

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

이민희\*\* · 김주형\*† · 김재환\*

Minhee Lee, Joo-Hyung Kim and Jaehwan Kim

**Key Words :** Electroactive Paper (EAPap), Piezoelectricity, Surface Acoustic Wave (SAW), SAW velocity, Inter digit transducer (IDT), Lift-off process, Insertion loss.

## 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 10  $\mu\text{m}$  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, 생분해능력이 있으며 자연친화적이며 가격이 저렴하고 쉽게 재료를 얻을 수 있다는 커다란 장점을 가지고 있다.<sup>(1)</sup> 또한 셀룰로오스의 구조상 결정질 부분과 비결정질 부분은 각각 이온전이 효과와 압전효과를 일으킬 수 있어 전기에 의해 움직이는 전기활성고분자로도 이용이 가능하다.<sup>(2)</sup> 오늘 날 많은 기업과 연구소들은 환경친화적이며 가격경쟁력이 있는 대체 고분자를 많이 찾고 있는데 셀룰로오스는 이에 부합되는 최적의 물질이라고 할 수 있다. 하지만 지금까지의 연구로는 실제 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.<sup>(3)</sup> 특히 셀룰로오스가 전기기계적인 압전특성이 있는 것으로 밝혀짐으로 음향 분야에도 적용이 될 수 있기에, 본 논문에서는 차세대 지능재료로 주목 받고 있는 Electroactive Paper (EAPap)를 이용하여 표면탄성과(Surface acoustic wave, SAW) 디바이스로서의 가능성을 연구하고자 한다. 이를 위해 마이크로 크기의 금속 패턴을 셀룰로오스 필름 상에 형성한 후 Network Analyzer 장비를 이용하여 SAW 특성을 확인하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 EAPap film 의 제조

본 실험에 사용된 셀룰로오스 EAPap은 용제로 사용된 DMAc (N,N-dimethyl acetamide)와 첨가제인 LiCl 를 이용하여 용해-재생시키는 방법으로 제작되었다. 먼저 100℃의 오븐에서 건조된 후 LiCl 과 상온에서 건조한 DMAc 와 필름을 교반한 뒤 상온으로 식히고 진공상태로 보관한다. 이를 이용하여 얻어진 셀룰로오스 솔루션은 Casting 방법과 스펀코팅으로 시트형태의 박막으로 제작되어 질 수 있다. 보다 자세한 제작방법은 이미 발표된 자료들에 소개되어 있다.<sup>(4,5)</sup> 본 논문에서는 셀룰로오스의 균일한 특성을 얻기 위해, 습도 35 ± 3 % RH 및 25 ± 2℃ 환경이 유지되는 클린룸에서 테이프캐스팅(Tape casting) 방법을 이용하여 셀룰로오스 EAPap을 제작하였다. 유리판에 셀룰로오스 솔루션을 닥터 블레이드를 이용하여 일정한 두께를 가진 솔루션 박막형태로 제작한다. 이렇게 제작된 박막형태의 솔루션은 증류수(DI water)와 Isopropylalcohol (IPA)의 혼합용액에 일정시간을 넣어둔 후, 증류수를 이용하여 세척을 진행함으로써 남아있는 DMAc 와 LiCl 을 제거하고, 마지막으로 고형화시킨다. 젖은 상태의 필름은 스트레칭 공정과 적외선을 이용한 건조공정을 거쳐서 필름형태의 EAPap을 얻게 된다. 그림 1 은 셀룰로오스의 구조를 나타내고 있다.

† 교신저자; 인하대학교  
E-mail : joo-hyung.kim@inha.ac.kr  
Tel : (82-32-874-7325, Fax : (032)873-7325  
· 인하대학교 기계공학과  
.. 인하대학교 기계공학과 대학원

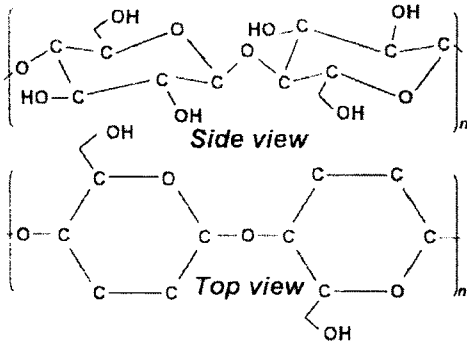


Fig.1 Chemical structure of cellulose.

### 2.2 셀룰로오스 압전 기관

셀룰로오스 EAPap의 압전효과는 실험을 통해 알려져 있다.<sup>(1)</sup> 이러한 압전효과는 표면탄성파를 발생시킬 수 있다. 표면탄성파는 전파가 아니고 외부의 열적, 기계적, 전기적 힘에 의한 입자들의 운동에서 나오는 기계적인 파동으로 Transversal Wave 또는 Rayleigh Wave라고도 한다.<sup>(8-9)</sup> 이러한 표면탄성파를 일으킬 수 있는 물질로는 LiNbO<sub>3</sub>, LiTaO<sub>3</sub>, PZT, ZnO, GaAs, Quartz, PVDF 등이 있다.<sup>(7-12)</sup> 위에서 소개된 세라믹 기관들은 그 위에 주변환경에 의해 특성이 쉽게 변화되는 민감한 감도를 가진 측정필름을 추가로 필요로 한다.<sup>(4)</sup> 그러나 폴리머 재료인 셀룰로오스는 세라믹 압전기관과 달리 표면의 변형이 쉽게 일어나고 외부 환경에도 민감하다는 특성이 있다. 그러므로 셀룰로오스 EAPap은 그 자체적으로 센서 역할을 할 수 있는 가능성을 충분히 가지고 있다.<sup>(5)</sup> 본 실험에서는 셀룰로오스 EAPap의 압전특성을 극대화하기 위해 기계적 스트레칭시 최대 압전특성을 보이는 기계적 스트레칭 비율(Drawing ratio)을 2.0으로 하여 스트레칭 후 적외선을 이용하여 건조함으로써 압전 셀룰로오스내의 분자 배열을 고정시켰다. 그림 2는 압전특성을 가진 셀룰로오스 EAPap을 제작하는 프로세스를 간략하게 보여주고 있다.

## 3. SAW device 제작

### 3.1 Inter digital tranducer (IDT)형성

SAW 디바이스는 일반적으로 빗살무늬형태의 금속 전극 전극으로 이루어진 두 개의 송수신용 변환기,

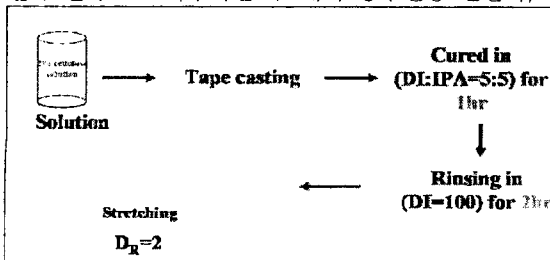


Fig.2 The film process of cellulose EAPap.

그리고 IDT로 구성되어 있다. 이 배열은 극성이 서로 다르게 연속적으로 배열되어 있어, 그 사이에 걸리는 주파수의 신호전압이 결정표면을 팽창, 압축시키면서 기계적인 파동을 발생시킨다. 이것을 표면탄성파라고 부르고 이 파는 압전기관 상에 전달되어 수신 측 전극에서 다시 역 압전효과에 의해 전자파로 바뀌게 된다. 본 연구에서 설계된 IDT 패턴은  $\lambda = 40 \mu\text{m}$  (wave length) 가지고 있으며, 두 IDT 패턴 사이의 거리는  $150\lambda$ 를 갖도록 디자인 하였다. 표 1은 SAW 디바이스의 디자인 변수를 보여주고 있다.

Table. 1 Design Parameter of IDT pattern on cellulose EAPap

Parameter	IDT pattern ( $\lambda = 40\mu\text{m}$ )
Acoustic path length	$150\lambda$
finger width/ length	$10 \mu\text{m}$
Aperture	$50\lambda$
No. of Finger pairs	60

### 3.2 셀룰로오스 기관위에 IDT 전극 형성

셀룰로오스 SAW 디바이스로 제작하기 위해서는, EAPap 위에 식각 공정을 사용하여 원하는 패턴을 제작할 수 있다. 그림 3은 셀룰로오스 상에 IDT패턴을 제조하는 공정을 나타낸다. IDT 패턴은 Lift-off 과정을 통해 제작하는데, 셀룰로오스 상에 감광막(Photoresist)을 도포하고 원하는 패턴이 새겨진 Mask를 셀룰로오스 위에 두고, 노광 후 현상 과정을 거쳐 PR에 IDT 패턴을 형성한다. 이온증착기를 이용해서  $200 \text{ nm}$  두께의 금전극을 증착시킨다. 증착은  $5.0 \times 10^{-6} \text{ Torr}$ 에서 진행되며, 전극형성 후 PR을 제거함으로써 EAPap위에 원하는 IDT 전극을 제작한다. 그림 4는 현미경과 주사전자현미경을 이용해 관찰한 셀룰로오스 표면에 제작된 IDT패턴을 보여준다.

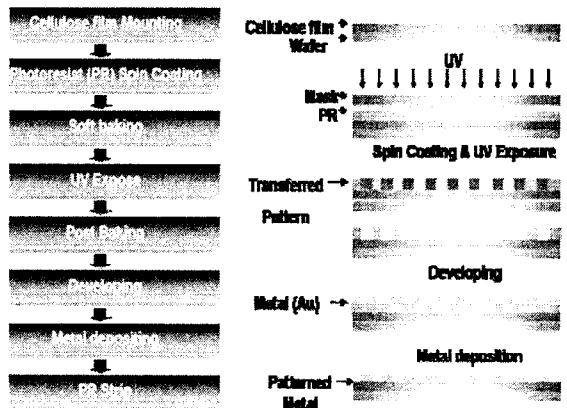


Fig.3 Lift-off process for the IDT pattern formation on EAPap.

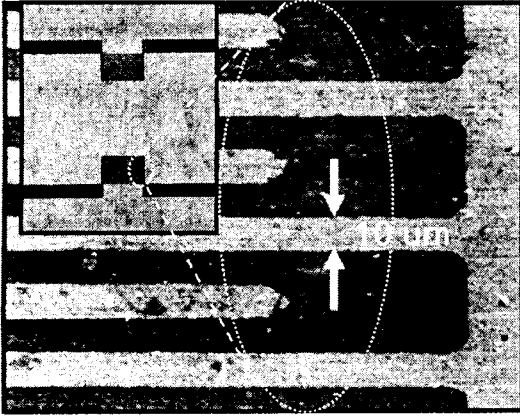


Fig.4 SEM image of the IDT patterned EAPap SAW device. The finger insert presents a microscope image of the pattern IDT on EAPap with  $\lambda = 40\mu\text{m}$ .

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 EAPap SAW Device 특성 관찰

셀룰로오스를 기판으로 제작된 EAPap SAW 디바이스를  $4 \times 3\text{cm}^2$ 의 절연틀에 전극이 형성된 필름을 부착 후, 제작된 PCB 기판 위에 고정시킨다. 노이즈를 최소화 하기 위해 얇은 백금선을 이용해 측정샘플과 PCB기판을 연결하고 이를 네트워크 어날라이저(Network Analyzer, Agilent N5230A PNA-L)와 연결한 후 측정을 하였다. 측정 범위는 20 MHz에서 100 MHz 이고 상온에서 측정하였으며 SAW 디바이스는 그림과 같이 차폐된 장치에 넣어 외부에서 오는 영향을 최소화하였다. 측정 시 존재할 수 있는 오차를 줄이기 위해 측정 전에  $50\Omega$  교정 키트(Calibration Kit)를 이용하여 교정을 진행하였다. 그림 5는 디바이스 특성을 평가하기 위해 사용된 측정장비를 보여 주고 있다. 실험에서 SAW 기판으로 사용된 필름은 실험실에서 제작된 DMAc EAPap와 Cellophane EAPap를 사용하였다. 두 종류의 EAPap위에 SAW

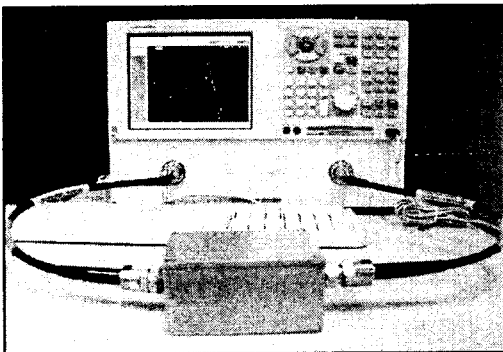


Fig.5 Measurement configuration of cellulose SAW device using a network analyzer.

디바이스를 위한 IDT 패턴공정은 동일하게 적용하였다. 실험에 사용된  $28\mu\text{m}$ - $30\mu\text{m}$ 로 비슷한 두께의 필름을 사용하였다.

표 2는 방향에 따른 영률(Elastic constant)을 보여주고 있다. 표를 통해, IDT 전극과 EAPap의 스트레칭 방향에 따라 EAPap의 영률이 달라짐을 확인할 수 있었다. 영률은 탄성과 속도의 영향을 주는 인자로 SAW 특성을 극대화 하기 위하여 IDT 전극과 필름 스트레칭 방향을 0로 하여 EAPap 샘플을 만들어 실험하였다.

Table. 2 The elastic constants of EAPap.

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

그림 6은 네트워크 어날라이저를 이용하여 Cellulose SAW 디바이스를 측정한 결과로,  $S_{21}$  파라미터는 입력 전압 대 출력 전압의 비로서 주파수에 대한 신호 에너지의 분포를 dB값으로 나타낸 것이다. 여기서 10μm의 중심주파수는 61.3MHz, 삽입손실은 47.8dB로 측정되었다.

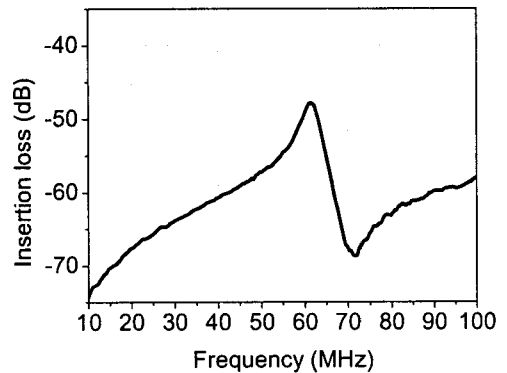


Fig.6 The measured  $S_{21}$  data of cellulose EAPap.

측정된 중심주파수를 이용하여 표면탄성파의 속도를 아래의 식을 통해 구해 낼 수 있다.

$$f_0 = \frac{v}{\lambda}$$

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 <sup>3</sup> )	0.0131/ (0.02*0.02)	0.0132/ (0.02*0.02)
Thickness (μm)	28	30
Acoustic velocity (m/s)	2446.3	2374.10

여기서,  $f_0$ 는 중심주파수이며,  $v$ 는 표면탄성파의 속도이고  $\lambda$ 는 IDT의 파장거리이다. 이 식을 이용하여 Cellulose EAPap의 표면탄성파 속도를 계산하면 2452m/s가 나온다. 또한 재료의 물성으로부터 탄성파의 속도를 구할 수 있으며 아래의 식과 같다.<sup>(10,13)</sup>

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

여기서  $v$ 는 탄성파 속도,  $c$ 는 영률, 그리고  $\rho$ 는 재료의 밀도를 나타낸다. 이 식은 등방성 재료에 적용되며 EAPap 필름의 경우 스트레칭 과정에서 등방성 재료의 특성을 띄게되어 이 식의 적용이 가능하다. 이로부터 계산된 속도는 표 3에 정리하였으며 실험으로 구해진 속도와  $\pm 10$ m/s의 오차를 보였다.

그림 8은 cellophane EAPap의 전극과 스트레칭 방향이 일치된 경우의  $S_{21}$  그래프이다. 여기서 중심주파수는 59.05MHz, 삽입손실은 39.6dB로 측정되었으며 표면탄성파의 속도는 2362 m/s로 셀룰로오스의 경우와 비슷한 결과를 보였다.

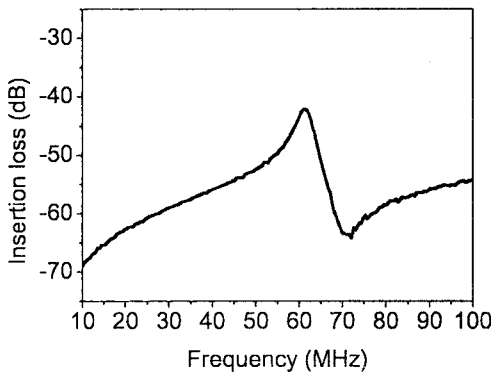


Fig. 8 The measured  $S_{21}$  data of cellophane EAPap.

## 5. 결론

본 연구에서 EAPap 필름을 기관으로 하는 SAW 디바이스를 만들어 특성을 관찰하였다. 표면 탄성파를 최대도로 발생 시키기 위해 EAPap 필름은 기계적 스

트레칭을 통해 제작되었으며, 최대영률 하에 실험하기 위해서 IDT 전극 방향과 필름의 스트레칭 방향을 0 하여 lift-off 방법을 사용해 IDT 패턴을 EAPap 위에 제작하였다. EAPap 필름의 종류에 따라 특정된  $S_{21}$ 의 값은, 중심주파수 차이를 보였고 이를 이용해 표면탄성파의 속도를 계산하였다. Cellulose EAPap 및 cellophane EAPap을 이용한 SAW 디바이스를 측정함으로써 각각 EAPap에서의 탄성파 속도는 2452 m/s 및 2362 m/s로 계산되었다.

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

- (1) 강유근, 2006 “생체 모방 종이 작동기에 직접 압전 효과에 관한 연구” 인하대학교 논문집.
- (2) 조기연, 2008 “Electro active paper of MEMS 디바이스 및 유연디스플레이 적용을 위한 셀룰로오스 마이크로 몰딩” 인하대학교 논문집.
- (3) 위규진, 강진규, 강원구, 박창엽, 1987, “압전 세라믹의 탄성 표면파 속도 측정에 관한 연구”, 한국 음향학회지 6권 4호.
- (4) 박재홍, 김재환, 2006 “표면 탄성파를 이용한 온도센서의 제작 및 특성에 대한 연구”, 한국 정밀 공학회지 제 23권 4호.
- (5) 송춘석, 2006 “셀룰로오스 솔루션에 따른 EAPap의 성능 고찰” 인하대학교 논문집.
- (6) J. Kim and S.Yun, 2006 “Discovery of Cellulose as a Smart Material” Micromolecules vol. 39, pp. 4202-4206.
- (7) V. L. Strashilov, 2000 “Efficiency of poly (vilylidene fluoride) thin films for excitation of surface acoustic waves” J. Appl. Phys. vol. 88, pp. 3582-3586.
- (8) David W Galipeau, Patrick R Story, Kelvin Avetelino and Russell D Mileham, 1997 “Surface acoustic wave microsensors and applications” Smart Mater. Struct. vol. 6, pp. 658-667.
- (9) Alfred Pohl, Member, 2000 “A Review of wireless SAW Sensors”, IEEE transactions on ultrasonic, ferroelectrics, and frequency control, vol. 47, pp. 317-332.
- (10) D.M.G. Preethichandra and Keiichi Kaneto, 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) Norman F. Foster, 1981 “Piezoelectricity in thin film materials” J. Acoust. Soc. Am. vol. 70, pp. 1609-1614.
- (12) C. Deger E. Born, H. Angerer, O.Ambacher, M. stutzmann, J. Hornsteiner, E. Riha, and G. Fischerauer, 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).