

셀룰로오스 Electro-Active Paper(EAPap)를 이용한 변형률 센서 Strain Sensor Application Using Cellulose Electro-Active Paper(EAPap)

장 상 동**·김 주 형†·김 재 환*

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

(2009년 4월 30일 접수 ; 2009년 8월 17일 심사완료)

Key Words : Cellulose(셀룰로오스), Electro-active Paper(EAPap), Flexibility(변형성), Polymer Sensor(폴리머센서), Piezoelectricity(압전성), Electro-mechanical(전기-기계적), Strain Gauge(스트레인 게이지), Bending(굽힘)

ABSTRACT

Cellulose based electro-active paper(EAPap) is considered as a new smart material which has a potential to be used for biomimetic actuators and sensors. Beside of the natural abundance, cellulose EAPap is fascinating with its biodegradability, lightweight, high mechanical strength and low actuation voltage. When the external stress is applied to EAPap, it can generate the electrical output due to its piezoelectric property. Using piezoelectric behavior of EAPap, we studied the feasibility of EAPap as mechanical strain sensor applications and compared to commercial strain sensor. By measuring the induced output voltage from the thin piezoelectric cellulose EAPap under static and dynamic force, we propose cellulose EAPap film as a potential strain sensor material.

1. 서 론

셀룰로오스(cellulose)는 자연으로부터 얻을 수 있는 천연 고분자로 인류의 역사와 함께 오랜 기간 동안 다양한 분야에 사용되어 왔다. 천연 셀룰로오스를 이용한 나노기술화, 바이오 응용 등을 위해 선진국들은 많은 투자를 하고 있으며, 셀룰로오스 자체의 친환경적인 특성과 나노기술을 이용한 분리막, 여과필터, 흡착제, 탈취제 등과 기계적 강도와 탄성을 향상시킨 고기능의 경량 복합재료로 응용연구가 활발히 진행 중에 있다⁽¹⁾. 셀룰로오스는, 재료적인 측면에서 보면, 압전성을 통한 스마트 재료로서 충분한 가능성을 보여주고 있으며 이는 다양한 종류의 센서로 적용하거나 인공근육 같은 바이오 재료

로 충분한 가능성을 가지고 있다. 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 물질로 최근 주목을 받기 시작했다. 전기활성 고분자는 그 구동원리에 따라 압전 고분자(piezoelectric polymer), 이온성 고분자-금속 복합체(ionic polymer metal composite, IPMC), 유전성 탄성체(dielectric elastomer), 전도성 고분자(conductive polymer) 등으로 구분되며 선진국을 중심으로 매우 활발한 연구가 진행 중에 있다⁽²⁾.

EAPap의 경우 그 구동원리가 명확하게 정량화되지는 않았으나 결정화구조의 셀룰로오스에서 발생하는 압전 효과와 셀룰로오스 내부에 잔존하는 이온이 외부에서 가해지는 전기장에 의한 셀룰로오스 내의 이동으로 인한 변형 등으로 전기적 에너지가 기계적 에너지로 변환되는 액추에이터로 사용 가능성이 밝혀졌다^(3,4). 재료적인 측면으로 셀룰로오스 EAPap은 생분해 능력이 있으며, 재생이 가능하

† 교신저자; 정희원, 조선대학교 전자정보대학 전자공학과
E-mail : joo-hyung.kim@chosun.ac.kr
Tel : (062)230-7063, Fax : (062)233-6896

* 인하대학교 기계공학과

** 인하대학교 대학원 기계공학과

고, 자연 친화적일 뿐만 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 환경 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, 전자분야 등으로 그 연구분야를 넓혀가고 있다⁵⁾.

현재 전도성 고분자인 폴리아닐린(polyaniline), 폴리피롤(polypyrrole)이나 PVDF(polyvinylidene fluoride)와 같은 압전 고분자 등을 이용하여 QCM(quartz crystal microbalances), IDT(inter-digital transducer) 패턴을 이용한 화학적 저항계, 전계효과트랜지스터(field-effect transistor, FET) 등의 다양한 형태의 센서 및 디바이스를 개발하고 있다. 근래에 이러한 센서들을 이용하여 바이오센서 및 가스 검출기 산도 측정기 등 다양한 분야에 이용이 가능할 것으로 예상된다⁶⁾.

이 논문에서는 셀룰로오스 EAPap의 센서로 이용 가능성을 알아보기 위하여 EAPap에 기계적 응력을 가하였을 때 발생하는 전기적 신호를 측정하여 그 상관관계를 파악하고, 외부진동에 의해 기계적 변형이 발생시에 EAPap의 응답특성을 측정하여 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 연결되어 있다. 화학식은 (C₆H₁₀O₅)_n으로, 냄새가 없는 백색 고체이며 물에 녹지 않는다. 셀룰로오스는 다당류 중에서 분자량이 가장 큰 물질로 분자량은 천연상태에서 수만~수십만에 이르는 것으로 보고되고 있다⁷⁾.

2.2 셀룰로오스 EAPap 제조법

셀룰로오스는 현재 많이 사용되고 있는 고분자이

다. 하지만 셀룰로오스는 결정화도와 분자간 수소 결합력이 커서 박막필름 형태로 제조하기 위해서는, 이를 녹이기 위한 용매가 한정되어 있기 때문에 용매의 선택이 매우 중요하다⁸⁾. 이 실험에서 EAPap를 만들기 위한 사용된 셀룰로오스 용매로 DMAc(N,N-dimethyl acetamide)를 이용하고 첨가제인 LiCl를 사용하였다. 우선 셀룰로오스 내에 잔존하는 수분을 모두 없애기 위해 100℃의 오븐에서 건조된 펄프에 LiCl와 상온에서 건조한 DMAc를 함께 교반한 다음, 상온으로 냉각 후 진공상태로 보관한다. 셀룰로오스 섬유형태가 모두 녹은 솔루션 상태의 셀룰로오스를 필름 형태로 만들기 위하여 닥터 블레이드(doctor blade)를 이용하여 유리판 위에 솔루션을 고르게 편다. 일정한 간격을 두고 닥터 블레이드를 통해 셀룰로오스를 박막형태로 제조하게 되고 이 과정에서 셀룰로오스 EAPap 필름의 두께가 결정된다. 일정한 박막 두께로 제작된 EAPap 필름을 IPA(isopropyl alcohol)와 탈이온수(de-ionized water)를 50:50으로 섞은 용액에 장시간 넣어 솔루션에 있는 LiCl와 DMAc를 제거함과 동시에 솔루션을 고형화 시킨다. 다시 탈이온수에 넣어 잔여 LiCl와 DMAc 및 IPA를 제거한다. 이렇게 만들어진 고형상태의 젖은 필름을 기계적인 스트레칭 방법과 건조 과정을 통해서 셀룰로오스내의 분자를 스트레칭 방향으로 정렬해줌으로써 압전효과가 극

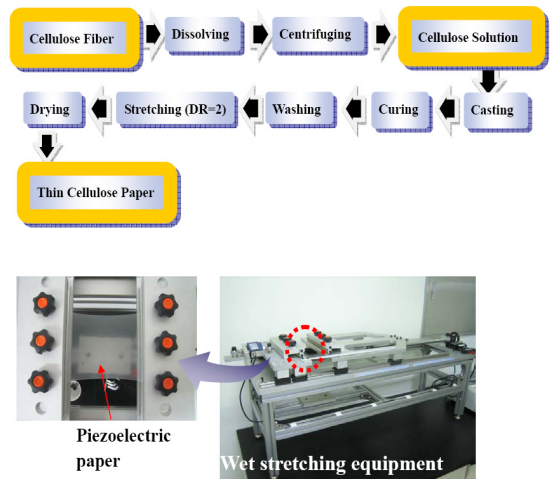


Fig. 1 Regenerating process of EAPap (top) and mechanical stretching equipment system (bottom)

대화된 셀룰로오스 필름이 재생된다. Fig. 1은 개략적인 EAPap 필름의 제조공법을 보여주고 있으며 압전성을 극대화한 필름을 얻기 위해 사용된 스트레칭 장비를 보여주고 있다.

이 실험에서는 셀룰로오스 EAPap의 압전 특성을 증가시키기 위해, 기계적 스트레칭 비율(drawing ratio)을 1.6으로 하였으며, 셀룰로오스내의 다이폴을 스트레칭 방향에 의해 일정방향으로 배열 후 스트레칭 상태에서 적외선을 조사하여 건조시켰다. 이 실험에서 제작된 스트레칭을 통해 재생된 EAPap 필름의 두께는 약 20 μm 정도이다.

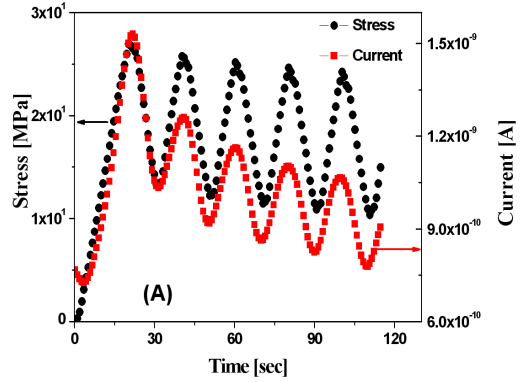
2.3 셀룰로오스 EAPap의 전기-기계적 특성

셀룰로오스가 가지는 압전특성은 이미 1968년 Fukada에 의해 목재가 지니는 압전 특성에 대한 연구를 통해 학계에 보고됨으로써 알려지게 되었다. 셀룰로오스는 기계적인 응력에 의해 전기분극 현상이 발생하거나 외부 전기장에 의해 기계적 변형이 발생하게 된다 재료적인 측면에서 단사정계 결정구조(monoclinic crystal structure)를 지니고 있으며⁽⁹⁾ 셀룰로오스는 그 결정구조에 따라 셀룰로오스 I, 셀룰로오스II 등으로 구분되며, DMAc 용매에 의해 만들어진 셀룰로오스 EAPap는 셀룰로오스 II로 구성되어 있음이 X-선 회절법을 통해 밝혀졌다⁽¹⁰⁾.

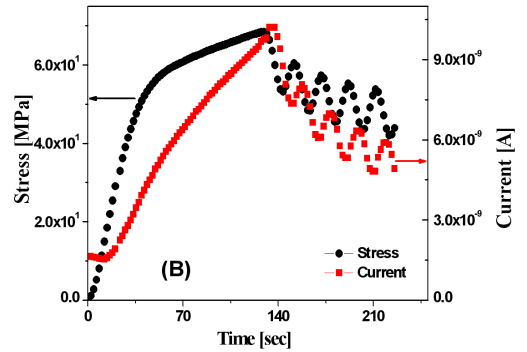
Fig. 2는 EAPap이 지니는 전기-기계적인 특성의 평가를 위한 실험 장치의 도식이다. 미세단위로 선형적 이동을 제어할 수 있는 서보모터를 사용하여 EAPap 시편에 기계적인 응력을 가하면, 시편에서 전류가 발생하게 되는데, 이때 발생한 전류는 Pico

ammeter(6485, Keithley)를 이용하여 측정하였다.

Fig. 3은 앞서 설명된 전기-기계적 특성평가 장비를 이용하여 측정된 셀룰로오스 EAPap에서 발생된 전류 값을 나타내고 있다. Fig. 3(a)는 탄성구간에서



(a) Elastic region



(b) Plastic region

Fig. 3 Mechanical and piezoelectric induced current plot of EAPap

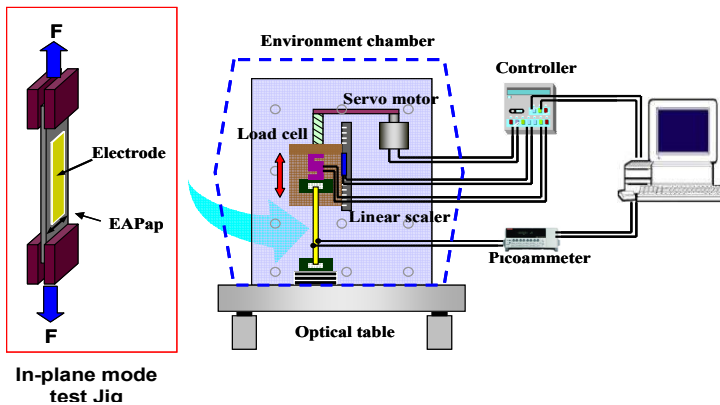


Fig. 2 Schematic of direct piezoelectric constant measurement system

반복하중을 주었을 때 응력의 거동에 대한 그래프이고, (b)는 소성구간에서 반복하중을 주었을 때의 응력거동에 대한 결과이다. 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 EAPap의 점탄성 특성 때문에 실제 가해진 응력 값과 발생한 전류가 차이를 보이는 것을 관찰할 수 있었다.

3. 셀룰로오스 EAPap 변형률 센서

3.1 인장 변형률 센서

셀룰로오스 EAPap의 기계적 하중에 의한 전기-

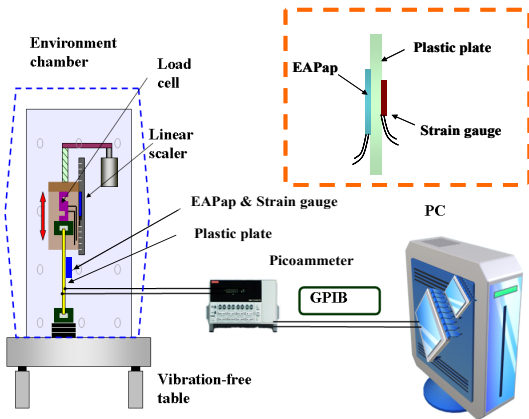


Fig. 4 Schematic of EAPap tensile strain measurement system

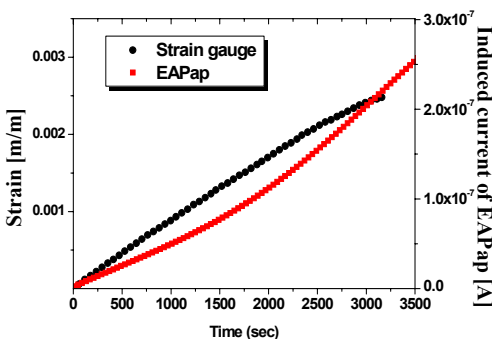


Fig. 5 Experimental results of induced current value of EAPap

기계적 특성을 바탕으로, 기계적 변형을 감지하는 센서로서의 가능성을 알아보기 위한 실험을 수행하였다

우선 인장하중에 의한 변형률 변화를 감지하는 센서로서의 응용 가능성을 알아보기 위하여 Fig. 4와 같은 실험을 구성하였다. 얇은 플라스틱 판(100 μm) 표면에 셀룰로오스 EAPap와 상용 스트레인 게이지(strain gauge, FLA-5-11-1L, TML)를 부착한 다음에 인장하중을 가하였을 때 스트레인 게이지에서 발생하는 신호와 EAPap에 발생한 전기적 신호를 측정 및 비교하였다. 이 실험에 사용된 EAPap 시편은 20 μm 두께를 가진 10 mm \times 50 mm 크기의 EAPap을 사용하였고 스트레칭 방향에 대해 45°의 방향성을 가지고 있다. 이는 45°의 방향성을 가졌을 때 EAPap이 가장 큰 압전효과를 보여주기 때문이다⁽¹¹⁾. 그리고 플라스틱 판에 가해진 인장 속도는 1.0 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 로 일정하게 유지하였다.

Fig. 5는 상용 스트레인 게이지를 통하여 얻어진 변형률과 EAPap에서 유도된 압전전류를 비교한 그래프이다. 그래프에서 플라스틱 판의 경우 서보 모터가 움직인 변위와 비슷하게 선형적인 변형이 발생하였다. 그러나 EAPap의 경우 변형에 의한 압전 전류 결과는 2차식의 형태에 가깝게 비선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 셀룰로오스 EAPap이 점탄성(viscoelasticity)의 성질을 가지고 있어서 장시간 인장하중을 가함에 따라, 셀룰로오스 재료내의 크리프(creep) 현상이 발생하여 시간에 의한 변형률 변화가 발생하였기 때문으로 여겨진다

3.2 굽힘 변형률 센서

셀룰로오스 EAPap에 굽힘 변형이 발생하면 변형률에 비례하여 전류나 전압 신호가 발생하게 된다. 이에 굽힘 변형률 센서로서의 가능성을 알아보기 위한 실험을 수행하였다.

Fig. 6은 굽힘 변형률 측정을 위한 실험장비의 구성을 나타낸 것이다. 우선 25 mm \times 100 mm \times 0.5 mm의 얇은 알루미늄 판 표면에 EAPap과 상용 스트레인 게이지를 부착하였다. 알루미늄 판은 외팔보의 형태로 한쪽 끝 부분이 고정되어 있으며 보의 반대쪽 끝단에 외력을 가하여 굽힘 변형을 발생시켰다. 자유단에 외력을 가하여 구부린 다음 자유롭게 놓아두어 상하 반복적인 진동에 의한 EAPap의

발생 전압과 스트레인 게이지를 통하여 얻어진 변형률 값을 비교하여 보았다. 알루미늄 판이 상하로 진동을 하는 동안 발생하는 상용 스트레인 게이지와 EAPap의 전압 신호는 Pulse analyzer (3560-B-030, Bruel & Kjaer)로 측정하였다.

Fig. 7은 알루미늄 외팔보의 인장 굽힘변형에 의해 발생하는 EAPap과 스트레인 게이지의 출력 전압에 대한 그래프이다. 외팔보의 끝단에 각각 18 mm, 23 mm, 60 mm의 굽힘 변위를 가한 다음, 굽힘 변위를 제거함으로 자유 진동상태로 놓았을 때, 발생하는 보의 자유진동에 대해 EAPap에서 발생하는 전압의 변화를 측정하여, 응력변화에 따른 압전 효과의 전기적인 반응을 관찰하였다. 실험을 통하여, 초기 굽힘 변위를 순차적으로 증가시키에 따라서 EAPap에서 자유진동을 감지하여 발생하는 전압 신호의 크기는 초기 굽힘 변위에 비례하여 증가하는 것을 관찰하였다. 그러나 상용 스트레인 게이지와 비교시, EAPap이 지니는 응답특성과 차이가 발생하며 Fig. 7(a)에서 보이듯이 위상차가 발생하는 것을 확인하였다. 이는 재료자체의 특성에서 비롯한 것으로 보인다. 일반적으로 스트레인 게이지로 많이 사용되는 상용 스트레인 게이지는 금속의 저항변화에 의한 전기적 신호의 변화를 감지하는 센서이기 때문에 정적 굽힘 변형을 감지하는 반면에 EAPap은 정전용량(capacitive)을 주로 가지고 있는 센서이기 때문에 진동구간에서의 동적인 변형만을 감지하여 정전용량에 의존하는 전압신호를 발생시켰기 때문으로 보인다.

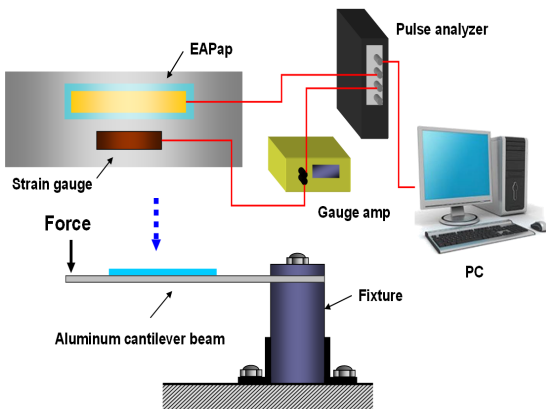
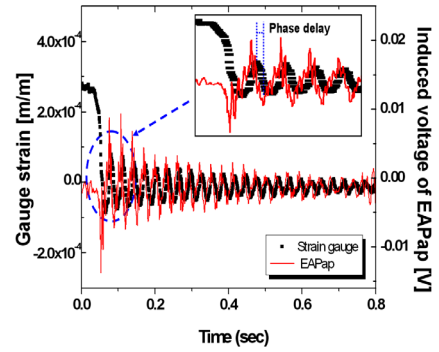
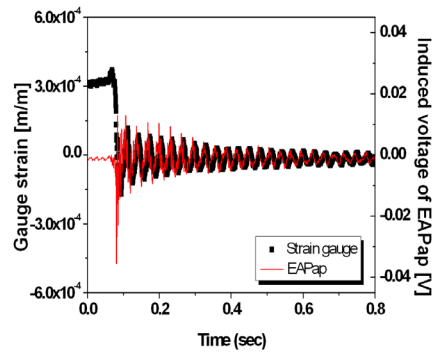


Fig. 6 Performance test setup of EAPap and commercial strain sensor under bending force

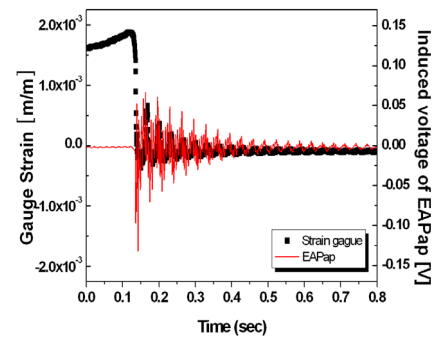
굽힘 변위를 다르게 주었을 때 EAPap에서 발생하는 전기적 신호의 변화를 알아보기 위한 실험을 수행하였다. Fig. 8은 끝단의 초기 굽힘 변위를 18 mm, 23 mm, 60 mm로 주었을 때 발생하는 자유 진동에 의해 EAPap에서 유발되는 전압 신호의 최대 지점을



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Comparison of sensor outputs from EAPap (induced voltage) and commercial strain gauge (gauge strain) under same static deflection of (a) 17 mm. Insert is the detailed plot near initial condition (b) 23 mm and (c) 60 mm

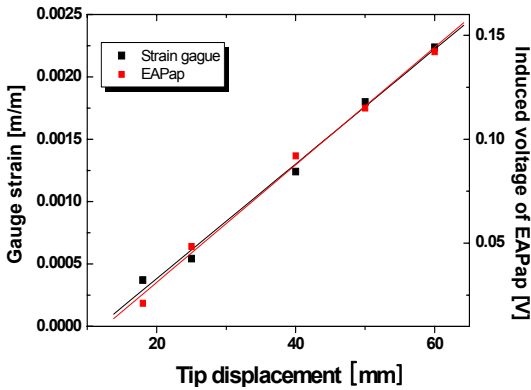


Fig. 8 Free bending oscillation measurement results of strain gage and EAPap with different initial tip displacement

비교한 그래프이다. 그래프에서 EAPap의 경우 스트레인 게이지와 비슷하게 굽힘 변위에 선형적으로 비례한다는 결과를 얻을 수 있었다.

이를 통하여 셀룰로오스 EAPap이 인장 변형률 센서뿐만 아니라 굽힘 변형률 센서로도 응용될 수 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

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

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

향후 EAPap이 지닌 동적 응답 특성에 대한 정밀한 실험 및 센서의 내구성 등에 대한 추가적인 연구를 통해 자연 친화적인 변형률 센서로 응용이 가

능할 것으로 보인다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 창의연구 과제진흥사업(EAPap Actuator) 연구비를 지원받아 진행된 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Suh, Y.-W., 2008, "Ionic Liquids-Based Processing of Cellulose," *Polymer Science and Technology*, Vol. 19, No. 3, pp. 220~227.
- (2) Bar-Cohen, Y., 2001 Ed., *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential and Challenges*, SPIE press, Washington.
- (3) Lee, M., Kim, J.-H. and Kim, J., 2008, *Surface Acoustic Wave Sensor Using Electroactive Paper(EAPap)*, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 18, No. 11, pp. 1128~1133.
- (4) Kim, J., Yun, S. and Ounaies Z., 2006, "Discovery of Cellulose as a Smart Material," *Macromolecules*, Vol. 39, pp. 4202~4206.
- (5) Kim, J., Song, C.-S. and Yun, S.-R., 2006, "Cellulose Based Electro-active Papers: Performance and Environmental Effects," *Smart Mater. Struct.* Vol. 15, pp. 719~723.
- (6) Wilson, S. A., Jourdain, R. P. J., Zhang, Q., Dorey, R. A., Bowen, C. R., Willander, M., Wahab, Q. U., Willander, M., Al-hilli, S. M., Nur, O., Quandt, E., Johansson, C., Pagounis, E., Kohl, M., Matovic, J., Samel, B., van der Wijngaar, W., Jager, E. W. H., Carlsson, D., Djinojic, Z., Wegener, M., Moldovan, C., Iosub, R., Abad, E., Wendlandt, M., Rusu, C. and Persson, K., 2007, "New Materials for Micro-scale Sensors and Actuators: An Engineering Review," *Materials Science and Engineering R*, Vol. 56, pp. 1~129.
- (7) Brown Jr., R. M., Jr. and Saxena, I. M., 2007, *Cellulose: Molecular and Structural Biology*, Springer,

New York.

(8) Heinze, T., Koschella, A., 2005, "Solvents Applied in the Field of Cellulose Chemistry - A Mini Review," *Polimeros: Ciência e Tecnologia*, Vol. 15, No. 2, pp. 84~90.

(9) Fukada, E., 1968, "Piezoelectricity as a Fundamental Property of Wood," *Wood Science and Technology*, Vol. 2, pp. 299~307.

(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, H. S., Li, Y. and Kim, J., 2008, "Electro-mechanical Behavior and Direct Piezoelectricity of Cellulose Electro-active Paper," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 147, No. 1, pp. 304~309.