

압전 진동 에너지 수확 장치의 에너지 변환 효율에 대한 고찰

김 재 은*†

* 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

On the Energy Conversion Efficiency of Piezoelectric Vibration Energy Harvesting Devices

Jae Eun Kim*†

* School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic Univ. of Daegu

(Received January 23, 2015 ; Revised February 26, 2015 ; Accepted February 27, 2015)

Key Words: Vibration(진동), Energy Harvesting(에너지 수확), Piezoelectricity(압전), Conversion Efficiency(변환 효율), Impedance Matching(임피던스 정합), Electro-Mechanical Coupling Coefficient(전기-역학 연성 계수)

초록: 압전 진동 에너지 수확 장치의 설계 및 성능 평가 시 에너지 변환 효율을 고려하는 것은 매우 당연하다. 본 연구에서 고려하는 에너지 변환 효율은 부하 저항이 부착된 압전 진동 에너지 수확 장치에 입력되는 가진 진동 파워 대비 전기 출력 값으로 정의된다. 기존의 연구에서는 근사적으로 임피던스 정합된 부하 저항에서의 전기 출력을 고려한 반면, 본 연구에서는 최적의 임피던스 정합 값을 사용하여 새롭게 에너지 변환 효율 식을 유도하였다. 유도된 식의 타당성을 검증하기 위해 3 개의 서로 다른 전기-역학 연성 계수 값을 갖는 진동 에너지 수확 장치에 대한 유한 요소 해석 결과를 이용하였다. 또한, 부하 저항의 임피던스 정합 방법의 차이에 따른 에너지 변환 및 변환 효율 특성을 살펴보았다.

Abstract: To properly design and assess a piezoelectric vibration energy harvester, it is necessary to consider the application of an efficiency measure of energy conversion. The energy conversion efficiency is defined in this work as the ratio of the electrical output power to the mechanical input power for a piezoelectric vibration energy harvester with an impedance-matched load resistor. While previous research works employed the electrical output power for approximate impedance-matched load resistance, this work derives an efficiency measure considering optimally matched resistance. The modified efficiency measure is validated by comparing it with finite element analysis results for piezoelectric vibration energy harvesters with three different values of the electro-mechanical coupling coefficient. New findings on the characteristics of energy conversion and conversion efficiency are also provided for the two different impedance matching methods.

1. 서 론

진동 에너지는 주변 환경 어디에나 존재하여 에너지 수확(energy harvesting) 분야의 대상 에너지 원으로서 일찍부터 많은 연구가 수행되어 왔다.^(1,2) 초기 연구 단계에서는 정전기, 전자기 유도 및 압전 현상 등에 기반한 에너지 수확 장치의 제작 및 실험을 통해 에너지 수확 가능성을 확인하였다.⁽³⁻⁵⁾

동시에 각각의 물리 현상에 따른 에너지 수확 장치의 수학적 모델링 기법이 정립되어 왔으며,⁽⁶⁻⁸⁾ 서로 다른 에너지 변환 수단의 변환 효율에 대한 연구가 이루어졌다.^(9,10)

압전 현상을 이용한 진동 에너지 수확은 장치 구성의 간단함, 소형화를 위한 MEMS 구현의 용이성, 높은 출력 전압, 다른 에너지 변환 수단에 비해 비교적 높은 에너지 밀도와 변환 효율 등의 장점이 있어 상대적으로 많은 연구가 이뤄져 왔다.⁽¹¹⁻¹³⁾ 압전 진동 에너지 수확 장치(PEH: piezoelectric vibration energy harvester)의 에너지 변환 효율에 관

† Corresponding Author, jekim@cu.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

한 초기 연구로서 Umeda 등⁽¹⁴⁾은 낙하 쇄구슬의 충격에 의한 원판형 에너지 수확 장치의 효율을 다루었으며, 이 때 변환 효율을 쇄구슬의 위치 에너지 대비 외부 커패시터에 저장되는 에너지의 비율로 정의하였다. 또한, Goldfarb 등⁽¹⁵⁾은 외부 부하 저항이 부착된 적층형 에너지 수확 장치에 대해 조화 가진(harmonic excitation)에 의한 입력 파워(input power) 대비 저항에서의 전력 값을 변환 효율로서 정의하고 실험에 의한 결과를 제시하였다. 그러나, 효율에 특성을 미치는 인자의 파악 및 이에 의한 명시적인 변환 효율 식은 제시되지 않았다. 반면 Richards 등⁽¹⁶⁾은 근사 정합된 부하 저항을 갖는 압전 진동 에너지 수확 장치에 대해 역학 품질 계수(mechanical quality factor) 및 전기-역학 연성 계수(electro-mechanical coupling coefficient)에 의해 표현된 에너지 변환 효율 식을 제안한 바 있다. 이 밖에도 압전 진동 에너지 수확의 에너지 변환 효율에 대한 연구가 있었으나,⁽¹⁷⁻¹⁹⁾ 특정 환경에 대한 실험이거나, 일반적인 변수에 의해 표현되지 않아 그 응용에 제한된 면이 있다.

본 연구에서는 Richards 등⁽¹⁶⁾에 의해 제안된 에너지 변환 효율 식의 특성을 살펴 본 후 기존 연구와는 달리 최적의 임피던스 정합값을 갖는 외부 저항이 부착된 경우에 대해 에너지 변환 효율 식을 다시 유도하였다. 이를 통해 기존 식을 사용함에 있어서의 일부 문제점을 확인함과 동시에 제안된 식을 이용하여 압전 진동 에너지 수확 장치의 에너지 변환 효율 특성에 대한 재 고찰을 하였다.

2. 압전 기반 진동 에너지 변환 효율 식

2.1 기존 에너지 변환 효율 식의 유도

본 논문에서 새롭게 유도할 에너지 변환 식과의 차이점을 분명히 하고 기존의 연구에서는 생략되었던 중요한 유도 과정을 설명하기 위해 우선 기존 에너지 변환 효율 식에 대해 비교적 자세하게 살펴보고자 한다.

단일 모드에서 동작하는 압전 진동 에너지 수확 장치(Fig. 1(a) 참조)에 대한 지배 방정식은 다음과 같이 표현된다.⁽⁸⁾

$$M_{eq} \ddot{w}_{rel}(t) + C_{eq} \dot{w}_{rel}(t) + K_{eq} w_{rel}(t) + \alpha \cdot V_o(t) = -\mu M_{eq} \ddot{w}_b \quad (1a)$$

$$\alpha \cdot w_{rel}(t) - C_p \cdot V_o(t) = -Q_e(t) \quad (1b)$$

위 식에서 $Q_e(t)$, $V_o(t)$, C_p 및 α 는 각각 전극의 전하량, 출력 전압, 압전 층의 정전 용량(capacitance),

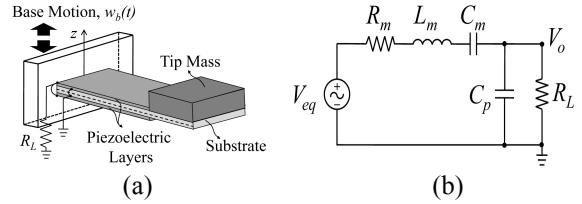


Fig. 1 (a) A typical piezoelectric vibration energy harvester and (b) its equivalent electrical circuit model of a single mode

압전 연성 계수(piezoelectric coupling coefficient)⁽⁸⁾를 나타내고, w_b 와 w_{rel} 은 각각 가진 기저(base)의 변위 및 끝단 질량의 기저에 대한 상대 변위를 나타낸다. 또한, M_{eq} , C_{eq} 및 K_{eq} 는 각각 유효 질량, 감쇠 및 강성을 나타낸다. μ 는 기저 가진되는 구조물에 대한 수정 계수를 의미한다.^(8,20) 식 (1)로 표현된 지배 방정식은 단일 모드로 동작하는 모든 형태의 압전 진동 에너지 수확 장치에 대해 적용 가능하므로, 본 연구에서 제시되는 에너지 변환 효율에 대한 결과 역시 외팔보 형태에만 국한되지 않는다.

압전 진동 에너지 수확 장치의 에너지 변환 효율에 대한 연구로서, Richards 등⁽¹⁶⁾은 에너지 변환 효율(η)을 부하 저항이 부착된 에너지 수확 장치 전체에서 소모되는 전력(P_T) 대비 부하 저항 R_L 에서 소모되는 전력(P_L)로 정의하였다. 이는 Fig. 1(b)에 나타난 단일 모드의 압전 진동 에너지 수확 장치에 대한 등가 전기 회로를 이용하면 다음과 같이 유도된다.

$$\eta = \frac{P_L}{P_T} = \frac{1}{2} \frac{k_{sys}^2}{1 - k_{sys}^2} \left/ \left(\frac{1}{Q_m} + \frac{1}{2} \frac{k_{sys}^2}{1 - k_{sys}^2} \right) \right. \quad (2)$$

Fig. 1(b)에서 R_m , L_m 및 C_m 은 각각 압전 에너지 수확 장치의 등가 저항, 등가 유도 용량(inductance) 및 등가 정전 용량을 의미한다.⁽²¹⁾ 또한, 위 식에서 Q_m 은 역학 품질 계수로서 $1/2\zeta_m$ (ζ_m : 역학 감쇠비)과 같으며, k_{sys}^2 은 전기-역학 연성 계수로서 다음과 같이 정의된다.^(8,16)

$$k_{sys}^2 = \frac{C_m}{C_m + C_p} = \frac{\omega_{oc}^2 - \omega_{sc}^2}{\omega_{oc}^2} \quad (3)$$

식 (3)에서 ω_{sc} 및 ω_{oc} 는 각각 폐회로($R_L = 0$) 및 개회로($R_L = \infty$) 상태에서의 고유 진동수(rad/s)를 나타낸다. 그런데, 기존의 연구에서 식 (2)는 유도 과정에서 분모, 분자의 공통 인자가 약분되기 때문에 P_L 및 P_T 에 대한 결과 식이 명시적으로 제시되지 않았다. 그러나, 본 논문에서 수정된 에너지 변환 효율 식을 유도하고 기존 연구 결과와의 비교를 위해 입력 및 출력 파워 각각에 대한 특성

파악이 필요하다. 압전 진동 에너지 수확 장치는 폐회로 고유 진동수 $\omega = \omega_{sc}$ 에서 동작한다는 가정 하에, Fig. 1(b)의 등가 전기 회로에서 C_p 와 R_L 병렬 연결 부분에 대한 임피던스($Z_{Cp//R_L}$) 및 회로 전체의 임피던스(Z_T)는 각각 다음과 같다.

$$Z_{Cp//R_L} = \frac{R_L}{1 + j\omega_{sc}C_p R_L} = \frac{1}{1 + j} \cdot \frac{1}{\omega_{sc}C_p} \quad (4a)$$

$$Z_T = R_m + \frac{1}{1 + j} \cdot \frac{1}{\omega_{sc}C_p} \quad (4b)$$

위 식에서 j 는 허수 단위 $\sqrt{-1}$ 를 의미한다. 또한, 부하 저항 R_L 은 근사 임피던스 정합 값인 $1/\omega_{sc}C_p$ 와 같다고 가정하였으며 이를 R_L^{Appr} 로 표시한다. 따라서, 등가 회로의 각 계수에 대한 다음 관계를 이용하면, (16,21)

$$L_m = \frac{1}{\omega_{sc}^2 C_m} = \frac{M_{eq}}{\alpha^2}, \quad C_p = \frac{1 - k_{sys}^2}{k_{sys}^2} C_m, \quad (5)$$

$$R_m = \frac{1}{Q_m \omega_{sc} C_m}, \text{ and } V_{eq} = \frac{\mu M_{eq} A_b}{\alpha}$$

부하 저항 R_L^{Appr} 에서 소모되는 전력 P_L 과 회로 전체에서 소모되는 전력 P_T 는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$P_L = \frac{1}{2} \left| V_{eq} \frac{Z_{Cp//R_L}}{Z_T} \right|^2 \frac{1}{R_L^{Appr}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\mu M_{eq} A_b}{\alpha} \right)^2 \left| \frac{Z_{Cp//R_L}}{Z_T} \right|^2 \frac{1 - k_{sys}^2}{k_{sys}^2} \omega_{sc} C_m \quad (6a)$$

$$= \frac{1}{2} \frac{Q_m k_e^2}{(1 + Q_m k_e^2/2)^2 + (Q_m k_e^2/2)^2} \cdot \frac{1}{2} \frac{Q_m \mu^2 M_{eq}^2 A_b^2}{\omega_{sc}}$$

$$P_T = \frac{1}{2} |V_{eq}|^2 \text{Re} \left[\frac{1}{Z_T^*} \right] = \frac{1}{2} \frac{2 + Q_m k_e^2}{(1 + Q_m k_e^2/2)^2 + (Q_m k_e^2/2)^2} \cdot \frac{1}{2} \frac{Q_m \mu^2 M_{eq}^2 A_b^2}{\omega_{sc}} \quad (6b)$$

위 식에서 A_b 는 가진 기저의 가속도 크기를 나타내며, k_e^2 은 편의(expedient) 전기-역학 연성 계수로서 식 (3)의 k_{sys}^2 과는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$k_e^2 = \frac{k_{sys}^2}{1 - k_{sys}^2} = \frac{\omega_{oc}^2 - \omega_{sc}^2}{\omega_{sc}^2} \quad (7)$$

본 논문에서는 에너지 변환 효율 식의 결과를 간결히 표현하기 위해 k_{sys}^2 및 Q_m 대신 각각 k_e^2

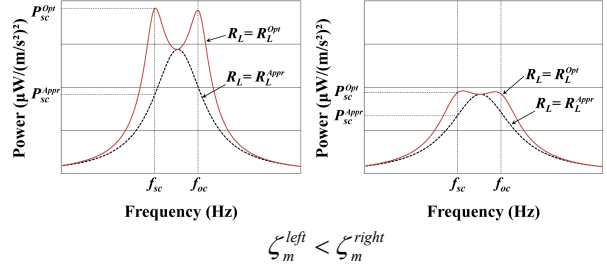


Fig. 2 Electrical output power of a piezoelectric energy harvester with the approximate (dotted line) or optimal (solid line) impedance-matched load resistance for two different damping ratios

및 ζ_m 을 사용할 것이다. 따라서, 식 (2)는 다음과 같이 더욱 간단히 나타내어진다.

$$\eta = \frac{P_L}{P_T} = \frac{Q_m k_e^2}{2 + Q_m k_e^2} = \frac{1}{2(2\zeta_m/k_e^2) + 1} \quad (8)$$

2.2 수정된 에너지 변환 효율 식의 제안

앞서 기술한 바와 같이 기존의 에너지 변환 효율 식은 압전 진동 에너지 수확 장치의 부하 저항 R_L 이 근사 임피던스 정합 값과 같다고 가정하여 유도된 결과이다. 그런데, Fig. 2 에 보인 바와 같이 이 경우의 최대 전기 출력 값은 최적의 임피던스 정합 값을 사용한 경우보다 항상 작으며, 그 최대값은 폐회로 및 개회로 고유 진동수 사이에 존재한다. 따라서, 에너지 변환 효율을 보다 정확히 나타내기 위해서 식 (2) 또는 (8)은 전기 출력 값이 최대가 되는 외부 부하 저항 값으로서 다음의 식을 이용하여야 한다. (8)

$$R_L^{Opt} = \frac{1}{\omega_{sc} C_p} \frac{2\zeta_m}{\sqrt{k_e^4 + 4\zeta_m^2}} \quad (9)$$

따라서, 식 (9)를 이용한 경우 $Z_{Cp//R_L}$ 및 Z_T 는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$Z_{Cp//R_L} = \frac{R_L}{1 + j\omega_{sc}C_p R_L} = \frac{k_e^2}{\sqrt{Q_m^2 k_e^4 + 1} + j} \cdot \frac{1}{\omega_{sc} C_m} \quad (10a)$$

$$Z_T = R_m + \frac{R_L}{1 + j\omega_{sc}C_p R_L} = \frac{Q_m^2 k_e^4 + 2 + Q_m k_e^2 \sqrt{Q_m^2 k_e^4 + 1} - jQ_m k_e^2}{Q_m (Q_m^2 k_e^4 + 2)} \cdot \frac{1}{\omega_{sc} C_m} \quad (10b)$$

위 식을 이용하면

$$\left| \frac{Z_{Cp//R_L}}{Z_T} \right|^2 \frac{1}{R_L^{Opt}} = \frac{1}{2} \frac{Q_m k_e^2}{Q_m k_e^2 + \sqrt{Q_m^2 k_e^4 + 1}} \cdot Q_m \omega_{sc} C_m \quad (11a)$$

$$\text{Re} \left[\frac{1}{Z_T^*} \right] = \frac{1}{2} \frac{Q_m^2 k_e^4 + 2 + Q_m k_e^2 \sqrt{Q_m^2 k_e^4 + 1}}{Q_m^2 k_e^4 + 1 + Q_m k_e^2 \sqrt{Q_m^2 k_e^4 + 1}} \cdot Q_m \omega_{sc} C_m \quad (11b)$$

이므로, 여기에 식 (5)의 첫 번째 관계식을 이용하면 부하 저항 R_L^{opt} 에서 소모되는 전력 P_L^{mod} 과 회로 전체에서 소모되는 전력 P_T^{mod} 은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$P_L^{mod} = \frac{1}{2} \frac{Q_m k_e^2}{Q_m k_e^2 + \sqrt{Q_m^2 k_e^4 + 1}} \cdot \frac{1}{2} \frac{Q_m \mu^2 M_{eq} A_b^2}{\omega_{sc}} \quad (12a)$$

$$P_T^{mod} = \frac{1}{2} \frac{Q_m^2 k_e^4 + 2 + Q_m k_e^2 \sqrt{Q_m^2 k_e^4 + 1}}{Q_m^2 k_e^4 + 1 + Q_m k_e^2 \sqrt{Q_m^2 k_e^4 + 1}} \cdot \frac{1}{2} \frac{Q_m \mu^2 M_{eq} A_b^2}{\omega_{sc}} \quad (12b)$$

따라서, 본 논문에서 제안하는 수정된 에너지 변환 효율 식은 다음과 같이 유도된다.

$$\eta^{mod} = \frac{P_L^{mod}}{P_T^{mod}} = \frac{Q_m k_e^2 \sqrt{Q_m^2 k_e^4 + 1}}{Q_m^2 k_e^4 + 2 + Q_m k_e^2 \sqrt{Q_m^2 k_e^4 + 1}} = \frac{\sqrt{1 + (2\zeta_m/k_e)^2}}{1 + 2(2\zeta_m/k_e)^2 + \sqrt{1 + (2\zeta_m/k_e)^2}} \quad (13)$$

위의 식은 식 (2) 또는 (8)과 비교하여 다소 복잡하지만, 에너지 변환 효율이 여전히 감쇠비와 전기-역학 연성 계수만의 함수로 표현될 수 있음을 보여준다.

3. 타당성 검증 및 효율 특성 비교

3.1 수정된 에너지 변환 효율 식의 타당성 검증

수정된 에너지 변환 효율 식의 타당성을 검증하기 위해 Fig. 3 에 나타난 압전 진동 에너지 수확 장치의 압전 재료 별 효율 특성을 ANSYS 유한요소 해석(SOLID5 및 CIRCU94 요소 사용) 결과와 비교하였다. 비교를 위해 사용된 에너지 수확 장치의 압전 재료는 전기-역학 연성 계수가 낮은 순서대로 PZT 5H,⁽²²⁾ PMN-PZT([001]-poled)^(23,24) 및 PMN-PZT([011]-poled, d_{32})^(23,24)이며, 3 경우 모두 동일한 폐회로 고유 진동수를 갖도록 기판(substrate)의 두께는 각각 0.337 mm, 0.487 mm, 0.500 mm로 조정하였다. 또한, 끝단 질량 및 기판은 각각 황동(밀도: 8,470 kg/m³, 탄성 계수: 110 GPa) 및 알루미늄(밀도: 2,700 kg/m³, 탄성 계수: 69 GPa)으로 만들어졌다. 이 경우 각각에 대한 폐회로(f_{sc}) 및 개회로

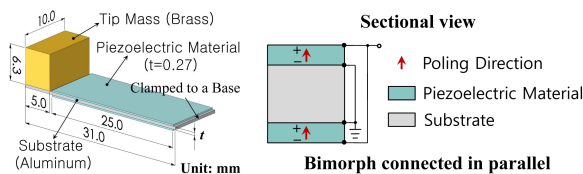


Fig. 3 Configuration of a cantilevered piezoelectric vibration energy harvester with electrodes connected in parallel

상태의 고유 진동수(f_{oc}), 전기-역학 연성 계수 값을 Table 1 에 나타내었다. 따라서, 예시된 3 가지 압전 진동 에너지 수확 장치의 에너지 변환 효율은 식 (7)에 의해 계산된 편의 전기-역학 연성 계수 값을 식 (13)에 대입하여 구할 수 있으며, 이를 다양한 감쇠비에 대하여 Fig. 4 에 실선으로 나타내었다. 이 결과로부터 전기-역학 연성 계수의 값에 관계 없이 감쇠비가 작은 경우 에너지 변환 효율이 50%에 근접함을 알 수 있다. 이는 Fig. 1(b)의 등가 전기 회로에서 R_m 과 R_L^{opt} 에서의 소모 전력이 동일함을 의미하며, 폐회로 고유 진동수로 가진되는 압전 진동 에너지 수확 장치의 감쇠비가 작고 외부 부하 저항이 R_L^{opt} 와 같다면, 역학 감쇠비(ζ_m)와 동일한 값을 갖는 전기 감쇠비(ζ_e)의 존재를 가정할 수 있다는 사실과 일치한다.⁽²⁾ 수정된 에너지 변환 효율의 결과로부터 관찰할 수 있는 또 다른 사실은 감쇠비가 증가함에 따라 에너지 변환 효율이 감소한다는 점이다. 그러나, Fig. 4(c)에 나타난 경우와 같이 전기-역학 연성 계수가 매우 높으면 감쇠비에 따른 에너지 변환 효

Table 1 Resonant frequencies and electromechanical coupling coefficients for the three cases

	PZT 5H	PMN-PZT ([001])	PMN-PZT ([011]- d_{32})
f_{sc} (Hz)	150.2	150.2	150.2
f_{oc} (Hz)	157.3	165.5	222.8
k_{sys}^2	0.088	0.176	0.545

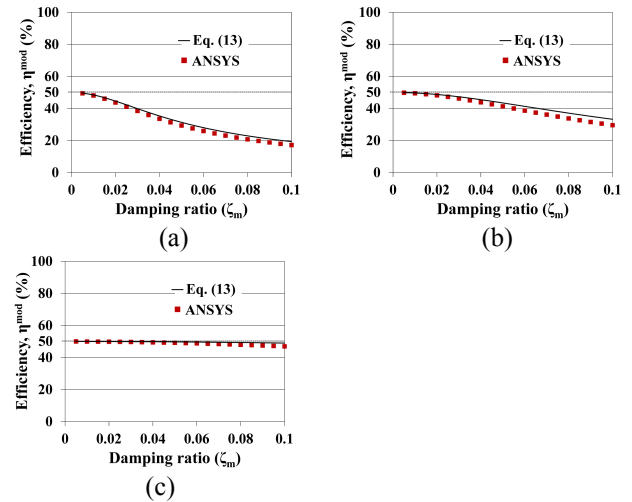


Fig. 4 Verification of the newly derived energy conversion efficiency for the optimal impedance-matched piezoelectric vibration energy harvesters with (a) PZT 5H, (b) [001]-poled PMN-PZT, and (c) [011]-poled d_{32} PMN-PZT

을 특성이 거의 변하지 않는다(다음에 살펴 보겠지만 가진 입력 및 전기 출력 파워 값 자체는 감쇠비의 영향을 받는다).

본 연구에서는 식 (13)의 결과를 입증하기 위해 ANSYS 를 사용하여 에너지 변환 효율을 직접 구하였다. 즉, Fig. 3 의 압전 진동 에너지 수확 장치에 식 (9)의 임피던스 정합된 부하 저항을 연결하고 외팔보 기저의 가진 가속도 크기를 1 m/s^2 으로 하였을 경우에 입력 진동 파워 및 전기 출력을 구하였다. 이는 각각 식 (6b) 및 (6a)를 의미하며, 유한 요소법을 이용하여 구할 때에는 다음의 식을 이용하였다.

$$P_L^{FEM} = \frac{1}{2} \frac{|\tilde{V}_o|^2}{R_L^{Opt}}; P_T^{FEM} = \frac{1}{2} \text{Re} \left[\sum_{i=1}^N \tilde{f}_i \cdot \tilde{v}_i^* \right] \quad (14)$$

위 식에서 \tilde{f}_i 및 \tilde{v}_i^* 는 조화 가진에 대한 기저 절점 i 에서의 복소수 반력 및 공액 복소수 속도를 의미하며, \tilde{V}_o 는 복소수 출력 전압을 뜻한다. 해석을 위해 폐회로 상태의 고유 진동수와 같은 주파수로 기저의 수직 방향 변위를 가속도 크기가 1이 되게 $1/\omega_{sc}^2$ 로 설정하였다. 이는 기저의 가진 가속도의 크기가 커지는 경우 발생할 수 있는 비선형성을 제외하고자 함이다.⁽²⁵⁾ 또한, 유한 요소 해석을 이용한 R_L^{Opt} 의 값은 기저가 고정된 압전 진동 에너지 수확 장치에 폐회로 고유 진동수와 동일한 가진 주파수의 단위 전압을 가한 후 전극에 발생하는 전하의 실수부(q_r) 및 허수부(q_i)를 이용하여 다음의 식에 의해 구하였다.^(8,26)

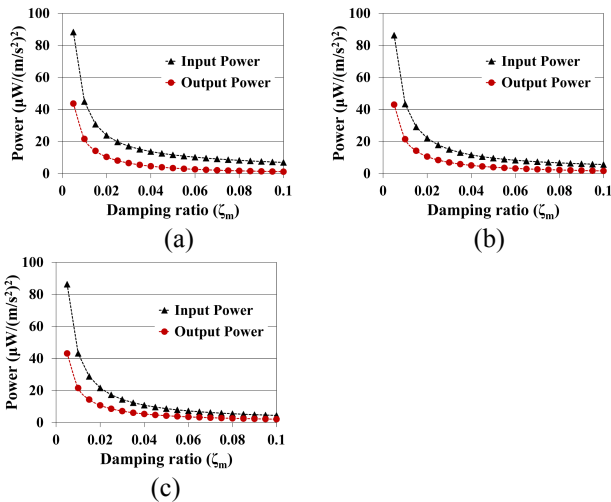


Fig. 5 Finite element analysis results of the mechanical input and electrical output power for the optimal impedance-matched PEHs with (a) PZT 5H, (b) [001]-poled PMN-PZT, and (c) [011]-poled d_{32} PMN-PZT

$$R_L^{Opt} = \frac{1}{2\pi f_{sc} \sqrt{q_r^2 + q_i^2}} \quad (15)$$

Fig. 4 에 위에서 설명한 방법에 의한 결과를 나타내었으며, 일반적인 구조물의 감쇠비 영역에서는 식 (13)의 결과와 매우 잘 일치함을 확인할 수 있다. 감쇠비가 증가함에 따라 오차가 발생하는 이유는 식 (13)의 단일 모드 가정에 의한 식에서 상위 모드의 영향이 고려되지 않았기 때문이다. 식 (14)에 의한 입력 진동 파워 및 임피던스 정합된 부하 저항에서의 전기 출력은 Fig. 5 에 별도로 나타내었다. 이를 통해 입력 및 출력 파워는 감쇠비가 증가함에 따라 모두 감소함을 확인할 수 있다.

3.2 에너지 변환 효율 식의 특성 비교

기존 식 (2) (또는 (8)) 및 수정된 식 (13)을 이용하여 3 가지 압전 재료의 진동 에너지 수확 장치에 대한 에너지 변환 효율을 Fig. 6 에 비교하여 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있듯이 제안된 효율 식의 최대값이 50%인 점을 고려할 때, 기존 식에 의한 에너지 변환 효율은 최대 100%의 값을 갖는다. 이는 근사 임피던스 정합된 부하 저항에서의 전기 출력 값이 최적의 정합인 경우보다 큰 것이 아니라, 변환 효율 식의 분모에 있는 입력 가진 진동 파워의 값이 작게 계산되기 때문이다. 이를 확인하기 위해 이번에는 Fig. 3 의 압전 진동 에너지 수확 장치에 근사 임피던스 정합 값 $1/\omega_{sc} C_p$ 를 갖는 부하 저항을 연결했을 때의 입력가진 진동 파워 및 전기 출력을 Fig. 7 에 나타내었다. 3 가지 진동 에너지 수확 장치에 대한 커패시턴스 C_p 의 값은 유한 요소의 결과를 이용하였으며,⁽²¹⁾ 각각 49.8 nF, 55.2 nF, 10.0 nF 이다. 부하 저항이 최적의 값으로 정합된 결과의 Fig. 5 와 비교해볼 때, 근사 정합된 부하 저항이 부착된 경우

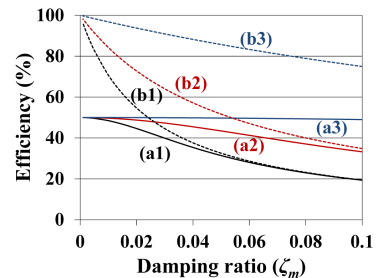


Fig. 6 Comparisons of energy conversion efficiencies for the optimal impedance-matched PEHs with (a1) PZT 5H, (a2) [001]-poled PMN-PZT, (a3) [011]-poled d_{32} PMN-PZT, and for the approximate impedance-matched ones with (b1) PZT 5H, (b2) [001]-poled PMN-PZT, (b3) [011]-poled d_{32} PMN-PZT

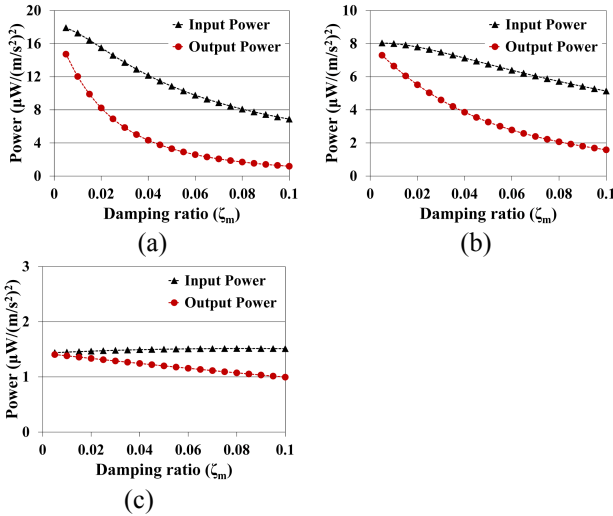


Fig. 7 Finite element analysis results of the mechanical input and electrical output power for the approximate impedance-matched PEHs with (a) PZT 5H, (b) [001]-poled PMN-PZT, and (c) [011]-poled d_{32} PMN-PZT

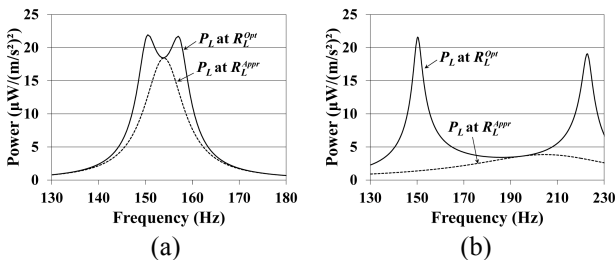


Fig. 8 Electrical output power of PEHs with (a) PZT 5H and (b) [011]-poled d_{32} PMN-PZT, for the damping ratio of 0.01

가 항상 전기 출력뿐만 아니라 입력 가진 진동 파워도 매우 작다는 것을 확인할 수 있다. 특히, 전기-역학 연성 계수가 매우 커서 폐회로 및 개회로 고유 진동수의 차이가 큰 경우에는 기존의 에너지 변환 효율 값은 큰 의미가 없다. 즉, 에너지 변환 효율은 크게 평가되지만 진동 에너지 수확 장치에 유입되는 실제 진동 파워는 작고 그에 따른 전기 출력도 작기 때문에 이를 설계 및 평가에 직접 적용하는 것이 적절하지 않다. 참고로 부하 저항의 정합 방법에 따른 압전 진동 에너지 수확 장치의 전기 출력 결과($\zeta_m = 0.01$)를 Fig. 8에 나타내었는데, 전기-역학 연성 계수가 큰 경우 근사 정합된 저항에서의 전기 출력은 최적 정합의 경우와는 많은 차이가 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 이 경우에는 근사 정합된 부하 저항에서의 출력 평가는 의미가 없다. 반면, 단결정을 사용한 압전 진동 에너지 수확 장치의 경우, 유도된 식에 의한 에너지 변환 효율 특성은 일반적인 구조물 감쇠비 영

역에서 감쇠비에 따라 크게 변하지 않는다. 따라서, 유도된 에너지 변환 효율 식은 다결정 세라믹 계열의 압전 재료를 이용한 에너지 수확 장치의 설계 및 평가에 훨씬 유용하게 사용될 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 압전 진동 에너지 수확 장치의 기존 에너지 변환 효율 식을 수정하여 새롭게 유도하였다. 이는 기존 식과는 달리 부하 저항이 최대 전기 출력이 발생하는 최적의 임피던스 정합 값을 가질 때의 에너지 변환 효율을 나타낸다. 유도된 식은 유한 요소 해석 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다. 또한, 검증 및 기존 식과의 비교를 위해 유한 요소법을 사용하여 임피던스 정합 차이에 따른 가진 입력 및 전기 출력 파워 특성을 파악하였다. 전기-역학 연성 계수가 높은 단결정 압전 진동 에너지 수확 장치의 경우, 기존의 효율 식은 실제 진동 가진 입력 및 전기 출력 양상을 잘 반영하지 못하는 반면, 제안된 식에 의한 에너지 변환 효율 특성은 일반적인 구조물의 감쇠비 영역에서 감쇠비에 따라 크게 변하지 않았다.

후기

이 논문은 2012년도 대구가톨릭대학교 교내 연구비 지원에 의한 것임

참고문헌 (References)

- (1) Roundy, S., Wright, P. K. and Rabaey, J., 2003, "A Study of Low Level Vibrations as a Power Sources for Wireless Sensor Nodes," *Computer Communications*, Vol. 26, No. 11, pp. 1131~1144.
- (2) Cook-Chennault, K. A., Thambj, N. and Sastry, A. M., 2008, "Powering MEMS Portable Devices-A Review of Non-regenerative and Regenerative Power Supply Systems with Special Emphasis on Piezoelectric Energy Harvesting Systems," *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, No. 4, 043001.
- (3) Meninger, S., Mur-Miranda, J. O., Amirtharajah, R., Chandrakasan, A. P. and Lang, J. H., 2001, "Vibration-to-Electric Energy Conversion," *IEEE Transactions on VLSI Systems*, Vol. 9, No. 1, pp. 64~76.
- (4) El-hami, M., Glynne-Jones, P., Whilte, N. M., Hill, M., Beeby, S., James, E., Brown, A. D. and Ross, J. N., 2001, "Design and Fabrication of a New Vibration-Based Electromechanical Power Generator," *Sensors and Actuators A*, Vol. 92, No. 1-3, pp. 335~342.
- (5) Roundy, S. and Wright, P. K., 2004, "A Piezoelectric

- Vibration Based Generator for Wireless Electronics," *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, No. 5, pp. 1131~1142.
- (6) Mitcheson, P. D., Green, T. C., Yeatsman, E. M. and Holmes, A. S., 2004, "Architectures for Vibration-Driven Micropower Generators," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 13, No. 3, pp. 429~440.
- (7) Stephen, N. G., 2006, "On Energy Harvesting from Ambient Vibration," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 293, No. 1-2, pp. 409~425.
- (8) Kim, J. E. and Kim, Y. Y., 2011, "Analysis of Piezoelectric Energy Harvesters of a Moderate Aspect Ratio with a Distributed Tip Mass," *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 133, No. 4, 041010.
- (9) Roundy, S., 2005, "On the Effectiveness of Vibration-based Energy Harvesting," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 16, No. 10, pp. 809~823.
- (10) Gilbert, J. M. and Balouchi, F., 2008, "Comparison of Energy Harvesting Systems for Wireless Sensor Networks," *International Journal of Automation and Computing*, Vol. 5, No. 4, pp. 334~347.
- (11) Kim, J. E., 2010, "Design of a Vibration-Powered Piezoelectric Energy-Harvesting Module by Considering Variations in Excitation Frequency," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No. 5, pp. 637~644.
- (12) Erturk, A. and Inman, D. J., 2011, *Piezoelectric Energy Harvesting*, Wiley, United Kingdom.
- (13) Kim, J. E., 2013, "Performance Study of Diagonally Segmented Piezoelectric Vibration Energy Harvester," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 8, pp. 983~989.
- (14) Umeda, M., Nakamura, K. and Ueha, S., 1997, "Energy Storage Characteristics of a Piezo-Generator using Impact Induced Vibration," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 36, No. 5B, pp. 3146~3151.
- (15) 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*, Vol. 121, No. 3, pp. 566~571.
- (16) Richards, C. D., Anderson M. J., Bahr, D. F. and Richards, R. F., 2004, "Efficiency of Energy Conversion for Devices Containing a Piezoelectric Component," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 717~721.
- (17) Sodano, H., Inman, D. J. and Park, G., 2005, "Comparison of Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Recharging Batteries," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 16, No. 10, pp. 799~807.
- (18) Shu, Y. C. and Lien, I. C., 2006, "Efficiency of Energy Conversion for a Piezoelectric Power Harvesting System," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 2429~2438.
- (19) Harn, R. L., 2012, "Theoretical Investigation of Energy Harvesting Efficiency from Structural Vibrations Using Piezoelectric and Electromagnetic Oscillators," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 132, No. 1, pp. 162~172.
- (20) Erturk, A. and Inman, D. J., 2008, "Issues in Mathematical Modeling of Piezoelectric Energy Harvesters," *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, No. 6, 065016.
- (21) Kim, J. E., 2010, "Analysis of Vibration-powered Piezoelectric Energy Harvesters by Using Equivalent Circuit Models," *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.*, Vol. 20, No. 4, pp. 397~404.
- (22) Piezo Systems, Inc., Catalog available from <http://www.piezo.com/catalog7C.pdf> (cited on 23 January, 2015).
- (23) Kim, J. E., Kim, Y.-C. and Sun, K. H., 2014, "Performance Characteristics of Vibration Energy Harvesting Using [001] and [011]-Poled PMN-PZT Single Crystals," *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.*, Vol. 24, No. 11, pp. 890~897.
- (24) Ceracomp Co., Ltd. (<http://www.ceracomp.com>).
- (25) Stanton, S. C., Erturk, A., Mann, B. P., Dowell, E. H. and Inman, D. J., 2011, "Nonlinear Nonconservative Behavior and Modeling of Piezoelectric Energy Harvesters Including Proof Mass Effects," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 23, No. 2, pp. 183~199.
- (26) Kim, J. E. and Kim, Y. Y., 2013, "Power Enhancing by Reversing Mode Sequence in Tuned Mass-Spring Unit Attached Vibration Energy Harvester," *AIP Advances*, Vol. 3, No. 7, 072103.