

Electroactive Paper(EAPap)를 이용한 표면탄성과 센서 Surface Acoustic Wave Sensor Using Electroactive Paper(EAPap)

이 민 희* · 김 주 형† · 김 재 환**

Minhee Lee, Joo-Hyung Kim and Jaehwan Kim

(2008년 9월 5일 접수 ; 2008년 10월 24일 심사완료)

Key Words : Electroactive Paper(전기활성종이), Piezoelectricity(피에조특성), Surface Acoustic Wave(표면탄성파), SAW Velocity(탄성속도), Inter Digit Transducer(미세전극), Lift-off process(리프트오프), Insertion Loss(삽입손실)

ABSTRACT

Cellulose based electroactive paper(EAPap) has been developed as a new smart material due to its advantages of piezoelectricity, large displacement, low power consumption, low cost and flexibility. EAPap can be used for a surface acoustic wave(SAW) device using the piezoelectric property of EAPap, resulting in the cost effective and flexible SAW device. In this paper, inter digit transducer(IDT) structure using lift-off technique with a finger gap of 10mm was used for micro fabrication of the cellulose EAPap SAW devices. The performance of IDT patterned SAW device was characterized by a Network Analyzer. The feasibility of cellulose EAPap as a potential acoustic device was presented and explained.

1. 서 론

셀룰로오스는 자연으로부터 얻을 수 있는 석유기반이 아닌 고분자로, 생분해 능력이 있으며 자연친화적이며 가격이 저렴하고 쉽게 재료를 얻을 수 있다는 커다란 장점을 가지고 있다⁽¹⁾. 또한 셀룰로오스의 구조상 결정질 부분과 비결정질 부분은 각각 이온전이효과와 압전효과를 일으킬 수 있어 전기에 의해 움직이는 전기활성고분자로도 이용이 가능하다⁽²⁾. 오늘날 많은 기업과 연구소들은 환경친화적이며 가격경쟁력이 있는 대체 고분자를 많이 찾고 있는데, 셀룰로오스는 이에 부합되는 최적의 물질이라고 할 수 있다. 하지만 지금까지의 연구로는 실제적인 디바이스로의 적용이 불가능하므로 셀룰로오스 물질

개선 및 디바이스로 적용하기 위한 기초 연구들이 시급하게 필요하다. 몇몇 연구들에 의해 셀룰로오스 물질의 우수성 및 디바이스로 적용함에 있어 가능성들이 밝혀지고 있는 실정이다⁽³⁾. 특히 셀룰로오스가 전기-기계적인 압전특성이 있는 것으로 밝혀짐으로 음향분야에도 적용이 될 수 있기에, 이 논문에서는 차세대 지능재료로 주목 받고 있는 electroactive paper(EAPap)를 이용하여 표면탄성파(surface acoustic wave, SAW) 디바이스로의 가능성을 연구하고자 한다. 표면탄성파 디바이스는 구조가 간단하고, 측정감도가 아주 우수하면서, 제작비용이 저렴하다는 장점이 있다⁽⁴⁾. SAW 디바이스로 응용되기 위해서는 물질의 탄성과 속도가 중요한데, 빠른 탄성파를 가진 물질은 같은 형태를 가진 디바이스에서 높은 중심주파수를 갖기 때문에 초고주파수 영역으로의 적용이 가능하면서 디바이스를 소형화할 수 있다는 장점이 있다. 또한 SAW 디바이스의 경우 두 개의 inter digit transducer(IDT) 전극 사이에 적절한 센싱 필름을 두고 외부 환경의 변화에 따른 선형적인

† 교신저자 : 정희원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : joo-hyung.kim@inha.ac.kr
Tel : (032)874-7325, Fax : (032)873-7325

* 인하대학교 대학원 기계공학과

** 정희원, 인하대학교 기계공학과

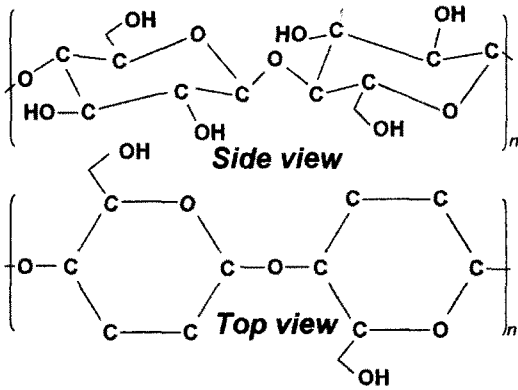


Fig. 1 Chemical structure of cellulose

중심주파수 변화를 토대로 다양한 분야로의 적용이 연구되고 있다. 근래에는 유연소재(flexible substrate)를 사용한 센서에 대해 관심이 고조되고 있는 실정이므로, 이 연구에서는 이를 위해 EAPap위에 마이크로 크기의 금속 패턴을 셀룰로오스 필름 상에 형성한 후 network analyzer장비를 이용하여 EAPap의 SAW 디바이스의 특성을 확인하고자 한다.

2. 본 론

2.1 EAPap Film의 제조

이 실험에 사용된 셀룰로오스 EAPap은 용제로 사용된 DMAc(N,N-dimethyl acetamide)와 첨가제인 LiCl를 이용하여, 용해-재생시키는 방법으로 제작되었다. 먼저 100 °C의 오븐에서 건조된 후 LiCl과 상온에서 건조한 DMAc와 펄프를 교반한 뒤 상온으로 식히고 진공상태로 보관한다. 이를 이용하여 얻어진 셀룰로오스 솔루션은 casting 방법과 스펀코팅으로 시트형태의 박막으로 제작될 수 있다. 이 논문에서는 셀룰로오스의 균일한 특성을 얻기 위해, 습도 35 ± 3% RH 및 25 ± 2°C 환경이 유지되는 클린룸에서 테이프캐스팅(tape casting) 방법을 이용하여 셀룰로오스 EAPap을 제작하였다. 보다 자세한 제작방법은 이미 발표된 자료들에 자세히 소개되어 있다^(4,5). 유리판에 셀룰로오스 솔루션을 닥터 블레이드를 이용하여 일정한 두께를 가진 솔루션 박막형태로 제작한다. 이렇게 제작된 박막형태의 솔루션은 증류수(DI water)와 Isopropylalcohol(IPA)의 혼합 용액에 일정시간을 넣어둔 후, 증류수를 이용하여 세척을 진행함으로 남아있는 DMAc와 LiCl을 제거

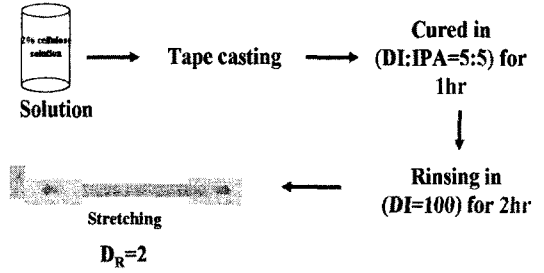


Fig. 2 The film process of cellulose EAPap

Table 1 Design parameter of IDT pattern on cellulose EAPap

Parameter	IDT pattern (λ=40 μm)
Acoustic path length	150λ
finger width/ length	10 mm
Aperture	50λ
No. of finger pairs	60

하고, 마지막으로 고형화시킨다. 젖은 상태의 필름은 스트레칭 공정과 적외선을 이용한 건조공정을 거쳐서 막 필름형태의 EAPap을 얻게 된다. Fig. 1은 셀룰로오스 EAPap의 화학적 구조를 나타내고 있다.

2.2 셀룰로오스 압전 기판

표면탄성파는 전파가 아니고 외부의 열적, 기계적, 전기적 힘에 의한 입자들의 운동에서 나오는 기계적인 파동으로 transversal wave 또는 rayleigh wave라고도 한다^(8,9). 이러한 표면탄성파를 일으킬 수 있는 물질로는 LiNbO₃, LiTaO₃, PZT, ZnO, GaAs, Quartz, PVDF등이 있다⁽⁷⁻¹²⁾. 셀룰로오스 EAPap의 압전효과는 이미 실험을 통해 입증된 바 있다⁽¹⁾. 그러므로 이러한 압전효과는 표면탄성파를 발생시킬 수 있다. 셀룰로오스와 달리, 위에서 소개된 세라믹 기판들은 그 위에 주변환경에 의해 특성이 쉽게 변화되는 민감한 감도를 가진 측정필름을 추가로 필요로 하게 된다⁽⁴⁾. 그러나 폴리머 재료인 셀룰로오스는 세라믹 압전기판과 달리 표면변형이 쉽게 일어나, 외부환경에 매우 민감하다는 특성을 가지고 있다. 그러므로 셀룰로오스 EAPap은 그 자체적으로 센서 역할을 할 수 있는 충분한 가능성을 내재하고 있다^(5,6). 이 실험에서는 셀룰로오스 EAPap의 압전특성을 극대화하기 위해 기계적 스트레칭시 최대 압전특

성을 보이는 스트레칭 비율(drawing ratio)을 2.0으로 하여 스트레칭을 진행한 후, 적외선을 이용하여 건조함으로써 압전 셀룰로오스내의 섬유분자 배열을 일정방향으로 고정시켰다. Fig. 2는 압전특성을 가진 셀룰로오스 EAPap을 제작하는 프로세스를 간략하게 보여주고 있다.

3. SAW Device 제작

3.1 Inter Digital Transducer(IDT) 형성

SAW 디바이스는 일반적으로 빗살무늬형태의 급속전극으로 이루어진 두 개의 송수신용 변환기, 그리고 IDT로 구성되어있다. IDT 배열은 극성이 서로 다르게 연속적으로 배열되어 있어, 그 사이에 가해지는 주파수의 신호전압이 재료의 결정표면을 팽창 또는 압축시키면서 기계적인 파동을 발생시킨다. 이것을 표면탄성파라고 하고, 이 파는 압전기판 상에 전달되어 수신 측 전극에서 다시 역 압전효과에 의해 신호로 바뀌게 된다. 이 연구에서 설계된 IDT 패턴은 $\lambda = 40 \mu\text{m}$ (wave length) 가지고 있으며, 두 IDT 패턴 사이의 거리는 150λ 를 갖도록 디자인 하였다. Table 1은 SAW 디바이스의 디자인 변수를 보여주고 있다.

3.2 셀룰로오스 기판위에 IDT 전극 형성

셀룰로오스 SAW 디바이스로 제작하기 위해서는, EAPap 위에 식각 공정을 사용하여 원하는 패턴을 형성할 수 있다. Fig. 3은 셀룰로오스 상에 IDT패턴

을 제조하는 공정을 보여주고 있다. IDT 패턴은 Lift-off 과정을 통해 형성되는데, 셀룰로오스 상에 감광막(photoresist, PR)을 도포하고, IDT패턴이 새겨진 glass mask를 PR막 위에 두고, 노광과정과 현상과정을 거쳐 셀룰로오스 EAPap위에 IDT를 형성할 수 있는 PR패턴을 형성한다. 5.0×10^{-6} Torr에서, 이온증착 장비를 이용해서 약 200 nm 두께의 금전극을 셀룰로오스 위에 증착시킨다. 전극막이 증착된 후, 남아있는 PR을 제거함으로써 EAPap위에는 원하는 IDT 전극만 형성된다. Fig. 4는 현미경과 주사전자현미경을 이용해 관찰한 셀룰로오스 EAPap 표면에 제작된 IDT패턴을 보여준다.

4. 결과 및 고찰

4.1 EAPap SAW Device 특성 관찰

전기적인 특성을 관찰하기 위해, EAPap SAW 디바이스를 $4 \times 3 \text{ cm}^2$ 의 절연판에 부착 한 후, 제작된 PCB 회로기판에 고정시켰다. 회로기판과 SAW 디바이스는 얇은 백금선을 이용하여 연결하였고, 회로기판에 연결된 단자와 네트웍 어날라이저(network analyzer, Agilent N5230A PNA-L)를 연결하여 특성 분석을 진행하였다. 주파수 측정 범위는 20 MHz 에서 100 MHz이고, 상온에서 측정하였으며, SAW 디바이스는 차폐된 장치에 넣어 외부에서 오는 영향을 최소화하였다. 측정 전에 오차를 줄이기 위해 50Ω

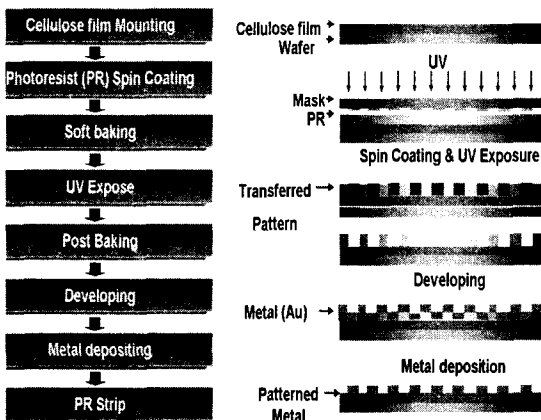


Fig. 3 Lift-off process for the IDT pattern transfer on EAPap

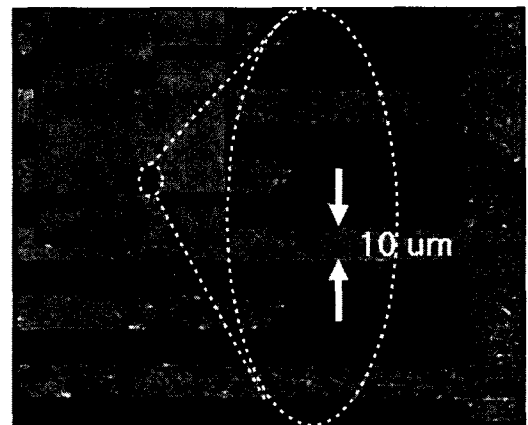


Fig. 4 SEM image of the IDT patterned EAPap SAW device. The insert presents a microscope image of the patterned IDT on EAPap with $\lambda = 40 \mu\text{m}$

교정 키트(calibration kit)를 이용하여 교정을 진행하였다.

Fig. 5는 EAPap SAW 디바이스의 특성을 평가하기 위해 사용된 측정장비 시스템을 보여주고 있다. 실험에서 SAW 기판으로 사용된 필름은, 실험실 자체에서 제작된 DMAc EAPap과 cellophane EAPap 두 종류를 사용하였다. 두 종류의 EAPap위에 SAW 디바이스를 위한 IDT패턴공정은 동일하게 적용하였다. 실험에 사용된 필름의 두께는 28~30 μm 로 비슷한 두께의 필름을 사용하였다.

스트레칭 방향에 따른 EAPap의 영률(elastic constant) 값은 Table 2에 나타나 있다. IDT 전극과 EAPap의 스트레칭 방향에 따라 EAPap의 영률이 각도에 따라 선형적으로 달라짐을 확인 할 수 있었다. 영률은 탄성과 속도의 영향을 주는 인자로서, 이 실험에서는 SAW 특성을 극대화하기 위하여 IDT전극과 EAPap 스트레칭 방향을 0° 로 고정하여 EAPap SAW디바이스를 제작하였다.

Fig. 6은 네트워크 어날라이저를 이용하여 cellulose SAW 디바이스를 측정된 결과로, 파라미터 S_{21} 은 입력 대비 출력의 비로서, 주파수에 대한 신호 에너지의 분포를 dB값으로 나타낸 것이다. 여기서 $\lambda = 40 \mu\text{m}$ 인 SAW 디바이스의 중심주파수는 61.3 MHz, 삽입손실은 47.8 dB로 측정 되었다. 중심주파수의 범위는 현재 GHz 영역으로 높아지고 있으며, 이는 높은 중심주파수로 인해 디바이스의 크기를 작게 설계할 수 있어 다양한 분야에 적용이 가능할 것으로 보인다⁽⁴⁾.

측정된 중심주파수를 이용하여 표면탄성과의 속도

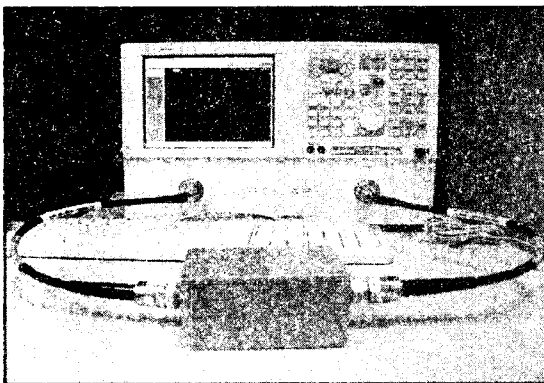


Fig. 5 Measurement configuration of cellulose SAW device using a vector network analyzer

를 아래의 식을 통해 구해 낼 수 있다.

$$f_0 = \frac{v}{\lambda} \quad (1)$$

여기서, f_0 는 중심주파수이며, v 는 표면탄성과 속도이고 λ 는 IDT의 파장거리이다. 이 식을 이용하여 cellulose EAPap의 표면탄성과 속도를 계산한 결과 2452 m/s를 얻을 수 있었다.

Fig. 7은 같은 λ 를 갖는 cellophane EAPap SAW 디바이스의 경우 얻어진 S_{21} 그래프이다. 여기서 구해진 중심주파수는 59.05 MHz, 삽입손실은 39.6 dB로 관측되었으며, 계산된 표면탄성과 속도는 2362 m/s로 셀룰로오스의 경우와 매우 비슷한 결과를 보였다.

다른 방법으로, 탄성과 속도를 재료의 물성으로부터 구할 수 있으며 아래의 식과 같이 주어진다^(10,13).

$$v = (c / \rho)^{1/2} \quad (2)$$

여기서 v 는 탄성과 속도, c 는 재료의 영률, 그리고 ρ 는 재료의 밀도를 나타낸다. 이 식은 등방성 재료에 적용할 수 있으며 EAPap의 경우 스트레칭 과정

Table 2 The elastic constants of EAPap

Drawing direction	Elastic constant (GPa)	
	Cellulose EAPap	Cellophane EAPap
0°	7.01	6.80
45°	5.51	4.66
90°	4.39	3.57

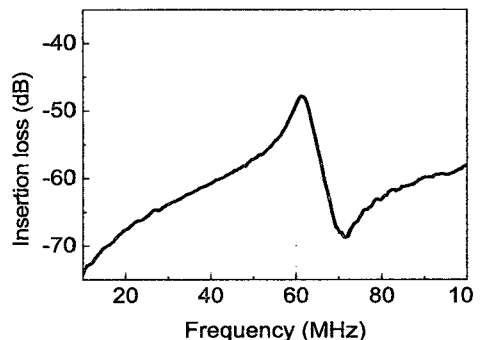
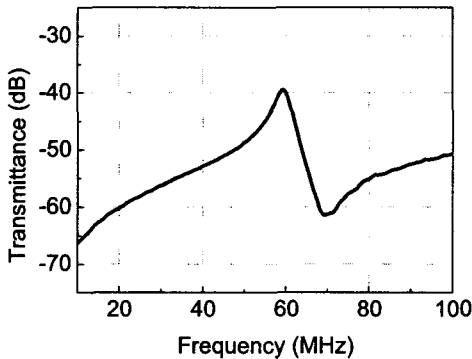


Fig. 6 The measured S21 data of cellulose EAPap

Table 3 Selected properties of cellulose and cellophane EAPap

Property	EAPap	Cellulose EAPap	Cellophane EAPap
Elastic constants (GPa)		7.01	6.80
Density (g/m ³)		0.0131/ (0.02'0.02)	0.0132/ (0.02'0.02)
Thickness (mm)		28	30
Acoustic velocity (m/s)		2446.3	2374.10

**Fig. 7** The measured S21 data of cellophane EAPap

에서 등방성 재료의 특성을 가지게 되므로, 이 식의 적용이 가능하다. 위의 식을 이용하여 계산된 속도는 Table 3에 정리하였다. Table 3을 통해, 실험으로 구해진 탄성파속도와 재료의 물성으로부터 구해진 속도의 오차는 약 10 m/s로 거의 비슷한 값을 보였다.

그러므로, 이 실험을 통해서 cellulose EAPap을 이용하면 기존의 SAW 디바이스의 단점인 유연성을 극복할 뿐만 아니라, EAPap이 센싱 필름의 역할도 하게 되어 SAW 디바이스의 구조가 더욱 간단해 질 것으로 생각된다. 그러므로 EAPap을 이용한 SAW 센서로서의 사용 가능성은 앞으로 지속적인 연구가 진행될 것으로 보인다⁽¹⁴⁾.

5. 결 론

이 연구에서 EAPap필름을 기판으로 하는 SAW 디바이스를 만들어 특성을 관찰하였다. IDT 전극 방향과 필름의 스트레칭 방향을 0° 하여 lift-off 방법

을 사용해 금속 IDT패턴을 EAPap위에 제작하였다. EAPap필름의 종류에 따라 특정된 S21의 값은, 중심주파수 차이를 보였고 이를 이용해 표면 탄성파의 속도를 계산하였다. Cellulose EAPap 및 cellophane EAPap SAW 디바이스의 탄성파 속도는 2452 m/s 및 2362 m/s로 계산되었고, 물질의 영률과 밀도를 이용하여 구한 탄성파속도와 거의 유사한 값을 보였다. 그러므로 이 연구에서는 cellulose EAPap이 SAW 디바이스로의 응용 가능성을 확인하였으며, 그에 따른 다양한 EAPap디바이스의 연구 및 활용이 필요할 것으로 보인다.

후 기

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

참 고 문 헌

- (1) Kang, Y. K., 2006, "Research for the Direct Piezoelectric Effect of Electro-active Paper", M.E thesis, INHA University.
- (2) Cho, K. Y., 2008, "Cellulose Micro Molding for MEMS Device and Flexible Display Application Using Electro Active Paper", M.E. Thesis, INHA University.
- (3) Wee, G. J., Kang, J. K., Kang, W. K., Park, C. Y., 1987, "A Study on the Measurement of SAW Velocity on Piezoelectric Ceramics", J. Acoustical Society of Korea Vol. 6, pp. 5~11
- (4) Park, J. H. and Kim, J. H., 2004, "A Study on the Fabrication and Characteristics of SAW Temperature Sensor Using Piezoelectric Material", Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 563~567.
- (5) Song, C. S., 2006, "Research for the Performance of EAPaps with Cellulose Solutions", M.E Thesis, INHA University.
- (6) Kim, J. and Yun, S., 2006, "Discovery of Cellulose as a Smart Material", Macromolecules Vol. 39, pp. 4202~4206.

(7) Strashilov, V. L., 2000, "Efficiency of poly(vinylidene fluoride) Thin Films for Excitation of Surface Acoustic Waves", J. Appl. Phys. Vol. 88, pp. 3582~3586.

(8) Galipeau, D. W., Story, P. R., Avetelino, K. and Mileham, R. D., 1997, "Surface Acoustic Wave Microsensors and Applications", Smart Mater. Struct. Vol. 6, pp. 658~667.

(9) Alfred, P., 2000, "A Review of Wireless SAW Sensors", IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 47, pp. 317~332.

(10) Preethichandra, D. M. G. and Kaneto, K., 2007, "SAW Sensor Network Fabricated on a Polyvinylidene Difluoride(PVDF) Substrate for Dynamic Surface Profile Sensing", IEEE Sensors J., Vol. 7, pp. 646~649.

(11) Foster, N. F., 1981, "Piezoelectricity in Thin Film Materials", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 70, pp. 1609~1614.

(12) Deger, C., Born, E., Angerer, H., Ambacher, O., Stutzmann, M., Hornsteiner, J., Riha, E. and Fischerauer, G., 1998, "Sound Velocity of $Al_xGa_{1-x}N$ Thin Films Obtained by Surface Acoustic-wave Measurements", Appl. Phys. Lett. Vol. 72, pp. 2400~2402.

(13) Kino, G. S., 1987, "Acoustic Wave: Devices, Imaging, and Analog Signal Processing". (Engelwood Cliffs, NJ: Prentice Hall).

(14) Kerstin L., Bastian, E. P. and Michael, R., 2008, "Surface Acoustic Wave Biosensors: a Review", Anal. Bioanal. Chem. Vol. 391, pp. 1509~1519.