

셀룰로오스 기반 Electro-Active Paper (EAPap)를 이용한 변형률 센서 응용

Strain Sensor Application using Cellulose Electro-Active Paper (EAPap)

장상동** · 이상우 · 김주형*[†] · 김재환*

Sang-Dong Jang, Sang-Woo Lee, Joo-Hyung Kim and Jaehwan Kim

Key Words : Cellulose, Electro-active paper (EAPap), Polymer Sensor, Piezoelectricity, Electro-mechanical, Strain gauge, Bending

ABSTRACT

Cellulose based electro-active paper (EAPap) is a new smart material that has a potential to be used in biomimetic actuator and sensor. Beside of the natural abundance, cellulose EAPap is fascinating with its biodegradability, lightweight, high mechanical strength and low actuation voltage. An actuating mechanism of EAPap is revealed to be the combination of ion migration effect and piezoelectricity. EAPap can generate the electrical current and voltage when the mechanical stress applied due to its electro-mechanical characteristics. In this paper, we investigated the feasibility of EAPap as a mechanical strain sensor.

1. 서 론

셀룰로오스 (Cellulose)는 자연으로부터 얻을 수 있는 천연 고분자로 인류의 역사와 함께 오랜 기간 동안 다양한 분야에 사용되어왔다. 셀룰로오스 EAPap (electro-active Paper)는 셀룰로오스를 기반으로 한 전기 활성 고분자 (Electro-active polymer, EAP)의 일종으로 전기적인 신호에 반응하여 기계적 변형을 일으키는 천연 고분자 물질이다. 전기활성 고분자는 그 구동원리에 따라 압전 고분자(piezoelectric polymer), 이온성 고분자-금속 복합체(ionic polymer metal composite), 유전성 탄성체(dielectric elastomer), 전도성 고분자 (conductive polymer)등으로 구분된다 [1].

EAPap의 경우 그 구동원리가 명확하게 정량화되지는 않았으나 결정화구조의 셀룰로오스에서 발생하는 압전 효과와 셀룰로오스 내부에 잔존하는 이온이 외부전기장에 의한 내부이동으로 인한 변형등으로 전기적 에너지가 기계적 에너지로 변환되어 액추에이터로 사용가능함이 밝혀졌다 [2]. 재료적인 측면으로 셀룰로오스 EAPap은 생분해 능력이 있으며, 재생이 가능하고, 자연친화적일뿐만 아니라 가격이 저렴하고 쉽게 재료를 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 뿐만 아니라 셀룰로오스가 지니는 우수한 기계적 특성과 압전 성질을 이용하면 여러 종류의 센서나 액추에이터 등으로 다양한 분야에 응용이 가능하다. 오늘날 세계의 많은 연구소 및 기업에서 환

경 친화적인 고분자 재료 및 기능성 고분자를 찾고 있는데 셀룰로오스가 하나의 대안이 될 수 있다. 셀룰로오스를 바탕으로 한 연구는 새로운 기존의 섬유 및 제지분야를 넘어서 센서, 에너지, 전자분야등으로 그 연구분야를 넓혀가고 있다 [3].

현재 전도성 고분자인 폴리아닐린 (Polyaniline), 폴리피롤 (Polypyrrole)이나 PVDF와 같은 압전 고분자 등을 이용하여 QCM (quartz crystal microbalances), IDT (inter-digital transducer) 패턴을 이용한 화학적 저항계, 전계효과트랜지스터 (field-effect transistors)등의 다양한 형태의 센서를 개발하고 있다. 근래에 이러한 센서들을 이용하여 바이오 센서 및 가스 검출기 산도 측정기등 다양한 분야에 이용이 가능할 것으로 예상된다 [4].

본 논문에서는 셀룰로오스 EAPap의 센서로 이용 가능성을 알아보기 위하여 EAPap에 기계적 응력을 가하였을 때 발생하는 전기적 신호를 측정하여 그 상관관계를 파악하고 센서로서의 응용가능성을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 셀룰로오스의 특징

셀룰로오스는 지구상에서 가장 풍부하게 존재하는 고분자로 모든 식물성 고분자의 30%정도를 차지한다. 셀룰로오스의 화학구조는 D-글루코오스가 β-1, 4 결합으로 다수 중합되어 있으며 사슬형태로 연결

[†] 교신저자; 인하대학교

E-mail : joo-hyung.kim@inha.ac.kr

Tel : (032)874-7325, Fax : (032)873-7325

* 인하대학교 기계공학과

** 인하대학교 기계공학과 대학원

되어 있다. 화학식은 $(C_6H_{10}O_5)_n$ 으로, 냄새가 없는 백색 고체이며 물에 녹지 않는다. 셀룰로오스는 다당류 중에서 분자량이 가장 큰 물질로 분자량은 천연상태에서 수만~수십만에 이르는 것으로 보고되고 있다 [5].

2.2 셀룰로오스 EAPap 제조법

셀룰로오스는 현재 많이 사용되고 있는 고분자이다. 하지만 셀룰로오스는 결정화도와 분자간 수소결합력이 커서 이를 녹이기 위한 용매가 한정되어 있기 때문에 용매의 선택이 중요하다. 본 실험에서 EAPap 를 만들기 위한 사용된 셀룰로오스 용매로 DMAc (N,N-dimethyl acetamide)를 첨가제인 LiCl 를 사용하였다. 우선 잔존하는 수분을 모두 건조시키기 위해 100℃의 오븐에서 건조된 펄프에 LiCl 와 상온에서 건조한 DMAc 를 함께 교반한 다음 상온으로 식혀 진공상태로 보관한다. 섬유소가 모두 녹은 솔루션 상태의 셀룰로오스를 필름 형태로 만들기 위하여 닥터 블레이드(Doctor blade)를 이용하여 유리판 위에 솔루션을 고르게 편다. 이 과정에서 완성될 필름의 두께가 결정된다. IPA(Isopropyl alcohol)와 탈이온수 (Deionized water)를 50:50 으로 섞은 용액에 장시간 넣어 솔루션에 있는 LiCl 와 DMAc 를 제거함과 동시에 솔루션을 고형화 시킨다. 다시 탈이온수에 넣어 잔여 LiCl 와 DMAc 및 IPA 를 제거한다. 이렇게 만들어진 고형상태의 젖은 필름을 늘리기와 건조 과정을 통해서 셀룰로오스내의 분자를 늘림 방향으로 정렬해줌으로써 압전효과가 증대된 셀룰로오스 필름이 된다.

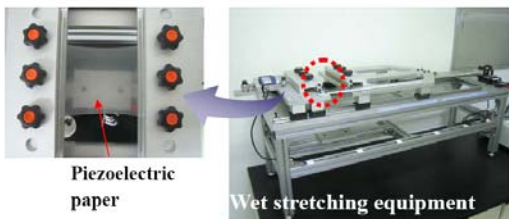
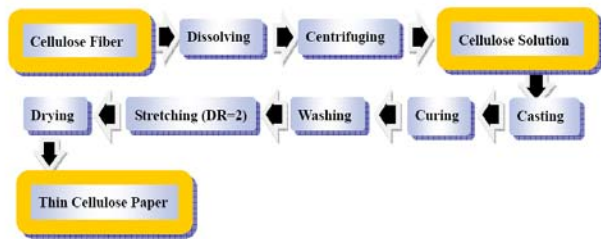


Fig. 1 EAPap Fabrication process & wet stretching equipment system

본 실험에서는 셀룰로오스 EAPap 의 압전 특성을 극대화하기 위한 늘리기 비율 (Drawing ratio)을 1.6 으로 하였으며 적외선을 이용하여 건조함으로써 셀룰로오스내의 분자 배열을 고정시켰다. Fig. 1 은 압전 특성을 가진 셀룰로오스 EAPap 을 제작하는 개략

적인 공정과 셀룰로오스 EAPap 의 특성을 극대화 하기 위한 기계적 스트레칭 공정을 보여주고 있다..

2.3 셀룰로오스 EAPap 의 전기-기계적 특성

셀룰로오스가 가지는 압전특성은 이미 1968 년 Fukada 에 의해 목재가 지나는 압전 특성에 대한 연구를 통해 학계에 보고됨으로써 알려지게 되었다. 셀룰로오스는 단사정계 결정구조 (monoclinic crystal structure)를 지님으로, 기계적인 응력에 의해 전기분극 현상이 발생하거나 외부 전기장에 의해 기계적 변형이 발생하게 된다 [6]. 셀룰로오스는 그 결정구조에 따라 셀룰로오스 I, 셀룰로오스 II 등으로 구분되며, DMAc 용매에 의해 만들어진 셀룰로오스 EAPap 은 셀룰로오스 II 로 구성되어 있음이 X 선 회절법을 통해 밝혀졌다. [7].

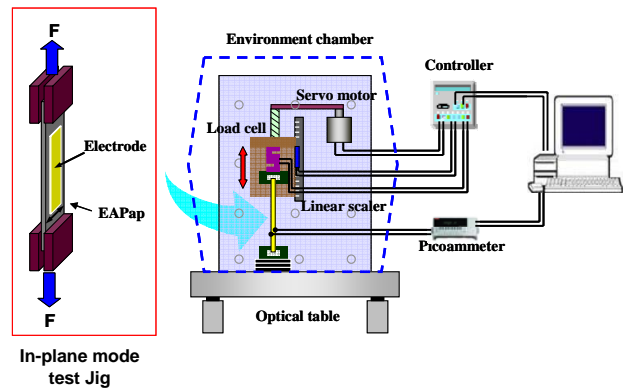


Fig. 2 Schematic of direct piezoelectric constant measurement system

Fig. 2 는 EAPap 이 지니는 전기-기계적인 특성의 평가를 위한 실험 장치의 도식이다. 서보 모터를 이용하여 시편에 기계적인 응력을 가하면 시편에서 전류가 발생하게 되는데, 이때 발생된 전류는 picoammeter (6485, Keithley)를 이용하여 측정하였다.

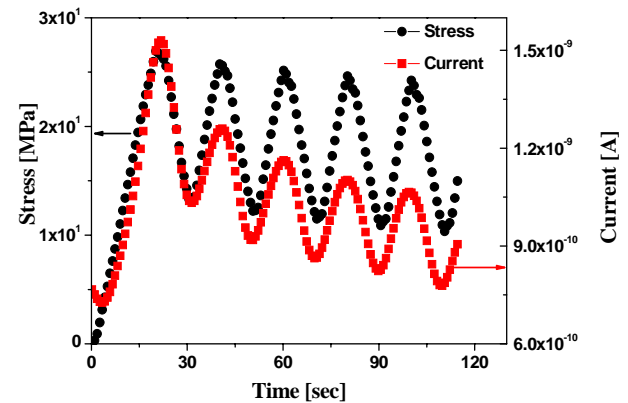


Fig. 3 Induced current of EAPap with mechanical stress with time

Fig.3 은 앞서 설명된 전기-기계적 특성평가 장비를 이용하여 측정된 셀룰로오스 EAPap 의 유발 전류 값을 나타내고 있다. 그래프를 통해 탄성구간 영역에서 반복적인 하중을 따라 전류가 증가와 감소를 반복하는 것을 관찰할 수 있었다. 하지만 초기에는 인장 하중에 비례하는 응답특성을 보여주었지만, 시간이 지남에 따라 반복 하중이 계속 되면서 EAPap 의 점탄성 특성 때문에 실제 가해진 응력 값과 유발 전류가 차이를 보이는 것을 관찰 할 수 있었다.

3. 셀룰로오스 EAPap 변형률 센서

3.1 인장 변형률 센서

인장하중에 의한 변형률의 크기를 감지하는 센서으로써의 응용 가능성을 알아보기 위하여 Fig.4 와 같은 실험을 구성하였다. 얇은 플라스틱 판 표면에 셀룰로오스 EAPap 와 상용 스트레인게이지 (strain gauge, FLA-5-11-1L, TML)를 부착한 다음 인장하중을 가하였을 때 스트레인게이지에서 발생하는 신호와 EAPap 에 발생한 전기적 신호를 측정 및 비교하였다. 본 실험에 사용된 EAPap 시편은 20 μ m 두께의 10mm \times 50mm 에 스트레칭 방향에 45 $^\circ$ 의 방향성을 가지고 있다. 그리고 플라스틱 판에 가해진 인장 속도는 1.0 μ m/sec 로 일정하게 유지하였다.

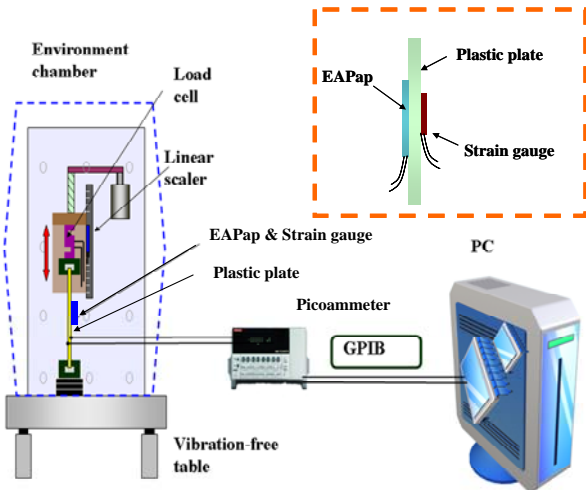


Fig. 4 Schematic of EAPap tensile strain measurement system

Fig. 5 는 스트레인게이지를 통하여 얻어진 변형률과 EAPap 에서 발생한 유발 전류를 비교한 그래프이다. 그래프에서 플라스틱 판의 경우 서보 모터가 움직인 변위와 비슷하게 선형적인 변형이 발생하였다. 하지만 EAPap 의 경우 변형에 의한 유발 전류 결과는 2 차식의 형태에 가깝게 비선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 셀룰로오스 EAPap 이 점탄성 (viscoelasticity)의 성질을 가지고 있어서 인장 시간에 따른 변형률 변화의 영향으로 보인다.

3.2 굽힘 변형률 센서

셀룰로오스 EAPap 에 굽힘 변형이 발생하면 변형률에 비례하여 전류나 전압 신호가 발생하게 된다. 이에 굽힘 변형률 센서로써 가능성을 알아보기 위한 실험을 수행하였다.

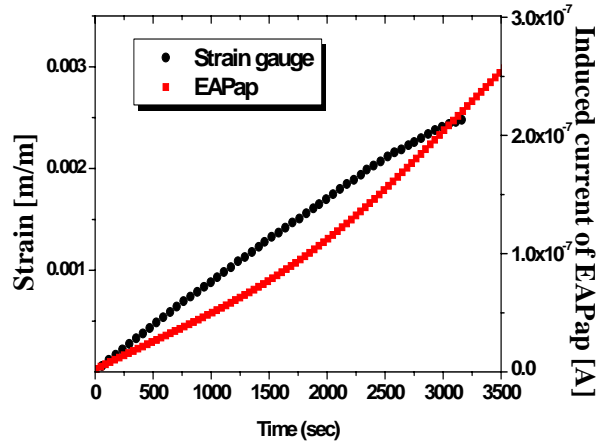


Fig. 5 Experimental result of induced current value of EAPap

Fig. 6 은 굽힘 변형률 측정을 위한 실험장비의 구성을 나타낸 것이다. 우선 25mm \times 100mm \times 500 μ m 의 얇은 알루미늄 판 표면에 EAPap 과 상용 스트레인게이지를 부착하였다. 알루미늄 판은 외팔보의 형태로 한쪽 끝 부분이 고정되어 있으며 보의 반대쪽 끝 단에 외력을 가하여 굽힘 변형을 발생시켰다. 자유 단에 외력을 가하여 구부린 다음 자유롭게 놓아두어 상하 반복적인 진동에 의한 EAPap 의 발생 전압과 스트레인게이지를 통하여 얻어진 변형률 값을 비교하여 보았다. 알루미늄 판이 상하로 진동을 하는 동안 발생하는 상용 스트레인게이지와 EAPap 의 전압 신호는 Pulse analyzer (3560-B-030, Bruel & Kjaer)로 측정하였다.

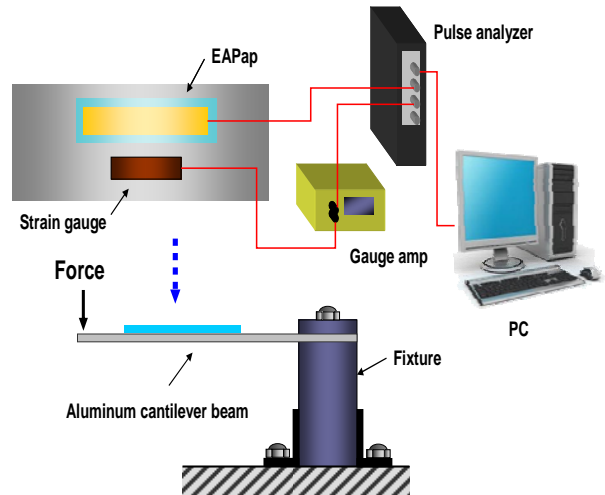


Fig. 6 Schematic of EAPap bending measurement sensor

Fig. 7은 알루미늄 외팔보의 인장 굽힘변형에 의해 발생하는 EAPap 과 스트레인게이지의 출력 전압에 대한 그래프이다. 그래프를 보면, 자유단에 굽힘 변형을 가한 후 놓았을 때 발생하는 자유진동이 약 0.2 초 부근에서 발생하는 것을 발견할 수 있다. 그래프를 통해 EAPap 이 약간의 위상차는 있지만 스트레인게이지와 비교했을 때 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 하지만 스트레인게이지는 정적인 굽힘 변형의 값도 나타내는 반면에 EAPap 은 진동구간에서만 전압이 발생하였다.

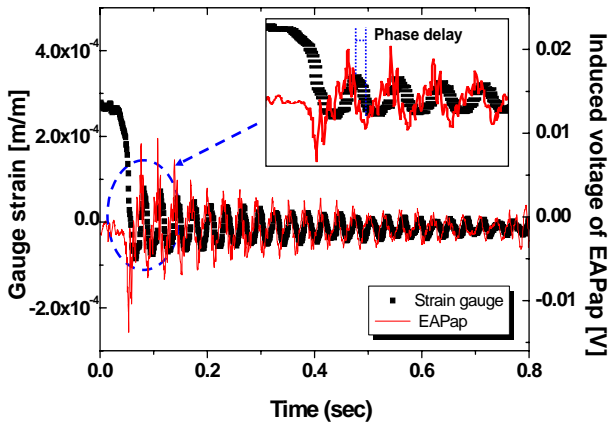


Fig. 7 Comparison between the induced voltage from EAPap and the strain signal from commercial strain gauge

굽힘 변위를 다르게 주었을 때 EAPap 에서 발생하는 전기적 신호의 변화를 알아보기 위한 실험을 수행하였다. Fig. 8 은 끝 단의 초기 굽힘 변위를 18mm, 23mm, 60mm 로 주었을 때 발생하는 자유 진동에 의해 EAPap 에서 유발되는 전압 신호의 최대 지점을 비교한 그래프이다. 그래프에서 EAPap 의 경우 스트레인게이지와 비슷하게 굽힘 변위에 선형적으로 비례한다는 결과를 얻을 수 있었다.

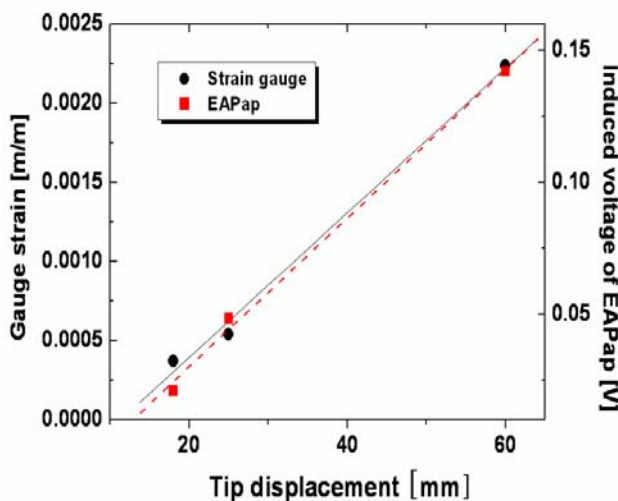


Fig. 8 Data comparison of free bending oscillation magnitude with different initial tip displacement

이를 통하여 셀룰로오스 EAPap 이 인장 변형을 센서뿐만 아니라 굽힘 변형을 센서로도 응용될 수 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 EAPap 이 가지는 전기-기계적인 특성과 우수한 기계적 강도를 이용하여 인장 변형을 및 굽힘 변형을 측정하는 센서로 응용 가능성을 실험해 보았다. 실험을 위해 셀룰로오스 필름을 직접 제작하였고, 압전 특성을 높이기 위하여 제조과정 중에 필름을 늘리는 방법을 사용하였다. 인장 변형을 및 굽힘 변형을 측정을 위해 제작된 셀룰로오스 EAPap 과 상용 스트레인게이지를 각각 플라스틱 판과 알루미늄 판에 부착하여 변형을 가하였다.

실험결과를 통해 셀룰로오스 EAPap 에 인장 응력을 천천히 가하였을 때 발생하는 유발 전류는 재료의 점탄성 성질로 인하여 비선형적으로 변하는 것을 알 수 있었다. 반면에 알루미늄 외팔보 끝 단에 일정한 변형을 가한 후 놓았을 때 발생하는 자유진동에 대한 EAPap 의 유발 전압 특성은 변형에 비례하는 결과를 얻을 수 있었다.

EAPap 을 이용한 센서로의 적용에 있어, 응답 특성에 대한 정밀한 실험과 재현성 및 내구성에 대한 실험을 통해 자연 친화적인 스트레인게이지로의 응용이 가능할 것으로 보인다.

후 기

이 연구는 한국과학재단/교육과학기술부가 주관하는 창의연구과제진흥사업(EAPap Actuator)의 연구비 지원에 의한 것으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Y. Bar-Cohen, 2001 Ed., Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential and Challenges, SPIE press, Washington.
- (2) Kim J., Yun S. and Ounaies Z., 2006, "Discovery of Cellulose as a Smart Material," *Macromolecules*, Vol. 39, pp. 4202-4206
- (3) J. Kim, C.-S. Song and S.-R. Yun, 2006, "Cellulose based electro-active papers: performance and environmental effects," *Smart Mater. Struct.* Vol. 15, pp. 719-723.
- (4) S. A. Wilson et al., 2007, "New materials for micro-scale sensors and actuators: An engineering review," *Materials Science and Engineering R* Vol. 56, pp. 1-129.
- (5) R. M. Brown, Jr. and I. M. Saxena, 2007, *Cellulose: Molecular and structural biology*, Springer, New York.
- (6) Fukada E., 1968, "Piezoelectricity as a fundamental property of wood," *Wood Science and Technology*, Vol. 2, pp. 299-307
- (7) J. Kim, N. Wang, Y. Chen, S.-K. Lee and G.-Y. Yun, 2007, "Electroactive-paper actuator made with cellulose/NaOH/urea and sodium alginate", *Cellulose*, Vol. 14, pp. 217-223