

# 생체모방종이작동기(Electro-Active Paper)의 전기기계적인 구동 시뮬레이션

## Electromechanical Simulation of Cellulose Based Biomimetic Electro-Active Paper

장상동\* 김홍수† 김재환\*\*

Sangdong Jang, Heung Soo Kim and Jaehwan Kim

**Key Words:** Electro-Active Paper, EAPap, Cellulose, Dielectrophoretic force, Electromechanical simulation, Biomimetic Actuator.

### ABSTRACT

Electro-Active paper (EAPap) is a new smart material that has a potential to be used in biomimetic actuator and sensor. It is made by cellulose that is abundant material in nature. EAPap is fascinating with its biodegradability, lightweight, large displacement, high mechanical strength and low actuation voltage. Actuating mechanism of EAPap is known to be the combined effects of ion migration and piezoelectricity. However, the electromechanical actuation mechanisms are not yet to be established. This paper presents the modeling of the actuation behavior of water infused cellulose samples and their composite dielectric constants calculated by Maxwell-Wagner theory. Electro-mechanical forces were calculated using Maxwell stress tensor method. Bending deflection was evaluated from simple beam model and compared with experimental observation, which result good correlation with each other.

## 1. 서 론

생체모방종이작동기(Electro-Active Paper, EAPap)는 셀룰로오스(Cellulose)를 기반으로 한 전기 활성 고분자(Electro-Active polymer, EAP)의 일종으로 전기적인 자극에 반응하여 변형을 발생시키는 물질이다. 전기 활성 고분자는 최근에 지능재료 및 인공근육으로써 사용가능성이 부각되면서 활발한 연구가 진행되고 있다[1,2]. 현재 EAP의 단점인 에너지 효율성, 내구성, 출력, 신뢰성 등의 문제로 인하여 상용화에 많은 장애요소가 존재하지만 최근 차세대 기술로 각광받고 있는 나노 기술, 고분자 재료 기술 등의 발전으로 많은 성능의 향상을 이루어 왔다. EAP는 그 구동원리에 따라 압전 고분자(Piezoelectric polymer), 이온성 고분자-금속 복합체(Ionic polymer metal composite), 유전성 탄성체(dielectric elastomer), 전도성 고분자(Conductive polymer), 전왜 고분자(electrostrictive polymer)등으로 구분된다 [3].

EAPap은 다른 지능재료와 비교하였을 때 많은 장점들을 가지고 있다. 우선 상대적으로 낮은 구동전압에서 작동하면서 큰 변위를 발생시키며 좋은 기계적 강성을 가지고 있다. 무엇보다 EAPap를 구성하고 있는 셀룰로오스는 자연에 흔히 존재

하는 천연 고분자물질로 친환경적이며 가격이 저렴하다는 장점을 지니고 있다. 또한 마이크로파를 이용한 무선전력 전송 기술과 결합하여 내부 전력원이 별도로 필요치 않은 원격 구동 액츄에이터로도 활용이 가능하다 [4]. EAPap는 그 구동원리가 명확하게 정량화 되지는 않았으나 셀룰로오스 결정이 지니는 압전 효과와 EAPap 내부에 잔존하는 이온이 전기적인 에너지를 기계적인 에너지로 변환시키는 것으로 알려져 있다 [5].

본 논문에서는 물과 셀룰로오스의 유전특성 차이로 인해 불균일 전기장에서 발생하는 전기적인 힘인 유전체전기영동현상(Dielectrophoresis)을 이용하여 EAPap에 직류 전압을 가하였을 때 발생하는 정지변형을 시뮬레이션 하고 실제 측정값과 비교하여 본 모델의 타당성을 검토 해 보았다.

## 2. EAPap의 전기 기계적인 모델링

### 2.1 유전체전기영동(Dielectrophoretic) 힘

유전체전기영동이란 불균일한 전기장에서 전기 쌍극자를 지닌 입자가 강한 전기장에서 약한 전기장으로 혹은 약한 전기장에서 강한 전기장으로 움직이는 현상을 의미 한다. 유전체전기영동힘의 크기는 부피와 유전율의 차이에 비례한다 [6]. 절연 손실이 없는 구형 입자에 발생하는 유전체전기영동힘을 구하기위한 방법으로, 전기장에 의해 대전된 표면전하에 의해 발생한 전기적인 힘을 구하는 방법인 맥스웰 스트레스 텐서법(Maxwell stress tensor method)을 이용하였다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다 [7].

† 인하대학교 기계공학과

E-mail : heungsookim@inha.ac.kr

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

\* 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\* 인하대학교 기계공학과

$$\vec{F}_{mst} = \frac{1}{2}(\epsilon_{wt} - \epsilon_{cel}) \oint_s (\vec{E}_{t\_wt}^2 + \frac{\epsilon_{wt}}{\epsilon_{cel}} \vec{E}_{n\_wt}^2) \hat{n} ds \quad (1)$$

$\vec{E}_{t\_wt}$ : 접선방향의 전기장

$\vec{E}_{n\_wt}$ : 수직방향의 전기장

$\epsilon_{wt}$ : 물의 유전상수

$\epsilon_{cel}$ : 셀룰로오스의 유전상수

## 2.2 EAPap의 모델링

EAPap은 셀룰로오스필름과 그 표면에 증착된 얇은 박막의 전극으로 이루어져 있다. 셀룰로오스는 주변의 습도변화에 민감한 친수성 물질이다. 따라서 EAPap의 구동 성능은 습도환경에 크게 영향을 받는다. 미시적인 관점에서 EAPap을 보면, 일부 물 분자들은 셀룰로오스 분자에 있는 수산기와 결합을 하여 묶여있는 상태에 있고, 나머지 물 분자들은 셀룰로오스 분자들 사이에서 클러스터를 형성하고 있다. 본 논문에서는 물 입자 클러스터의 크기를  $1\mu m$ 의 반지름을 가진 구로 가정하였다. 또한 각각의 물 입자들은  $15\mu m$ 의 간격을 가지고 있다. 본 시뮬레이션에서 셀룰로오스와 물의 유전상수는 각각 5.6, 80으로 하였다 [8]. 서로 다른 유전율을 가지고 있는 물과 셀룰로오스의 혼합체는 불균일 전기장을 발생시킨다. 이때 발생된 전기장을 해석하기 위하여 상용 소프트웨어인 'COULOMB'으로 경계요소법을 적용하였다. 그 다음, 해석된 전기장을 이용하여 식 (1)에 주어진 맥스웰 스트레스 텐서법으로 물 입자에 발생하는 전기적인 힘을 구하였다

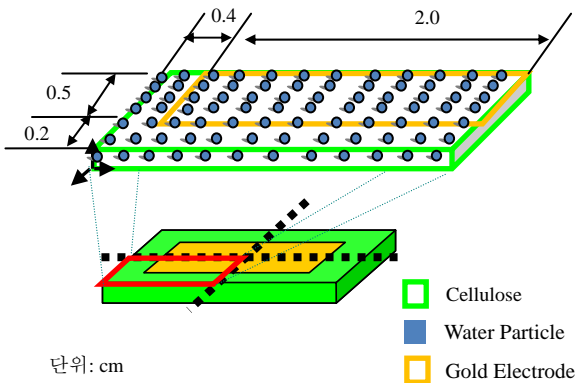


그림 1. EAPap 시뮬레이션 모델

그림 1은 EAPap 시편의 형태를 나타낸다. 시편은  $1.4 \times 4.8cm$ 의 크기에  $34\mu m$ 의 두께를 가지고 있으며, 시편 양쪽 표면에  $1 \times 4cm$  크기의 전극이  $0.1\mu m$ 의 두께로 코팅되어 있다. 실제 시

뮬레이션은 기하학적인 대칭성과 시뮬레이션 시간을 줄이기 위하여 전체 샘플 크기의 4분의 1만 수행되었다.

## 2.3 단순 외팔보를 이용한 기계적인 모델링

전기장에 의해 물입자에 발생하는 힘을 가지고 EAPap에 발생하는 굽힘 변형을 설명하기 위하여 한쪽 끝이 고정되어 있는 단순 외팔보 이론을 적용하였다.

금 전극과 셀룰로오스의 탄성 계수  $80GPa$ ,  $8.5GPa$ 와 주어진 형상을 이용하여 EAPap의 강성을 계산하면 다음과 같다 [9].

$$\begin{aligned} EI &= E_{cel} I_{cel} + 2E_g I_g \\ &= E_{cel} \frac{b_{cel} h_{cel}^3}{12} + 2E_g \times \left( \frac{b_g h_g^3}{12} + b_g h_g \bar{h} \right) \quad (2) \\ &= 4.3889 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

$E_{cel}$ : 셀룰로오스의 영률

$E_g$ : 금 전극의 영률

$I_{cel}$ : 셀룰로오스의 관성모멘트

$I_g$ : 금 전극의 관성모멘트

그리고 EAPap의 굽힘 변형을 계산하기 위하여 오일러-베르누이 방정식을 이용하여 그림 2와 같이 균일한 분포하중이 작용하는 단순 외팔보로 가정하였다. 분포하중이 작용하는 단순 외팔보 끝단의 처짐은 다음과 같다.

$$\delta_B = \frac{qL^4}{8EI} \quad (3)$$

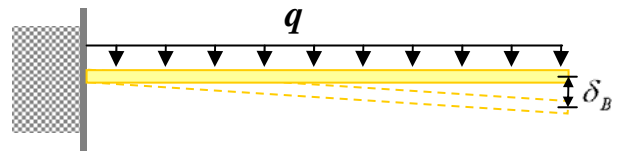


그림 2. 단순 외팔보 이론을 이용한 균일한 힘이 작용하는 경우의 EAPap의 굽힘변형 모델

## 3. 변위 측정

시뮬레이션에 의해 구해진 변위와 실제 변위를 비교하기 위하여 직류전압이 가해진 상태의 변위를 측정하였다. EAPap 샘플의 변위를 구하기 위한 장비의 도식은 그림 3과 같다. 함수 발생기

(Agilent 33220A)에서 직류전압을 가진시키고, EAPap 시편의 끝단 굽힘 변위는 레이저 변위 센서(Keyence Japan LK-G85)를 이용하여 측정하였다. 센서에서 측정된 값은 DAQ 보드를 통하여 PC로 전송된다. 습도와 온도는 환경 챔버 (environmental chamber)를 이용하여 조절된다.

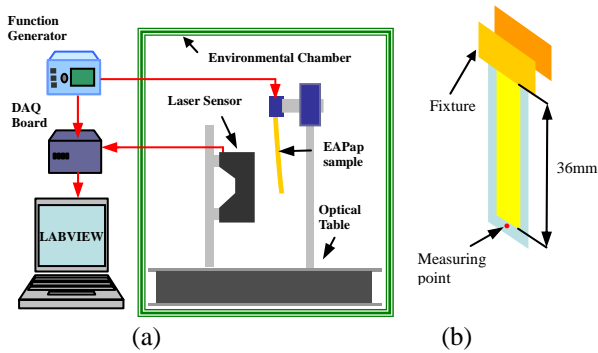


그림 3. (a) 굽힘 변위 측정장치 및 (b) 시편의 형상

변위를 측정하는 동안 금 전극의 일부는 고정장치에 접촉하고 있기 때문에 실제 움직일 수 있는 부분은 약 36mm 정도이다.

## 4. 시뮬레이션 결과

### 4.1 전기장 해석

물이 포함되지 않은 순수한 셀룰로오스로만 구성된 EAPap 시편의 경우 균일한 전기장 분포를 띄고 있다. 하지만 전기적으로 다른 특성을 지닌 두 물질이 혼합되어 있을 경우 Maxwell-wagner 효과에 의해 불균일한 전기장 분포를 띄게 된다. 3차원 전기장 해석 프로그램인 COULMB을 이용하여 EAPap 단면의 전기장을 해석하면 그림 3과 같은 분포를 나타낸다.

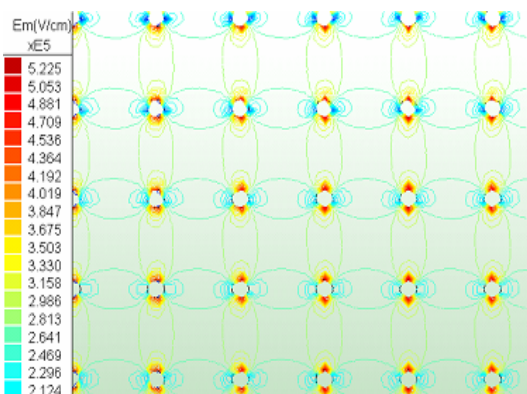


그림 3. 물이 포함된 EAPap의 전기장 분포

시뮬레이션 결과를 보면 물입자의 주변에 유전율의 차이에 의해 전기장이 급격하게 변하는 것을 알 수 있다. 이런 전기장의 변화는 식(1)에 나타난 유전체전기영동힘을 발생시킨다.

### 4.2 EAPap에 작용하는 유전체 전기영동힘

EAPap은 두께대비 면적이 매우 큰 평행판으로 생각할 수 있다. 그러므로 가로세로 위치의 변화에 따른 전기장 세기는 일정하다. 그리하여 EAPap의 두께 방향의 위치 변화에 따른 물입자에 유전체전기영동힘을 알아보았다. 두께 방향의 위치변화는 그림 4처럼 주었다.

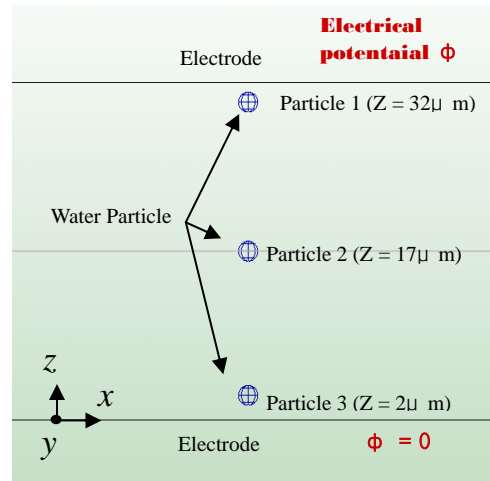


그림 4. EAPap 시뮬레이션 모델의 단면

각각의 물 입자에 작용하는 유전체전기영동힘은 표 1과 같은 값을 가진다. 표를 보면 Z 방향, 즉 전기장이 가해지는 두께방향의 힘이 다른 방향의 힘보다 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 또한 중립축을 중심으로 대칭의 힘이 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 중립축을 따라 전기장의 분포가 대칭이기 때문이며, 이에 따라 중립축에 존재하는 물 입자의 경우 전기장의 대칭성 때문에 유전체전기영동힘이 거의 작용하지 않는 것을 알 수 있다.

표 1. 두께 방향의 변화에 따른 유전체전기영동힘

힘 (N)	Particle 1	Particle 2	Particle 3
X 방향	-1.3E-14	5.5E-14	-1.8E-13
Y 방향	-3.1E-13	2.9E-14	-1.4E-14
Z 방향	-1.6E-08	-1.0E-13	1.6E-08

EAPap과 같이 굽힘변형이 발생하는 지능재료인 IPMC (Ionic Polymer-metal composite) 액츄에이터의 경우를 살펴보면, IPMC에 전기장을 가하면 내

부에 있는 이온들이 이동하여 두께에 따른 이온의 분포가 변하게 된다. 이를 전기침투현상 (Electro-osmosis)라고 하는데, 전기침투현상이 내부 클러스터의 부피에 변화를 일으키는 것으로 알려져 있다 [10]. EAPap 의 경우에도 내부에 이온이 존재하므로 내부의 물 입자의 부피를 변화 시킬 것이다. 본 모델에서는 두께 방향에 따라 각 클러스터 전체 부피의 0.5%가 변한다고 가정하였다. 앞서 설명한 바와 같이 유전체전기영동힘은 부피의 변화에 비례하여 변하므로 굽힘 모멘트를 발생시킬 것이다.

#### 4.3 시뮬레이션 값과 측정 값의 비교

EAPap 에 작용하는 유전체전기영동힘을 이용하여 전압의 변화에 따른 끝단 굽힘 변형을 모사한 값과 실제 측정된 변위를 비교하여 보았다. 그림 5 를 보면 일반적으로 전압의 증가에 2 차식의 형태로 변위가 증가하는 경향성을 볼 수 있다. 하지만 실제 측정값은 비선형적으로 증가하는 경향을 나타내어 3V 에서는 시뮬레이션 결과와 실측값의 차이가 상당히 큰 것을 알 수 있다. 이는 EAPap 이 순수하게 유전체전기영동힘에 의한 영향으로 움직인다고 보다는 내부 이온전이에 의한 직접적인 굽힘 변형, 셀룰로오스에 작용하는 압전효과와 전왜효과 (Electrostriction effect)등의 물리적인 효과들이 복합적으로 작용하여 변형을 발생시키기 때문으로 보여진다. 향후 이러한 효과들의 타당성에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

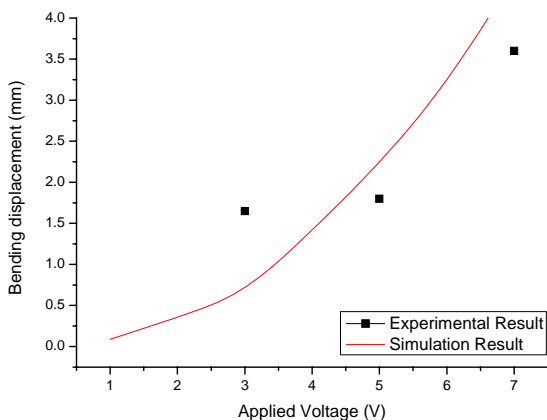


그림 5. 측정 값과 시뮬레이션 값의 비교

## 5. 결 론

본 연구는 EAPap 시편의 내부에서 발생하는 유전체전기영동힘과 EAPap 에 포함된 이온에 의한

전기 이동현상을 이용하여 시편의 끝단에 발생하는 굽힘 변형을 모사하였다. 친수성 재료인 셀룰로오스는 습도 변화에 민감하고 흡수된 물 분자와 셀룰로오스의 유전율의 차이는 두께방향전기장 분포의 불균일성을 초래한다. 이러한 전기장의 불균일 분포는 유전체전기영동힘을 발생시키고 이는 EAPap 의 굽힘 변형을 나타내는 원동력이 된다. 따라서 이러한 전기기계적인 시뮬레이션을 상용 소프트웨어인 COULOMB 을 사용하여 수행하였으며, 실제 직류 가진한 EAPap 시편의 변위와 비교를 하였다. 저 전압에서는 실험값과 시뮬레이션 결과 사이에 차이가 있는데 이는 EAPap 에 작용하는 이온전이효과, 압전효과, 전왜효과 때문으로 판단된다. 향후 EAPap 에 포함된 실제 이온의 양과 이온의 투과계수 (diffusion coefficient)를 이용한 이온의 효과, EAPap 에 작용하는 압전효과 등을 고려한 좀 더 발전된 형태의 모델링을 수행하는 것이 필요하다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부/한국과학재단의 창의적연구진흥사업(EAPap Actuator) 지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

- (1) Bar-Cohen Y., 2001, "Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles," SPIE press, Washington.
- (2) 윤성률, 김재환, Ounaies Z., 배성훈, 2005, "전도성 고분자를 결합한 EAPap 작동기에 관한 연구," 한국소음진동공학회지, 15 권, 9 호, pp.1077-1083.
- (3) Bar-Cohen Y., 2002, "Electro-active polymers: current capabilities and challenges," Prec. SPIE Smart Structures and Material, Vol. 4695, pp.1-7
- (4) Kim J., Yang S.Y., Song K.D, Jones S. and Choi S.H., 2006, "Microwave power transmission using a flexible rectenna for microwave-powered aerial vehicles," Smart Material and Structures, Vol. 15, pp. 1243-1248.
- (5) Kim J., Yun S. and Ounaies Z., 2006, "Discovery of Cellulose as a Smart Material," Macromolecules, Vol. 39, pp. 4202-4206.
- (6) Jones T.B., 1995, "Electromechanics of Particles," Cambridge University Press, New York.
- (7) Yang C., Goh S., Isabel R., Youcef-Toumi K. and Lam Y.C., 2006, "Generation of dielectrophoretic force under uniform electric field," Proc. Innovation in Manufacturing Systems and Technology.
- (8) Bristow A.J. and Kolseth P., 1986 "Paper structure and properties," MARCEL DEKKER, New York.
- (9) Kim J., Kang Y. and Yun S., 2007, "Force measurement of electro-active paper actuators by micro-balance," Sensors and Actuators A, Vol. 133, No. 2, pp.401-406
- (10) Nemat-Nesser S., 2002, "Micromechanics of Actuation of Ionic Polymer-metal Composites," Journal of Applied Physics, Vol. 92, No 5, pp. 2899-2915.