

# 생체 모방 종이 작동기의 면내 변형에 관한 연구

## Study on In-plane Strains of Electro-Active Paper

정우철† · 김재환\* · 이선곤\*\*, 배성훈\*\*

Woochul Jung, Jaehwan Kim and Sunkon Lee and Seunghun Bae

**Key Words:** Electro-Active Paper(생체 모방 종이), In-plane Strain(동일 평면 변형률), Piezoelectricity (압전 효과), Converse Effect (전왜 효과), Orientation (방향성).

### ABSTRACT

Cellulose based Electro-Active Papers (EAPap) is very promising material due to its merits in terms of large bending deformation, low actuation voltage, ultra-lightweight, and biodegradability. These advantages make it possible to utilize applications, such as artificial muscles and achieving flapping wings, micro-insect robots, and smart wall papers. This paper investigates the in-plane strains of EAPap under electric fields, which are useful for a contractile actuator application. The preparation of EAPap samples and the in-plane strain measurement system are explained, and the test results are shown in terms of electric field frequency and the orientations of the samples. The power consumption and the strain energy of EAPap samples are discussed. Although there are still unknown facts in EAPap material, this in-plane strain may be useful for artificial muscle applications.

## 1. 서론

전기 활성 고분자(Electro-Active Polymer, EAP)는 외부의 자극에 의해 큰 변형을 내는 장점을 지니고 있어 차세대 마이크로 로봇, 오락산업 또는 초소형 비행체, 인공근육 작동기 등의 응용 분야에서 큰 주목을 받고 있다. 현재 다양한 종류의 EAP 에 대한 연구는 새로운 EAP 재료에 대한 이해와 응용을 위한 개발 분야에서 활발하게 진행되고 있다 [1-3]. 하지만, EAP 의 폭넓은 응용 가능성에도 불구하고 그 제한된 성능으로 인해 새로운 EAP 재료의 개발이 중요해지고 있다. EAP 연구에 있어서 극복해야 할 점들은 작동력 증가, 빠른 응답, 낮은 작동 신호, 그리고 내구성 등이다. 특히, 초경량의 EAP 작동기에 있어서 전력의 공급은 응용 디바이스와 연계하여 매우 중요한 문제이다.

최근 새로운 EAP 재료로 종이를 이용한 전기 활성 종이 작동기 (Electro-Active Paper, EAPap)에 관한 연구가 보고되었다 [4,5]. EAPap 은 셀룰로오스를 근간으로 하는 종이로 외부 전기장에 대해 큰 변형을 발생시킬 수 있는 장점을 지닌 EAP 의 한 분야로 주목을 받고 있다. EAPap 의 작동원리는 압전 효과와 EAPap 내에 존재하는 전기 쌍극자에 의한 이온 전이 효과의 결합으로

알려져 있다. EAPap 작동기는 종이의 양쪽에 얇은 전극을 가지고 있으며, 두께 방향의 전기장이 가해질 때, 큰 굽힘 변형이 발생한다. 0.25V/ $\mu\text{m}$  의 외부 전기장에 대해, 40mm 길이의 샘플에 대해 최대 끝 단 변위는 4.3mm 가 발생하였으며, 가진 전압이 증가할수록 변위가 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 0.25V/ $\mu\text{m}$  의 전기장은 다른 EAP 재료들보다 낮은 사용 전압에서 구동이 가능하다. 또한, EAPap 작동기 구동에 필요한 전력 소모, 10mW/cm<sup>2</sup>, 는 마이크로파(microwave)의 안정성 범위인 15mW/cm<sup>2</sup> 보다 낮은 값으로 EAPap 작동기의 마이크로파에 의한 원격 구동에 대한 가능성을 보여준다.

지금까지 EAPap 작동기에 대한 성능 평가는 굽힘 변형에 의한 끝 단 변위와 정지력에 관하여 이루어져 왔으며, 본 연구에서는 전기장, 가진 주파수, 그리고 방향성을 갖는 EAPap 의 대한 면내의 변형에 관한 실험을 수행하였고, 에너지 밀도와 소비 전력의 측정을 수행하였다. 굽힘 변형이 이온 전이 효과와 관련된 반면, 면내의 변형은 압전 효과와 관련되어 있어 EAPap 의 구동 원리를 규명하기 위해 중요하다. 또한 EAPap 의 면내에서의 수축 팽창에 관한 연구는 인공 근육 및 선형 작동기 등의 응용 분야에 도움이 될 것이다.

## 2. Electro-Active Paper (EAPap)

### 2.1 EAPap 의 구조 및 특징

EAPap 재료의 근간이 되는 셀룰로오스 화학적 구조

† 인하대학교 기계공학과 대학원

E-mail: woofe98@empal.com

Tel: (032) 874-7325, Fax : (032) 868-1716

. 인하대학교 기계공학과

\*\* 인하대학교 기계공학과 대학원

적 특성으로 인해 EAPap 는 많은 주목할만한 특성을 나타내는 것으로 알려져 있다. 셀룰로오스의 기본 구조는 D-글루코오스의  $\beta$ -1, 4 글루코시드 결합으로 이루어져 있다. 또한 각각의 단위 글루코오스 당 3 개의 수산화기를 가지고 있어 다른 분자들과 수산화 결합의 가능성을 가지고 있으며, 이러한 화학 구조는 친수성 (hydrophilicity), 화학적 안정성, 생물학적 분해성 (biodegradibility), 단일손성 (chirality), 등의 특성을 가지고 있다 [6].

실험에 사용되는 EAPap 는 수산화 나트륨 (NaOH) 을 사용한 비스코스 법 (Viscous Method) 에 의하여 만들어진다. 용해된 목화 셀룰로오스 섬유 (Cotton Cellulose fiber) 용액은 압출 과정을 통해 필름 형태로 얻어지며, 세척과 건조의 과정을 통해 20  $\mu$ m 의 두께를 갖는 투명한 필름이 된다. 이 때, 압출 과정을 통해 EAPap 은 기계적인 방향성을 가지게 된다. 또한 EAPap 은 결정영역과 비결정영역을 가지고 있으며, 제조 방법에 의해 결정영역과 비 결정영역의 비율이 달라지는데, 이 비율에 따라 EAPap 의 특성이 변화하는 것으로 알려져 있다. 그림 1 은 실험에 사용되는 EAPap 의 형상을 보여주며, 압출 방향을 0° 를 기준으로 45°, 그리고 90° 로 정의하였다. 또한 열 증착기 (Thermal Evaporation System: SHE-6D-350T) 를 이용하여 샘플 양쪽 면에 40mm x 10mm 크기의 얇은 금 전극을 증착하였다.

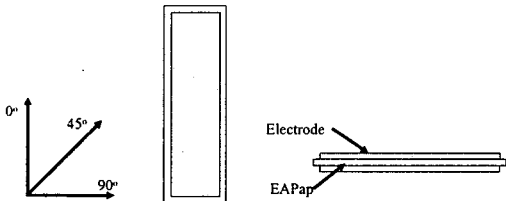


Fig. 1 Configuration of the prepared EAPap samples and definition of the orientation.

EAPap 샘플은 0°, 45°, 그리고 90° 의 방향에 대해 각각 7.1 GPa, 5.5 GPa, and 4.4 GPa 의 탄성계수를 갖는다. 또한, 각 방향에 대해 112 MPa, 92 MPa, 그리고 86 MPa 의 항복강도와 173 MPa, 140 MPa, 그리고 113 MPa 의 극한 강도를 갖는다.

## 2.2 면내의 변형률의 측정.

전기장에 대한 EAPap 의 면내의 변형률을 측정하기 위하여, 그림 2 와 같은 자동화된 측정 장비를 구성하였다. EAPap 샘플은 바닥으로부터의 진동을 제거하기 위해 광학 테이블 위에 환경 챔버 (Environmental Chamber) 안에 장치되었다.

신호 발생기 (Agilent 33220A) 에서 발생된 전기적 신호는 EAPap 의 양 쪽 면의 전극을 통해 전기장을 형성한다. 또한 면내의 변형률을 측정에서, 샘플을 수직하게 유지하게 하기 위하여 샘플 하단에 추가 장치 되었다. 이는 0.2 MPa 의 응력과  $0.2 \times 10^{-5}$  의 변형률에 해

당하는데, 이 값은 발생하는 변형률에 비해 매우 작은 값이므로 추에 의한 영향은 무시될 수 있다. 면내의 변형률을 측정하기 위해 추의 밑부분에 Fiber Optical Displacement Sensor (Angstrom Resolver Series, 101) 가 수직으로 설치되었고, 센서로부터의 변위는 Portable pulse analyzer (Brüel & Kjær, 3560B) 와 laptop 컴퓨터를 이용하여 특정 가진 시간에 대하여 얻어진다. 이 실험은 23°C 와 60-65%RH 의 온도와 습도 조건에서 수행되었다.

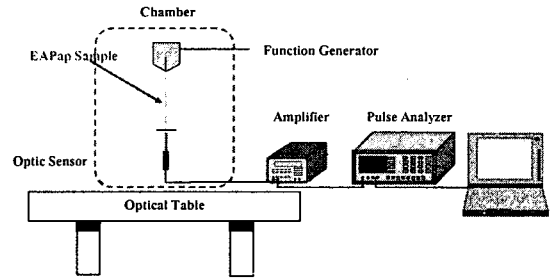


Fig.2 Test setup for in-plane strain measurement

면내의 변형률은 DC 전압 1 V (0.03 V/ $\mu$ m) 에서부터 7 V (0.35 V/ $\mu$ m) 의 전기장의 조건하에서 수행되었다. 또한 0.2 Hz, 0.5 Hz, 그리고 1.0 Hz 의 교류전압 하에서의 면내의 변형률도 구해졌다.

## 3. 성능 평가.

### 3.1 DC 전기장에 의한 변형률

그림 3 은 45° 의 방향성을 갖는 EAPap 샘플에 대하여 직류 전기장에 대해 시간에 따른 EAPap 의 면내의 변형률을 보여준다. (+) 의 변형률은 샘플의 인장을 나타내고, (-) 의 변형률은 수축을 나타낸다. 외부 전기장은 100 초간 주어진다. 3 V<sub>DC</sub> 의 전기장이 가해질 때, EAPap 샘플의 수축이 나타나고, 가진 후에 점진적으로 원래의 크기로 회복하는 것을 볼 수 있다. 또한 직류 전기장의 세기가 5 V<sub>DC</sub> 와 7 V<sub>DC</sub> 로 증가할 때, 약간의 인장을 보인 후, 전기장을 제거할 때까지 수축하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 초기의 인장은 셀룰로오스의 크리프와 관련된 것으로 여겨지며 셀룰로오스의 비결정부분과 관련되어 발생하는 것으로 추측된다. 또한 가진 동안의 열 변형에 의한 영향을 살펴보기 위해, 적외선 온도 센서 (Rayomatic 14) 를 사용하여 표면 온도를 측정하였지만, 특별한 온도 변화는 나타나지 않았다. 전기장에 대한 EAPap 의 변형의 원인에 대해서는 앞으로 많은 연구가 필요할 것이다.

직류 전기장이 제거된 후에도 잠시 동안의 수축이 발생한 후, 크리프가 다시 발생하게 된다. 계속되는 EAPap 의 수축은 셀룰로오스 내의 전하의 이동에 의해

발생되는 것으로 간주되며, 이러한 부분에서의 연구도 필요할 것이다.

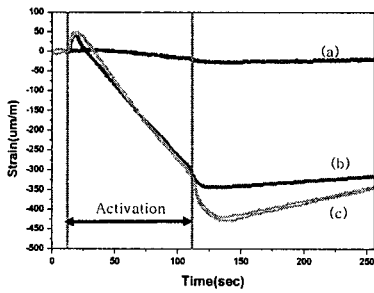


Fig.3 The deformation of in-plane strain of EAPap sample (45° orientation) under the DC electric fields: (a) 3V<sub>DC</sub> (b) 5V<sub>DC</sub> and (c) 7V<sub>DC</sub>.

그림 4는 전기장에 따른 변형률의 변형률을 보여주고 있다. 최대 변형률은 7V<sub>DC</sub>에서 430ppm을 나타내었으며, 인가 전압의 점진적 증가와 함께 변형률도 증가한다. 전기장이 제거된 후, 원래의 길이를 회복하기 위하여 약 20분 정도의 시간이 소요되었다. 그림 5는 5V<sub>DC</sub>의 전압을 9분간 가했을 때, 시간에 따른 EAPap의 변형률을 나타낸 것이다. 시간이 증가함에 따라 EAPap의 수축이 계속 진행되는 것을 알 수 있다.

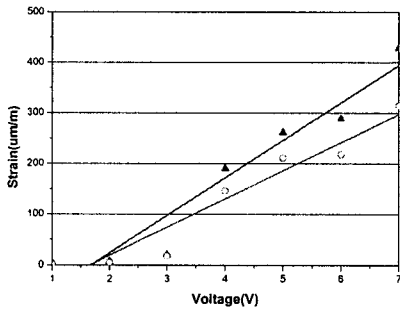


Fig. 4 In-plane strain of EAPap sample (45° orientation) under DC voltage: (A) Just after the electrical actuation was turned off, and (B) The maximum strain reached after the turn off

그림 5는 다른 방향을 갖는 EAPap에 대한 변형률을 나타낸다. 각각의 방향성을 갖는 EAPap 샘플에 대해 변형되는 양식은 가진 시간에 대해 거의 동일함을 알 수 있다. 주목할만한 결과는 45°의 방향성을 갖는 샘플은 다른 샘플에 비해 큰 변형률을 보이고 있음을 알 수 있다. 이 45°의 방향은 압전 효과와 관련이 있는 것으로 사료된다 [7]. 참고문헌 7은 모든 나무와 셀룰로오스는 섬유에 대해 45°의 방향에서 발생하는 압전 효과에 대해 설명하고 있다. 또한 주목할 만한 점은 5.5 GPa의 탄성계수를 갖는 45°방향의 샘플이 7.1 GPa의 더 높은 탄성 계수를 갖는 0°방향의 샘플보다 더 큰 변형을 보이는 것이다. 이는 EAPap의 방향성과 압전 변형은 셀룰로오스 기반의 EAPap의 압전 효과와

연관될 것으로 여겨진다.

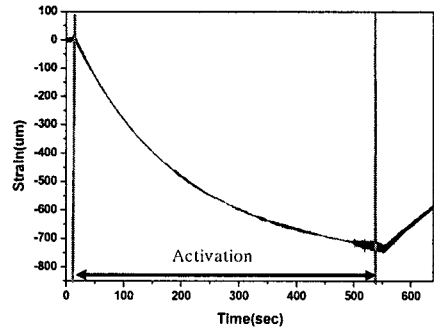


Fig.5 In-plane strain of EAPap sample (45° orientation) under DC voltage (applied during 9 minutes)

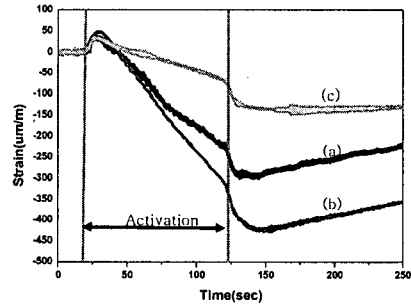


Fig. 6 In-plane strain EAPap samples with orientations: (a) 0°, (b) 45°, and (c) 90°.

### 3.2 교류 전기장에 의한 변형률

특정 전압 7V<sub>DC</sub>에 대해, 0.2 Hz, 0.5 Hz, 그리고 1.0 Hz의 교류 전기장하의 변형률을 측정하였다.

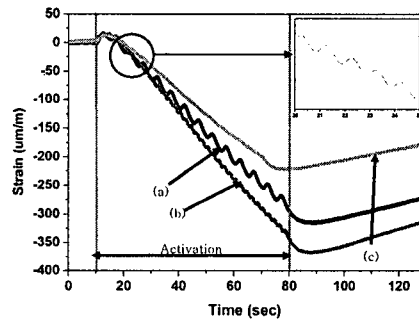


Fig. 7. In-plane strain of EAPap sample (45° orientation) with 7V AC field at different frequency: (a) 0.2 Hz, (b) 0.5 Hz, and (c) 1.0 Hz.

그림 7 은 따른 변형률을 보이고 있다. 교류 전기장이 가해질 때, 변형률은 가진 주파수와 동일한 주파수로 변화하는 것을 볼 수 있다. 최대 변형률은 0.5 Hz의 주파수에서 391 ppm 은 발생하며, 시간에 대한 변형률의 기울기는 주파수마다 다른 것을 알 수 있다. 주파수에 따른 변형률의 요동 현상은 EAPap 재료내의 쌍극자 모멘트에 의한 영향으로 간주된다.

### 3.3 에너지 밀도

에너지 밀도는 작동기로 사용되는 재료의 성능을 나타내는 인자로 매우 중요하다. 전기장이 가해질 때, 전기 에너지에 의한 일은 변형 에너지로 작동기내에 저장되며, 탄성계수와 면내의 변형률을 이용하여 얻어진다. 45°의 방향성을 같은 EAPap의 탄성계수는 약 5.5 GPa 이므로, 변형 에너지는 다음과 같다.

$$E = \frac{1}{2} \times Y \times \varepsilon^2 = \frac{1}{2} \times 5.5 \times 10^9 \times (3.4 \times 10^{-4})^2 = 318 \text{ J/m}^3$$

에너지 밀도는 EAPap의 밀도, 0.77 kg/m<sup>3</sup>를 이용하여 0.41 J/kg가 된다. 이러한 에너지 밀도는 인공 근육에 필요로 되는 에너지 밀도 범위인 0.2-40.6J/kg 안에 들어움을 알 수 있다 [1]. 다른 EAP 재료들과 비교해 볼 때, EAPap의 탄성계수는 상당히 큰 값을 가지므로 큰 힘을 내는 인공 근육으로 활용될 가능성이 있다.

### 3.4 전력 소모

EAPap의 전력 소모를 current probe (Tektronix, AM503B)를 이용하여 면내의 변형률과 동시에 측정되었다. 최대 전력은 7 V<sub>DC</sub>에서 30.1 mW 이고, 이것은 7.4 mW/cm<sup>2</sup>와 동일하다. 또한 교류에서의 전력 소모는 0.2 Hz, 0.5 Hz, 그리고 1.0 Hz 대하여, 각각 23 mW, 29 mW and, 31 mW를 보였다. 따라서 전력 소모는 8 mW/cm<sup>2</sup>보다 작으며, 이는 마이크로파를 이용한 구동이 가능함을 보여준다. 낮은 전력 소모는 또한 다양한 범위에서 사용되는 지능 피부 (smart skin), 초경량 비행체, 초소형 로봇 등의 분야에서도 적용 가능하다.

## 4. 결론

본 논문에서는 생체 모방 작동기로써 EAPap의 면내 변형률을 외부 전기장과 재료의 방향성에 대해 연구하였다. EAPap는 전기장의 세기가 증가함에 따라 변형률의 증가를 보이고, 45°의 방향성에 대하여 큰 변형률이 발생하였다. 따라서 이러한 면내의 변형률은 외부 전기장의 세기와 샘플의 방향성에 많은 영향을 받는 것을 알 수 있다. 또한, 교류 전기장에 대한 실험으로부터 면내의 변형률은 가진 주파수와 동일한 주파수를 갖는 팽창과 수축의 과정을 반복하는 것이 관측되었다. 이러한 변형률의 변동은 EAPap내의 쌍극자 모멘트와 연관된 압전 효과와 관련 있는 것으로 여겨지며, 이 부분에 대한 많은 연구가 필요하다. 또한, 0.41 J/kg 변형 에너지 밀도와 8 mW/cm<sup>2</sup>의 전력 소모는 인공 근육과 마이크로파에 의해 구동되는 작동기로서의 가능성을 보여준다. 차세대 지능재료의 하나인 EAPap는 작동기와 센서로의 활용을 위해 EAPap의 작동 원리와 응용을 위한 더 많은 연구가 필요할 것으로 여겨진다.

## 참고문헌

- (1) 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 Materials & Structures*, 7 (6), R15-R30, 1998.
- (2) P. Calvert and Z. Liu, "Free form Fabrication of Hydrogels," *Acta Materialia*, 46, 2565-2571, 1998.
- (3) A. G. MacDiarmid, J. C. Chiang, M. Halpern, W. S. Huang, S. L. Mu, N. L. Somasiri et al *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1985; 121-173.
- (4) J. Kim, Y. B. Seo, "Electro-active paper actuators," *Smart Materials & Structures*, 11, 355-360, 2002
- (5) J.Kim, C.S. Song, S. H. Bae, "Actuation performance of cellulose based electro-active papers." *SPIE's 12th Annual Symposium on Smart Structure and Materials*, Vol.5759, pp.75-81, San Diego CA, USA, March 2005.
- (6) D. Klemm, B. Heublein, H.-P. Fink, and A. Bohn, "Cellulose: Fascinating Biopolymer and Sustainable Raw Material," *Angewandte Chemie Int. Ed.*, 44, 3358-3393 (2005).
- (7) V.A Bazhenow, Piezoelectric properties of wood, Consultants Bureau, 1961.