

# 압전종이를 이용한 그린에너지 하베스터

## Green Energy Harvester using a Piezoelectric Regenerated Paper

고현우\*, 권연호\*, 윤규영\*\*, 김주형†, 김재환\*

Yeon-Ho Kwon, Hyun-Woo Koh, Gyu-Young Yun, Joo-Hyung Kim and Jaehwan Kim

**Key Words :** Cellulose, Electro-active paper (EAPap), Polymer Sensor, Piezoelectricity, Energy Harvester, Strain

### ABSTRACT

Due to piezoelectric property of regenerated cellulose paper, a green energy harvester using an electro-active paper (EAPap) was studied. In order to design the green energy harvester, we simulated cymbal type energy harvesting structures for single and multi-stacked layers of EAPap films. From the simulation, the optimized material orientation, thickness of harvesting structure was selected. By measuring of the induced output voltage by applying stress on energy harvester will be explained in detail. Therefore we propose the feasibility of the nature-friendly piezoelectric EAPap as a new green energy harvesting material.

## 1. 서 론

20 세기 후반부터 수많은 소형 기기가 개발되고 무선 네트워크 기술이 발전하면서 세계는 점점 언제 어디서든 누구나 정보를 쉽게 얻을 수 있는 유비쿼터스 사회로 변모하고 있다. 이런 유비쿼터스 사회를 실현하기 위해 더욱 고기능을 가지고 소형화를 통하여 기동성을 확보할 수 있는 기기들의 필요성이 증대되고 있다. 그리고 이를 뒷받침하기 위한 작은 형태로도 충분히 에너지를 공급 할 수 있는 기술의 개발이 요구되고 있다.

지금까지 이러한 에너지원으로는 대부분 충전식의 이차전지를 활용하고 있는 실정이다. 그러나 다른 소형화 에너지 재생기술이 크게 발전하는데 비하여 리튬이온전지 등의 이차전지 성능은 약 2~3 배 증가하는데 그치고 있고, 앞으로 획기적인 성능 증대에 박차를 가하고 있다 [1].

따라서 장시간 사용 가능한 동력원이 필요한 제품들이 상용화 되는 시점인 지금 기존의 화학 연료를 대체할 새로운 형태의 에너지 하베스팅 기술 및 마이크로 동력장치(Micro-Power Generator, MPG)에 대한 요구가 크게 대두되고 있다 [2]. 이러한 시대적 요구 속에서 전세계의 많은 기업과 연구진들은 새로운 에너지 하베스팅 기술과 MPG 의 연구에 몰두하고 있으며 대체로 MEMS 를 이용한 마이크로 연료전기,

마이크로 히터, 압전 MPG 기술 등의 연구로 귀결되고 있다 [3].

이러한 기술중에 압전재료가 외부에서 가해지는 구조적 변화가 발생함에 따라 전기적 에너지를 발생하는 압전현상을 이용한 압전 MPG 기술은 근래에 많은 각광을 받고 있는 기술이다.

압전효과를 가지고 있는 압전재료는 압전세라믹과 압전 고분자 등이 있다. PZT 와 같은 압전세라믹은 실제 산업계에서 가장 많이 사용되는 압전재료로서 우수한 압전 특성을 갖고 있으며, 무연압전재료로 각광받기 시작한 (Na<sub>0.5</sub>K<sub>0.5</sub>)NbO<sub>3</sub> 경우도 우수한 성능이 있음에도 불구하고 산화물 재료가 가지는 취성으로 인해 사용에 제약을 받는다 [4]. 반면 고분자 재료의 경우 압전 특성은 세라믹에 비하여 떨어지지만 재료의 기계적 특성에 따른 이용 범위가 세라믹에 비하여 상당히 넓다 [5].

전기작동종이(EAPap)는 대표적 천연 고분자인 셀룰로오스(cellulose)을 가공하여 만든 전기 활성 고분자(EAP)의 일종이다. EAPap 는 우수한 압전효과를 가지고 있으면서도 천연 고분자인 셀룰로오스를 원료로 한 만큼 자연에서 생분해되며 재활용이 용이한 재료적 이점을 가지고 있어 친환경적이다 [6,7]. 그러므로 우리는 이 연구에서 EAPap 를 이용한 에너지 하베스터의 연구를 통하여 친환경적이고 효율적인 에너지 하베스팅 기술을 연구하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 셀룰로오스의 특징

셀룰로오스는 지구상에서 가장 많은 양을 차지하는 고분자로 식물 내부의 약 30%를 차지하고 있다. 셀

† 교신저자: 조선대학교 정보통신대학 전자공학과

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

Tel: (062)230-7063, Fax: (062)233-6896

\* 인하대학교 기계공학과

\*\* 인하대학교 기계공학과 대학원

룰로오스는 탄수화물에 속하며 탄소 44.4%, 수소 6.2% 산소 49.4%로 구성된 다당류 (polysaccharide)이며 다당류 글루코스로 구성된 선형 고분자로, 중합도는 최고 1000 여 개에 달하고 화학식은  $(C_6H_{10}O_5)_n$ 이다. 셀룰로오스는 사슬 사이에 강한 수소 결합이 작용하여 결정성을 가지고 있다 [7]. 이런 점은 셀룰로오스가 압전성을 가지는 요인 중 하나로 짐작된다. Fig. 1은 셀룰로오스의 화학적 구조를 보여주고 있다.

셀룰로오스는 수소결합에 의한 사슬간 결합력이 있으므로, 이를 용해할 만한 용매를 통해 압전성이 우수한 셀룰로오스를 재생하였다. 본 실험에서는 셀룰로오스를 녹일 용매로 DMAc (N, N-dimethyl acetamide)와 첨가제인 LiCl을 사용하였다. 우선 안에 남아있는 잔존 수분을 제거하기 위하여 100°C 오븐에서 건조한 펄프에 LiCl과 상온에서 건조한 DMAc를 함께 교반한 다음 상온에서 식혀 진공상태로 보관한다. 섬유소가 완전히 녹은 솔루션 상태의 재료를 닥터 블레이드(doctor blade)를 통하여 유리판 위에 고르게 편다. 이 과정에서 필름이 두께가 결정된다. IPA와 탈이온수를 5:5로 섞은 용액에 장시간 넣어 LiCl과 DMAc 제거와 동시에 솔루션을 고형화한다. 다시 탈이온수에 넣어 LiCl과 DMAc 및 IPA 제거한다. 이렇게 만들어진 셀룰로오스를 늘이기와 건조과정을 통하여 늘린 방향으로 분자를 배열하여 압전 특성을 증대시킨다 [8].

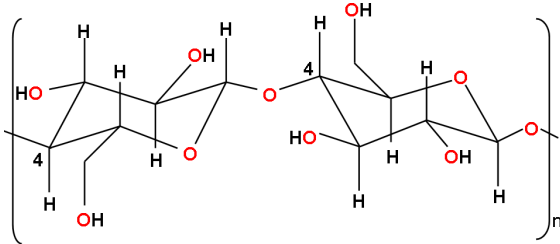


Fig.1 Chemical structure of cellulose

셀룰로오스는 단사정계 결정구조를 가짐에 따라 기계적 응력에 의한 전기 분극 현상을 발생하거나 외부 전기장에 의하여 기계적 변형을 일으키는 압전 특성을 갖는다. 그리고 압전특성의 크기 사슬의 배열 방향에 영향을 받으며 일반적으로 힘의 방향과 배열 방향이 45°일 때 가장에서 가장 큰 압전 특성을 보인다. 이는 45°에서 전단 응력이 최대가 되기 때문이다.

Fig. 2는 압전 셀룰로오스 EAPap이 가진 전기-기계적 특성을 확인하기 위한 실험장치의 도식이다. 사용된 시편에는 evaporating 기법에 의하여 양면에 얇은 금막을 입혀 전극으로 사용하였으며, 각 전극의 크기는 10×40 mm<sup>2</sup>로 하였다. 실험은 서보 모터를 사용하여 기계적인 인장을 주고 그에 따라 발생하는 전류값을 측정하여  $d_{31}$  (piezo strain constant)를 계산하였다.

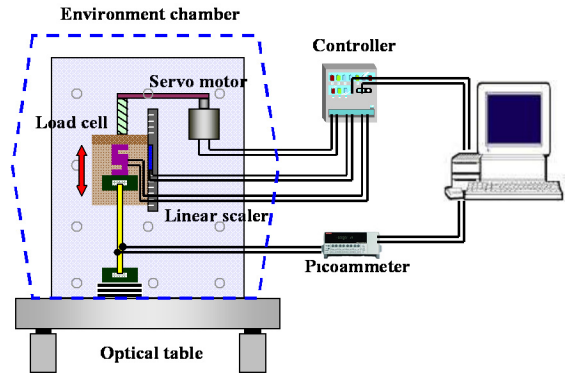


Fig.2 schematic of direct piezoelectric constant measurement system

Fig. 3는 본 실험에서 기계-전기적 특성평가 장치를 통하여 배열 방향에 따른  $d_{31}$  값과 E(Young's modulus)의 변화를 나타낸다. 이 값은 기준에 측정된 값보다 상대적으로 적게 나타났는데[8] 이는 샘플의 두께 차이와 재료의 각도의 차이에서 기인하는 것으로 보인다.

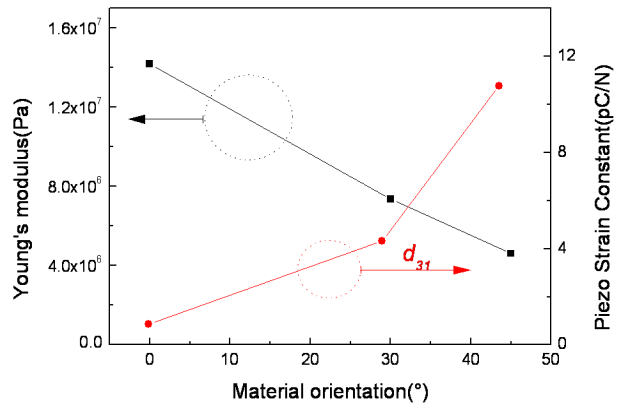


Fig. 3 Young's modulus and piezoelectric constant of EAPap as a function of material orientation.

## 2.2 Simulation for Piezoelectric Energy harvester

압전종이를 이용한 에너지 하베스팅을 진행하기에 앞서 구조용 해석 툴인 Ansys program<sup>®</sup>을 이용하여 Cymbal 타입의 에너지 하베스터의 두께 및 각도에 따른 압전종이 EAPap의 변형해석을 통한 최적 설계점을 찾고자 하였다.

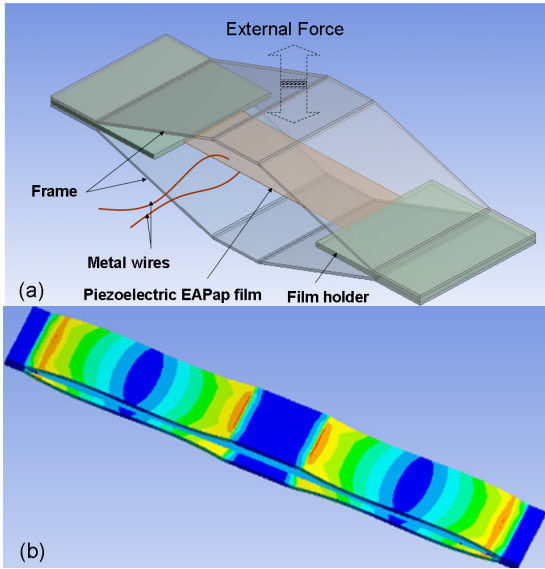


Fig. 4 Cymbal type energy harvester (a) before external force applied on the structure (b) after applied force

Fig. 4는 Ansys 프로그램을 통해 Cymbal 형태의 에너지하베스터의 외부힘에 의한 구조적변화를 보여주고 있다. 구조해석을 통해 Al 재료의 경우 두께가 일정두께 이상이 필요하게 되어 본 실험에서 사용된 구조물 재료는 Stainless steel 로 선정하였으며, 압전종이의 물성치는 압전상수가 최대로 나오는 45°조건에서 얻은 평균값을 이용하였다.

Fig.5는 Cymbal 구조물의 각도 변화에 따른 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 구조물의 굽힘각도  $\theta$  가 커질수록 EAPap 에 가해지는 strain 은 작아지는 것을 알 수 있다. 그러나 구조물이 견딜 수 있는 하중에는 큰 변화가 없었다. 따라서 각도가 작을수록 더 많은 더 많은 에너지를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그러나 지나치게 작을 경우 구조물이 시편에 닿을 경우가 생길 수 있으므로 20°로 하여 구조물을 설계하였다.

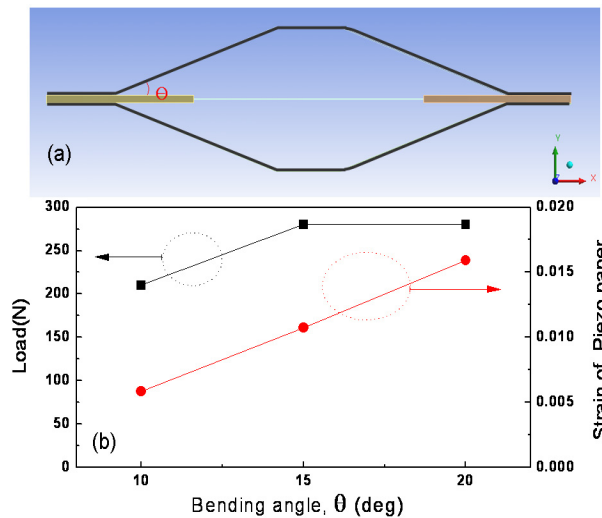


Fig. 5 (a) Side view of cymbal type EAPap energy harvester (b) The obtained strain of piezoelectric EAPap as a function of bending angle of cymbal structure

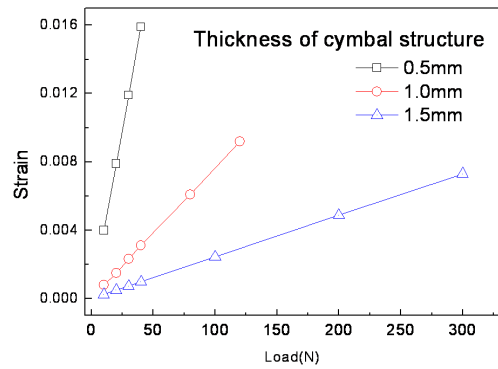


Fig. 6 The simulation result of strain of piezoelectric EAPap as a function of applied load under different thickness

구조물의 두께를 0.3mm 에서 1.5mm 까지 증가시켜 구조물의 파괴한도 내에서 압전종이에 발생하는 strain 을 해석하였다. 이때 구조물의 각도는 20°로 고정하였다. Fig. 6 은 시뮬레이션을 통해 얻은 결과를 보여주고 있다. 하중이 증가함에 따라 압전종이의 strain 이 선형적으로 증가함을 볼 수 있으며, 두께가 감소할수록 하중에 대한 반응 민감도가 커지는 것을 알 수 있었다.

### 2.3 Energy harvesting test

앞서 시뮬레이션을 통해 얻은 내용과 실제 장치에서 얻어지는 결과를 확인하기 위하여 Fig. 7 과 같은 실험 장치를 구성하여 실험을 진행하였으며 EAPap 의 전극은 60×20mm<sup>2</sup>로 하였다.

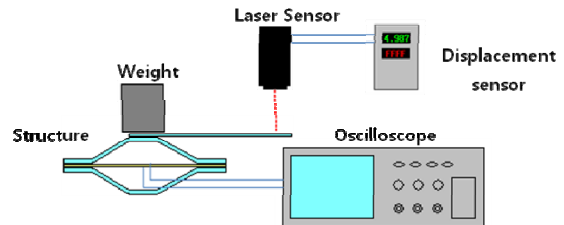


Fig. 7 Schematic of energy harvester using a piezoelectric EAPap film

Fig. 8 은 인가된 하중에 따른 구조물 상부 판면의 이동 거리변화 그래프로 하중이 증가함에 따라 이동 거리가 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이것은 구조물이 아직 Elastic 영역 안에 있음을 보여준다. 그러므로 반복적인 하중내에서 압전 EAPap 은 유도전압을 재생해 낼 수 있음을 확인하였다. Stress-strain curve 에서 찾은 Stress 값과 Strain 과 Young's Modulus 를 바탕으로 추정된 Stress 값에 있어 하중이 30N 을 넘어서면 소성구간으로, 30N 분 실험에서 에너지 하베스팅에 가장 좋은 조건으로 확인되었다. 그러나 이는 이는 시뮬레이션 결과와 다소 차이를 보이는 값으로 Fig. 9 에서 볼 수 있듯이 Strain 에 있어서 약 40%의 오차를 보였다. 이러한 오차는 실제 시뮬레이션 과정의 경우 EAPap 의 결정 구조 및 분자 사슬

배열에 따른 재료의 이방성과 Polymer 가 가지는 역학적 성질을 고려하지 않았으므로 발생한 것으로 보인다.

Fig. 10 은 압전중이 EAPap 에서 하중에 따라 발생하는 최대전압을 보여주는 그래프이다. 전압은 하중이 증가할수록 선형적으로 증가하지만, 본 실험에서 30N 이상의 하중이 가해질 경우 EAPap 이 소성구간에 접어들게 된다. 따라서 최적 하중은 약 30N 이고 이때 발생하는 최대 전압은 약 4.0mV 로 확인되었다.

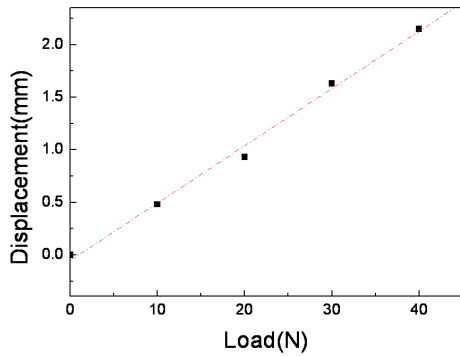


Fig. 8 Induced deflections of cymbal energy harvester under different load

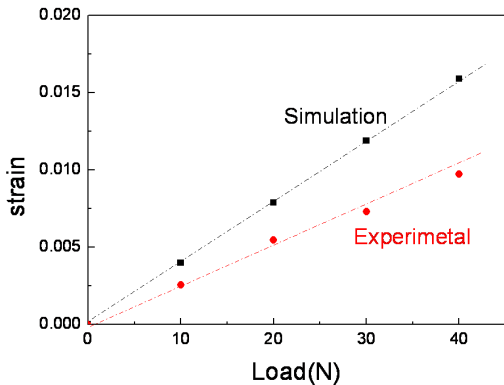


Fig. 9 Comparison of strain obtained from simulation and experiment

### 3. 결 론

친환경 소재인 EAPap 를 활용하여 친환경 에너지 하베스터로서 활용가능성에 대한 연구를 진행하였다. 이를 위하여 Ansys Program 을 통하여 다한 형태의 Cymbal Type Energy Harvester 를 시뮬레이션 하였으며 구조물의 각도가 작아질수록 더욱 좋은 효율을 발휘함을 알 수 있었다. 또한 구조물의 두께에서도 그 결과 Stainless Steel 을 재료로 할 경우 0.5mm 에서 굽힘각도가 20°인 경우 최적의 결과를 보였다. 20N 의 하중을 가할 경우 Strain 이 0.0079 로 항복점 내에서 가장 좋은 효율을 보였다. 실제 실험에서는 재료의 구조적 성질에 의하여 다소 오차를 보여 30N 에서 가장 큰 효율을 보였으며 이때 4mV 의 전압이 발생

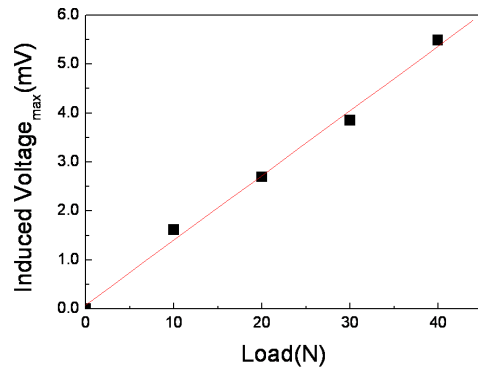


Fig.10 Induced voltage from the cymbal type EAPap energy harvester

하였다. 앞으로 압전성을 극대화하여 높은 유도전압을 얻는 것에 대한 연구가 필요하며, 본 실험을 통하여서 압전중이 EAPap 이 에너지 하베스터로 사용가능함을 확인할 수 있었다.

### 후 기

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

### 참 고 문 헌

- (1) Taberna, P. L., Mitra, S., Poizot, P., Simon, P. and Tarascon, J.-M., 2006, "High rate capabilities Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-based Cu nano-architected electrodes for lithium-ion battery applications", Nature Materials Vol. 5, pp. 567-573.
- (2) Mitcheson, P. D., Green, T. C., Yeatman, E. M., Holmes, A. S., 2004, "Architectures for vibration-driven micropower generators", J. of Microelectromechanical System Vol. 13, pp. 429-440.
- (3) Jeon, Y. B., Sood, R., Jeong, J.-H., and Kim, S.-G., 2005, "MEMS power generator with transverse mode thin film PZT", Sensors and Actuators A: Physics Vol. 122, pp. 16-22.
- (4) Takenaka, T., Nagata, H., 2005, "Current status and prospects of lead-free piezoelectric ceramics", J. of European Ceramic Society Vol. 25, pp. 2693-2700.
- (5) Granstrom, J., Feenstra, J., Sodano, H. A., Farinholt, K., 2007, "Energy harvesting from a backpack instrumented with piezoelectric shoulder straps", Smart Mater. Struct. 16 Vol. 16, pp. 1810-1820.
- (6) Kim, J., Yun, S., Lee, S.-K., 2007, "Cellulose Smart Material: Possibility and Challenges", Vol. 19, pp. 417-422.
- (7) Lee, M., Kim, J.-H., Kim, J., 2008, "Surface acoustic wave sensor using electroactive paper(EAPap)", J. of KSNVE, Vol. 18, pp.1128-1133
- (8) Krässig, H. A., 1996, "Cellulose Structure, Accessibility and Reactivity", Gordon and Breach Sci. Publisher, Amsterdam.
- (9) Kim, J.-H., Yun, K.-J., Kim, J.-H., Kim, J., 2009, "Mechanical stretching effect on the actuator performance of cellulose electroactive paper", Smart Mater. Struct. Vol. 18, pp. 055005.