

# 생체모방 종이구동기의 원리 및 응용 가능성

## Electroactive Paper Actuator: Principle and Its Application Possibility

김재환\*, 윤성률, 정우철, 강유근  
(Jaehwan Kim, Sungryul Yun, Woochul Jung, and Yukeun Kang)

**Abstract :** This paper deals with the idea of Electroactive paper (EAPap) actuator and its application possibility. EAPap is a paper that produces large displacement under electrical excitation. EAPap is made with a cellulose paper by constructing thin electrodes on both sides of the paper. When electrical voltage is applied on the electrodes, the EAPap produces bending displacement. EAPap has merits in terms of lightweight, dryness, large displacement output, low actuation voltage and low power consumption. Since the power requirement is so small that it is suitable for microwave-driven smart actuators. This paper describes the working principle and performance of EAPap as an artificial muscle and its possibility for many applications.

**Keywords :** electroactive paper (EAPap), artificial muscle, piezoelectric effect, ionic migration effect

### I. 서론

과거 10여 년간 큰 변형을 낼 수 있는 지능재료 등이 출현함에 따라 인공근육을 만들 수 있는 가능성으로 인해 전기활성 고분자 (Electro-active polymer, EAP) 구동기에 많은 관심이 모아지고 있다. EAP는 외부의 자극에 따라 큰 변위를 생성할 뿐만 아니라 근육과 같이 탄력성이 있는, 다른 재료기술들이 낼 수 없는 특성과 성능을 가지고 있다[1-3]. EAP가 갖는 생체근육과 같은 구동을 할 수 있는 가능성은 곧 공상 과학의 꿈을 이루고자 하는 희망을 갖게 하며 인류의 문명발전에 크게 기여할 것이다. EAP는 차세대 마이크로 로봇, 오락 산업 또는 초소형 비행체의 구동과 같은 인공근육 작동기의 응용분야를 창출 하고 있다.

EAP 작동기의 응용성은 폭넓으며 많은 응용분야에 가능성을 제시하고 있다. 하지만, 지금까지 개발된 EAP의 제한된 성능으로 인해 새로운 EAP재료의 개발이 중요하다. EAP연구에 있어서 극복 해야 할 점들은 작동력 증가, 빠른 응답, 낮은 작동 신호, 그리고 내구성 등이다. 특히, 초경량의 EAP 작동기에 있어서 전력의 공급은 응용 디바이스와 연계하여 매우 중요한 문제이다.

최근에 종이를 이용한 EAP가 개발되어 관심이 모아지고 있다[4]. 일명 Electro-active Paper (EAPap) 라고 불리는 이것은 셀룰로오스를 근간으로 하는 종이로서 전기장을 가했을 때 변위가 발생하는 것을 세계최초로 발견하였다[5]. 지금까지 연구된 전기 EAP는 빠른 응답과 비교적 큰 변위가 나오지만 높은 구동전압이 요구되고, 이온 EAP는 낮은 작동전압에 큰 변위가 나오며 근육과 같은 탄력이 있지만 응답속도가 늦고 수분이 항상 유지되어야 하는 단점을 가지고 있다. 특히 초경량 소형화 EAP 작동기는 이러한 난제로 인해 디바이스의 응용이 제한되고 있다. 그러나 EAPap은 2V/ $\mu$ m 의 낮은 전압에도 구동을 하고, 소모전력이  $\sim 10\text{mW}/\text{cm}^2$ 로 낮고, 길이

대비 약 10%의 굽힘 변형이 나오며, 수십Hz까지 구동이 가능한 것을 확인하였다. 더욱이 EAPap은 대기 중에서도 몇 시간 동안 큰 성능저하가 없이 동작하는 특징이 있다. 이러한 특징은 초 경량 소형 디바이스에 응용하기 위한 현재 EAP 재료의 한계를 극복할 수 있는 것으로 사료되며 매우 희망적이다. 본 논문에서는 EAPap에 대한 소개를 성능과 구동원리 면에서 하고 응용 가능성을 짚어 보고자 한다.

### II. EAPap

EAPap은 셀룰로오스를 주성분으로 하는 종이를 이용해 만든 구동기로서 자연 고분자 재료를 사용한다. 셀룰로오스는 자연계에 나무 펄프의 섬유성분을 이루는 것으로 가느다란 섬유(fibril)가 나선형태로 꼬인 구조를 갖고 있다. 가느다란 섬유는 다시 여러 개의 마이크로 섬유(micro fibril)가 다발로 되어 있는 결정 영역이 무 결정 영역에 의해 등 간격으로 체인과 같이 연결되어 있다. 마이크로 섬유는 셀룰로오스 단결정으로 구성되어 있는 것으로 알려져 있으며 물에 잘 녹지 않으며 특수한 용매에 의해서만 결정이 분해 된다. 결정영역과 무 결정영역의 비율은 펄프의 종류, 셀룰로오스의 종류에 따라 다르다.

EAPap은 셀룰로오스를 녹여서 만든 셀로판지에 금 박막을 입혀 전극을 형성한 후 전기장을 인가한다. 그림 1은 EAPap의 사진으로 10mm x 40mm x 0.025mm의 크기를 갖고 금 전극은 0.1 $\mu$ m의 두께로 증착법으로 입혔다. 다양한 셀룰로오스를 근간으로 하는 셀로판지 (S11-S51)를 사용하여 EAPap를 제작하였으며, EAPap 샘플을 온·습도가 제어되는 환경 챔버 (10-190°C, 30-99%RH) 내에 설치하여 전기장을 인가하여 구동시켰다. 컴퓨터로 제어 된 함수 발생기를 통해 전압을 EAPap 샘플에 인가 하였다. 그리고 방진 테이블 위에 고정된 고 정밀도의 레이저 진동계를 통해 EAPap 샘플의 속도를 측정하였으며, 이 신호를 Labview 소프트웨어를 이용해 변위로 변환시켰다(그림 2). 1~7Hz사이의 주파수를 인가 전압과 동시에 변화 시키면서 움직임을 관찰 하였고, 10mm x 40mm 크기와 16-21 $\mu$ m 두께의 EAPap 샘플을 사용하였다.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 6. 29., 채택확정 : 2004. 8. 13.

김재환, 윤성률, 정우철, 강유근 : 인하대학교 기계공학과

(jaehwan@inha.ac.kr/ysy1129111@empal.com/woofe98@hotmail.com/ukeun i@hanmail.net)



그림 1. EAPap 샘플 사진.  
Fig. 1. Photograph of EAPap sample.

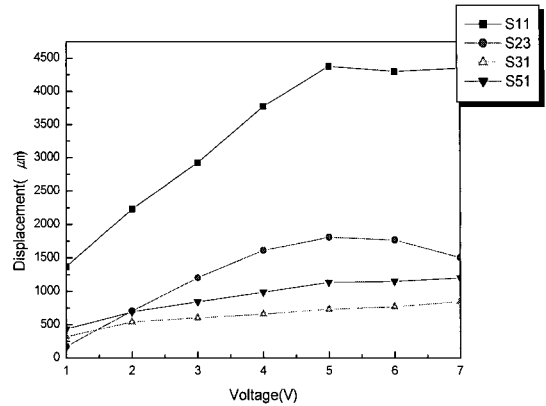


그림 3. 인가 전압에 의한 EAPap 샘플 변위 결과.  
Fig. 3. Displacement of EAPap with voltage.

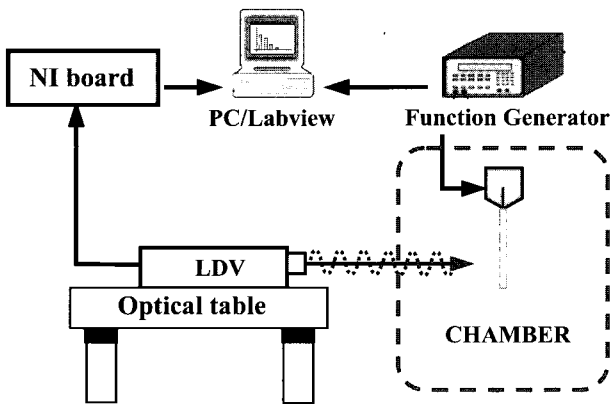


그림 2. EAPap 변위 측정 장비 그림.  
Fig. 2. Diagram of EAPap actuation test setup.

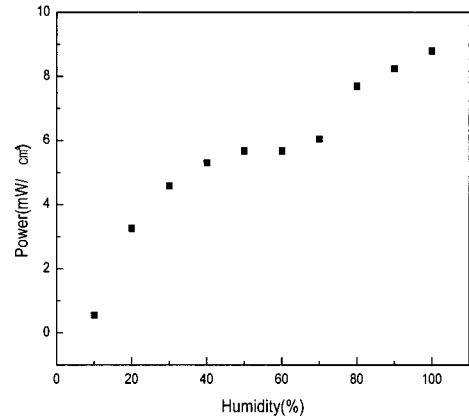


그림 4. EAPap의 전력소모.  
Fig. 4. Electrical power consumption.

III. 성능 평가

EAPap 작동기의 변위를 주파수와 전압에 따라 측정하되, 상온에서 습도의 영향을 조사하였다. 네 가지 다른 셀로판지 (S11, S23, S31, S51)를 이용한 EAPap 샘플에 전기장을 인가했을 때 끝 단의 변위는 서로 달랐으며 인가 전압에 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 그림 3은 20마이크론의 두께를 가진 EAPap 작동기를 3Hz의 주파수에서 7V(p-p)의 전압으로 가정한 결과이다. 이는 다른 전왜고분자나 탄성체 구동기보다 인가 전압이 낮았다[6]. 이 점은 상대적으로 낮은 전압 하에 구동할 수 있는 EAPap 구동기의 장점이다. 인가한 전압에 의해 발생한 굽힘 변위는 종이 빔의 첫 공진 주파수가 위치한 3Hz에서 최대였으며, 20Hz 까지 0.3mm 이상의 끝단 변위를 관찰 할 수 있었다. 다른 습도(50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 99%) 조건에서 EAPap 샘플(S11,S23,S31,S51)의 변위를 측정함으로써 습도의 영향을 알아보았다. 습도가 증가할수록 EAPap 샘플의 변위도 증가하였으며 최고 변위는 4.4mm이었다. 일반적으로 상대 습도가 증가할 때 종이의 탄성 계수는 감소하며 참고문헌에 의하면 이 탄성 계수는 습도 80%RH부터 감소하기 시작하여 99%RH에 도달하면 거의 50% 감소한다[7]. 오셀리반의 실험에 의하면 셀로판 종이의 전도성은 상대 습도가 증가하면 좋아진다[8]. 이것은 종이 안에서 이온의 움직임이 증가하기 때문이며, 습도가 증가할 때 이온 움직임의 증가와 함께 강성이 감소하여 EAPap 샘플 끝 단의 변위

가 증가한다.

EAPap 샘플의 전력 소모를 측정하기 위해서 3Hz 주파수에 5V 전압을 인가 하였고 전류 프루브(AM 503B, Tektronix)로 전류를 측정하였다. 그림 4는 다른 습도에서 종이 작동기의 전력 소모를 측정한 결과이며 전력 밀도는 습도가 99%RH까지 증가하면 8.8mW/cm² 까지 증가하였다. 이처럼 EAPap는 전력 소비량이 매우 적어서 여러 분야에 응용이 가능하다.

IV. 작동원리

EAPap의 구동원리는 두 가지로 설명될 수 있다. 먼저 압전효과는 일반적으로 셀룰로오스의 결정성 때문에 가지며 실험을 통해 EAPap 구동기의 움직임이 방향성에 의존한다는 사실을 알게 되었다. 종이는 물리 화학적으로 복합 재료를 포함하고 있다. 이 복합 구조는 리그닌, 셀룰로오스 그리고 다른 헤미 셀룰로오스 들의 집합체로 이루어져 있다. 지금까지 알려진 바에 의하면, 섬유형태의 셀룰로오스, 세포 구조에서 떨어져 나온 셀룰로오스, 그리고 니트로 셀룰로오스가 어느 정도 압전특성을 가짐이 알려져 있으며 펄프와 종이의 압전특성은 종이 펄프 세포들의 부분적인 방향성으로 설명이

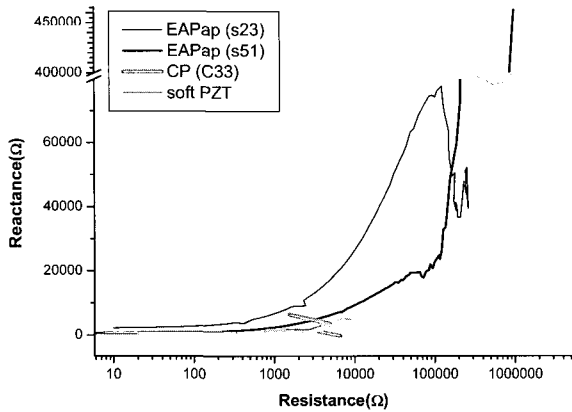


그림 5. 임피던스 비교.  
Fig. 5. Impedance comparison.

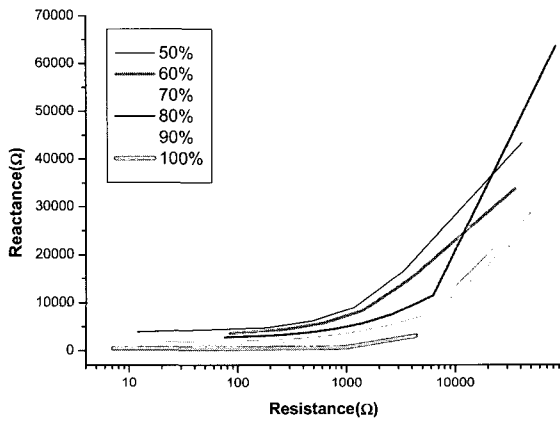


그림 6. 셀로판 종이의 임피던스.  
Fig. 6. Impedance of cellophane paper.

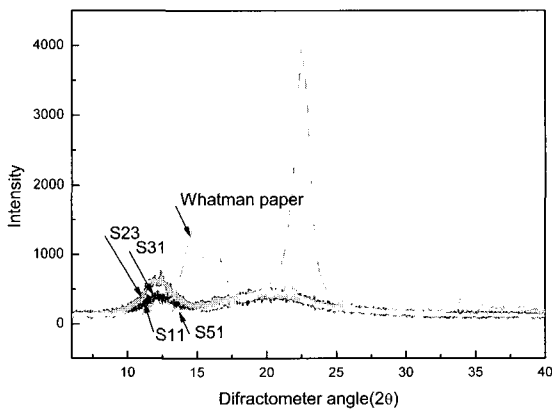


그림 7. 셀로판 종이의 X-선 회절 실험결과.  
Fig. 7. XRD of cellophane paper.

된다[9].

이온 전이 효과는 셀룰로오스내의 이온, 흡수된 물, 화학 성분 등 몇 가지 성분과 연관된 것이다. 또한 셀룰로오스의 수산기(hydroxyl)는 극성 용매와 용액에 강한 친화력을 가지며 극성 화합물의 상호작용은 셀룰로오스의 팽창, 용해성 및

유도체 형성을 이끌어 낸다. 셀룰로오스 유도체가 형성되는 동안 물리화학적 특성은 고분자화 및 치환 정도에 따라 결정된다. 그리고 평균 고분자 체인길이 또는 셀룰로오스 유도체의 고분자화 정도(Degree of Polymerization, DP)는 화학적 상호작용과 연관된 체인간격을 결정하는 수소 결합을 끊거나 에너지를 투입하여 분자를 무질서 하게 만듦으로써 조절할 수 있다. 비록 셀로판의 결정질이 EAPap의 성능에 영향을 미치지 않지만 비결정질 영역에서 수산기는 공기중의 물과 반응할 수 있고, 이것은 비결정질 영역에서 흡수 될 수 있기 때문에 이렇게 흡수된 물은 전압을 인가하면 반응하게 된다.

이와 같은 EAPap의 두 가지 구동 원리를 알아보기 위해 EAPap의 특성 파악에 필요한 전기 임피던스, XRD (X-Ray Diffractogram)를 측정하였다.

그림 5는 셀로판 종이의 전기 임피던스를 나타내며 polypyrrole 도전성 고분자, 압전세라믹과 비교하였다. 가로축은 임피던스의 실수부인 레지스탕스를 세로축은 허수부인 리액턴스를 나타낸다. 이 그래프는 아간드 도표 (Argand diagram)로 불린다[10]. 샘플에 따라 곡선이 조금씩 변하며 가진 주파수가 5Hz에서 400kHz까지 변화함에 따라 리액턴스는 저 주파수 영역에서 급속히 감소한다. 그리고 리액턴스 뿐만 아니라 레지스탕스도 주파 수 증가와 함께 점진적으로 감소하고 있다. 이 그래프는 전도성 폴리머나 압전 세라믹 물질과는 차이가 있으며, EAPap 구동기의 리액턴스는 압전 세라믹이나 전도성 고분자보다 높음을 알 수 있었다. 그림 6은 습도에 따른 C23 셀로판 종이의 임피던스를 나타내는 것으로, 습도가 증가하면 리액턴스는 감소하는 경향을 보인다.

임피던스 분석으로부터 알 수 있는 것은 좋은 성능을 내는 S23는 구동기로서의 성능이 낮은 S51보다 리액턴스가 저주파수 대역에서 낮다. 이 경향은 도전성 고분자 (C33)나 압전 재료(PZT)가 낮은 리액턴스를 저주파수 대역에서 보이는 것과 일치한다. 하지만 이러한 아간드 도표의 경향이 EAPap의 작동원리와 어떠한 연관이 있는지 현 시점에서는 명확하지 않으며 이에 대한 더 많은 연구가 필요하다.

그림 7은 와트만 종이#4와 셀룰로오스 종이의 X선 회절 실험(XRD)의 결과를 나타낸 것이다. 수평축은 회절 각도 ( $2\theta$ )이고 수직 축은 상대적 강도이다. 넓은 후광(halo)은 비결정 질을 나타내고 날카로운 봉우리는 결정질이 많음을 나타낸다[8]. 와트만 종이#4의 X선 회절 실험결과는 셀룰로오스의 결정 샘플을 나타내는 비결정 후광의 영향이 거의 없이 급격히 최고 값에 도달하고 있음을 보여준다. 셀룰로오스 종이는 금전극이 있는  $2\theta=38.5^\circ$  부분을 제외하고는 가장 넓은 후광을 나타냈다. 결정질의 정도를 측정하기 위해 X선의 회절을 사용할 수 있으나 정확한 정도를 측정하기 위해서는 기준값을 알아야 하는데 이것이 쉽지 않다. 따라서 그림 7은 단지 결정질 정도의 상대적 크기 만을 나타낸다. S51, S11, S31, S23의 순서로 결정영역이 상대적으로 많은 것을 알 수 있는데, 전기적 구동실험에 의하면 S23가 가장 좋은 성능을 보였다. 따라서 EAPap의 효과를 갖는 종이는 완전히 결정영역 또는 비결정영역이 주도적인 상태 보다는 결정영역과 비결정영역이 적절히 섞인 상태를 알 수 있다. 이것은 압전

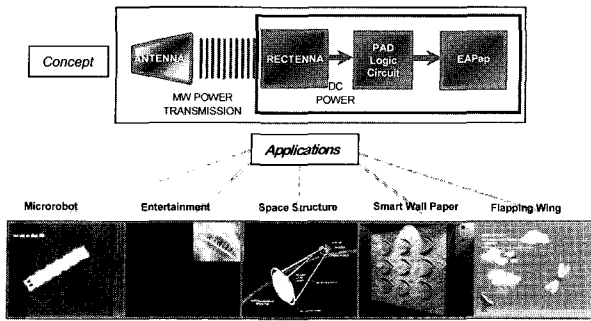


그림 8. 마이크로파 원격구동 EAPap 작동기 개념.  
Fig. 8. Concept of microwave-driven EAPap actuator.

효과와 이온전이효과가 같이 있을 수 있음을 시사한다.

전기 임피던스와 X선 회절분석 결과로부터 리액턴스가 낮은 것과 셀룰로오스의 결정영역과 비결정영역의 조합이 EAPap 구동에 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 따라서 구동 원리는 압전효과와 이온전이 효과에 동시에 의한 것으로 추측된다. 그러나 어느 효과가 얼마나 지배적인지에 대한 정량적 분석이 앞으로 필요하다.

**V. 응용분야**

EAPap은 낮은 전압에도 구동을 하고, 소모전력이 인체에 해를 미치지 않는 마이크로파의 한도 이내로 낮으므로 마이크로파로 원격 구동을 할 수 있다. 따라서, 마이크로파로 원격 구동되는 EAPap는 선형작동기, 마이크로 로봇 및 엔터테인먼트, 음향 증폭기 및 지능형 소음 저감기, 원격 구동되는 회전 날개와 같은 다양한 응용분야에 적용 할 수 있다. 마이크로파로 구동되는 선형 작동기는 EAPap에서 생성되는 굽힘 운동을 이용한 것으로, EAPap 원형 판을 적층함으로써 선형 운동을 얻어 낼 수 있으며 이 작동기에 Rectena를 적용함으로써 원격 구동이 가능하다. EAPap의 굽힘 운동을 활용한 또 다른 응용분야로 마이크로 로봇 설계를 들 수 있다. 이는 작동기의 형태를 다르게 함으로써 엔터테인먼트에 응용되어 얼굴 표정 변환, 작은 인형, 인조 꽃 및 전시용 패널을 위한 거울 배열에 적용 가능하다. 또한 EAPap 작동기는 전기장인 인가되면 큰 신장률을 가지는데 이는 음향 출력을 만들어 내기 때문에 유연하고 가벼우며 두께가 얇은 음향 증폭기나 공기로부터 음향에너지를 흡수하여 소음을 저감할 수 있는 지능형 종이 벽으로도 응용이 가능하다. 뿐만 아니라 EAPap

**김 재 환**



1985년 인하대학교 기계공학과 (공학사). 1987년 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사). 1995년 펜실바니아 주립대학교 Engineering Science & Mechanics (공학박사). 1996년~현재 인하대학교 기계공학과 부교수. 관심분야는 EAP, 압전, 자왜재료와 같은 지능재료 연구 및 응용장치 개발.

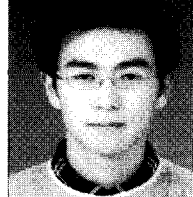
**VI. 결론**

EAPap는 셀룰로스 종이를 근간으로 하는 전기활성 고분자 재료 작동기로서 초경량, 저전압, 저전력, 건조 상태의 장점을 갖고 있다. EAPap는 압전효과와 이온 전이 효과에 의하여 변위가 발생하는 것으로 보인다. 압전효과에 대한 분석, 셀룰로스 파이버의 최적구조, 습도에 대한 영향매체 등 연구할 내용들이 많은데 앞으로 이에 대한 심도있는 연구가 진행된다면 원격 구동되는 초경량 인공근육에 EAPap가 사용될 수 있는 가능성이 있다.

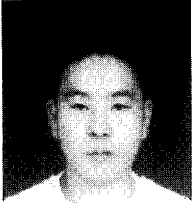
**참고문헌**

- [1] Y. Bar-Cohen Ed., "Electroactive polymer(EAP) actuators as artificial Muscles: reality, potential, and challenges," *SPIE Press*, 2001.
- [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*, vol. 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*, vol. 64, pp. 77-85, 1998.
- [4] 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, pp. 203-209, Newport Beach, CA, USA, March 2000.
- [5] J. Kim, Y. B. Seo, "Electro-active paper actuators," *Smart Materials & Structures*, vol. 11, pp. 355-360, 2002.
- [6] 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.
- [7] J. A. Bristov, *PAPER : Structure and Properties*, pp. 28-29, Marcel Dekker Inc., 1986.
- [8] R. E. Mark, "Handbook of physical and mechanical testing of paper and paperboard," New York, Marcel Dekker, 1989.
- [9] V. A. Bazhenov, "Piezoelectric properties of woods," Consultants Bureau, New York 1961.
- [10] A. J. Bard and L. R. Faulkner, "Electrochemical methods: fundamentals and applications, Wiley, New York, 1980.

**윤 성 름**

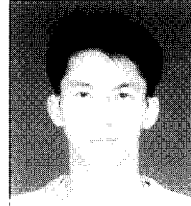


2003년 인하대학교 기계공학부 졸업. 2003년~현재 인하대학교 대학원 기계공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 EAPap, CP, CNT.



**정 우 철**

2004년 인하대학교 기계공학부 졸업.  
2004년~현재 인하 대학교 대학원 기계  
공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는  
EAPap, 고분자MEMS.



**강 유 근**

2004년 인하대학교 기계공학부 졸업.  
2004년~현재 인하대학교 대학원 기계  
공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는  
EAP characterization, 고분자MEMS.