


# A Study on Design of Linear Generator for Wave Energy Conversion Through Simple Design of Wave Energy System

파력발전시스템의 간이 설계를 통한 파력발전용 리니어 발전기 설계에 관한 연구

Hyunwoo Kim · Yeji Park · Hyungkwan Jang · Daehyeon Yang · Ju Lee · Sung-Hong Won

김현우\* · 박예지\* · 장형관\* · 양대현\*\* · 이 주\* · 원성홍†

## Abstract

In this paper, the design of linear generator for wave energy conversion is studied through wave energy system design. The wave energy system is designed through the mass and spring system. In the designed wave energy system, the specification of permanent magnet linear synchronous generator (PMLSG) is obtained using the principle of energy conversion. The basic design of PMLSG is performed considering the constraint of wave energy system considering the resistance load using the external circuit. Furthermore, the detent force of PMLSG is optimized using the parametric analysis. As a result, the PMLSG is designed considering the design of the wave energy system and optimization of the detent force.

## Key Words

Detent force, finite element analysis, linear synchronous generator, parametric analysis, wave energy system

## 1. 서론

최근 화석에너지의 고갈 및 환경 문제에 따라 태양광 발전, 해양발전, 풍력 발전 등과 같은 지구의 에너지 자원을 이용한 에너지 발전 방식에 대하여 연구가 진행되고 있다[1-3]. 이러한 에너지 발전 방식 중 지구의 3/4을 점유하고 있는 해양을 사용한 발전 방식이 관심을 받고 있다. 해양에너지 중 파력에너지는 높은 에너지밀도와 폭넓은 활용 가치 때문에 큰 경제적인 잠재력을 가지고 있다[4]. 또한, 파력 발전의 경우 날씨에 대한 불확실성에 가장 영향을 적게 받고 해상풍력과 통합하여 활용이 가능하며 소규모로 방파제로 활용할 수 있다. 이러한 이유 때문에 파력발전에 대한 투자가 커지고 있으며 파력발전시스템의 설계 및 제어 등의 다양한 연구가 진행되고 있다[4-6].

해양에너지를 통해 전기에너지로 변환하는 방법 중 해양의 상하운동을 이용한 방법이 주로 사용 된다[7]. 파력발전방식의 경우 해양에너지가 가지고 있는 주파수와 파력발전시스템의 공진주파수를 일치시키면 지속적인 운동과 고효율 발전이 가

능하다. 하지만 파동에너지를 고유주파수를 분석해야 하며 실시간으로 변화하는 파도에너지에 맞춰 주파수를 일치시키는 것은 어렵다. 또한, 파력발전시스템은 복잡한 유체운동을 가지고 있으므로 해석적인 방법으로 분석하는 것은 어려움이 따른다. 따라서 파력발전시스템의 간이모델에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 파력발전시스템의 간이 설계를 통해 파력발전용 리니어 발전기 설계에 대한 연구를 진행하였다. 파력발전시스템을 질량과 스프링으로 간략화 된 모델을 도출하였고 중력에 의해 주기운동과 역학적 에너지 및 에너지변환 원리를 이용하여 파력발전시스템을 설계하였다. 파력발전시스템의 주기운동은 파력에너지의 주파수와 공진이 되도록 질량과 스프링 계수를 설계하였다. 설계된 파력발전시스템과 운동에 대한 제약조건을 고려하여 파력발전용 리니어 영구자석 동기발전기(Permanent Magnet Linear Synchronous Generator, PMLSM)의 설계 사양을 도출하였고 유한요소해석을 통해 기초설계를 수행하였다. 리니어 영구자석 동기발전기에서 발생하는 디텐트력은 파력발전시스템의 주기운동을 방해하는 요소이다. 따라서 디텐트력을 최소화하기 위한 설계 변수를 선정하였고, 파

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Dongyang Mirae University, Korea.

E-mail: [sagewide@dongyang.ac.kr](mailto:sagewide@dongyang.ac.kr)  
<https://orcid.org/0000-0003-3517-4505>

\* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea.  
<https://orcid.org/0000-0003-4121-1851> <https://orcid.org/0000-0002-0095-2103>  
<https://orcid.org/0000-0003-3199-7141> <https://orcid.org/0000-0003-0251-6492>

\*\* Aron Energy Co., Ltd.  
<https://orcid.org/0000-0002-8891-3845>

Received : Nov. 30, 2020 Revised : Jan. 19, 2021 Accepted : Feb. 1, 2021

Copyright © The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

라메트릭 해석을 통해 디텐트력을 최적화하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 파력발전시스템 설계

일반적으로 파력발전시스템은 질량, 스프링, 댐퍼 시스템으로 등가화 할 수 있으나 유체역학에 의한 비선형과 복잡한 특성을 가지고 있다. 파력발전시스템의 경우 파력에 의해 지속적인 운동을 유지한다고 가정하면 그림 1과 같이 감쇄운동을 일으키는 댐퍼를 무시한 질량, 스프링 시스템으로 간소화할 수 있다. 외부의 파력에 의한 주기적인 운동을 지속적으로 유지한다고 가정하면 리니어 발전기의 외력은 중력만 존재하며 중력에 의한 진동운동이 이뤄진다. 따라서 파력발전시스템의 운동방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며 위치와 속도는 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = mg \tag{1}$$

$$x(t) = \frac{mg}{k} \left( 1 - \cos \sqrt{\frac{k}{m}} t \right) \tag{2}$$

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = g \sqrt{\frac{m}{k}} \sin \sqrt{\frac{k}{m}} t$$

여기서  $m$ 은 시스템 질량,  $k$ 는 스프링 상수,  $x$ 는 위치,  $g$ 는 중력가속도,  $v$ 는 속도,  $t$ 는 시간이다.

중력에 의한 위치에너지와 운동에너지, 탄성에 의한 위치에너지, 발전기의 발전에너지의 에너지변환 관계를 통해 설계할 수 있다. 중력에 의한 위치에너지와 운동에너지, 탄성에 의한 위치에너지의 경우 식 (2)에서 나타난 파력발전 시스템의 설계 변수들로 구할 수 있다. 반면, 발전기의 발전에너지는 역기전력을 통해 구할 수 있으며 리니어 발전기의 역기전력은 공극자속밀도와 파력발전시스템의 속도에 의해서 결정된다. 공극자속밀도는 극수와 주파수에 의해서 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_g = B_m \sin \frac{P}{2} \sqrt{\frac{k}{m}} t \tag{3}$$

여기서  $B_g$ 는 공극자속밀도,  $B_m$ 은 공극자속밀도의 최댓값,  $P$ 는 극수이다.

식 (2)와 식 (3)를 통해 파력발전 시스템에서 발생하는 역기전력(Back Electromotive Force, BEMF)은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$e = B_g L_{stk} v = E_m \sin \left( \frac{P}{2} \sqrt{\frac{k}{m}} t \right) \sin \left( \sqrt{\frac{k}{m}} t \right) \tag{4}$$

여기서  $E_m$ 은 역기전력의 최댓값이다.

그림 2는 파력발전시스템에서 발생하는 역기전력을 나타내며 극수에 의한 고주파수와 진동운동에 의한 기본 주파수에 의해서 발생하는 것을 알 수 있다. 파력발전시스템의 전력 특성을 분석하기 위해 발전기의 부하를 저항으로 가정하면 발전기에서 발생하는 전력은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

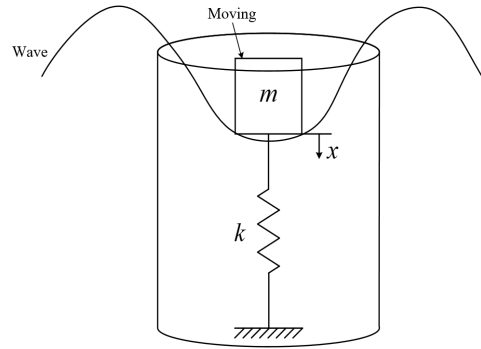


그림 1 파력발전시스템의 간이모델  
Fig. 1 The simple model of wave energy system

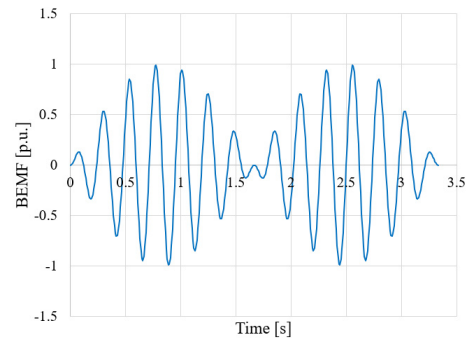


그림 2 파력발전시스템의 역기전력 파형  
Fig. 2 BEMF of wave energy system

$$P = ei = \frac{E_m^2}{R} \sin^2 \left( \frac{P}{2} \sqrt{\frac{k}{m}} t \right) \sin^2 \left( \sqrt{\frac{k}{m}} t \right) \tag{5}$$

여기서  $R$ 은 부하의 저항이다.

그림 3(a)는 한 상에서 발생하는 발전기의 전력을 나타내며, 그림 3(b)는 3상에 의한 발전기 전력을 나타낸다. 그림 3에서 알 수 있듯이 한 상에서 발생하는 전력의 최댓값과 3상에서 발생하는 전력의 최댓값은 1.5배 차이가 발생하는 것을 알 수 있으며 극수에 의한 고조파 성분들은 서로 상쇄됨을 알 수 있다.

그림 3(b)로부터 알 수 있듯이 파력발전시스템에서의 평균 발전에너지는 식 (6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$W_e = \langle P_e \rangle T = \frac{P_m}{2} T \tag{6}$$

여기서  $W_e$ 는 발전기에서 발생하는 에너지,  $\langle P_e \rangle$ 는 발전기에

서 발생하는 평균 전력,  $T$ 는 주기,  $P_m$ 은 발전기에서 발생하는 전력의 최댓값이다.

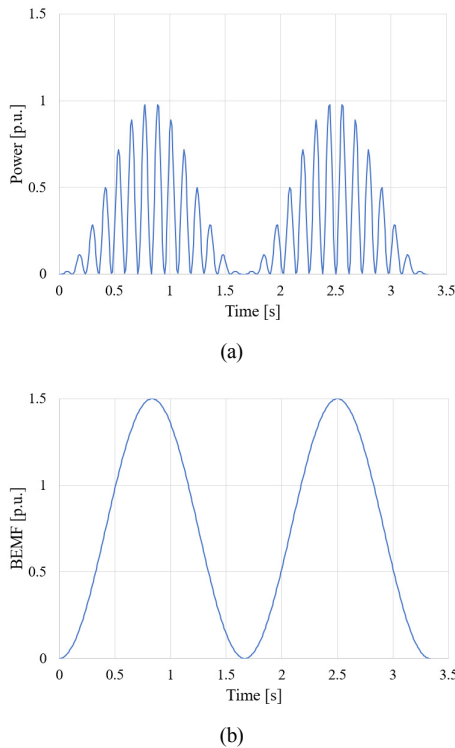


그림 3 파력발전시스템의 전력 파형 (a) 단상 (b) 3상  
Fig. 3 Power of wave energy system (a) single phase (b) three phase

식 (6)으로부터 알 수 있듯이 발전기 설계 용량의 2배 만큼의 최대 전력이 발생해야함을 알 수 있다. 발전기의 발전에너지는 중력위치에너지와 운동에너지에 의해서 발생한다. 지속적인 운동을 위하여 최대 운동에너지의 절반이 발전에너지로 변환된다고 가정하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (7)을 통해 발전에너지에 따른 파력발전시스템의 질량을 구할 수 있다.

$$W_e = \frac{1}{2} W_v$$

$$\frac{1}{2} \frac{1}{4} mgH = \frac{P_m}{2} T \tag{7}$$

$$m = \frac{4P_m T}{gH}$$

파력발전시스템의 주파수를 공진주파수로 설계하면 진동운동을 증폭할 수 있으므로 지속적인 진동운동이 가능하다. 따라서 가장 큰 파력에너지를 가지는 주파수에 대하여 식 (8)과 같이 스프링 상수를 구할 수 있다.

$$2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$k = 4\pi^2 m f^2 \tag{8}$$

표 1 파력발전시스템의 제약조건 및 설계 결과  
Table 1 Constraint and design result of wave energy system

항 목	값	단위
주파수	0.3	Hz
발전기 전력	5	W
파력발전시스템의 높이	500	mm
질량	27.21	kg
스프링 계수	96.68	N/m
최대 속도	1.56	m/s

표 2 파력발전용 리니어 발전기 사양  
Table 2 Specification of PMLSM for wave energy system

항목	값	단위
용량	5	W
주파수	0.3	Hz
리니어 발전기 속도	$0.47\sin(0.6\pi t)$	m/s

### 2.2 파력발전시스템 설계

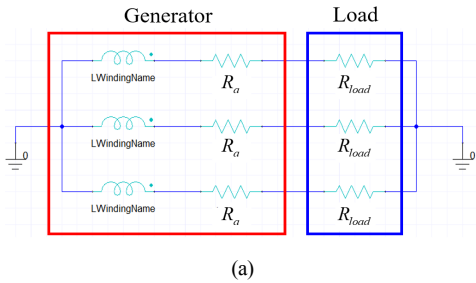
표 1은 파력발전시스템의 제약조건과 식 (2), (6), (7)을 이용한 파력발전시스템의 설계 결과를 나타낸다. 파력발전시스템의 여러 가지 주파수 중 0.3[Hz]에서 가장 큰 파력에너지를 가지고 있다[8]. 따라서 공진주파수를 0.3[Hz]로 파력발전시스템을 설계하였다.

표 2는 파력발전시스템 설계를 통해 도출한 파력발전용 리니어 발전기의 사양을 나타낸다. 50[cm]의 제한공간 내에서 0.3[Hz]로 진동 운동하므로 최대 속도는 0.47[m/s]이다. 표 1과 표 2에서의 최대 속도의 차이에 의한 운동에너지는 마찰력과 발전기에 의한 손실로 변환되는 것으로 볼 수 있다.

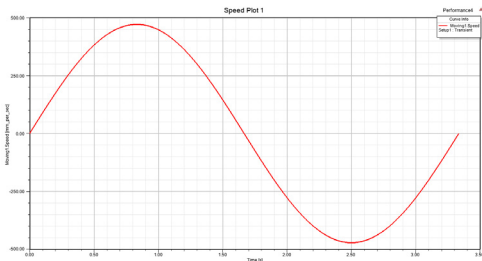
### 2.3 리니어 발전기 기초 설계

파력발전시스템의 설계와 동일한 조건으로 해석하기 위하여 부하는 간단하게 저항부하로 가정하여 설계하였다. 또한, 파력발전시스템의 속도 조건을 고려하여 주기운동을 하는 조건에서 리니어 발전기를 설계하였다. 그림 4는 발전기의 부하특성을 분석하기 위한 유한요소해석 조건을 나타낸다. 그림 4(a)는 부하특성을 해석하기 위한 외부회로를 나타내며, 그림 4(b)는 리니어 발전기의 속도를 나타낸다. 그림 5는 리니어 발전기의 FEM 모델을 나타내며 표 3은 리니어 발전기의 설계 제원을 나타낸다. 그림 6은 파력발전용 리니어 발전기의 유한요소해석 결과를 나타낸다. 그림 6(a)는 역기전력이며 그림 6(b)는 공극출력을 나타낸다. 파력발전시스템에서 리니어발전기가 진동 운동하므로 역기전력과 공극출력은 진동하는 특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 발전기의 출력은 공극출력과 동손의 차이이므로 동손을 고려한 출력 특성을 분석해야한다. 소형 발전기의 경우 동손이 크기 때문에 동손을 고려한 슬롯 설계가 필요하다. 그림 7은 동일한 점적률에 대하여 슬롯면적에 따른 출

력 특성을 나타낸다. 슬롯면적이 작을 경우 동손이 크므로 발전기의 목표 출력인 5[W]를 만족하지 못하는 것을 알 수 있다. 따라서 발전기의 출력 마진을 고려하여 슬롯면적은 38[mm<sup>2</sup>]으로 기초설계 하였으며 표 4는 리니어 발전기의 기초 모델의 특성을 나타낸다.



(a)

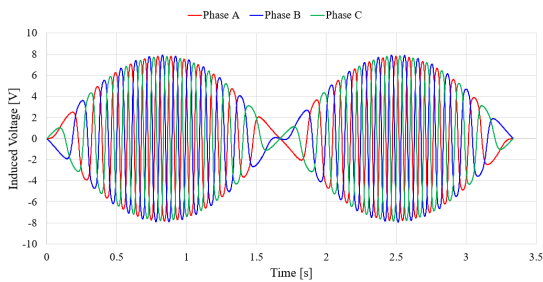


(b)

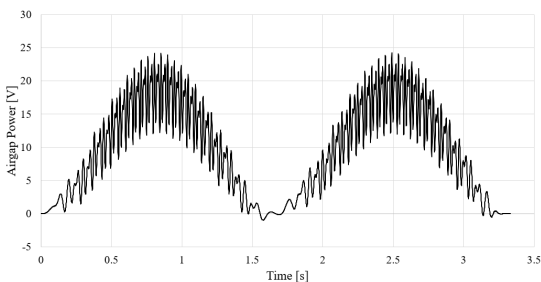
그림 4 부하특성을 분석하기 위한 해석 조건 (a) 외부회로 (b) 속도  
Fig. 4 Analysis condition for load characteristic (a) external circuit (b) velocity



그림 5 리니어 발전기의 FEM 모델  
Fig. 5 FEM model of PMLSM



(a)



(b)

그림 6 부하 특성 (a) 역기전력 (b) 공극출력  
Fig. 6 Load characteristic (a) BEMF (b) airgap power

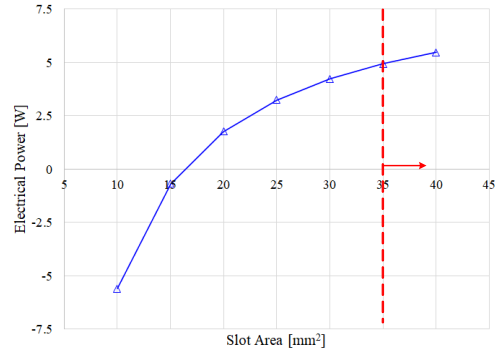


그림 7 슬롯면적에 따른 리니어발전기 출력  
Fig. 7 Electrical power of PMLSM according to slot area

표 3 리니어 발전기의 설계 제원

Table 3 Design parameter of PMLSM

항목	값	단위
극수	28	-
슬롯수	12	-
턴수	51	-
영구자석 두께	5	mm
영구자석 폭	20	mm
공극길이	3	mm
철 재질	50PN470	-
영구자석 재질	N35H	-

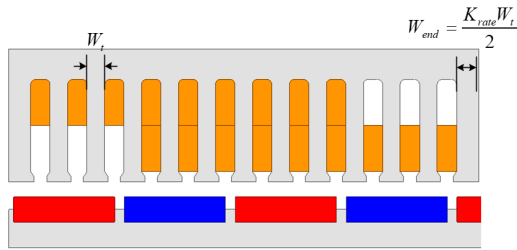
표 4 리니어 발전기의 기초 설계 결과

Table 4 Initial design result of PMLSM

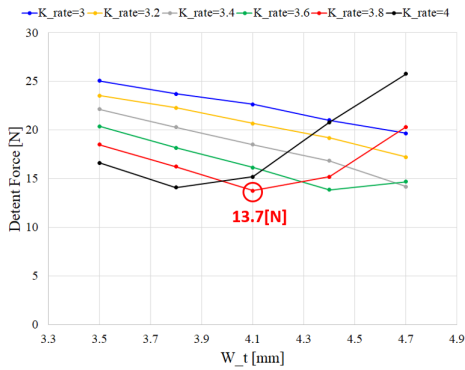
항목	값	단위
전압	4.45	V <sub>rms</sub>
전류	0.68	A <sub>rms</sub>
저항	2.54	Ω
디텐트력	37	N
공극출력	2.54	W
동손	3.54	W
전기적 출력	5.6	W

### 2.4 디텐트력 최적화 설계

파력발전시스템의 주기운동을 위해서는 파력에 의해 초기 구동이 가능해야한다. 영구자석 리니어 기기의 경우 디텐트력이 존재하기 때문에 파력에 의한 초기 구동을 위해서는 디텐트력이 최소화되어야 한다. 디텐트력은 슬롯 형상에 의한 영향과 단부효과에 의해서 결정되므로 치의 두께( $W_l$ ), 슬롯 오프닝( $W_{so}$ ), 단부 치 두께( $W_{end}$ )를 설계변수로 설정할 수 있다. 하지만 슬롯 오프닝의 경우 제작성과 밀접한 관계를 가지므로 소선 직경을 고려하여 2.5[mm]로 고정하였다. 그림 8(a)는 디텐트력을 최적화하기 위한 설계변수를 나타낸다. 단부 치의 두께는 자속포화도를 고려하여 치 두께의 배수로 설계 변수를 설정하였다. 그림 8(b)는 설계변수에 따른 디텐트력을 나타내



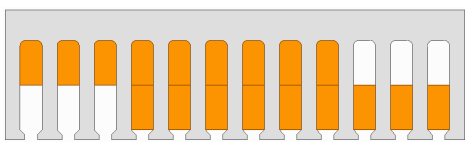
(a)



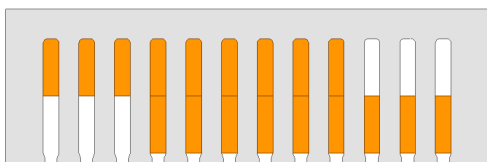
(b)

그림 8 디텐트력 최적화 설계 (a) 최적설계 변수 (b) 설계 변수에 따른 디텐트력

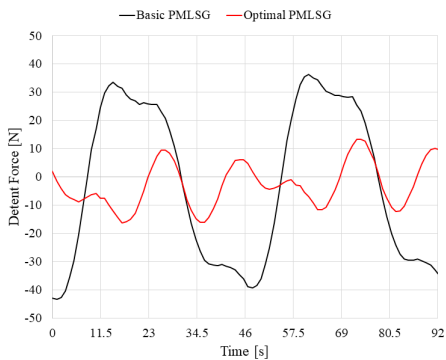
Fig. 8 Optimal design of detent force (a) optimal design parameters (b) detent force according to design parameters



(a)



(b)



(c)

그림 9 파력발전용 리니어 발전기 설계 결과 (a) 기초설계 (b) 최적설계 (c) 디텐트력

Fig. 9 Design result of PMLSM (a) basic design (b) optimal design (c) detent force

며 최적설계 결과 치의 두께는 4.1[mm], 단부 쪽 치의 두께는 7.8[mm]로 설계하였다. 그림 9는 기초설계와 최적설계를 통해 도출한 이동자 슬롯형상을 나타내며 표 5는 기초설계와 최적설계의 비교를 나타낸다. 디텐트력은 단부효과에 의해서 영향을 많이 받는 것을 알 수 있으며 기초설계 대비 최적설계의 디텐트력은 약 63[%] 감소한 것을 알 수 있다.

표 5 리니어 발전기의 최적 설계 결과

Table 5 Optimal design result of PMLSM

항목	기초설계	최적설계
전압	4.45	4.48
전류	0.68	0.69
저항	2.54	2.54
<b>디텐트력</b>	<b>37</b>	<b>13.7</b>
공극출력	2.54	9.6
동손	3.54	3.66
전기적 출력	5.6	5.3

### 3. 결론

본 논문에서는 파력발전시스템의 간이 설계를 통해 리니어 발전기의 설계 사양을 도출하였고, 리니어 발전기를 설계하였다. 리니어 발전기의 경우 동손이 큰 영향을 미치므로 슬롯형상 설계가 중요하다. 슬롯형상을 통해 5[W] 출력을 만족할 수 있는 리니어 발전기를 기초 설계하였다. 또한, 파력발전시스템의 초기 운동 및 지속적인 운동을 위해 디텐트력 최적화 설계를 수행하였다. 디텐트력에 영향을 미치는 치의 두께와 단부 치의 두께를 설계 변수로 최적화 설계를 진행하였고, 최종 리니어 발전기 모델을 도출하였다. 최종적으로 파력발전시스템의 간이 설계를 통해 리니어 발전기를 설계할 수 있다. 파력발전시스템의 경우 질량과 스프링뿐만 아니라 댐퍼에 의한 영향도 존재한다. 댐퍼를 고려한 파력발전시스템의 설계는 복잡한 물리적인 현상을 고려해야하므로 추가적인 연구가 필요하다. 또한, 파력발전시스템의 간이 설계를 검증하기 위하여 제작 및 실험을 통해 추가 연구가 필요하다.

### Acknowledgements

This work was supported by a Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning grant funded by the Korea government (20192010106780, A Construction and Operation of Open Platform for Next-Generation Super Premium Efficiency (IE4) Motors)

### References

[1] I. A. Ivanova, O. Agren, H. Bernhoff, and M. Leijon, "Simulation of Wave-Energy Converter With Octagonal



Linear Generator,” IEEE Jour. Oceanic Engineering, vol. 30, no. 3, pp. 619-629, July 2005.

[2] B. Drew, A. R. Plummer, and M. N. Sahinkaya, “A Review of Wave Energy Converter Technology,” Journal of Power and Energy, vol. 223, no. 8, pp. 887-902, Jun. 2009.

[3] J. Prendergast, M. Li, and W. Sheng, “A Study on the Effects of Wave Spectra on Wave Energy Conversions,” IEEE Jour. Oceanic Engineering, vol. 45, no. 1, pp. 271-283, Jan. 2020.

[4] M. Leijon, H. Bernhoff, M. Berg, and O. Agren, “Economic Considerations of Renewable Electric Energy Production—Especially Wave Energy,” J. Renew. Energy, vol. 28, no. 8, pp. 1201-1209, Jul. 2003.

[5] V. D. Colli, P. Cancelliere, F. Marignetti, R. D. Stefano, and M. Scarano, “A Tubular-Generator Drive for Wave Energy Generation,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, no. 4, pp. 1152-1159, Aug. 2006.

[6] P. Tokat, and T. Thiringer, “Sizing of IPM Generator for a Single Point Absorber Type Wave Energy Converter,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 33, no. 1, pp. 10-19, Mar. 2018.

[7] F. Wu, X.-P. Zhang, P. Ju, and M. J. H. Sterling, “Modeling and Control of AWS-Based Wave Energy Conversion System Integrated Into Power Grid,” IEEE Trans. Power System, vol. 23, No. 3, Aug. 2008.

[8] N. M. Kimoulakis, A. G. Kladas, and J. A. Tegopoulos, “Power Generation Optimization From Sea Waves by Using a Permanent Magnet Linear Generator Drive,” IEEE Trans. Magn., vol. 44, no. 6, pp. 1530-1533, Jun. 2008.



**양대현 (Daehyeon Yang)**

2005 인하대학교 지리정보공학과 석사 졸업.  
2019년~현재 (주)아론에너지 대표이사  
Tel: 032-676-4668  
E-mail: a2ronenergy@gmail.com



**이 주 (Ju Lee)**

1986년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국 철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대학교 전기생체공학부 교수.  
Tel: 02-2220-0342  
E-mail: julee@hanyang.ac.kr



**원성홍 (Won Sung Hong)**

1993.2. 한양대학교 전기공학과 졸업  
1995.2. 한양대학교 전기공학과 석사  
1995~2004 CAE 삼성전기 중앙연구소 그룹  
2007.2 한양대학교 전기공학과 박사  
2007~2008 BK21 한양대학교 연구교수  
2009~현재 동양미래대학교 전기공학과 부교수/학과장  
Tel: 02-2610-5180  
Fax: 02-2610-1854  
E-mail: sagewide@dongyang.ac.kr

**저자소개**



**김현우 (Hyunwoo Kim)**

2017년 한양대학교 전기공학부 졸업.  
2017년~현재 동 대학원 전기공학과 석박통합과정.  
Tel: 02-2220-0349  
E-mail: khw7481@hanyang.ac.kr



**박예지 (Yeji Park)**

2017년 환경대학교 전기전자제어공학부 졸업.  
2017년~현재 한양대학교 대학원 전기공학과 석박 통합과정.  
Tel: 02-2220-0349  
E-mail: yejipark@hanyang.ac.kr



**장형관 (Hyungkwan Jang)**

2010년 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 졸업.  
2012년 동 대학원 전기공학과 석사졸업.  
2013년~2017년 LG전자. 2017년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정  
Tel: 02-2220-0349  
E-mail: jhkinhyu@hanyang.ac.kr