

진동을 이용한 Energy Harvesting 기술의 연구동향

문석준 | 한국기계연구원 객문규 | 동국대학교

1. 서론

Energy harvesting은 주위에 산재해 있는 에너지를 수집해서 사용할 수 있는 전기 에너지로 변환시키는 과정을 말한다(연구자들에 따라 power harvesting이라는 용어를 사용하기도 한다). 최근 무선 기술(wireless technology) 및 MEMS와 같은 저 전력 전자기술 (low-power electronics)의 발전과 더불어 휴대용 전자기기 및 무선 계측기 등에 대한 수요가 증가하고 있다. 이러한 장비들은 대부분 휴대할 수 있는 소형 장비로서 자체 전력공급기를 가지고 있다. 대부분의 장비들은 전력공급기로서 재래식 전지를 이용하고 있으나, 사용수명이 짧다는 것이 문제이다. 따라서 원하는 기능을 유지하기 위해서는 지속적으로 충전을 하거나 전지를 교체해야 한다. 이러한 작업은 매우 비효율적이며, 불가능한 경우도 있다. 예를 들면, 교량에 설치된 건전성 감시용 계측기나 야생동물에 부착된 위치추적 장치 등 무선 계측기의 전지 교체는 쉽지도 않고 비용도 많이 든다. 만약 계측기 주위에 존재하고 있는 다양한 형태의 에너지를 수집하여 전기 에너지(또는 전원)로 활용할 수 있다면, 문제는 쉽게 해결할 수 있다. 이것이 energy harvesting 기술이 활용된 한 예이다. 실제 energy harvesting 기술이 실현되고 있는 방법을 에너지원에 따라 나누면, solar energy, kinetic-flow energy, combustible autophagous structure-power (or structure-fuel), electromagnetic energy, thermal energy harvesting 등이 있다. 표 1에는 energy harvesting에 활용될 수 있는 다양한 에너지원을 비교·정리하였다. 본 원고에서는 kinetic-flow energy harvesting 중 진동을 이용한 방법 즉, energy harvesting 장치 주위에 존재하고 있는 진동으로부터 유용한 전기에너지를 변환하는 방법에 대해서만 기술하고자 한다. 기계/구조 진동은 MEMS 기술을 이용하여 비교적 쉽게 전기에너지로 변환될 수 있는 잠재적인 전력원으로 알려져 있다. 예를 들면, 무선 계측기는 저 전력 VLSI 설계 기술의 발전에 힘입어 수십 ~ 수백 μ W의 전력만 있으면 기능을 발휘할 수 있다. 이 정도의 낮은 전력은 지금도 energy harvesting 기술로 충분히 얻을 수 있을 것으로 판단하고 있다. 진동을 활용하여 전기에너지를 얻는 방안으로서 압전(piezoelectric), 정전기(electrostatic) 및 전자기(electromagnetic) 등이 있으며, 표 2에 에너지 저장 밀도를 비교하였다.

이 분야에서 주도적으로 연구 활동을 하고 있는 팀을 살펴보면 아래와 같다.

- Mechanical Engineering, Univ. of California at Berkeley (미국) : Roundy 교수(현재 Australian National Univ.)를 중심으로 활발하게 연구를 진행 중에 있다. 이론적 접근뿐 아니라 실험적인 면에서도 좋은 결과를

발표하고 있다^[1, 2, 3, 4, 5].

- Center for Acoustics & Vibration, Pennsylvania State Univ. (미국) : 항공공학과 교수인 Lesieutre, 전기공학과 교수 Ottman과 Hofmann이 한 팀이 되어서 연구를 진행하고 있으며, energy harvesting 기술과 관련된 회로 측면에서 좋은 결과를 발표하고 있다^[6, 7, 8].
- Center for Intelligent Material Systems and Structures, Virginia Polytechnic Institute and State Univ. (미국) : Inman 교수와 Sodano 박사를 중심으로 연구활동이 진행되고 있다. 여러 편의 논문들이 발표되고 있으나, Sodano 박사가 Michigan Technical Univ.으로 이동한 후 뚜렷한 성과가 보이지 않는다^[9, 10].
- Control and Power Research Group, Imperial College London (영국) : 전기전자공학과 교수인 Mitcheson을 중심으로 저 주파수 영역에서 사용할 수 있는 MEMS electrostatic micropower generator에 대한 연구를 수행하고 있다^[11, 12].
- VIBES (Vibration Energy Scavenging) Project (영국) : Univ. of Southampton을 중심으로 총 9개 기관이 컨소시엄 형태로 수행중인 과제로서, piezoelectric 및 electromagnetic energy harvesting에 관한 연구를 수행하고 있다^[13].

표 1. Energy and power sources comparisons

Power source	Power (μ W)/cm ³	Energy (Joules)/cm ³	Power (μ W)/cm ³ /yr	Secondary storage needed?	Voltage regulation?	Commercially available?
Primary battery	N/A	2,880	90	No	No	Yes
Secondary battery	N/A	1,080	34	N/A	N/A	Yes
Micro fuel cell	N/A	3,500	110	Maybe	Maybe	No
Ultra capacitor	N/A	50–100	1.6–3.2	No	Yes	Yes
Heat engine	1×10^6	3,346	106	Yes	Yes	No
Radioactive (⁶³ Ni)	0.52	1,640	0.52	Yes	Yes	No
Solar(outside)	15,000*	N/A	N/A	Usually	Maybe	Yes
Solar(inside)	10*	N/A	N/A	Usually	Maybe	Yes
Temperature	40*†	N/A	N/A	Usually	Maybe	Soon
Human power	330	N/A	N/A	Yes	Yes	No
Air flow	380‡	N/A	N/A	Yes	Yes	No
Pressure variation	17*	N/A	N/A	Yes	Yes	No
Vibrations	375	N/A	N/A	Yes	Yes	No

★ Measured in power per square centimeter, rather than power per cubic centimeter.

† Demonstrated from a 5°C temperature differential.

‡ Assumes an air velocity of 5m/s and 5 percent conversion efficiency.

♣ Based on 1cm³ closed volume of helium undergoing a 10°C change once a day.

2. 압전재료를 이용한 Energy Harvesting

압전 재료는 압전 효과(또는 압전 현상)를 이용하여 계측기 또는 액추에이터 개발에 널리 활용되고 있다. 압전 효과는 1880년에 피에르와 폴 자크 퀴리에 의해 발견되었으며, 석영 · 전기석 · 로셀염 같은 결정을 어떤 결정축

을 따라 압력을 가하면 결정의 표면에 전압이 생기는 것을 관측했다. 다음 해에 그들은 전압을 가하면 그 결정들의 길이가 늘어나는 역효과도 관측하였다. 압전 재료를 활용하여 기계적 스트레인 에너지를 전기적 에너지로 효과적으로 변환시킬 수 있는 연구가 energy harvesting 분야에서도 매우 활발하게 진행되고 있다. 그림 1은 적용 예로서 간단한 외팔보 형태의 압전 발전기를 보여 주고 있다. 압전 재료가 윗면과 아랫면 2층으로 적층되어 있으며, 끝단에 집중 질량이 매달려 있다. 외팔보가 아래로 굽혀지면 윗면에는 인장, 아랫면에는 압축에 의해 변형이 생기고 양면에서 전압이 발생하게 된다. 따라서 외팔보가 상하로 진동을 하게 되면 교류 전압이 발생한다. 그림 2는 발생하는 진동주파수 및 집중질량과 생성 전력과의 관계를 한 예로서 가속도 수준 2.5m/s^2 로 진동하고 있을 때의 수치 해석 결과를 보여주고 있다. 수치해석에 사용된 외팔보의 1차 고유진동수는 120 Hz 이며, 집중질량은 9 gram 이다. 그림 2에서 보는 바와 같이 공진주파수에서 최대 전력이 발생하고, 끝단의 집중질량과 전력은 비례하고 있음을 알 수 있다.

표 2. Energy storage density comparison

Type	Practical maximum (millijoules/cm ³)	Aggressive maximum (millijoules/cm ³)
Piezoelectric	35.4	335
Electrostatic	4	44
Electromagnetic	24.8	400

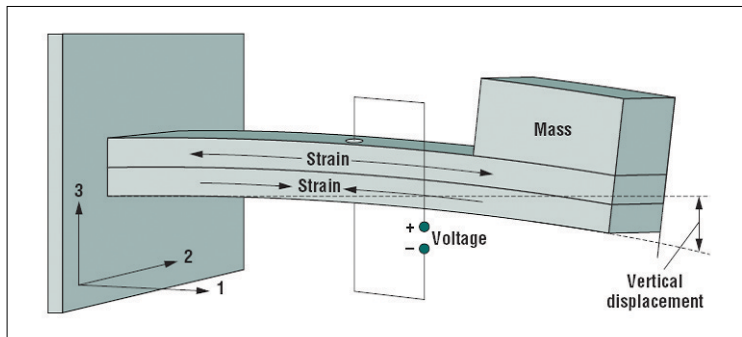


그림 1. A two-layer bimorph mounted as a cantilever^[1]

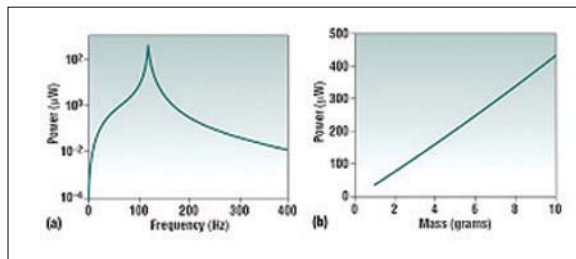


그림 2. Simulation for 1 cm^3 piezoelectric generator driven by vibration^[1]

3. 전자기식 Energy Harvesting

전자기식 energy harvesting은 Faraday 법칙을 이용한다. 도체(전기회로)를 통과하는 자기장이 변화하면, 도체 주위에 전기장이 형성되어 전류가 흐르게 된다. 자기장의 변화는 가동 자석과 고정 코일 또는 고정 자석과 가동 코일로 구현할 수 있으나, 대부분 가동 자석과 고정 코일 방식을 사용한다. 일반적으로 다른 조건들이 동일하다면, 코일 크기가 클수록 성능이 좋다. 그림 3은 간단한 한 예를 보여주고 있다. 진동을 하게 되면, 가동 질량(m)이 하우징에 대해 상대 운동을 하게 되며, 이 상대 운동을 전기에너지로 변환하게 된다. 그림 3(a)에는 energy harvesting 장치를 질량-감쇠-스프링으로 구성된 1자유도계로 치환하였다. 여기서 감쇠(Bm)은 에너지 추출로 인하여 질량의 진동이 감쇠하는 것을 표현한 것이다. 자석(m)은 스프링(k)과 연결되어 있으며, 일정한 자기장(B)에서 진동을 받게 된다. 코일은 inductance (L), 저항(Rc) 및 부하저항(R)으로 모델링 하였으며, 상대변위(z)는 코일 양단에 걸리는 전압과 관계가 있다. 그림 3(b)은 3(a)의 수학적 전달함수를 보여주고 있다. 여기서 ℓ 은 코일의 길이를 나타내고 있다.

그림 3(b)로부터 일정 주파수(ω) 및 크기(Y_0)를 갖는 정현파 변위(y)가 입력될 때, 얻을 수 있는 전력을 계산하면 다음과 같이 식으로 표현할 수 있다.

$$P = \frac{m \zeta_e Y_0^2 (\omega / \omega_n)^3 \omega^3}{[1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2]^2 + 2\zeta (\frac{\omega}{\omega_n})^2}$$

여기서,

$$\omega_n = \sqrt{k/m}, \quad \zeta = \frac{BmR + (B\ell)^2}{2R\sqrt{mk}}, \quad \zeta_e = \frac{(B\ell)^2/R}{2\omega_n m}$$

따라서 발생하는 전력은 공진주파수에서 최대가 되며, 가진 주파수의 3제곱에 비례함을 알 수 있다. 예로서 70 Hz 진동주파수에서 1 μ W, 330 Hz에서 0.1 mW를 얻은 실험결과가 발표되었다. 이것은 낮은 주파수 영역에서는 우수한 성능을 얻기가 힘들 수도 있다는 것을 의미한다.

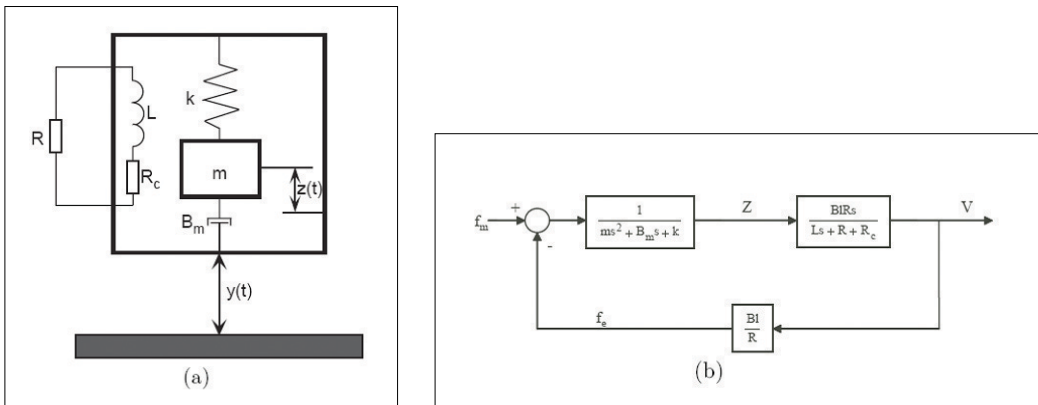


그림 3. Electromagnetic energy harvesting model^[14]

4. 정전기식 Energy Harvesting

정전기 발전기를 전기장에 대해 물체가 움직일 때 전력이 발생하는 원리를 이용한다. 그림 4는 한 예로서 parallel plate capacitive transducer를 보여 주고 있다. 축전지(capacitor)의 위판이 최소 capacitance position (위판과 아래 판 사이의 최대 간격)과 최대 capacitance position (최소 간격) 사이에서 상하로 움직이면, 충전 및 방전 현상이 일어나게 된다. 일반적으로 전기 감쇠효과를 이용하기 때문에 Coulomb-damped resonant generator (CDRG)라고 하기도 한다. Capacitance가 감소할 때(두 판 사이의 간격이 증가할 때), 축전지의 전하가 항상 일정하게 유지된다면 전압이 증가할 것이다. 반면 capacitance가 감소할 때, 축전지의 전압이 일정하게 유지된다면 전하가 감소할 것이다. 그림 5는 전하가 일정한 경우(A-B-D-A)와 전압이 일정한 경우(A-C-D-A)에 대해 capacitance가 충전 및 방전되는 과정을 보여주고 있다. 전하가 일정한 경우, 축전지가 초기 전압(V_{start})로 충전이 되면, A점에서 B점으로 이동한다. 위 판이 최대 capacitance (C_{max})에서 최소 capacitance (C_{min})로 이동하며, B점에서 D점으로 이동한다. 축전지가 감소하고 전하는 일정하면, 전압이 증가하게 되는 것이다. 전하가 원상태로 복귀하면, D점에서 A점으로 이동하게 된다. 따라서 전체 생산되는 에너지는 A-B-D의 면적이 된다. 전압이 일정한 경우, 축전지가 초기 전압(V_{max})로 충전이 되면, A점에서 C점으로 이동한다. 위판이 최대 capacitance (C_{max})에서 최소 capacitance (C_{min})로 이동하며, C점에서 D점으로 이동한다. 방전을 하면, D점에서 A점으로 이동한다. 따라서 얻을 수 있는 에너지는 A-C-D의 면적이 된다. 이러한 과정에서 생긴 에너지를 D점에서 A점으로 이동할 때 축전지로부터 뽑아내게 된다. 위에 기술한 바와 같이 전압이 일정한 경우가 전하가 일정한 경우보다 기계적 에너지를 전기적 에너지로 더 많이 변환할 수 있음을 알 수 있다. 다만, 큰 초기 전압이 필요하다는 단점이 있다. 정전기 발전기는 충전 및 방전과정이 반복되므로, 최적의 반복방법 및 반복시기를 결정해서 효율을 증대할 필요가 있다. 또한 가진원의 주파수를 변환기의 공진주파수와 동조시킴으로써 좋은 결과를 얻을 수 있다.

그 외에 저 주파수 영역에서 효과적인 것으로 알려진 non-resonant Coulomb-force parametric generator (CFPG)가 있다^[11].

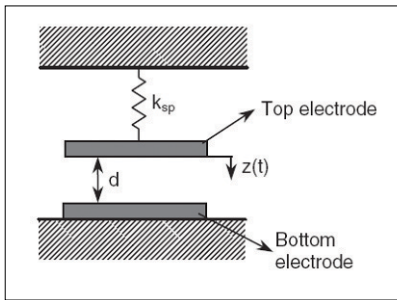


그림 4. Standard parallel plate capacitive transducer ^[2]

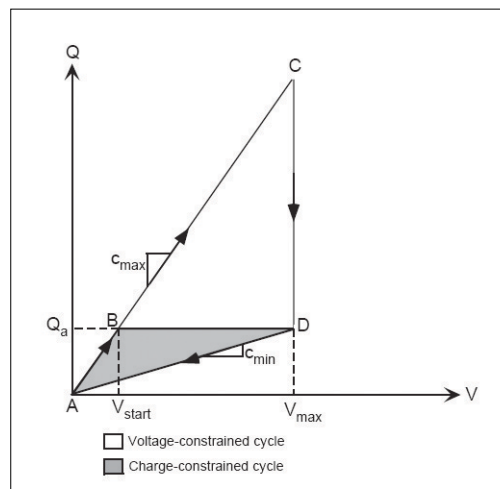


그림 5. Diagram explaining electrostatic energy conversion ^[14]

5. 효율적인 Energy Harvesting

진동을 이용하여 전기 에너지를 얻는 장치는 앞장에서 살펴본 바와 같이 고유진동수와 가진 주파수가 일치할 때 최대 전력을 얻을 수 있다. 대부분의 경우 energy harvesting 장치를 설계하기 전에 가진 주파수를 미리 파악할 수 있으므로 적절한 고유진동수를 갖도록 설계할 수 있다. 반면 그렇지 못한 경우에는 넓은 주파수 범위에서 효과적으로 작동할 수 있는 장치를 설계해야 한다. 따라서 공진 주파수에서 작동하도록 할 것인가 또는 넓은 주파수 영역에서 작동하도록 할 것인가에 따라 설계 방법이 다르게 된다. 공진 주파수에서 작동하도록 설계할 경우, 가진 주파수와 고유진동수를 동조시켜야 하며, 전자 스프링 등을 이용하여 능동적으로 조절하는 방법과 고정조건 등을 변경하는 수동적인 방법이 있을 수 있다. 그러나 능동적인 방법을 구현하기 위해서는 추가적인 전자유소를 사용함으로써 전원공급이 필요하고, 수동적인 방법을 구현하기 위해서는 장비를 멈추고 작업을 해야 한다. 따라서 전력 생산성 및 사용성 측면에서 엄밀한 검토가 사전에 필요하다. 한편, 그림 2의 공진주파수 영역에서의 대역폭은 $2\xi\omega_n$ 이다. 예를 들면, 고유진동수가 120 Hz이고, 감쇠비가 0.025인 경우, 대역폭은 6 Hz가 된다. Energy harvesting 장치를 이 대역폭안에 동조하기는 쉽지 않다. 따라서 대역폭을 넓힐 필요가 있으며, 다 자유도계 시스템으로 변경함으로써 구현할 수 있다.

연구과정에서 물체의 진동 에너지를 energy harvesting 장치에 전달하는 기계적 시스템의 설계가 매우 중요하게 대두되고 있다. 특히 압전 재료의 크기 및 모양의 결정이 효율에 있어서 매우 중요한 요소이다. 현 단계에서 압전 재료를 이용하여 얻을 수 있는 전기에너지의 양은 매우 미약하여 전자기기를 동작할 수 없다. 따라서 획득할 수 있는 전기에너지의 양을 늘리고, 변환한 에너지를 축전하는 기술이 획기적으로 개발되어야 한다. 이러한 측면에서 에너지를 획득하는 과정에서 축전하는 방법으로 충전지(rechargeable battery)를 사용하는 방안이 제안되고 있다. 지금까지는 축전기(capacitor)를 사용하고 있으나, 에너지 저장 능력이 나쁘기 때문에, 충전과 방전을 반복해야 하므로 빨리 방전되는 경향이 있다. 이러한 면에서 축전기의 활용이 재고되어야 할 것이다. 반면 충전지는 연속적으로 충전을 할 수 있으며, 비교적 오랜 시간동안 전원을 공급할 수 있다. Energy harvesting 분야의 발전을 위해서는 지능재료 등을 이용한 충전지와 같은 에너지 저장기술이 먼저 개발되어야 한다. 더불어 발생한 에너지를 저장매체로 전송할 때 효율을 최대로 하는 energy harvesting 회로의 개발이 필요하다^[15]. 그림 6은 압전 재료를 활용한 energy harvesting 장치의 전형적인 전기회로를 보여주고 있으며, 그림 7은 효율을 높이기 위해 개발된 적응형 회로의 한 예를 보여주고 있다. 또한 저 전압 전자기기의 개발에 있어서 전원흐름의 최적화 및 회로 손실의 최소화 등에 관한 연구가 진행되어야 한다. 구조물에 부착하는 energy harvesting 장비의 효율을 높이기 위해서는 부착하는 진동특성 및 위치 등을 고려하여 최적의 해를 찾아야 하며, 이를 통해 공진 개념을 이용하여 압전 재료가 최대 스트레인이 발생하도록 고려해야 한다.

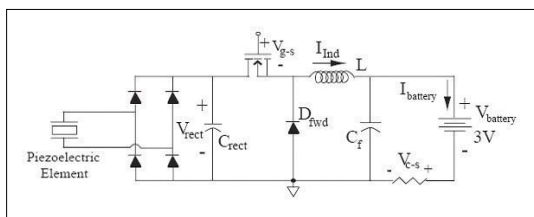


그림 6. General topology of energy harvesting circuit ^[6]

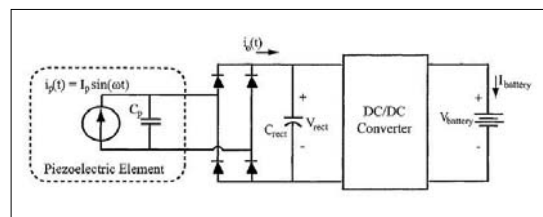


그림 7. Adaptive energy harvesting circuit ^[8]

6. 결 론

전지의 교체 걱정이 없는 휴대용 전자기기의 탄생이 멀지 않은 것 같다. 최근 self-powered 개념에서 주위에 산재해 있는 에너지를 수집하여 전기적 에너지로 변환하는 분야, 즉 energy harvesting에 관한 연구가 매우 적극적으로 진행되고 있다. 현 연구수준에서는 전자기기가 요구하는 전력과 비교할 때 아직은 낮은 수준의 전기에너지를 얻고 있는 것이 사실이며, 극복해야 할 문제임에 틀림없다. 그러나 전기에너지를 얻고 축전하는 기술의 발달과 함께 이러한 문제는 해결될 수 있을 것이다. 따라서 energy harvesting 분야는 다음과 같은 이유로 멀지 않아 소형(휴대용) 전자기기의 미래에 중요한 역할을 할 것으로 예상하고 있다.

- 전원 안정화 회로 및 저장 장치의 획기적인 발달과 함께 새로운 재료의 개발과 새로운 에너지 변환장치의 설계기술을 활용하여 생산되는 전기에너지의 양은 증가할 것이다.
- 여러 가지 energy harvesting 전략의 조합으로 다양한 조건에서 에너지를 얻을 수 있는 능력이 향상될 것이다.
- 전자기술의 지속적인 발전으로 인하여 - 예를 들면 장비의 소형화, 나노기술, 분자 전자기술 등 - 요구하는 에너지는 점점 감소할 것이다.
- 휴대성이 증가하는 장비 및 자율성을 소유한 전자 장비의 증가로 인하여 스스로 에너지를 얻을 수 있는 장비가 증가할 것이다.

Energy harvesting 기술은 무선 기술 및 저전원 전자장비 기술과 self-powered 시스템을 연결하는 잃어버린 연결고리 역할을 할 것으로 판단된다.

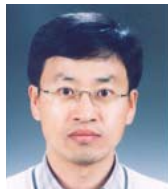
후 기

본 연구는 한국기계연구원의 인적자원개발 프로그램인 “전문역량강화 교육훈련”의 결과임을 밝혀둔다.

❁ 참고 문헌

- [1] Roundy, S., Leland, E.S., Baker, J., Carleton, E., Reilly E., Lai, E., Otis, B., Rabaey, J.M., Wright, P.K., and Sundararajan, V., “Improving power output for vibration-based energy scavengers”, Pervasive Computing, January– March, pp.28–36, 2005
- [2] Roundy, S., “On the effectiveness of vibration-based energy harvesting”, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.16, pp.809–823, 2005
- [3] Roundy, S. and Zhang, Y., “Toward self-tuning adaptive vibration-based micro-generators”, Proceedings of SPIE, Vol.5649, pp.373–384, 2005
- [4] Roundy, S., Wright, P.K., and Rabaey, J.M., Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks with Special Focus on Vibrations, Kluwer Academic Press, 2004
- [5] Roundy, S., Wright, P.K., and Rabaey, J.M., “A study of low level vibrations as a power source for

- wireless sensor nodes”, Computer Communications, Vol.26, pp.1131–1144, 2003
- [6] Lesieutre, G.A., Ottman, G.K., and Hofmann, H.F., “Damping as a result of piezoelectric energy harvesting”, Journal of Sound and Vibration, Vol.269, pp.991–1001, 2004
- [7] Ottman, G.K., Hofmann, H.F., and Lesieutre, G.A., “Optimized piezoelectric energy harvesting circuit using step-down converter in discontinuous conduction mode”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.18, No.2 pp.696–703, 2003
- [8] Ottman, G.K., Hofmann, H.F., Bhatt, A.C., and Lesieutre, G.A., “Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.17, No.5 pp.669–676, 2002
- [9] Sonado, H.A., Inman, D.J., and Park G., “Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries”, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.16, pp.799–807, 2005
- [10] Sonado, H.A., Inman, D.J., and Park G., “A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials”, The Shock and Vibration Digest, Vol.36, No.3, pp.197–205, 2004
- [11] Mitcheson, P.D., Miao, P., Stark, B.H., Yeatman, E.M., Holmes, A.S., and Green, T.C., “MEMS electrostatic micro power generator for low frequency operation”, Sensors and Actuators A, Vol.115, pp.523–529, 2004
- [12] Mitcheson, P.D., Green, T.C., Yeatman, E.M., and Holmes, A.S., “Architectures for vibration-driven micro power generators”, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.13, No.3, pp.429–440, 2004
- [13] VIBES, <http://www.vibes.ecs.soton.ac.uk>, 2006
- [14] Mateu, L. and Moll, F., “Review of energy harvesting techniques and applications for microelectronics”, Proceedings of SPIE, Vol.5837, pp.359–373, 2005
- [15] Lefeuvre, E., Badel, A., Richard, C., Petit, L., and Guyomar, D., “A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems”, Sensors and Actuators A, Vol.126, pp.405–416, 2006



문 석 준

· 한국기계연구원 e-엔지니어링연구센터 책임연구원
· 관심분야 : 구조동역학, 진동제어, 제진장치
· E-mail : sjmoon@kimm.re.kr



곽 문 규

· 동국대학교 기계공학부 교수
· 관심분야 : 능동진동제어, 지능구조물, 압전재료
· E-mail : kwakm@dgu.edu