

입력파형에 따른 PZT 바이몰프 진동자의 출력특성

The output characteristics of the input waveform to the PZT bimorph vibrator

김 용 혁[†] · 추 순 남^{*}
(Yong-Hyuk Kim · Soon -Nam Chu)

Abstract - The aim of this study is to research maximum harvesting energy by the optimal input wave condition. The voltage characteristics of the PZT bimorph were investigated in terms of the sine wave, triangle wave and square wave according to frequency range 0~70Hz. It was found that the square wave compared with a triangular wave or square wave was showed the higher output energy. PZT bimorph was mechanically vibrated by solenoid coil experiments, which revealed two voltage peak mode according to frequency. Maximum voltage at second vibration frequency 28Hz demonstrated that the generated DC voltage was proportional to the tip displacement of the bimorph and the phase difference between the input frequency and bimorph vibration frequency was 90 degree. It was expected that optimized design to harvest a much higher energy level from lower frequency vibrations.

Key Words : Triangle wave, Square wave, Energy harvest, Vibration frequency, PZT bimorph, Phase difference

1. 서 론

PZT 압전체는 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환하거나 기계적 에너지를 전기적 에너지로 상호변환이 가능하기 때문에 센서나 액츄에이터 등과 같은 에너지 변환소자로서 폭 넓게 응용되고 있다. 또한 유전성과 압전성이 우수하고 전력밀도가 매우 크기 때문에 진동에너지를 전기에너지로 쉽게 변환시킬 수 있는 특성을 갖고 있다[1].

이와 같은 특성을 이용하여 PZT 압전체로부터 전력을 수집하거나 저장하려는 많은 연구들이 에너지 수확이라는 관점에서 수행되었다. 이러한 연구들은 대부분 생활환경이 제공하는 진동이나 압력, 즉 차량이 통과할 때 발생하는 교량 진동, 도시 소음과 같은 음향진동 또는 보행시 압력 등 다양한 진동원을 이용하여 에너지를 수확하는 것으로서, 대부분 캔틸레버 구조의 PZT 바이몰프 압전소자를 대상으로 이루어졌다.

Sodano 등은 압전체 진동에너지의 전력변환 작용과 압전체에서 생성되는 전하를 평가할 수 있는 다양한 모델들을 제시하였다[2-3]. 그리고 J.Ajitsaria 등은 시험 질량이 부착된 바이몰프 PZT 밴더에 있어서 진동 시 발생하는 에너지 발생의 수학적 모델을 제시하였으며, Gonzalez J. L 등은 PZT 소자에 대한 에너지 변환실험결과를 바탕으로 압전소자의 출력을 이론적으로 제시하였다[4-5]. 또한 Glynne 등은 마그네트를 다수 사용하여 차량운행 시에 발생하는 진동 에너지를 전기에너지로 직접 변환하는 전자식 에너지수확장치를 개발하였으며, Saha 등은 주변의 진동에너지로부터 전력을 발생시킬 수 있는 최적조건을 전자식 발전기 방식으

로 모델화하였다[6-7]

이들 연구들은 실험을 위하여 일정 주기의 정현파 진동을 일으키는 미니 셰이커 바이브레이터를 이용하거나 주변의 자연발생적인 불규칙한 비정현파 진동을 여과 없이 사용하는 방식을 취해서 바이몰프의 발전특성, 진동에너지의 변환 효율, 진동특성분석에 따른 전기적 등가회로의 설계 등 발전 시스템의 효율을 최적화하는 조건에 관한 연구들이다. 그러나 PZT 바이몰프에 적용 가능한 진동조건은 정현파나 비정현파 이외에도 정현적 요소가 아닌 펄스파형이나 스텝파형 등과 같은 다양한 진동패턴이 존재하고 있지만 이들 진동조건들에 대한 연구보고는 매우 미비한 실정이다. 그러므로 다양한 외부 진동조건에 따른 출력특성의 조사를 통해서 PZT 바이몰프의 잠재적 에너지수확 능력을 확대시키는 것은 바이몰프의 효율적 사용이란 측면에서 매우 중요하다고 하겠다.

따라서 본 연구에서는 PZT 바이몰프의 진동특성에 맞는 입력조건과 진동특성을 조사하여 출력 에너지를 보다 효율적으로 수확할 수 있는 방안을 도출하였다. 이를 위하여 정현파, 삼각파, 구형파를 외부입력으로 사용하여 각 파형에 따른 PZT 바이몰프의 기본진동 특성과 주파수 변화에 따른 출력특성을 분석하였으며, 그 결과를 바탕으로 최대출력에 미치는 입력파형과 진동조건을 제시하였다.

2. 측정 및 방법

그림 1에 본 실험을 위해 사용된 실험장치의 구성도를 나타내었다. 진동구동장치는 마그네트와 코일을 결합시킨 솔레노이드를 Digital Swweep Function Generater(Topward 8150)로 구동하는 방식으로 구성하였으며, 바이몰프 소자의 변위측정은 고주파발전방식의 근접센서(PS-3015N)를 사용하였다. AC출력파형과 AC전압(실효치)은 Digital Storage Oscilloscope (Agilent, DSO 3062A)를 사용하여 관찰하였으

* 정 회 원 : 가천대 공대 전기공학과 교수

† 교신저자, 정회원 : 가천대 공대 전기공학과 교수

E-mail : kimyh@gachon.ac.kr

접수일자 : 2012년 10월 7일

최종완료 : 2012년 11월 20일

며 DC출력전압은 브리지 정류회로를 통하여 47uF커패시터에 저장되는 전압을 True RMS Multimeter(Fluke 111)로 측정하였다.

본 실험에서 사용된 PZT 압전소자는 캐틸레버형 바이몰프소자(Piezo system, inc. EH220-A4- 503YB)로서 가동부 크기는 50mm(L) × 31.3mm(W) × 1.5mm(t)이다. 표 1에 PZT 바이몰프 소자의 기본성능을 나타내었다.

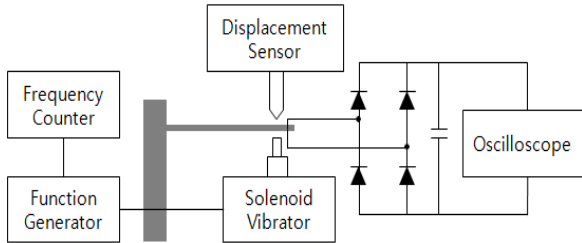


그림 1 실험장치 구성도

Fig. 1 Schematics of experimental devices

표 1 PZT 바이몰프 소자의 기본성능

Table 1 Basic properties of PZT bimorph element

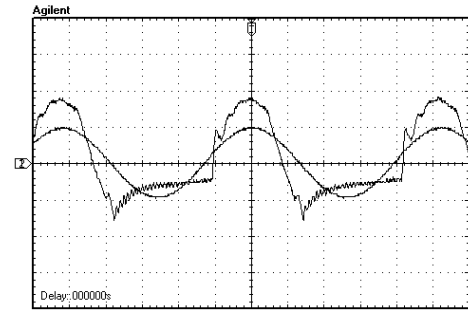
Contents	Specifications
Stiffness (N/m)	188
Tip deflection(um)	±2.6
Capacitance(nF)	232
Rated Voltage (Vp)	±90
Blocked Force(N)	±0.3

3. 결과 및 검토

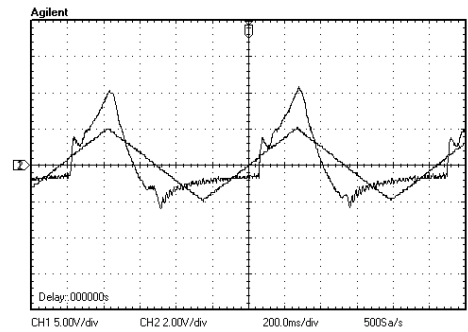
3.1 입력파형에 따른 출력파형

입력파형에 의해서 구동되는 PZT 바이몰프의 진동상태를 알아보기 위해서 솔레노이드 구동코일에 가해진 입력 파형 (정현파, 삼각파, 구형파)과 각 입력파형에 의해서 PZT 바이몰프 소자에서 발생한 AC전압파형을 그림 2에 나타내었다.

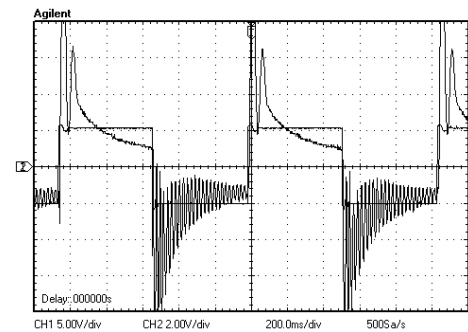
정현파 입력의 경우, AC출력파형이 (+)반주기 동안은 입력파형과 동일하게 정현파 진동을 하다가 (-)반주기 동안 정현적으로 감소해가는 감쇄진동 특성을 나타내었다. 삼각파 입력의 경우, (+)반주기 동안에 입력파형과 같은 삼각파형의 진동양상을 나타내었고 (-)반주기에는 정현파 입력과 마찬가지로 정현적 감쇄진동을 하는 것으로 나타났다. 구형파 입력의 경우, (-)에서 (+)로 입력파형의 극성이 바뀌는 순간에는 급격하게 (+)진동을 하다가 일정 입력구간에서는 지수함수적으로 감소하는 특성을 나타내었으며, 다시 (+)에서 (-)로 입력파형의 극성이 바뀌는 순간 큰 폭으로 (-)진동을 하다가 (-)주기 동안에는 정현적 감쇄진동을 하는 것으로 나타났다. AC출력전압에 크기에 있어서 구형파의 경우가 정현파나 삼각파 입력파형에 비해서 전압이 크게 증가되는 특성으로 나타났다. 이 결과로써, PZT 바이몰프는 입력파형에 따라서 서로 다른 진동패턴을 갖고 되며, 그로 인해서 생성되는 출력전압 또한 진동패턴을 따르기 때문에 구형파



(a)



(b)



(c)

그림 2 입력파형에 따른 AC전압 (a) 정현파, (b) 삼각파, (c) 구형파

Fig. 2 AC voltage according to input waveform (a) sine wave (b) triangle wave (c) square wave

가 정현파나 삼각파 입력과는 전혀 다른 패턴으로 진동한다는 사실을 알 수 있다.

입력파형에 따른 이러한 출력특성은 PZT 바이몰프에 가해지는 외부압력의 시간적 변화에 따른 현상으로서, 압력변화가 급격하게 일어나는 순간에 출력이 발생하기 때문이다. 식 (1)에서와 같이 외부압력에 의한 전하의 시간적 변화가 클수록 전류량이 증가되는 현상에 기인된다고 볼 수 있다. 그림 2(a)의 정현파에 의한 출력파형이 둥근 종 모양을 이룬 반면에 삼각파에서는 뾰족한 산 모양을 이루고 있고, 구형파는 양 극단에서 입력변화가 급격하게 일어나기 때문에 이 순간 출력이 짧은 펄스 형태로 나타난 것이다.

3.2 AC전압의 입력파형 의존성

입력파형에 의해서 진동되는 PZT 바이몰프 압전소자 양단에는 전하량의 변화로 인해서 다음 식에 의해서 AC전압이 생성된다.

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad (1)$$

$$v(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt \quad (2)$$

그림 3은 입력주파수를 0~70Hz로 변화시켰을 때, 입력파형에 따른 AC전압크기를 실효값으로 나타낸 것이다. 전반적으로 삼각파 <정현파 <구형파 순으로 출력전압이 증가되는 특성을 나타냈다.

각 파형에 대한 최대전압은 동일하게 16Hz와 28Hz에서 나타났으며 입력주파수 40Hz 이상에서는 주파수의 영향이 관찰되지 않았다. 특히 구형파의 경우 최대전압은 26Vrms로써 삼각파와 정현파에 비해서 1.7~1.8배정도 높게 나타났다. 이와 같은 특성은 그림 2에서와 같이 PZT 바이몰프 진동이 입력파형의 패턴과 관련되어 나타난 결과로 볼 수 있다.

그리고 16Hz와 28Hz에서 피크를 나타낸 것은 PZT 바이몰프의 진동모드와 관련된 것으로 생각된다. 일반적으로 사각 평형판 압전체의 경우, 진동특성은 압전체 길이에 의존되는 진동모드를 갖게 되는데 전장에 대해서 기본적으로 반파장 진동인 $\lambda/2$ 모드, 전과장 진동인 $\lambda/4$ 모드가 생성된다. 그러나 입력주파수가 높아지면 압전체 진동은 그림 2와 같은 기본과 진동뿐만이 아니라 고조파 진동이 병행되어 발생되기 때문에 일정 파장의 모드로 규정할 수 없게 된다. 그러므로 주파수에 따라서 다양한 고조파 진동이 발생되다가 어느 일정 주파수에서 진동파가 합성되거나 상쇄되는 효과로 인하여 최대값이나 최저값을 나타낸다고 할 수 있다. 최대값을 나타낸 16Hz와 28Hz 그리고 최대값 전, 후의 값들은 이러한 효과에 의한 것으로 생각된다. 그리고 40Hz 이상에서는 진동속도가 빠르기 때문에 PZT 바이몰프를 충분히 진동시키지 못함으로 인해서 전압변화가 매우 미미하게 나타났다고 할 수 있다.

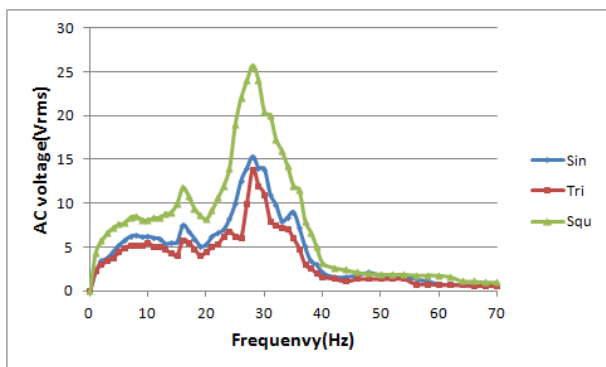


그림 3 주파수에 따른 AC전압의 입력파형 의존성
Fig. 3 Input waveform dependence of AC voltage

3.3 DC전압의 입력파형 의존성

그림 4에 주파수변화에 따른 DC전압의 크기를 입력파형에 따라 나타내었다. 그림 3의 AC전압특성과 마찬가지로 DC전압은 주파수 16Hz와 28Hz에서 최대값을 나타내었으며 삼각파 <정현파 <구형파 순으로 전압이 크게 나타났다. 이와 같은 현상은 AC전압이 DC전압으로 변환되는 과정에서 파형패턴에 의한 영향이 없음을 보여준 것이라 할 수 있다.

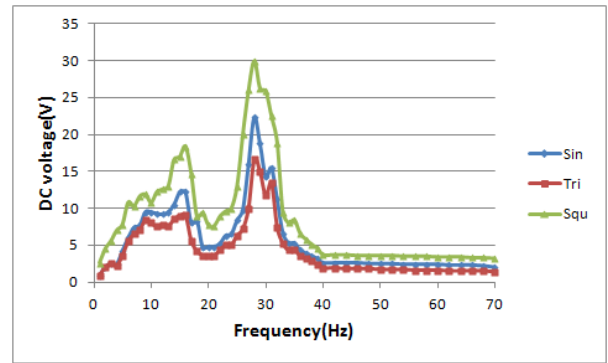


그림 4 DC전압의 입력파형 의존성
Fig. 4 Input waveform dependence of DC voltage

입력파형에 의해서 발생된 AC전압은 그림 1의 정류회로를 통해서 DC전압으로 변환되어 커패시터에 저장됨으로서 에너지원으로서의 활용이 가능하기 때문에 DC전압에 대한 평가는 에너지 수확에 있어서 PZT 바이몰프가 얼마나 효율성이 있는가를 평가하는 척도가 된다. 일반적으로 커패시터에 저장되는 전하량은 DC전압으로 평가되며, 다음 식으로 나타낸다.

$$V = \frac{Q}{C} \quad (3)$$

그림 5는 최대 DC전압을 나타낸 입력주파수 28Hz에 있어서, 1분 동안 DC전압증가의 시간적 변화를 나타낸 것이다. 그림 4의 DC전압의 주파수특성과 마찬가지로 구형파의 경우가 정현파나 삼각파 보다 높은 값을 나타내었다. 구형파의 경우, 15.2V를 나타냈으나 삼각파, 정현파의 경우는 각

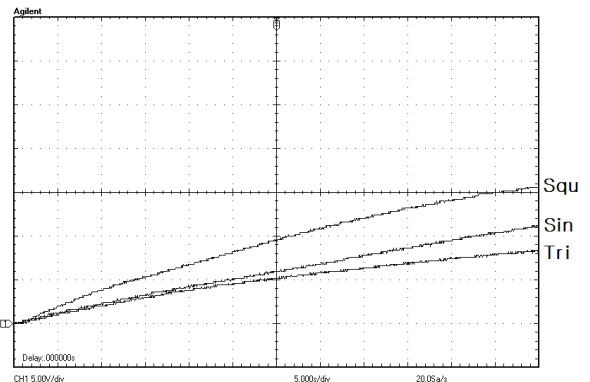


그림 5 시간증가에 따른 DC전압변화
Fig. 5 Variation of DC voltage according to time increase

각 8.5V, 10.1V로 나타났다. 따라서 DC전압 출력면에서 구형파 입력이 정현파나 삼각파에 비해서 우수하다고 할 수 있다.

3.4 입력파형에 따른 출력에너지

연속진동에 의해서 바이몰프 양단에 생성된 에너지 량은 다음 식으로 구해진다.

$$W = \frac{1}{2} C v^2 (J) \quad (4)$$

여기서, C(F)는 커패시터의 정전 용량
v는 측정된 DC전압

그림 6에 식 (4)를 이용하여 47μF 커패시터에 저장된 DC 전압으로부터 구한 출력에너지를 입력파형에 따라 나타내었다. 주파수 28Hz에서, 구형파의 경우 21.2mJ를 나타냈으며 삼각파, 정현파에서는 각각 7.3mJ과 12mJ를 나타내었다.

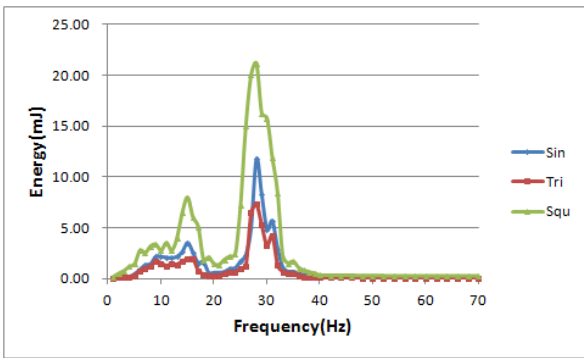


그림 6 입력파형에 따른 출력 에너지
Fig. 6 Output energy according to input waveform

3.5 진동변위특성

PZT 바이몰프의 진동변위가 출력특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 그림 7에 입력주파수에 따른 진동변위를 입력파형별로 나타내었다. 진동변위는 전반적으로 삼각파 <정현파 <구형파순으로 크게 증가하였으며 16Hz와 28Hz에

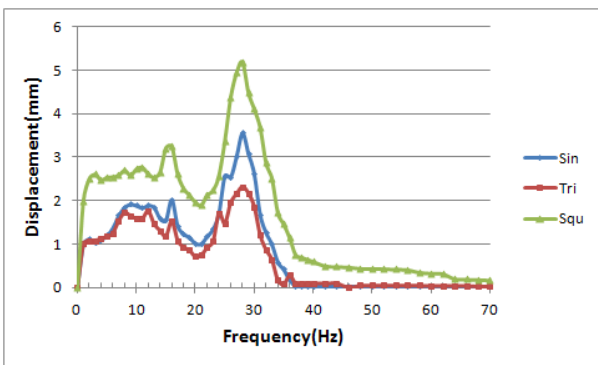


그림 7 진동변위의 주파수 의존성
Fig. 7 Frequency dependence of vibration displacement

서 진동변위피크를 나타내었다. 이 특성은 그림 6의 입력파형에 따른 출력 에너지의 주파수 특성과 정확하게 일치되었다. 따라서 진동변위가 증가할수록 출력에너지가 증가된다고 할 수 있다.

3.6 입력파형과 출력파형의 위상차

에너지 수확이란 관점에서, 최대 출력조건은 PZT 바이몰프를 실용화에 있어서 매우 중요하다고 할 수 있다. 그림 3~5에서와 같이, 본 실험에서 설정한 1~70Hz의 진동주파수 영역 내에서 최대 AC전압, 최대 DC전압, 최대 출력에너지를 갖는 진동주파수가 28Hz임을 확인하였다. 따라서 최대출력 주파수 28Hz와 PZT 바이몰프의 진동패턴과의 연관성을 조사하기 위하여 PZT 바이몰프 자체의 공진주파수 그리고 입력파형과 진동파형의 위상관계를 측정하였다.

실험결과 본 실험에 사용된 PZT 바이몰프의 두께방향 최초 공진주파수는 2.06kHz인 것으로 측정되었으며 입력주파수 1~70Hz 범위에서 PZT 바이몰프 자체의 공진특성은 나타나지 않았다. 따라서 주파수 28Hz는 바이몰프의 공진주파수와 연관성이 없음을 확인하였다.

그림 8은 입력주파수 28Hz에서, 입력파형과 출력파형의 위상관계를 나타낸 그림이다. 출력파형은 입력파형의 주파수 변화에 따라서 크기 및 위상이 변환되는 사실은 그림 2의 1Hz그래프와 그림 8의 28Hz 그래프로부터 확인할 수 있다.

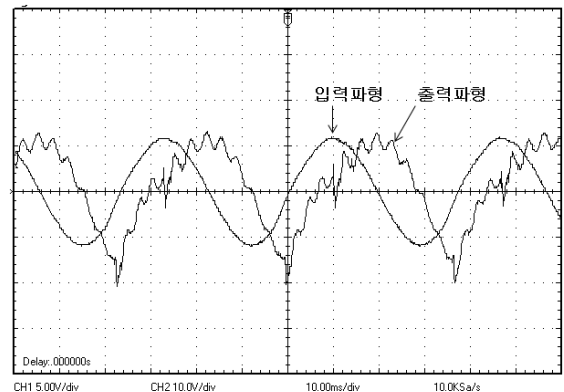


그림 8 입력파형과 출력파형의 위상관계(28Hz)
Fig. 8 Phase relationship between the input waveform and output waveform(28Hz)

최대출력과 위상차와의 관계를 조사하기 위하여 그림 9에 입력파형 주파수와 PZT 바이몰프 진동에 따른 출력주파수 간의 위상차를 입력주파수에 따라 나타내었다. 입력주파수 증가에 따라서 위상차가 증가되는 경향을 보였으며 28Hz에서 두 주파수 간의 위상차가 90°가 되는 것으로 나타났다. 그림 6에서 최대출력에너지는 입력주파수 28Hz에서 나타나므로 입력주파수와 PZT 바이몰프의 진동주파수간의 위상차 90°일 때 최대출력이 나타난다고 할 수 있다. 그리고 90°의 위상차를 벗어나게 되면 출력에너지가 급격하게 낮아지는 특성을 고려하면, 위상차 90° 될 때에 PZT 바이몰프에서의 기계적 공진현상으로 인해서 변위량이 최대가 됨으로서 출력에너지가 최대로 되는 것으로 해석할 수 있다.

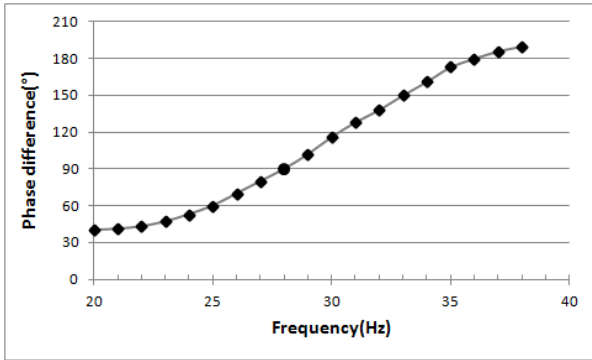


그림 9 입력주파수에 따른 위상차
 Fig. 9 Phase difference according to input frequency

4. 결 론

본 연구에서는 PZT 바이몰프에 인가되는 구동전원의 파형(정현파, 삼각파, 구형파)이 PZT 바이몰프 출력특성에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 주파수특성 면에서, AC전압, DC전압, 출력에너지 모두 일치된 변화특성을 나타내었다. 출력에너지 면에서, 구형파의 경우 정현파와 삼각파에 비해서 2~3배 정도의 높게 나타났으며 정현파는 삼각파에 비해서 약 2배 정도로 높게 나타났다. 0~70Hz 입력주파수 영역에서 16Hz와 28Hz에서 피크출력이 관찰되었으며 최대출력은 28Hz에서 나타났다. 최대출력 주파수 28Hz에서 입력파형 주파수와 PZT 바이몰프의 진동주파수의 위상차가 90°가 된다는 사실과 진동변위가 최대로 된다는 사실을 확인하였다. 따라서 PZT 바이몰프로부터 최대 에너지를 얻기 위해서는 구형파를 입력파형으로 사용하는 것이 유리하며 또한 입력주파수와 PZT 바이몰프 진동주파수의 위상차를 90°로 유지시켜 구동시키는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 가천대학교 교내연구비 지원에 의한 결과임.

참 고 문 헌

[1] S. Roundy, P. K. Wright and J. Rabaey, " A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes", computer communications, Vol. 26, pp. 1131, 2003

[2] Sodano H A, Park G and Inman D J., "Estimation of electric charge output for piezoelectric energy harvesting." Strain, vol. 40, pp. 49 - 58 , 2004.

[3] Sodano H A, Inman D J and Park G., "A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials." Shock Vib. Dig., vol. 36, pp. 197-205, 2004.

[4] J. Ajitsaria, S Y Choe, D Shen and J Kim, "Moeling an analysis of bimorph piezoelectric cantilever beam

for voltage generation, Smart Mater. Struct. Vol. 16, pp. 447-454, 2007

[5] Gonzalez J. L, Rubio A and Moll F, "2001 Human powered piezoelectric batteries to supply power to wearable electronic devices", Int. J. Soc. Mater. Eng. Resources", Vol. 10, pp. 34-40, 2001

[6] Glynne-Jones P, Tudor M J, Beeby S P and White N M., "An electromagnetic, vibration - powered generator for intelligent sensor systems., Sensors Actuators, A vol. 110, pp. 344 - 349, 2004

[7] Saha C R, O'Donnell T, Loder H, Beeby S and Tudor J., "Optimization of an electro magnetic energy harvesting device, IEEE Trans. Mag., vol. 42, pp. 3509-3511, 2006.

저 자 소 개



김 용 혁 (金 龍 赫)

1988년 인하대 전기공학과(박사),
 1993년 (일)명성대학 연구교수,
 현재 가천대학교 전기공학과 교수
 주 관심분야 : 신재생에너지



추 순 남 (秋 順 男)

2002 경원대 전기전자공학과(공박),
 현재 조달청 심사위원,
 현재 가천대학교 전기공학과 교수
 주 관심분야 : 반도체, 태양전지