

◆ 특집 ◆ 고분자 기반 소프트 액추에이터

셀룰로오스 기반 Electro-Active Paper 작동기: 재료 및 응용

Cellulose based Electro-Active Paper Actuator: Materials and Applications

장상동¹, 양상열¹, 고현우¹, 김동구¹, 문성철¹, 강진호¹, 정혜전¹, 김재환^{1,✉}
Sangdong Jang¹, Sang Yeol Yang¹, Hyun-U Ko¹, Donggu Kim¹, Sungchul Mun¹, Jinho Kang¹, Hyejun Jung¹
and Jaehwan Kim^{1,✉}

¹ 인하대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Inha Univ.)

✉ Corresponding author: jaehwan@inha.ac.kr, Tel: 032-874-7325

Manuscript received: 2011.9.19 / Accepted: 2011.10.1

Cellulose Electro-Active Paper (EAPap) has been known as a new smart material that is attractive for a bio-mimetic actuator due to its merits in terms of lightweight, dry condition, large displacement output, low actuation voltage and low power consumption. Cellulose EAPap is made by regenerating cellulose and aligning its micro-fibrils. This paper introduces several EAPap materials, which are based on natural cellulose and its hybrid nanocomposites mixed/blended with inorganic functional materials. By chemically bonding and mixing with carbon nanotubes and inorganic nanoparticles, the cellulose EAPap can be a hybrid nanocomposite that has versatile properties and can meet material requirements for many applications. Recent research trend of the cellulose EAPap is introduced in terms of material preparations as well as application devices including actuators, temperature and humidity sensors, biosensors, chemical sensors, and so on. This paper also explains wirelessly driving technology for the cellulose EAPap, which is attractive for bio-mimetic robotics, surveillance and micro-aerial vehicles.

Key Words: Electro-Active Paper (전기활성 종이), Cellulose(셀룰로오스), Hybrid nanocomposite (하이브리드 나노복합재), Actuator (작동기), Sensors (센서)

1. 서론

일반적으로 지능재료는 전기장, 힘, 온도, 습도 등의 외부 영향에 의해 재료가 가지는 특성 중 하나 또는 그 이상이 다른 값으로 변화하는 재료를 의미하며, 특히 고분자를 이용한 지능재료는 고분자의 특성인 높은 강도와 뛰어난 충격흡수 등의 능력으로 인해 센서 및 작동기(actuator)와 같은 다양한 분야에서 응용되고 있다.¹⁻³ 최근에 주목 받고 있는 지능재료로써의 고분자 즉, 전기 활성 고분자(Electro Active Polymers, EAP)는 작동 원리에 따

라 크게 전하력(Coulomb force)에 의해 움직이는 전기 고분자(Electronic EAP)와 이온의 움직임에 의해 작동되는 이온 고분자(Ionic EAP) 두 가지로 나눌 수 있다. 전자적 고분자는 빠른 응답성과 공기 중에서 움직일 수 있다는 장점이 있으나 구동전압이 매우 높다는 단점을 가지며 정전 효과, 압전 효과, 강 유전성과 같은 특징을 가진다.⁴ 이에 반해 전도성 고분자, 탄소 나노튜브와 같은 이온활성 고분자는 구동 전압이 낮으나 이온에 의해 작동하므로, 온도, 습도 등의 환경적인 제약조건이 따르는 단점을 가진다.⁵

최근에 셀룰로오스를 근간으로 하는 전기활성 종이(Electro Active Paper, EAPap)가 개발되어 관심을 받고 있다.⁶ 이 재료는 초경량이며 대기 중에서 구동이 가능하고 생분해성과 생체 적합성이 있고 낮은 전기장 하에서도 큰 변형을 낼 수 있으며 소모전력이 낮은 장점이 있다. EAPap의 구동은 이온전이효과와 압전성에 의한 것으로 알려져 있다. EAPap는 셀룰로오스 필름의 양쪽 면에 얇은 금 전극을 증착 해서 만드는데, 두께방향으로 전기장을 가해주면 큰 굽힘 변위를 발생하며, 반대로 굽힘 변형을 주면 전기적 신호가 나타난다. EAPap는 0.25 V/ μm 의 낮은 전압에도 작동을 하고, 소모전력도 10 mW/cm²로 낮고, 큰 변형이 나오며, 수십 Hz 까지 작동이 가능하다. 이러한 특징으로 인해 초경량 고분자 전기 작동기를 마이크로와 원격구동 장치와 통합하면 원격구동 전기 활성 종이 작동기의 구현이 가능하다.⁷ 하지만, EAPap 작동기는 구동 주파수가 낮고 발생하는 힘이 작은 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 셀룰로오스를 재생하여 EAPap를 만드는 과정에서 탄소나노튜브, 전도성 고분자, 이온유체, 이산화 타이타늄(TiO₂), 이산화 주석(SnO₂), 산화아연(ZnO) 등과 화학적 결합 또는 표면도포를 함으로써 강성과 출력을 높이거나 전기, 화학적 기능을 개선한 복합재료로서의 연구가 진행되고 있다.

Fig. 1은 셀룰로오스 나노 복합재의 응용 분야를 나타내고 있다.

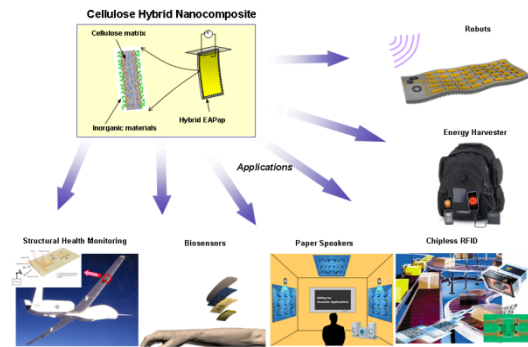


Fig. 1 Applications of cellulose smart materials

Table 1 Piezoelectric charge constant of Piezo Paper depending on the orientation and fabrication process⁹

Fabrication process	Piezoelectric charge constant [d_{31}] (pC/N)		
	Orientation of cellulose(degree)		
	0°	45°	90°
Manual	5.9	10.7	1.88
Automated	22	30.6	10.7

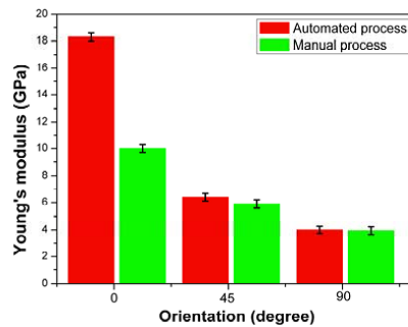


Fig. 2 Young's modulus of EAPap depending on fabrication process and orientation⁹

2. 셀룰로오스 하이브리드 나노복합재

2.1 Cellulose 압전종이

압전종이는 셀룰로오스 마이크로 섬유 배열에 의해 셀룰로오스 결정영역이 형성되어 우수한 압전 효과를 얻을 수 있다. 압전종이는 압전 세라믹보다는 낮지만 고성능의 압전 고분자에 견줄만한 압전 특성을 가지고 있다. 또한 열에 안정적이며 환경친화적이고 생적합성 및 생분해성을 가지고 있다.

압전종이는 중합도 4500의 펄프를 LiCl/DMAc 용액에 150도의 열을 가해 녹여 제조한 겔 상태의 솔루션을 이용하여 만든다.

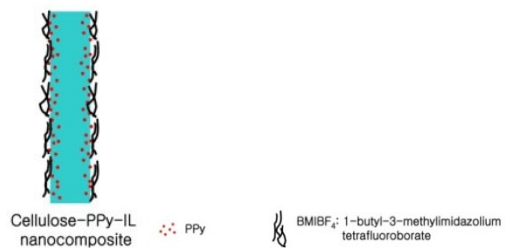


Fig. 3 Concept of CPIL nanocomposite and its actuation performance

이 솔루션을 유리판 위에서 doctor blade 를 이용하여 tape casting 하고 유기용매에 넣어 이온성분을 제거하는 방법으로 고화시킨다. 고체가 된 젖은 상태의 셀룰로오스 필름은 스트레칭을 수반한 건조과정을 거친다. 완성된 셀룰로오스의 EAPap 특성을 평가하기 위해 섬유배열방향에 대하여 다양한 각도에서의 Young's modulus 와 압전상수 측정치를 분석했다.⁸

건조과정에서 셀룰로오스 필름에 사용된 Zone Stretching 방법은 셀룰로오스 체인을 효과적으로 배열한다. 측정 결과 이 배열방향과 같은 방향으로 당긴 경우 가장 높은 Young's modulus 를, 배열방향에 45 도로 당긴 샘플은 최고 압전 상수를 나타냈다. 이러한 기계적 특성에 의한 EAPap 작동기 성능을 확인하기 위해 배열방향과 여기 전압에 따른 굽힘 변형을 측정하였고 45 도 배열 시 가장 높은 굽힘 변형치가 나타났다. 기계적 특성 평가치와 작동기 성능의 향상은 각각 Table 1 과 Fig. 2 에서 확인할 수 있다.⁹

2.2 Cellulose-Polypyrrole-Ionic Liquid 나노복합재

셀룰로오스의 이온전이 효과는 낮은 구동전압과, 큰 변위를 발생시킨다는 장점을 지니고 있지만 주변의 습도에 따라 구동특성이 달라진다는 단점을 지니고 있다. 이를 해결하기 위해, Cellulose-Polypyrrole-Ionic Liquid (CPIL) 나노복합재를 제조하였고, 상온 상습 조건에서도 큰 변형을 나타내었다. CPIL 제조를 위해 셀룰로오스 용액을 유리기판 위에 스핀 코팅 방식으로 투명한 필름을 형성한다. 폴리피롤 합성을 위한 용액을 제조하고 셀룰로오스 필름을 용액이 든 반응기에 넣어 셀룰로오스 필름 표면에 나노수준의 폴리피롤 입자의 중합을 유도 하였다. 이후, 이온성 액체에 48 시간 동안 반응 시킨다. 마지막으로 이온성 액체가 첨가된 CPIL 나노복합재를 탈이온수에 넣어 폴리피롤 층에 흡수되지 않은 이온성 액체를 제거하면 된다. 결과적으로 CPIL 나노복합재에 이온성 액체를 흡수 시킴으로써 필름의 이온 전도성을 향상시켰다.¹⁰ Fig. 3 은 CPIL 의 제조 개념을 나타낸다.

2.3 Cellulose-Carbon Nanotube 나노복합재

소량의 다중벽 탄소나노튜브(Multi-walled carbon nanotubes, MWCNT)를 셀룰로오스와 화학적으로 결합하여 기계적 성질이 우수하면서 전기적인 성질을 변화시킬 수 있는 나노복합재를 개발하였다.

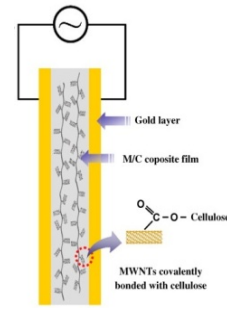


Fig. 4 Schematic of M/C EAPap actuator

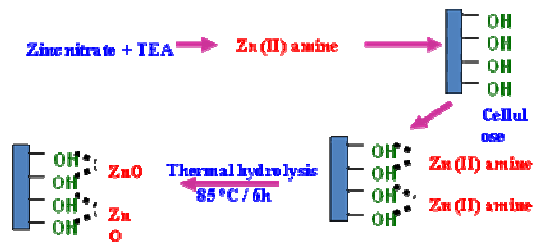


Fig. 5 Mechanism of Cellulose-ZnO nanocomposite fabrication

MWCNT 는 질산 처리에 의해 carboxyl group 과 hydroxyl group 으로 표면을 개질 하고 필터 과정을 통해 증류수로 pH 7 로 조절한다. 개질된 MWCNT 를 N,N-carbonyldiimidazole (CDI)와 반응함으로써 MWCNT 표면에 있는 carboxyl group 을 이미다졸화하여 공유 결합 장소를 형성하고 이를 셀룰로오스 용액과 60 도에서 약 18 시간 반응하여 셀룰로오스-CNT 나노복합재를 제조하고 그 성능을 평가하였다.¹¹ Fig. 4 는 이 나노복합재로 만든 작동기의 개념이다. 셀룰로오스 자체는 부도체이지만 극소량의 CNT 를 셀룰로오스에 첨가하면 CNT 를 통하여 전자가 통하여 복합재의 전기적 성질이 향상된다. 이러한 하이브리드 복합재를 이용하면 셀룰로오스 특유의 유연성과 MWCNT 의 전도성이 융합되어 화학센서, 유연 반도체를 만들 수 있다.

2.4 Cellulose-TiO₂ , Cellulose-ZnO 나노복합재

Titanium dioxide (TiO₂)는 화학적 안정성 과 전기전도성, 광촉매 활성, 광감성 등의 폭넓은 물리 화학적 특성을 가진 wide band gap 반도체로서 주목받고 있다. 본 연구에서는 TiO₂ 와 셀룰로오스 재료를 이용하여 하이브리드 복합재를 제조하였고, 두 재료의 기본 단위들 사이에 물리적 화학적 상

호 작용을 통한 시너지 효과에 의해 재료의 광학적 기계적 특성을 동시에 부여한 기능성 나노복합 재료를 개발 하였다.¹² TiO₂ 나노 입자를 15 ml 의 DMAc 용매에 넣고 약 1 시간 동안 초음파를 가해 균일한 혼합물을 형성한 후 LiCl/DMAc 용매 시스템에서 제조된 1.5 wt% 셀룰로오스 용액 50 g 에 추가하여 약 2 시간 동안 교반을 한다. 최종 셀룰로오스-TiO₂ 혼합 용액은 스핀 코팅 기법을 이용하여 유리기판 위에서 캐스팅 하여 고화 및 세정 과정을 거쳐 셀룰로오스-TiO₂ 나노복합재를 얻게 된다.¹³

산화아연은 각광받는 반도체 재료이자 압전 재료로 초소형 에너지 획득기, 전계방사형 트랜지스터 등의 활용을 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 산화아연을 Liquid phase deposition 기법을 이용하여 셀룰로오스 표면에 코팅한 복합 재료를 만들었다. 코팅은 Fig. 5 와 같이 산화아연 핵 생성과 산화아연층 성장을 위한 두 번의 화학 반응을 통하여 이루어진다.¹⁴ 산화아연층은 구 형태의 입자들을 핵으로 하여 셀룰로오스 표면에서 성장된다. 이 산화아연 막대들은 셀룰로오스 표면에 화학적으로 결합되어 잘 떨어지지 않으며 wurtzite 구조를 가지고 있어 기존의 셀룰로오스에 비해 압전성이 높을 것으로 기대된다.

3. 응용 기술

3.1 Cellulose 압전종이 스피커

압전종이에 전기장을 인가하면 정-압전 효과에 의해 기계적 변형률을 발생시키는데, 이때 인가된 전기장이 교류일 경우 그 주파수에 따른 진동으로 음압을 생성시킬 수 있다. 압전종이 스피커는 양면에 전극이 입혀진 셀룰로오스 평판 형태로 제작된다. 이와 같이 제작된 필름형 스피커는 가볍고 구조가 간단하며 다양한 형태로 제작이 가능하다. 본 연구에서는 압전에 의한 종이 스피커 실현가능성을 확인하기 위해 압전종이에 인장력을 가해 배열성을 향상시키고 깨끗한 표면을 가진 압전종이를 만들어 발생하는 음압을 측정하였다.¹⁵

Fig. 6 은 압전스피커의 개념 및 측정된 SPL (Sound Pressure Level)을 나타낸다. 크기는 7 x 10 cm 로 입력 전압이 50 V_{pp} 일 때 최대 음압이 약 40 dB 로 측정되었다. 3 kHz 이상의 높은 주파수에서 음압이 주로 나오는 것을 알 수 있다.

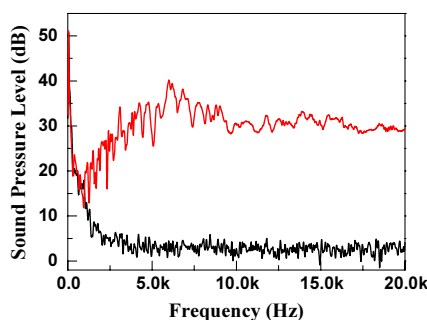


Fig. 6 Piezoelectric cellulose speaker and the measured sound pressure level

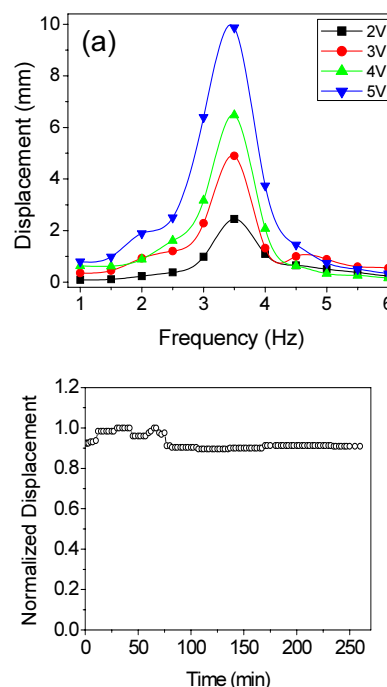


Fig. 7 Actuator performance of CPIL actuator: (a) Bending displacement (b) durability with time

3.2 CPIL 작동기

CPIL EAPap 은 이온성 액체-폴리피롤 나노층을

셀룰로오스에 형성하여 EAPap의 작동 특성을 향상시킨 것이다. Fig. 7은 CPIL 나노복합체를 이용하여 개선된 작동기의 성능으로서 굽힘 변형과 시간에 따른 내구성을 보여준다.¹⁶ CPIL 나노복합체는 전기장 인가로 인한 이온성액체 내의 이온의 이동에 의해 작동한다. CPIL EAPap은 상온 상습의 조건에서 셀룰로오스 EAPap의 최대 변위량보다 3배에 달하는 굽힘변위를 보였으며, 시간이 지남에 따라 작동기의 성능을 유지하는 내구성을 보였다. 이는 기존의 셀룰로오스 EAPap의 단점을 상당히 개선한 성과이며, CPIL 작동기의 개발은 생체모방 로봇, 센서, 원격구동 작동기 등 응용분야를 넓힌다.

3.3 Cellulose-CNT 화학센서, 유연 FET

MWCNT가 결합된 셀룰로오스는 전기적 특성을 부도체에서 도체까지 조절이 가능하므로 이를 이용하여 트랜지스터, 가스센서, 바이오센서도 만들 수 있다. 다중벽 탄소나노튜브-셀룰로오스 종이 위에 Lift-off 기술을 이용해 IDT(Inter-digital transducer) 패턴의 전극을 만들어서 기체 감지 센서를 제작했다. 제작된 센서에 메탄올, 에탄올, 1-부탄올, 1-프로판 기체를 노출시켰고 제작된 기체 센서의 저항 변화로 실험 기체에 대한 센서의 감지 재현성과 반응성을 조사했다.¹⁷ 센서의 반응성의 크기는 1-부탄올, 1-프로판올, 에탄올, 메탄올 순임을 확인했고, 특히 1-프로판올 기체에 노출시킨 경우 저항 변화와 기체의 농도가 선형적으로 비례하는 것을 확인할 수 있었다.

또한 셀룰로오스의 투과율이 높고 유연성과 전기절연성이 우수한 특성을 이용하여 탄소나노튜브를 셀룰로오스에 접목한 유연종이 Field Effect Transistor (FET)를 개발하였다.¹⁸ 개발된 종이 FET는 셀룰로오스에 결합된 단일벽 탄소나노튜브를 전자의 이동 경로로 사용함으로써 우수한 전기효과 특성을 보였다.

3.4 Cellulose-TiO₂ 바이오센서

TiO₂의 화학적 안정성과 전기전도성, 광촉매 활성, 광감성 등의 폭넓은 물리 화학적 특성을 이용하여 포도당(glucose) 바이오 화학센서를 제작하고 그 특성을 분석하였다. Glucose oxidase(GOx)는 물리적 흡착 방법으로 Cellulose-TiO₂ 복합체에 고정시켰고, 전기적 특성을 분석하였다. 다양한 농도의 포도당 용액을 제조하고 이 용액에 따른 센서의 전류-전압 (I-V) 곡선을 측정하여 효소 활성을

측정하였다. 포도당 센서의 감도는 TiO₂가 많이 함유된 센서일수록 높은 것을 확인할 수 있었다.¹³ Fig. 8은 제작된 포도당 센서의 표면 및 단면 사진과 성능을 나타낸다. 포도당 농도가 증가할수록 센서의 감도는 높아지나, 약 10 mM에 이르게 되면 센서의 감도는 더 이상 증가하지 않는다. 센서의 감도는 재료의 표면적과 구조 그리고 필름의 컨덕턴스와 같은 특성에 의존한다.

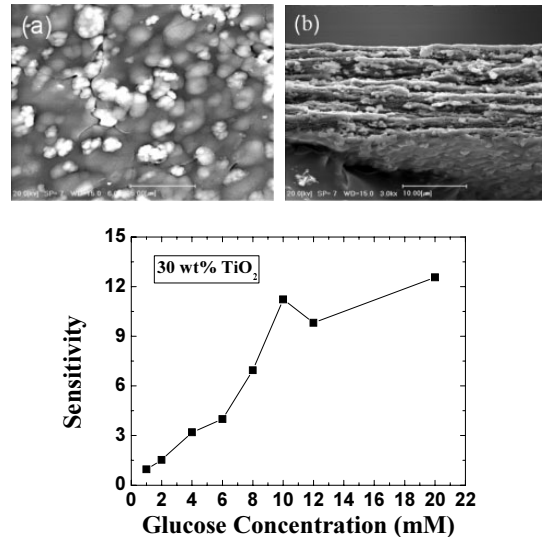


Fig. 8 SEM images of TiO₂-cellulose hybrid material with 30 wt% TiO₂ at (a) surface and (b) cross section; (c) sensitivity of the glucose biosensor

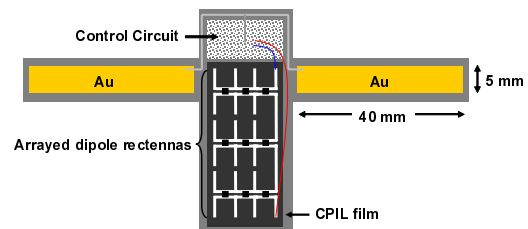


Fig. 9 Configuration of wirelessly-driven CPIL actuator and control circuit

3.5 원격 구동 EAPap 작동기

원격 구동되는 EAPap 작동기를 개발하기 위해서는 무선 에너지 공급이 필요하다. EAPap 작동기는 전기 에너지 공급이 필요한데, 재료의 특성상 도선을 연결하거나 배터리를 부착하는 식의 일반적인 방법은 실제 작동기로 적용하기에 부적합하다. 따라서, 이 문제를 해결하기 위하여 마이크로파를

이용한 무선전력전송 기술을 적용 하였다. 무선전력전송기술에 있어서 중요한 장치는 렉테나인데 이는 안테나와 정류회로가 결합되어 있어 일종의 정류 안테나이다. 렉테나는 공간을 통해 마이크로파 형태로 에너지를 공급하면 안테나에서 이를 수신한 후 정류회로에서 직류 전력으로 변환하여 공급하는 역할을 한다.¹⁹ Fig. 9는 원격구동 EAPap 작동기의 개념도이다. 렉테나를 통해 공급되는 직류전력을 제어회로에서 원하는 주파수로 변화시켜서 EAPap의 동작을 제어한다.

Fig. 10(a)는 다이폴 렉테나에서 70 cm 떨어진 거리에서 20 W의 마이크로파 전력을 방사하였을 때 렉테나에서 수신/변환하여 최종 출력된 직류전력의 결과를 보여준다. 이 결과는 9.7 GHz에서 최대 75 mW 전력을 공급할 수 있음을 보여준다. 렉테나에서 출력되는 직류전력은 제어회로로 전달된다. 제어회로는 EAPap 작동기를 구동하기 위한 4 Hz 신호로 변환하여 공급한다. Fig. 10(b)는 이렇게 전달된 전력에 의해 동작하는 EAPap의 변위량을 보여주며 4 Hz에서 약 1.8 mm의 움직임이 나타났음을 알 수 있다.²⁰ 이와 같은 결과를 통해서 다양한 생체모방 로봇, 작동기, 센서 등 다양하게 적용할 수 있을 것이 기대된다.

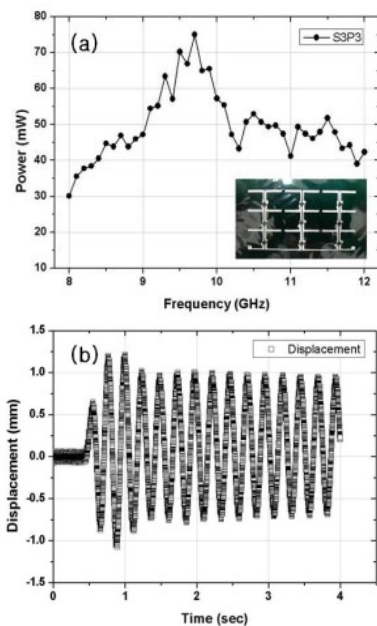


Fig. 10 (a) Performance of dipole rectenna and (b) bending displacement of the wirelessly-driven EAPap actuator²⁰

4. 결론

본 논문에서는 셀룰로오스를 기반으로 하여 다양한 무기재료를 접목시킨 나노복합재를 제조하고 이를 작동기, 센서, 스피커, 트랜지스터 등에 응용하는 원리를 소개하였다. 셀룰로오스 EAPap의 압전성을 키우기 위해 재생과정에서 잔존이온을 최대한 제거하고 Zone Stretching 방법을 사용하여 셀룰로오스 섬유를 배열한 압전 종이는 진동 감지, 충격감지 센서 및 스피커로 사용이 가능하다. 이온 전이 효과를 높인 Cellulose-PPy-Ionic Liquid 나노복합체는 상온, 상습조건에서 우수한 작동성능을 보이므로 생체 모방 종이 작동기로 적합하다. 탄소나노튜브를 적용한 나노복합체는 기계적 전기적 성질이 우수하고 전기적 특성의 조절이 용이하므로 화학센서를 비롯하여 유연트랜지스터와 같은 반도체를 만들 수 있다. 산화티타늄을 나노코팅한 셀룰로오스 나노복합체는 바이오 센서를 제작하는데 적용이 가능하며 산화아연을 코팅한 복합재 역시 유연 트랜지스터, 센서 및 에너지 획득장치로써의 응용이 가능하다. 스마트 재료로써 셀룰로오스는 생분해성, 생적합성, 유연성, 경량성, 저가격 등의 많은 장점을 가지고 있으며 이를 이용한 하이브리드 복합체는 향후 유망한 나노복합재로써 응용 분야가 매우 넓다.

후 기

본 연구는 연구재단의 창의연구진흥사업 (EAPap Actuator)의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Shahinpoor, M., Bar-cohen, Y., Simpson, Y. O. and Smith, J., "Ionic Polymer-metal Composites (IPMCS) as biomimetic sensors, actuators and artificial muscles-a review," Smart Mater. & Struct., Vol. 7, No. 6, pp. R15-R30, 1998.
2. Pelrine, R., Kornbluh, R. and Joseph, J., "Electrostriction of Polymer Dielectrics with Compliant Electrodes as a Means of Actuation," Sens. & Act. A: Physical, Vol. 64, pp. 77-85, 1998.
3. Jung, Y. D., Park, H. S., Jo, N. M. and Jeong, H. D., "Development and Performance Evaluation of Polymer Micro-actuator using Segmented

- Polyurethane and Polymer Composite Electrode,” J. of the Korean Soc. of Prec. Eng., Vol. 22, No. 2, pp. 180-187, 2005.
4. Cheng, Z. Y., Bharti, V., Xu, T. B., Xu, H., Mai, T. and Zhang, Q. N., “Electroactive Poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) copolymers,” *Sens. & Act. A: Physical*, Vol. 90, No. 1-2, pp. 138-147, 2001.
 5. Osada, Y., Okuzaki, H. and Hori, H., “Polymer gel with electrically driven mobility,” *Nature*, Vol. 355, No. 6357, pp. 242-244, 1992.
 6. Kim, J., Yun, S. and Ounaies, Z., “Discovery of cellulose as a smart material,” *Macromolecules*, Vol. 39, No. 16, pp. 4202-4206, 2006.
 7. Kim, J., Yang, S. Y., Song, K. D., Jones, S. and Choi, S. H., “Microwave power transmission using a flexible rectenna for microwave-powered aerial vehicles,” *Smart Mater. & Struct.*, Vol. 15, No. 5, pp. 1243-1248, 2006.
 8. Yang, C., Kim, J. H., Kim, J. H., Kim, J. and Kim, H. S., “Piezoelectricity of wet drawn cellulose electro-active paper,” *Sens. & Act. A: Physical*, Vol. 154, No. 1, pp. 117-122, 2009.
 9. Yun, S., Kim, J. and Lee, K. S., “Evaluation of Cellulose Electro-Active Paper Made by tape casting and Zone Stretching Methods,” *Int. J. Prec. Eng. Manuf.*, Vol. 11, No. 6, pp. 987-990, 2010.
 10. Mahadeva, S. K., Yun, K., Kim, J. and Kim, J. H., “Highly durable, biomimetic Electro-Active Paper Actuator based on Cellulose Polypyrrole-ionic liquid (CPIL) nanocomposit,” *J. Nanosci. & Nanotech.*, Vol. 11, No. 1, pp. 270-274, 2011.
 11. Yun, S. and Kim, J., “Covalently bonded-multi-walled carbon nanotubes-cellulose electro-active paper actuator,” *Sens. & Act. A: Physical*, Vol. 154, No. 1, pp. 73-78, 2009.
 12. Marques, P., Trindade, T. and Neto, C., “Titanium dioxide/cellulose nanocomposites prepared by a controlled hydrolysis method,” *Comp. Sci. Technol.*, Vol. 66, No. 7-8, pp. 1038-1044, 2006.
 13. Mohammad, M., Jung, H. and Kim, J., “TiO₂-cellulose nanocomposites manufacturing and bio-sensor application,” *Proc. of KSPE Spring Conference*, pp. 173-174, 2011.
 14. John, A., Ko, H., Kim, D. and Kim, J., “Preparation of cellulose-ZnO hybrid films by a wet chemical method and their characterization,” *Cellulose*, Vol. 18, No. 3, pp. 675-680, 2011.
 15. Kim, J.-H., Yun, S., Kim, J. H. and Kim, J., “Fabrication of piezoelectric cellulose paper and audio application,” *J. Bionic Eng.*, Vol. 6, No. 1, pp. 18-21, 2009.
 16. Mahadeva, S. K. and Kim, J., “An electro-active paper actuator made with cellulose-polypyrrole-ionic liquid nanocomposite: influence of ionic liquid concentration, type of anion and humidity,” *Smart Mater. & Struct.*, Vol. 19, No. 10, Paper No. 105014, 2010.
 17. Yun, S. and Kim, J., “Multi-walled carbon nanotubes-cellulose paper for a chemical vapor sensor,” *Sens. & Act. A: Physical*, Vol. 150, No. 1, pp. 308-313, 2010.
 18. Yun, S., Jang, S.-D., Yun, G.-Y., Kim, J.-H. and Kim, J., “Paper transistor made with covalently bonded multiwalled carbon nanotube and cellulose,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 95, No. 10, Paper No. 104102, 2009.
 19. Brown, W. C., “The history of power transmission by radio waves,” *IEEE Trans. on Microwaves, Theory and Techniques*, Vol. 32, No. 9, pp. 1230-1242, 1984.
 20. Yang, S. Y., Mahadeva, S. K. and Kim, J., “Wirelessly driven electro-active paper actuator made with cellulose-polypyrrole-ionic liquid and dipole rectenna,” *Smart Mater. & Struct.*, Vol. 19, No. 10, Paper No. 105026, 2010.