

Original Articles

## 선형발전기가 탑재된 파랑에너지 추출장치 설계 II. 선형발전기

조일형<sup>1,†</sup> · 최장영<sup>2</sup>

<sup>1</sup>제주대학교 해양시스템공학과

<sup>2</sup>충남대학교 전기공학과

## Design of Wave Energy Extractor with a Linear Electric Generator Part II. Linear Generator

Il Hyoung Cho<sup>1,†</sup> and Jang Young Choi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Ocean System Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, Chungnam National University, DaeJeon 305-764, Korea

### 요약

선형발전기가 연결된 부이의 수직운동에 대한 시간영역 해석을 수행하여 얻은 시계열 자료를 가지고 선형발전기를 설계하고 전기에너지 출력특성 및 효율에 대해 살펴보았다. 1차 변환장치로 원통형 부이를 선택하였고, 2차 변환장치로 양측식 할박(Halbach) 배열 영구자석 가동자와 철심형 슬롯리스(Slotless) 고정자로 구성된 선형발전기를 사용하였다. 시간영역에서 부이의 수직운동 속도와 파랑하중을 입력자료로 직선형 영구자석 발전기가 설계되었고, 설계된 발전기는 규칙과 조건에서 유한요소 해석법을 적용하여 발전특성해석을 수행함으로써, 그 타당성이 입증되었다. 또한 불규칙과 조건에서 합리적이고 빠른 해석을 위해, 등가회로법을 적용하여 발전특성 해석을 수행하였는데, 그 결과 역시 매우 타당함을 확인하였다.

**Abstract** – Design procedure of LEG(Linear Electric Generator) is introduced by performing the time-domain analysis for the heaving motion of a floating buoy coupled with LEG. A vertical truncated buoy is selected as a point absorber and a double-sided Halbach array mover and cored slotless stator is adopted as a linear electric generator. LEG with a double-sided Halbach array mover and cored slotless stator is designed with the input data such as the heave motion velocity and wave exciting forces in time-domain. The validity of designed LEG is confirmed by performing generating-characteristic-analysis under the sinusoidal motion of a buoy, based on the numerical techniques such as FE(Finite Element) analysis. In particular, an ECM(Equivalent Circuit Method) is employed as the design tool for the prediction of generating characteristics under irregular wave conditions. Finally, we confirm that the ECM gives reasonable and fast results without sacrifice of accuracy.

**Keywords:** Wave Energy Converter(파력발전장치), Time-domain Analysis(시간 영역 해석법), Linear Electric Generator(선형발전기), Halbach Array Mover(할박 배열 가동자), Cored Slotless Stator(철심형 슬롯리스 고정자)

### 1. 서 론

파력발전은 주기적으로 운동하는 파의 위치 및 운동 에너지를 1차 가용에너지로 변환하는 1차 변환과정과 발전기 구동을 위한 에너지로 전환하는 2차 변환과정 그리고 발전기를 통한 전력 생산 단계인 3차 변환과정으로 구분할 수 있다. 변환 방식에 따라서는 2차 변환과 3차 변환이 하나의 변환 장치로 이루어지는 경우도 있다. 1

차 변환장치에는 파의 위치 및 운동에너지를 직접 이용하는가 혹은 다른 형태로 변환하느냐에 따라 가동물체형, 진동수주형, 월파·월류형으로 대별할 수 있다. 특히 가동물체형 파력발전장치는 파의 상하운동, 회전운동 등을 물체에 직접 전달하여 물체의 운동으로부터 에너지를 흡수하는 방식을 말한다(Budal and Falnes[1975]).

흡수된 에너지는 발전기를 통해 전기에너지로 변환되므로, 이에 대한 연구의 중요성 또한 증가하고 있다. 이중 영구자석 발전기는, 높은 에너지 밀도를 가지고 있는 희토류 자성체의 발전으로 인하여 보다 경량화, 소형화가 가능해지고, 보다 높은 효율을 가질 수

<sup>†</sup>Corresponding author: cho0904@jejunu.ac.kr

있는 등의 장점 때문에 다양한 용도로 사용되고 있다(Polinder *et al.*[2006]). 특히, 병진운동을 하는 기구에 선형발전기를 연결하면, 병진운동 에너지를 직접적 전기에너지로 변환할 수 있기 때문에, 기어와 같은 기계적인 변환장치에 대한 의존도를 제거할 수 있으며 지속적인 유지보수가 필요하지 않으므로 보다 높은 효율과 신뢰성을 확보할 수 있다(Amara *et al.*[2005]).

정리하면, 2,3차 변환장치로 주로 사용되고 있는 영구자석 선형발전기는 파랑에너지를 직접 전기에너지로 전환할 수 있는 장점을 가지고 있어 대부분 가동물체형 파력발전장치에는 이 방식을 채택하고 있다. 영구자석 선형발전기의 도입으로 생기는 파랑중 부유체의 동유체역학적 거동과 선형발전기의 전자기력 연성효과에 대한 이해가 필요하다. 수치계산과 모형실험에 의하면 둘 사이의 상호작용은 매우 복잡하며 단순히 발전기의 형상변화가 효율과 파워의 증가로 이어지지 않는다는 것이다. 따라서 가동물체의 운동특성에 함께 선형발전기의 전자기장의 해석을 위하여 유한요소 해석법을 이용한 시뮬레이션이 필요하고 둘 사이의 상호작용 특성(자기장 분포, 무부하 역기전력, Winding flux-자속, 전자력과 권선 인덕턴스 등)에 관한 연구가 요구된다. 현재 이 연구분야는 개발 초기단계이며 현재 해상감시 시스템과 같은 소형 발전장치부터 풍력발전과 연계한 대형 복합발전장치에 이르기 까지 다양한 파력발전장치에 대한 선형발전기 실증 연구 사업들이 활발히 추진되고 있다.

본 연구에서는 선형발전기가 연결된 부이의 수직운동을 시간영역에서 해석하였고, 이 결과를 이용하여 선형발전기의 설계과정을 살펴보았다. 1차 변환장치로 원통형 부이가 선택되었고, 2,3차 변환장치로 양측식 할박(Halbach) 배열 영구자석 가동자와 철심형 슬롯리스(Slotless) 고정자로 구성된 선형발전기를 사용하였다. 시간영역에서 부이의 수직운동방정식내의 충격응답함수를 수치적으로 구하는 방법을 소개하였고, 운동방정식을 Newmark  $\beta$  시간 적분법으로 풀어, 부이의 수직속도를 구하고 이를 입력 자료로 하여 직선형 영구자석 발전기를 설계하였다. 먼저 설계된 선형발전기는 규칙과 조건에서 유한요소 해석법을 이용하여 발전특성해석을 수행하였다. 더 나아가 부이가 불규칙파동에 뛰어 있을 때 합리적이고 빠른 해석을 위해, 등가회로법을 적용하여 발전특성 해석을 수행하였다.

## 2. 시간영역 해석

### 2.1 충격응답함수

시간영역해석법은 부유체의 천이운동이 중요하거나 비선형 하중 또는 계류력을 고려하기 위한 경우 주로 사용된다. 선형발전기와 부이가 연성되어 있을 때 시간영역에서의 부이의 수직운동에 대한 천이운동방정식은 다음과 같은 적미분 방정식(Integro-differential Equation)으로 표현된다(Cummins[1962]). 해석모델은 반경  $a$ , 흘수  $d$ 인 원통형 부이로 수심이  $h$ 인 수면 위에 떠 있다고 가정한다(Fig. 1 참조).

$$(m + a_{33}(\infty))\ddot{\zeta} + (b_{vis} + c_{PTO})\dot{\zeta} + \int_0^t K(\tau)\dot{\zeta}(t-\tau)d\tau + \rho g S z = F(t) \quad (1)$$

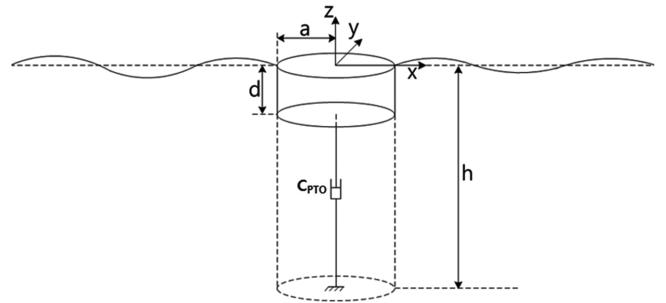


Fig. 1. Definition sketch of a WEC in waves.

여기서 웃첨자  $\cdot$ 는 시간미분을 나타내며,  $a_{33}(\infty)$ 는  $\omega \rightarrow \infty$ 일 때의 부가질량이다. 점성감쇠계수는  $b_{vis} = 2\rho g \kappa S / \omega_N$ 로 정의되며, 여기서  $S (= \pi a^2)$ 는 수선면적이다. 무차원화된 점성계수  $\kappa (= 0.053)$ 는 자유감쇠실험을 통하여 실험적으로 구한다.  $\omega_N$ 는 부이의 수직운동 비감쇠 고유주파수(Undamped Natural Frequency)이다.

$$\omega_N = \sqrt{\frac{\rho g S}{m + a_{33}(\omega_N)}}. \quad (2)$$

외력항  $F(t)$ 에는 선형파랑하중, 시간평균 표류력, 차진동수 표류력, 합진동수 파랑하중, 계류력, 비선형 감쇠력, 풍력, 조류력, 위치유지 장치에 의한 추진기력 등 모든 외력을 포함할 수 있다. 각 외력항은 외력의 특성에 따라 조화함수 중첩법이나 Volterra방정식에 근거한 콘볼루션(Convolution) 형태로 표시할 수 있다.  $K(\tau)$ 는 이전 시간의 운동이 현재시간의 운동에 미치는 영향을 나타내는 시간기억함수(Time Memory Function)로 충격응답함수(Impulse Response Function) 또는 지연함수(Retardation Function)라고도 한다. 충격응답함수  $K(\tau)$ 는 부가질량 및 방사감쇠계수의 Fourier역변환으로 구할 수 있으며 보통 방사감쇠계수를 역변환하여 구한다.

$$K(\tau) = -\frac{2}{\pi} \int_0^\infty (a_{33}(\omega) - a_{33}(\infty)) \omega \sin(\omega\tau) d\omega \\ = -\frac{2}{\pi} \int_0^\infty b_{33}(\omega) \cos(\omega\tau) d\omega \quad (3)$$

식 (3)에 주어진 수치적분을 효율적으로 수행하기 위하여 적분 구간  $(0, \infty)$ 내의 주파수  $\omega$ 를 일정한 간격  $N_w$ 개로 나누어 합하고 나머지 적분항을 포함시키면 충격응답함수는 아래와 같이  $N_w+1$ 개의 적분항들의 합으로 표현한다.

$$K(\tau) = \sum_{n=1}^{N_w} \Delta K_n(\tau) + K_\infty(\tau), \quad (4)$$

여기서

$$\Delta K_n(\tau) = -\frac{2}{\pi} \int_{\omega_n}^{\omega_{n+1}} b_{33}(\omega) \cos(\omega\tau) d\omega \\ K_\infty(\tau) = \frac{2}{\pi} \int_{\omega_{N_w+1}}^\infty b_{33}(\omega) \cos(\omega\tau) d\omega \quad (5)$$

먼저  $\Delta K_n(\tau)$ 를 수치적분 하기 위하여 구간  $(\omega_n, \omega_{n+1})$ 내에서 방사감쇠계수를 선형함수로 근사 시킨다.

$$b_{33}(\omega) \approx a_0 + a_1\omega, \omega_n \leq \omega \leq \omega_{n+1}, \quad (6)$$

여기서 1차 함수의 계수는

$$a_0 = \frac{b_{33}(\omega_n)\omega_{n+1} - b_{33}(\omega_{n+1})\omega_n}{\omega_{n+1} - \omega_n}$$

$$a_1 = \frac{b_{33}(\omega_{n+1}) - b_{33}(\omega_n)}{\omega_{n+1} - \omega_n}$$

이다. 방사감쇠계수 대신 구간( $\omega_n, \omega_{n+1}$ )에서의 근사식인 선형함수를 대입하여 적분을 수행하면  $\Delta K_n(\tau)$ 은 다음과 같다.

$$\Delta K_n(\tau) \approx \frac{2}{\pi} \int_{\omega_n}^{\omega_{n+1}} (a_0 + a_1\omega) \cos(\omega\tau) d\omega = a_0 P_0 + a_1 P_1, \quad (7)$$

여기서

$$P_0 = \frac{2}{\pi} \int_{\omega_n}^{\omega_{n+1}} \cos(\omega\tau) d\omega = \frac{2}{\pi} \left( \frac{\sin(\omega_{n+1}\tau) - \sin(\omega_n\tau)}{\tau} \right),$$

$$P_1 = \frac{2}{\pi} \int_{\omega_n}^{\omega_{n+1}} \omega \cos(\omega\tau) d\omega$$

$$= \frac{2}{\pi} \left( \frac{\omega_{n+1} \sin(\omega_{n+1}\tau) - \omega_n \sin(\omega_n\tau)}{\tau} + \frac{\cos(\omega_{n+1}\tau) - \cos(\omega_n\tau)}{\tau^2} \right)$$

마지막 적분항인 구간( $\omega_{N_w+1}, \infty$ )에서의 적분항은 해석적인 방법을 사용하여 구한다.  $\omega \rightarrow \infty$ 일 때  $b_{33}(\omega)$ 는 사라지므로 주파수영역( $\omega_{N_w+1}, \infty$ )에서의 방사감쇠계수의 근사식을  $\omega \rightarrow \infty$ 일 때 지수함수적으로 사라지는 함수로 근사시킬 수 있다. 또한  $\omega \rightarrow \infty$ 일 때,  $b_{33}(\omega) \rightarrow 0$  이므로  $\gamma$ 는 0보다 커야 하며,  $\omega = \omega_{N_w+1}$ 에서 방사감쇠계수와 그 미분값이 연속이라는 조건을 적용하면  $\alpha$ 와  $\gamma$ 를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$b_{33}(\omega) \approx \alpha e^{-\gamma(\omega - \omega_{N_w+1})}, \quad (8)$$

여기서

$$\alpha = b_{33}(\omega_{N_w+1}), \gamma = \frac{-1}{b_{33}(\omega_{N_w+1})} \frac{db_{33}(\omega_{N_w+1})}{d\omega}.$$

주파수영역( $\omega_{N_w+1}, \infty$ )에서 타당한 식 (8)에 주어진 방사감쇠계수의 근사식을 식 (5)에 대입하여 적분을 수행하면 다음과 같다.

$$K_\infty(\tau) \approx \frac{2}{\pi} \int_{\omega_{N_w+1}}^\infty \alpha e^{-\gamma(\omega - \omega_{N_w+1})} \cos(\omega\tau) d\omega$$

$$= \frac{2\alpha}{\pi} \left( \frac{\gamma \cos(\omega_{N_w+1}\tau) - \tau \sin(\omega_{N_w+1}\tau)}{\gamma^2 + \tau^2} \right). \quad (9)$$

식 (1)의 콘벌류션 적분(Convolution Integral)으로부터 얻어지는 메모리항은 앞에서 구한 충격응답함수를 가지고 사다리꼴 수치적분을 수행하면 아래와 같이 얻어진다.

$$I(t) = \left[ \int_0^t K(\tau) \dot{\zeta}(t-\tau) d\tau \right] = \sum_{i=1}^M K(i\Delta t) \dot{\zeta}(t-i\Delta t) \Delta t + \frac{1}{2} K(0) \dot{\zeta}(t) \Delta t. \quad (10)$$

식 (1)의 적미분방정식을 시간 적분하여 운동변위의 시계열은 구하는데 이 시계열을 Fourier해석하면 운동의 주파수 특성을 알 수 있다.

본 연구에서는 초기조건(부이의 위치와 속도)를 가지고 Newmark [1959]에 의해 제안된 Newmark's  $\beta$  방법을 사용하여 시간 적분하였다.

부이가 불규칙파중에 놓여 있을 때 선형파랑하중은 조화함수 중첩원리를 사용하여 파랑스펙트럼과 주파수영역에서 구한 파기진력으로부터 얻어진다(Cho and Kweon[2011]).

$$F_D(t) = \sum_{n=1}^{N_w} \left| \frac{X_n}{a_n} \right| a_n \cos(\omega_n t + \chi_n + \phi_n), \text{ with } a_n = \sqrt{2S_\zeta(\omega_n)\Delta\omega} \quad (11)$$

여기서  $S_\zeta(\omega)$ 는 파랑스펙트럼이며,  $\chi_n$ 는 범위  $[0, 2\pi]$  내의 난수를 뜻한다. 본 연구에서는 유의파고 3 m, 피크 주기 6.67초의 JONSWAP 스펙트럼을 사용하였다. ( $|X_n/a_n|, \phi_n$ )는 각각의 주파수에서 입사파의 진폭으로 나눈 부이에 작용하는 수직방향 파기진력의 절대값과 위상차를 나타낸다. 식 (1)을 수치적으로 적분하여  $\zeta(t), w(t)(=\dot{\zeta}(t)), a(t)(=\ddot{\zeta}(t))$ 가 구해지면 시간영역에서의 파력은  $P(t) = c_{PTO} \dot{\zeta}^2$  이다.

## 2.2 해석결과

Fig. 2는 반경이 2.0 m, 흘수가 5.0 m인 부이의 수직운동 충격응답함수를 시간에 따라 그렸다. 충격응답함수는 시간에 따라 급격히 줄어들어 5초를 지나 0에 수렴함을 보이고 있다. Fig. 3은 파고 3 m, 입사파의 주파수  $\omega$ 가 고유주파수( $\omega_N=1.26 \text{ rad/s}$ )와 같은 공진조건일 때 수직운동변위와 속도 그리고 파워의 시계열을 그렸다. 초기의 과도기 상태를 지나 짧은 시간내에 정상상태에 도달하고 있으며 매우 안정된 수치해석 결과를 보여주고 있다. 부이의 운동진폭은 대략 2.2 m로 공진조건일 때 입사파의 진폭 1.5 m 보다 약 1.5배 증폭한 것을 알 수 있다. 선형발전기를 부이에 연결하면 부이와 함께 움직이는 영구자석의 운동방향과 반대방향으로 작용하는 PTO(Power Take-Off) 감쇠력( $=c_{PTO} \dot{\zeta}$ )이 작용하므로 공진주파수에서 선형발전기를 연결하지 않았을 때 보다 증폭비가 줄어들었다. 또한 운동변위와 속도사이에는 시간지연이 일어남을 알 수 있다. 선형발전기를 통하여 추출할 수 있는 Fig. 3b의 파력의 시계열로부터 추출 가능한 최대파력은 약 80 kW이다.

Fig. 4와 Fig. 5는 부이가 유의파고 3 m, 피크 주기 6.67초인 불

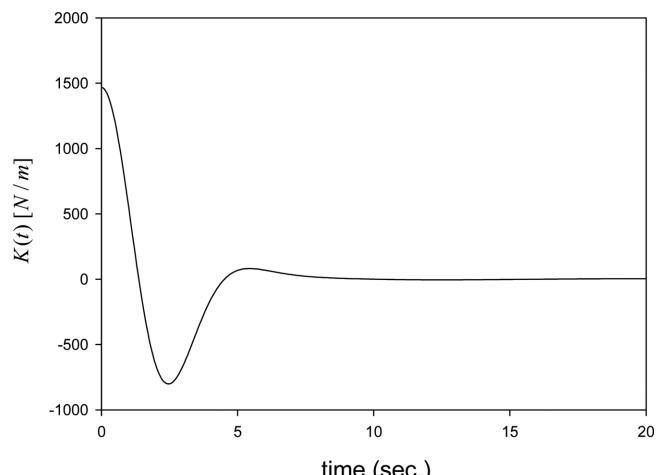


Fig. 2. Impulse response function for the heaving buoy.

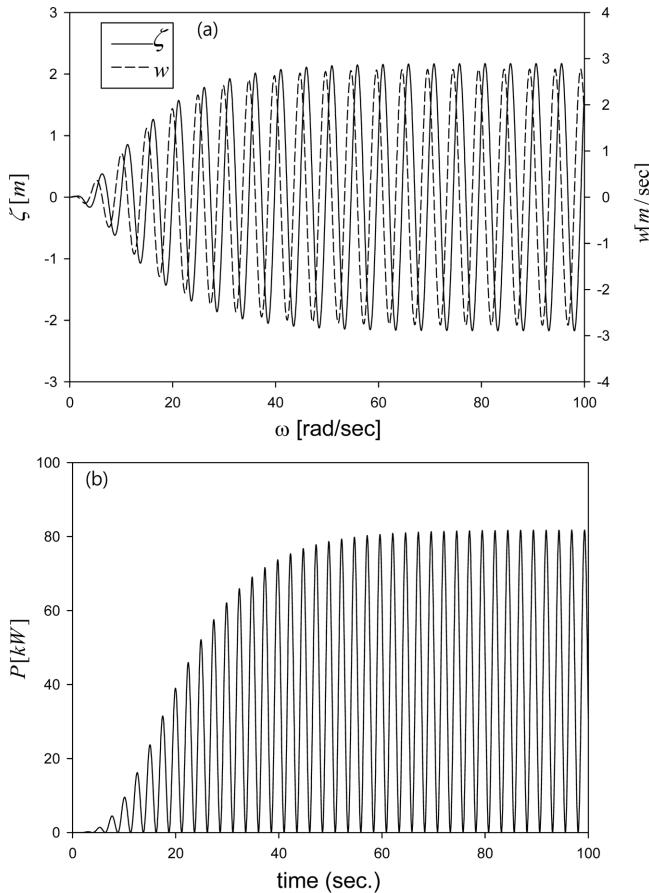


Fig. 3. (a) Heave motion and velocity and (b) extracted power records in regular waves ( $H=3.0$  m,  $T=6.0$  sec).

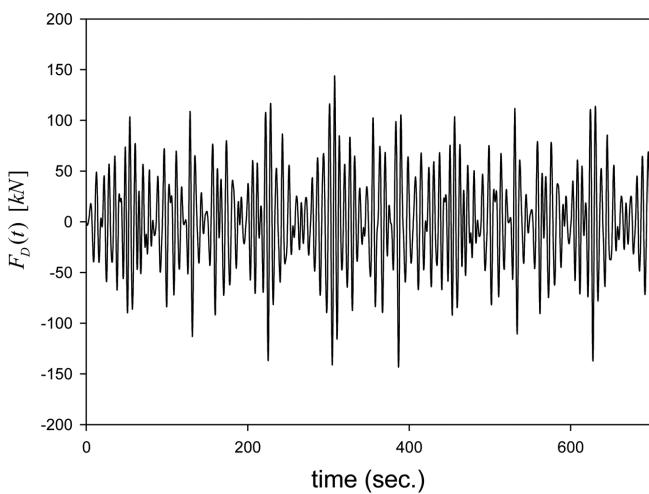


Fig. 4. Vertical wave load acting on a buoy in irregular seas ( $H_{1/3}=3.0$  m,  $T_p=6.67$  sec).

규칙파중에 놓여 있을 때 시간영역 해석법을 통하여 구한 파랑하중과 수직운동속도 그리고 추출 파워를 도시하였다. 이상의 시간영역 해석결과는 선형발전기 설계에 필요한 입력값으로, 3장에서 다룬 Halbach 배열 영구자석 가동자 및 철심형 슬롯리스(slotless) 고정자를 갖는 동기 선형발전기를 설계하는데 활용된다.

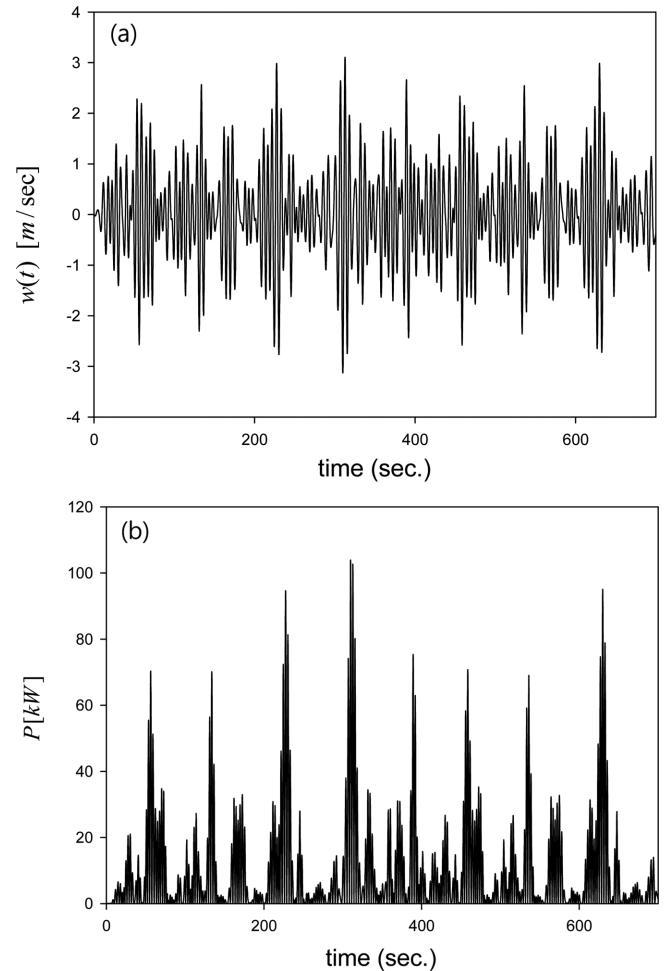


Fig. 5. (a) Heave velocity and (b) extracted power records in irregular seas ( $H_{1/3}=3.0$  m,  $T_p=6.67$  sec).

### 3. 선형영구자석발전기

#### 3.1 발전기 구조 및 설계사양

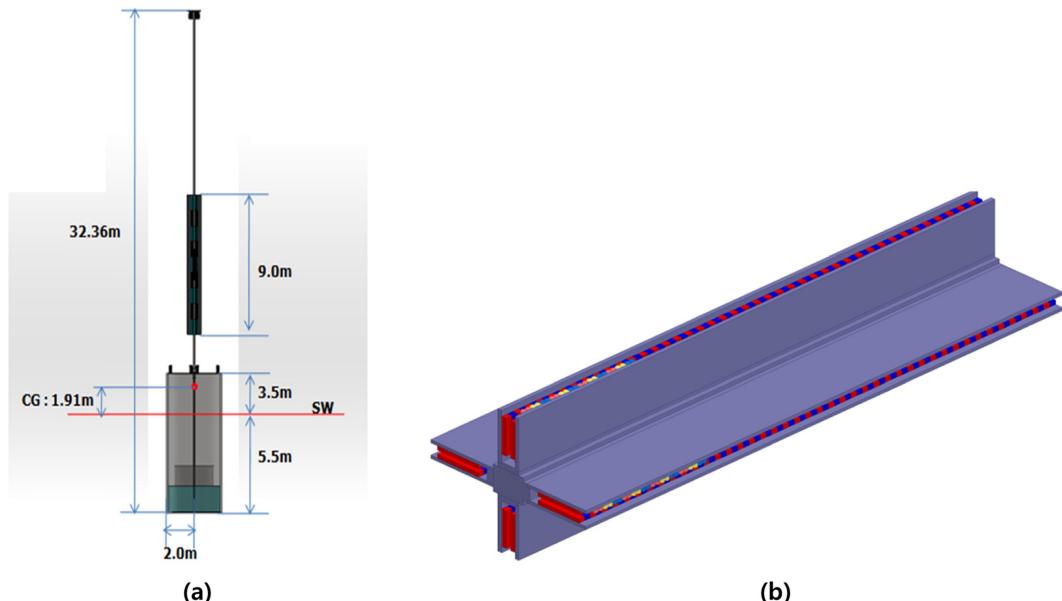
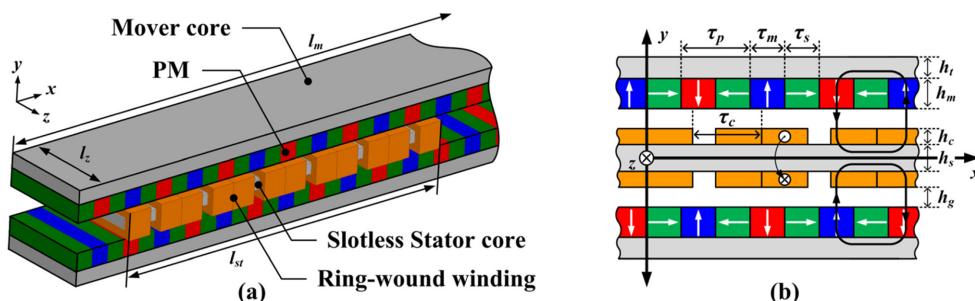
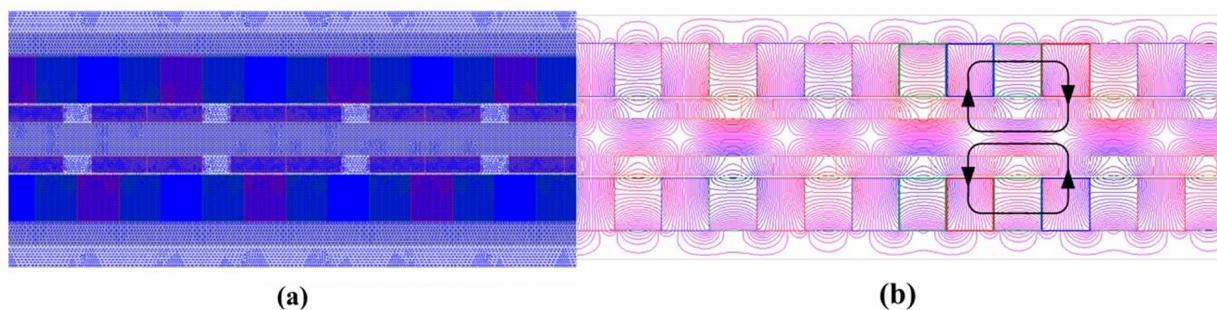
Fig. 6은 부이와 선형발전기의 결합도를 보여주고 있는데, 선형발전기는 4개의 동일한 발전기가 한 세트로 구성되어 부이와 체결되는 구조로 구성되었다. Fig. 7은 부이와 결합되는 발전기 세트를 구성하는 4개의 발전기중 1개의 세부 구조를 보여주고 있다. 발전기 구조는 양측식 할박(Halbach) 배열 영구자석 가동자와 철심형 슬롯리스(slotless) 고정자로 구성되었음을 알 수 있다. 자화 패턴을 할박 배열로 구성할 경우 장점은 수직 배열 자화와 비교하여 부피당 출력 밀도가 높은 컴팩트한 구조를 가질 수 있으며, 영구자석의 back-iron의 두께를 감소시켜 발전기의 무게 및 비용 절감이 가능하다는 것이다(Atallah and Howe[1988]). 또한 고정자의 구조를 슬

Table 1. Required and electrical parameters of linear generator

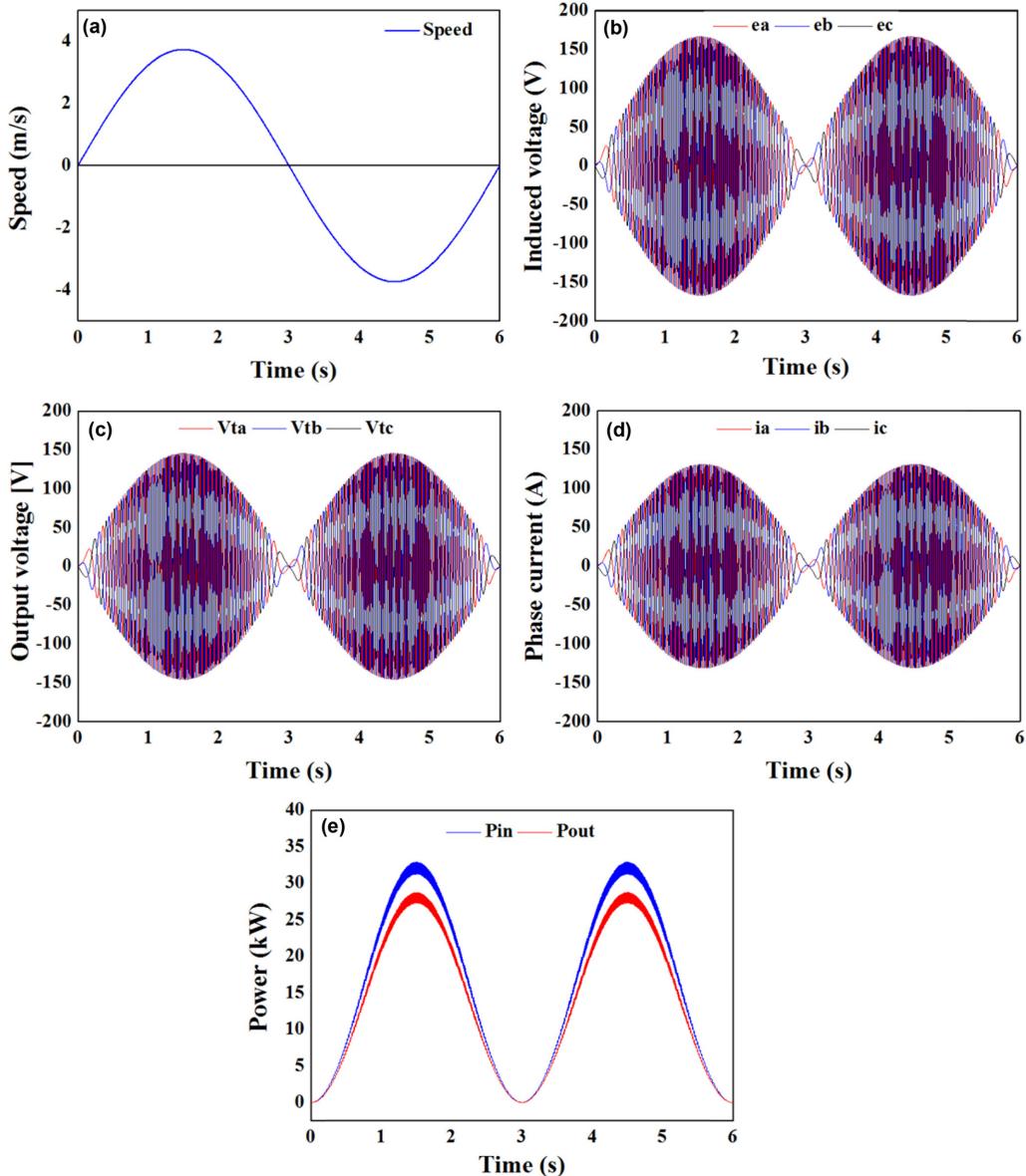
Parameter	Value	Parameter	Value
PTO damping	9590 [kg/s]	속도( $V_s$ )	3.73 [m/s]
발전기 입력( $P_i$ )	33.25 [kW]	발전기 출력( $P_o$ )	29 [kW]
효율	87.3 [%]	전류 밀도	2 [A/mm <sup>2</sup> ]

**Table 2.** Specification of analytic model

Parameter	Value	Parameter	Value
무버 길이( $l_m$ )	9000 [mm]	고정자 길이( $l_{st}$ )	2000 [mm]
극 간격( $\tau_p$ )	100 [mm]	코일 간격( $\tau_c$ )	50 [mm]
수직 자화 너비( $\tau_m$ )	50 [mm]	수평 자화 너비( $\tau_s$ )	50 [mm]
자석 두께( $h_m$ )	55 [mm]	코일 두께( $h_c$ )	20 [mm]
공극 두께( $h_g$ )	3 [mm]	무버 두께( $h_t$ )	30 [mm]
고정자 두께( $h_s$ )	40 [mm]	폭( $l_z$ )	270 [mm]
코일 당 권선수	8 [turn]	상 당 코일수	8 [coil]
상 저항	0.16 [ $\Omega$ ]	상 인덕턴스	0.7 [mH]

**Fig. 6.** Assembled buoy-generator system: (a) structure of system and (b) detailed view of linear generator.**Fig. 7.** The schematic of a linear synchronous generator with a double-sided Halbach array mover and cored slotless stator: (a) 3D view and (b) 2D view.**Fig. 8.** 2D Finite element analysis model: (a) Mesh plot and (b) magnetic flux line.

롯리스 코어드 타입으로 하여 발전기의 리플 성분 중 하나인 디텐트력(Detent Force)을 저감하였다. 고정자의 권선은 환상형(Ring-wound) 타입으로 하여 끝부분에서의 구리 사용량을 줄여 분포권과 비교하여 낮은 저항이 되도록 설계하였다. Table 1은 파력에너지 변환용으로 요구되는 부이의 출력 및 속도, 발전기의 출력 및 효율 등의 설계요구조건 및 제약조건을 나타낸다. 여기서 PTO 감쇠계 수와 부이의 운동속도로부터 발전기의 입력은 약 133 kW이나, 동일한 발전기 4개가 부이와 결합하므로, 발전기의 입력을 1개 기준

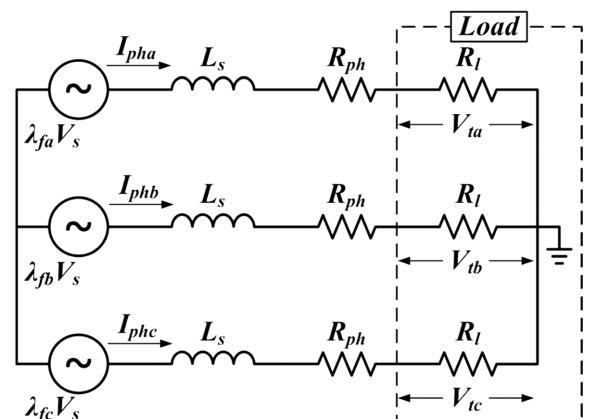


**Fig. 9.** Generating performance of the designed linear generator under sine wave speed conditions: (a) speed, (b) induced voltage, (c) output voltage, (d) phase current, (e) input and output power.

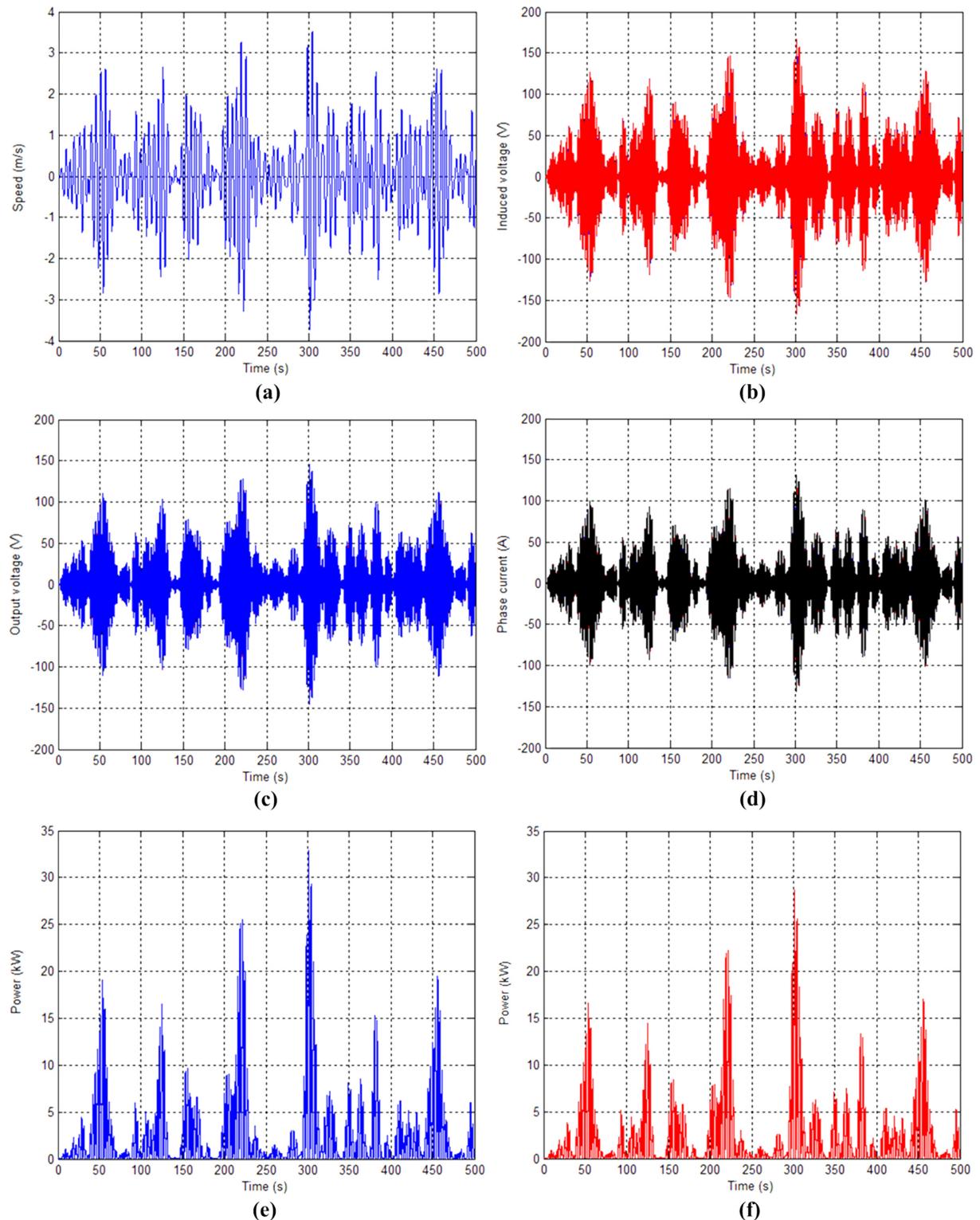
으로 선정하였음을 알 수 있다. Table 2는 Table 1의 요구조건에 부합하도록 설계된 선형발전기의 설계 사양으로 Fig. 8에 표시된 기호의 수치로 설명하고 있다.

### 3.2 해석결과

Fig. 8은 Table 2의 제시된 치수를 갖는 양측식 선형 영구자석 발전기의 유한요소 해석모델이고, Fig. 9는 Fig. 8의 해석모델로부터 얻은 발전특성을 나타낸다. Fig. 9(a)의 규칙파 속도 입력 조건에서 Fig. 9(b)의 3상 발전기전력, Fig. 9(c)의 3상 발전전압, Fig. 9(d)의 3상 발전류 및 Fig. 9(e)의 입/출력전력 해석결과를 얻었다. 이 해석결과는 발전기 4개 중 1개의 해석결과이다. 따라서, 발전기 4개가 직렬로 연결된다면, 해석결과는 단순히 전압 성분에는 4배를 곱



**Fig. 10.** Equivalent circuit of PMLSG.



**Fig. 11.** Generating performance of irregular speed: (a) speed, (b) induced voltage, (c) output voltage, (d) phase current, (e) input power, (f) output power.

하여 주고, 전류는 변함이 없기 때문에, 전력 역시 4배를 곱하여 주면 된다. 한편, Fig. 9(e)에서 알 수 있듯이 최고속도가 발생하는 구간 즉, 1.5초에서 2초사이에 최대 출력이 나타남을 알 수 있으며, 그 값 역시, Table 1에 제시된 요구조건에 부합함을 알 수 있다.

정현과 속도 입력조건에서의 발전특성해석 결과만으로도 발전기의 설계가 타당하게 이루어 졌음을 판단할 수 있다. 그러나, 실제 해상에서 부이의 운동은 불규칙적이므로, 이러한 불규칙한 조건 하에서, 얼마의 출력이 얻어질 수 있는 가에 대한 검토는 반드시 필

요하다. 그러나 서론에서도 명시하였듯이, 불규칙파 해석을 유한요소 해석법을 적용하여 수행하게 되면, 많은 해석시간과 해석해의 미 수렴으로 인한 계산 오류 등으로 인해, 해석의 부담이 가중된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 Fig. 10의 선형발전기 등가회로를 이용하여 불규칙파 속도 조건에서의 발전특성 해석을 수행하였다.

$$\lambda_f V_s = V_t + I_{ph} R_{ph} + j I_{ph} (2\pi f) L_s \quad (12)$$

$$V_t = \lambda_f V_s \frac{R_i}{\sqrt{(R_{ph} + R_i)^2 + (2\pi f L_s)^2}} \quad (13)$$

$$I_{ph} = \frac{\lambda_f V_s}{\sqrt{(R_{ph} + R_i)^2 + (2\pi f L_s)^2}} \quad (14)$$

$$P_i = \lambda_{fa} V_s \cdot I_{pha} + \lambda_{fb} V_s \cdot I_{phb} + \lambda_{fc} V_s \cdot I_{phc} \quad (15)$$

$$P_o = V_{ta} \cdot I_{pha} + V_{tb} \cdot I_{phb} + V_{tc} \cdot I_{phc} \quad (16)$$

Fig. 10으로부터 식 (12)~(16)의 발전특성 관계식을 얻을 수 있다[Cho[2007], Choi[2009]]. 식 (12)는 발전기 한 상(One Phase)의 발전전압 관계식을 나타내며, 식 (12)~(16)는 각각 발전상전압, 발전상전류, 입력전력 및 출력전력에 대한 관계식을 나타낸다. 여기서  $\lambda_f$ ,  $V_s$ ,  $V_t$ ,  $I_{ph}$ ,  $R_i$ ,  $R_{ph}$ ,  $f$ ,  $L_s$ ,  $P_i$ ,  $P_o$ 는 각각 영구자석에 의한 쇄교자속[V.m/s], 부이속도[m/s], 발전단자전압[V], 발전상전류[A], 부하저항[Ω], 발전기 권선 상 저항[Ω], 발전주파수[Hz], 권선 상 동기인덕턴스[H], 입력전력[W] 및 출력전력[W]이다. 특히, 영구자석에 의한 쇄교자속, 권선 상 저항 및 상 인덕턴스는 해석의 정확도를 높이기 위해, 유한요소 해석법으로부터 얻어진 값을 사용하였다.

Fig. 11는 부이의 불규칙한 운동조건에서 Fig. 10으로부터 얻어진 Table 2의 제원을 갖는 선형발전기의 발전특성 해석결과를 나타낸다. 즉, Fig. 11(a)의 불규칙한 속도 입력조건에서 Fig. 11(b)의 한상 발전기전력, Fig. 11(c)의 한상 발전전압, Fig. 11(d)의 한상 발전전류 및 Fig. 11(e) 및 (f)의 입/출력전력 해석결과를 얻었다. 이 해석결과는 Fig. 9의 결과와 동일하게, 발전기 4개 중 1개의 해석결과이므로, 발전기 4개가 직렬로 연결된다면, 입출력 전력에 4배를 곱하여 주면 부이와 결합된 전체 발전기의 출력을 유추할 수 있다. 한편, Fig. 11(f)에서 알 수 있듯이, 최고속도가 발생하는 구간 즉, 약 300초 부근에서 최대 출력이 나옴을 알 수 있으며, 그 값 역시, Table 1에 제시된 요구조건에 부합하며, Fig. 11(e)의 입력전력 역시 Fig. 5(b)에 제시된 부이의 출력과 그 크기와 패턴이 동일하다고 판단되어지기 때문에, 등가회로를 이용한 해석법이 해석시간 및 정확성 측면에서 타당하다고 판단할 수 있다.

## 5. 결 론

파랑중 선형발전기가 연결된 부이의 수직운동을 시간영역 해석법을 통하여 구하고, 이 결과를 선형발전기 시스템을 설계하는데 활용하였다. 최대 파워를 추출할 수 있는 최적조건( $c_{PTO}=b_{33}+b_{vis}$ )에서 파고 3 m, 주파수가  $\omega=\omega_N$  일 때의 규칙파와 유의파고 3.0 m, 피크

주기 6.67초인 불규칙파에서 수직운동 변위와 속도, 그리고 파워의 시계열을 구하였다. 시간영역해석 결과를 이용하여 직선형 영구자석 발전기가 설계되었고, 설계된 발전기는 규칙파 조건에서 유한요소 해석법을 적용하여 발전특성 해석을 수행함으로써, 그 타당성이 입증되었다. 특히, 불규칙파 조건에서 빠른 해석을 위해, 등가회로 법을 적용하여 발전특성 해석을 수행하였는데, 그 결과 역시 매우 타당함을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 해양수산부의 해양정정에너지개발사업 “10 MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 개발 및 인프라 구축”의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

- [1] Atallah, K. and Howe, D., 1988, “The application of Halbach cylinders to brushless AC servo motors”, IEEE Trans. Magn., Vol.34, No.4, 2060-2062.
- [2] Budal, K. and Falnes, J., 1975, “A resonant point absorber of ocean wave power”, Nature, Vol.256, 478-479.
- [3] Cho, I.H. and Kweon, H.M., 2011, “Extraction of wave energy using the coupled heaving motion of a circular cylinder and linear electric generator”, J. KSOE, Vol.25, No.6, 9-16.
- [4] Cummins, W., 1962, “The impulse response function and ship motions”, Schiffstechnik, Vol.9, 101-109.
- [5] Cho, H.W., 2007, “Characteristic analysis of high-speed PM synchronous motor considering power losses and SVPWM inverter”, Ph.D. Dissertation, Chungnam National University, Daejeon-city, Korea.
- [6] Choi, J.Y., 2009, “Characteristic analysis of direct-coupled permanent magnet wind turbine generator with single-phase full-bridge inverter”, Ph.D. Dissertation, Chungnam National University, Daejeon-city, Korea.
- [7] Polinder, H., van der Pijl, F.F.A., de Vilder, G.J. and Tavner, P.J., 2009, “Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines”, Ieee Transactions on Energy Conversion, vol.21, 725-733.
- [8] Newmark, N.M., 1959, “A method of computation for structural dynamics”, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.85 (EM3), 67-94.
- [9] Amara, Y., Wang, J.B. and Howe, D., 2005, “Analytical prediction of eddy-current loss in modular tubular permanent-magnet machines”, Ieee Transactions on Energy Conversion, vol.20, 761-770.

Received 4 April 2014

Revised 15 May 2014

Accepted 16 May 2014