압전체를 이용한 에너지 수집 장치 개발 및 실험

Development of Piezoelectric Energy Harvesting Device and Experiments

김기영*·곽문규† ·강호용·김내수**

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

Key Words : Piezoelectric Energy Harvesting Device(압전에너지수집장치)

ABSTRACT

This paper is concerned with the development of the piezoelectric energy harvesting(PEH) device for ubiquitous sensor node(USN). The USN needs auxiliary power to lengthen its operational life. In this study, the piezoelectric energy harvesting system consisting of a cantilever with a tip mass and piezoelectric wafer was investigated in detail both theoretically and experimentally. The dynamic model for the addressed system was derived using the assumed mode method. The resulting equations of motion were expressed in matrix form, which had never been developed before. The power output characteristics of the PEH was then calculated and discussed. Various experiments were carried out to investigate the charging characteristics of electrical components. Theoretical and experimental results showed that the PEH was able to charge a battery with ambient vibrations but still needed an effective mechanism which can convert mechanical energy to electrical energy and an optimal electric circuit which dissipates small energy.

1. 서 론

최근에 무선 센서 노드에 대한 관심이 높아지고있다. 무선 센서 노드는 구조물의 안전진단, 무기체계, 방재 시스템, 동물의 이동 등에 사용될 수 있는 초소형 데이터 수집 및 발송 장치를 가리킨다. 무선 센서 노드는 서로 데이터의 교환이 가능하고 대량의 무선 센서 노드를 살포하여 근거리 무선 통신을 구현하기 때문에 무선 통신으로 인한 전력소모를 극소화할 수 있다. 그러나 전력 소모를 극소화한다고 해도 전지 소모 자체를 없앨 수 없기 때문에 태양광, 열 변화, 인간의 동작, 신체의 열, 진동, RF 에너지 등과 같은 주위 에너지원들로부터 에너지를 수집하여 전지의 수명을 연장하는 방법에 대한 연구 결과들이 많이 있다[1-7].

압전소자를 이용한 에너지 수집 개념[1]에 대해서는 과거 수십 년간 많은 연구가 진행되어왔다. 압전소자는 기계적인 운동이나 힘을 전기적인 에너지로 또는 전기적인 에너지를 기계적인 에너지로 교환할 수 있는 변환기이다. 이 재료를 이용하면 기계적 진동을 다른 장비의 전원으로 사용되거나 저장할 수 있는 전기적인 에너지로 변환하는 메카니즘으로써 사용할 수 있다. 이 재료의 거동에 대한 모델 및 압전 효과에 대해서는 참고문헌[8,9]을 참조하기 바란다. 최근에 Sodano[1]와 duToit 등[10]은 압전소자를 이용한 에너지 수집기에 대한 연구 결과를 재검토하였다.

Hausler[11]는 PVDF(polyvinylidene fluoride)를 이용해 숨쉬는 동안의 흉부의 팽창과 수축을 전기에너지로 생성하는 방법을 연구하였다. Starner[12]는 인간이 걷는 동안 대략 67W 의 전력이 소모되며 변환 효율이 12.5%인 압전 소자를 신발에 장착한 경우 8.4W 의 전력을 생성할 수 있다고 계산하였다. Kymissis et al.[13]은 걷는 동안 소모되는 에너지를 수집해 라디오 송신장치의 전원으로 사용하였다. 그들은 신발의 바닥에 여러 겹의 PVDF 를 얇게 적층하고 뒷 축에는 압전 소자로 구성된 THUNDER 작동기를 부착하였다. PVDF 판의 최대 전력은 약 20mW 이며 압전 작동기는 80mW 로 계측되었다. 그러나 느린 가진으로 인하여 PVDF 와 압전 작동기에서 발생한 평균 전력은 대략 1mW~2mW 로 매우 낮다고 보고되었다. Ramsey and Clark[14]은 압전 소자를 이용하여 사람의 행동이나 동물의 움직임에서 에너지를 획득하기 위한 연구를 수행하였다. 이 연구에서 비록 구조물의 진동에 종속된 약한 에너지 수집 장치로는 구조물의 센서 노드에 필요한 전원을 지속적으로 공급할 수 없지만 간헐적인 에너지원으로써 압전소자의 잠재적인 가능성을 입증하였다. 더욱이 수집한 에너지를 이용해 무선 데이터 송신이 가능함을 입증한 결과는 자가 발전 무선 센서 분야의 많은 연구가에게 주목을 받았다. Roundy et al.[15]은 무선 센서 노드의 전력원으로서 압전 소자를 외팔보에 부착한 장치를 제시하였다. 이 장치를 전자레인지에 부착하고 전자레인지가 작동하는 경우에 발생하는 진동을 이용하는 경우 압전 소자가 약 70 ㎼/㎤ 의 전원 밀도를 생성하는 것으로 보고되었다. Sodano et al.[16,17]은 압전 소자가 붙은 외팔보 에너지 수집 시스템의 모델을 공식화 하였다. 모델은 구속된 상태에서 외팔보의 베이스를 가진하여 증명하였다. 이 모델은 정확하게 발생된 에너지를 평가하였고

† 교신저자; 동국대학교 기계공학과, 정회원
E-mail : kwakm@dongguk.edu
Tel:(02) 2260-3705, Fax:(02)2263-9379
* 동국대학교 대학원, 현 ㈜현대엘리베이터
** 한국전자통신연구소(ETRI)

압전 에너지 수집 장치의 감쇠 효과를 증명하는데도 사용되었다. 압전 변환기에서 출력된 전원을 평가하기 위한 정확한 분석 모델의 개발과 기계적, 전기적 부하와 전기회로를 포함한 몇몇 요소의 효과를 이해하는 것은 에너지 수집 연구가에 의해 상당한 주목을 받아왔고 분석적인 모델링과 압전 에너지 획득의 분석 등의 다양한 노력은 문헌[10, 18-25]에서 찾을 수 있다. 압전 소자가 미세구조물[26-28]에 적합하기 때문에 최근에는 MEMS-크기의 미세 전원 발생 장치의 개발이 많은 주목을 받고 있다. Jeon[27]등에 의해 개발된 미세크기의 압전 발전기는 최대 DC 3V, 1 차 공진 주파수인 13.9Hz 에서 연속적으로 1 ㎼의 전기 전원를 발생시킨다고 보고되었다.

압전 소자나 PVDF 를 사용하지 않은 연구 결과로는 PMN-PT(Performance of Lead Magnesium Niobate-Lead Titanate) 단일 결정 장치[18, 29]를 이용한 에너지 수집장치, Macro-Fiber 혼합 작동기[16]를 이용한 에너지 수집 장치, " CYMBAL"이라는 압전 변환기[30]를 이용한 에너지 수집장치 등이 있다. 이것들은 전기 기계 결합 특성이 기존의 것보다 높기 때문에 더 좋은 효율을 보여준다.

압전 에너지 수집 장치의 효율을 높이기 위해서는 외팔보 형태의 압전에너지 수집 장치의 고유진동수를 가진 진동수와 일치시킬 필요가 있다. Cornwell et al.[31]은 다양한 기계적 파라미터를 조절하여 압전 소자로부터 생성되는 전력을 극대화하는 방안을 조사하였다. 그들은 수집장치의 고유진동수가 구조물의 진동수와 일치할 때 전원 발생은 약 25 배 정도 증가된다고 보고하였다. Roundy and Wright[20] 역시 에너지 수집 장치는 공진주파수에서 반응하도록 설계되어야 한다고 주장하였는데 집중질량을 갖는 외팔보 형태가 산출 전력을 극대화하는 구조임을 보여주었다.

주변 진동을 이용해 기계적인 에너지를 전기적인 에너지로 변환하여 수집하는 방법 중 또 다른 방법으로 전자기 시스템이 있다[32,33]. 전자기 시스템은 코일과 스프링에 부착된 영구자석으로 구성되어 있다. 진동에 의해서 야기된 자석의 기계적 거동은 코일단에서 전압을 유도한다. 이 에너지는 전기 부하로 전달될 수 있다. Roundy[34]은 에너지 수집에 대한 수많은 논문들이 있지만 기본적인 기술간의 비교에 있어서 완벽한 근거가 정리되어 있지 않다고 지적하였으며 전자기, 압전, 자기변형 에너지 수집기를 포함한 에너지 수집에 관한 기본 이론들을 기술하였다.

진동 기반의 에너지 수집 장치는 아직 개발 단계에 있기 때문에 불과 소수의 장치만이 상업적으로 사용할 수 있다. 대부분의 연구 노력은 실험실 수준의 개념 증명 단계에 있다. Microstrain, Inc[35]는 개발하였다. 센서 노드는 원격 측정이 가능한 온도센서와 습도 센서를 장착하고 있다. 압전 수집 장치는 57Hz 에서 순간적으로 2.7 ㎽의 전력을 생산할 수 있다고 보고되었다. Ottman et al.[36], Hofmann et al.[37], Guan and Liao[38]은 압전체를 에너지 수집 장치로 이용할 경우에 추출 전력을 극대화할 수 있는 전자 회로의 설계를 연구하였다. 압전체 에너지 수집 장치를 센서 노드와 결합할 경우 구조물 안전 진단에 적합한 시스템을 제공할 수 있다. 구조물 안전 진단으로의 응용에 대한 연구 결과에 대해서는 참고문헌[39-43]를 살펴보기 바란다.

이와 같이 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. 이를 위해 본 연구에서는 가정모드법(Assumed Mode Method)를 이용해 보다 정확한 모델을 유도하였다. 새 모델은 행렬식 형태로 표현되는 다자유도 모델이고 주파수 영역 전체를 감당할 수 있다. 또한 부대 전자회로에 대한 모델을 유도하고 마지막으로 부하 하중을 고려해 전력 출력 평가식을 유도하였다. 수치해석 결과는 압전에너지 수집 메커니즘에 대한 중요한 정보를 제공한다. 그리고 압전에너지 수집 장치의 충전 특성 조사를 위해 다양한 전자 부품에 대한 실험이 수행되었으며 실험 결과는 충전 특성을 보여주고 있다.

2. 압전 에너지 수집 장치의 모델링

Fig. 1 과 같은 외팔보에 집중 질량이 끝단에 부가된 시스템을 고려해보자. Fig. 1 의 시스템에 대해 운동과 탄성 에너지는 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

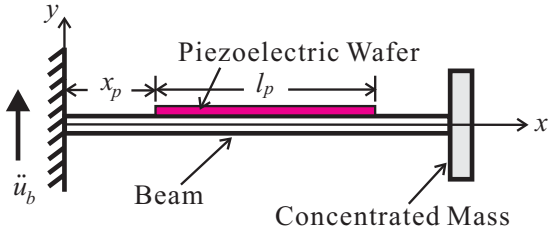

Fig. 1. Schematics of Cantilever-type Piezoelectric Energy Harvesting Device with a Tip Mass

$$T = \frac{1}{2}\int_0^L \bar{m}_b(\dot{u}_b(t)+\dot{u}(x,t))^2 dx + \frac{1}{2}m_c(\dot{u}_b(t)+\dot{u}(L,t))^2 + \frac{1}{2}\int_{x_p}^{x_p+l_p} \bar{m}_p(\dot{u}_b(t)+\dot{u}(x,t))^2 dx \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{2}EI\int_0^L \left(\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}\right)^2 dx + \frac{1}{2}E_p w_p t_p \int_0^L \left(\frac{t_b}{2}\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - \frac{d_{31}V_p}{t_p}\right)^2 dx \quad (2)$$

여기서 $\bar{m}_b$ 과 $\bar{m}_p$ 는 보와 압전 웨이퍼의 단위길이당 질량이며 m_c 는 끝단 질량이다. mass, $u_b(t)$ 는 기저부의 변위를 나타내며, $u(x,t)$ 는 x 축상의 y 방향 변위를 나타낸다. $\dot{\bullet}$ 는 시간 도함수를 나타낸다. L , EI , w_b 와 t_b 는 보의 길이, 굽힘강성, 폭과 두께를 나타낸다. 그리고 x_p , l_p , E_p , w_p 와 t_p 는 압전 웨이퍼의 시작위치, 길이, 영의 계수, 폭과 두께를 나타낸다. d_{31} 은 압전웨이퍼의 기계적인 응력과 전하 사이의 연성효과를 나타내는 압전상수이다. V_p 는 압전웨이퍼에 가해진 전압을 나타낸다.

수치해석을 위해 다음과 같은 가정모드 함수와 무차원화된 변수를 도입해보자.

$$u(x,t) = u(\xi,t) = \Phi(\xi)q(t) \quad (3)$$

여기서 $\xi = x/L$, $\Phi(\xi) = [\Phi_1(\xi)\ \Phi_2(\xi)\cdots\Phi_n(\xi)]$ 는 허용함수로 구성된 $1\times n$ 행렬이며 $q(t) = [q_1(t)\ q_2(t)\cdots q_n(t)]^T$ 는 일반좌표계로 구성된 $n\times 1$ 벡터를 나타낸다. n 은 이산화를 위해 사용된 허용함수의 총 개수를 나타낸다.

식 (3)을 식 (1)과 (2)에 대입하면 다음과 같은결과가 유도된다.

$$T = \frac{1}{2}m_t\dot{u}_b^2 + m_b\dot{u}_b\bar{\Phi}\dot{q} + \frac{1}{2}m_b\dot{q}^T\bar{M}_t\dot{q} \quad (4)$$

$$V = \frac{1}{2}\gamma_p V_p^2 - V_p b_p \Phi_p' q + \frac{1}{2}\frac{EI}{L^3}q^T\bar{K}_t q \quad (5)$$

여기서 $m_b = \bar{m}_b L$ 과 $m_p = \bar{m}_p L$ 는 각각 보와 압전웨이퍼의 질량을 나타낸다. 그리고,

$$m_t = m_b + m_p + m_c\,,\quad \bar{\Phi}_t = \bar{\Phi} + \alpha_c\Phi(1) + \frac{\alpha_p}{\beta_p}\bar{\Phi}_p \quad (6a,b)$$

$$\bar{M}_t = \bar{M} + \alpha_c\Phi^T(1)\Phi(1) + \frac{\alpha_p}{\beta_p}\bar{M}_p\,,\ b_p = \frac{E_p w_p d_{31} t_b}{2} \quad (6c,d)$$

$$\Phi_p' = \left.\frac{d\Phi}{d\xi}\right|_{\xi=\bar{x}_p+\bar{l}_p} - \left.\frac{d\Phi}{d\xi}\right|_{\xi=\bar{x}_p}\,,\quad \bar{K}_t = \bar{K} + \kappa_p\bar{K}_p \quad (6e,f)$$

여기서 $\alpha_c = m_c/m_b$, $\alpha_p = m_p/m_b$ 와 $\beta_p = l_p/L$ 는 질량비와 길이비를 나타낸다. 그리고 $\bar{x}_p = x_p/L$, $\bar{l}_p = l_p/L$ 는 각각 압전웨이퍼의 위치와 길이에 대한 무차원 변수를 나타낸다. 또한

$$\bar{\Phi} = \int_0^1 \Phi d\xi\,,\ \bar{M} = \int_0^1 \Phi^T\Phi d\xi\,,\ \bar{\Phi}_p = \int_{\bar{x}_p}^{\bar{x}_p+\bar{l}_p}\Phi d\xi \quad (7a-c)$$

$$\bar{M}_p = \int_{\bar{x}_p}^{\bar{x}_p+\bar{l}_p}\Phi^T\Phi d\xi\,,\ \bar{K} = \int_0^1 \frac{d^2\Phi^T}{d\xi^2}\frac{d^2\Phi}{d\xi^2}dx \quad (7d,e)$$

$$\bar{K}_p = \int_{\bar{x}_p}^{\bar{x}_p+\bar{l}_p}\frac{d^2\Phi^T}{d\xi^2}\frac{d^2\Phi}{d\xi^2}dx\,,\quad \kappa_p = 3\frac{E_p w_p t_p}{E_b w_b t_b} \quad (7f,g)$$

강성 행렬을 계산하는데 있어 보의 이차모멘트에 대해 다음과 같은 공식이 사용되었다.

$$I = \frac{1}{12}w_b t_b^3 \quad (8)$$

라그랑지 방정식과 운동 및 탄성에너지 표현식 (4)와 (5)를 사용하면 다음과 같은 운동방정식 유도된다.

$$m_b\bar{M}_t\ddot{q} + C_t\dot{q} + \frac{EI}{L^3}\bar{K}_t q - b_p\Phi_p' V_p = -m_b\bar{\Phi}_t\ddot{u}_b \quad (9)$$

여기서 감쇠항 C_t 가 추가되었다. 이 식을 풀면 기저부의 가진에 의한 보의 응답을 계산할 수 있다. 이 식은 또한 전기-기계 연성 효과를 포함하고 있는데 이는 가해진 전압으로도 구조물을 가진시킬 수 있음을 의미한다.

기저부의 진동과 보의 응답을 다음과 같은 조화함수 형태로 나타내보자.

$$\ddot{u}_b = \bar{a}_b e^{i\omega t}\,,\quad q = \bar{q}e^{i\omega t} \quad (10a,b)$$

식 (10)을 식 (9)에 대입하면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$\frac{\bar{q}}{\bar{a}_b} = -\left[-\omega^2\bar{M}_t + \frac{i\omega}{m_b}C_t + \frac{EI}{m_b L^3}\bar{K}_t\right]^{-1}\Phi_t = T_b(\omega) \quad (11)$$

이 식은 기저부의 가속도와 보의 운동 사이의 전달함수를 나타낸다.

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

$$Q_u = \frac{E_p w_p d_{31} t_b}{2}\int_{x_p}^{x_p+l_p}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}dx = b_p\Phi_p' q \quad (12)$$

압전 웨이퍼에 의해 소산된 전하는 다음과 같이 표현된다.

$$Q_p = C_p V_p \quad (13)$$

여기서 C_p 는 압전웨이퍼의 캐패시턴스 값을 나타낸다. 총 전하는 따라서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Q = Q_u - Q_p \quad (14)$$

이 전하가 에너지 수집 장치에 실제로 사용되는 전하이다. 식 (12)와 (13)을 식 (14)에 대입하고 시간에 대해 미분하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$2b_p\Phi'_p\dot{q} - C_p\dot{V}_p = I = V_p / R \qquad (15)$$

여기서 I 와 R은 회로의 전류와 부하 저항을 나타낸다. 참고문헌[20]에서 전력 출력 분석을 위해 사용된 방법에 따르면 시간 구간, $T_\omega = 2\pi/\omega$ 에 대해 식 (15)를 적분하면 다음과 같은 결과가 얻어진다.

$$2b_p\Phi'_p q - 2C_p V_p = \frac{T_\omega}{2}\frac{V_p}{R} \qquad (16)$$

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

$$\bar{V}_p = \frac{\omega b_p R}{\left(\omega C_p R + \pi/2\right)}\Phi'_p\bar{q} \qquad (17)$$

식 (11)을 이용하면 보의 진동에 의한 전력 출력은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{P}{\bar{a}_b^2} = \frac{\omega^2 b_p^2 R}{\left(\omega C_p R + \pi/2\right)^2} T_b^T(\omega)\Phi''_p\Phi'_p T_b(\omega) \qquad (18)$$

식 (20)은 기저부의 가진에 의해 압전에너지 장치에서 발생되는 전력을 평가하는데 사용될 수 있다.

수치계산예로 C_p =20.35nF, t_p =0.3mm, d_{31} =460 pC/N, E_p =30.34 GPa, x_p =0 mm, E =69 GPa, t_b =1 mm, w_b =80 mm, m_b =48 g, L =216 mm, m_c =75 g 을 가지는 시스템을 고려해보자. 이 상수값은 에너지 수집을 위해 제작된 장치의 실제 제원이다. Fig. 2 는 식 (11)과 (17)이 결합된 전달함수의 크기와 위상을 나타낸다.

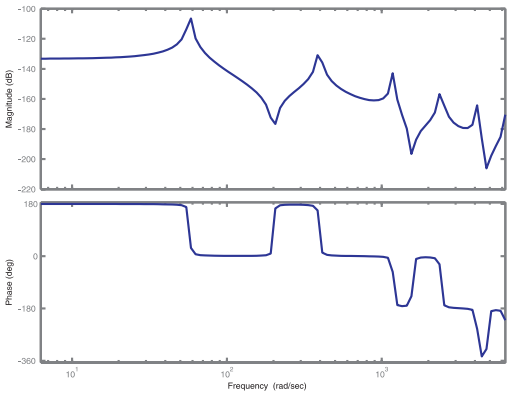

Fig. 2. Transfer Function of Energy Harvesting Device

이 그림으로부터 고유진동수가 9.2, 62.9, 188.6 Hz 인 것으로 나타났는데 실험값과 유사함을 알 수 있었다. Fig. 2 는 분포계의 전형적인 전달함수를 보여준다.

Fig. 3 은 기저부의 가진 주파수와 부하 저항에 의한 전력 출력 선도를 보여준다. Fig. 3 는 최적의 부하 저항이 존해함을 보여주는데 이 결과는 Shu and Lien[20]의 결론과 일치한다. 또한 Fig. 3 은 또한 고유진동수에서 전력값이 최대가 됨을 보여준다. 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.

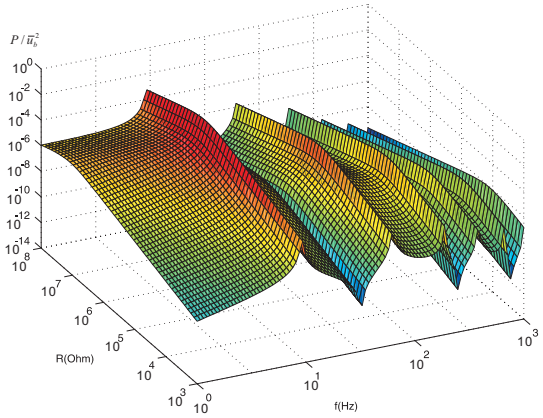

Fig. 3. Power Curve vs. Frequency and Resistance

3. 압전 에너지 수집 실험

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 웨이퍼[21] (Model M8557P1), 가진기(B&K Mini Shaker 33410), 그리고 렉티파이어 칩(WTE DF06)으로 구성되어 있다.

압전 웨이퍼가 부착된 보의 기저부를 가진기에 부착하고 함수 발생기를 이용해 사인파를 생성해 가진기 증폭앰프에 제공하여 외팔보를 가진하였다. 이 경우 압전 웨이퍼 출력 신호는 AC 신호이며 렉티파이어 회로를 거치면 반파 형태의 DC 신호로 변환된다.

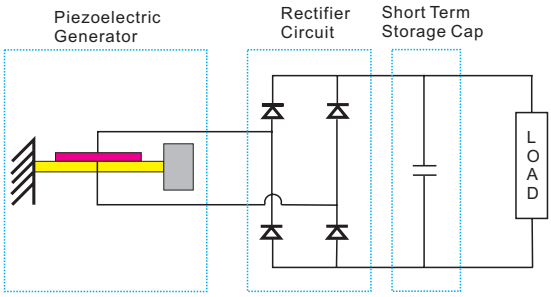

Fig. 4. Electrical Circuit for Piezoelectric Energy Harvesting System

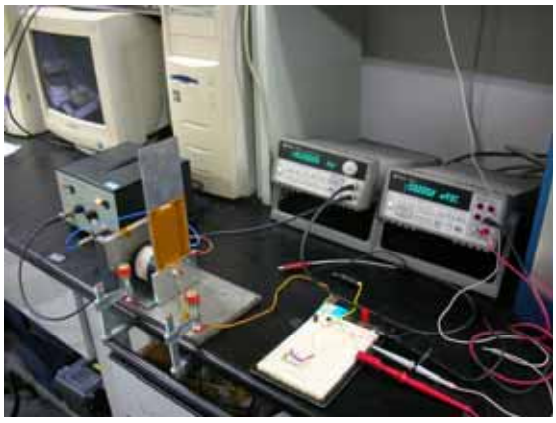

Fig. 5. Experimental Setup for Piezoelectric Energy Harvesting System

압전 에너지 수집 장치의 전력 출력은 효용성에 대한 중요한 지표이다. 전력 측정을 위해 LED 의 전류와 전압을 측정하고 이를 이용해 전력을 계산하였다. Fig. 6 은 기저부의 가진 주파수에 대한 전력을 보여준다. 최대 전력은 기본 진동수에서 얻어지며 그 값은 600 μW 이다. Fig. 6 은 다른 공진 주파수에서도 큰 값을 얻을 수 있음을 보여준다. 수치계산 예에서 토의되었듯이 고차 모드를 가진해서도 큰 전력을 얻을 수 있다.

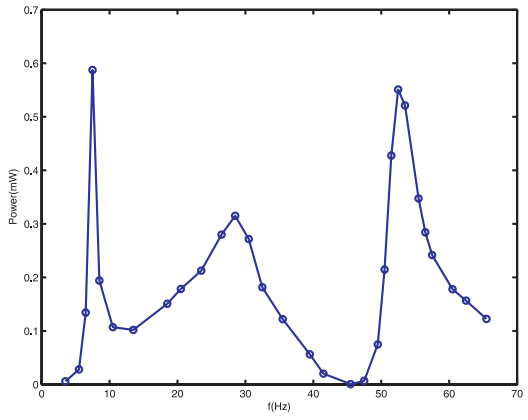

Fig. 6. Power vs. Frequency

단기 저장 캐패시터는 건전지를 충전하는데 있어 중요한 역할을 한다. 따라서 본 연구에서는 부하가 없는 상태에서 두 종류의 캐패시터에 대한 충전 특성을 실험으로 계측하였다. Fig. 10 과 11 은 220μF 와 1000μF 캐패시터를 첫번째 모드로 가진했을 경우의 시간대비 충전 전압을 보여준다. 최대 허용 캐패시턴스가 도달한 후에 전압은 더 이상 올라가지 않는다. 부하가 짧은 시간에 전류를 끌어갈 수 있기 때문에 큰 캐패시턴스 값을 가지는 캐패시터가 선호된다.

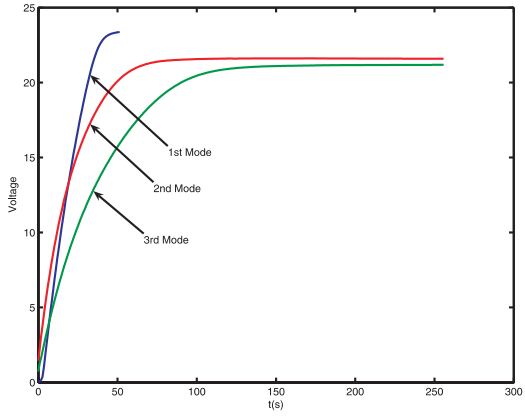

Fig. 7. Voltage Charging for the 220 μF Capacitor

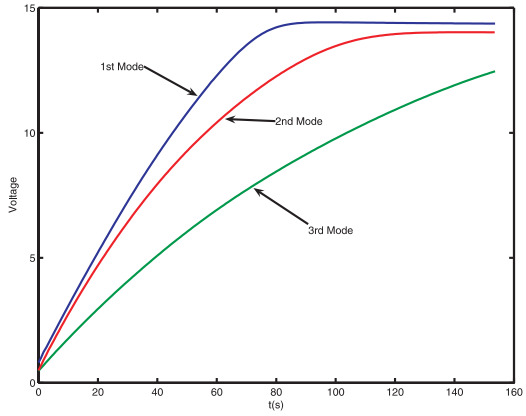

Fig. 8. Voltage Charging for the 1000 μF Capacitor

아주 큰 용량의 캐패시터, 즉 슈퍼캐패시터를 단기 저장 캐패시터로 사용하는 것이 바람직하다는 의견이 있었지만 실험이 수행된 적은 없다. Fig. 9 는 0.1F 캐패시터에 대해 시간별 충전 전압 선도를 보여준다. 이 선도는 첫 번째 모드를 아주 오래 가진하여 얻어졌는데 그림에서 알 수 있듯이 슈퍼캐패시터를 충전하는데 아주 오래 걸린다. 그러나 슈퍼캐패시터는 한번 충전되면 부하에 충분한 전력을 공급할 수 있다. Fig. 7,8,9 는 캐패시터의 최대 내부 전압이 존재함을 보여준다.

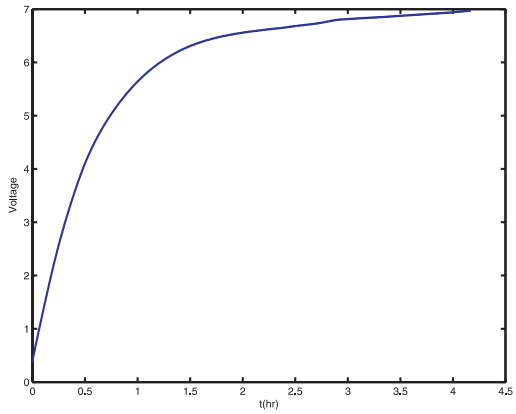

Fig. 9. Voltage Charging for the 0.1 F Super Capacitor

3.3V 4mAh Li-Ion battery (Seiko Model MS621)에 대해 220 μF 캐패시터를 단기 저장 캐패시터로 사용해 충전을 시도하였다. Fig. 10 는 건전지의 충전 전압 선도를 보여준다. 첫 번째 모드를 가진해 이 건전지를 충전하는데 약 4 시간이 소요되었다. 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 USN 에 장착된 마이크로프로세서를 이용해 건전지에 흘러들어가는 전류를 관찰해 작동시킬 수 있을 것으로 생각된다. 또한 마이크로프로세서는 단기 저장 캐패시터의 상태를 점검해 캐패시터의 연결도 제어해야할 것으로 생각된다.

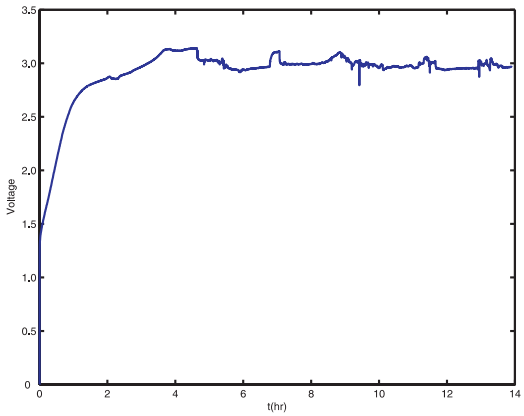

Fig. 10. Voltage charging for the 0.1 F super capacitor

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

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

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

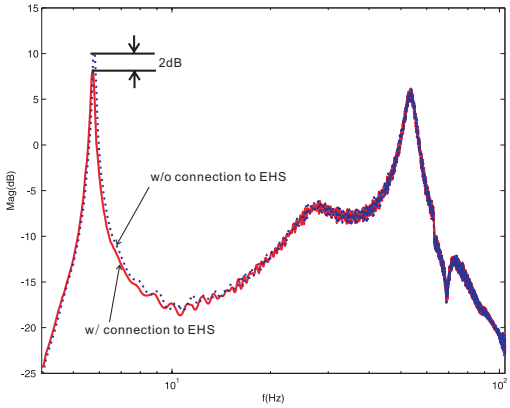

Fig. 12. Change in Frequency Response Curve by the Introduction of the Energy Harvesting System

4. 토의 및 결론

구조물 안전진단 분야와 센서 네트워크 시스템의 모든 영역에서 에너지 수집 기술이 조금씩 활용되고 있다. 무선 센서와 작동기 기술의 지속적인 향상, 개선된 신호 처리 기술 그리고 효율적인 전자장비 지속적인 개발 등은 에너지 수집을 연구하고 있는 엔지니어와 연구자에게 꾸준히 주목을 받을 것이다. 그러나 에너지 수집 기술은 아직까지 초기 단계이고 소수의 에너지 수집장치만 성공적으로 실험되었다. 에너지 변환 기술, 에너지 효율의 최적화 기술, 전자장비에 필요한 에너지량 축적 및 관리 기술등과 같이 아직 수많은 연구 과제가 남아 있다. 이 연구 과제는 에너지 수집 장치의 이론적인 모델링, 충전 회

로의 모델링, USN 지원 전원장치와 연결 회로 설계 등이 포함된다. 특히 자가발전이 가능한 무선 센서 네트워크와 같은 경우 에너지 수집 시스템의 전원 관리가 중요해진다. 신뢰성 또한 에너지원에 요구되는 가장 중요한 사항이다. 많은 진동 기반의 에너지 수집 장치는 공진에서 작동하도록 설계되었기 때문에 오랜 주기 동안 작동된 시스템은 불안정해질 수 있다. 실제 현장에서 에너지원으로 사용되기 위해서는 가혹한 환경 조건을 견디어야 하기 때문에 신뢰성과 강인성도 반드시 실험되어야 한다.

본 연구에서는 에너지 수집 방법 중 실제 활용이 검토되고 있는 압전 에너지 수집 장치의 동적 모델링 및 전자회로 분석을 시도하였다. 또한 압전 에너지 수집 장치와의 연결로 야기되는 감쇠 증가 효과에 대해 이론적인 모델을 유도하였다. 본 연구에서 제시한 압전 에너지 수집 장치에 대한 수학 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.

에너지 수집 장비가 USN 을 지원하기에 충분한 작동 조건이 무엇인지 조사하기 위해 캐패시터와 배터리의 충전율을 다양한 조건하에서 실험하였다. 실험 결과는 압전 에너지 충전 장치가 USN 의 보조 전원 장치로 사용가능함을 보여준다. 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 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 IT 신성장동력 핵심기술 개발사업의 일환으로 전자통신연구원의 RFID/USN 용 센서태그 및 센서노드 기술 개발[2005-S-106-02] 중 USN 센서노드를 위한 에너지 Harvest 기술 연구에 대한 위탁 과제의 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

(1) Sodano, H.A., Inman, D.J. and Park, G., 2004, " A Review of Power Harvesting from Vibration Using Piezoelectric Materials," The Shock and Vibration Digest, 36(3) pp. 197- 205.

(2) Fry ,D.N., Holcomb, D.E., Munro, J.K., Oakes, L.C., and Maston, M.J., 1997, Compact Portable Electric Power Sources, Oak Ridge National Laboratory report, ORNL/TM-13360.

(3) Glynne-Jones, P. and White, N.M., 2001, " Self-Powered Systems: A Review of Energy Sources," Sensor Review, 21, pp. 91- 97.

(4) Roundy, S.J., 2003 Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion, Ph.D. Dissertation, Department of Mechanical Engineering, University of California,Berkeley.

(5) Qiwai, M.A., Thomas, J.P., Kellogg, J.C., and Baucom, J., 2004, " Energy Harvesting Concepts for Small Electric Unmanned Systems," Proc. of SPIE, 5387, pp. 84- 95.

(6) Mateu, L. and Moll, F., 2005, " Review of Energy Harvesting Techniques and Applications for Microelectronics," Proc. of SPIE, 5837, pp. 359- 373.

(7) Paradiso, J.A. and Starner, T., 2005, " Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics," IEEE Pervasive Computing, 4, pp.18- 27.

(8) Niezrecki, C., Brei, D., Balakrishnan, S., and Moskalik, A., 2001, " Piezoelectric Actuation : State of the Art," Shock and Vibration Digest, 33(4) pp. 269- 280.

(9) Kwak, M.K. 1995, "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.

(10) duToit, N.E., Wardle, B.L., and Kim, S.G., 2005 " Design Considerations for MEMS-Scale Piezoelectric Mechanical Vibration Energy Harvesters," Integrated Ferroelectrics, 71, pp. 21- 160.

(11) Hausler, E. and Stein, E., 1984, " Implantable Physiological Power Supply with PVDF Film," Ferroelectrics, 60, pp. 277- 282.

(12) Starner, T., 1996, " Human-Powered Wearable Computing," IBM Systems Journal, 35, pp. 18- 628.

(13) Kymissis, J., Kendall, Paradiso, C., J., and Gershenfeld, N., 1998, " Parasitic Power Harvesting

in Shoes," Proceedings of 2nd IEEE International Symposium on Wearable Computers, October 19- 20th, Pittsburg, PA, pp. 132- 139.

(14) Ramsey, M.J., and Clark, W.W., 2001, " Piezoelectric Energy Harvesting for Bio MEMS Applications," Proc. of SPIE, 4332, Newport Beach, CA, pp.29- 438.

(15) Roundy, S., Wright, P., and Rabaey, J., 2003, " A Study of Low Level Vibrations as a Power Source for Wireless Sensor Nodes," Computer Communications, 23, pp.1131- 1144.

(16) Sodano, H.A., Inman, D.J., and Park, G., 2005, " Comparison of Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Recharging Batteries," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 16, pp. 799- 807.

(17) Sodano, H.A., Park, G., and Inman, D.J., 2004. " Estimation of Electric Charge Output for Piezoelectric Energy Harvesting," Strain, 40, pp. 49- 58.

(18) Lu, F., Lee, H.P., and Lim, S.P., 2004, " Modeling and Analysis of Micro Piezoelectric Power Generators for Micro -Electromechanical -Systems Applications," Smart Materials and Structures, 13, pp. 57- 63.

(19) Twiefel, J., Richter, B., Hemsel, T., and Wallaschek, J., 2006, " Model-based Design of Piezoelectric Energy Harvesting Systems," Proc. of SPIE, 6169, pp. 09.1- 09.10.

(20) Roundy, S. and Wright, P.K., 2004, " A Piezoelectric Vibration Based Generator for Wireless Electronics," Smart Materials and Structures, 13, pp. 1131- 1142.

(21) Kim, S., Clark, W.W., and Wang, Q.M., 2005, " Piezoelectric Energy Harvesting with a Clamped Circular Plate: Analysis," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 16, pp. 847- 854.

(22) Sohn, J.W., Choi, S.B., and Lee, D.Y., 2005, " An Investigation on Piezoelectric Energy Harvesting for MEMS Power Sources," Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part C—Journal of Mechanical Engineering Science, 219, pp. 429- 436.

(23) Goldfarb, M. and Jones, L.D., 1999, " On the Efficiency of Electric Power Generation with Piezoelectric Ceramic," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 121, pp. 566- 571.

(24) Kim, S., Clark, W.W., and Wang, Q.M., 2005, " Piezoelectric Energy Harvesting with a Clamped Circular Plate: Experimental Study," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 16, pp. 855- 864.

(25) Horowitz, S., Kasyap, K.A., Liu, F., D., Johnson, Nishida, T., Ngo, K., Sheplak, M., and Cattafesta, L., 2002, " Technology Development for Self-Powered Sensors," Proc. of 1st Flow Control Conference, AIAA-2022-2702.

(26) Glynne-Jones, P., Beeby, S., and White, N.M., " Toward a Piezoelectric Vibration-powered Microgenerator," IEEE Proc.-Science, Measurement and Technology, 148, pp. 68- 72.

(27) Jeon, Y.B., Sood, R., Jeong, J.H., and Kim, S.G., 2005, " MEMS Power Generator with Transverse Mode Thin Film PZT," Sensors and Actuators, 122, pp. 16- 22

(28) Lee, B.S., He, J.J., Wu, W.J., and Shih, W.P., 2006, " MEMS Generator of Power Harvesting by Vibrations using Piezoelectric Cantilever Beam with Digitate Electrode," Proc. of SPIE, 6169, 121- 129.

(29) Hong., Y.K. and Moon, K.S., 2005, " Single Crystal Piezoelectric Transducers to Harvest Vibration Energy," Proc. of SPIE, 6048, pp. E.1- E.7.

(30) Kim, H.W., Batra, A., Priya, S., Uchino, K., Markley, D., Newham, R.E., and Hofmann, H.F., 2004, " Energy Harvesting Using a Piezoelectric " Cymbal" Transducer in Dynamic Environment," Japanese Journal of Applied Physics, 43, pp. 6178- 6183.

(31) Cornwell, P.J., Goethal, J., Kowko, J., and Damianakis, M., 2005, " Enhancing Power Harvesting Using a Tuned Auxiliary Structure," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 16, pp. 825- 834.

(32) Williams, C.B. and Yates, R.B., 1996, " Analysis of a Micro-Electric Generator for Microsystems," Sensors & Actuators, 52, pp. 8- 11.

(33) Poulin, G., Sarraute, E., and Costa, F., 2004 " Generation of Electrical Energy for Portable Devices Comparative Study of an Electromagnetic and a Piezoelectric System," Sensors & Actuators, 116, pp. 61- 471.

(34) Roundy, S., 2005, " On the Effectiveness of Vibration-based Energy Harvesting," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 16, pp. 09- 824.

(35) http://www.microstrain.com/

(36) Ottman, G.K., Hofmann, H., Bhatt, A.C., and Lesieutre, G.A., 2002, " Adaptive Piezoelectric Energy Harvesting Circuit for Wireless, Remote Power Supply," IEEE Transactions on Power Electronics, 17, pp. 669- 676.

(37) Hofmann, H., Ottman, G.K., and Lesieutre, G.A., 2002, " Optimized Piezoelectric Energy Circuit Using Step-Down Converter in Discontinuous

Conduction Mode," IEEE Transactions on Power Electronics, 18, pp. 696- 703.

(38) Guan, M., and Liao, W.H., 2006, " On the Energy Storage Devices in Piezoelectric Energy Harvesting," Proc. of SPIE, 6169, pp. C.1- C.9.

(39) Elvin, N., Elvin, A., and Choi, D.H., 2003, " A Self-Powered Damage Detection Sensor," Journal of Strain Analysis, 38, pp. 115- 124.

(40) James, E.P., Tudor, M.J., Beeby, S.P., Harris, N.R., Glynne-Jones, P., Ross, J.N., and White, N.M., 2004. " An Investigation of Self-Powered Systems for Condition Monitoring Applications," Sensors & Actuators, 110, pp. 171- 176.

(41) Discenzo, F.M., Chung, D., and Loparo, K.A., 2006, " Pump Condition Monitoring Using Self-Powered Wireless Sensors," Journal of Sound and Vibration, 40 (5), pp. 12- 15.

(42) Pfeifer, K.B., Leming, S.K., and Rumpf, A.N., 2001, Embedded Self-Powered Micro Sensors for Monitoring the Surety of Critical Buildings and Infrastructures, Sandia National Laboratories report, SAND2001-3619.

(43) Ha, S., and Chang, F.K., 2005, " Review of Energy Harvesting Methodologies for Potential SHM Applications," Proc. of 2005 International Workshop on Structural Health Monitoring, pp. 1451- 1460.