

Electro-Active Paper 의 면내압전상수 측정

Measurement of In-plane Piezoelectric Charge Constant of Electro-Active Paper

이원섭* 윤규영** 김홍수† 김재환***

Yuanxie Li, Gyu Young Yun, Heung Soo Kim and Jaehwan Kim

Key Words : Electro-Active Paper, EAPap, Direct Piezoelectricity, Converse Piezoelectricity, Piezoelectric Charge Constant, Actuator, Sensor

ABSTRACT

In-plane piezoelectric charge constant of Electro-Active paper (EAPap) was investigated based on direct and converse piezoelectric effects. EAPap samples were made with cellulose film with very thin gold electrode coated on both sides of the film. To characterize direct piezoelectricity of EAPap, induced charge was measured when mechanical stress was applied to EAPap. In-plane piezoelectric charge constant was extracted from the relation between induced charge and applied in-plane normal stress. To investigate converse piezoelectricity, induced in-plane strain was measured when electric field was applied to EAPap. Piezoelectric charge constant was also extracted from the relation of induced in-plane strain and applied electric field. Piezoelectric charge constants obtained from direct and converse piezoelectricity are 31 pC/N and 178×10^{-12} m/V for 45 degree sample, respectively. Measured piezoelectric charge constants of EAPap provide promising potential as a piezoelectric material.

1. 서 론

셀룰로오스에 기초한 전기활성종이(Electro-Active Paper, EAPap)는 저비용, 저작동전압, 큰 작동변위, 경량성, 생체친화성, 압전 특성 등으로 인해 생체모방 응용 분야에서 매력적인 재료로서 각광을 받고 있다[1,2]. EAPap은 셀룰로오스 종이의 양쪽 면에 100 nm 두께의 얇은 금 전극을 증착해서 만드는데, 두께방향으로 전기장을 가해 주면, 큰 굽힘 변위를 발생한다. 40 mm 길이의 EAPap은 0.25 V/m의 전기장이 가해질 경우 최대 4.3 mm의 굽힘 변위를 발생하고, 이 때 소모되는 전력도 10 mW/cm^2 로 작은 편이다 [3-5]. EAPap의 작동 원리는 압전 효과와 이온 전이효과가 복합적으로 나타나는 것으로 알려져 있다 [2]. 하지만 작동기의 성능은 온도와 습도 같은 환경적인 요인에 민감하다. 그리고 작동력과 작동 주파수의 범위도 상당히 제한적이다 [3]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 전도성 고분자를 코팅한 하이브리드 EAPap이 개발되었다[6-8]. 하이브리드 EAPap은 기존의 EAPap에 비해 블럭힘과 굽힘 변위가 크게 증가하는데 특히 굽힘 변위의

경우 40 mm 길이의 샘플이 최대 9.1 mm 까지 변위를 발생시킨다. 또한 카본 나노 튜브를 첨가한 셀룰로오스를 이용하여 작동 주파수와 블럭힘을 증가시키는 연구도 진행되었다[9,10]. 카본 나노 튜브를 첨가할 경우 기존의 EAPap에 비해 강성과 전도성이 증가하고 이에 따라 EAPap의 특성이 좋아지는 현상이 관찰되었다. 이러한 EAPap은 잠자리의 날개짓 모방이나 능동 흡음재, 유연 스피커 또는 형상 제어 장치로 응용 가능하다. 특히, EAPap을 구동시키기 위한 전력 소모가 적어서 록테나 기술을 이용해 무선으로 EAPap을 작동시키는 연구도 활발하게 진행되고 있다 [11-13].

하지만 현재까지 EAPap의 작동 원리가 정량적으로 규명되지는 않았다. EAPap의 기반을 이루는 셀룰로오스는 단사정 결정구조를 가지고 있고, 압전 특성을 가지는 것으로 알려져 있다 [14]. 실제 EAPap에 인장응력을 가하면 전극 표면에 유도전하가 발생하고 그 반대로 전기장을 가하면 유도변위가 나온다. 이는 압전 재료의 직접 압전 효과와 역압전 효과의 특성과 일치한다. 이러한 압전 효과는 EAPap의 구동 원리 중 하나로 알려져 있다 [2,4]. 하지만 현재까지는 EAPap의 압전 특성이 정량적으로 규명되지는 않았다. 본 논문에서는 EAPap의 면내압전 특성을 직접 압전효과와 역압전 효과에 기초해서 연구하였다. 인장 시험 중 전극 표면에 유도되는 전하와 전기장을 가해줄 때 나타나는 면내 변위를 이용해 EAPap의 면내압전 상수를 정량화 하였다.

† 인하대학교 기계공학과

E-mail : heungsookim@inha.ac.kr

Tel : (032) 860-8256, Fax : (032) 868-1716

* 인하대학교 대학원 기계공학과

** 인하대학교 대학원 기계공학과

*** 인하대학교 기계공학과

2. 실험

2.1 EAPap 시편 준비

EAPap 는 셀룰로오스를 기반으로 하는 재료이다. 셀룰로오스는 가장 일반적인 유기 고분자로 친환경적인 특성으로 인해 많은 주목을 받고 있다. 셀룰로오스는 자연계 식물의 토대를 이루는 기본 물질로 자연계에 풍부하게 존재하고 있다. 셀룰로오스는 나무 펄프나 화학적인 합성으로부터 얻어진다. 본 연구에서는 셀룰로오스 크산틴염을 용해하여 용액을 만들고, 이를 압출하여 필름 형태로 만든 셀로판을 이용하여 EAPap을 만들었다 (Fig. 1). 이러한 셀로판은 압출 과정을 통해 기계적인 방향성을 가지게 되며, 이러한 기계적 방향성은 EAPap의 압전 효과를 확대하는 주요한 특성 중 하나이다. 시편의 크기는 길이 50 mm, 폭 12 mm, 두께 $33\mu\text{m}$ 이고, 물성방향에 따라 0° , 45° , 90° 의 세 종류로 구분을 하였다. EAPap의 전극은 진공증착기(삼한, SHE-6D-350T)를 사용하여 셀로판의 양면에 얇은 금 박막을 입혀 만들었다. 전극은 길이 40mm, 폭 10mm로 증착 하였으며 두께는 평균 100nm이다.

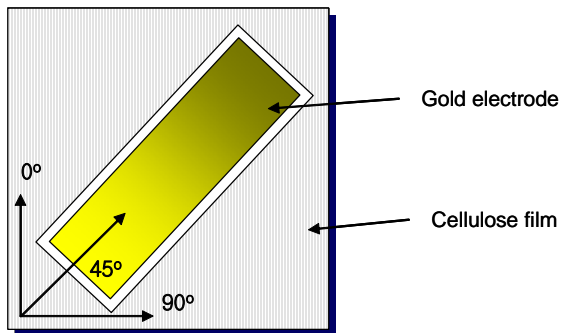


Fig. 1 Orientation of cellulose film and schematic of EAPap

2.2 직접압전 특성 평가

직접압전효과는 압전재료에 인장응력이 가해지면 재료의 표면에 전하가 유도되는 현상이다. EAPap의 직접압전 효과를 측정하기 위해 Fig. 2와 같은 실험 장치를 구성하였다. 실험장치는 인장실험기와 온도와 습도를 조절할 수 있는 환경챔버로 구성 되어있다. 인장실험기(대일시스템, DVIO-B-4545M-100t)에서는 서보모터를 이용하여 일정 속도로 시편을 당기는 동안, 로드셀(Daecell Korea, UU-K010)과 선형변위계(Sony Japan, GB-BA/SR128-015)를 이용하여 시편에 가해지는 힘과 스트레인을 측정하고, 미소전류계(Keithley, 6485 picoammeter)를 사용

하여 유도전하량을 측정 하였다. 측정값들은 LabVIEW를 이용하여 처리 하였다.

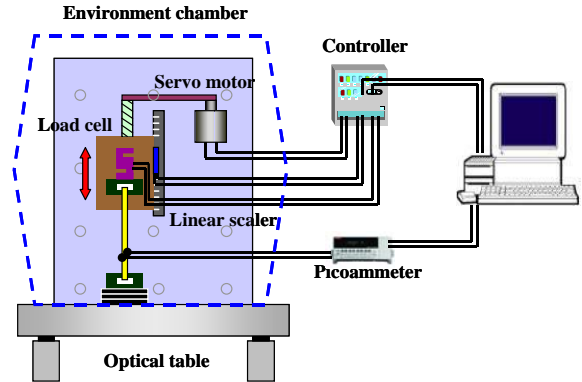


Fig. 2 Schematic of piezoelectric charge constant measurement based on direct piezoelectricity

실험은 실내 환경(24°C , 20~22%상대습도)에서 이루어 졌으며, 인장 속도에 따른 유도전하의 차이를 알아보기 위해 0.005mm/s 와 0.02mm/s 의 인장 속도로 실험 하였다. 재료의 방향성에 따른 압전 효과를 알아보기 위해 0° , 45° , 90° 의 시편에 대해서도 실험을 수행하였다.

2.3 역압전 특성 평가

역압전 효과는 압전 재료에 전기장이 가해지면 기계적인 변형이 발생하는 현상이다. 이러한 효과를 이용하여 EAPap의 면내압전 특성을 평가하기 위해 Fig. 3과 같은 실험 장치를 구성하였다.

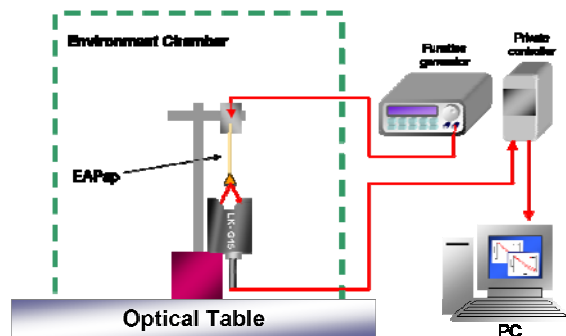


Fig. 3 Converse piezoelectricity measurement setup

EAPap 샘플은 외부 진동을 제거하기 위해 환경챔버 안에 있는 방진 테이블 위에 고정 시켰다. 함수발생기(Agilent, 33220A)를 사용하여 시편에 전기장을 가한 후 레이저 변위 센서(Keyence, LK-G15)를 사용하여 시편의 아래 끝단의 유도 변형을 측정하였다. 실험과정에서 시편변형방지와 센서의 반사판 역할을 위해 시편의

하단에 작은 추를 달았으며, 그 추가 발생하는 응력은 0.02MPa 정도로 약 1GPa 에 달하는 시편의 탄성계수를 고려할 때 측정에 크게 영향을 주지 않는 값으로 가정하였다. 실험은 실내 환경 (24℃, 20~22% 상대습도) 하에서 이루어 졌으며, 0.2Hz 의 교류 전압으로 4V(0.12V/μm) 에서 9V(0.27V/μm) 까지 1V 씩 증가시며 나타나는 유도변형량을 측정하여 면내 압전상수를 측정하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 직접압전 특성

압전 재료의 면내 압전 전하 상수는 외부에서 가해진 면내 수직응력에 따라 압전 재료의 전극 표면에 유도되는 단위 면적당 전하의 양으로 정량화 할 수 있다. 따라서 EAPap 의 면내 압전전하 상수는 다음의 관계식을 이용하여 구할 수 있다.

$$d_{31} = \left(\frac{\partial D_3}{\partial T_1} \right)_E = \frac{\text{Induced charge per unit electrode area}}{\text{Applied in-plane normal stress}} [C/N] \quad (1)$$

인장속도가 유도되는 전하에 미치는 영향을 알아보기 위해 90° 시편을 0.005mm/s와 0.02mm/s의 인장 속도 하에서 실험하였는데 그 결과는 Fig.4 에서 보여주는 바와 같다. 셀로판은 선형 탄소성재료인데 유도되는 전하를 보면 탄성과 소성의 두 개 구간으로 나누어짐을 알 수 있다. 또한 인장 속도가 작을 때 유도되는 전하가 더 많고 압전 상수가 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 느린 인장 속도가 셀로판 쌍극자의 분극화에 더 큰 영향을 미쳐서 분극 모멘트를 증가시키기 때문으로 판단된다. 0.005mm/s하에서 선형구간에서 70pC/N, 비선형구간에서 132pC/N의 압전전하 상수를 얻었다. 이 값은 작동기로 주로 사용되는 압전 세라믹의 대표재료인 PZT-5A 의 171 pC/N 와 센서로 주로 사용되는 압전 폴리머인 PVDF의 23pC/N 에 비교해 보면 중간적인 값을 가지며, 이는 EAPap이 작동기나 센서로 사용 가능함을 나타낸다.

EAPap의 물성 방향에 따른 압전 특성을 알아보기 위해 0°, 45°, 90° 의 세 개의 시편에 대해 0.005mm/s의 인장 속도 하에서 유도되는 전하량을 측정하였다. 동일한 응력 하에서 90° 시편에서 가장 많은 전하가 유도 되었고, 0° 시편에서 가장 적은 전하가 유도 되었다. 식 (1)을 이용하여 구한 선형구간과 비선형구간에서의 압전전하상수 값

을 Table.1 에 나타내었다. 선형구간에서 0°, 45° 시편의 압전전하상수는 각각 90° 시편의 27%와 44%이다. 이는 EAPap의 물성 방향이 압전상수와 밀접한 관계가 있다는 것을 알려준다.

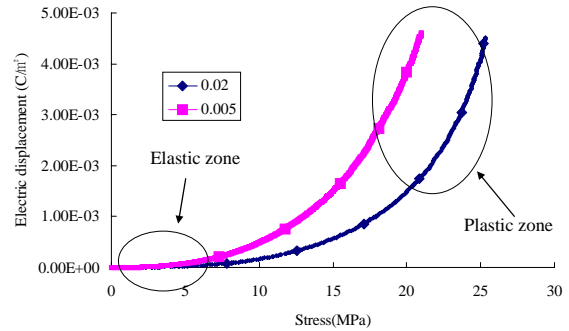


Fig. 4 Electric displacement vs. applied stress with different strain rate

Table 1. Piezoelectric charge constants of EAPap according to material orientation

Material orientation (degree)	d ₃₁ (pC/N)	
	Elastic	Plastic
0	19	34
45	31	62
90	70	132

3.2 역압전 특성

역압전 효과에 의한 EAPap 의 면내압전상수는 식 (2)와 같이 외부에서 가해진 전기장에 따라 유도되는 면내변위의 크기로 구할 수 있다.

$$d_{31} = \left(\frac{\partial S_1}{\partial E_3} \right)_T = \frac{\text{Induced in-plane strain}}{\text{Applied Voltage / thickness}} [m/V] \quad (2)$$

역압전 특성을 알아보기 위해 45°의 물성 방향을 가지는 시편에 4V에서 9V까지의 교류 전압을 가하고 이 때 나타나는 유도변위를 측정하였다. Fig. 5 에서 보는 바와 같이 전기장이 증가함에 따라 유도되는 변위가 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 식 (2)를 이용하여 면내압전상수를 구하면 178 x 10-12m/V이다. 이는 직접압전효과를 이용해서 구한 31pC/N에 비하여 5 배정도 크다. 이러한 차이는 전기장이 가해지는 동안 유도되는 변위는 역압전 효과 뿐만이 아니라 EAPap의 또 다른 구동

원리인 이온 전이 효과나 정전기 효과 와 같은 여러 가지 전기-기계적인 연성효과에 의해 나타나기 때문으로 판단된다.

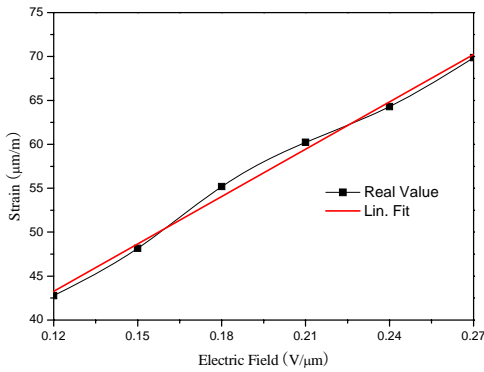


Fig. 5 Averaged induced in-plane strain vs. applied electric field

4. 결론

EAPap의 면내압전전하상수를 직접압전효과와 역압전효과를 이용해서 구하였다. EAPap는 셀로판의 양면에 얇은 금 전극을 증착시켜 만들었다. 시편은 셀로판의 물성 방향에 따라 0°, 45°, 90°의 세 종류로 구분을 하였다.

직접압전효과를 이용한 실험에서는 미소전류계를 이용하여 인장실험과정에서 유도되는 전하를 측정하였고 측정된 전하와 응력의 관계를 이용하여 면내압전전하상수를 구하였다. 역압전효과를 이용한 실험에서는 시편에 교류 전기장을 가한 후 나타나는 면내 변위를 레이저 변위계를 이용하여 측정하였고, 전기장과 유도된 변형량의 관계를 이용해서 면내압전전하상수를 구하였다. 직접압전 실험에서 유도되는 전하는 인장속도와 시편의 물성 방향에 따라 변하며 90° 시편에서 가장 큰 값을 가졌다. 선형구간에서 70 pC/N, 비선형구간에서 132 pC/N 를 얻었다. 역압전효과에서는 45° 시편에서 $178 \times 10^{-12} \text{m/V}$ 의 면내압전전하상수를 얻었는데 직접압전효과에서 얻은 31pC/N에 비하여 5 배정도 크다. 이러한 차이는 전기장이 가해지는 동안 유도되는 변위는 역압전 효과 뿐만이 아니라 이온 전이 효과나 정전기 효과와 같은 여러 가지 전기-기계적인 연성효과에 의해 나타나기 때문으로 판단된다. 본 연구를 통해서 EAPap의 면내압전전하상수는 압전세라믹과 압전폴리머의 중간 정도 값을 가지며 이는 EAPap이 작동기나 센서로서 많은 가능성을 보여줌을 확인할 수

있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부/한국과학재단의 창의적연구진흥사업(EAPAP Actuator) 지원으로 수행되었음

참고문헌

- (1) J. Kim and Y.-B. Seo, "Electro-Active Paper Actuators," *Smart Materials and Structures*, 11(3), 355-360, 2002.
- (2) J. Kim, S. Yun, "Discovery of Cellulose as a Smart Material," *Macromolecules*, 39(12), 4202-4206, 2006.
- (3) J. Kim, C. Song, S. Yun, "Cellulose based electro-active papers: performance and environmental effects," *Smart Materials and Structures*, 15, 719-723, 2006.
- (4) S. Yun, J. Kim, C. Song, "Performance of Electro-active paper actuators with thickness variation," *Sensors and Actuators A*, 133 (1), 225-230, 2007.
- (5) J. Kim, Y. Kang and S. Yun, "Force measurement of electro-active paper actuators by micro-balance," *Sensors and Actuators A*, 133(2), 401-406, 2007.
- (6) S.D. Deshpande, J. Kim and S.-R. Yun, "New Electro-active Paper Actuator using Conducting Polypyrrole: Actuation behavior in LiClO₄ acetonitrile solution," *Synthetic Metals*, 149, 53-58, 2005.
- (7) S.D. Deshpande, J. Kim and S.-R. Yun, "Studies on CP-EAPap Actuators: Effect of humidity, dopant ions and type of cellulose paper," *Smart Materials and Structures*, 14, 876-880, 2005.
- (8) J. Kim, S.D. Deshpande, S. Yun and Q. Li, "A comparative study of conductive polypyrrole and polyaniline coatings on electro-active papers," *Polymer Journal*, 38(7), 659-668, 2006.
- (9) S. Yun, J. Kim and Z. Ounaies, "Single-walled carbon nanotube / Polyaniline coated cellulose based electro-active paper (EAPap) as hybrid actuator," *Smart Materials and Structures*, 15, N61-N65, 2006.
- (10) S. Yun and J. Kim, "Multiwalled-Carbon Nanotubes and Polyaniline Coating on Electro-Active Paper for Bending Actuator," *Journal of Physics D Applied Physics*, 39, 2580-2586, 2006.
- (11) J. Kim, S.-Y. Yang, K. Song, S. Jones and S. Choi, "Performance Characterization of Flexible Dipole Rectennas for Smart Actuators," *Smart Materials and Structures*, 15, 809-815, 2006.
- (12) J. Kim, S.-H. Bae and H. Lim, "Micro transfer printing on cellulose electro-active papers," *Smart Materials and Structures*, 15, 889-892, 2006.
- (13) J. Kim, S.Y. Yang, K.D. Song, S. Jones and S.H. Choi, "Microwave power transmission using a flexible rectenna for microwave-powered aerial vehicles," *Smart Materials and Structures*, 15, 1243-1248, 2006.
- (14) V.A. Bazhenov, *Piezoelectric Properties of Wood*, Consultants Bureau, New York, 1961.