

## 소형 압전 에너지 하베스터 구현을 위한 세라믹 크기 변화

김형찬\*\*\* · 정우석\*\*\* · 강종윤\* · 윤석진\* · 주병권\*\* · 정대용\*\*\*\*†

### Investigation of piezoelectric ceramic size effect for miniaturizing the piezoelectric energy harvester

Hyung-chan Kim\*\*\*, Woo-suk Jung\*\*\*, Chong-Yun Kang\*, Seok-jin Yoon\*,  
Byeong-kwon Ju\*\* and Dae-yong Jeong\*\*\*\*†

#### Abstract

Energy harvesting from the vibration through the piezoelectric effect has been studied for powering the small wireless sensor nodes. As piezoelectric uni-morph cantilever structure can transfer low vibration to large displacement, this structure was commonly deployed to harvest electric energy from vibrations. Through our previous results, when stress was applied on the cantilever, stress was concentrated on the certain point of the ceramic of the cantilever. In this study, for miniaturizing the energy harvester, we investigated how the size of ceramics and the stress distribution in ceramic affects energy harvester characteristics. Even though the area of ceramic was 28.6 % decreased from  $10 \times 35 \times 0.5 \text{ mm}^2$  to  $10 \times 25 \times 0.5 \text{ mm}^2$ , both samples showed almost same maximum power of 0.45 mW and the electro-mechanical coupling factor ( $k_{31}$ ) of 14 % as well. This result indicated that should be preferentially considered to generate high power with small size energy harvester.

**Key Words :** energy harvesting, piezoelectric, cantilever

## 1. 서 론

자연재해나 불의의 재난에 대비하기 위하여 시설물이나 주변 환경을 실시간으로 감시하고, 모니터링 하는 USN (ubiquitous sensor network) 구축에 관한 연구에 많은 관심이 집중되고 있다. USN를 구성함에 있어서 대두되고 있는 큰 문제점중의 하나는 넓은 지역에 산재되어 분포하는 많은 수의 센서의 전원을 공급하는 것이다. 센서를 구동하기 위해서 전선을 연결하거나 배터리를 사용할 수 있지만, 많은 수의 센서들을 선으로 연결하는 것은 현실적으로 매우 어려우며, 배터리를 사용할 경우, 배터리를 주기적으로 교환해 주어야 하며

사용된 배터리로 인해 공해가 발생하는 단점이 있다. 이러한 센서의 전원공급 문제점을 해결하기 위하여 주변 환경에서 버려지는 에너지를 유용한 전기에너지로 변환하는 에너지 하베스팅이 제안되고 있다. 특히, 최근 전자공학의 발달로 센서기기의 소형화와 이에 따른 저 전력 동작이 가능하게 됨에 따라, 주위 환경에서 버려지는 에너지를 소규모 전기에너지로 변환시키는 에너지 하베스팅(energy harvesting)이 현실적으로 실현 가능하게 되었다. 에너지 하베스팅 방법으로는 태양발전, 열전발전, 전자기에 의한 발전, 압전체를 이용한 발전 등이 있으며, 그 중에서 압전 에너지 하베스팅은 외부 날씨에 영향을 받지 않으며, 에너지 밀도가 높아 많이 연구되고 있다<sup>[1-3]</sup>.

압전 에너지 하베스팅에서 생성되는 전기에너지는 압전체의 변형량과 압전재료의 전기-기계결합계수의 제품에 비례하여 증가한다<sup>[4]</sup>. 현재, 압전에너지 하베스팅에 많이 사용되는 압전체는  $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$  계열의 세라믹으로, 전기-기계결합계수가 약 50 %로 폴리머에 비해 높지만 매우 단단하며, 쉽게 깨져서 큰 변형에서 사

\*한국과학기술연구원, 박막재료연구센터(Thin Film Material Research Center KIST)

\*\*고려대학교 전자전기공학과(School of Electrical Engineering, Korea Univ.)

\*\*\*호서대학교 전자공학과(Electronics, Hoseo Univ.)

\*\*\*\*명지대학교 신소재공학과(Department of Materials Science & Engineering, Myongji Univ.)

†Corresponding author: dyjeong@mju.ac.kr

(Received : February 22, 2008, Accepted : May 23, 2008)

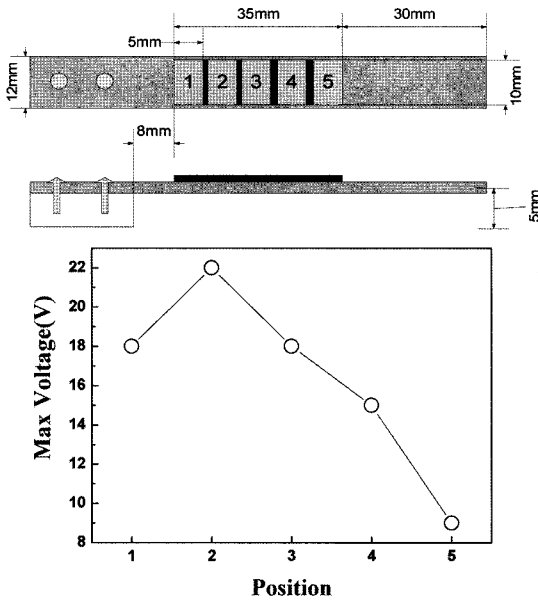


그림 1. 압전에너지 하베스터에서 세라믹 위치에 따른 출력 전압의 변화  
 Fig. 1. Measured output voltage according to the ceramic position in cantilever type energy harvester.

용할 수 없는 단점이 있다. 따라서 압전 세라믹 깨짐을 방지하고 적은 진동에서도 비교적 큰 변위를 얻기 위하여 세라믹을 유연한 기판에 붙여 만든 캔틸레버(cantilever)모양이 일반적으로 에너지 하베스팅에 많이 이용되고 있다<sup>[3,5-6]</sup>.

김형찬등의 결과에 의하면, 캔틸레버에 부착한 세라믹은 항상 그림 1의 “2”번 위치에서 파괴되며, 이러한 결과는 캔틸레버에 인가된 힘이 세라믹 전체에 고르게 전달되지 않고 세라믹의 위치에 따라 다르게 분포되는 것으로 해석되었다<sup>[6]</sup>. 특히, 그림 1의 압전체 “5”번 위치는 가해주는 응력이 최소로 전체 에너지의 총량에 크게 기여하지 못한 것으로 생각되었다.

한편, 센서노드를 소형으로 제작하기 위해서는 에너지 하베스터의 크기를 가능한 작게 제작해야 한다. 따라서 본 연구에서는 유연한 압전 캔틸레버의 부착한 압전 세라믹에 응력이 거의 가해지지 않는 부분을 잘라내 세라믹의 크기를 소형화 하였으며, 이에 따른 출력 에너지를 측정하여 세라믹의 크기에 따른 압전 에너지 하베스팅 특성을 관찰하고자 하였다. 또한, 서로 다른 크기의 압전 세라믹을 이용한 하베스터를 제작하고, 생산된 전기에너지를 슈퍼 캐패시터(super capacitor)에 저장하여 그 특성을 평가하였다.

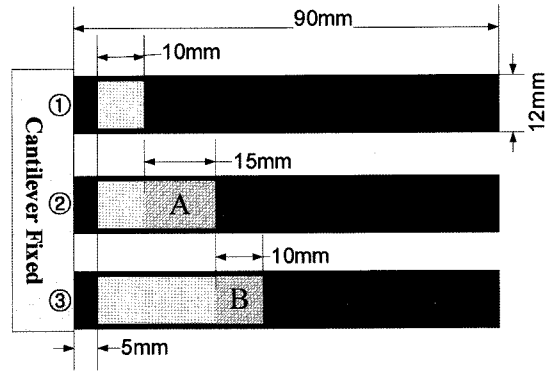


그림 2. 캔틸레버의 모양과 크기  
 Fig. 2. Schematic of cantilever shape and ceramic size for experiment.

## 2. 실험

그림 2는 실험에서 사용한 캔틸레버모양의 유니몰프 압전 에너지 하베스터의 모양을 나타내었다. 캔틸레버 기판의 재질은 단단하면서도 비교적 유연함이 보장되는 FR-4를 사용하였고, 크기는  $90 \times 12 \times 1.6 \text{ mm}^3$ 이다. 사용한 압전 세라믹은 PZT계 세라믹으로 (동일기연, D223, piezoelectric constant  $\sim 500 \text{ pC/N}$ ) 두께는 0.5 mm이며, ①, ②, ③번 시료의 크기는 각각  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ ,  $10 \times 25 \text{ mm}^2$ ,  $10 \times 35 \text{ mm}^2$ 이다.

기계적 에너지는 진동기(Brüel & Kjaer사, Type 4809)를 이용하여 60 Hz의 주파수에서  $3.34 \text{ m/s}^2$ 의 가속도와  $46.5 \mu\text{m}$ 의 변위로 생성한 후 압전하베스터에 가하였다. 한편, 캔틸레버의 최대 변형은 캔틸레버 자체의 고유 주파수와 진동원의 주파수가 일치할 때 발생하므로 캔틸레버의 끝에 표준 질량을 가하여 캔틸레버의 고유 주파수가 60 Hz가 되도록 하였다<sup>[8-10]</sup>.

압전하베스터의 발생출력은 그림 3에서 외부저항의 크기를 변화시키면서 출력전압을 오실로스코프를 이용

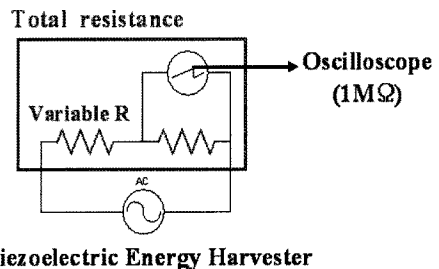


그림 3. 압전에너지 하베스팅 측정회로  
 Fig. 3. Schematic of the measurement circuit for energy harvester.

하여 측정된 값으로부터 계산하였다. 세라믹의 크기 차이에 의해 압전하베스터의 효율이 달라질 것으로 생각하였으며, 압전하베스터의 전기-기계결합계수는 압전하베스터를 전기적으로 단락하였을 때 변화하는 공진 주파수를 측정하여 계산하였다.

한편, 제작한 압전하베스터의 충전특성은 0.1 F-5.5 V의 슈퍼캐패시터의 충전전압을 시간의 흐름에 따라 측정하여 평가하였다. 슈퍼캐패시터의 빠른 충전을 위하여 진동원의 주파수는 60 Hz로 고정된 상태에서 가속도와 변위를 각각 32.8 m/s<sup>2</sup>와 463 μm로 증가시켜 측정하였다.

### 3. 결과 및 검토

그림 4는 제작된 각각의 캔틸레버형 압전 에너지 하베스터의 고유 주파수를 보여주고 있다. 세라믹이 없는 기판의 고유주파수는 106.5 Hz이며 세라믹의 길이가 10, 25, 35 mm로 증가함에 따라 고유 주파수도 119.5, 130.5, 133.3 Hz로 증가하고 있다. 이것은 기판보다 Young's modulus가 큰 세라믹을 기판에 고정함에 따라 캔틸레버의 유효 modulus가 증가한 것을 보여준다. 특히, 세라믹의 길이가 10 mm에서 25 mm로 15 mm 증가할 때 주파수는 11 Hz (0.44 Hz/mm) 증가한 반면, 25 mm에서 35 mm로 10 mm 증가할 때 할 때 2.8 Hz (0.28 Hz/mm)로 서서히 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과는 ②번 캔틸레버의 A부분은 전체 압전캔틸레버의 modulus에 큰 영향을 주고 있으나, ③번 캔틸레버의 B부분의 영향은 적음을 보여주고 있다. 서론에서 언급한 그림 1의 결과를 고려하면, 2번 위치에 걸리는

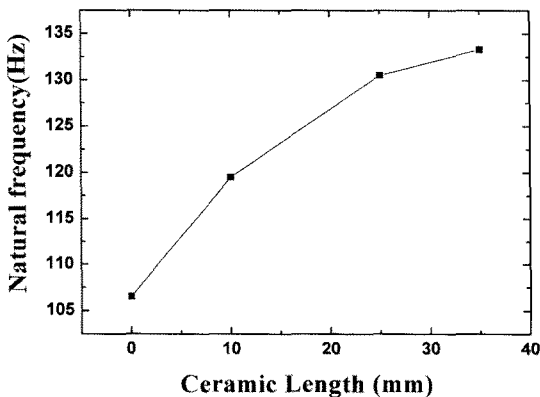


그림 4. 세라믹 길이변화에 대한 캔틸레버 고유 주파수의 변화  
Fig. 4. Natural frequency of cantilever with the different ceramic length.

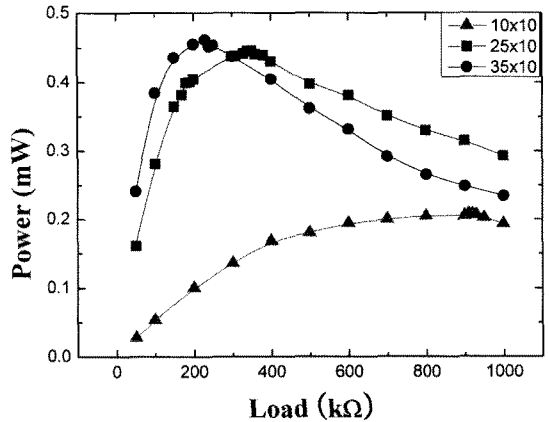


그림 5. 길이가 다른 세라믹을 가진 하베스터의 저항변화에 따른 출력 파워  
Fig. 5. Output power of cantilever with the different ceramic size according to the electrical load.

응력이 최대가 되므로 ①번 캔틸레버의 세라믹은 길이가 너무 짧아 응력을 효과적으로 가해주지 못한 것으로 생각되며, ②번 캔틸레버의 세라믹은 ③번 시료와 큰 차이 없이 2번 위치에 응력을 가해주어 ③번 시료의 B부분은 응력을 전달하는데 큰 영향을 주지 않는 것으로 생각된다.

그림 5는 진동수를 60 Hz로 조절한 후 외부 저항 변화에 따른 압전 캔틸레버의 출력파워를 나타낸 결과이다. ①, ②, ③ sample은 각각 910, 350, 230 kΩ에서 최대 파워가 발생하였다. 주기적으로 진동하는 압전 발전기의 최대 출력파워는 세라믹이 외부의 impedance와 일치할 때 나타나며 식 1과 같이 계산된다<sup>[11]</sup>.

$$Z = \frac{1}{2\pi fC} \tag{1}$$

Z는 matching 되었을 때의 impedance이며, f는 캔틸레버의 고유진동수이며, C는 세라믹의 전기용량(capacitance)이다. 60 Hz에서 진동하고 있는 ①, ②, ③ 캔틸레버의 최대 출력이 나타나는 impedance를 식 1을 이용하여 계산하면, 세라믹의 크기가 증가함에 따라 전기용량이 증가하고 따라서 계산되는 impedance는 912, 349, 243 kΩ으로 감소하였다. 이렇게 계산된 값은 측정된 값과 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

크기가 다른 세라믹을 이용한 캔틸레버의 최대 출력을 비교하면 ②와 ③은 0.45 mW로 거의 같으나 ①은 0.2 mW로 매우 적음을 알 수 있다. 따라서 ②의 경우 ③에 비해 세라믹의 크기는 10 mm 짧지만 생성되는 최대 파워는 거의 같으며, 따라서 생성되는 파워 밀도

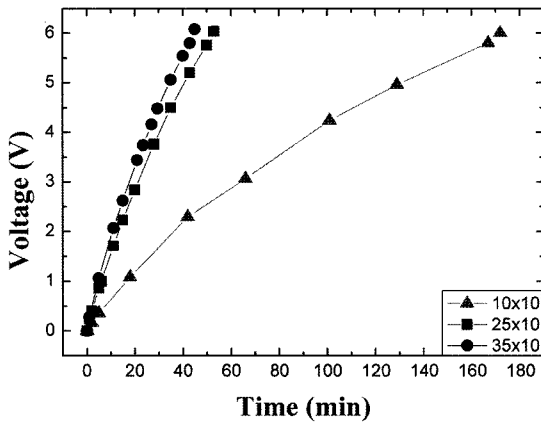


그림 6. 길이가 다른 세라믹을 이용한 0.1 F-5.5 V 슈퍼캐패시터 충전시간 비교  
Fig. 6. Comparison of charging time of cantilever with the different ceramic length into 0.1 F-5.5 V super-capacitor

는 ②의 경우  $1.80 \text{ W/m}^2$ 로 ③의  $1.28 \text{ W/m}^2$  보다 큼을 알 수 있다. 물론 ①의 경우 파워 밀도가  $2.0 \text{ W/m}^2$ 로 ②, ③ 보다 크지만 절대적인 파워가 적다. ②와 ③의 최대출력이 비슷한 것은, 그림 1에서 4, 5번 위치(②와 ③의 차이에 해당되는 부분)에 걸리는 응력이 매우 적어 출력파워에 크게 기여를 하지 않은 결과로 해석할 수 있다.

압전 에너지 하베스터의 출력 파워는 하베스터의 전기기계결합계수의 제곱에 비례하는데 아래 식 2를 이용하여 캔틸레버의 전기기계결합계수  $k_{31}$  값을 계산할 수 있다<sup>[12]</sup>.

$$k_{31} = \sqrt{\frac{f_{open}^2 - f_{short}^2}{f_{short}^2}} \quad (2)$$

$f_{short}$ 는 세라믹을 전기적으로 short시킨 상태에서의 캔틸레버의 고유주파수이며,  $f_{open}$ 는 세라믹을 전기적으로 open시킨 상태에서의 캔틸레버의 고유 주파수이다. 이 식을 이용하여 측정하는 전기-기계결합계수는 세라믹 재료 자체의 전기-기계결합계수가 아닌 캔틸레버 전체의 전기-기계결합계수이다. 측정된 주파수로부터 계산한 ①의 전기기계 결합계수는 8%로 ②와 ③의 14%에 비해 작았다. 그러나, ②와 ③은 측정 오차 범위 안에서 서로 일치하였으며, 이것은 세라믹 크기가 ②와 ③일 때 최대 출력파워의 차이가 거의 없는 앞의 결과와 일치한다.

그림 6은 3가지 캔틸레버를 사용하여 0.1 F-5.5 V의 슈퍼 캐패시터에 충전하면서 충전시간을 상호 비교해

그린 그래프이다. 빠른 충전을 위하여  $32.8 \text{ m/s}^2$ 의 가속도에  $463 \mu\text{m}$  변위의 비교적 큰 진동을 가했으나, 주파수는 60 Hz를 유지하였다. 5.5 V에 도달하는 시간은 ③ 캔틸레버가 ②보다 약간 빠르게 충전되었으며, 이것은 최대 출력 파워가 비슷하다고는 하나 ③ 캔틸레버는 전극면적이 ②에 비해 커 발생하는 전하량과 전류가 큰 것으로 생각된다. ② 캔틸레버는 ③ 캔틸레버 세라믹을 기준으로 면적은 28.6% 줄었지만 5.5 V 충전 시간은 53분으로 ③ 캔틸레버 45분에 비해 18.6% 증가하여 줄어든 면적에 비해 빠른 속도로 슈퍼캐패시터를 충전함을 알 수 있었다.

이상의 결과들은 ③이 ②에 비해 크기가 커져 전기용량(capacitance)은 증가하나 실제 캔틸레버에서 생산되는 전기에너지는 세라믹의 크기에 직접 비례하지 않는다는 것을 보여주며, 압전하베스터를 소형화하면서 원하는 출력을 얻기 위해서는 캔틸레버에 걸리는 응력 분포와 세라믹 크기를 고려해야 함을 말해준다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 캔틸레버형 압전 에너지 하베스터에 사용되는 압전세라믹의 크기를 조절하여 출력파워를 측정, 비교하였으며, 실제 상용 슈퍼캐패시터에의 충전 시간을 관찰하였다. 압전캔틸레버에 인가되는 응력 분포를 고려하여 세라믹의 크기를 조절한 결과 일정크기 이상의 세라믹에서는 크기에 따른 출력이 크게 변화하지 않음을 알 수 있었다. 본 실험에서는 크기가 다른  $10 \times 25 \times 0.5 \text{ mm}^3$ 와  $10 \times 35 \times 0.5 \text{ mm}^3$ 의 세라믹을 이용한 캔틸레버의 전기-기계결합계수를 측정된 결과 크기에 관계없이 약 14%를 나타내었다.  $10 \times 35 \times 0.5 \text{ mm}^3$  크기의 세라믹을  $10 \times 25 \times 0.5 \text{ mm}^3$ 로 전체 면적은 28.6% 작아졌지만, 0.1 F-5.5 V 슈퍼캐패시터에 충전되는 시간은 단지 18.6%만 증가하였다. 이러한 결과는 압전 캔틸레버를 소형화하기 위해서는 캔틸레버에 부착한 압전 세라믹에 걸리는 응력분포를 고려해야 함을 보여준다.

## 감사의 글

본 연구는 KIST 기관고유 (코드번호 2E19860)와 기초기술이사회 정책연구(코드번호 2N30500)의 지원에 의해 연구되었으며, 이에 감사합니다.

## 참고문헌

- [1] S. Roundy, P. K Wright, and J. M. Rabaey, "energy

scavenging for wireless sensor networks with special focus on vibrations”, *Kluwer Academic Pub.*, Boston, 2004.

[2] K. Ren, Y. Liu, X. Geng, H. F. Hofmann, and Q. Zhang, “Single crystal PMN-PT/Epoxy 1-3 composite for energyharvesting application”, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.*, vol. 53, no. 3, pp. 631-638, 2006.

[3] H. W. Kim, A. Batra, S. Priya, K. Uchino, D. Markley, R. E. Newnham, and H. F. Hofmann, “Energy harvesting using a piezoelectric ‘Cymbal’ transducer in dynamic environment”, *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 43, no. 9, pp. 6178-6183, 2004.

[4] K. Uchino and J. R. Giniewicz, *Micromechatronics*, Marcel Dekker, Inc., New York, 2003.

[5] Y. S. Lee, “Shaping of piezoelectric polyvinylidene fluoride polymer film for tip position sensing of a cantilever beam”, *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 14, no. 4, pp. 225-230, 2005.

[6] J. S. Kim, “Dielectric and piezoelectric properties of 0.125PMN-0.435PT-0.44PZ ceramic for ultrasonic motor applications”, *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 6, no. 5, pp. 392-399, 1997.

[7] H. C. Kim, D. Y. Jeong, S. J. Yoon, and H. J. Kim, “Analysis of the failure position in the unimorph cantilever for energy harvesting”, *Kor. J. Mater. Res.* vol. 17 no. 2, pp. 121-122, 2007.

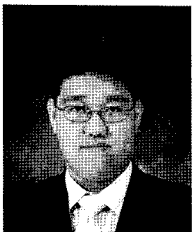
[8] S. Roundy and P K Wright, “A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics,” *Smart Mater. Struct.* vol. 13. no. 4, pp. 1131-1142, 2004.

[9] S. Roundy, E. S. Leland, J. Baker, E. Carleton, E. Reilly, E. Lai, B. Otis, J. M. Rabaey, P. K. Wright, and V. Sundararajan, “Improving power output for vibration-based energy scavengers”, *IEEE Pervasive Computing*, vol. 4, issu.1, pp. 28-36, 2005.

[10] H. C. Kim, H. C. Song, D. Y. Jeong, H. J. Kim, S. J. Yoon, and B. K. Ju, “Frequency tuning of unimorph cantilever for piezoelectric energy harvesting,” *Kor. J. Mater. Res.*, vol. 17, no. 12, pp. 660-663, 2007.

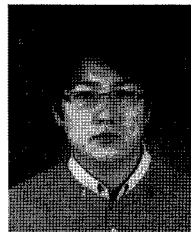
[11] T. L. Floyd, *Principles of Electric circuits*, Prentice Hall, Upper Saddle River, N. J., 2000.

[12] C. H. Park, “Dynamics modelling of beam with shunted piezoelectric elements”, *J. Sound and vibration*, vol. 268, no. 1, pp. 115-129, 2003.



김형찬

- 2006년 서울산업대학교 신소재공학과 졸업(공학사)
- 2006년~현재 한국과학기술연구원 박막재료연구센터 학생연구원 및 고려대학교 공과대학 전자전기공학과 석사과정
- 주관심분야 : 압전재료, 에너지 하베스팅



정우석

- 2002년 클라우드 소프트 회사 재직
- 2003년 호서대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 2005년 호서대학교 전자공학과 졸업(공학석사)
- 2005년~현재 KIST 박사과정 학생연구원 및 호서대학교 박사과정
- 주관심분야 : 초음파 액추에이터 구동 및 구동 드라이버, 센서 네트워크, 에너지 하베스팅



강종운

- 1993년 연세대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학사)
- 1995년 연세대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학석사)
- 2000년 연세대학교 공과대학 전기컴퓨터공학과 졸업(공학박사)
- 2002년~2004년 The University of Birmingham, Post-doc.
- 2000년~현재 KIST 박막재료연구센터 선임연구원
- 주관심분야 : 압전 액추에이터, 마이크로 파 소자, 마이크로파 강유전체



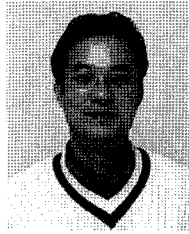
윤석진

- 1983년 연세대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학사)
- 1985년 연세대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학석사)
- 1992년 연세대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학박사)
- 1992년~현재 한국과학기술 연구원 박막재료연구센터 센터장
- 주관심분야 : 액추에이터, 고주파 유전체



### 주 병 권

- 1986년 서울시립대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 1988년 서울시립대학교 전자공학과 졸업 (공학석사)
- 1995년 고려대학교 전자공학과 졸업 (공학박사)
- 1988년~2005년 KIST 마이크로 시스템 연구센터 책임연구원
- 1996년 Univ. South Australia(Australia) 방문연구원
- 2005년~현재 고려대학교 전기전자전파 공학부 부교수
- 주관심분야 : Flat panel display(FED, OLED), MEMS, Nano-devices



### 정 대 용

- 1994년 서울대학교 무기재료공학과 공학사
- 1996년 서울대학교 무기재료공학과 공학 석사
- 2000년 서울대학교 재료공학부 박사수료
- 2004년 Pennsylvania State Univ. Materials 공학박사
- 1994년~1995년 한국과학기술연구원 위촉연구원
- 1996년~1997년 COSMO Ind. 연구원
- 2004년~2005년 TRS Technologies 연구원
- 2005년~2006년 Tohoku Univ. RIEC Post Doc.
- 2006년~2008년 한국과학기술연구원 박막재료연구센터 선임연구원
- 2008년~현재 명지대학교 신소재 공학과 조교수
- 주관심분야 : 압전재료, 센서, 에너지 하베스팅, 액츄에이터