

# 압전종이의 원리 및 녹색에너지 응용 Piezoelectric Paper: Its Principle and Possible Application for Green Energy

\*#김재환, 장상동, 양상열, 윤규영, 김주형

\*#Jaehwan Kim(jaehwan@inha.ac.kr), Sang Dong Jang, Sang Yeol Yang, Gyu Young Yun, Joo-Hyung Kim

<sup>1</sup> 인하대학교 기계공학과 EAPap Actuator 연구단

Key words : 압전종이, 셀룰로오스, 초소형 전력생산, 녹색에너지, 무선전력송신

## 1. 서론

셀룰로오스는 자연으로부터 얻을 수 있는 천연 고분자로 인류의 역사와 함께 오랜 기간 동안 다양한 분야에 사용되어왔다. 최근 셀룰로오스를 새로운 지능재료로 개발하는 연구가 소개되었다[1]. Electro-Active Paper(EAPap)라고 불리는 이 지능재료는 셀룰로오스에 있는 압전효과와 이온전 이 효과에 의해 전기장을 가했을 때 큰 변위가 나오고 반대로 변형을 주었을 때 전기적 신호가 나오는 특성을 지니고 있다. EAPap의 경우 그 구동원리는 결정화구조의 셀룰로오스에서 발생하는 압전효과와 셀룰로오스 내부에 잔존하는 이온이 외부전기장에 의한 내부이동으로 인한 변형 등으로 전기적 에너지가 기계적 에너지로 변환되어 작동기로 사용이 가능하다. 재료적인 측면으로 셀룰로오스 EAPap은 생분해 능력이 있으며, 재생이 가능하고, 자연친화적일 뿐만 아니라 가격이 저렴하고 쉽게 재료를 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 뿐만 아니라 셀룰로오스가 지니는 우수한 기계적 특성과 압전성질을 이용하면 여러 종류의 센서나 작동기 등으로 다양한 분야에 응용이 가능하다 [2]. 셀룰로오스의 압전성은 셀룰로오스 결정구조 및 셀룰로오스 파이버의 배열성에 기인한 것으로, 기존의 압전고분자보다 우수한 성질을 보이고 있다. 이러한 압전특성은 전기장에 대해 빠른 응답특성을 보이나 전기장에 따라 발생하는 변형이 작다. 한편, 셀룰로오스는 비결정영역에서 셀룰로오스의 수산기들이 쉽게 이온, 화학성분 또는 물 분자들과 반응을 할 수 있어서 전기장이 가해졌을 때 이러한 이온들의 움직임에 의해 변형이 발생한다. 이러한 이온전이 효과는 큰 변형을 발생시키는 반면 속도가 늦고 항상 이온과 물 분자들이 셀룰로오스 내에 있어야 하므로 내구성이 떨어진다. 셀룰로오스 EAPap에는 이러한 압전성과 이온전이효과가 같이 있는데, 압전성을 극대화 시켜서 압전종이(Piezoelectric Paper)와 이온전이효과를 극대화 시킨 이온성 EAPap(Ionic EAPap)을 분리하여 개발하는데 성공하였다.

본 논문에서는 압전종이의 원리 및 특성에 대하여 소개하고 이를 녹색에너지에 어떻게 응용할 수 있는지에 대하여 논의를 하고자 한다. 먼저, 셀룰로오스 EAPap의 제조방법을 소개하고 EAPap의 재료 특성 그리고 압전특성을 설명한다. 그리고, 본 연구를 수행하는 연구단이 갖고 있는 연구개념을 소개하고 이를 어떻게 녹색에너지 개발에 응용할 수 있는지를 소개하도록 한다.

## 2. 압전종이

### 2.1 셀룰로오스 EAPap 제조

셀룰로오스는 현재 많이 사용되고 있는 천연 고분자이다. 하지만 셀룰로오스는 결정화도와 분자간 수소 결합력이 커서 이를 녹이기 위한 용매가 한정되어 있기 때문에 용매의 선택이 중요하다 [3]. 본 실험에서 EAPap을 만들기 위한 사용된 셀룰로오스 용매로 DMAc (N,N-dimethyl acetamide)를 첨가제인 LiCl과 함께 사용하였다. 우선 잔존하는 수분을 모두 건조시키기 위해 100℃의 오븐에서 건조된 펄프에 LiCl와 상온에서 건조한 DMAc를 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. IPA(Isopropyl alcohol)와 탈이온수(Deionized water)를 섞은 용액에 장시간 넣어 셀룰로오스 용액에 있는 LiCl와 DMAc를 제거함과 동시에 셀룰로오스 용액을 고형화 시킨다. 이렇게 만들어진 고형상태의 젖은 필름을 늘리기와 건조 과정을 통해서 셀룰로오스내의 분자를 늘림 방향으로 정렬해줌으로써 압전효과가 증대된 셀룰로오스 압전종이가 된다. Fig. 1은 압전특성을 가진 셀룰로오스 EAPap을 제작하는 개략적인 공정과 셀룰로오스 EAPap의 특성을 극대화 하기 위한 기계적 스트레칭 공정을 보여주고 있다.

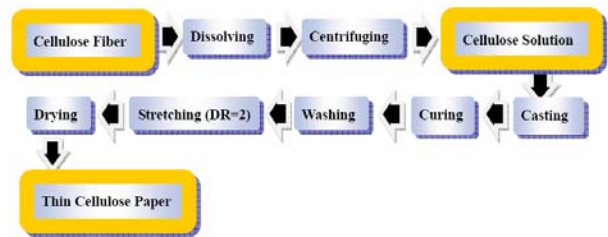


Fig. 1 EAPap Fabrication process & wet stretching equipment system

### 2.2 셀룰로오스 압전종이의 전기-기계적 특성

셀룰로오스가 가지는 압전특성은 이미 1968년 Fukada에 의해 목재가 지니는 압전특성에 대한 연구를 통해 학계에 보고됨으로써 알려지게 되었다. 셀룰로오스는 단사정계 결정구조(monoclinic crystal structure)를 지니므로, 기계적인 응력에 의해 전기분극 현상이 발생하거나 외부 전기장에 의해 기계적 변형이 발생하게 된다 [4]. 셀룰로오스는 그 결정구조에 따라 셀룰로오스 I, 셀룰로오스 II 등으로 구분되며, DMAc 용매에 의해 만들어진 셀룰로오스 EAPap은 셀룰로오스 II로 구성되어 있음이 X선 회절법을 통해 밝혀졌다. [5].

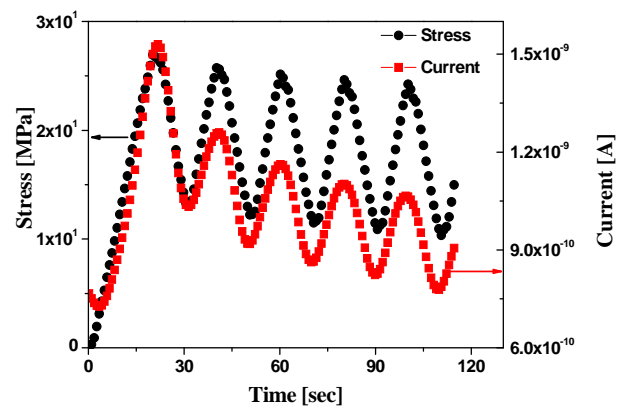


Fig. 2 Induced current of piezoelectric paper with mechanical stress with time

Fig.2 는 전기-기계적 특성평가 장비를 이용하여 측정된 셀룰로오스 EAPap 의 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. 녹색 에너지 응용

#### 3.1 연구동향

압전재료를 이용한 에너지 저장기술이 여러 연구기관을 통해 선보여 지고 있는데 그 중 하나로 미국의 미시간대학과 애리조나 대학의 공동연구를 통해 개발된, 압전고분자인 PVDF 를 부착한 가방을 이용하여 에너지를 수집하는 디바이스를 들 수 있다. 현재까지 널리 알려지고 사용되어지는 압전체에는 고분자로서는 PVDF 가 세라믹으로는 PZT 가 있다. 이들의 기계적 에너지를 전기에너지로 변환하는 효율은 변환계수(k)에 비례하며, PZT 의 경우  $k=0.5$ , PVDF 의 경우는  $k=0.2-0.3$  이다. 미국의 MIT 대학은 수년 전 신발에 압전재료인 PZT 박막소재를 부착하여 8.4mW 의 에너지를 얻어 이동형 에너지 하베스팅 기술의 가능성을 선보였다. 하지만, 세라믹의 경우 고분자 재료에 비해 강도가 높아 낮은 진동에서 에너지 발생 효율이 현저히 떨어지며, 또한 충격에 약하여 큰 진동에는 사용할 수 없는 단점이 있다. 따라서 고분자 재료를 사용하게 되면 자체 유연성이 높으므로 향후 에너지 하베스팅 분야에서 많은 기여를 할 것으로 기대된다.

#### 3.2 압전종이를 이용한 유연한 에너지 하베스팅 기구

에너지 하베스팅 디바이스는 시대 흐름에 발맞추어 많은 관심을 끌고 있다. 특히 기계적인 압력이나 변형에 의해 전기를 발생시킬 수 있는 압전체는 인체에 의한 동력, 자연에서 발생하는 소모성에너지 등을 통해 발생하는 기계적 진동을 전기 에너지로 변환 할 수 있는 점에 있어 에너지 하베스팅 디바이스 개발의 중점에 자리 잡고 있다.

Fig.3 은 압전종이를 이용하여 전기를 재생해낼 수 있는 압전종이 에너지 하베스팅 디바이스의 한 예로써 소형의 디바이스 임에도 자연풍을 이용하여 발생된 기계에너지를 전기에너지로 전환 할 수 있으므로 크게 기대하고 있다.

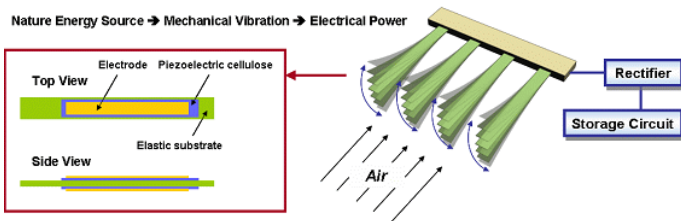


Fig. 3 Energy harvesting device made with piezoelectric paper from wind blow

#### 3.3 종이 슈퍼커패시터

셀룰로오스 자체는 유전성질을 가지고 있으므로 충전이 가능한 평판 종이 커패시터로의 응용이 가능하다. 이미 미국의 MIT 에서는 셀룰로오스를 기반으로 하여 탄소나노튜브가 차세대 에너지저장 분야인 박막 배터리영역에도 적용이 될 수 있다는 희망찬 결과를 최근에 보고한 바 있다. 셀룰로오스는 이온 유통막의 성질을 가지고 있으므로, 탄소나노튜브와의 조합은 종이 커패시터 개발에 있어 아주 뛰어난 조합에 속한다. 본 연구그룹은 이미 셀룰로오스와

탄소나노튜브를 화학적으로 접합시키는 기술을 가지고 개발/소유하고 있어 탄소나노튜브를 일정방향으로 재배열시키는 방법을 사용하면 더욱 조밀한 탄소나노튜브 밀도의 제품 생산이 가능해 성능이 우수한 셀룰로오스 종이 커패시터를 개발할 수 있을 것이다.

#### 3.4 렉테나를 이용한 무선 전력송신

본 연구그룹에서는 마이크로파를 이용한 원격구동기술을 개발하고 있다. 이 기술은 마이크로파를 이용하여 원격전력을 송신하는 기술의 일종으로서, 마이크로파를 수신하는 박막 형태의 렉테나(rectenna)를 작동기에 통합하여 외부의 전원 연결선이 없이 구동하는 기술이다. 렉테나는 정류안테나(rectifying antenna)의 약자로서, 마이크로파를 받아주는 금속박막의 안테나 형태와 고속 정류소자인 Schottky diode 로 구성되어 있다. Fig. 4 는 본 연구그룹에서 개발한 다이폴형 렉테나 배열로서, 6 개의 다이폴 렉테나 소자를 연결했을 때 약 180mW 의 전력을 수신할 수 있다. 렉테나는 50%이상의 전력수신효율을 실험적으로 나타내어 무선 인터넷이나 근거리 통신망이 점점 확산되는 시대에 전력을 근거리로 송신할 수 있는 매우 유용한 기술이라 하겠다.

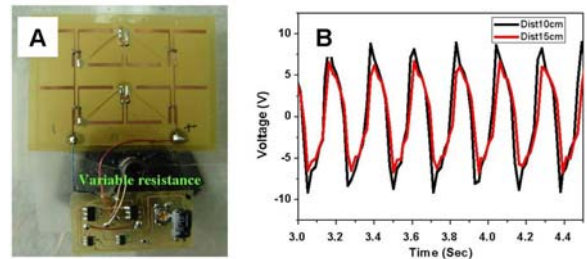


Fig. 4 Dipole rectenna array and control circuit made on polyimide film

### 4. 결론

본 논문에서는 셀룰로오스 압전종이를 소개하고 녹색에너지 분야의 응용가능성을 이야기 하였다. 셀룰로오스 압전종이의 제조과정과 재료특성, 압전특성을 설명하였다. 셀룰로오스 압전종이와 관련된 녹색에너지 연구동향을 소개하고 압전종이의 가능한 분야로서, 소형 에너지 하베스팅 기구와 슈퍼커패시터, 그리고 마지막으로 마이크로파 원격전력송신 기술에 대하여 이야기하였다. 이 분야는 학제적인 분야로서 기계뿐만 아니라 생산, 재료, 화학, 고분자의 융합적인 연구가 필요하다.

### 후기

본 연구는 한국과학재단/교육과학기술부의 창의연구진흥사업(EAPap Actuator 연구단)의 지원에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. Kim, J., Yun, S. and Ounaies, Z., "Discovery of Cellulose as a Smart Material," *Macromolecules*, 39, 4202-4206, 2006.
2. Kim, J., Song, C.-S., and Yun, S.-R., "Cellulose based electroactive papers: performance and environmental effects," *Smart Mater. Struct.* 15, 719-723, 2006.
3. Kim, J., Wang, N., Chen, Y., Lee, S.-K. and Yun, G.-Y., "Electroactive-paper actuator made with cellulose/NaOH/ urea and sodium alginate," *Cellulose*, 14, 217-223, 2007.
4. Fukada, E., "Piezoelectricity as a fundamental property of wood," *Wood Science and Technology*, 2, 299-307, 1968.
5. Brown, Jr., R.M., and Saxena, I.M., *Cellulose: Molecular and structural biology*, Springer, New York., 2007.