

◆특집◆ 진동 제어 및 응용 기술

압전소자를 이용한 진동에너지 수집 장치 개발

곽문규*, 김기영**, 강호용***, 김내수***

Development of Piezoelectric Energy Harvesting Device

Moon K. Kwak*, Ki Young Kim**, Ho-Yong Kang*** and Nae-So Kim***

Key Words : Piezoelectric Energy Harvesting(압전 에너지 수집)

1. 서론

최근에 무선 센서 노드(Wireless Sensor Node) 또는 편재 센서 노드(Ubiquitous Sensor Node)에 대한 관심이 높아져가고 있다. WSN 이나 USN 모두 구조물 손상 진단, 무기 체계, 재난 방진 시스템과 동물 추적을 위해 데이터 수집과 이송 장치로 사용될 수 있다. 이런 센서 노드는 근거리 통신을 통해 소모되는 전력을 최소화한다. 그러나 전력을 최소화한다고 하여도 건전지의 수명에 의해 운용되기 때문에 독자적으로 생존할 수는 없다. 따라서 최근에 주변의 에너지원들, 즉 빛, 온도차, 진동, RF 등으로부터 전력을 수집하는 방안이 모색되고 있다.¹⁻⁶ 다양한 에너지 수집 방법들 중 압전 에너지 수집 방법은 구조적인 단순성과 단순한 에너지 변환 메커니즘으로 인해 선호되고 있다.

압전 에너지 수집 장치는 에너지 변환 장치로 압전 재료를 사용한다. 압전 재료는 전기 에너지를 기계에너지로 바꾸거나 반대로 기계적인 에너지를 전기에너지로 변환할 수 있다. 따라서 압전 웨이퍼를 작동기(Actuator) 또는 감지기(Sensor)로

사용할 수 있다. 압전 감지기 메커니즘을 기반으로 하면 소량의 에너지를 수집할 수 있다. 압전 재료의 모델링과 압전 효과에 대해서는 참고문헌^{7,8}에 자세히 나와 있다. 최근에 Sodano¹와 du Toit et al.⁹는 압전 에너지 수집의 효율성에 대해 조사하였다. Roundy et al.¹⁰은 WSN에 활용될 수 있는 압전재료를 부착한 외팔보 형태의 에너지 수집 장치를 제시하였다. 이들은 이 장치를 전자기에 부착하고 그 진동으로부터 에너지를 수집하는 것을 시도하였다. 이들은 에너지 수집 장치가 $70 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 의 전력 밀도를 생산함을 보고하였다. Sodano et al.^{11,12}는 외팔보 형태의 압전 에너지 수집 장치에 대한 모델을 정식화하고 구조물의 기저부를 가진하여 모델이 타당함을 입증하였다. 이 모델은 에너지 수집 장치에 의해 생성된 에너지를 평가하는데 사용되었으며 에너지 수집에 의한 감쇠 효과에 대해서도 토의되었다. 또한 전력 출력의 평가, 전기-기계 시스템의 정확한 모델링, 압전 에너지 수집에 대한 전기 회로의 최적화에 대한 연구가 진행되었다.¹³⁻¹⁷

Cornwell et al.¹⁸은 압전 에너지 수집 장치의 고유진동수를 가진 주파수와 동일하게 만들면 전력이 25 배가 증가됨을 보고하였다. 이는 공진에서 큰 진폭이 만들어지기 때문에 당연한 결과인데 압전 에너지 수집 장치를 설계하는 경우에 가장 먼저 고려되어야 할 사항이다. 끝단에 질량이 부착된 외팔보가 압전에너지 수집 장치의 이상적인 형태로 고려되었는데 그 이유는 고정-자유 경계조건

* 동국대학교 기계공학과

Tel. 02-2260-3705, Fax. 02-2263-9379

Email : kwakm@donguk.edu

** 동국대학교 기계공학과 박사과정

*** 전자통신연구소(ETRI) USN 사업단

압전재료를 이용한 능동진동제어, 진동에너지 수집 장치, 메카트로닉스 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

이 압전 재료에 가장 큰 변형율을 발생시킬 수 있기 때문이다.¹⁴ 주변 진동으로부터 에너지를 수집하는 장치는 현재 개발 중이며 오직 몇몇 제품만이 시장에 선을 보이고 있다.¹⁹

끝단 질량을 가지고 있는 외팔보와 이에 부착된 압전재료 형태의 장치가 에너지 수집에 가장 이상적인 형태로 제시되었지만 이에 대한 모델은 일자유도 진동계 모델로 고려되어 연구되었다. 그 이유는 한 개의 가진 주파수를 가지는 에너지 원을 대상으로 삼았기 때문이다. 그러나 주변 진동 에너지 원이 넓은 주파수 영역을 가질 수 있고 실제 에너지 수집 모델이 분포계이기 때문에 동적 모델을 개선할 필요가 있다. 본 연구에서는 가정 모드법(Assumed Mode Method)을 이용하는 경우의 압전에너지 수집장치의 모델과 수집 장치에 포함되는 전자 회로에 대한 설명, 그리고 수치 결과 및 실험 결과를 제시하여 압전에너지 수집 장치에 대한 이해를 제고하고자 한다.

2. 압전에너지 수집 장치의 수학적 모델

현재까지 압전에너지 수집장치에 사용되고 있는 구조물의 형태는 Fig. 1 과 같은 외팔보에 집중 질량이 끝단에 부착된 시스템이다.

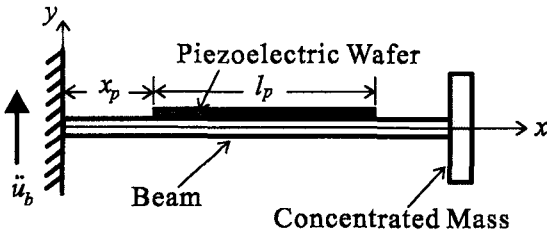


Fig. 1 Schematics of Cantilever-type Piezoelectric Energy Harvesting Device with a Tip Mass

Fig. 1 의 시스템에 운동방정식을 유도하면 다음과 같이 표현된다.

$$M_t \ddot{q} + C_t \dot{q} + K_t q - B_p^T V_p = D_b \ddot{u}_b \quad (1)$$

여기서 M_t, C_t, K_t 는 각각 질량, 감쇠, 강성 행렬을 나타내며, B_p 는 압전효과로 인한 연성 행렬, D_b 는 기저부의 가속도에 의한 영향 행렬을 나타낸다. 이 식을 이용하면 기저부의 가진에 의한 보의 응답을 계산할 수 있다. 이 식은 또한 전기-기

계 연성 효과를 포함하고 있는데 이는 가해진 전압으로도 구조물을 가진시킬 수 있음을 의미한다.

기저부의 진동과 보의 응답을 다음과 같은 조화함수 형태로 나타내보자.

$$\ddot{u}_b = \bar{a}_b e^{i\omega t}, \quad q = \bar{q} e^{i\omega t} \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$\frac{\bar{q}}{\bar{a}_b} = [-\omega^2 M_t + i\omega C_t + K_t]^{-1} D_b = T_b(\omega) \quad (3)$$

이 식은 기저부의 가속도와 보의 운동 사이의 전달함수를 나타낸다.

보의 운동은 전기-기계 연성에 의해 압전 웨이퍼에 전하를 발생시킨다. 총 전하는 보의 운동에 의해 발생된 전하에서 압전 웨이퍼에 의해 소산된 전하를 제하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q = B_p q - C_p V_p \quad (4)$$

여기서 C_p 는 압전웨이퍼의 캐패시턴스 값을 나타낸다. 이 전하가 에너지 수집 장치에 실제로 사용되는 전하이다. 식 (4)를 시간에 대해 미분하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$2B_p \dot{q} - C_p \dot{V}_p = I = V_p / R \quad (5)$$

여기서 I 와 R 은 회로의 전류와 부하 저항을 나타낸다. 참고문헌²⁰ 에서 전력 출력 분석을 위해 사용된 방법을 사용하여 시간 구간, $T_\omega = 2\pi/\omega$ 에 대해 식 (5)를 적분하면 다음과 같은 결과가 얻어진다.

$$2B_p q - 2C_p V_p = \frac{T_\omega V_p}{2R} \quad (6)$$

따라서 보의 진동에 의해 발생된 전압은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\bar{V}_p = \frac{\omega R}{(\omega C_p R + \pi/2)} B_p \bar{q} \quad (7)$$

식 (7)을 이용하면 보의 진동에 의한 전력 출력은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{P}{\bar{a}_b^2} = \frac{\omega^2 R}{(\omega C_p R + \pi/2)^2} T_b^T(\omega) B_p^T B_p T_b(\omega) \quad (8)$$

식 (8)은 기저부의 가진에 의해 압전에너지 장치에서 발생하는 전력을 평가하는데 사용될 수 있다. 식 (8)은 또한 전력을 최대 출력할 수 있는 부하 저항이 존재함을 의미한다. 이 결과는 Shu and Lien²⁰ 의 결론과 일치한다. Fig. 2 는 첫 번째 고유

진동모드에 대해 부하 저항이 변함에 따라 출력 전력이 어떻게 변화하는지를 보여준다. 최대 출력을 생성할 수 있는 부하 저항에 대해 기저부의 가진 주파수 대비 출력 전력을 보여주는 그림이 Fig. 3 이다. Fig. 3 이 기본 진동 모드를 가진하여 최대 전력을 얻을 수 있음을 보여주지만 고차 모드를 가진하여도 큰 출력을 얻을 수 있음을 보여준다. 그 이유는 기저부의 가속도가 고주파수에서 큰 값을 가질 수 있기 때문이다. 이 사실은 기저부의 진폭이 일정할 경우 가속도가주파수의 제곱에 비례하기 때문에 가능성이 있다. 위 식이 기저부의 가속도에 대해 유도되었음을 유념하기 바란다. 이 식을 사용하면 분포계의 에너지 수집 특성을 분석할 수 있다.

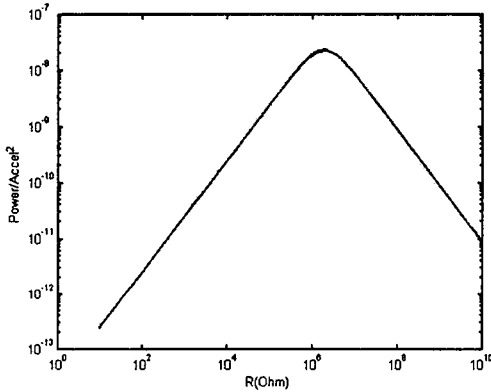


Fig. 2 Power Curve vs. Resistance

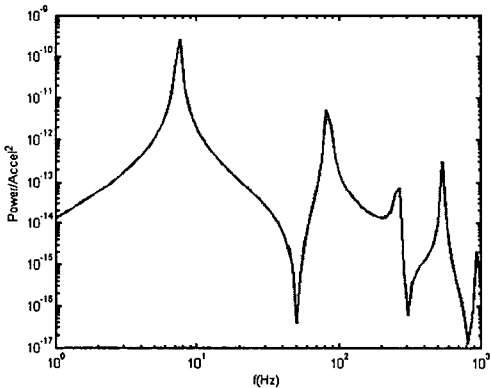


Fig. 3 Power Curve vs. Frequency

3. 실험 결과

3.1 PZT 와 렉티파이어의 출력 특성

압전 에너지 수집 장치는 Fig. 4 에 보이는 바와 같이 기본적으로 렉티파이어, 단기 저장 캐패시터, 부하로서 구성된다. 보의 진동으로 야기되는 압전 웨이퍼의 진동은 AC 신호를 산출한다. AC 신호가 렉티파이어 회로를 거치면 신호가 반파의 DC 신호로 변환된다. 단기 저장 캐패시터는 렉티파이어 신호를 매끄럽게 만드는 역할을 담당한다. Fig. 5 는 압전에너지 수집 장치에 대한 실험 구성을 보여주는데 알루미늄 보, 두 개의 압전 웨이퍼²¹ (Model M8557P1), 가진기(B&K Mini Shaker 33410), 그리고 렉티파이어 칩(WTE DF06)으로 구성되어 있다.

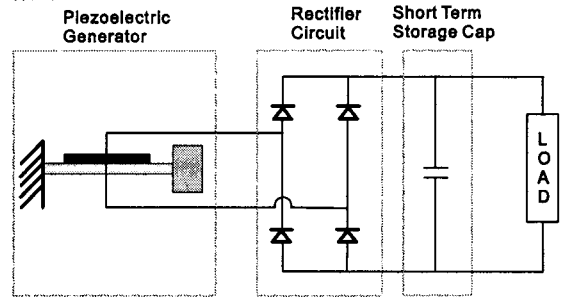


Fig. 4 Electrical Circuit for Piezoelectric Energy Harvesting System

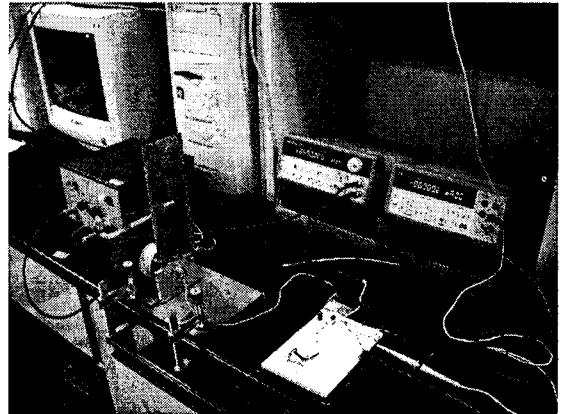


Fig. 5 Experimental Setup for Piezoelectric Energy Harvesting System

보의 기저부를 가진기에 부착하고 함수 발생기를 이용해 사인파를 생성해 가진기 증폭앰프에 제공하였다. Fig. 6 는 시스템의 첫번째 모드를 가진할 경우의 압전 웨이퍼 출력 신호를 보여준다. Fig. 6 에서 알 수 있듯이 생성된 신호는 사인파이

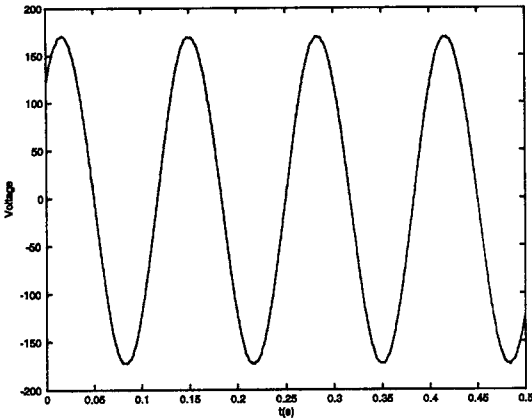


Fig. 6 Voltage Signal from PZT wafer

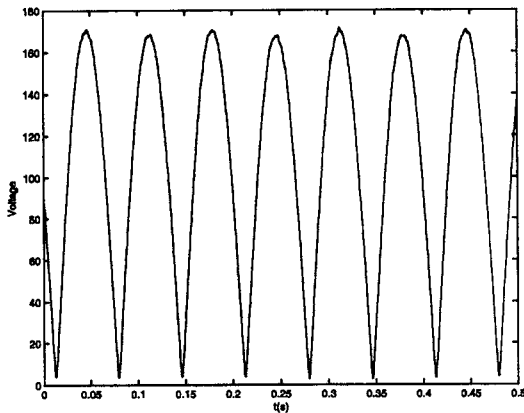


Fig. 7 Voltage Signal from Rectifier

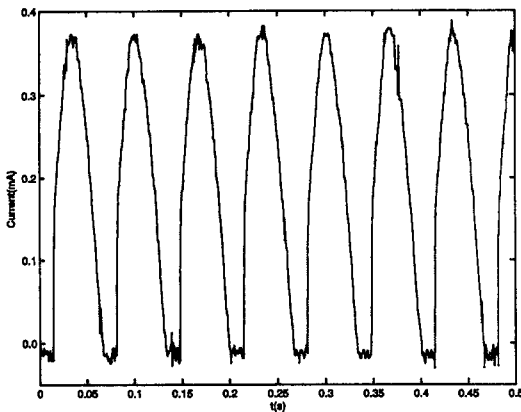


Fig. 8 Current of the Circuit

다. 렉티파이어 회로를 거치면 이 AC 신호는 Fig. 7 에 보이는 바와 같이 반파 형태의 DC 신호로 변환된다.

220 μ F 캐패시터를 단기 저장 캐패시터로 사용하였다. 압전 에너지 장치에서 생성된 전류를 계측하기 위해 330 Ohm 저항을 부하로 사용된 LED 에 직렬로 연결하고 저항에 걸리는 전압을 계측하였다. 계측 전압값을 이용해 전류를 산정하였는데 그 결과가 Fig. 7 이다.

Fig. 8 에 보이는 바와 같이 최대 전류는 약 380 μ A 인데 건전지 충전을 위해서는 조금 낮은 값으로 보인다. 실제 실험에서는 기저부를 가진해 끝단의 최대 진폭이 10 mm 가 되었는데도 생성되는 전류값은 이와 같이 크지 않았다. 이것은 USN 의 독자적인 구동을 위해 많은 수의 압전 에너지가 필요함을 의미한다.

압전 에너지 수집 장치의 전력 출력은 효율성에 대한 중요한 지표이다. 전력 측정을 위해 LED 의 전류와 전압을 측정하고 이를 이용해 전력을 계산하였다. Fig. 9 는 기저부의 가진 주파수에 대한 전력을 보여준다. 최대 전력은 기본 진동수에서 얻어지며 그 값은 600 μ W 이다. Fig. 8 은 다른 공진 주파수에서도 큰 값을 얻을 수 있음을 보여준다. 수치계산에서 토의되었듯이 고차 모드를 가진해서도 큰 전력을 얻을 수 있다.

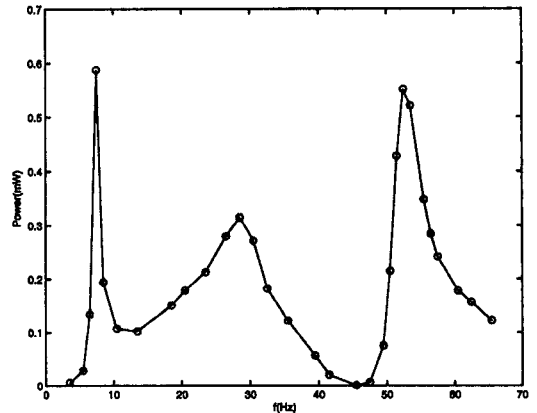


Fig. 9 Power vs. Frequency

3.2 건전지 충전 실험

단기 저장 캐패시터는 건전지를 충전하는데 있어 중요한 역할을 한다. 220 μ F 를 단기 충전 캐패시터로 사용하여 3.3V 4mAh Li-Ion battery (Seiko Model MS621)를 충전하는 실험을 수행하였다. Fig. 10 은 건전지의 충전 전압 선도를 보여준다. 첫 번째 모드를 가진해 이 건전지를 충전하는데 약 4

시간이 소요됨을 보여준다. 최대 전압이 도달한 후에는 건전지가 비정상적인 요동을 보여준다. 따라서 충전이 된 후에는 스위치를 이용해 충전을 더 이상 하지 않는 것이 바람직하지 않을 것으로 예상된다. 스위치는 마이크로프로세서를 이용해 건전지에 흘러들어가는 전류를 관찰해 작동시킬 수 있을 것으로 생각된다. 또한 마이크로프로세서는 단기 저장 캐패시터의 상태를 점검해 캐패시터의 연결도 제어해야할 것으로 생각된다.

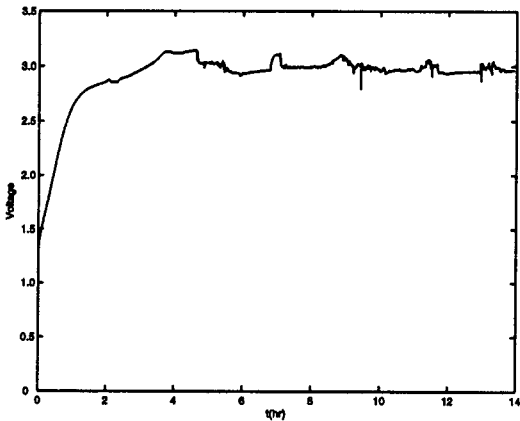


Fig. 10 Voltage charging for the 0.1 F super capacitor

3.3 감쇠 효과 실험

압전에너지 수집 장치를 사용하는 경우 감쇠 효과가 동시에 발생함을 관찰되었다. 그 효과를 검증하기 위해 Fig. 11 과 같이 실험 장치를 구성하였다. 렉티파이어 회로의 출력을 100 μ F 캐패시터와 고휘도 LED 에 연결하였다.

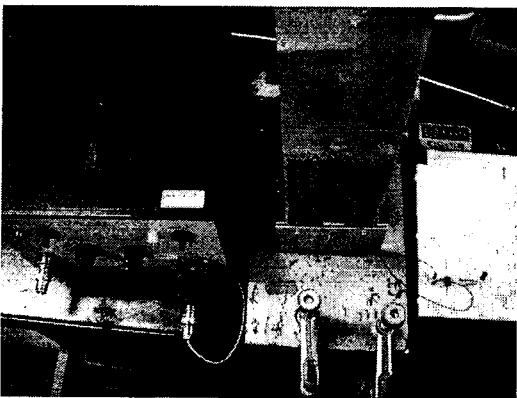


Fig. 11 Experimental Setup for Damping induced by Energy Harvesting System

Fig. 12 는 FFT 신호 분석기를 이용해 얻은 주파수 응답곡선을 보여주는데 압전 에너지 수집 장치를 연결하는 경우 약 2dB 의 감쇠 효과를 얻을 수 있음을 보여준다.

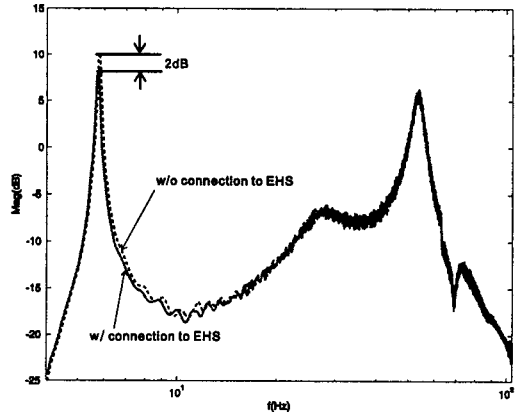


Fig. 12 Change in Frequency Response Curve by the Introduction of the Energy Harvesting System

3.4 압전 에너지 수집 장치 개발

본 연구에서는 압전 에너지 장치의 시연을 위해 다음과 같은 압전 에너지 장치를 제작하였다. 이 압전 에너지 장치를 이용하면 LED 에 불이 들어오게 할 수 있다.

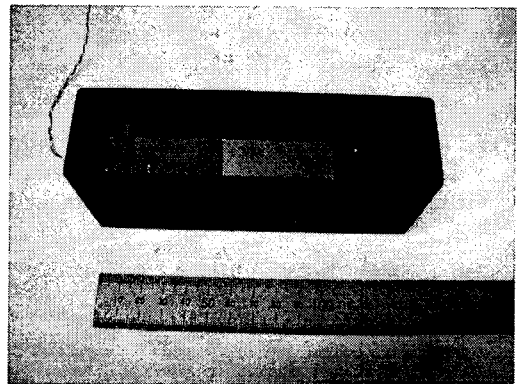


Fig. 13 Demonstration Model for Piezoelectric Energy Harvesting

4. 결론

에너지 수집 방법을 이용해 USN 의 수명을 연장하는 방법을 소개하였다. USN 의 동작에 필요한

전력을 최소화는 것과 동시에 에너지 수집 장치의 전자 회로를 최적화하고 압전 에너지 장치의 최적 설계는 실질적인 자율 USN 을 구현할 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 아직 많은 기술적인 문제가 남아 있으며 이를 위해 더 많은 연구가 필요하다. 본 연구는 압전 에너지 수집 장치의 효율성과 타당성을 조사하기 위해 외팔보 형태의 압전 에너지 수집 장치와 부대 전자 회로에 대한 모델을 소개하였다.

본 연구에서 제시한 압전 에너지 수집 장치에 대한 수학적 모델은 끝단에 집중 질량을 가지는 외팔보와 보에 부착된 압전 웨이퍼에 대한 것이다. 이 새로운 모델은 광범위한 주파수 영역에 대해 다양한 공진 주파수에서의 전력 출력을 산정하는데 유용할 것으로 예상된다. 수치 결과는 최적의 부하 저항이 존재함을 보여주는데 충전을 위해 연결된 건전지의 부하 저항을 조정할 필요가 있을 것으로 생각된다. 실험 결과는 기본 진동 모드를 가진했을 경우에 가장 큰 출력이 얻어짐을 보여준다. 그러나 고차 모드를 가진해도 큰 출력을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 실험 결과는 압전 에너지 수집 장치를 연결하였을 경우 이론으로 예상한 바와 같이 감쇠 효과가 얻어짐을 보여준다.

본 연구의 결과는 압전 에너지 수집 장치가 USN 을 구동하는데 필요한 전력을 생산할 수는 없지만 건전지를 충전하여 USN 의 간헐적인 구동에는 사용될 수 있음을 보여준다.

후 기

본 연구는 MIC/IITA 의 IT R&D 프로그램[2005-S-106-02, RFID/USN 을 위한 센서 태그와 센서 노드 기술 개발]에 지원되었다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- Sodano, 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.
- Fry, D. N., Holcomb, D. E., Munro, J. K., Oakes, L. C. and Maston, M. J., "Compact Portable Electric Power Sources," Oak Ridge National Laboratory Report, ORNL/TM-13360, 1997.
- Glynne-Jones, P. and White, N. M., "Self-Powered Systems: A Review of Energy Sources," *Sensor Review*, Vol. 21, pp. 91-97, 2001.
- Qiwai, M. A., Thomas, J. P., Kellogg, J. C. and Baucom, J., "Energy Harvesting Concepts for Small Electric Unmanned Systems," *Proc. of SPIE*, 5387, pp. 84-95, 2004.
- Mateu, L. and Moll, F., "Review of Energy Harvesting Techniques and Applications for Microelectronics," *Proc. of SPIE*, 5837, pp. 359-373, 2005.
- Paradiso, J. A. and Starner, T., "Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics," *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 4, pp.18-27, 2005.
- Niezrecki, C., Brei, D., Balakrishnan, S. and Moskalik, A., "Piezoelectric Actuation: State of the Art," *Shock and Vibration Digest*, Vol. 33, No. 4, pp. 269-280, 2001.
- Kwak, M. K., "Active Vibration Suppression of Smart Structures Using Piezoelectric Materials," *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 292-302, 1995.
- du Toit, N. E., Wardle, B. L. and Kim, S. G., "Design Considerations for MEMS-Scale Piezoelectric Mechanical Vibration Energy Harvesters," *Integrated Ferroelectrics*, Vol. 71, pp. 21-160, 2005.
- Roundy, S., Wright, P. and Rabaey, J., "A Study of Low Level Vibrations as a Power Source for Wireless Sensor Nodes," *Computer Communications*, Vol. 23, pp.1131-1144, 2003.
- Sodano, 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.
- Sodano, H. A., Park, G. and Inman, D. J., "Estimation of Electric Charge Output for Piezoelectric Energy Harvesting," *Strain*, Vol. 40, pp. 49-58, 2004.
- Lu, F., Lee, H. P. and Lim, S. P., "Modeling and Analysis of Micro Piezoelectric Power Generators for Micro Electromechanical Systems Applications,"

- Smart Materials and Structures, Vol. 13, pp. 57–63, 2004.
14. Roundy, S. and Wright, P. K., “A Piezoelectric Vibration Based Generator for Wireless Electronics,” Smart Materials and Structures, Vol. 13, pp. 1131–1142, 2004.
 15. Kim, S., Clark, W. W. and Wang, Q. M., “Piezoelectric Energy Harvesting with a Clamped Circular Plate: Analysis,” Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 16, pp. 847–854, 2005.
 16. Sohn, J. W., Choi, S. B. and Lee, D. Y., “An Investigation on Piezoelectric Energy Harvesting for MEMS Power Sources,” Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part C—Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 219, pp. 429–436, 2005.
 17. Goldfarb, M. and Jones, L. D., “On the Efficiency of Electric Power Generation with Piezoelectric Ceramic,” ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 121, pp. 566–571, 1999.
 18. Cornwell, P. J., Goethal, J., Kowko, J. and Damianakis, M., “Enhancing Power Harvesting Using a Tuned Auxiliary Structure,” Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.16, pp. 825–834, 2005.
 19. <http://www.microstrain.com/>
 20. Shu, Y. C. and Lien, I. C., “Analysis of Power Output for Piezoelectric Energy Harvesting Systems,” Smart Materials and Structures, Vol. 15, pp. 1499–1512, 2006.
 21. <http://www.smart-material.com/>
 22. Ottman, G. K., Hofmann, H., Bhatt, A. C. and Lesieutre, G. A., “Adaptive Piezoelectric Energy Harvesting Circuit for Wireless, Remote Power Supply,” IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 17, pp. 669–676, 2002.
 23. Hofmann, H., Ottman, G. K. and Lesieutre, G. A., “Optimized Piezoelectric Energy Circuit Using Step-Down Converter in Discontinuous Conduction Mode,” IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.18, pp. 696–703, 2002.