

편재형 컴퓨팅을 위한 미세구조 에너지 하베스팅 시스템의 구조 설계

Design of Micro-structured Small Scale Energy Harvesting System for Pervasive Computing Applications

민철홍¹, 김태선^{1,a}

(Chul Hong Min¹ and Tae Seon Kim^{1,a})

Abstract

In this paper, we designed micro-structured electromagnetic transducers for energy harvesting and verified the performance of proposed transducers using finite element analysis software, COMSOL Multiphysics. To achieve higher energy transduce efficiency, around the magnetic core material, three-dimensional micro-coil structures with high number of turns are fabricated using semiconductor fabrication process technologies. To find relations between device size and energy transduce efficiency, generated electrical power values of seven different sizes of transducers (3×3 mm², 6×6 mm², 9×9 mm², 12×12 mm², 15×15 mm², 18×18 mm², and 21×21 mm²) are analyzed on various magnetic flux density environment ranging from 0.84 T to 1.54 T and it showed that size of 15×15 mm² device can generate 991.5 μW at the 8 Hz of environmental kinetic energy. Compare to other electromagnetic energy harvesters, proposed system showed competitive performance in terms of power generation, operation bandwidth and size. Since proposed system can generate electric power at very low frequency of kinetic energy from typical life environment including walking and body movement, it is expected that proposed system can be effectively applied to various pervasive computing applications including power source of embodied medical equipment, power source of RFID sensors and etc. as an secondary power sources.

Key Words : Energy harvesting, Micro power module, Pervasive computing, MEMS generator

1. 서론

휴대전화에서 출발한 휴대용 전자기기의 수요급 증현상은 저전력 반도체 및 전자회로기술의 발전과 더불어 그 범위를 더욱 넓히고 있으며, 최근에는 u-헬스케어 및 유비쿼터스 컴퓨팅 등 인간의 생활패턴을 바꾸어 놓을 수 있는 다양한 형태로 진화하고 있다. 이때, 유비쿼터스환경 혹은 편재형 컴퓨팅(pervasive computing) 기술이 적용된 휴대

용 기기의 전원은 통상 2차전지를 통해 공급되고 있다. 비록 휴대용전자기기를 위한 저전력 전자기술이 꾸준히 개발되고 있기는 하지만, 성능향상을 위한 소자수의 증가와 다양한 기능들의 추가 통합으로 인하여 전력 소모는 오히려 지속적으로 늘어나고 있는 추세이며, 지속적이고 안정적인 전원공급문제가 대두되고 있는 상황이다. 현재 2차 전지에 적용되는 재료, 기술 등의 발전으로 전지 용량이 조금씩 증가되고는 있지만 정기적인 교체 혹은 충전이 필요하다는 근본적인 문제를 해결할 수는 없어 관리에 어려움을 겪고 있다. 또한 납, 카드뮴, 수은 등의 유해물질이 포함되어 있어 환경오염의 원인으로 부각되고 있는 현실이다. 따라서 각종 휴대용 전자기기들의 배터리 전력에 대한 의존성을

1. 가톨릭대학교 정보통신전자공학부

(경기도부천시 원미구 역곡2동 산43-1)

a. Corresponding Author : tkim@catholic.ac.kr

접수일자 : 2009. 9. 28

1차 심사 : 2009. 10. 16

심사완료 : 2009. 10. 23

줄이거나 대체 할 수 있으며, 환경오염이 없는 새로운 인간친화적인 독립전원기술이 절실히 요구되고 있으며, 이에 많은 연구가 다양한 방법으로 활발히 진행되고 있다[1-8].

현재 개발되고 있는 에너지 하베스팅 소자는 에너지원에 따라 빛(solar cell), 열(solar heat), 그리고 진동(vibration) 등으로 나뉘며, 그 중 진동을 이용한 에너지 하베스팅 소자는 압전(piezoelectric) 방식과 전자기(electromagnetic) 방식, 그리고 정전기(electrostatic) 방식[6]으로 구분된다[8]. 일반적으로 압전체를 이용한 하베스팅 소자[1-3]는 바(bar)의 한쪽 끝을 고정시킨 외팔보(cantilever) 형태로 제작되며, 그 끝에는 집중 질량(mass)이 매달려 있다. 외팔보가 아래로 굽혀지면 윗면에는 인장, 아랫면에는 압축에 의해 변형이 생기고 양면에는 전압이 발생하게 된다. 그러나 압전방식의 에너지 하베스팅 소자의 대부분은 압전 세라믹(PZT)을 사용하기 때문에 응력파괴가 쉽게 발생 될 수 있으며, 대체로 주파수가 높고 제한된 범위에서만 전력발생이 용이하고 공진주파수를 맞추어 설계해야하는 단점이 있다. 또한 크기에 비해 기계적-전기적 에너지 변환효율이 낮아 전자기기가 요구하는 전력과 비교해 보았을 때 아직까지는 활용범위가 높지 못하다. 또한 전자기 방식[4,5]의 에너지 하베스팅 소자는 코일을 감은 질량(mass)이 진동에 의해 자석 안으로 수직운동하며 에너지를 발생시키는 방법[4]과 패턴이 형성된 여러 층의 PCB 중심에 자석을 놓고 진동에 의해 자석이 운동을 하며 에너지를 발생시키는 구조[5]의 에너지 하베스팅 소자 등이 개발되었다. 전자기 방식의 에너지 하베스팅 소자는 압전체 방식의 하베스팅 소자와 달리 공진 주파수를 조절할 필요가 없다는 장점이 있으나, 이 방법 역시 발생전압이 시간에 따른 자속쇄고수에 의존한다는 단점과 에너지 효율을 위해 높은 권선수를 필요로 하여 소형화가 어렵다는 한계를 가지고 있다.

상기 기술한 다양한 형태의 에너지 하베스팅 소자들은 에너지원이나 구조, 발전방식, 주파수 등에 따라 하베스팅 소자의 효율이 달라지기 때문에 실제 하베스팅 소자를 제작하기에 앞서 유효성을 검증하는 작업이 반드시 필요하다[7]. 따라서 본 논문에서는 반도체 공정을 이용하여 자성체 주위로 미세 패턴의 마이크로 코일을 감고 외부 자석을 이용하여 하베스팅 소자 내부의 자성체 극성을 바꿔주어 미세 패턴들로부터 유도기전력이 발생하는 에너지 하베스팅 소자에 대한 구조를 제안하고, 상용프로그램인 Comsol社의 Multiphysics를 이용하여 유한요소법을 통해 미세구조물의 동역학 관계를

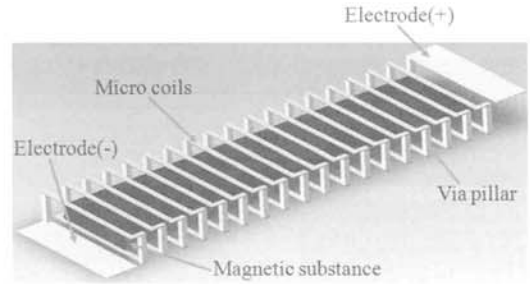


그림 1. 제안된 에너지 하베스팅 소자의 구조도.
Fig. 1. Structural view of proposed energy harvesting device.

모형화하여 제안한 에너지 하베스팅 소자의 유효성을 검증하였다[9]. 이러한 모형화 과정은 다른 형태를 갖는 전자기유도 방식의 하베스팅 소자뿐만 아니라 다양한 MEMS 소자 등의 효율성 및 구조 검증에 응용되어 제작 시간과 비용을 절감할 수 있다는 장점이 있다.

2. 제안한 하베스팅 소자의 구조

제안한 하베스팅 소자의 기본원리는 원통형 코일 안에 자석을 넣었다 빼는 방식으로 유도기전력을 발생시키는 기본적인 원리에 기초한다. 그러나 이 같은 전자기유도 방식은 크기에 비해 효율이 매우 낮다는 단점을 가지고 있었다. 따라서 효율성의 문제를 극복하고 소형화를 통해 그 적용범위를 넓히고자 본 논문에서는 미세반도체공정을 이용하여 높은 권선수를 갖는 미세 삼차원 구조의 코일을 형성하여 변환효율을 높이고, 코일 내부에 자석을 넣는 방식 대신 그림 1과 같이 하베스팅 소자에 자성체를 삽입하여 그 크기를 줄인 에너지 하베스팅 소자를 제안한다. 즉, 반도체 공정을 이용하여 자성체 주위로 미세 패턴의 마이크로 코일을 감고 외부 자석을 이용하여 제안한 하베스팅 소자의 내부 자성체를 극성만 바꿔주어 미세 패턴들로부터 유도기전력이 발생하는 원리로서, 기존의 전자기 방식의 에너지 하베스팅 시스템과 다르게 코일 안으로 자석의 수직운동을 인가할 필요가 없어 그 크기를 줄이고 코일의 파손위험도 줄일 수 있는 장점을 갖고 있다.

그림 2는 미세반도체공정기술을 이용한 하베스팅소자의 제작공정을 나타낸다. 먼저 그림 2의 (a)와

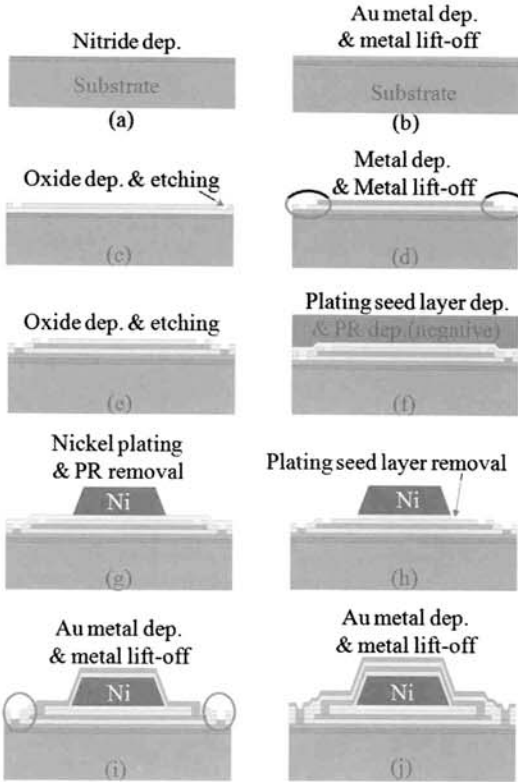


그림 2. 제안한 하베스팅 소자의 제작공정.
Fig. 2. Fabrication process flow of proposed energy harvesting device.

같이 발생하는 전류가 웨이퍼의 표면저항으로 인해 단락되는 것을 방지하기 위해 웨이퍼 표면에 Si_3N_4 절연층을 증착한다. 증착된 절연층 위에는 코일의 하단부 역할을 하는 금속층을 증착하고 Lift-off 방식을 이용하여 패턴을 제작한다[그림 2의 (b)]. 메탈 패턴이 제작되면 그 위에 다시 절연층을 증착하고 아래쪽 금속패턴과 절연체 상부에 형성될 금속패턴과의 연결부분(via hole)을 식각한다[그림 2의 (c)]. 그 위에 다시 금속패턴을 형성시키고 절연층(oxide layer)을 증착시킨 후 도금을 위한 시드층(seed layer)을 증착한다[그림 2의 (d)~(f)]. 그 후 금속층 위에 네거티브 PR(negative photoresist)를 도포하고 노광량을 조절하여 큰 언더컷(undercut)을 형성시킨다. 형성된 공간에는 자성체(Ni 혹은 Co)를 도금하고 PR과 시드층(seed layer)을 제거한 후[그림 2의 (g), (h)] 도금된 자성체 위의 패턴이 단락되는 것을 방지하기 위해 절

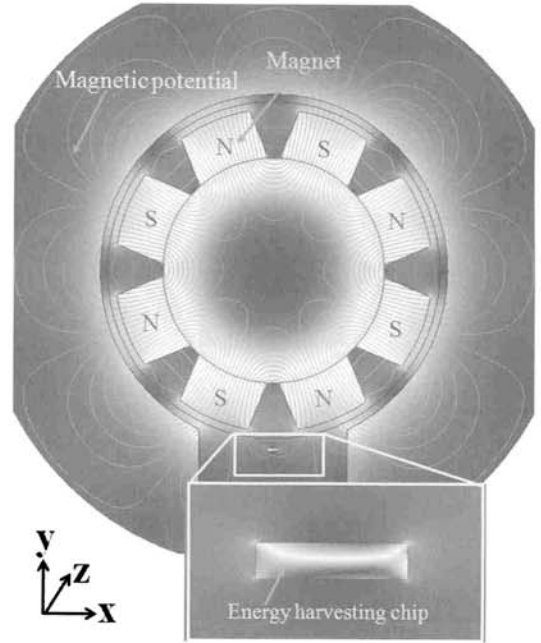


그림 3. 시뮬레이션을 위한 설계 구조.
Fig. 3. Geometry design for computer simulation.

연층 증착과 금속 패턴 형성을 반복적으로 진행하여 아래쪽 금속 패턴과 코일의 상단부 역할을 하는 금속패턴을 연결시킨다[그림 2의 (i), (j)]. 위와 같은 공정을 진행하여 2층 구조의 마이크로 코일을 형성시킬 수 있으며, 필요에 따라 위와 같은 공정을 반복하여 다층으로 마이크로 코일의 감은수를 늘릴 수 있다.

3. 제안한 하베스팅 소자의 효율분석

3.1 모형을 위한 관계식 정의

제안한 에너지 하베스팅 소자의 유효성 및 소자의 크기에 따른 발전용량을 평가하기 위해 본 논문에서는 상용프로그램인 Comsol社의 Multiphysics를 이용하여 유한요소법을 통해 미세구조물의 동역학 관계를 모형화하였다. 분석을 위한 환경은 그림 3에 나타난 바와 같이 제안한 하베스팅 소자의 외부에 8개의 극성(pole)을 갖는 자석을 회전자(rotor)에 부착하고 자석의 회전운동을 통해 하베스팅 소자 내부의 자성체 극성을 바꿔주는 구조로 설계하였다.

통상 전자기유도를 이용하는 발전기의 전압은 아래와 같은 패러데이의 법칙(Faraday's law)을 따른다[10].

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

이때, N , Φ 및 ϕ 는 각각 코일의 권선수, 총쇄교자속 및 코일의 회전당 평균자속을 나타낸다. 이때, Φ 는 식 (2)와 같이 코일의 각 권선당 자속밀도(magnetic flux density) B [T]를 자속밀도가 작용하는 코일의 면적에 대해 적분한 후 이 값에 코일의 권선수를 곱하여 총쇄교자속을 구할 수 있다.

$$\Phi = \sum_{i=1}^N \int_{A_i} B \cdot dA \quad (2)$$

이때, 자속밀도가 코일의 전면에 대해 균일하다고 가정하면 적분식은 간단한 곱의 식으로 변형 가능하며 따라서 식 (1)과 식 (2)을 이용하여 발전기에 유도되는 전압의 크기는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$V = -NA \frac{dB}{dt} \sin(\alpha) \quad (3)$$

또한, 소자 내부의 자성체는 식 (4)와 같이 자속밀도 B 와 자계강도(magnetic field intensity) H [A/m]와의 관계식으로 표현할 수 있다.

$$B = \mu_0 H + M = \mu_0 (H + \chi H) = \mu_r \mu_0 H \quad (4)$$

여기서, μ_0 는 자기투자율(magnetic permeability), μ_r 는 자성재료의 비투자율(relative permeability), M 은 내부 자기화(internal magnetization), χ 는 자화율(magnetic susceptibility)을 나타낸다.

유한요소법을 이용한 분석도구인 Multiphysics 에 그림 3과 같이 제안한 에너지 하베스팅 소자와 외부운동에너지 발생환경을 구조적으로 설계하여 정의하고 관련수치들을 입력하게 되면 Multiphysics 에서는 자기유도에 따른 전계의 세기를 내부적으로 계산한다. 이때 발전 소자에서 발생하는 전압은 식 (5)와 같이 자성체의 자화에 따른 전계강도(electric field intensity)의 세기와 감은 도선에 따른 관계식으로 표현할 수 있다.

$$V_i = \sum_{i=1}^N \frac{L}{A} \int E_z dA \quad [V] \quad (5)$$

여기서, E_z 는 z 방향에 대한 전계강도의 크기이며(그림 3 참고), L 은 도선의 길이, A 는 도선의 면적을 각각 나타낸다.

발전기에서 발생하는 전력의 크기를 구하기 위해서 발전기의 부하단에 로드임피던스 R_L 이 연결되었다고 가정하면 식 (6)과 같이 코일 임피던스(impedance)와 로드 임피던스 그리고 미세 패턴의 인덕턴스의 관계식으로 표현할 수 있다.

$$P_{em} = \frac{V^2}{R_L + R_C + j\omega L_C} \quad (6)$$

여기서, R_L 은 로드 임피던스이며, R_C 는 코일의 저항성분, 그리고 L_C 코일의 인덕턴스 값을 각각 나타낸다.

이때 최대발생전력을 얻기 위해서 내부 임피던스($R_C + j\omega L_C$)와 로드단 임피던스(R_L)가 공역정합(conjugate matching)되었다고 가정하면 하베스팅 소자로부터 발생하는 최대전력은 식 (7)과 같다.

$$P_{max} = \frac{V^2}{2(R_C + j\omega L_C)} \quad (7)$$

본 논문에서 목표하는 하베스팅 소자의 크기는 $15 \times 15 \times 1 \text{ mm}^3$ 이며, 이때 미세패턴이 감긴 자성체의 단면적은 $15 \times 1 \text{ mm}^2$ 인 직사각형 모양이 된다. 이 경우 미세패턴의 인덕턴스는 식 (8)와 같이 감은수와 자성체 면적, 미세패턴의 면적의 관계식으로 표현할 수 있다[11].

$$\begin{aligned} L_{rect} \approx & N^2 \frac{\mu_0 \mu_r}{\pi} [-2(W+h) \\ & + 2\sqrt{h^2 + W^2} - h \ln(\frac{h + \sqrt{h^2 + W^2}}{W}) \\ & - W \ln(\frac{W + \sqrt{h^2 + W^2}}{h}) + h \ln(\frac{2W}{a}) \\ & + W \ln(\frac{2h}{a})] \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, N 은 감은수, W 는 자성체의 너비, h 는 자성체의 높이, a 는 미세패턴의 반지름, μ_r 는 매질의 비투자율(relative permeability)을 각각 나타낸

다. 본 연구에서는 편재형 컴퓨팅의 응용을 위해 사용자가 인지하지 못하는 상황에서 휴대형 혹은 인체착용형기에 전원공급을 목적으로 한다. 따라서 사용자의 걸음걸이나 움직임 등 상대적으로 낮은 주파수를 갖는 운동에너지를 이용해야하는 상황이다. 이때, 제한한 에너지 하베스터의 코일 인덕턴스값은 그 저항값에 비해 상대적으로 무시할 수 있을 만큼 작게 나타난다.

3.2 모형화 틀을 이용한 효율 분석

본 장에서는 제안한 에너지 하베스팅 소자의 구조 및 효율 검증을 위해 유한요소해석용 컴퓨터 분석 도구(COMSOL Multiphysics)를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 제안한 하베스팅 소자의 모형화를 위한 실험 조건은 표 1과 같으며, 하베스팅 소자의 면적(자성체의 크기)을 3~21 mm²까지 총 7가지(3×3 mm², 6×6 mm², 9×9 mm², 12×12 mm², 15×15 mm², 18×18 mm², 21×21 mm²) 크기로 변화시켰으며, 이때 자성체 두께는 1 mm로 고정하였다. 회전하는 회전자에 8개의 서로 다른 극성을 갖는 자석을 1분에 60번 회전시키면서 하베스팅 소자 내부의 자성체 극성을 1초에 8번(8 Hz) 변화시켰으며, 이때 자화된 자성체 내부의 자속밀도는 균일하다고 가정하였다. 자석과 에너지 하베스팅 소자와의 거리는 5 mm이며, 회전하는 자석의 자속밀도는 0.84~1.54 T까지 0.1 T씩 증가시키면서 에너지 변환 효율을 분석하였다. 제안한 하베스팅 소자의 코일구조를 형성하는 금속 패턴 폭은 10 μm, 두께는 1 μm, 그리고 감은수는 6,000회로 정의하였다. 위와 같은 조건으로 자속밀도 1.34 T에서의 발생전압 모형화를 진행한 결과 그림 4와 같이 정현파(sine curve) 형태의 교류전압이 주기적으로 발생되며, 가장 작은 소자(자성체 크기) 3×3 mm²에서 정현파 최대 피크 0.51 V의 전압이 발생되었다. 이때 실효값 V(eff)는 0.36 V이다. 또한 소자크기가 21×21 mm²인 경우 0.06 sec에서 정현파의 최대 피크값 18.0 V가 발생되었으며, 이때의 실효값 V(eff)는 약 12.73 V가 발생되는 결과가 나왔다. 그림 5는 자속밀도와 하베스팅 소자크기에 따른 발생전력의 관계를 나타낸 그림이다. 예상한 바와 같이 하베스팅 소자의 크기(자성체의 크기)가 크고 자속밀도가 클수록 발생전력이 증가함을 알 수 있다. 단 이들의 관계는 선형적이지는 않았고 하베스팅 소자의 크기가 커질수록 자속밀도의 증가분에 대한 영향이 더 크게 나타나는 것으로 나타났다.

표 2[10]는 본 연구에서 제안한 에너지 하베스터의 성능을 포함하여 과거부터 2008년까지 개발된 전자기유도 에너지 하베스터의 비교성능을 나타낸

표 1. 성능분석을 위한 모형 변수.

Table 1. Modeling parameters for performance analysis.

| Parameters | Values | Units |
|--|---|-----------------|
| Transducer dimension (width×length×height) | 3a _n ×3a _n ×1 (a _n =1~7) | mm ³ |
| (Target size) | 15×15×1 | mm ³ |
| Pattern size | 10×1 | μm ² |
| Magnetic substance thickness | 0.8 | mm |
| Magnetic flux density | 0.84~1.54 | T |
| Coil material | Copper | |
| Number of turns | 6000 | turn |

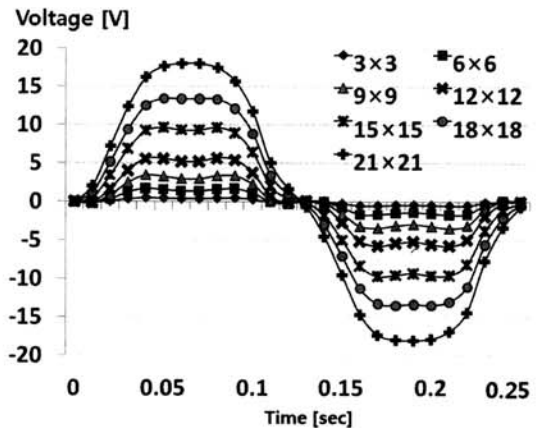


그림 4. 소자크기에 따른 발생전압크기.

Fig. 4. Effect of transducer size on generated output voltage.

다. 본 논문에서 제작목표로 하는 15×15 mm 크기의 에너지 하베스팅 소자에 대해 유한요소법을 이용한 분석결과, 자속밀도 1.34 T에서 약 991.5 μW의 최대전력이 발생되는 것을 알 수 있었다. 이 값을 표 2에 나타난 타 연구결과와 직관적으로 비교하기에는 각 설계요소 및 측정환경이 상이하여 불가능하지만 대체적으로 볼 때, 본 논문에서 제안한 에너지 하베스터는 그 크기뿐만 아니라 발생전력 수치를 볼 때 충분히 경쟁력을 갖고 있다고 보여진다. 또한 타 연구결과에 비해 외부 운동에너지의 발생주파수가 매우 낮은 상태에서 동작 가능하므로 휴대용 기기에 응용되어 걸음걸이 및 움직임 등 자연스러운 신체활동에 따른 운동에너지를 활용할 수 있다는 장점을 가질 것으로 본다.

표 2. 발전기 면적 및 외부운동에너지 주파수에 따른 발전량의 비교 요약[10].

Table 2. Performance comparison of several research results on electromagnetic power generator.

(*: Estimated value from literature, **: simulated value)

| Reference | Year | P(μ W) | F(Hz) | Volume (cm ³) |
|---|-------------|--------------|-------------|---------------------------|
| Shearwood - Sheffield University(UK) | 1997 | 0.3 | 4,400 | 0.025 |
| Mizuno - Warwick University(UK) | 2003 | 0.0004 | 700 | 2.1* |
| Kulah - Michigan University(US) | 2004 | 0.004 | 25 | 2 |
| Glynne-Jones - University of Southampton(UK) | 2004 | 2,800 | 2,800 | 3.66 |
| Scherrer - Boise State University(US) | 2005 | 7,000** | 35 | 9 |
| Sari - Middle East Technical University(Turkey) | 2007 | 0.5 | 3,300~3,600 | 1.4 |
| Serrer - University of Barcelona(Spain) | 2008 | 55 | 380 | 0.8* |
| Perpetuum PMG-17 - UK company | 2008 | 1,000 | 100 | 135 |
| Feero Solutions VEH-360 - US company | 2008 | 430 | 60 | 250 |
| Proposed energy harvester by authors | 2009 | 991.5 | 8 | 0.225 |

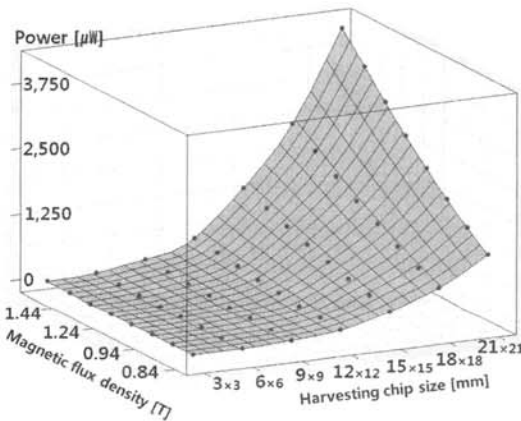


그림 5. 칩크기와 자속밀도에 따른 발생전력.

Fig. 5. Effects of magnetic flux density and transducer size on generated output power.

4. 결론

본 논문에서는 반도체 공정을 이용하여 자성체 주위로 미세 패턴의 마이크로 코일을 감고 외부 자석을 이용하여 하베스팅 소자 내부의 자성체 극

성을 바꿔주어 미세 패턴들로부터 유도기전력이 발생하는 에너지 하베스팅 소자에 대한 구조를 제안하였다. 그리고 유한요소법을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 미세구조물의 동역학 관계를 모형화하고 제안한 에너지 하베스팅 소자의 유효성을 검증하였다. 유한요소법을 이용한 분석결과 본 논문에서 제작목표로 하는 15 mm×15 mm 크기의 에너지 하베스팅 소자에 대해, 자속밀도 1.34 T에서 약 991.5 μ W의 전력이 발생되는 것으로 나타났다. 이는 타 연구결과와 비교할 때 그 크기와 발생전력뿐만 아니라 발생주파수 또한 매우 낮은 상태에서 동작이 가능하므로 휴대용 기기에 응용되어 걸음걸이 및 움직임 등 자연스러운 신체활동에 따른 운동에너지를 활용할 수 있다는 장점을 가질 것으로 본다. 또한 본 논문에서 제안한 하베스팅 소자는 MEMS 공정을 이용하여 제작하기 때문에 공간상의 제약 없이 감은 수를 늘릴 수 있고 크기와 모양에 따라 여러 개의 하베스팅 소자를 붙여서 사용할 수 있다는 장점이 있어 미세코일구조의 권선수를 향상시킨다면 RFID 센서 태그용 전원, 센서 노드 및 스마트 더스트용 전원 등의 다양한 편재형 컴퓨팅에 적용 가능하며, 마이크로 및 나노 로봇의 전원장치로도 활용이 기대된다.

감사의 글

본 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-313-D00561).

참고 문헌

- [1] F. Glynne-Jones, S. P. Beeby, and N. M. White, "Towards a piezoelectric vibration-powered microgenerator", *IEEE Proc.-Sci. Meas Technol.*, Vol. 148, No. 2, p. 68, 2001.
- [2] S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey, "A study of low level vibration as a power source for wireless sensor nodes", *Comput. Commun.*, Vol. 26, p. 1131, 2003.
- [3] X. Wang, J. Song, J. Liu, and Z. L. Wang, "Direct-current nanogenerator driven by ultrasonic waves", *Science*, Vol. 316, No. 5821, p. 102, 2007.
- [4] R. Amirtharajah and A. P. Chandrakasan, "Self-powered signal processing using vibration-based power generation", *IEEE J. Solid-state Circuits*, Vol. 33, No. 5, p. 687, 1998.
- [5] N. N. H. Ching, G. M. H. Chan, W. J. Li, H. Y. Wong, and P. H. W. Leong, "Pcb integrated micro generator for wireless systems", in *Intl. Symp. on Smart Structures and Microsystems*, p. 19, 2000.
- [6] S. Meninger, J. O. Mur-Miranda, R. Amirtharajah, A. P. Chandrakasan, and J. H. Lang, "Vibration to electric energy conversion", *IEEE Tran. VLSI Syst.*, Vol. 9, No. 1, p. 64, 2001.
- [7] S. Das, D. P. Arnold, I. Zana, J. W. Park, M. G. Allen, and J. H. Lang, "Microfabricated high-speed axial-flux multiwatt permanent-magnet generators - Part I: Modeling", *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 15, Iss. 5, p. 1330, 2006.
- [8] M. T. Penella and M. Gasulla, "A review of commercial energy harvesters for autonomous sensors", in *Proc. of Instrumentation and Measurement Technology Conf.(IMTC)*, p. 1, 2007.
- [9] O. Krovel and R. Nilssen, "Design and measurements on a small radial flux permanent magnet generator with concentrated coils", excerpt from the *Proc. of the 2006 Nordic COMSOL Conf.*, 2006.
- [10] Priya, Inman (Eds.), "Energy Harvesting Technologies", Springer, p. 130, 2009.
- [11] F. W. Grover, "Inductance Calculations", Dover Publications, p. 70, 2004.