

외팔보 압전 진동 에너지 수확 장치의 직류 전기 출력 해석을 위한 전용 알고리즘 개발

Development of a Dedicated Algorithm for the Analysis of DC Electrical Outputs of Cantilevered Piezoelectric Vibration Energy Harvesters

김 재 은† · 김 윤 영*

Jae Eun Kim and Yoon Young Kim

(2012년 7월 9일 접수 ; 2012년 8월 8일 심사완료)

Key Words : Piezoelectric Energy Harvesting(압전 에너지 수확), Equivalent Electrical Circuit Model(등가 전기 회로 모델), DC Electrical Output(직류 전기 출력), Algorithm(알고리즘), Software(소프트웨어)

ABSTRACT

For most applications of the vibration energy harvesting technology as in wireless sensor networks for smart buildings and plants, the evaluation of DC output performance of vibration energy harvesters is typically required. However, there is no dedicated algorithm for the evaluation. The lack of a dedicated algorithm results from difficulties in the direct incorporation of nonlinear rectifying and regulating circuitry into finite element models of piezoelectric vibration energy harvesters. In this study, we develop a dedicated algorithm and present software based on it for the evaluation of not only AC but also DC electrical quantities. Here, an equivalent electrical circuit model is employed. The COMSOL multiphysics simulation tool is adopted for extracting equivalent electrical circuit parameters of a piezoelectric vibration energy harvester and MATLAB is used to make a graphical user interface. The AC voltage and power outputs calculated by the proposed algorithm under various conditions are compared with those by a traditional finite element analysis. The DC output voltage and power through a rectifier are obtained for varying values of smoothing capacitance and external resistance.

1. 서 론

압전 진동 에너지 수확⁽¹⁻³⁾ 장치의 전기 출력 등에 대한 해석은 장치의 설계 및 성능 평가를 위해

필수적이다. 일반적으로 장치에 대한 성능 평가는 외부 부하의 등가 저항이 부착된 상태에서 외부 가진 주파수가 장치의 고유진동수와 일치하는 경우의 교류 출력 전압 및 전력에 대해 수행한다⁽⁴⁻⁷⁾. 따라서, 해석 도구는 이러한 외부 저항이 부착된 압전 구조물에 대한 해석이 가능해야 한다^(8,9). 그런데, 실제 외부 전기 부하는 저항뿐만 아니라 전기 용량 및 유도 용량 요소도 포함하고 있으며 더욱이 무선 센서망(WSN: wireless sensor network)의 센서 노드 등 압전 에너지 수확 장치가 전원으로 사용되는

† 교신저자; 정회원, 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부
E-mail : jekim@cu.ac.kr

Tel : (053)850-2657, Fax : (053)850-2710

* 정회원, 서울대학교 기계항공공학부

이 논문의 일부는 2012년 춘계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

대부분의 응용 분야에서 사용되는 전기는 직류이다. 그러므로, 정류/평활 기능을 포함한 전력 관리 회로 및 부하로 인해 발생하는 모든 전기-역학 연성이 고려된 직류 출력에 대한 해석 도구의 확보는 매우 현실적이며 실용적이다. 이를 해결하기 위한 방법으로 (상용)유한요소 해석 도구를 이용하여 얻어진 등가 전기 회로 요소값을 기반으로 한 등가 회로 해석 기법이 제안된 바 있다^(10,11).

이 연구에서는 공진형 압전 진동 에너지 수확 장치에 적합한 Van Dyke 등가 전기 회로 모델을 기반으로⁽¹¹⁾ 외팔보 압전 진동 에너지 수확 장치의 직류 출력 전기량을 해석할 수 있는 알고리즘을 제안하고 그 알고리즘에 기초한 소프트웨어를 개발하였다. 기본적인 압전 해석 및 등가 전기 회로 요소의 추출을 위해서 COMSOL⁽⁸⁾ 해석 소프트웨어를 사용하였으며, 추출된 등가 회로 요소를 이용한 전기 회로 해석 및 사용자 인터페이스 구축을 위해서는 MATLAB⁽¹²⁾을 이용하였다. 이 연구에서 제안된 알고리즘을 기반으로 개발된 소프트웨어는 압전 진동 에너지 수확 관련 연구에서 수행되어 온 일반적인 교류 출력 성능 평가뿐만 아니라 정류 및 평활 회로에 의한 직류 출력 해석이 가능하다. 실제 응용 예제를 통해 이 연구에서 제안한 기술의 유용성을 검증하였다.

2. 전기 출력 해석 알고리즘 개발

Fig. 1(a)에 나타난 외팔보 압전 진동 에너지 수확 장치의 기저가 조화 가진을 받는 경우 r 번째 폐회로 (Fig. 1(a)에서 $R_e=0$ 인 경우) 고유진동수 근처에서의 전기-역학 연성 지배방정식은 다음과 같다⁽⁷⁾.

$$\begin{aligned} m_r \ddot{w}_r(t) + \eta_r \dot{w}_r(t) + k_r w_r(t) + \alpha_r V_o(t) &= -\mu_r m_r \ddot{w}_b(t) \\ \alpha_r \dot{w}_r(t) - C_p \dot{V}_o(t) &= \frac{V_o}{R_e} \end{aligned} \quad (1)$$

위 식에서 m_r , η_r , k_r 과 α_r 은 각각 r 번째 모드에서의 등가 질량, 감쇠 계수, 강성 및 압전 연성 계수를 나타내며, C_p 및 V_o 는 각각 압전체 내부의 전기 용량 및 압전 에너지 수확 장치의 출력 전압을 나타낸다. 또한, w_b 및 w_r 은 각각 기저의 변위 및 기저 대비 외팔보 끝단에서 상대 변위를 나타내며, μ_r 은 기저의 가진을 받는 외팔보의 운동 지배

방정식에서 필요한 수정 계수이다⁽¹³⁾.

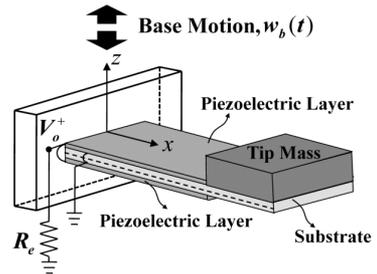
식 (1)의 지배 방정식을 만족하는 압전 진동 에너지 수확 장치의 등가 전기 회로는 Fig. 1(b)에 나타내었다. Fig. 1(b)의 $R_m^{(r)}$, $L_m^{(r)}$ 및 $C_m^{(r)}$ 은 각각 r 번째 모드에서의 등가 저항, 유도 용량 및 전기 용량을 나타내며, $V_{eq}^{(r)}$ 은 외부 가진에 의한 등가 전력을 나타낸다. 유한요소 해석 소프트웨어를 이용한 등가 전기 회로 요소 추출 알고리즘은 다음 절차를 사용한다⁽¹¹⁾.

Step 1: 고유 모드 해석을 통해 폐회로 및 개회로 상태의 고유진동수 $f_{sc}^{(r)}$ 및 $f_{oc}^{(r)}$ 의 결정

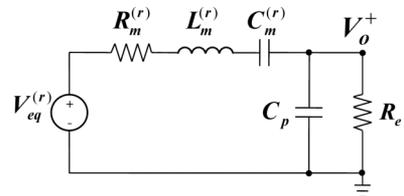
Step 2: 폐회로 상태의 고유진동수와 동일한 가진 주파수 ($f_{sc}^{(r)}$)의 단위 전압을 가한 후 전극에서 발생한 출력 전하량의 허수부를 q_i^V 라고 할 때, 등가 저항 $R_m^{(r)}$ 의 결정

$$R_m^{(r)} = \frac{1}{2\pi f_{sc}^{(r)} q_i^V} \quad (2)$$

Step 3: 폐회로 상태의 r 번째 모드에서의 모드 감쇠비가 ζ_r 인 경우 등가 유도 용량 $L_m^{(r)}$ 의 결정



(a) Cantilevered piezoelectric energy harvester



(b) Equivalent electrical circuit model employed in this work

Fig. 1 Geometry and circuit model of a typical cantilevered piezoelectric energy harvester

$$L_m^{(r)} = \frac{R_m^{(r)}}{4\pi\zeta_r f_{sc}^{(r)}} \quad (3)$$

식 (3)에서 모드 감쇠비는 일반적으로 실험으로 측정하기 전에는 경험에 의한 추정값을 사용한다.

Step 4: 등가 전기 용량 $C_m^{(r)}$ 의 결정

$$C_m^{(r)} = \frac{1}{(2\pi f_{sc}^{(r)})^2 L_m^{(r)}} \quad (4)$$

Step 5: 압전 에너지 수확 장치의 내부 전기 용량 C_p 의 결정

$$C_p = \frac{C_m^{(r)}}{(2\pi f_{oc}^{(r)})^2 L_m^{(r)} C_m^{(r)} - 1} \quad (5)$$

Step 6: 기저의 가진 가속도 크기 및 주파수가 각각 $(2\pi f_{sc}^{(r)})^2 w_b$, $f_{sc}^{(r)}$ 이고, 이 경우 전극에서의 출력 전하량의 허수부를 $q_i^{w_b}$ 라고 할 때, 등가 가진 전압원 $V_{eq}^{(r)}$ 의 결정

$$V_{eq}^{(r)} = -2\pi f_{sc}^{(r)} q_i^{w_b} R_m^{(r)} \quad (6)$$

3. 소프트웨어 모듈 개발

3.1 구성 및 해석 범위

이 연구에서는 개발된 알고리즘을 구현하기 위해 MATLAB 및 COMSOL을 이용하였으며, 그 결과를

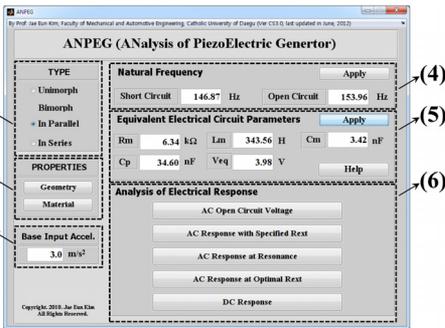


Fig. 2 Main module of the developed software and its submodules from (1) to (6)

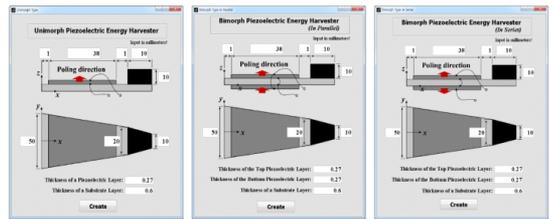
Fig. 2에 나타내었다. 주 모듈(ANPEG : analysis of piezo electric generator) 내의 6개의 부 모듈이 수행하는 기능은 다음과 같다.

(1) Type

압전 물질의 부착 위치 및 전극의 상호 연결 형태에 따른 외팔보 압전 진동 에너지 수확 장치의 형태를 선택하도록 하였다. 기판(substrate)의 상하 양면에 압전 물질이 부착된 경우, 병렬 및 직렬 연결 구성은 출력 전력이 같으나 병렬 연결의 경우 출력 전류가 더 많고 직렬 연결의 경우에는 출력 전압 값이 더 크다. 따라서, 압전 에너지 수확 장치는 일반적으로 unimorph 또는 전극간 병렬 연결의 bimorph로 구성한다.

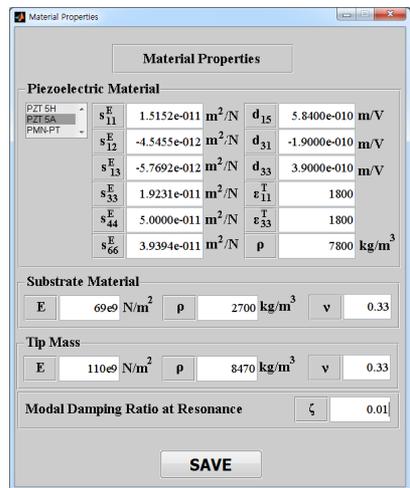
(2) Properties

선택된 압전 에너지 수확 장치의 구성 형태에 따라



Unimorph Bimorph in Parallel Bimorph in Series

(a) Module for geometric dimensions according to a selected type of piezoelectric energy harvester



(b) Module for material properties

Fig. 3 Input modules of the developed software

기하학적 치수 및 해석에 필요한 물성치를 입력하는 부분이다(Fig. 3). 끝단 질량을 포함하여 임의 형상의 외팔보에 대한 해석이 가능하도록 하였으며, 압전 에너지 수확 장치에 자주 사용되는 압전 물질 몇 개에 대해서는 미리 물성치가 입력되어 있으며 추가 및 수정이 가능하다. 물성치 입력 후 저장을 하면 유한요소소가 생성되게 하였다.

(3) Base input acceleration

압전 에너지 수확 장치의 기저에 대한 가진 가속도 값을 입력한다. 이 값은 (5)번 모듈이 수행될 때 필요하다.

(4) Natural frequency

압전 에너지 수확 장치의 폐회로 및 개회로 상태의 고유진동수를 계산한다. 외부 가진원의 주파수가 정해지면 압전 진동 에너지 수확 장치의 폐회로 고유진동수와 가능한 일치시켜야 한다. 또한, 폐회로 및 개회로 상태의 고유진동수를 알면 전기역학 연성 계수(EMCC: electro-mechanical coupling coefficient)를 통해 외부 진동 에너지가 전기 에너지로 변환되는 효율을 예상할 수 있다⁽⁷⁾.

(5) Equivalent electrical circuit parameters

압전 유한요소 해석을 통해 2장에서 설명한 방법을 이용하여 등가 전기 회로 요소 값들을 추출하여 출력한다. 일반적인 외부 진동 환경은 수백 Hz 이내의 주파수 대역이므로 개발된 소프트웨어는 실용적으로 외팔보 압전 에너지 수확 장치의 1차 고유진동수 근처에서의 값들만 계산하여 출력하도록 되어 있다.

(6) Analysis of electrical response

위의 (5)번 모듈에서 계산된 등가 전기 회로 요소 값들을 사용하여 Fig. 1(b)의 등가 전기 회로를 구성하고 회로 해석을 통해 다음과 같은 다양한 조건하에서 전기 출력값들을 계산한다⁽⁴⁻⁷⁾.

- 외부 저항이 무한대(개회로) 상태일 때 압전 진동 에너지 수확 장치의 가진주파수 대비 출력 전압 (Fig. 4(a)).
- 임의의 외부 저항이 부착되었을 때 가진주파수 대비 저항 양단에서의 출력 전압 및 전력(Fig. 4(b)).

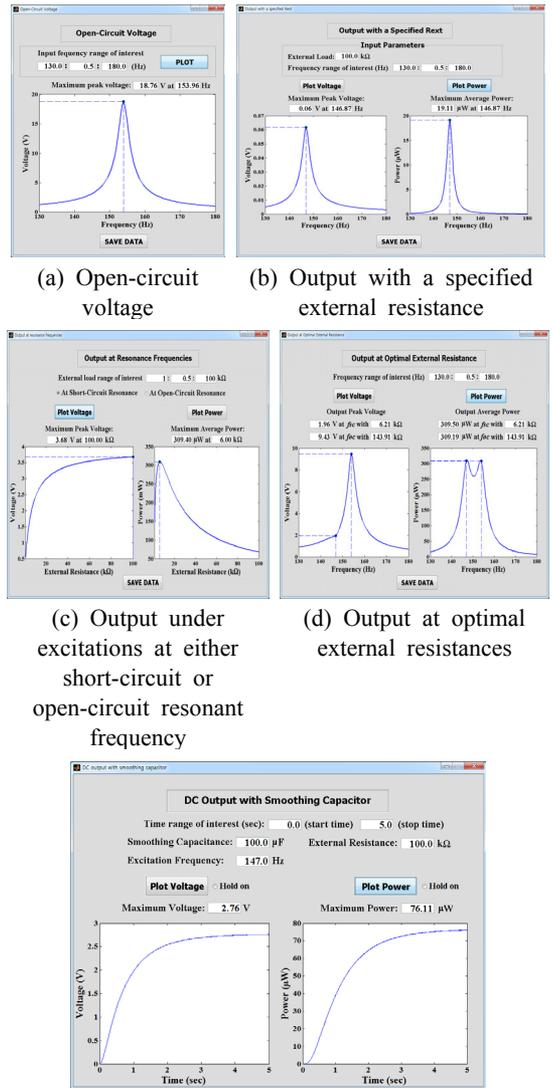


Fig. 4 Output windows of the developed software

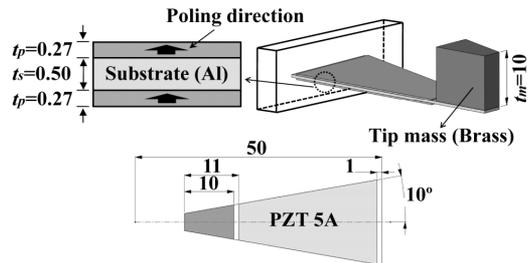


Fig. 5 Cantilevered trapezoidal shaped piezoelectric energy harvester in bimorph connected in parallel

· (폐회로 또는 개회로) 상태의 고유진동수와 같은 주파수를 갖는 기저 가진에 의한 외부 저항 대비 출력 전압 및 전력(Fig. 4(c)).

· 외부 저항이 압전 진동 에너지 수확 장치의 주파수별 내부 임피던스 값과 같을 때의 가진 주파수 대비 출력 전압 및 전력(Fig. 4(d)).

· 압전 진동 에너지 수확 장치에 정류/평활 및 전력 관리 회로가 부착된 경우 부하에서의 출력 직류 전압 및 전력(Fig. 4(e)).

위의 계산 결과는 Fig. 4에 보인 바와 같이 관련 수치와 더불어 그래프로 출력되며, 이 중 교류 출력 창의 하단에 마련된 ‘SAVE DATA’를 이용하면 모든 수치 결과가 마이크로소프트 엑셀 파일(*.xls)의 각 항목(tab)으로 저장되어 추후 보고서를 작성할 때 유용하다. 또한, 직류 전기 출력 창에는 출력 그래프 겹침 기능(hold on/off)이 있어 외부 회로 요소 값의 변화에 따른 출력 전압 및 전력의 시간에 따른 출력 경향 차이를 파악할 수 있다.

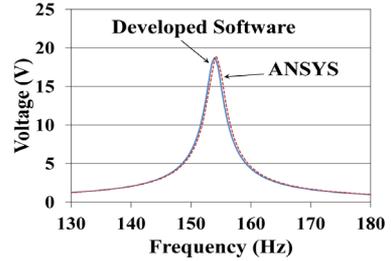
3.2 교류 출력 전기량을 통한 검증

개발된 소프트웨어 및 ANSYS⁽⁹⁾를 이용하여 Fig. 5의 압전 진동 에너지 수확 장치⁽¹¹⁾에 대한 교류 출력 전기량을 해석하고 비교하였다. ANSYS는 외부 저항이 부착된 압전체의 유한요소 모델이 가능하기 때문에 압전 에너지 수확 장치의 교류 출력 해석이 매우 용이한 장점이 있다. 압전 물질은 Piezo Systems사의 PZT 5A4E, 기판은 알루미늄, 끝단 질량은 황동을 사용하였다^(7,11). 또한, 기저의 가진 가속도는 3 m/s^2 를 가정하였으며, 1차 모드에서의 감쇠비로 0.01을 사용하였다.

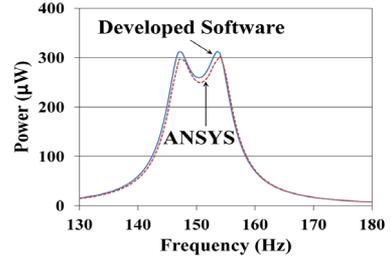
Table 1에 개발된 소프트웨어를 이용한 폐회로 및 개회로 상태에서의 고유진동수 해석 결과 및 등가 전기 회로 요소 값들을 나타내었다. COMSOL 해석 결과의 타당성 검토를 위해 제안한 알고리즘을 동일하게 적용한 ANSYS의 결과와도 비교하였다. 또한, Fig. 6은 개회로 상태에서의 출력 전압 및 외부 저항이 각 주파수 별로 내부 임피던스와 일치하는 값에서의 출력을 나타낸다^(5,7). 따라서, Fig. 6(b)에 보인 바와 같이 압전 진동 에너지 수확 장치는 폐회로 및 개회로 고유진동수에서 동일한 최대 출력 값을 갖는다. 결과에서 알 수 있듯이 이 연

Table 1 Comparisons of resonant frequencies and equivalent circuit parameters

	Developed software	ANSYS ⁽¹¹⁾
f_{sc}	146.87 Hz	147.06 Hz
f_{oc}	153.96 Hz	154.24 Hz
R_m	6.34 k Ω	6.51 k Ω
L_m	343.56 H	352.19 H
C_m	3.42 nF	3.33 nF
C_p	34.60 nF	33.27 nF
V_{eq}	3.98 V	3.95 V



(a) Output voltage



(b) Output power

Fig. 6 Comparisons of AC electrical outputs by the developed software and ANSYS

구에서 개발된 등가 전기 회로 기법 기반 소프트웨어의 교류 전기 출력값이 기존의 상용 유한요소 해석 소프트웨어를 이용한 유한요소 해석 결과와 매우 비슷함을 알 수 있다. 그래프 및 수치값에 있어서의 미소한 차이는 유한요소 망의 밀도 및 유한요소 품질의 차이에 기인한 것으로 판단된다.

3.3 직류 전기 출력 해석

개발된 소프트웨어 알고리즘은 등가 전기 회로 요소를 추출한 후 Fig. 1(b)의 전기회로를 해석하기 때문에 세밀한 간격 및 넓은 범위의 주파수(또는

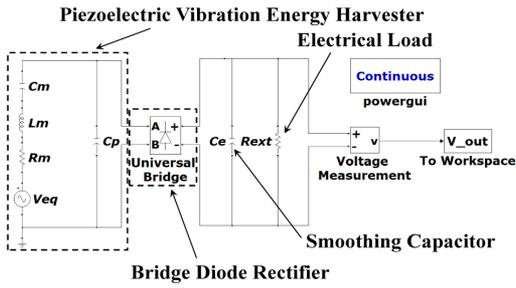
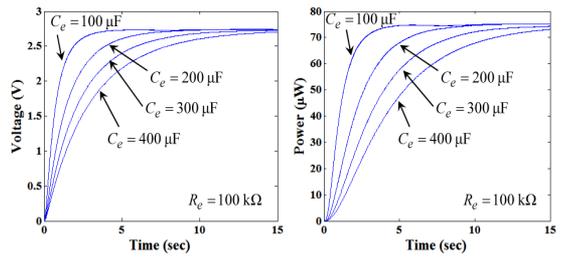


Fig. 7 Equivalent electrical circuit for the DC output voltage and power across the external load (MATLAB SimPowerSystems model)

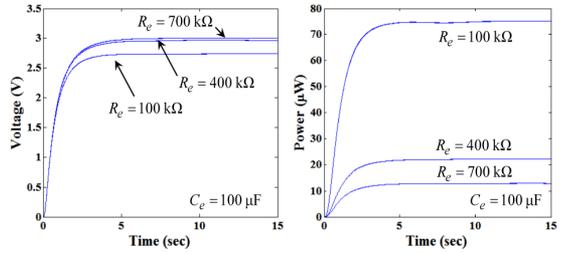
외부 저항)에 대한 출력 전기량도 빠른 시간안에 얻을 수 있다. 이 뿐만 아니라, Fig. 1(b)에서 R_e 로 표현된 외부 부하 위치에 정류/평활 회로 및 에너지 수확 장치에서 필요로 하는 전력 관리 회로 등의 비선형 요소가 추가되어도 해석 관점에서 정확한 직류 전기 출력 값을 얻을 수 있다. 이는 외부 부하의 성격에 따라 압전 진동 에너지 수확 장치를 달리 설계할 경우 매우 유용하다. 따라서, 이러한 관점에서 개발된 소프트웨어의 직류 전기 출력 해석 기능을 간단한 예제를 통해서 살펴보았다.

Fig. 7은 압전 에너지 수확 장치의 등가 전기 회로에 전파 브리지 정류기(full-wave bridge diode rectifier), 평활 축전기 및 외부 부하 저항이 연결된 상태를 나타낸다. 이러한 비선형 요소를 포함한 회로 해석을 위해서 MATLAB의 SimPowerSystems™라는 회로 해석 toolbox를 사용하였으며, 계산에 필요한 변수 값들은 입력으로 받거나(Fig. 4(e)) 이미 계산되어 저장된 등가 회로 요소 값들을 사용한다. Fig. 7에 나타낸 회로 요소들 이외의 다른 회로 요소들을 추가로 고려할 경우에는 동일한 방법으로 simulink model과 일(*.mdl)을 미리 만들어 저장하여 호환한다.

Fig. 8에 보인 결과는 Fig. 7의 회로에 대해 평활 축전기의 전기 용량 및 외부 부하 저항값의 변화에 따른 출력 전압 및 전력을 나타낸 것이다. 그림에서 축전기의 전기 용량이 커질수록 출력 최대 전압 및 전력에 이르기까지의 충전 시간이 길어지는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 축전기의 전기용량을 고정하고 외부 부하 저항의 크기를 증가시킬 경우 부하 저항 양단의 전압은 증가하나 전력은 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 등가 회로 해석 기법을 사용하지 않으면 얻을 수 없는 결과이다.



(a) For varying values of the smoothing capacitance, C_e



(b) For varying values of the external resistance, R_{ext}

Fig. 8 Electrical DC outputs with respect to two external parameters shown in Fig. 7

4. 결 론

이 연구에서는 등가 전기 회로 기법을 이용하여 외팔보 압전 에너지 수확 장치의 교류 및 직류 전기 출력 해석이 가능한 소프트웨어 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘을 소프트웨어로 구현하기 위해서 사용자 인터페이스는 MATLAB을, 기본 압전 해석은 COMSOL 유한요소 해석 프로그램을 사용하였다. 개발된 소프트웨어(the encoded MATLAB m-files(p-files)를 이용하면 해석 시간이 상당히 소요되는 넓은 범위의 관심 주파수 영역 및 외부 저항 값 대비 교류 출력 전기량을 매우 빠르게 구할 수 있었다. 특히, 정류/평활 회로 등의 비선형 회로가 압전 에너지 수확 장치에 연결된 경우에 직류 출력 전기량을 정확하고도 매우 편리하게 계산할 수 있음을 보였다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재

원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(No. 0003494).

참 고 문 헌

(1) Priya, S. and Inman, D. J., 2009, Energy Harvesting Technologies, Springer, New York.

(2) Erturk, A. and Inman, D. J., 2011, Piezoelectric Energy Harvesting, John Wiley & Sons, Ltd., United Kingdom.

(3) Kim, J. E., 2011, Micro Energy Harvesting: Still Scientific Curiosity?, Journal of KSNVE, Vol. 21, No. 2, pp. 35~47.

(4) Erturk, A. and Inman, D. J., 2008, A Distributed Parameter Electromechanical Model for Cantilevered Piezoelectric Energy Harvesters, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 130, No. 4, 041002.

(5) Liao, Y. and Sodano, A., 2008, Model of a Single Mode Energy Harvester and Properties for Optimal Power Generation, Smart materials and Structures, Vol. 17, No. 6, 065026.

(6) Erturk, A. and Inman, D. J., 2009, An Experimentally Validated Bimorph Cantilever Model for Piezoelectric Energy Harvesting from Base

Excitations, Smart Materials and Structures, Vol. 18, No. 2, 025009.

(7) Kim, J. E. and Kim, Y. Y., 2011, Analysis of Piezoelectric Energy Harvesters of a Moderate Aspect Ratio with a Distributed Tip Mass, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 133, No. 4, 041010.

(8) COMSOL, Inc., COMSOL Version 4.0a.

(9) ANSYS, Inc., ANSYS Version 12.

(10) Yang, Y. and Tang, L., 2009, Equivalent Circuit Modeling of Piezoelectric Energy Harvesters, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 20, No. 18, pp. 2223~2235.

(11) Kim, J. E., 2010, Analysis of Vibration-powered Piezoelectric Energy Harvesters by Using Equivalent Circuit Models, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 4, pp. 397~404.

(12) The MathWorks, Inc., MATALB Version 2012a.

(13) Erturk, A. and Inman, D. J., 2008, Issues in Mathematical Modeling of Piezoelectric Energy Harvesters, Smart Materials and Structures, Vol. 17, No. 6, 065016.