

파력을 이용한 하이브리드 발전에 대한 연구

한기봉¹ · 이형우[†]

(원고접수일 : 2011년 6월 28일, 원고수정일 : 2011년 7월 12일, 심사완료일 : 2011년 9월 1일)

The Research of the Hybrid Power Generation using Ocean Wave

Ki-Bong Han¹ · Hyoung-Woo Lee[†]

요약 : 본 논문에서는 파도의 상하운동에 의해 발전되는 선형발전시스템과 진동발전시스템이 결합된 하이브리드 발전방법을 제안한다. 선형발전시스템은 권선과 영구자석으로 구성되어있고, 파도의 상하운동 속도를 직접적으로 사용하므로 파도의 주파수에 관계없이 안정적인 발전을 한다. 그리고 진동발전시스템은 진동시스템인 영구자석, 스프링과 발전시스템인 영구자석, 권선으로 구성되어 있다. 진동발전시스템은 파도의 주파수와 진동시스템의 고유진동수를 일치시킨 공진대역에서 구동함으로써 파도의 상하운동 속도보다 더 큰 속도를 이용하여 더 많은 전기에너지를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 하이브리드 파력발전방법은 공진영역에서 더 많은 전기에너지를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 공진영역을 벗어난 대역에서도 안정적으로 발전할 수 있는 장점을 가짐을 알 수 있다.

주제어 : 선형발전시스템, 진동발전시스템, 하이브리드발전, 고유진동수, 공진 주파수

Abstract: This paper described the hybrid power generation using ocean wave that consists of linear power generation system and vibrational power generation system. The linear power generation system is made up of the winding coil, the permanent magnet and it is performed stable generation regardless of the wave frequency using directly the ocean wave velocity. And the vibration power generation system consists of the winding coil, the permanent magnet and spring. When the vibration system natural frequency in the vibrational power generation system is tuned to the ocean wave frequency, the relative velocity of between the winding coil and the permanent magnet is faster than the velocity of ocean wave up and down motion, then we can obtain more the electric power. Therefore, in this paper, the proposed hybrid power generation using ocean wave have merits that obtaining the more electric energy in resonance frequency and carrying out stable generation even over the range of resonance frequency.

Key words: Linear power generation system, The vibration power generation system, Hybrid power generation, Natural frequency, Resonance frequency.

1. 서 론

최근 화석연료인 석유, 석탄, 기타에너지의 고갈 우려와 가격상승 및 환경오염에 대한 문제가 심각하게 대두되면서 신재생에너지를 이용한 발전에 관심이 크게 증대되고 있다. 신재생에너지는 태양 에너지, 풍력에너지, 해양에너지, 기타 여러 종류의

에너지가 있으며, 국가나 지역특성에 따라 이들을 적용하여 사용하고 있다. 특히 우리나라의 경우에는 3면이 바다로 둘러싸여 있어서 해양에너지가 풍부함에도 불구하고 아직 이를 이용하는 기술은 선진국에 비하여 많이 부족한 실정이다. 해양에너지를 이용하는 방법은 크게 조류발전과 파력발전

[†] 교신저자(부산대학교 기계기반융합부품소재인재양성센터, E-mail:leehwoo@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2598)

¹ 중원대학교 에너지자원공학부

으로 구분된다. 조류발전은 바닷물의 밀물과 썰물 때 바닷물의 흐름 즉 조수간만의 차이를 이용하여 발전하는 방법인 반면, 파력발전은 바닷물이 상하운동할 때 생기는 운동에너지를 이용하여 발전하는 방법이다. 파력을 이용하여 발전하는 방법에는 진동수주형 발전, 월파/월류형 발전, 가동물체형 발전이 있다. 진동수주형 발전방식에는 부유식, 고정식, 안벽형 등이 있는데, 이들은 각각 파도에 의해 발생하는 공기 챔버내의 물의 수위 변동으로 수위 상부에 있는 공기가 좁은 통로를 통과할 때 빠른 공기흐름을 이용하여 발전하는 방식이다[1-2]. 이는 파랑에너지를 공기유동에너지로 변환시킨 1차 에너지변환과 공기유동에너지가 다시 터빈을 회전시키는 2차 에너지변환과정을 거치기 때문에 에너지 손실이 크다는 단점을 갖는다. 월파/월류형 방식은 파랑의 진행방향에 경사면을 설치해 경사면을 타고 넘어오는 바닷물을 저수해두었다가 이 물을 이용하여 발전하는 방식이다[3]. 이 방식은 파도운동에너지가 특정 에너지수위 이상인 경우에만 사용 가능하다는 단점을 갖는다. 가동물체형 방법은 부유식과 잠수식으로 나누어지는데, 이는 파도에 의해 고정된 힌지를 중심으로 상하운동이나 피칭운동을 하는 부유구조물을 사용하는 가동물체형으로서 파랑에너지를 직접적으로 흡수하는 방식이다[4]. 이는 진동수주형이나 월파/월류형에 비해 에너지 변환효율이 높다. 그러나 바다표면에 설치해야 하기 때문에 많은 면적을 차지하는 단점을 갖는다. 최근에 이러한 단점을 보완하기 위하여 부표를 이용한 방식을 제안하였다[5]. 이는 부표를 바다표면에 띄우고 바다 밑바닥에 선형발전기를 설치하여 부표와 선형발전기를 연결시킨다. 이때 파도의 상하운동에너지는 부표를 상하운동 시키고, 부표의 상하운동은 부표 바로 밑 바다에 설치된 선형발전기를 왕복운동 시켜 전력을 발생한다. 그러나 이 역시 파도의 상하운동의 속도를 1:1비율로 활용한 방식이다. 이상과 같이 현재까지 개발된 파력발전 시스템은 파도로부터 공급받는 에너지에 비해 전기적 변환효율이 낮은 문제점을 가지고 있다.

본 연구에서는 이런 문제점을 극복하기 위해 부

표의 상하운동에 의해 발전되는 직선발전기와 진동발전기를 결합한 하이브리드 발전방법을 제안한다. 이는 바다표면에 부표가 떠 있고, 그 바로 밑 바다에 선형발전기와 진동발전기가 차례로 연결되어 있다. 선형발전기는 권선과 영구자석으로 구성되어 있으며, 파도의 상하운동속도를 1:1로 이용하여 발전한다. 또한 선형발전기 하부에 연결된 진동발전기는 진동시스템인 영구자석, 스프링 그리고 발전시스템인 영구자석과 권선으로 구성되어 있다. 진동발전기는 선형발전기로부터 전달되는 파도의 상하운동에너지를 받아 발전하게 되는데, 이때 파도의 주파수와 진동시스템의 고유진동수를 일치시킨 공진대역에서 구동함으로써 파도의 상하운동 속도보다 더 큰 속도를 이용하여 더 많은 전기에너지를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 공진 영역에서 더 많은 전기에너지를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 공진영역을 벗어난 대역에서도 안정적으로 발전할 수 있는 장점을 가지는 하이브리드 파력발전방법을 제안한다.

2. 파력 발전기의 수학적 모델

Figure 1은 하이브리드 파력발전기의 구조를 나타낸다. 하이브리드 파력 발전기는 바다표면에는 부표가 떠 있고, 부표 하부 바다 밑에는 부표와 연결된 선형발전기와 진동발전기가 결합된 하이브리드 발전기가 바다 밑 바닥에 고정되어 있다. Figure 1에서, V 는 부표의 부력을 결정하는 부피이고, 부표는 바닷물을 따라 상하운동하게 된다. 선형발전기는 스프링상수 K_L 을 갖는 복원 스프링과 질량 M 을 갖는 영구자석, 그리고 영구자석 주변에 권선으로 구성되어 있다. 부표와 연결시킨 영구자석은 부표의 상하운동에 따라 움직이고, 영구자석의 상하운동은 권선과의 상대운동을 일으켜서 권선내의 자기장의 변화에 의해 전기에너지를 발생하게 된다. 진동 발전기는 스프링과 영구자석 그리고 권선으로 구성되어 있다. 스프링은 직선발전기의 영구자석과 연결되어 있어서 선형발전기의 영구자석으로부터 스프링을 통하여 운동에너지를 공급받는다.

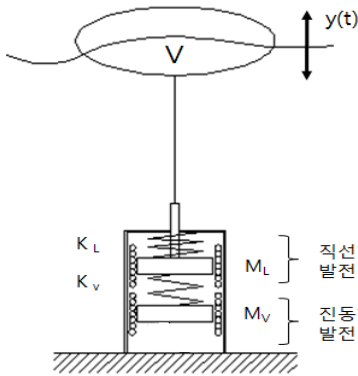


Figure 1: Hybrid wave power generation.

Figure 2는 선형발전기의 구성도를 나타낸다. 여기서 부력은 충분히 크다고 가정하면 선형발전기의 전압방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_L(t) = N_L B_L l_L \frac{dy(t)}{dt} \quad (1)$$

여기서 $V_L(t)$ 은 개회로에서 전압, N_L 은 자속의 영향권 내에 있는 권선 수, B_L 은 자속의 밀도, l_L 은 권선의 원주길, $y(t)$ 는 파도의 파형을 나타내며, 파도의 파형은 아주 복잡한 형태인 위치와 시간의 함수로 주어진다. 한편, 실제 해상에서의 파도는 완전한 비선형성을 지니는 관계로 보다 복잡한 형태의 파성분을 지닌 파의 외력에 대한 연구가 필요하다. 하지만, 본 연구에서는 직선발전기와 진동형발전기가 결합한 하이브리드 파력발전시스템의 우수성을 제안하는 것이 목적이므로, 본 논문에서는 위치를 고정시키고 시간의 함수만을 고려하였다. 또한 파형은 여러 가지 주파수 중에서 가장 큰 에너지를 가지는 한 가지 주파수만을 고려하였다. 파도 진동 스펙트럼의 연구[6-7]에 의하면, 파도의 큰 진동 주파수는 0.4~0.7Hz 범위 내에 있는 것으로 알려져 있다. 폐회로에서의 회로방정식으로 다음과 같다.

$$N_L B_L l_L \frac{dy(t)}{dt} - L_{CL} \frac{di_L(t)}{dt} - R_{CL} i_L(t) = v_{LL}(t) \quad (2)$$

여기서 L_{CL} 은 선형발전기의 리액턴스, R_{CL} 은 코일저항, $v_{LL}(t)$ 은 부하저항에서의 전압, $i_L(t)$ 은 회

로에 발생하는 전류를 나타낸다. 식 (2)에서 $v_{LL}(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$v_{LL}(t) = R_{LL} \int i_L(t) dt \Leftrightarrow i_L(t) = \frac{1}{R_{LL}} \frac{dv_{LL}(t)}{dt} \quad (3)$$

식 (3)을 식 (2)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$L_{CL} \frac{d^2 v_{LL}(t)}{dt^2} + R_{CL} \frac{dv_{LL}(t)}{dt} + R_{LL} v_{LL}(t) = R_{LL} N_L B_L l_L \frac{dy(t)}{dt} \quad (4)$$

식 (4)에서 R_{LL} 은 부하저항을 나타낸다.

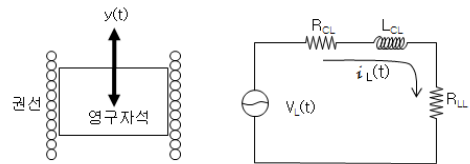


Figure 2: The schematic of linear generator.

Figure 3은 진동발전기의 개념도를 나타낸다. 여기서 진동방정식과 진동발전기의 회로방정식을 나타내면 다음과 같다[7-8].

$$M \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + C \frac{dz(t)}{dt} + Kz(t) + N_V B_V l_V i_V(t) = -M \frac{d^2 y(t)}{dt^2} \quad (5)$$

$$N_V B_V l_V \frac{dz(t)}{dt} - R_{CV} i_V(t) - L_{CV} \frac{di_V(t)}{dt} = v_{VL}(t) \quad (6)$$

식 (5), (6)에서 $z(t) = x(t) - y(t)$ 이고, M , C , K , $z(t)$, $y(t)$ 는 각각 진동발전기의 진동시스템을 구성하는 영구자석의 질량, 감쇠, 스프링상수 및 권선코일과 영구자석의 상대변위, 파도의 높이를 나타내며 N_V , B_V , l_V , R_{CV} , L_{CV} , $v_{VL}(t)$, $i(t)$ 는 각각 자속의 영향권 내에 있는 권선 수, 자속밀도, 권선의 원주길이, 권선코일의 저항, 권선코일의 리액턴스, 폐회로에서의 전압, 진동발전기에서 발생하는 전류의 값을 나타낸다. 식 (6)에서 $v_{CL}(t)$ 는 다음과 같다.

$$v_{VL}(t) = R_{VL} \int i_V(t) dt \Leftrightarrow i_V(t) = \frac{1}{R_{CL}} \frac{dv_{CL}(t)}{dt} \quad (7)$$

여기서 R_{CL} 은 부하저항이고, 식(7)을 식(5),식(6)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$M \frac{d^2z(t)}{dt^2} + C \frac{dz(t)}{dt} + Kz(t) + \frac{N_V B_V l_V}{R_{CL}} \frac{dv_{CL}(t)}{dt} = -M \frac{d^2y(t)}{dt^2} \quad (8)$$

$$N_V B_V l_V \frac{dz(t)}{dt} - \frac{R_{CV}}{R_{CL}} \frac{dv_{CL}(t)}{dt} - \frac{L_{CV}}{R_{CL}} \frac{d^2v_{CL}(t)}{dt^2} = v_{VL}(t) \quad (9)$$

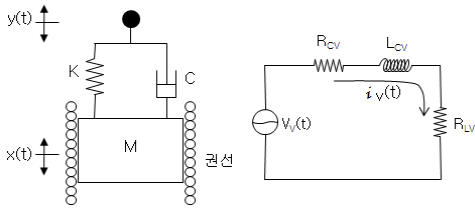


Figure 3: The schematic of vibration generator.

일반적으로 진동발전기에서는 외부에서 들어오는 에너지주파수와 진동시스템의 고유진동수가 일치할 때 진동발전기는 최대 출력을 가진다[9]. 또한 파도에 의한 주파수는 0.4~0.7Hz 성분이 큰 것으로 알려져 있다[6-7]. 따라서 본 연구에서는 파도가 갖는 주파수 중에 0.5Hz성분이 가장 큰 에너지를 갖는다고 가정하여 이를 기준으로 진동시스템을 설계하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 하이브리드 파력발전기의 특성을 살펴보기 위해서 파고를 0.5m로 고정시키고 파도의 주파수를 0.5Hz일 때 시뮬레이션을 수행하였다. Table 1은 하이브리드 파력 발전기에 사용한 시스템 매개변수를 나타낸다. 여기서 발전기의 성능을 비교하기 위해 선형발전기를 구성하는 시스템매개

Table 1: System parameters of hybrid power wave generator.

L_{CL}	18 H	L_{CV}	18 H
R_{CL}	86 Ω	R_{CV}	86 Ω
R_{LL}	175 Ω	R_{VL}	175 Ω
N_L	1,000회	N_V	1,000회
B_L	1.2T	B_V	1.2T
l_L	0.87m	l_V	0.87m

변수와 진동발전기를 구성하는 발전시스템의 매개변수를 동일하게 선정하였다.

또한 진동발전기 진동시스템의 고유진동수는 0.5Hz를 갖도록 시스템매개변수 M, C, K 을 Table 2와 같이 선정하였다.

Table 2: System parameters of vibration system.

M	20Kg
C	12.6 N-s/m
K	198 N/m

Figure 4는 하이브리드 파력발전기의 영구자석과 권선코일사이의 상대속도를 나타낸다. 선형발전기와 진동발전기의 부하저항(175Ω)이 있을 때, 진동발전기의 부하저항이 없을 때 영구자석과 권선코일사이의 상대속도는 각각 약 1.5m/sec, 약 6.8m/sec, 약 8.7m/sec임을 알 수 있다. 여기서 선형발전기보다 진동발전기의 권선과 영구자석사이의 상대속도가 큰 이유는 공진에 의한 것으로 사료된다.

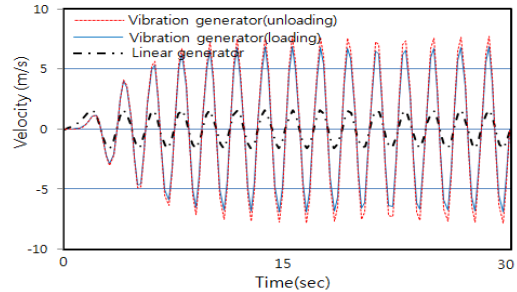


Figure 4: Relative velocity of permanent magnet to winding coil.

또한 진동발전기에서 부하저항이 유무에 따른 상대속도에 차이가 생기는 이유는 부하저항이 있을 때는 진동발전기에서 발생된 전류가 회로를 따라 흐르기 때문에 식 (5)에서와 같이 전류는 역기 전력을 발생시키고, 발생된 역기전력은 영구자석과 권선사의 상하운동을 방해하는 것으로 사료된다. Figure 5는 무부하일 때 하이브리드 파력 발전기를 구성하는 선형발전기와 진동발전기의 양단에 걸리는 전압을 나타낸다. 선형발전기와 진동발전기의

양단에 걸리는 최대 전압은 각각 $36 V_{pp}$, $180 V_{pp}$ 임을 알 수 있다. 이는 Figure 4에서 보는 바와 같이 공진 대역에서의 진동발전기는 권선과 영구자석사이의 상대속도가 크기 때문에 Faraday 법칙에 의하여 큰 유도기전력이 발생한 것으로 사료된다.

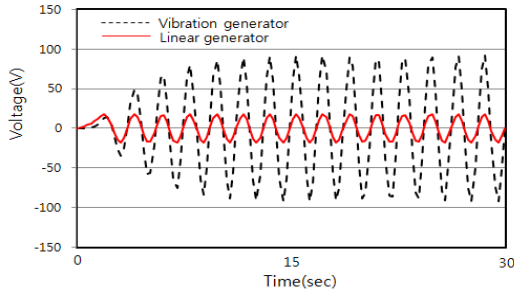


Figure 5: Voltage of open circuit.

Figure 6은 하이브리드 발전기를 구성하는 선형발전기와 진동발전기에 부하저항을 연결했을 때 각각의 부하저항에 걸리는 전압을 나타낸다. 여기서 선형발전기와 진동발전기에 연결된 각각의 부하저항에 걸린 최대 전압은 $22 V_{pp}$, $100 V_{pp}$ 임을 보여준다.

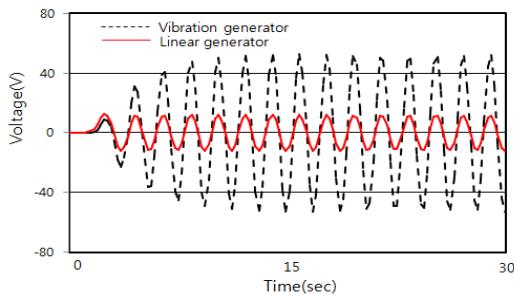


Figure 6: Voltage of close circuit with load resistance.

선형발전기는 식 (2)에서 보는 바와 같이 권선 양단에 부하저항(175Ω)을 연결시키면 영구자석과 권선의 상대운동에 의해 생성된 유도기전력에 의해 전류가 흐르게 된다. 이때 전류는 권선과 부하저항을 통과하면서 전압강하가 발생한 것으로 사

료된다. 또한 진동발전기는 식 (8)에서 보는 바와 같이 발전기에서 생성된 기전력은 권선과 부하저항에 전류를 흐르게 하고, 권선 내에 흐르는 전류는 역 기전력을 발생하여 권선과 영구자석사이의 상대속도를 줄일 뿐만 아니라 권선과 부하저항을 통과하면서 전압강하가 발생하게 되는 것으로 사료된다. Figure 7은 하이브리드 발전기를 구성하는 선형발전기와 진동발전기에 부하저항을 연결했을 때 각각의 회로에 흐르는 전류를 나타낸다. 여기서 선형발전기에서 발생하는 기전력에 의해 흐르는 최대전류는 $0.4 A_{pp}$ 인데 비해 진동발전기는 $1.8 A_{pp}$ 임을 보여 준다. 이는 Figure 4에서 보는 바와 같이 선형발전기에 비해 진동발전기가 4.5배 정도 빠른 속도로 구동되고 있기 때문에 큰 전류가 생성되는 것으로 사료된다.

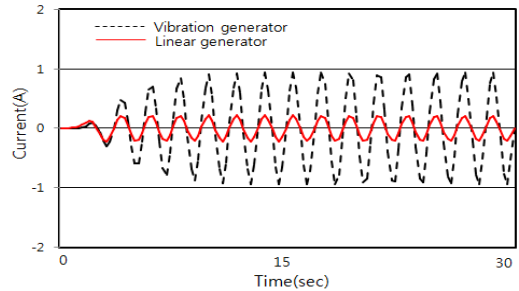


Figure 7: Current of close circuit with load resistance.

Table 2: Electric power according to the load resistance.

Load resistance(Ω)	Linear generator(W)	Vibration generator(W)
0	0	0
87	1.2	23.8
175	2.64	49.4
265	3.4	64.3
350	3.5	70
436	3.23	67.9
523	2.8	62.2
610	2.43	56.2
698	2	47.3

Table 2는 부하저항에 따른 전력곡선을 나타낸다. 여기서 부하저항이 증가함에 따라 전력이 증가하다가 350Ω에서 최대이고, 그 이상에서는 부하저항이 증가할수록 전력은 감소함을 보인다. 350Ω에서 선형발전기와 진동발전기의 출력 값은 각각 3.5W, 70W임을 알 수 있다.

여기서 진동발전기와 선형발전기의 출력이 큰 차이를 보이는 것은 운동에너지는 속도 제공에 비례하기 때문이라고 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 상하운동에 의해 발전되는 선형발전기와 진동발전기를 결합한 하이브리드 파력발전기를 제안하였다. 또한 하이브리드 파력발전기를 구성하고 있는 선형발전기와 진동발전기의 특성을 살펴보았다. (1) 기존의 선형발전기는 파도의 상하운동 속도 1.5m/sec, 그 자체를 이용하여 발전하지만 진동발전기는 파도의 상하운동 주파수와 일치될 때 권선과 영구자석사이의 상대속도는 파도의 상하운동 속도보다 훨씬 큰 6.8m/sec를 얻을 수 있었다. 이때 선형발전기의 발생전력은 최대 3.5W인데 비해 진동발전기는 70W로 크게 증가하였다. 이는 발전시스템을 구동시키는 에너지원인 운동에너지가 속도제공에 비례하기 때문이다.

(2) 선형발전기와 진동발전기를 결합한 하이브리드 파력발전시스템은 공진영역 근처에서는 큰 전력을 획득할 수 있을 뿐만 아니라 공진영역을 벗어난 주파수대역에서도 선형발전기에 의해 안정적으로 전력을 획득할 수 있음을 알 수 있었다.

따라서 본 논문에서 제안한 하이브리드 파력발전시스템은 향후 파력발전 시스템 연구에 크게 기여할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] 홍기용, 신승호, 홍도천, “진동수주형 파력발전장치 공기실의 파력에너지흡수율,” 한국해양환경공학회지, 제10권, 제3호, pp. 173-180, 2007.
- [2] 김성근, 박명규, “진동수주형 파력발전기의 흡수파력 추정에 관한 연구,” 한국박용기관학회지, 제15권, 제3호, pp. 31-38, 1991.
- [3] 류진, 현범수, 김길원, “포물선형 월류파력발전 장치에 대한 수치해석,” 한국해양환경공학회지, 제12권, 제4호, pp 273-278, 2009.
- [4] 신승호, 홍기용, “파력발전기술동향과 상용화의 길,” 대한토목학회, 제10권, 제5호, pp55-62, 2011.
- [5] Rafael Waters, “Energy from ocean waves full scale experimental verification of wave energy converter,” Digital Comprehensive summaries of Uppsala dissertations from the faculty of science and technology 580, 2008.
- [6] 홍명호, 김기영, “제주도 상시미동의 H/V 스펙트럼비 분석,” 지구물리와 물리탐사, vol. 13, no. 2, pp. 144-152, 2010.
- [7] Nibras Awaja, Dinesh Sood and Thurai Vinay, “Design and Analysis of electromagnetic micro generator,” As sensor & Transducers Journal, vol. 103, no. 4, April, pp. 109-121, 2009.
- [8] C.R. Saha, T. O'Donnell, N. Wang and P. McCloskey, “Electromagnetic generator for harvesting from human motion,” Sensor and Actuators A 147: Physical, pp. 248-253, 2008.

저 자 소 개



한기봉(韓奇奉)

1986년 부산대학교 기계설계공학과 졸업, 1997년 부산대학교 대학원 기계설계공학과(공학박사), 1994년 - 2000년 (주)대우전자(선임연구원), 2000년-2006년 (주)메카텍(대표이사), 현재 중원대학교 에너지자원공학부 교수



이형우(李炯佑)

1966년생, 1991년 부산대학교생산기계공학과졸업, 1999년 부산대학교 대학원 생산기계공학과 졸업(공학박사), 2007년~현재 부산대학교 기계공학부 기계기반융합부품소재인재양성센터 교수