

압전섬유복합재 외팔보 에너지 회수장치의 출력전압 최대화

김 선 명* · 김 철*†

* 경북대학교 기계공학부

Maximization of the Output Voltage of a Cantilevered Energy Harvester Comprising Piezoelectric Fiber Composites

Seon-Myeong Kim* and Cheol Kim*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

(Received March 15, 2011 ; Revised April 5, 2011 ; Accepted April 7, 2011)

Key Words: Energy Harvester(에너지 회수장치), Piezoelectric Fiber(압전섬유), Voltage(전압), Cantilevered Beam(외팔보)

초록: 손가락형 전극과 압전섬유/에폭시 복합재료(MFC) 압전패치가 분포된 알루미늄 외팔보형의 에너지 회수장치를 설계하여 전기-기계적 특성을 연구하였다. 최대 전력을 얻기 위해서 보와 외부 가진이 공진 주파수에서 진동하도록 하였다. ANSYS를 사용하여 해석기법을 개발했으며, 방법의 타당성 검증을 위해서 결과를 실험과 비교하였으며, 두 결과는 잘 일치하였다. 개발된 해석기법을 사용하여 PZT, PVDF, MFC 압전체에 의한 발생전압의 차이를 계산했으며, 압전체의 위치, 보의 치수가 성능에 미치는 영향을 연구하였다. 또한 MFC에 의한 최대 전압발생을 위해서 보의 치수에 대한 최적화가 수행되었으며, 그 결과 최적화된 보에서 1차고유진동수 24.5Hz에서 40.1V의 전압이 발생했으며 이 값은 PZT의 결과와 비슷하다. 그러나 압전섬유형 회수장치는 PZT보다 더 높은 내구수명이 기대되어 유리하다.

Abstract: In this study, a cantilevered energy harvester comprising piezoelectric fiber and epoxy composites was designed and analyzed electro-mechanically. In order to maximize the power of the cantilevered energy harvester, its exciting frequency was tuned to the first natural frequency of the beam. An efficient analysis method for predicting the output voltage of the beam was developed by using the finite element method coupled with piezoelectric behavior. By using this method, the effects of geometric parameters and various piezoelectric materials on power generation were investigated and the electric characteristics were evaluated. Design optimization of the beam geometries was performed for a base model. The optimum MFC design generated a maximum electric output of 40.1 V at a first natural frequency of 24.5 Hz.

1. 서 론

전기에너지 회수기술은 태양에너지, 휴대 기기 부착장치의 미세 진동에너지, 인간의 신체활동으로 인한 소산에너지 등 다양한 에너지원들을 흡수하여 전기에너지로 변환하고, 전자 기기 등의 전력원으로 사용할 수 있는 주위 환경에서 얻는 재생에너지라 할 수 있다. 반도체 저 전력화와 소형화 기술발달은 무선센서노드(wireless sensor node, WSN)와 유비쿼터스 센서 노드(USN)의 상용화를 촉진시켰다. WSN/USN에 사용되는 반도체

회로에는 외부 전원이 공급되며 일반적으로 배터리가 사용된다. 하지만 무선 센서 시스템의 특성상 유지보수가 용이하지 않다는 문제점을 가지고 있다. 그래서 앞으로는 주기적으로 배터리 교체를 할 필요가 없는 영구적이고 안정적인 전원공급원이 반드시 필요한 실정이며, 이와 관련된 전기에너지 회수장치의 연구가 활발히 이루어져 왔다.⁽¹⁻⁵⁾ 이러한 노력으로 최근에는 수 많은 진동 기반의 에너지 회수장치에 전자기, 정전기, 압전기 등을 포함하는 다양한 메커니즘이 제안되었다.⁽²⁻⁶⁾

압전재료(piezoelectric materials)를 이용한 에너지 회수장치는 높은 에너지 밀도와 자급자족의

† Corresponding Author, kimchul@knu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

발전능력 때문에 특히 많은 주목을 받고 있다. 압전재료 에너지 회수장치는 낮은 외부의 가진 주파수로부터 최대의 전력을 생산하기 위하여 가진 주파수와 회수장치의 고유 진동수를 일치시켜 공진현상을 유도한다. 이 때문에 보통 샌드위치 적층의 캔틸레버 판이나 보 구조를 가지고, 끝에는 큰 질량이 위치한다.

Roundy 등⁽¹⁾은 치수가 다른 1cm³ 부피의 WSN 압전 에너지 회수장치에 대한 연구를 하였고, 다른 출력량을 가짐을 증명하였다. Mitchson 등⁽²⁾과 Beeby 등⁽⁶⁾은 압전 회수장치나 진동 회수장치의 성능을 외팔보의 치수에 따른 출력 전압, 질량의 크기, 입력 진동 주파수, 변위의 크기, 가속도 등에 관해서 정리하였다. 이들의 연구에서 압전 에너지 회수장치의 치수 변화가 전력 출력에 큰 영향을 미칠 수 있다는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 ANSYS를 이용하여 독특한 압전섬유(piezoelectric fiber) 복합재 외팔보 에너지 회수장치의 전기 출력을 예측하기 위한 해석 및 설계기법을 개발하였다. 이를 바탕으로 하여 외팔보 기반의 압전 에너지 회수장치의 기하학적 매개변수와 다양한 압전재료들이 전력 출력에 어떠한 영향을 미치는지 알아보고, 성능을 평가하였다. 그리고 전기에너지 회수장치의 치수 최적화를 수행하여 최대의 전기 출력량을 가진 모델을 제시하였다.

2. 회수장치 해석기법의 검증

해석의 타당성을 검증하기 위하여 압전섬유 복합재 외팔보형 전기에너지 회수장치의 출력 전압을 ANSYS를 이용하여 해석하고 그 결과를 Yang 등⁽⁷⁾의 실험 결과와 비교하였다. 해석 모델은 Fig.

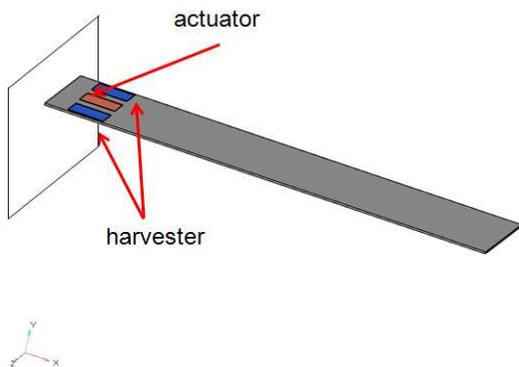


Fig. 1 Cantilevered energy harvesting system

1과 같이 외팔보형의 얇은 판의 가운데 부분에 압전섬유 복합재 작동기를 위치시키고, 그 좌우에는 압전 회수장치를 위치시켰다. 작동기에 전압을 부여하여 외팔보에 진동을 유발하고, 그 결과 발생된 기계적 굽힘변형은 다시 에너지 회수장치에 의해 전기에너지로 변환된다. Fig. 2와 Table 1은 전기에너지 회수장치의 기하학적 형상과 치수를 나타낸다.

2개의 압전섬유 복합재 작동기는 직렬 또는 병렬연결로 출력 전압의 양을 증가시킬 수 있지만 본 해석에서는 병렬연결의 회수장치에 대한 전압만 계산하고 그 결과를 실험값과 비교하였다. 유한요소 모델링을 위해서 압전재료는 SOLID5, 구조체인 알루미늄은 SOLID45가 적용되었다. 유한요소 모델에서 전극은 압전체의 상부 측과 하부 측 노드에 전압 자유도를 각각 하나의 노드로 종속시킴으로써 표현하였다.⁽⁸⁾ 작동기의 왼쪽 끝단부의 자유도를 완전히 구속시켰으며, 상부 전극에 354 V의 직류 전압을, 하부 전극에는 0 V의 전압을 각각 작용시켜서 상부 전극의 출력 전압값을 계산하였다.

조화응답해석(harmonic analysis)을 수행함으로써 외부의 주파수 변화에 따른 전압 출력량의 변화를 확인하고, 최대 출력 전압을 예측해 보았다.

Fig. 3은 주파수 변화에 따른 외팔보의 처짐을 나타내는 그림이다. 최대 처짐은 첫 번째 공진주

Table 1 Geometric parameters of MFC and the cantilever beam

	L	W	P _L	P	G	G	T _{Piezo}	T _{epoxy}	T _{Al}
				w	1	2			
Size (mm)	350	62	28	14	2	8	0.25	0.1	1.5

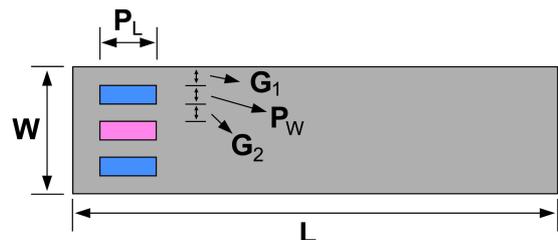


Fig. 2 Geometric configuration of the cantilever beam with macro-piezoelectric fiber and epoxy composite (MFC) actuators

파수인 10.3 Hz에서 5.8 mm 가 발생하였다. 그리고 Fig. 4의 결과에서 첫 번째 공진주파수에서는 11.025 V, 두 번째 공진주파수에서는 4.626 V의 출력 전압이 발생함을 알 수 있었다.

실험의 최대 출력 전압은 유한요소해석의 계산값 보다 4.3%가 크다. 또한 두 번째 고유 진동수에서 실험값은 60 Hz이고 해석값은 64 Hz이다. 이는 실험 장치의 구축이 유한요소해석과는 달리 완전하지 않았기 때문이라고 판단된다. 실험값과 계산값의 오차가 5% 이내의 작은 수치이므로 에너지 회수장치의 성능을 평가하고 설계하는데 큰 영향을 주지 않을 것이다.

3. 출력전압에 영향을 주는 요소

3.1 압전소자 종류에 따른 성능 비교

대기 중의 진동은 작기 때문에 에너지 회수장

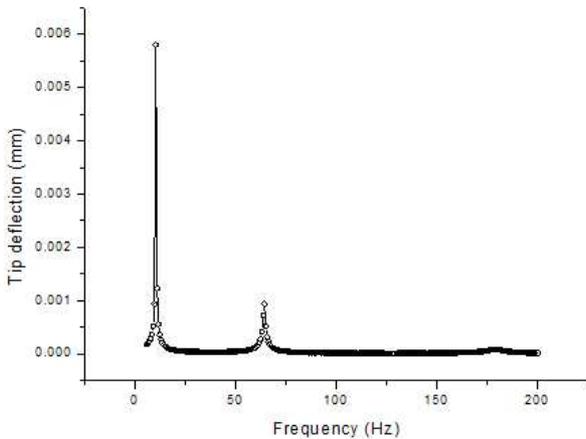


Fig. 3 Tip deflection of the cantilever beam

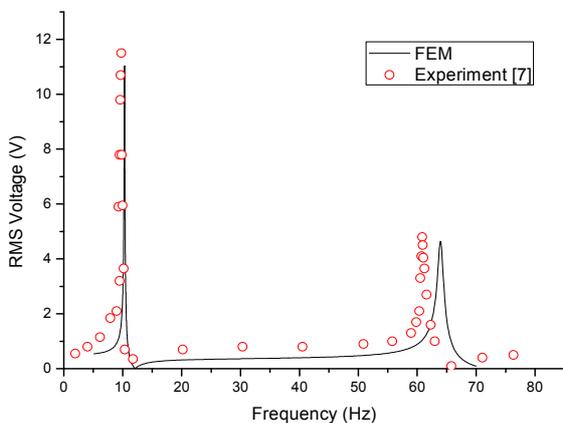


Fig. 4 Comparison of FEM and experimental results

치의 설계 시 압전재료의 선택은 매우 중요하다. 본 연구에서는 압전재료의 출력전압을 해석으로 예상해보고 각각의 결과를 비교하였다. Table 2는 해석에 사용된 각 재료의 물성치를 나타낸다.

Fig. 5의 해석 결과에서 PZT가 가장 큰 전압을 발생시켰고 MFC, PVDF 순으로 성능이 좋았다. 각각의 재료들은 첫 번째 공진주파수에서 PZT는 12.86 V, MFC는 10.76 V, PVDF는 7.77 V의 전압이 발생하였다. 그리고 압전재료 종류의 변화는

Table 2 Properties of piezoelectric materials

	PZT-5A	PVDF		MFC
c_{11} (10^9Nm^{-2})	121	3.61	E_1 (MPa)	30.34
c_{12} (10^9Nm^{-2})	75.4	1.61	E_3 (MPa)	15.86
c_{13} (10^9Nm^{-2})	75.2	1.42	ν_{12}	0.4
c_{33} (10^9Nm^{-2})	111	1.62	ν_{13}	0.4
c_{44} (10^9Nm^{-2})	21.1	0.55	G_{12} (MPa)	5.52
c_{66} (10^9Nm^{-2})	28.1	0.69	G_{23} (MPa)	10.7
d_{31} (C/m^{-2})	-5.4	-0.01036	d_{31} (10^{-12}C/N)	-0.02
d_{33} (C/m^{-2})	15.8	-0.02788	d_{33} (10^{-12}C/N)	0.04
d_{15} (C/m^{-2})	12.3	-0.01224	ϵ_{11} (10^{-11}F/m)	1500
ϵ_{11} (10^{-11}F/m)	1500	6.482		
ϵ_{33} (10^{-11}F/m)	1530	6.761		

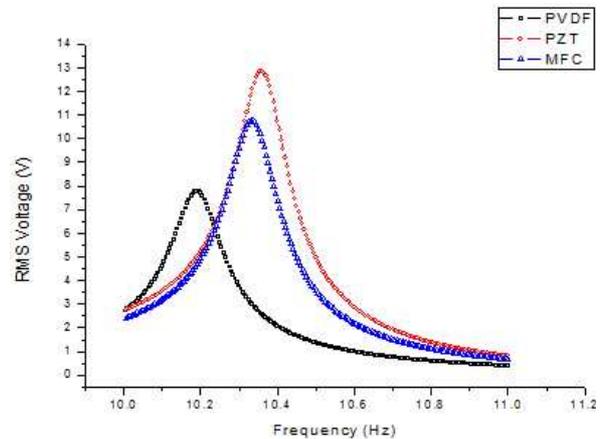


Fig. 5 Output voltages of PVDF, PZT and MFC

전체 구조물의 공진 주파수에도 미세하게 영향을 미침을 알 수 있었는데 이는 압전체 강성의 변화가 주요 원인일 것이다.

PVDF의 출력 전압과 비교하면 PZT와 MFC는 월등히 높은 전압이 발생함을 알 수 있었다. 그리고 PZT가 큰 변형에 깨지기 쉬운 단점을 고려한다면 에너지 회수장치의 압전소자로서 MFC가 더 적절하다고 판단된다. 이후의 해석에서는 압전재료로 MFC가 사용되었으며, Fig. 6과 같은 구조를 갖는다. 이 복합재 MFC는 사각형의 압전섬유와 에폭시를 결합한 후 상하면에 전극을 연결한 구조를 가진다. 분극방향과 전극의 종류에 따라 d_{33} 모드로 작동하는 타입과 d_{31} 모드로 작동하는 타입으로 구분된다.⁽⁹⁾ 본 연구의 전압계산에서는 모두 d_{31} 모드가 사용되었다. PZT의 구성방정식과 혼합물법칙(rule of mixture)⁽¹⁰⁾을 이용하여 유도된 등가 기계적 물성치와 압전체 물성치는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_L &= \rho E_L^p + (1-\rho)E_L^m & (1) \\ \frac{1}{E^T} &= \frac{\rho}{E_L^p} + \frac{1-\rho}{E_L^m} \\ \nu_{LT} &= \rho\nu_{LT}^p + (1-\rho)\nu_{LT}^m \\ \frac{1}{G^T} &= \frac{\rho}{G_L^p} + \frac{1-\rho}{G_L^m} \\ G_{LT} &= \rho G_{LT}^p + (1-\rho)G_{LT}^m \\ \frac{1}{G_{Tz}} &= \frac{\rho}{G_{Tz}^p} + \frac{1-\rho}{G_{Tz}^m} \end{aligned}$$

여기서, E 는 탄성계수, ν 는 포아송비, G 는 전단탄성계수를 의미하며, 상첨자 p 는 압전체, m 은 기지, 첨자 L 은 섬유방향, T 는 섬유에 수직한 방향, z 는 면외방향을 의미한다. ρ 는 섬유의 체적비를 나타낸다.

그리고 압전체와 유전체의 물성치는 각각 다음의 관계식으로 연결된다.

$$\begin{aligned} d_{31} &= \frac{1}{E_1} \rho d_{31}^p E_L^p & (2) \\ d_{32} &= -d_{31} \nu_{LT} + \rho d_{31}^p (1 + \nu_{LT}^p) \\ \epsilon_{33}^T &= \rho \epsilon_{33}^T + (1-\rho) \epsilon_{33}^{Tm} \end{aligned}$$

여기서, 기지는 압전성이 없으며 섬유의 d_{31} 와 d_{32} 는 같다. d_{31} 는 오직 길이방향의 물성치(E_L^p ,

E_L^m , d_{31}^p)를 포함하는 혼합물 법칙을 따른다. 같은 방법으로 d_{33} 압전복합재료는 다음과 같은 압전 물성치를 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} d_{33} &= \frac{1}{E_L} (\rho d_{33}^p E_L^p) & (3) \\ d_{32} &= -d_{33} \nu_{LT} + \rho (d_{32}^p + d_{33}^p \nu_{LT}^p) \end{aligned}$$

3.2 압전소자 위치에 따른 성능 비교

외팔보의 구조 특성상 압전재료 위치가 에너지 회수장치의 성능에 큰 영향을 미친다. 이를 확인하기 위하여 압전재료의 위치를 구속지점에서부터 5mm씩 이동하여 총 6구간에서 해석을 수행하였다. 해석 결과 Fig. 7과 같이 20mm지점 이후부터 출력 전압이 급격히 감소함을 알 수 있었다.

3.3 압전소자 연결 방법에 따른 성능 비교

외팔보 에너지 회수장치에서 압전소자를 연결하는 방법은 Fig. 8과 같이 직렬과 병렬연결이 있으며 각각 장단점을 가진다. 한 개의 압전소자를 사용하였을 때와 비교하여 직렬연결은 두 배의 출력전압과 절반의 커패시턴스 값을 가진다. 반면 병렬연결은 2배의 커패시턴스 값을 가지고 출력 전압은 비슷하게 발생한다.

본 연구에서는 직렬연결과 병렬연결을 모두 적용하여 해석을 수행하여 출력전압을 비교하였다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 첫 번째 공진주파수인 10.3Hz에서 직렬연결은 20.1V, 병렬연결은 11.03V가 발생하였다. 이는 기존의 이론과 잘 일치함을 알 수 있다.

3.4 외팔보의 치수 변화에 따른 성능 비교

먼저 외팔보의 길이를 300 mm, 350 mm, 400

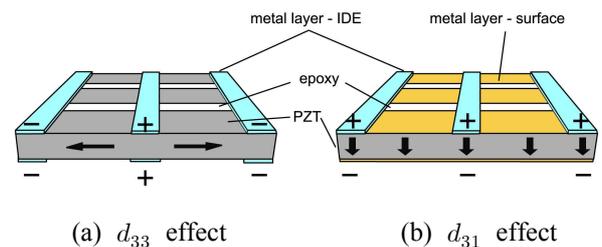


Fig. 6 d_{33} and d_{31} along a poling direction of MFC

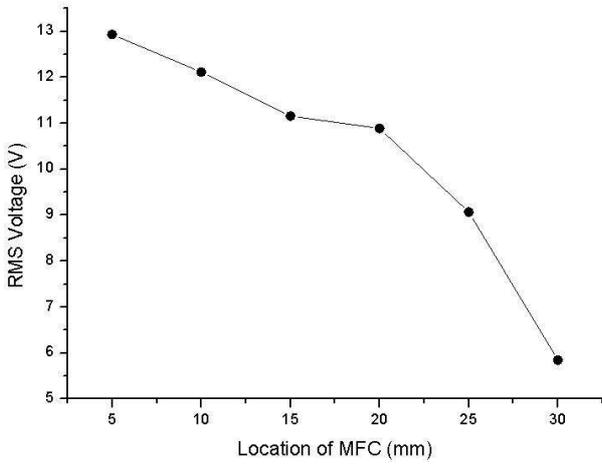


Fig. 7 Relationship between RMS voltage and locations of MFC

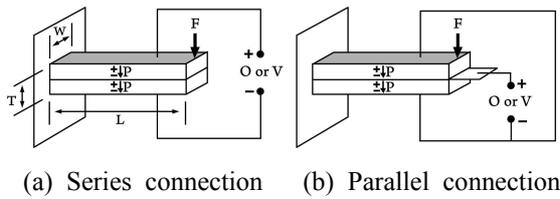


Fig. 8 Schematics of a connection method

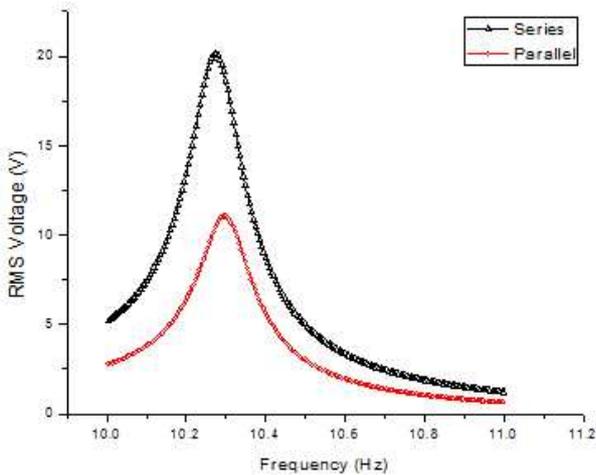


Fig. 9 RMS voltage of series and parallel

mm으로 각각 달리하여 조화응답해석을 진행하였다. Fig. 10에서 보듯이 길이가 짧아질수록 고유진동수가 높아지고, 전기 출력량도 커졌다. 그리고 두 번째 고유진동수에서는 길이가 가장 긴 모델이 높은 출력 전압을 발생시켰다. 또한 두 번째 고유진동수는 비교적 큰 차이를 보였다. 첫 번째 고유진동수에서의 최대 출력 전압은 14.602V, 11.026V, 8.102V이고, 두 번째 고유진동

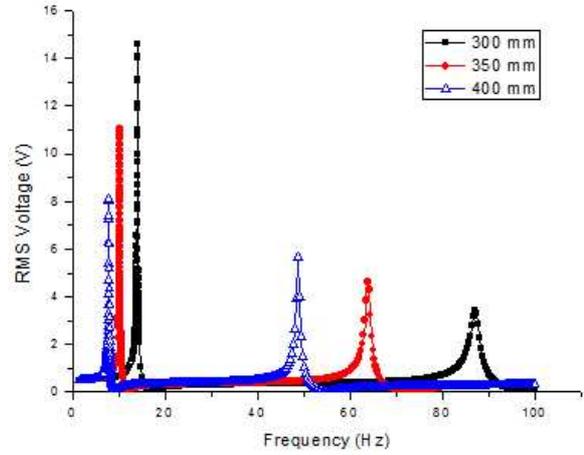


Fig. 10 RMS voltages on various lengths

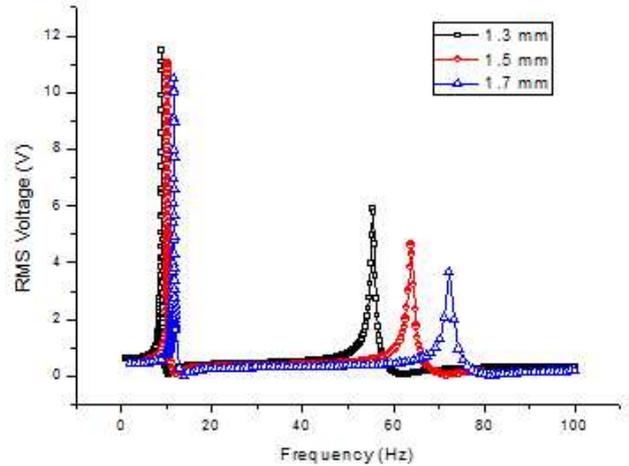


Fig. 11 RMS voltages on various thicknesses

수에서의 최대 출력 전압은 3.445V, 4.615V, 8.102V가 발생함을 알 수 있었다.

Fig. 11은 두께를 1.3mm, 1.5mm, 1.7mm로 달리하여 해석을 수행한 결과이다. 첫 번째 고유진동수에서 두께가 얇을수록 큰 출력 전압이 발생하였다. 그리고 두 번째 고유진동수에서도 역시 같은 경향을 보였다. 최대 출력 전압은 첫 번째 고유진동수에서 각각 11.472V, 11.025V, 10.493V이고, 두 번째 고유진동수에서 5.873V, 4.615V, 3.675V가 발생하였다.

Fig. 12는 너비를 60mm, 65mm, 70mm로 하여 해석을 수행하였다. 이 경우는 고유진동수의 차이가 크지 않아 첫 번째 고유진동수에서만 비교하였다. 첫 번째 고유진동수에서의 출력 전압은 각각 11.080V, 10.514V, 10.3V이 발생하였다. 상대적으로 너비의 변화는 출력 전압과 고유진동수에 크게 영향을 주지 못함을 알 수 있었다.

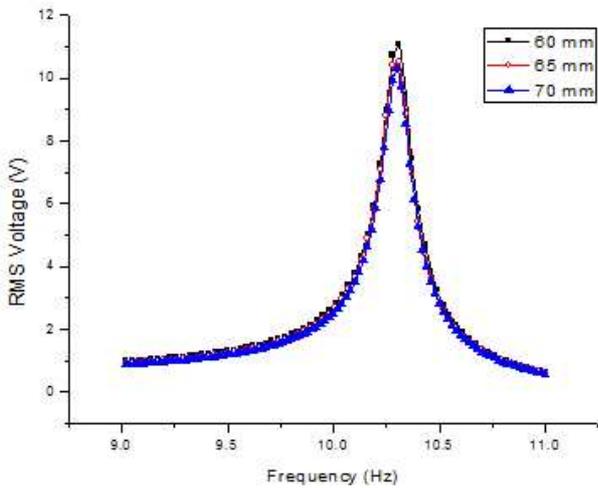


Fig. 12 RMS voltages on various widths

4. 최적 설계

4.1 전력량 최대를 위한 치수 최적화

기하학적인 변수가 회수장치의 성능과 많은 연관성이 있음을 확인한 바 있다. 앞에서 개발된 해석기법을 바탕으로 전기에너지 회수장치의 치수 최적화를 수행하여 최대의 출력 전압을 갖는 회수장치의 모델을 제시하고자 한다.

식 (4)는 치수최적화의 수학적인 정식화이다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximize} && V_{out} \\
 & \text{Subject to} && \text{Stress}_{\max} < 50 \text{ MPa} \quad (4) \\
 & && \text{Frequency}_{1st \text{ res.}} < 30 \text{ Hz} \\
 & && 100 \text{ mm} < L < 400 \text{ mm} \\
 & && 60 \text{ mm} < W < 80 \text{ mm} \\
 & && 1.1 \text{ mm} < T < 1.9 \text{ mm} \\
 & && 1 \text{ mm} < D < 30 \text{ mm} \\
 & && 0.245 \text{ mm} < \text{MFC}_T < 0.255 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

여기서, V_{out} 는 에너지 회수장치의 출력 전압, L 은 외팔보의 길이, W 는 너비, T 는 두께이다.

치수 최적화에서는 출력 전압의 최대화를 목적함수로 하였고, 제한함수로는 응력이 알루미늄의 항복응력인 50MPa보다 작도록 하였고, 낮은 가진 주파수에서 공진현상을 유도해야 하므로 전기에너지 회수장치의 첫 번째 고유진동수를 30Hz 이하로 제한하였다. D 는 지지부와 MFC의 거리를 의미하며, MFC_T 는 MFC 압전소자의 두께를 나타낸다.

Table 3 Design parameters of energy harvesting device

	초기 모델	치수 최적화 모델
L	350 mm	198.27 mm
W	62 mm	60.041 mm
T	1.5 mm	1.1016 mm
D	16 mm	1.0592 mm
MFC_T	0.25 mm	0.25212 mm

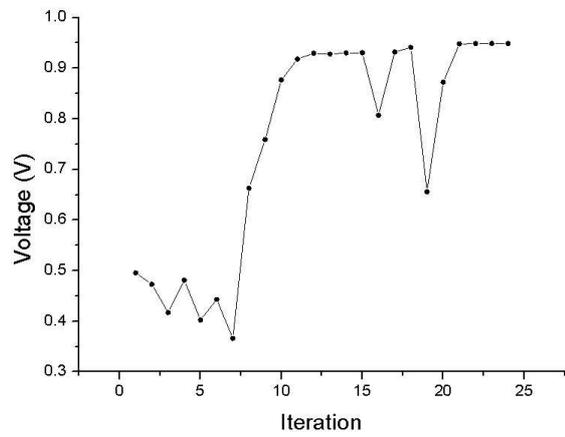


Fig. 13 Convergence history

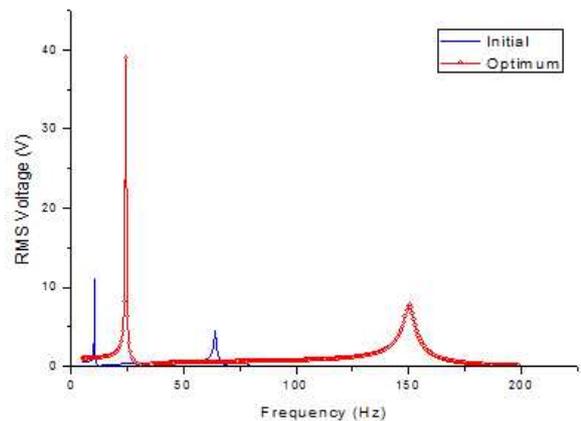


Fig. 14 RMS voltages of the initial and optimum

Fig. 13과 같이 24번의 반복계산으로 최적 치수를 얻을 수 있었으며 결과값은 Table 3과 같다. 최적화된 치수를 이용하여 해석을 수행하였다. Fig. 14에서 공진주파수가 24.5Hz로 상승한 것을 알 수 있다. 그리고 출력 전압은 첫 번째 공진주파수에서 기존의 모델은 11.03V, 최적화 모델은 38.89V가 발생하였다. 최적화 모델이 기존 모델보다 54.5% 출력 전압이 상승한 것임을 알 수 있다.

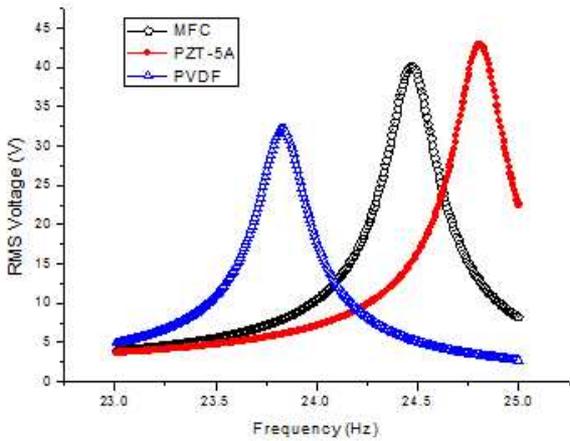


Fig. 15 Comparison of output voltages of PVDF, PZT and MFC

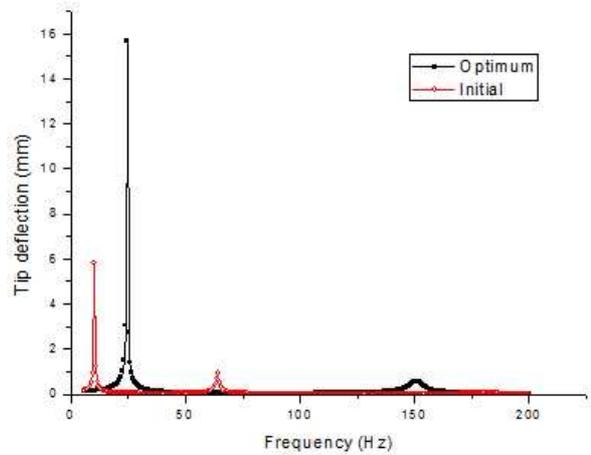


Fig. 17 Tip deflections of the initial and optimum

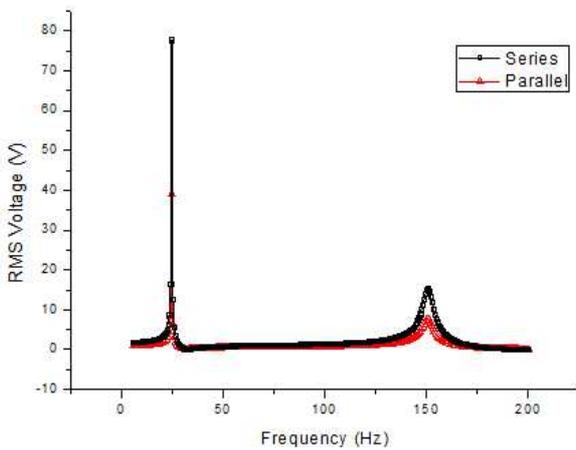


Fig. 16 RMS voltage of parallel and series connection

4.2 최적화 모델의 전기기계적 거동특성

최적화된 모델의 전기기계적 거동특성을 확인하기 위해 출력 전압에 영향을 미치는 요인들을 변경하며 해석을 수행하였다. Fig. 15는 압전 소자의 변경에 따른 출력 전압을 나타낸다. PZT-5A는 24.807 Hz에서 42.93V, MFC는 24.467Hz에서 40.133V, PVDF는 23.833Hz에서 32.193V의 전압이 각각 발생하였다. Fig. 16은 직렬과 병렬연결의 해석을 수행한 결과이며, 두 연결방식 모두 24.5Hz에서 공진이 발생하였고, 직렬연결을 했을 경우 77.789V, 병렬연결은 38.894V가 발생하였다.

Fig. 17은 치수 최적화 전의 모델과 최적화 후 모델의 처짐을 비교한 그래프이며, 전압비교 그래프와 같은 경향성을 가지며 최적화 전의 모델은 5.8 mm, 최적화된 모델은 15.64 mm의 최대 처짐이 발생하였다.

5. 결 론

압전섬유 복합재 외팔보형 에너지 회수장치의 성능예측 및 설계를 위한 유한요소해석 기법을 개발하고 타당성을 입증하기 위하여 실험값과 비교하였다. 대부분의 해석결과에서 이전의 실험 또는 해석적 방법으로 연구된 결과와 잘 일치하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 개발된 유한요소법 기반의 해석기법으로 첫 번째 고유 진동수, 10.2Hz에서 11.025V, 두 번째 고유 진동수, 64Hz에서 4.626V의 출력 전압을 확인하였고, 실험값과 비교한 결과 5% 이내의 오차를 가졌다.

(2) 압전재료의 종류를 바꿔가며 회수장치의 출력 전압을 비교한 결과 PZT_5A > MFC > PVDF 순으로 성능이 좋았다. MFC는 PZT와의 출력 전압값과 크게 차이가 나지 않으면서 유연성이 뛰어나 회수장치에 적용성이 우수함을 확인하였다.

(3) 압전재료의 위치가 외팔보의 지지부에 가까울수록 출력전압이 향상되었다.

(4) 외팔보의 길이가 짧을수록 고유진동수와 출력전압이 증가하였고, 두께는 얇을수록 고유진동수가 낮아지고 출력전압은 증가하였다. 반면 너비의 변화는 출력전압과 고유진동수에 큰 영향을 주지 못했다.

(5) 유한요소해석 기법을 바탕으로 치수최적화를 수행하여 최대의 출력전압을 갖는 모델을 제시하였고, 기존 모델과 비교한 결과 54.5%의 출력전압이 향상되었다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0014008)

참고문헌

- (1) Roundy, S., Wright, P. and Rabaey, J., 2003, "A Study of Low Level Vibrations as a Power Source for Wireless Sensor Nodes," *Comput. Commun.*, Vol. 26, No. 11, pp. 1131~1144.
- (2) Mitchson, P. D., Yeatman, E. M., Rao, G. K., Holmes, A. S. and Green, T. C., 2008, "Energy Harvesting from Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices," *Proc. IEEE*, Vol. 96, No. 9, pp. 1457~1468.
- (3) Priya, S., 2007, "Advances in Energy Harvesting Using Low Profile Piezoelectric Transducers," *J. Electroceram.*, Vol. 19, pp. 165~182.
- (4) Glynne-Jones, P. and white, N. M., 2001, "Self-Powered Systes: A Review of Energy Sources," *Sensor Review*, Vol. 21, pp. 91~97.
- (5) Paradiso, J. A. and Starner, T. 2005, "Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics," *Pervasive Computing, IEEE CS and IEEE ComSoc*, Vol 4, No. 1, pp. 18~27.
- (6) Beeby, S. P. Tudor, M. J. and White, N. M., 2006, "Energy Harvesting Vibration Sources for Microsystems Applications," *Meas. Sci. Tech.*, Vol. 17, p. 175.
- (7) Yang, Y., Tang, L. and Li, H., 2009, "Vibration Energy Harvesting Using Macro-Fiber Composites," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 18, No. 11, p. 115025.
- (8) ANSYS, ANSYS Release 11.0 documentation.
- (9) Williams, B. R., Grimsley, B. W., Inman, D. J. and Wilkie, W. K., 2002, "An Overview of Composite Actuators with Piezoceramic Fibers," *Proc. 20th Int'l Modal Analysis Conference, L.A., USA*.
- (10) Deraemaeker, A., Nasser, H., Benjeddou, A. and Preumont, A., 2009, "Mixing Rules for the Piezoelectric Properties of Macro Fiber Composites," *J. Intel. Mat. Sys. Str.*, Vol. 20, No. 12, pp. 1475~1482.