 변형률을 보여줌으로, 새로운 개념의 전기작동 물질로 많은 관심을 끌어오고 있다. 이러한 전기-기계적인 특성을 사용하여 EAP 물질을 여러가지 다양한 응용분야로 확대/적용하기 위한 연구가 꾸준히 진행되고 있으며, 특히 의료분야에서 인공관절로의 응용가능성이 제기되어 오고 있다. 이러한 재료적인 우수성을 확인 받기 위해서

는, 이러한 재료들이 가지고 있는 문제점인 느린 반응속도, 낮은 구동전압 그리고 기계적인 강성을 증가시키는 것이 매우 중요한 부분으로 현재 논의되고 있다. 무엇보다도 초경량 EAP 작동기를 실용화 함에 있어, 구동에 필요한 전기를 공급하는 기술에 대해서는 현재로서 난관에 부딪혀 있는 상태이다. 현재까지 이러한 부분에 적용할 수 있는 물질로는 이온고분자(ionic polymer), 금속복합재료(metal composite), 젤타입 고분자(gel polymer), 전도성 고분자(conductive polymer), 유전성 중공체(dielectric elastomer) 그리고 탄소나노튜브(CNT)를 섞은 복합체 등이 그 가능성을 보여주고 있다<sup>(1-6)</sup>.

기계-전기적인 특성을 측정하기 위해 셀룰로오스 종이 위에 수백 nm정도의 금속막(Au)을 입히고, 외부에서 교류 전기장이 두 금속막에 가해지게 되면, 셀룰로오스 종이는 굽힘변위를 발생하게 되고 이러

† 교신저자; 정회원, 인하대학교 기계공학과  
E-mail : jaehwan@inha.ac.kr  
Tel : (032)872-7925, Fax : (032)868-1716

\* 정회원, 인하대학교 기계공학과

\*\* 정회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

한 현상을 보이는 셀룰로오스를 전기작동 종이(electro-active paper, EAPap)라고 한다<sup>(7)</sup>. EAPap의 장점으로서는 전기장이 금속막에 가해지면, 그에 따른 커다란 변위를 발생하게 된다는 것과 액추에이터로서 작은 구동전압을 요구하고 적은 소비전력, 경량이면서, 자연친화적이고, 생분해성의 우수한 특성을 소유하고 있다는 점이다. 그럼에도 불구하고, 바이오 분야 및 센서로서의 실제적인 응용을 위해서는 기계적인 출력과 굽힘변형에 대한 특성에 대해서는 아직도 개선되어야 할 부분이 남아있다. 이러한 물질적인 특성을 개선하기 위해서, 전도성 고분자로 잘 알려져 있는 polypyrrole을 EAPap위에 증착함으로, 개선된 변위량을 보여주는 복합재료 EAPap가 이미 발표되었다<sup>(8)</sup>.

전도성 고분자중에서, polypyrrole보다 안정적인 고분자로 알려져 있는, 폴리아닐린(PANI)은 EAPap의 특성향상에 크게 기여할 것으로 기대되는 대표적인 물질이다. 그러므로 이 연구에서는 PANI 박막을 EAPap위에 코팅함으로 액추에이터의 성능을 개선하는 것을 목적으로 하고 있다. PANI의 두께, 도핑 물질의 종류 및 PANI-EAPap의 구조에 따른 영향들을, 서로 다른 습도조건에 따라 발생하는 변형 및 작동력(blocked force)에 대한 연구를 진행함으로 전도성 고분자인 PANI가 EAPap에 미치는 영향을 파악하고자 한다<sup>(9)</sup>.

## 2. 실험방법

### 2.1 셀룰로오스 EAPap제작

셀룰로오스를 기반으로 하는 EAPap은 셀룰로오스 박막 양면에 금속막을 입힘으로 제작된다. 자연 상태에서 얻어진 셀룰로오스는 수산기를 가진 수산화나트륨/요소(NaOH/Urea)속에서 용해되며, 여기서 얻어진 셀룰로오스 용매를 실리콘 기판 위에 스프인코팅 함으로써 박막형태의 셀룰로오스를 얻어낼 수 있다. 막 두께는 스프인코팅의 속도에 따라 결정되며, 일반적으로 최종단계인 건조단계를 거친 후에 측정된다. 스프인코팅으로 박막상태의 셀룰로오스는 세척 단계와 건조단계를 거쳐서 박막 형태의 종이로 제작된다<sup>(10,11)</sup>. 이렇게 제조된 셀룰로오스 종이의 고분자화(polymerization)는 자연에서 얻어지는 셀룰로오스의 고분자화보다는 적은 양을 갖게 되며, 건조된 후

의 셀룰로오스 종이는 대략 약 20  $\mu\text{m}$ 정도의 두께를 갖게 된다. 이렇게 제작된 셀룰로오스 종이 양면에 이온 증착장비(evaporator)를 사용하여 약 100 nm정도의 금속막(Au)을 입힌다. PANI막과 금속막의 점착성을 좋게 하기 위해서, 30 nm두께의 Ti막을 금속막 위에 입힌 후 최종적으로 PANI막을 도포하게 된다. 여기서 금속박막의 두께는 셀룰로오스 EAPap의 두께에 비해 매우 얇기 때문에 굽힘변형에 있어서는 그 영향을 무시하였다.

### 2.2 PANI박막 형성

전기화학적으로 PANI막을 EAPap위에 형성하기 위해서 solartron electrochemical interface(Model SI 1287) 장비를 이용하여, 0.9 V에서 증착시간(15, 30, 60분)에 따라 서로 다른 두께의 PANI-EAPap을 제조하였다. PANI를 제조하기 위해서는 2개의 금속막이 필요한데 하나는 PANI가 형성될 셀룰로오스 위의 Au막과 역 금속막으로는 Pt판을 이용하였다. 위의 방법을 이용하여 30 $\times$ 10 mm<sup>2</sup> 크기의 PANI를 셀룰로오스 위에 형성하였다. PANI를 형성시키는 전해액은 일반적으로 0.25 M의 aniline 단량체와 propylene carbonate내의 0.5 M의 산화촉진제를 함유하고 있다. 전자를 생성하는데 사용되는 산으로 dichloroacetic acid (DAC)가 사용되었으며, 전해질의 산성을 유지시켜주는 역할을 한다. 이러한 전해질은 약 1~2 M정도의 DAC와 함께 공급되었다. 이렇게 함으로 용해액은 질소가스의 흐름 속에서 탈산화가 진행되므로 PANI를 금속면 위에 형성하기

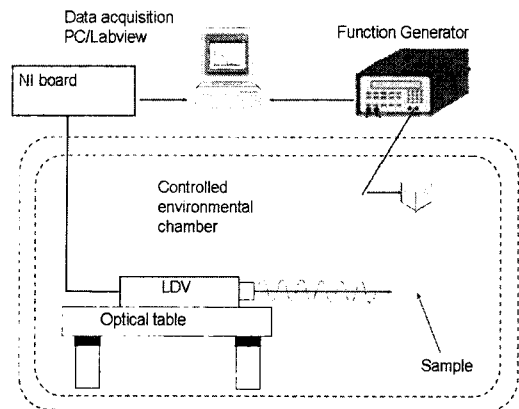


Fig. 1 Schematic diagram of bending displacement measurement system

위해서는 유기용매를 필요로 하게 된다. 그러므로 셀룰로오스를 수산기를 함유한 용액에 담가둠으로 EAPap 위에 PANI가 형성될 수 있도록 한다. 이렇게 해서 얻어진 PANI막의 두께는 일반적으로 10~80 mm 정도되며 이렇게 얻어진 PANI-EAPap은 90~100°C에서 건조시킨다. EAPap의 한 면과 양 면에 PANI를 적용 하였을 때의 효과를 알아보기 위하여, EAPap의 한쪽 면에 PANI를 증착한 이중구조(bi-layer)와 EAPap의 양면에 PANI막을 형성한 삼층구조(tri-layer)에 따른 PANI-EAPap 영향을 분석하였다.

### 2.3 변위 측정

위에서 제작된 PANI-EAPap 구조의 구동특성을 측정하기 위해, 일정한 온도 및 습도가 가능한 환경 실험장비를 사용하여 실험하였다<sup>(11)</sup>. 구동전압에 대한 변위 측정을 위하여, PANI-EAPap 샘플을 수직으로 한쪽 끝 단을 고정시켜 놓았다(Fig. 1 참조). 구동을 위한 신호를 생성하기 위해 펄스발생기(function generator)를 통해 원하는 구동신호를 PANI-EAPap에 가하도록 하였다. 구동전압은 7 V(peak to peak)가 인가되었고, 구동 주파수 영역은 0.5 Hz에서 7 Hz까지 변화하면서 실험을 진행하였다. 가해진 전기장에 의해 발생하는 변위량을 측정하기 위하여 레이저 변위 진동측정기(laser displacement vibrometer, LDV)를 사용하였고, 전압은 전류측정기(current probe, Tektronix AM503B)를 이용하여 평가하였다.

### 2.4 작동력(blocked force) 측정

액추에이터로서 PANI-EAPap의 성능을 평가하기 위해서, 발생변위에서 얻어지는 작동력으로부터 구해

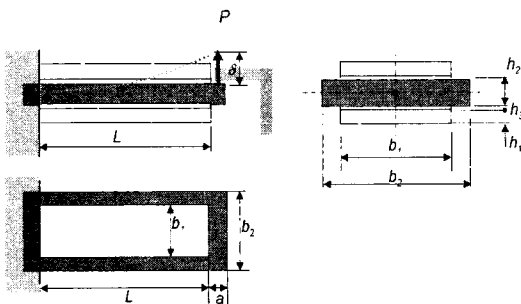


Fig. 2 Bending actuation of PANI/EAPap/PANI tri-layer structure. The geometries are used for the blocked force calculation

구해 낼 수 있다<sup>(12)</sup>. EAPap 액추에이터를 양면에 PANI필름이 코팅된 단일빔 샌드위치 구조로 가정한다면, 전기장에 의해 액추에이터는 굽힘변형을 발생시키고, 변형에너지는 Fig. 2에서 끝단에 발생하는 최대힘에 의한 일량과 같다고 가정할 수 있다. Fig. 2는 EAPap 액추에이터의 단면을 보여주고 있다. 앞에서도 거론되었지만 여기서 금속막(Au)층은 100 nm로 EAPap에 비해 충분히 얇기 때문에 강성을 계산시에 무시해도 된다. 자세한 재료특성과 제작된 액추에이터 크기에 대한 내용은 Table 1에 정리되어 있다. 만일 하중이 액추에이터의 끝단에 집중분포되어 굽힘변형이 발생했다고 가정한다면 변형( $\delta$ )과 가해진 힘( $P$ )에 의한 관계는 아래 식 (1)로 주어질 수 있다<sup>(12)</sup>.

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

여기서  $L$ 은 액추에이터의 길이 그리고  $EI$ 는 빔의 굽힘 강성(flexural rigidity)이다.  $EI$ 은 등가굽힘 강성으로 이것은 복합재료 빔의 단면법에 의해서 적용될 수 있다<sup>(13)</sup>. 변형량  $\delta$ 가 구속되면 작동력이 끝단에서 구해지게 된다. 그 힘은 식 (2)로 나타내어진다.

Table 1 Material properties and dimensions of PANI-EAPap

Material properties	layer geometries	Value
Density $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Cellulose	0.77
	PANI(ClO <sub>4</sub> )	1.23
	PANI(BF <sub>4</sub> )	1.23
Young's modulus $E$ (Gpa)	Gold	19.3
	Cellulose	9
	PANI(ClO <sub>4</sub> )	3
	PANI(BF <sub>4</sub> )	3
Thickness $t$ ( $\mu$ m)	Gold	78
	Cellulose	20
	PANI(ClO <sub>4</sub> )	28
	PANI(BF <sub>4</sub> )	10
Layer geometries (mm)	Gold	0.1
	L	30
	a	5
	b <sub>1</sub>	10
	b <sub>2</sub>	14

\* Deposited for 30 minutes

$$P = \frac{3EI\delta}{L^3} \quad (2)$$

액추에이터는 최대힘, 변형률, 응력 및 최대 일량 (work output) 그리고 최대힘 및 최대힘을 내기 위한 구동주파수 범위로 표현 될 수 있다. 여기서 최대 일량은 굽힘변형 에너지와 동일하며, 굽힘변형 에너지는 아래와 같이 주어진다.

$$U = \int_0^L \frac{M^2}{2EI} dx = \frac{(PL)^2 L}{6EI} \quad (3)$$

여기서  $M$ 은 굽힘모멘트를 의미한다. 만일 식 (3)을 전체 질량으로 나누게 된다면 단위질량당 굽힘변형 에너지를 구할 수 있다. 또한 발생하는 굽힘변형에 의한 기계적 파워(mechanical power)는 아래와 같이 표현할 수 있다<sup>(14)</sup>.

$$P_{ME} = F \cdot v = F \cdot 2\pi f\delta \quad (4)$$

여기서  $f$ 는 액추에이터의 굽힘운동 주파수이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 PANI-EAPap 물리적 특성

시간에 따른 PANI막의 두께에 대한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 증착시간에 따른 막의 두께는 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며,  $\text{ClO}_4^-$ 를 PANI에 도핑한 경우가  $\text{BF}_4^-$ 를 도핑한 경우보다, 막 두께가 높은 것을 관찰할 수 있었다. 이것은,  $\text{ClO}_4^-$  용해질에서의 전류가  $\text{BF}_4^-$ 에서보다 높게 나타나는데, 그에 따른 전자생성 과정에서 서로 다른 이온화도에 의해 기인하는 것으로 보인다.

Fig. 4는 서로 다른  $\text{ClO}_4^-$ 와  $\text{BF}_4^-$ 를 함유하고 있는 PANI막의 SEM사진을 보여주고 있다. Fig. 4의 (a)는  $\text{ClO}_4^-$ 가, (b)는  $\text{BF}_4^-$ 가 있는 PANI의 표면을 보여주고 있는데, 모두 조밀한 구조를 띠고 있음을 발견할 수 있었다. 이러한 결과는 Yonezawa<sup>(15)</sup>가 발표한 결과와 비슷한 양상을 보였다. 특히  $\text{BF}_4^-$ 가 있는 PANI의 표면은  $\text{ClO}_4^-$ 가 있는 PANI의 경우보다 조밀한 표면구조를 띠고 있는 것으로 보여진다. PANI/EAPap/PANI의 단면에 대한 SEM사진은 Fig. 5에 나타나 있다. 그림에서 보듯이 PANI층은

금속막(Au)에 완벽하게 부착되어 있는 것이 관찰되었다.

#### 3.2 PANI-EAPap 구동특성

구동특성평가를 위해서 상대습도(RH)가 95%이

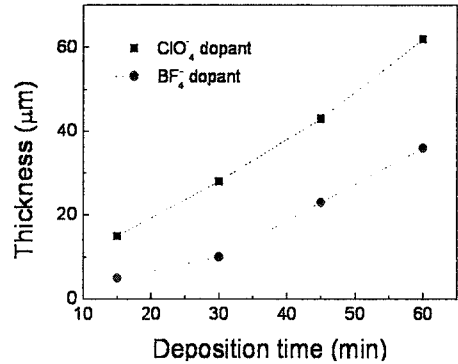


Fig. 3 Thickness changes as a function of deposition time of PANI with  $\text{ClO}_4^-$  and  $\text{BF}_4^-$  dopant

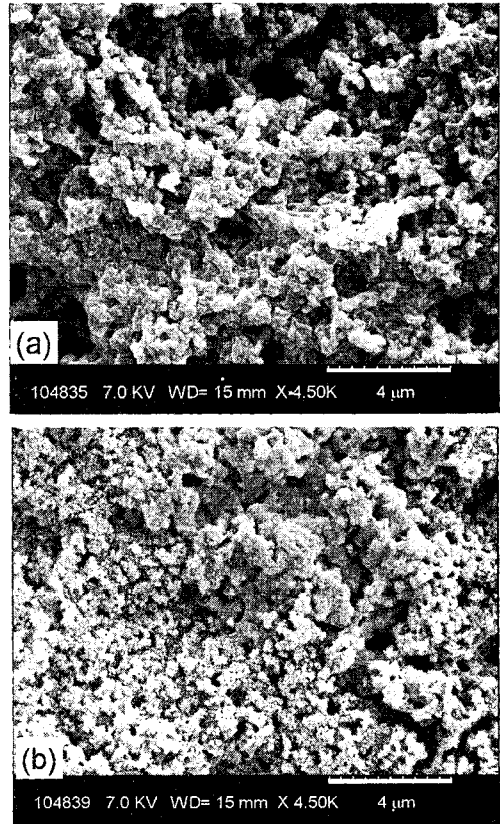


Fig. 4 SEM images of the surfaces of (a)  $\text{ClO}_4^-$  doped and (b)  $\text{BF}_4^-$  doped PANI layers

고 온도가 23°C인 조건하에서 실험을 진행하였다. 구동전압은 7 Vp-p, 구동주파수는 0.5~7 Hz가 인가되었다. ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>와 BF<sub>4</sub><sup>-</sup>를 포함하고 있는 PANI/EAPap/PANI의 변위 결과는 Fig. 6에 나타나 있다. PANI층을 30분 증착한 후 측정된 최대변위는 ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>와 BF<sub>4</sub><sup>-</sup> 각각에 대해 13.2 mm와 9.7 mm로 나타났다. 이것으로 전도성 고분자인 PANI는 증착시간이 증가할수록 이온 침투에 의거한 변형량은 증가함을 관찰할 수 있었다. PANI의 산화 환원량은 두께 방향의 양극의 움직임과 관련 있다. 그러나 PANI막의 두께가 너무 두껍게 되면 양극의 움직임이 산화환원과정이 일어나는 과정을 제한할 수도 있을 뿐만 아니라, 막 두께가 너무 증가하게 되면 액추에이터가 단단한 구조물과 같은 효과를 보이게 되므로 그에 따른 변위가 줄어드는 효과를 보이게 된

다. 그러므로 여기서 액추에이터는 최대효과를 낼 수 있는 최적두께가 필요함을 알 수 있다. 구동특성에 있어서, ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>가 함유된 PANI는 BF<sub>4</sub><sup>-</sup>를 함유한 경우보다 더 좋은 결과를 보이는데, 이는 ClO<sub>4</sub><sup>-</sup> PANI의 표면에 커다란 홀들이 존재함으로 인해, 이온들이 보다 쉽게 막으로 이동하기 때문으로 보여진다. 이상적인 조건하에서 셀룰로오스 EAPap이 낼 수 있는 최대변위는 약 4.5 mm. 이므로, PANI-EAPap의 이층구조는 EAPap에 비해 그 변위가 매우 크게 증대되는 것을 발견할 수 있었다. PANI/EAPap/PANI의 삼층구조를 형성하게 되면 ClO<sub>4</sub><sup>-</sup> 또는 BF<sub>4</sub><sup>-</sup>를 포함한 PANI막에 따라 두께가 각각 76과 40 μm가 되어진다. 그러므로 EAPap양면에 있는 금속막(Au)에 가해지는 전기장세기는 같게 나타나지만, 두께 차이를 보이는 ClO<sub>4</sub><sup>-</sup> 또는 BF<sub>4</sub><sup>-</sup> PANI층을 감안한다면 각각의 전기장세기는 서로 다를 수 있다. 그러므로, 실제 구동특성을 평가하기 위해서는 각 샘플의 실제 두께를 반영한 구동을 통해 비교해야 하며, 이러한 구동특성에 대한 결과는 이 장의 마지막 부분에 출력 및 단위무게당 효율을 계산함으로 자세히 다루어질 것이다.

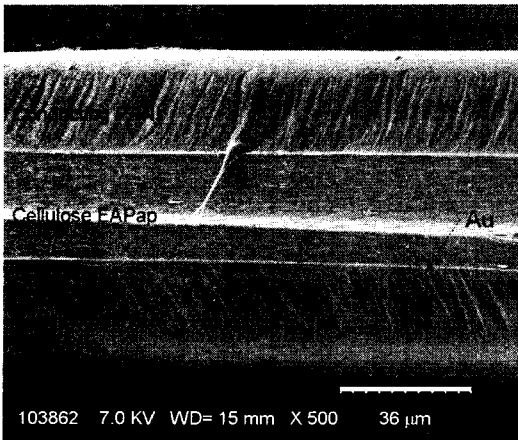


Fig. 5 Cross sectional SEM image of PANI/EAPap/PANI tri-layer

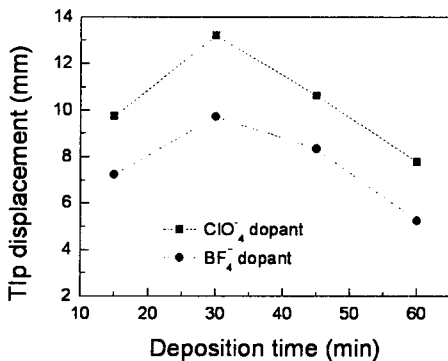


Fig. 6 Tip displacement of PANI-EAPap actuators with different dopants

### 3.3 PANI-EAPap-PANI의 구동특성

PANI-EAPap이층구조와 PANI-EAPap-PANI삼층구조의 구동특성에 대한 결과는 Fig. 7에 나타나 있다. 최대변형은 1차 공진주파수가 3 Hz에서 발생하는 것으로 관찰되었다. 특히 삼층구조의 경우 ClO<sub>4</sub><sup>-</sup> 또는 BF<sub>4</sub><sup>-</sup> PANI의 경우에서 이층구조에 비해 두께가 두꺼워짐에도 불구하고 구동특성은 최대 20~30% 정도 개선되는 것으로 나타났다.

### 3.4 구동특성에 대한 습도의 영향

셀룰로오스는 물분자를 쉽게 흡수하는 성질이 있다. 흡수된 물분자는 전기장 하에서 PANI막의 산화 환원을 돕는 역할을 하므로 습도는 구동특성에 커다란 영향을 줄 수 있다<sup>(11)</sup>. Fig. 8은 ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>를 함유한 PANI/EAPap/PANI의 상대습도에 따른 구동특성을 보여주고 있다. 60%에서 95%까지 서로 다른 상대습도 조건에서 실험이 이루어졌다. 최대변위는 95% 습도 조건에서 일어졌으며 13.2 mm의 값을 나타내었다. 그러나 PANI-EAPap 이층구조의 경우는 70%이상의 상대습도- 적어도 85% 이상에서- 최대 구

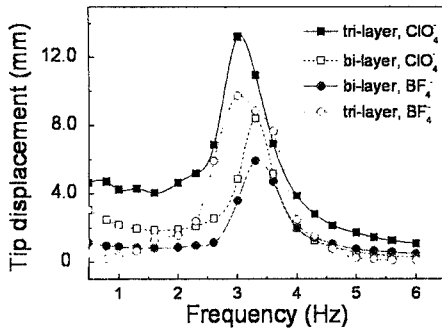


Fig. 7 Tip displacement of PANI-EAPap actuators for bi-layer and tri-layer structure

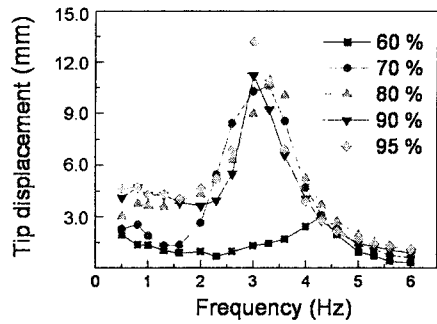


Fig. 8 Displacement performance of  $\text{ClO}_4^-$  doped PANI/EAPap/PANI tri-layer actuator under different humidity conditions

Table 2 Performance comparison of PANI-EAPap bi-layer actuators

	Bilayer ( $\text{BF}_4^-$ )	Bilayer ( $\text{ClO}_4^-$ )	Trilayer ( $\text{BF}_4^-$ )	Trilayer ( $\text{ClO}_4^-$ )	EAPap
Sample mass (mg)	11.812	18.46	16.08	29.37	7.55
Max tip-displacement (mm)	6.0	8.6	9.4	13.4	4.5
Resonance frequency (Hz)	3.0	3.0	3.0	3.0	4.0
Max. block force ( $\mu\text{N}$ )	66.7	96.0	104.4	149.6	50.0
Bending strain energy ( $\mu\text{J}$ )	0.60	1.24	1.47	3.01	0.34
Bending energy density ( $\mu\text{J}$ )	50.8	67.2	91.6	102.6	44.7
Power output density (W/kg)	0.958	1.267	1.727	1.934	1.123

동특성을 얻을 수 있었다. 그러므로 PANI를 적용한 EAPap의 경우 단일 EAPap에 비해 상대습도의 영향을 덜 받는 것으로 보인다.

### 3.5 작동력과 기계적 출력에 대한 계산

작동력은 식 (2)에 보이는 것처럼 측정된 변위로부터 계산될 수 있다. 얻어진 데이터와 식을 사용하여, 여러가지 PANI-EAPap 액추에이터에 대한 특성 값들은 Table 2에 정리하였고, 계산된 값들을 보여주고 있다. 여기서 최대 작동력은 최대 변형률에 비례함을 보여주고 있으며, 식 (3)과 (4)에 의해 굽힘 변형 에너지와 굽힘 에너지 밀도, 그리고 출력밀도를 구하면 삼층구조의 PANI-EAPap 액추에이터가

EAPap 액추에이터에 비해 두 배 이상의 우수한 성능을 보여주고 있다.  $\text{ClO}_4^-$ 를 함유한 삼층구조 PANI-EAPap의 경우 최대 에너지 밀도가 약 0.103 J/kg으로 나타났다. 그러나 이 값은 생체근육으로 사용하기 위한 0.18~40.57 J/kg보다는 작은 값이므로 이 값을 증대하기 위한 개선이 필요하다<sup>(16)</sup>. 이층구조의 PANI-EAPap의 구동력이 EAPap에 비해 약 10% 정도 개선되었으나, 삼층구조의 경우는 1.934 W/kg으로, 약 70% 이상 개선되었다. 또한 생체근육의 경우, 필요 구동주파수는 1.9 Hz에서 173 Hz로 보고되고 있는데<sup>(16)</sup> PANI-EAPap의 구동주파수는 3 Hz로 실제 필요한 주파수의 저영역에 분포하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 삼층구조의  $\text{ClO}_4^-$ 를 함유한 PANI-EAPap 액추에이터의 경우 EAPap에 비해 우수한 성능을 보여주고 있다.

## 4. 결 론

EAPap의 구동특성을 향상하기 위해 전도성 polyaniline(PANI)-EAPap 복합재료의 굽힘변형에 대한 영향을 연구하였다. EAPap과 PANI를 이용한 이층구조 (PANI-EAPap)와 삼층구조에 대한 비교를 통해, 삼층구조(PANI-EAPap-PANI)가 더 우수한 굽힘 변형 특성이 있음을 관찰하였다. 최대의 구동특성 얻기 위해서는 PANI와 EAPap사이에 최적두께가 있다는 것을 알 수 있다.  $\text{ClO}_4^-$ 과  $\text{BF}_4^-$ 를 포함하고 있는 PANI막에 대한 구동특성에 대해서는,  $\text{ClO}_4^-$ 를 이용한 경우가 좋은 구동특성을 보이는 것으로 나타났다.  $\text{ClO}_4^-$ 를 포함한 PANI/EAPap/PANI의 경우, 최대 굽힘변형과 작동력에 대한 실험에서 13.2 mm

와 0.15 mN이 관찰되었는데 이것은 순수 EAPap에서 얻을 수 있는 값보다 약 세 배 정도 큰 값이다. 출력밀도는 EAPap에 비해 두 배 정도 큰, 1.934 W/kg 정도로 생체근육에서 요구하는 구동력 밀도를 만족시키는 값이다.

## 후 기

이 연구는 한국과학재단/교육과학기술부가 주관하는 창의연구과제 진흥사업 (EAPap Actuator)의 연구비 지원에 의한 것이며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

(1) Bar-Cohen, Y., 2001 Ed., *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential and Challenges*, SPIE press, Washington.

(2) Shahinpoor, M., Cohen, Y. B., Simpson, J. O. and Smith, J., 1998, "Ionic Polymer-metal Composites (IPMS) as Biomimetic Sensors, Actuator and Artificial Muscles Review," *Smart Mater. Struct.* Vol. 7, pp. R15~R30.

(3) Pehrline, R. E., Kornbluh, R. D. and Joseph, J., 1998, "Electrostriction of Polymer Dielectrics with Compliant Electrodes as a Means of Actuation," *Sensors & Actuators A*, Vol. 64, pp. 77~85.

(4) Zhang, Q. M., Bharti, V., Zhao, X., 1998, "Giant Electrostriction and Relaxor Ferroelectric Behavior in Electron-Irradiated Poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) copolymer," *Science*, Vol. 280, pp. 2101~2104.

(5) Calvert, P., Liu, Z., 1998, "Freedom Fabrication of Hydrogels," *Acta Materialia*, Vol. 46, pp. 2565~2571.

(6) Smela, E., Inganas, O. and Lundstrom, L., 1995, "Controlled Folding of Micrometer-size Structure," *Science*, Vol. 268, pp. 1735~1738.

(7) Kim, J., Yun, S., Ounaies, Z. and Bae, S., 2005, "Conductive Polymer Coated Electro-active

Paper (EAPap)," *Transactions of Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 1077~1083.

(8) Nigrey, P. J., MacDiarmid, A. G. and Heeger, A. J., 1979, "Electrochemistry of Polyacetylene, (CH)<sub>x</sub>: Electrochemical Doping of (CH)<sub>x</sub> Films to the Metallic State," *J. Chem. Soc. Chem. Comm.*, Vol. 14, pp. 594~595.

(9) Madden, J. D., Cush, R. A., Kanigan, T. S. and Hunter, I. W., 2000, "Fast Contracting Polypyrrole Actuators," *Synthetic Metals*, Vol. 113, pp. 185~192.

(10) Kim, J., Wang, N., Chen, Y., Lee, S.-K. and Yun, G.-Y., 2007, "Electroactive-paper Actuator Made with Cellulose/NaOH/urea and Sodium Alginate," *Cellulose*, Vol. 14, pp. 217~223.

(11) Kim, J., Song, C.-S. and Yun, S., 2006, "Cellulose Based Electro-active Papers: Performance and Environmental Effects," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 15, pp. 719~723.

(12) Kim, J., Kang, Y. and Yun, S., 2007, "Blocked Force Measurement of Electro-active Paper Actuator by Microbalance," *Sensors and Actuators A*, Vol. 133, pp. 401~406.

(13) Timoshenko, S. and Gere, J., 1972, *Mechanics of Materials*, Little Educational Publishing, New York.

(14) Yun, S., Kim, J., 2008, "Characteristics and Performance of Functionalized MWNT Blended Cellulose Electro-active Paper Actuator," *Synthetic Metals*, Vol. 158, pp. 521~526.

(15) Yonezawa, S., Nakamura, K. and Takehara, Z., 1993, "Discharge and Charge Characteristics of Polyaniline Prepared by Electropolymerization of Aniline in Nonaqueous Solvent," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 140, pp. 629~633.

(16) Bar-Cohen, Y. and Breazeal, C., 2003, *Biologically Inspired Intelligent Robots*, SPIE Press, Bellingham, p. 34.