

# 압전 재료를 이용한 진동에너지 변환 전력발생 시스템 해석 및 설계

금명훈\*·김경호\*·이승엽\*·고병식\*\*  
(2003년 8월 11일 접수, 2004년 3월 23일 심사완료)

## System Analysis and Design for Vibration-Based Power Generation using Piezoelectric Materials

Myoung-Hun Keum, Kyung-Ho Kim and Seung-Yep Lee

**Key Words:** Ambient Energy(여유에너지), Electric Energy(전기에너지), Energy Converter(에너지 변환), Micro Power Generation(초소형 전력 발생), System Analysis(시스템 해석), Optimal Design(최적 설계), Piezoelectric Materials(압전 재료), Vibration Energy(진동에너지)

### Abstract

A power generation systems are proposed to convert ambient mechanical vibration into electrical energy using cantilever-type piezoelectric materials. The vibration-based power device can be used for self-powered systems without batteries. This paper presents the theoretical analysis for the coupled equations of piezoelectric and structural motions and investigates the dynamic characteristics of the self-power system using transfer function method. The theoretical model is verified by the finite element analysis of the resonance frequency, the dynamic response of the structure and the sensor sensibility. Experimental results measured using a prototype system agree with the theoretical predictions. The system is shown to produce 34.5  $\mu W$  in average. Finally, we perform the optimal design for system variables to maximize output power.

### 1. 서 론

최근 모바일 전자기기 시스템이 발달되어 감에 따라 시스템을 장시간 사용하기 위한 방법들에 대한 관심이 높아지고 있다. 지금까지의 모바일 시스템은 하드웨어와 소프트웨어적으로 에너지 소비 효율을 높여 시스템이 저전력을 사용하여 장시간 사용하려는 연구와 배터리와 같은 화학적 기반의 동력원의 효율을 증대시키려는 연구가 주로 진행되어 왔다. 하지만 하드웨어와 소프트웨

어적인 효율 증대는 한계를 지니고 있어 근원적인 해결책을 제시하지는 못하고 있는 실정이다. 또한, 배터리와 같이 화학 기반의 에너지 저장은 장시간 사용함에 따라 효율이 감소하며, 큰 부피를 차지하여 모바일 시스템의 크기 제약으로 작용하는 문제점을 지니고 있다.

따라서 배터리 교체가 어렵고 오래 사용되는 시스템에서는 배터리를 대체할 수 있는 자체 동력원의 개발이 필요하다. 또한, 갑작스런 배터리의 방전과 충격과 같은 외력에 의해 시스템이 오작동 하였을 때 시스템을 안정적으로 유지시킬 수 있는 보조 동력원으로도 사용될 수 있다. 이러한 시스템 자체 동력원은 배터리와 같이 외부에너지를 저장하여 사용하지 않고 시스템의 구동에 의해 발생하는 에너지를 뜻하는 여유 에너지를 사용한다면 잠재적으로 반영구적인 작동 수명을 갖을 수 있다.

† 책임저자, 회원, 서강대학교 기계공학과  
E-mail : sylee@sogang.ac.kr  
TEL : (02)705-8638 FAX : (02)712-0799

\* 서강대학교 대학원 기계공학과

\*\* 한국시물레이션 기술(주)

이러한 여유 에너지 중의 하나인 진동에너지는 모바일 시스템에서 가장 흔하게 발생할 수 있는 에너지원으로 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데 MIT와 U.C. Berkeley 그리고 Chinese 대학 등에서 압전효과와 자속밀도를 이용하여 전력을 얻는 연구가 진행되고 있다. 우선, MIT에서는 인간이 걸을 때 신발에 가해지는 압전효과를 이용하여 전력을 발생시키는 연구를 진행하여 250 mW를 얻었고, 더 향상된 전력을 얻기 위한 연구가 진행되고 있다.<sup>(1)</sup> 또한, Chinese 대학에서는 레이저에 의해 가공된 코일 모양의 Spiral 스프링이 진동에 의해 자속 밀도를 변화시켜 동력을 발생시키며, 이 방법을 통해  $830 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 의 전력을 얻었음을 보고하였다.<sup>(2)</sup> 그리고 U.C. Berkeley에서도 comb 모양의 마이크로 capacitor를 이용하여  $50 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  전력이 발생함을 보고하였다.<sup>(3)</sup>

본 연구에서는 고효율의 전력 발생을 위한 압전 재료를 사용하여 진동 에너지를 변환하는 전력 발생 시스템의 기계적, 전기적인 동적 특성을 분석하고 최적 설계를 위한 다양한 정보를 얻기 위한 연구를 수행하였다. 지금까지 압전 재료는 기계적 변형을 전기적 신호로 바꾸는 용도로 사용될 경우, 주로 센서로서 전압 신호만을 발생시키는 것이 목적으로 연구되어 왔다. 따라서 최대 가용 전력의 획득에 있어서는 연구가 거의 이루어지지 않은 실정이다. 그리고 압전 재료의 동적 특성을 이론적으로 완전히 얻어내는 것이 매우 어려운 일이기 때문에 기존의 전기적 특성을 얻기 위한 연구들은 주로 정적인 상태의 변형을 가정한 재료 및 압전 방정식을 근사화하는데 머물고 있다. 그러나 가진 요소의 주파수가 높을 경우(~수십 Hz 이상)에 재료 내부에 가해지는 동적 응력과 변형은 절대 간과할 수 없다. 그러므로 압전 및 재료역학 방정식과 함께 동적 시스템의 특성을 잘 나타내는 주파수 응답함수를 적용하는 이론적 방법을 적용해 보고자 한다.

## 2. 시스템 이론적 모델

### 2.1 전력발생 모델

Fig. 1은 본 연구에서 제안한 전력 발생의 개념도를 보여준다. 원하는 전력량에 따라 여러개의 단위시스템을 연결하는데 각각의 단위체는 Fig. 2와 같이 압전물질이 부착된 네 개의 평판에 의해

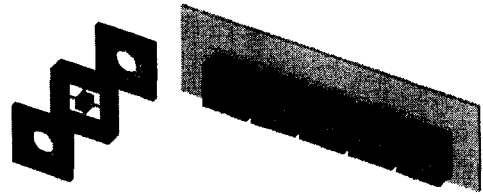


Fig. 1 Power generation systems with several modules

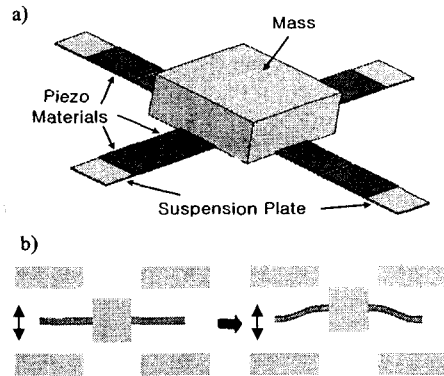


Fig. 2 Schematic diagram of a single module power generator

질량이 지지되어 있다. 본 시스템은 가진원의 주파수 범위와 크기에 대해 변형 및 피로 파괴가 일어나지 않는 한도 내에서 최대 전력을 갖도록 설계하는 것이 중요하다. 기계적 입력에 대한 전기적 출력의 동적인 특성이라는 물리적 결합 문제를 해결하기 위해 전달함수 합성 방법을 적용하였다. 시스템이 일정한 주파수와 크기의 가진원을 갖는다면 문제없지만, 대부분의 경우 주요 주파수 대역은 최대 주파수 이하의 저주파를 포함하고 있으므로 최대 가용전력을 얻는다는 측면에서 주파수 응답을 이용하는 방법이 필요하다.

또한, 기계적 전달함수가 전기적 전달함수에 비해 시스템의 출력에 큰 기여도를 가지는 것은 자명한 일이다. 그러나 PZT는 설계사양에 따라 내부저항과 캐패시턴스가 다르고 또한 외부 부하의 상태에 따라 시스템의 전기적 특성이 달라지므로 기계적 전달함수의 효과를 극대화하는 방법으로 여러 가지 수동 회로를 추가하는 방법을 적용할 수 있다. 이를 위해서 다양한 부하조건에서도 발전 특성을 잘 나타내는 기계적인 해석 모델이 있어야 하며 이를 바탕으로 전기적인 장치 추

가 및 변수 조절을 통한 부하 및 출력 제어가 이루어 질 수 있도록 해야한다.<sup>(4)</sup>

2.2 모델 방정식

가진 입력가속도  $\ddot{z}_r$ 와 두께방향의 PZT 출력 전압  $V_o$ 를 각각 시스템의 입·출력이라고 할 경우, 전체 시스템의 전달함수  $G_{total}(\omega)$ 는 상대변위  $z_r$ 를 나타내는 기계적 전달함수  $G_{me}(\omega)$ 와 상대변위에 대한 출력전압의 전기적 전달함수  $G_{elec}(\omega)$ 와의 곱으로 표현할 수 있다.<sup>(5)</sup>

$$\frac{V_o(\omega)}{\dot{z}(\omega)} = \frac{Z_r(\omega)}{\dot{Z}(\omega)} \frac{V_o(\omega)}{Z_r(\omega)} = G_{me}(\omega)G_{elec}(\omega) \quad (1)$$

기계적 전달함수는 Fig. 3(a)와 같이 기본적인 1자유도 감쇠 진동시스템으로 가정할 수 있으며 방정식은 다음과 같다.

$$m\ddot{z}_r + c\dot{z}_r + kz_r = -m\ddot{z}_i \quad (2)$$

여기서,  $k=48E_e J_e/L^3$ 는 등가강성이며, 점성 감쇠 계수  $c$ 는 실험을 통해 얻어낼 수 있다. 기계적 전달함수는 다음의 식으로 표현된다.<sup>(6)</sup>

$$G_{me}(\omega) = \frac{Z_r(\omega)}{\dot{Z}_i(\omega)} = K_{me} \frac{\omega_n^2}{\omega^2 - 2\xi\omega_n i\omega - \omega_n^2} \quad (3)$$

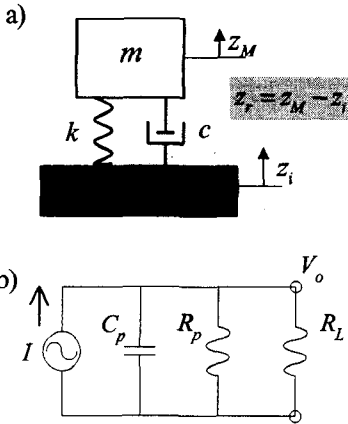


Fig. 3 Dynamic model of power generation system  
a) Mechanical model b) Electrical model

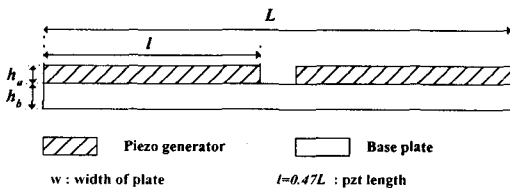


Fig. 4 Design variables

이때, 등가영률은  $E_e = (E_a h_a + E_b h_b)/(h_a + h_b)$ , 면적 모멘트는  $I_e = w(h_a + h_b)^3/12$ ,  $K_{me} = m/k$ 는 기계적 전달함수의 정적 민감도를 나타낸다. 반면, 전기적 전달함수는 Fig. 3(b)와 같이 압전 물질을 전류원과 내부저항  $R_p$ , 내부 캐피시턴스  $C_p$ 로 구성된 모델에 외부 정적 부하인  $R_L$ 을 인가하였을 경우로 구할 수 있다. 우선 전체 등가 저항은  $R_t = R_p + R_L$ 이며, 내부 캐피시턴스는 다음과 같다.

$$C_p = \epsilon_o \epsilon_r \frac{wl}{h_a} \quad (4)$$

여기서  $\epsilon_o$ 는 유전 상수,  $\epsilon_r$ 는 PZT의 상대적 유전 상수를 의미한다. 상대변위의 크기와 전류와의 관계는 다음과 같다.<sup>(7)</sup>

$$i(t) = K_q \dot{z}_i(t) \quad (5)$$

$$I(\omega) = K_q Z_r(\omega) i\omega \quad (6)$$

여기서  $K_q$ 는 단위 변위당 발생하는 전하량을 의미하며, 회로의 임피던스를 고려한 전압과 전류와의 관계를 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$I(\omega) = (i\omega C_p + \frac{1}{R_t}) V_o(\omega) \quad (7)$$

또한  $\tau = R_t C_p$ 라 할 때, 전기적 전달함수는 다음과 같다.

$$G_{elec}(\omega) = \frac{V_o(\omega)}{Z_r(\omega)} = \frac{K_q}{C_p} \frac{i\omega}{i\omega + 1} = K_{elec} \frac{i\omega}{i\omega + 1} \quad (8)$$

전기적 주파수 응답은 변형의 크기에 대한 출력전압을 나타내는 것으로서 정적 민감도  $K_{elec}$ 을 구하기 위해서 아래와 같이 작은 변형을 가정한 근사방정식을 적용하였다. 길이가  $L$ 인 외팔보에 수직방향으로 힘이 가해져 변형  $\delta$ 가 생길 경우  $x$  방향에 대한 변형의 크기  $v(x)$ , 모멘트  $M(x)$ 는 곡률의 정의와 Hook의 법칙에 의한 곡률의 근사식을 통해 다음의 관계를 가진다.

$$\frac{d^2 v(x)}{dx^2} = -\frac{M(x)}{E J_x} \quad (9)$$

$\delta_s$ 를 정적상태의 상대변위라고 하면, 양단의 경계조건은 다음과 같으므로

$$v(0) = 0, \quad \frac{dv(0)}{dx} = 0, \quad v(L) = \delta_s, \quad \frac{dv(L)}{dx} = 0$$

모멘트는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$M(x) = 12E_e J_e \frac{\delta_s}{L^3} x - 6E_e J_e \frac{\delta_s}{L^2} \quad (10)$$

압전 방정식으로의 적용을 위해 단면에서의 PZT 평균변형률  $S_{1a}(x)$ 를 구하는데, 중립축의 거리  $z_s$ ,

는 강성 가중치를 준 중립축에 대한 변형모델에 의해 다음과 같이 표현된다.<sup>(8)</sup>

$$z_s = \frac{\frac{h_a}{2} h_a \frac{E_a}{E_b} + \left(h_a + \frac{h_b}{2}\right) h_b}{h_a \frac{E_a}{E_b} + h_b} \quad (11)$$

PZT만의 중립축의 위치는  $z_s - h_a/2$ 이므로 평균 변형을  $S_{1a}(x)$ 는  $I_a = wh_a^3/12$ ,  $I_b = wh_b^3/12$ 일 때, 다음 식과 같다.

$$S_{1a}(x) = \frac{M(x)}{(E_a I_a + E_b I_b)} \left(z_s - \frac{h_a}{2}\right) \quad (12)$$

압전 방정식에서  $x$ 방향의 변형율이 다른 방향  $S_2$  및  $S_3$ 에 비해 지배적이라고 가정하면, 출력방향인 두께방향의 전기적변위  $D_3$ 은 다음과 같다.

$$D_3 = d_{31}(T_{11} + T_{22}) + d_{33}T_{33} \\ = (c_{11}d_{31} + c_{12}d_{32})S_{1a} = d_{31}(c_{11} + c_{12})S_{1a} \quad (13)$$

단위 변위당 발생하는 전하량  $K_q$ 는 면적에 대해 적분함으로써 구할 수 있다.

$$K_q = \int_0^l D_3 w dx = \int_0^l d_{31}(c_{11} + c_{12})S_{1a} w dx \quad (14)$$

따라서 식 (8)에서 전기적 전달함수의 정적계인은 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$K_{elec} = \frac{K_q}{C_p} \quad (15)$$

이렇게 구한 기계적, 전기적 전달함수를 곱해서 아래와 같은 외부 부하  $R_L$ 에서 가진가속도  $\ddot{z}_i$ 에 대한 출력전압  $V_o$ 를 나타내는 전체 시스템의 모델을 구할 수 있다.

$$\frac{V_o(\omega)}{\ddot{z}(\omega)} = G_{tot}(\omega) = G_{me}(\omega) G_{elec}(\omega) \\ = K_{me} K_{elec} \frac{\omega_n^2}{\omega^2 - 2\xi\omega_n i\omega - \omega_n^2} \frac{\tau i\omega}{\tau i\omega + 1} \\ = \frac{kK_q}{mC_t} \frac{\omega_n^2}{\omega^2 - 2\xi\omega_n i\omega - \omega_n^2} \frac{\tau i\omega}{\tau i\omega + 1} \quad (16)$$

한편, 출력되는 전력  $P$ 는 전압  $V_o$ 의 rms 값이  $V_{or}$ 인 경우, 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(9)</sup>

$$P = \frac{V_{or}^2 R_L}{(R_p + R_L)^2} \quad (17)$$

### 3. 이론적 해석

외부의 전기적 정적부하  $R_L$ 가 인가되었을 경우, 가진 가속도 크기에 대한 전압출력의 전달함수를 식 (16)에서 이론적으로 유도하였다. 이 식

Table 1 Initial design specifications

Mass	$m$	0.09 kg
Total Length	$L$	27.5 mm
Width	$w$	10 mm
PZT Height	$h_a$	0.2 mm
Plate Height	$h_b$	0.3 mm

Table 2 Material properties

Plate Elastic Modulus	$E_b$	$7.17 \times 10^{10}$ N/m <sup>2</sup>
Plate Poisson Ratio	$\nu_b$	0.33
PZT Elastic Modulus	$E_a$	$11.4 \times 10^{10}$ N/m <sup>2</sup>
PZT Poisson Ratio	$\nu_a$	0.3
PZT Compliance	$c_{11}$	$12.3 \times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /N
	$c_{12}$	$-4.05 \times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /N
Piezoelectric Coupling	$d_{31}, d_{32}$	$-171 \times 10^{-12}$ C/N
PZT Permittivity	$\epsilon_o$	$8.854 \times 10^{-12}$ F/m
	$\epsilon_r$	1250
PZT Capacitance	$C_p$	$8.4246e^{-9}$ F
PZT Internal Resistance	$R_i$	100 k $\Omega$
External Resistance	$R_L$	30 k $\Omega$

을 이용하여 Table 1과 2에 나타난 값을 갖는 모델을 해석하였다. 본 설계를 위한 공진주파수는 62.5 Hz로 설정하였다.

Fig. 5는 전기적인 전달함수를 나타내고 있다. HP4192A 임피던스 측정기를 통해 구한 PZT의 내부 캐피시턴스  $C_p$ 와 저항  $R_p$ 는 각각 11.5 nF과 100 k $\Omega$ 이다. 이는 식 (4)에 의해 구한 내부 캐피시턴스 8.5 nF와 약간의 차이를 갖는데, 이는 측정장비의 입력단이 갖는 수 pF의 내부임피던스의 영향이 있으므로 이론식에서 구한 값을 적용하는 것이 바람직하다. 전기적 모델은 일반적인 고대역 통과 필터와 유사한 특성을 가지고, 이는 동작 주파수가 클수록 같은 변형의 크기에 대해 높은 전압을 출력시킬 수 있다. Fig. 6은 기계적 전달함수로서 감쇠비는 실험값으로부터 얻어낸 0.09를 사용하였다. 이 두 전달함수의 곱으로 이루어진 전체 전달함수는 Fig. 7에 나타나 있는데, 전반적으로 기계적 전달함수의 영향이 지배적이라는 것을 알 수 있다. 그러나 주파수가 클수록 전기적 전달함수의 영향이 커지므로 전기적 외부 부하를 적절히 조절하여 저주파 부분의 출력을 극대화시킬 수 있다. 또한 ANSYS를 이용한 FEM 모델해석을 수행하여 공진주파수와 모드형상 확인하였다.

### 4. 실험 및 토의

#### 4.1 제작 및 실험

모델의 적합성을 검토하기 위해 이론적 해석에 사용된 설계 사양을 갖는 실험 모델을 직접 제작해 실험을 수행하였다. 가진기를 이용해 1G 내의 가속도를 가지도록 20~200 Hz 범위내의 임의 가진을 하고, 가속도 신호를 기준 데이터로 하여 전달함수를 계산하였다. Fig. 9와 같이 데이터 측정 및 처리 장비인 시그랩(Siglab)의 4개 채널을 통해 측정하였다. 직접 가진되는 모델의 기저에 가속도계를 이용해 가진 가속도를 측정하고 질량과 기저에 각각 비접촉 변위 센서를 이용하여 두 값의 차이를 계산하여 상대변위 곧 변형의 크기를 구하였다. 그리고 총 8개의 PZT 중 하나로부터 출력전압을 측정하였다. 비접촉 변위센서로는 MTI-2000 Fotonic Sensor를 사용하였다.

실험결과는 Fig. 10에 나타난 바와 같이 30kΩ 부하상태에서의 가속도에 대한 전달함수로써, 발생되는 전력은 정류되어 DC 형태로 저장되기 때문에 그 크기만 도시하였다.

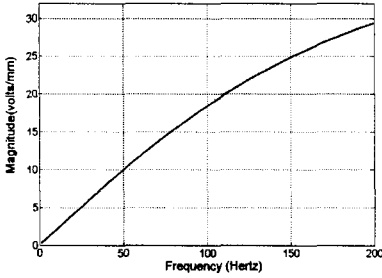


Fig. 5 Transfer function of 1st order electric model

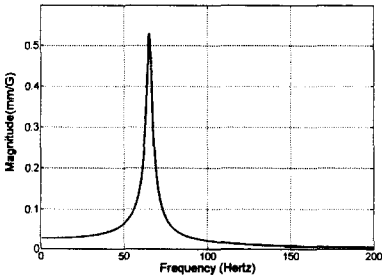


Fig. 6 Transfer function of 2nd order mechanical Model

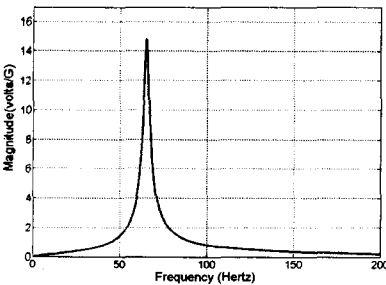


Fig. 7 Transfer function of total system model

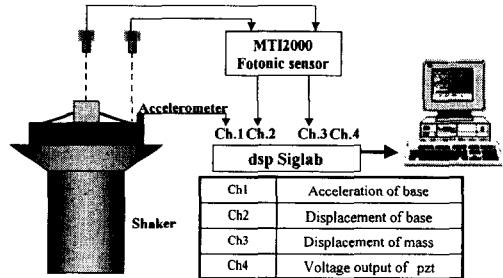


Fig. 9 Experimental setup

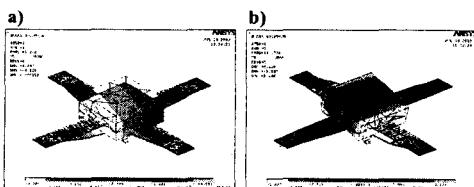


Fig. 8 FEM Modal Analysis a) 1st mode shape (67Hz) b) 2nd mode shape(136Hz)

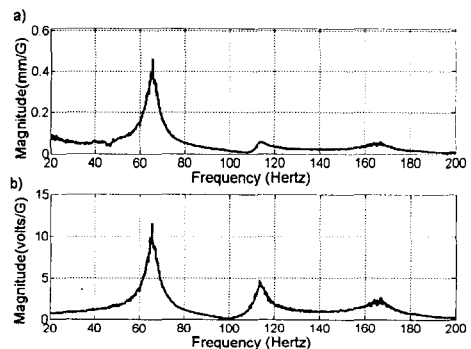


Fig. 10 Experiment results a) relative displacement b) output voltage

4.2 결과 비교

해석과 실험결과를 함께 도시한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 기계적 전달함수는 공진주파수 부근에서 상당히 비슷한 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 실험의 경우 저주파에서의 약간의 차이를 나타내는데 이것은 실험 모델의 고정대과 가진기 자체의 저주파 고유진동수의 영향 때문인 것으로 예상되며 고주파수 경우에 있어서의 차이는 해석 모델에서 첫번째 이외의 다른 공진주파수를 배제하였기 때문에 나타난 결과라고 할 수 있다. 본 연구에서 중요한 것은 설계식으로 사용된 이론 해석모델의 적합성을 검토하는 것으로서 주요 관심영역은 시스템의 운영주파수인 공진주파수 근처에서 실험치와 예상치가 얼마나 근접하는지를 살피는 것이다. 전달함수 형태의 이론적 모델은 최대응력의 계산과 예상 출력전압의 계산에 사용되는데, 허용응력의 안전계수의 적용과 출력전압이 캐피시턴스에 임시저장된다는 이유로 결과의 오차는 크게 문제가 되지 않을 것이고 또한 FEM의 주파수 응답해석을 수행하는 것 역시 설계측면에 큰 기여가 되지 않으므로, 모달해석 정도의 결과만 고려해도 문제없다고 생각된다.

또한 1G, 60Hz의 지속적인 가진에 의해 PZT 1개당 2.16  $\mu\text{W}$ , 즉 그림2와 같이 위아래 양면의 총 16개의 PZT가 있는 시스템에서 총 34.5 $\mu\text{W}$ 가 출력되는 것을 확인했다.

4.3 주파수 응답모델의 선형성 평가

본 논문에서는 전력 발생 시스템의 설계를 위한 방법으로 주파수 응답함수를 적용하였고, 실험을 통해 검증하였다. 그러나 전달함수 모델은 시스템의 선형성을 가정한 상태에서 유효하므로 여러 재질의 복잡한 형상의 시스템이 입력의 범위 내에서 선형 응답을 나타낸다는 것을 확인할 필요가 있다. 따라서 Fig. 12에서 가진 주파수 (a) 35 Hz, (b) 62 Hz, (c) 85 Hz에서 입력의 크기에 따른 응답의 크기를 나타내었다. 그리고 각 직선의 기울기는 (d)의 해당주파수에서의 전달함수의 크기의  $1/\sqrt{2}$ 배와 일치하는데 이는 rms 값을 적용하였기 때문이다. 이와 같이 가진의 크기의 제한 아래에서의 동작 특성이 선형성을 가지기 때문에 본 논문에서 제시한 전달함수 모델은 적합하다고 말할 수 있다.

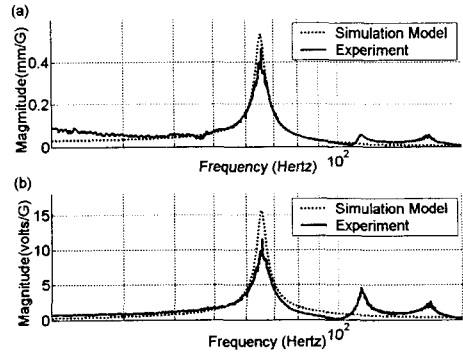


Fig. 11 Comparisons of experiment and simulation results, a) mechanical transfer function b) total transfer function

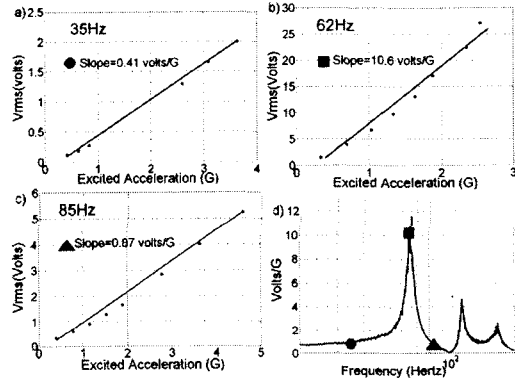


Fig. 12 Linearity evaluation

4.4 외부 전기적부하에 대한 출력특성

시스템을 설계하기 위한 목적함수는 출력 전력이며, 식 (17)에 나타나 있다. 시스템의 운영조건 즉, 가진 주파수 범위와 크기에 대해 최대전력을 발생시키는 것이 목표이므로 허용된 범위 내에서 운영 주파수 대역 내에 공진을 유도하도록 해야 한다. 그러나 단순히 정적 상태를 가정하지 않고 주파수 영역에서의 기계적 동적 모델을 구해야 하는 중요한 이유 중에 하나는 시스템 내부 및 외부의 전기적인 특성이다. 그 대표적 예가 Fig. 13에 나타나 있다. 제시한 설계 모델에 인가된 정적부하  $R_L$ 의 크기에 따른 전력 출력 양상을 나타내는 것으로서 약 30k $\Omega$ 에서 최대 출력을 보이는 것을 알 수 있다. 어떤 전력 발생원이든 외부부하에 대해 민감한 특성을 보이는데, 본 시스템 역시 부하의 동적 특성 곧 임피던스가 PZT 전력 발생원과 결합될 경우 출력의 크기가

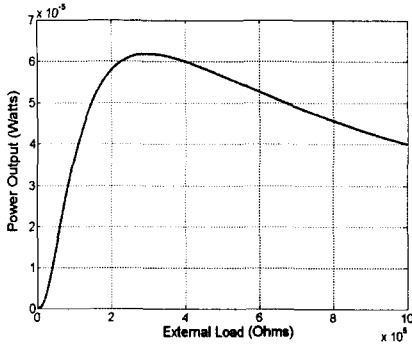


Fig. 13 Power Output by External load under 60Hz Excitation

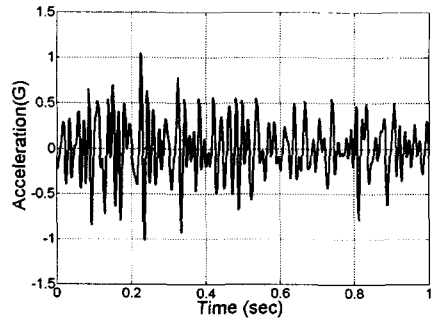


Fig. 15 Random excitation under 20 ~ 80Hz band

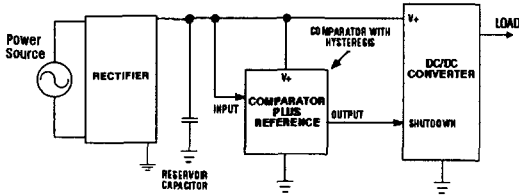


Fig. 14 The input to a DC/DC converter for power conversion comprises the panel, a reservoir capacitor, and a comparator/reference circuit that enables the converter only when adequate power is available <sup>(10)</sup>

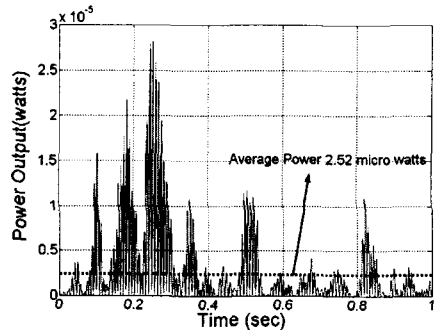


Fig. 16 Poweroutput about excitation

영향을 받기 때문이다. 그러므로 다른 전력 발생 원과 같이 전력상태 유지를 위한 회로를 별도로 구성할 필요가 있다.

Fig. 14은 MAXIM 社의 Application note에서 소개한 태양전지를 위한 전력상태 유지회로를 본 시스템에 사용가능하도록 수정한 개념도이다. 발생된 AC전력은 정류되어 임시로 캐패시터에 저장되고 이때 캐패시터 양단에 걸린 전압이 특정 값 이상으로 유지될 경우만 DC-DC 변환기가 작동하고 충전량이 보장될 경우만 출력을 부하가 사용할 수 있도록 하는 것이다. 본 시스템은 물론 서론에 소개된 전력발생 시스템은 단위 제품 센치미터당 수  $\mu$ W내외의 전력만을 발생하므로 지속적인 전력을 공급하기에는 부족한 것이 사실이다. 따라서 충전을 통해 전기에너지를 저장시키고 필요할 때만 큰 순간전력을 사용하는 방법이 유용하며 이를 위해서 전력을 제어할 수 있는 장치가 요구된다. 실제로 MAXIM 社의 MAX666과 MAX931과 같은 저전력 소자들을 이용한 전력제

어 회로들이 소형 전자제품에 많이 응용되고 있고, 본 시스템에도 차후 적용할 계획이다.

#### 4.5 출력 전력 예측

앞에서 주어진 모델에 대해 Fig. 15와 같은 가속도가 인가될 경우 출력 전력을 시뮬레이션을 통해 나타내었다. 가진 가속도는 20 ~ 80 Hz내의 임의의 주파수와 크기를 합성하였다. 이 경우, 1초 동안의 PZT 개당 평균 전력은 2.52  $\mu$ W를 얻었다.

실제 시스템에 사용될 경우, 가장 먼저 이루어져야 하는 것이 진동원의 분석이다. 대부분의 경우는 반복 가진과 임의의 가진이 합성된 형태로 나타나므로 Fig. 16과 같이 일정하지 않고 불규칙적인 출력을 보인다. 따라서 단순히 평균출력 양을 바탕으로 시스템을 설계하는 것보다는 본 논문에서 제시한 동적모델을 이용해 분석된 가진원에 대한 평균출력의 크기는 물론, 충전과 전력사용의 시간을 결정하는 등의 출력 및 부하제어를 위한 정보들을 통해서 설계하는 것이 효과적이다.

5. 최적설계

5.1 최적설계를 위한 공식화 및 분석

최적설계를 위한 목적은 식 (17)의 출력전압 값을 최대화하는 것이고, 설계변수는 Fig. 4에 나타나 있는 바와 같이 PZT의 길이, 두께, 폭, plate의 두께와 질량체의 무게이다. 이와 함께 운용 주파수와 가진의 크기에 대한 최대 응력값을 구하는 것이 중요하며, 근사식은 다음과 같이 유도할 수 있다.

단일 주파수  $\omega_{op}$ 에서 운용된다고 가정할 경우, 식 (4)의 기계적 전달함수에 의해 변형의 크기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = |G_{me}(\omega_{op})| |\vec{z}_d| \tag{18}$$

이에 대한 모멘트는 식 (10)과 같고, 최대 모멘트는  $x=0, L$  에서 발생하므로 식 (19)와 같다.

$$M_{max} = M(x)|_{x=0} = 6E_e \frac{I_e}{L^2} \delta = 6E_e \frac{I_e}{L^2} |G_{me}(\omega_{op})| |\vec{z}_d| \tag{19}$$

여기서 해당 단면에서 최대 응력은 중립축에서 가장 먼, PZT 표면에서 발생하므로 식 (12)를 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_{max} &= \frac{M_{max} z_s}{I_e} \\ &= \frac{3h_a^2 E_a + (2h_a + h_b)h_b E_b}{L^2(h_a + h_b)} |G_{me}(\omega_{op})| |\vec{z}_d| \end{aligned} \tag{20}$$

따라서 시스템의 운용 주파수와 가진의 크기가 주어질 경우, 최적설계 문제는 Fig. 4와 Table 1에 나타난 설계변수들에 대해 Table 3과 같이 공식화할 수 있다. 여기서  $f_n$ 는 식 (17)의 전력 출력을,  $h$ 는 공진주파수  $\omega_n = \sqrt{k/m}$ , 그리고  $g$ 는 식 (20)의 최대 응력식이고,  $T_{yield}$ 는 항복응력,  $S.F$ 는 안전계수를 의미한다.

MEMS 크기로 소형화하여 진행시킬 본 시스템에 본 설계식을 적용하기 전에, 본 논문에서 제작, 설계한 Prototype에 대해 간단한 최적화를 수행해 보았다. 두층의 두께 비율을 고정시키고, 1차 공진주파수를 시스템의 운용주파수 62.5 Hz라 하면, 질량  $m$ 은 중속 변수가 되므로 소거하고, PZT 길이  $L$ 과 폭  $w$ , 두께  $h$ 를 지배적인 설계변수로 선택하였다. 세 설계 변수의 범위 내에서 62.5Hz 공진주파수와 일치하는 운용주파수의 1G 크기의 가속도에 대한 최적화를 수행하였다. 또한, 민감도를 평가하기 위해 각 설계변수들에 대한 목적 함수인 최대 전력량과 Constraint인 최대

응력을 각각의 변수에 대해 해석해 보았다.

Table 3 Formulation

Variable Vector	$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}^T$
Cost Function	minimize $\{-f(X)\}$
Variables Constraints	$x_{imin} \leq x_i \leq x_{imax} \quad (i=1, 2, 3, 4, 5)$
Equality Constraint	$h_1(X) = \omega_{op}$
Unequality Constraint	$g_1(X) < \frac{T_{yield}}{S.F}$

Table 4 Result of Optimization

	Prototype (Experiment)	Optimal Solution
Length	27.5mm	15mm
Thickness	0.5mm	0.25mm
Width	10mm	15mm
PowerOutput(total)	34.5 $\mu W$	85 $\mu W$

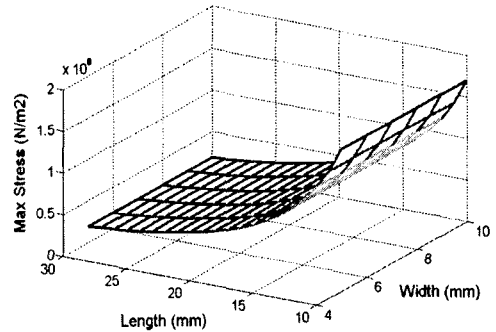


Fig. 17 Maximum stress about length & width

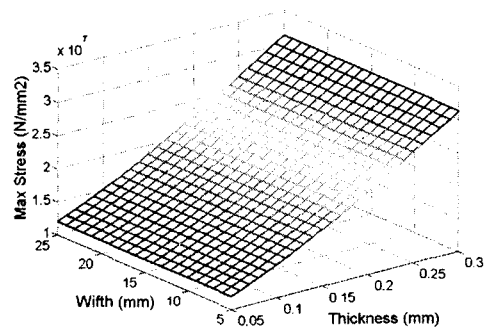


Fig. 18 Maximum stress about thickness & width



Fig. 17과 18로부터 PZT의 폭은 다른 설계변수들에 비해 최대 응력에 영향을 주지 않다는 것을 알 수 있으며, 출력 전력의 세가지 그림에서 길이가 짧고 두꺼우며 폭이 넓을수록 좋다는 것을 알 수 있다. 길이와 두께에 대한 최대 응력을 이용하여 허용 응력의 범위 내에서 최적값을, 폭은 시스템의 형상이 허용하는 범위내에서 가장 큰 값을 선택하였고 자세한 사항은 Table 4와 같다.

3장에서 제시한 이론적 모델을 평가하여 설계 방정식으로 사용할 수 있음을 증명하였고, Prototype에 대한 최적화를 수행하여 시스템의 85  $\mu$ W 출력이 가능하다는 것을 보였다. 그러나 실제 MEMS 크기의 기기를 설계할 경우 직접적으로 이 설계 방법이 적용가능할지는 불확실한데, 각 최적화된 설계변수의 비율 즉 길이와 폭이 같고 길이의 0.167배 이상의 두께를 갖는 형상의 PZT를 설계하는 것이 가장 좋은 방법이라고 말할 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 압전재료를 이용하여 시스템에서 발생하는 자체 진동에너지를 변환, 전력을 발생시키는 전력발생 시스템의 아이디어를 제시하고 설계를 위해서 압전 및 구조 방정식의 연성 해석과 함께 주파수 응답함수를 적용하는 이론적 방법을 적용해 동적 특성을 분석하였다. 소형화의 전 단계로서 실제 모델을 제작하고 실험을 수행하여 약 40 $\mu$ W의 전력을 생산하는 것을 보였으며 이론적 해석과 비교하여 설계 방정식의 타당성을 입증하였다. 이를 바탕으로 최적설계를 위한 문제를 공식화한 후, 설계변수들의 민감도를 고려하고 유효한 최적 설계치를 결정하여 최대 85 $\mu$ W까지 최적화할 수 있음을 보였다. 각 설계변수들의 상대적인 비율은 차후 MEMS 스케일의 기기를 설계, 제작할 경우 형상을 결정하기 위한 중요한 정보가 될 수 있다.

이와 함께 시스템 내·외부의 전기적 특성을 고려 최대 가용전력을 획득하기 위한 방법과 회로를 설계하여 차후 실제 기기에 응용될 수 있는 구체적인 방안을 제시하였다.

## 후 기

본 논문은 2002년도 한국학술진흥재단 선도연구자지원사업 (KRF-2002-041-D00063)에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Shenck, N.S. and Paradiso, J.A., 2001, "Energy Scavenging with Shoe-Mounted Piezoelectrics," *IEEE Micro*, Vol. 21, No. 3, pp. 30~42.
- (2) Ching, N.N.H. Wong, H. Li, W.J. Leong, P.H.W. and Wen, Z. 2002, "A Laser-Micromachined Multi-Modal Resonating Power Transducer for Wireless Sensing Systems," *Sensors and Actuators A*, Vol. 97-98, pp. 685~690.
- (3) Roundy, S. Wright, P.K. and Pister, K.S., 2002, "Micro-Electrostatic Vibration-to-Electricity Converters," *Proceedings of IMECE 2002*, New Orleans, Louisiana. (IMECE2002-39309).
- (4) Amirtharajah, R. and Chandrakasan, A.P., 1998, "Self-Powered Signal Processing Using Vibration-Based Power Generation," *IEEE Journal of Solid-State Circuit*, Vol. 33, No. 5, pp. 687~695.
- (5) Yu, J.-C. and Lan, C.-B., 2001, "System Modeling of Microaccelerometer Using Piezoelectric Thin Films," *Sensors and Actuators A*, Vol. 88, pp. 178~186.
- (6) van Kampen, R.P. and Wolffenbuttel, R.F., 1998, "Modeling the Mechanical Behavior of Bulk-Micromachined Silicon Accelerometers," *Sensors and Actuators A*, Vol. 64, pp. 137~150.
- (7) Nemirovsky, Y. et al, 1996, "Design of a Novel Thin-Film Piezoelectric Accelerometer," *Sensors and Actuators A*, Vol. 56, pp. 239~249.
- (8) Eggborn, T., 2003, "Analytical Models to Predict Power Harvesting with Piezoelectric Materials," Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- (9) Rizzoni, G., 2000, "Principles and Applications of Electrical Engineering," 3rd ed., McGraw-Hill.
- (10) MAXIM. co., "Harnessing Solar Power with Smart Power-Conversion Techniques," *Application notes*, [http://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/appnote\\_number/364#photons](http://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/appnote_number/364#photons).