

Electro-Active Papers (EAPap) 작동기의 가능성 연구 Possibility of Electro-Active Papers (EAPap) Actuators

김 재환¹
Jaehwan Kim

Key Words : Electro-Active Papers (EAPap), Electro-Active Polymers (EAP), Ultra Lightweight Actuators (초경량 작동기)

ABSTRACT

Recently, the advent of electro-active papers (EAPap) actuators has been reported. In this paper, the possibility of the actuators is demonstrated. EAPap is a paper that produces large displacement with small force under an electrical excitation. EAPap is made with a chemically treated paper by constructing thin electrodes on both sides of the paper. When electrical voltage is applied on the electrodes the EAPap produces bending displacement. To improve the bending performance of EAPap, different paper fibers—softwood, hardwood, bacteria cellulose, cellophane, carbon mixture paper, electrolyte containing paper and Korean traditional paper, in conjunction with additive chemicals were tested. Two attempts were made to construct the electrodes: the direct use of aluminum foil and the gold sputtering technique. It was found that a cellophane paper exhibits a remarkable bending performance. When 2MV/m of excitation voltage was applied on the paper actuator, more than 3mm of tip displacement was observed out of the 30 mm long paper beam. This is quite low excitation voltage compared to that of other EAPs. The actuation principle of electro-active paper (EAPap) and possible applications are addressed.

1. 서 론

최근에 electro-active polymers (EAP)의 동작은 큰 변위와 탄력성을 지닌 인공근육과 같은 특성을 가지고 있으므로 많은 관심이 모아지고 있다. EAP는 이온의 움직임에 의해 작동하는 ionic EAP와 전기장에 의해 작동하는 electronic EAP로 나눌 수 있다.⁽¹⁻⁷⁾ 대표적인 ionic EAP에는 ionic polymer metal composites (IPMC), 젤 폴리머, 도전성 폴리머가 있고, 전기장에 의해 작동하는 폴리머에는 electron irradiated P(VDF-TrFE), dielectric elastomer, electrostrictive polymer 등이 있다. 이온에 의해 작동하는 EAP는 작은 인가전압에 의해 작동하며 큰 변위를 낼 수 있으나 속도가 늦고 전해질의 필요에 따른 수분유지의 문제가 있다. 반면에, 전기장에 의한 EAP는 큰 변위를 빠른 시간에 낼 수 있으며 수분유지가 필요하지 않으나 인가전압이 높고 전력소모가 높아서 실제 응용하는데 어려

움이 있다. 지금까지 다양한 EAP의 재료가 개발되고 있으며 이를 이용한 여러가지 응용 디바이스가 고안되고 있으나 기존의 기술 수준으로부터 새로운 탈출구가 요구되고 있는 실정이다.

종이를 이용한 EAP 작동기가 Kim에 의해서 2000년도에 최초로 발표된 이후에 많은 기술적인 관심이 쏟아지고 있다.⁽⁸⁾ 종이는 기본적으로 섬유성분을 갖는 망 구조에 많은 입자들이 화학적 또는 기계적으로 분포되어 있는 일종의 복합재료이다. 초기에 종이 작동기는 은박지를 뒤집어 접착제로 붙인 후 전기장을 은박의 전극에 가하여 굽힘변위를 생성하였다. 이것이 세계에서 최초로 알려진 electro-active papers (EAPap) 작동기이며 이로부터 종이 및 접착제의 종류 그리고 전극에 따른 연구를 진행하였다. 최근에는 셀룰로스를 용해하여 재생한 셀로판지에서 큰 변위가 나옴을 발견하게 되었다. 종이 작동기는 판 형상으로 아주 가볍고 적은 전압에도 큰 변위를 생성하므로 기존의 EAP로서는 이를 수 없는 새로운 작동기로서 많은 가능성이 있다. 본 논문에서는 이

¹ 인하대학교 기계공학과
Tel: 032-860-7326, Fax: 032-868-1716
Email: jaehwan@inha.ac.kr

러한 EAPap 의 연구과정과 작동기로서의 가능성에 대하여 소개하고자 한다.

2. 실험

EAPap 작동기를 만들기 위하여 은박지를 뒤로 붙여서 unimorph 의 빔을 만들었다. (그림 1). 빔의 두께는 0.14mm 이고 크기는 15 mm x 65 mm 이다. Polyvinyl alcohol (PVA)과 같이 극성이 강한 접착제를 사용하였을 때 종이 내 수분과 반응하여 변위가 제법 크게 나옴을 보였으나 접착제가 마르고 나면 변위가 나오지 않았다.

접착제를 사용하여 은박지를 붙이는 대신 6 μ m의 알루미늄 박막을 여러 가지 종이의 양면에 극성이 없는 접착제를 사용하여 붙였다. 또는 종이의 양면에 sputtering 이나 증착법을 사용하여 수 nm 두께의 아주 얇은 전극을 입혀서 EAPap 를 만들었다 (그림 2). 이 때 사용한 종이는, hardwood, softwood, 한지, 전해지, 탄소지, 박테리아 셀룰로스, 셀로판지 등이 있다 (그림 3). EAPap 를 집게로 집어서 수직으로 세우고 양 전극에 전기장을 교류로 인가하며 EAPap 빔의 끝단 변위를 변위센서로 측정하였다.

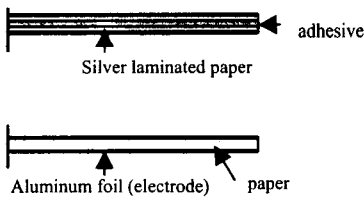


Fig.1 EAPap beams.

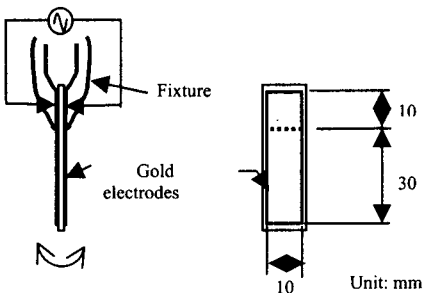


Fig. 2. EAPap test setup.

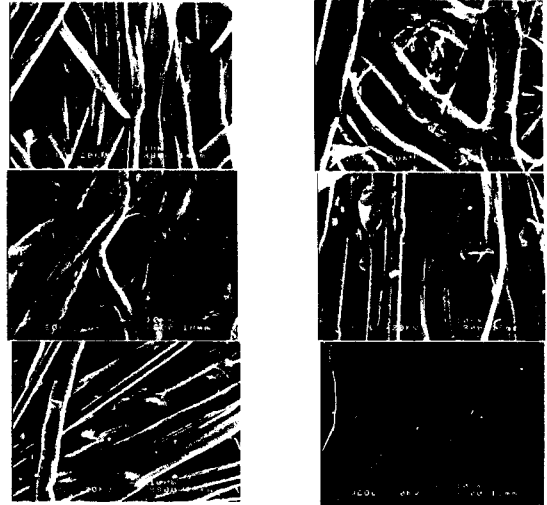


Fig. 3 Various paper samples.

3. 결과

3.1 종이 종류에 따른 영향

표 1 은 종이 종류와 화학 첨가제에 따른 변위를 나타낸다. 전극은 알루미늄박을 사용하였으며, 각각의 종이는 화학 첨가용액에 담갔다가 말린 후 사용하였다. B1, B3, B7, B8 의 경우에서 볼 수 있듯이 침엽수가 활엽수보다 굽힘변위가 나오는 경향이 뚜렷하다. 그러나 침엽수가 확실히 활엽수보다 좋다고 결론지을 수는 없다 왜냐하면 종이의 질은 습도, 밀도 및 구조에 따라 달라지기 때문이다.

Table 1. Various paper samples.

No.	Paper fiber	Chemical additive	Displacement
A1	Hardwood	Chemical 1 (5%)	0.020 mm @ 15 Hz
A2	Hardwood	Chemical 1 (10%)	-
A3	Hardwood	Chemical 1 (15%)	-
A4	Hardwood	Chemical 2 (5%)	-
A5	Hardwood	Chemical 2 (10%)	-
A6	Hardwood	Chemical 2 (15%)	-
A7	Hardwood	Chemical 3 (5%)	-
A8	Hardwood	No Chemical	0.080 mm @ 5 Hz
B1	Softwood	Chemical 1 (5%)	0.100 mm @ 5 Hz
B2	Softwood	Chemical 1 (10%)	-
B3	Softwood	Chemical 1 (15%)	0.040 mm @ 20Hz
B4	Softwood	Chemical 2 (5%)	-
B5	Softwood	Chemical 2 (10%)	-
B6	Softwood	Chemical 2 (15%)	-
B7	Softwood	Chemical 3 (5%)	0.060 mm @ 15 Hz
B8	Softwood	No Chemical	0.050 mm @ 5 Hz
C1	Bacte. cellulose	Chemical 2	-
C2	Bacte. cellulose	-	-
C3	Bacte. cellulose	Chemical 3	-
D1	Korean paper	Chemical 2	-
D2	Carbon paper	-	-

3.2 Gold Sputtered 전극

앞에서 쓰인 알루미늄 전극은 종이에 비해 너무 강하므로 종이에서 발생하는 작동영향을 보기가 어려웠다. 이를 극복하기 위하여 금전극을 sputtering 기법을 이용하여 1 nm 두께로 종이의 양면에 입혔다. 전술한 네 가지 종이 종류에 전해지, 탄소지, 셀로판지를 추가하여 샘플을 제작하였으며 교류 전기장을 인가하여 가진하는 실험을 실시하였다. 여기서 전해지는 유전상수가 일반 종이에 비하여 높다 (약~10). 탄소지는 3-6 μm 굵기의 탄소섬유를 종이 펄프에 섞어서 종이를 뜬 것으로서 전기전도도가 좋다. 그림 2와 같이 샘플을 고정하고 전기장을 인가한 결과, 셀로판지가 가장 좋은 결과를 보였다. 끝단에서 측정된 굽힘변위는 가진 주파수와 가진전압에 따라 달라졌다.

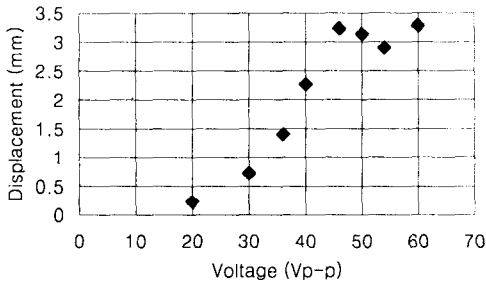


Figure 4. Tip displacement of EAPap actuator.

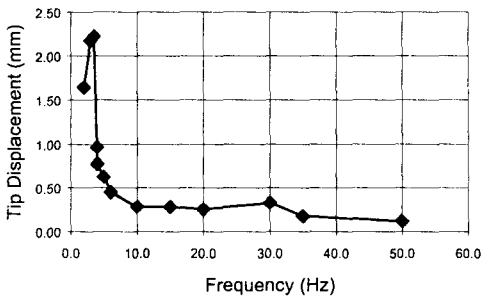


Figure 5. Tip displacement of EAPap versus frequency

그림 4는 1 Hz에서 인가전압에 따른 굽힘변위를 나타낸 것으로 전압에 따라 거의 비례적으로 변위가 나오는 것으로 볼 수 있다. 따라서, 변위 발생 원인이 전왜(electrostriction)현상에 의한 것이 아님을 알 수 있다. 50 Vp-p을 인가했을 때 약 3.3 mm의 변위가 나왔는데, 종이의 두께가 25 μm 이므로 이것은 2 MV/m의 인가전압 효과가 있다. 이 값은 다른 electronic EAP에

비하면 (140 MV/m)⁽⁹⁾ 매우 작은 인가전압 값이다. 그림 5는 40 Vp-p를 가할 때 주파수에 따른 변위를 나타낸다. 약 4 Hz에서 가장 큰 변위가 나오며 약 30 Hz까지 미약하지만 변위가 발생함을 나타낸다. 여기서 4 Hz는 EAPap 빔의 공진 주파수이다.

3.3 EAPap 작동원리 및 작동기 가능성

종이펄프는 식물의 섬유소로 구성된 일종의 복합체로서 리그닌, 셀룰로스 그리고 기타 헤미셀룰로스로 구성되어 있다. 구조는 부분적 결정체인 셀룰로스 열이 리그닌과 헤미셀룰로스의 무결정영역에 심겨있는 형태이다. 실험적으로 나무나 셀룰로스는 미약하지만 압전효과가 있는 것으로 알려졌다.⁽¹⁰⁾ 이 압전효과는 종이펄프의 방향성에 의한 것으로 섬유소의 방향성을 정렬한다면 보다 향상된 압전효과를 얻을 수 있다.

큰 변위를 나타낸 셀로판지는 용해된 셀룰로스를 판지 형태로 압출한 것으로서 기계적 방향성이 있다. 셀로판지의 DoP (Degree of Polymerization)는 나무펄프에 비하여 매우 낮다. 이는 곧 셀로판지의 많은 부분이 무결정영역인데 이 영역에 있는 hydroxyl기가 수분과 반응하여 큰 극성을 갖게 되고 전기장이 인가되었을 때 전기장에 따라 좌우로 이동할 가능성이 많다. 이것은 일종의 migration 효과이다. 그러나 대표적인 ionic EAP인 IPMC와는 건조상태에서 작동한다는 점과 빠른 응답속도를 보인다는 점에서 다르다. EAPap의 작동원리에 대하여 보다 심도있는 연구가 필요하다 하겠다.

EAPap의 가장 큰 장점은 건조상태에서 적은 전압, 적은 전력에 큰 전압이 나오며 비교적 빠른 응답속도를 보인다는 점이다. 아직 힘에 대한 검증은 이루어지지 않았으나 종이라는 특징을 감안하였을 때 압전 세라믹과 같이 큰 힘이 나오기는 어렵겠지만 종이 정도로서의 힘을 충분히 낼 수 있다면 이를 이용한 굽힘, 선형 등 다양한 작동기를 만들 수 있다. 특히 적은 전력소모 (~10 mW/cm²)의 특징은 마이크로파를 이용한 작동기를 가능케 할 수 있으며 이를 응용한 smart skin, smart wall paper, smart membrane 및 초소형 비행체의 날개 등 종래의 기술로 어려운 것들을 가능하게 할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 새로운 작동기 재료로서 EAPap의 발견을 소개하였고 작동기로서의 가능성을 언급하였다. 셀로판지에 박막 전극을 입히고 전기장을 인가하였을 때 큰 변위가 나옴을 발견하였다. 인가되는 전기장은 2 MV/m로서 이 값은 다른 electronic EAP에 비하면 (140 MV/m) 매우 적은 값이다. 전력소모는 $\sim 10 \text{ mW/cm}^2$ 로서 매우 작기 때문에 마이크로파로도 작동이 가능하다. 동작속도는 압전재료 보다는 느리지만 ionic EAP 보다는 빠르다. 따라서 EAPap 재료의 작동원리를 심도있게 이해하고 성능을 개선한다면 새로운 작동기로서의 가능성을 펼칠 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 BK21 핵심과제의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. T. Furukawa, and J.X. Wen, "Electrostriction and Piezoelectricity in Ferroelectric Polymers," *Japanese Journal of Applied Physics*, 23 (9), 677-679, 1984.
2. M. Shahinpoor, Y. Bar-Cohen, J.O. Simpson and J. Smith, "Ionic polymer-metal composites(IPMCs) as biomimetic sensors, actuators and artificial muscles—a review," *Smart Materials & Structures*, 7 (6), R15-R30, 1998.
3. R. Pelrine, R. Kornbluh and J. Joseph, "Electrostriction of Polymer Dielectrics with Compliant Electrodes as a Means of Actuation," *Sensor and Actuators A: Physical*, 64, 77-85, 1998.
4. Q. M. Zhang, V. Bharti and X. Zhao, "Giant Electrostriction and Relaxor Ferroelectric Behavior in Electron-Irradiated Poly(vinylidene fluoride - trifluoroethylene) Copolymer," *Science*, 280, 2101-2104, 1998.
5. P. Calvert and Z. Liu, "Free form Fabrication of Hydrogels," *Acta Materialia*, 46, 2565-2571, 1998.
6. R. Heydt, R. Kornbluh, R. Pelrine and V. Mason, "Design and Performance of an Electrostrictive-Polymer-Film Acoustic Actuator," *J. Sound & Vibration*, 215 (2), 297-311, 1998.
7. Y. Bar-Cohen Ed., *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential, and Challenges*, SPIE Press, 2001.
8. J. Kim, J. Y. Kim and S. J. Choe, "Electroactive Paper: Its Possibility as Actuators," *SPIE's 7th Annual Symposium on Smart Structure and Materials*, Vol.3987, 203-209, Newport Beach, CA, USA, March 2000.
9. J. Su, J. Harrison, T. Clair and Y. Bar-Cohen and S. Leary, "Electrostrictive grafted elastomers and applications," *MRS Symposium Proceedings*, Vol.600, pp.131-136, Warrendale, PA, 1999.
10. V.A. Bazhenov, *Piezoelectric Properties of Woods*, Consultants Bureau, New York 1961.
11. J. Kim and Y.-B. Seo, "Electro-Active Paper (EAPap) actuators," *Smart Mater & Struct.*, 11(3), 1-6, 2002.