

파력발전용 튜블러형 동기발전기 설계

권 오 창, 김 지 현, 장 기 봉, 김 규 탁  
 창원대학교 전기공학과

The Design of Tubular type Permanent Magnet Linear Synchronous Generator for Wave power generation

Gwon O-Chang, Kim Ji-Hyun, Jang Ki-Bong, Kim Gyu-Tak  
 Department of Electrical Engineering, Changwon National University

**Abstract** - 튜블러 선형 동기발전기는 간단하고 안정적 인 구조이며, 구조적으로 수직력이 발생하지 않는다. 본 논문에서는 파력발전에 튜블러 선형 동기발전기를 소개 한다. 또한 flat type과 특성비교를 통하여 튜블러 발전 기가 파력발전에 적합함을 증명하였다.

type PMLSG에 관하여 연구하였다. 소전력 파력발전용 tubular type PMLSG의 설계와 시작기를 제작하였으며, 실험값과 유한요소(FEM) 해석치를 비교하여 파력발전에 적합성을 증명하였다.

1. 서 론

최근 급격한 산업의 고도화에 따른 에너지 수요가 급 증함에 따라 한정된 에너지 자원 부족으로 석탄, 석유 등 화석 연료의 가격이 폭등하고, 화석연료의 과다한 사 용으로 지구 온난화 등 전 세계적으로 많은 환경적인 문 제가 대두되고 있다. 환경문제를 극복하기 위한 신재생 에너 지 개발에 대한 관심이 고조 되고 있는 가운데 특히 파력 발전은 친 환경적인 무한에너지로서 각광 받고 있 다.

하지만, 종래의 회전형 발전기를 이용한 공기 터빈 방 식의 파력발전은 파력의 왕복직선운동을 회전 운동으로 변환하는 기계적인 메커니즘을 필요로 하기 때문에 전체 시스템이 비대하여 제작비용이 급증하고, 전체적인 시스템 효율이 크게 떨어지는 등 많은 문제점이 있다. 따라 서, 파력의 왕복 직선운동의 기계적인 변환 메커니즘 없 이 바로 발전할 수 있고, 효율 증대 및 단위면적당 발전 량을 증대시키기 위하여 직선 왕복운동을 하는 파력을 직접적으로 이용할 수 있는 선형발전기에 대한 연구가 증가하고 있다[1-3].

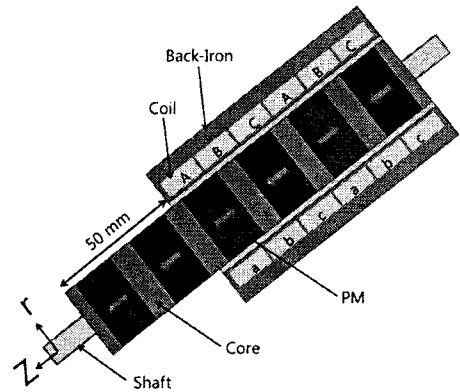
파력 발전용으로 선형발전기를 사용하기 위하여 다음 과 같은 몇 가지의 조건을 고려하여야 한다. 먼저 작은 파력에도 발전이 가능하기 위하여 가동자의 운동성 확보 를 위해 Detent-force, 수직력 등의 가동자의 운동성 저 해 요인을 최소화하여야 하고, 실제 발전 시스템에 적용 시의 유지보수의 최소화를 위하여 기구적 안정성 확보되 어야 한다.

현재, 유럽에서는 운동 에너지 변환 메커니즘이 필요 없이 파도의 왕복운동을 직접적으로 이용하는 flat type Linear Synchronous Generator (flat type PMLSG)에 관한 연구가 주로 이루어지고 있으나, 이는 앞에서 언급 한 파력발전기로서의 가져야 하는 조건인 디텐트력, 수 직력의 최소화와 기계적인 설치의 어려움을 가지고 있다 [1]. 또한, 현재 이루어지는 파력발전에 관한 대부분의 연구는 큰 규모를 가지는 대전력 발전에 집중하고 있고, 소전력에 관한 연구는 전혀 없다. 따라서 본 논문에서는, Flat type PMLSG의 단점을 보완하고, 파도의 느리고 큰 힘을 전기적 에너지로 변환시켜 보다 높은 효율을 얻 을 수 있는 원통형 선형 발전기(tubular type PMLSG) 를 제시하고, 소전력 파력발전에 이용할 수 있는 tubular

2. 본 론

2.1 튜블러 선형발전기 사양

그림 1. 튜블러 선형발전기 단면도



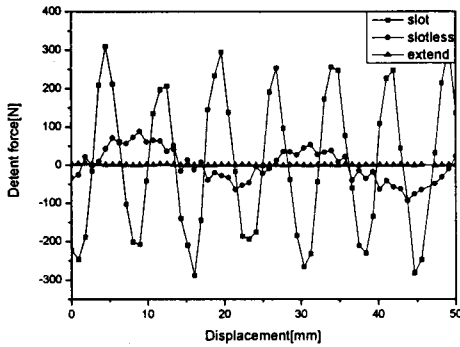
	항목(기준 축)	값 [단위]
가동자	영구자석 길이(Z축)	16 [mm]
	영구자석 두께(r축)	17 [mm]
	영구자석 외경(r축)	94 [mm]
	극 간격(Z축)	25 [mm]
	잔류 자속 밀도	1.37 [T]
고정자	코일 폭(Z축)	14.6 [mm]
	코일 두께(r축)	4 [mm]
	코일 이격거리(Z축)	2 [mm]
코일당 턴 수		208 [턴]
상 전류		1.4 [A]
전류 밀도		5 [A/m <sup>2</sup> ]
기계적 공극		1 [mm]

Table 1. 발전기 사양

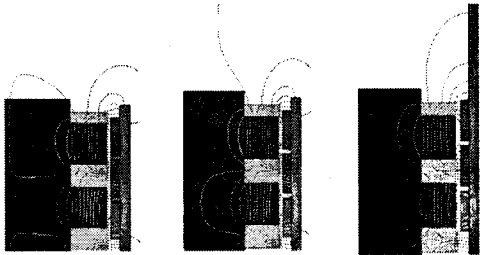
Tubular type PMLSG의 설계는 장하분배를 하고 비

장하를 선정해서 주요 수치를 결정하여, 실제로 적합한 슬롯이나 도선 등의 세부치수를 결정하고, FEM 해석을 통해 출력 값을 비교하여 설계되었다. 설계된 tubular type PMLSG의 용량은 40[W], 단자전압 12[V]로 설계되었으며, 그림 1은 설계된 tubular type PMLSG의 축방향 단면도이다. 파력에 의해 움직이는 무버는 유효 쇄교자속량을 늘리기 위해 halbach-array된 PM과 철심으로 구성되었다. Table 1은 본 논문 시작기의 사양을 나타낸 것이다. 극과 슬롯의 비율은 2:3으로 구동을 위해 무버의 2극분 만큼 더 길게 설계된 6극 6슬롯이다.

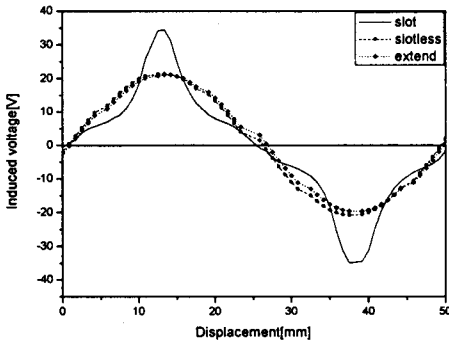
## 2.2. 비교 분석



(A) Detent force 비교



Slot model Slotless model Extend model  
(B) 자속밀도 비교



(C) 유기전압 비교

그림 2. Slot, slotless, extend model 의 비교

model에서 back-iron의 길이를 증가시킨 extend model 3가지 모델의 detent force를 그림2 (A)에 비교하였다. 3가지 모델의 자속밀도를 그림 2(B)에 나타내었다. Slot model에서는 자속이 치와 back-iron 끝부분에서 집중되어 디텐트력의 peak치가 309[N]으로 매우 큼으로 slot model을 구동시키기 위한 구동력은 309[N] 이상이 필요하다. 반면, 시작기와 형상이 똑같은 slotless model은 치와 자석에 의한 디텐트력이 발생하지 않지만 PM과 back-iron 끝단에 자속이 집중되어 80[N]의 detent force가 발생한다. 시작기의 형상은 그림 1과 같이 back-iron이 무버 보다 50[mm] 짧아 무버가 왕복운동을 하게 되면 PM과 back-iron의 끝부분 사이에서 강한 인력이 발생하여 큰 detent force가 발생하여 발전기의 구동력이 증가하여 파력 발전기로는 부적절하므로 detent force를 줄일 필요가 있다. Back-iron 끝단에서 발생하는 Slotless model의 detent force를 줄이기 위해 back-iron의 길이를 증가시켰다. FEM 해석을 통하여 양쪽 축 방향으로 120[mm] 증가시켜 발전기를 구동시킨 결과 PM과 back-iron 끝단 사이의 인력으로 인한 구동력의 영향이 없어짐을 확인 하였으며, 발전을 위한 구동력만 필요로 하므로 파력발전과 같은 소전력 발전시스템에 매우 적합하다. 그림2(C)에는 3가지 모델의 유기전압을 비교하였다. Slot model의 경우, 유기기전력은 15.57[V], 왜형율은 18.06[%], slotless model의 경우는 14.14[V], 1.27[%]이며, extend model의 경우는 14.07[V], 1.22[%]로 나타났다. Slotless model의 경우, PM에서 나오는 자속이 back-iron에 도달하는 거리가 slot model보다 더 멀어짐에 따라 유기전압이 낮아 졌으며, slotless model과 extend model의 스테이터는 무버의 운동방향에 따라 자기저항이 달라지지 않음으로 유기전압이 정현파에 가깝게 나타난다. 한편, slot type PMLSG의 경우 구동력은 매우 큼에도 불구하고 유기전압은 그다지 증가하지 않으며, 전압 리플율도 매우 크게 나타나므로 파력발전기로서는 부적절하다.

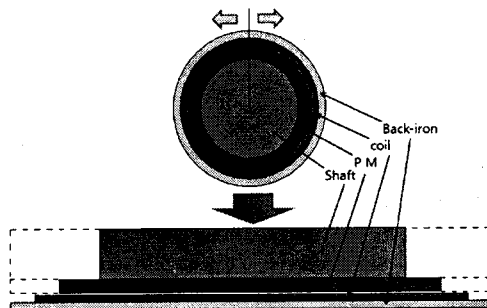


그림 3. 시작기와 같은 체적을 가진 flat type PMLSG

Specification of flat type PMLSG	
Number of pole	6
Thickness of PM	17[mm]
Volume of a pole	65797.5[mm <sup>3</sup> ]
Br	1.37[T]
Air gap	1[mm]
Pole pitch	25[mm]
Slot pitch	16.6[mm]

Table 2. flat type PMLSG의 사양

극 간격을 동일하게 한 경우, stator에 슬롯이 있는 slot model, 슬롯이 없는 slotless model 그리고 slotless

Tubular type PMLSG와 flat type PMLSG의 비교를 위하여 그림 3과 같이 시작기와 동일한 체적을 가진 flat type PMLSG의 단면도를 나타내었다. 시작기 1극분 PM 체적은  $65797.5[\text{mm}^3]$ 이며, 같은 체적으로 6극 6슬롯의 flat type PMLSG를 모델링 하고, 무버의 이속을  $0.5[\text{m/s}]$ 로 하여 FEM을 하였다. Flat type PMLSG의 유기전압과 시작기(tubular type PMLSG)의 유기전압 특성을 그림 4에 비교하였다. 유기전압 비교를 위한 flat type PMLSG의 사양을 table 2에 나타내었다. FEM결과 구조상 End-turn이 없고, 누설 자속이 적은 tubular type PMLSG의 유기기전력이  $43.4[\%]$  크게 나타나 flat type 보다 tubular type 이 보다 효율적임을 알 수 있다.

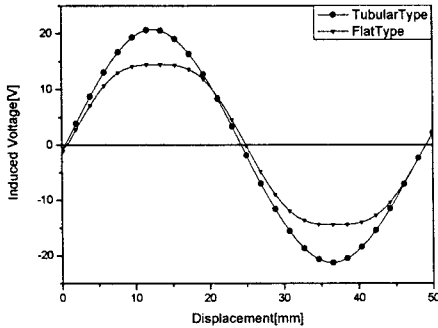


그림 4. Tubular type과 Flat type의 유기전압 비교

### 2.3. 실험

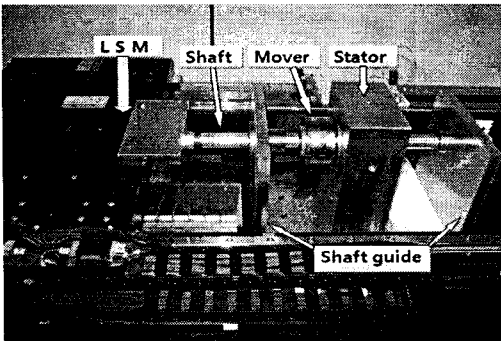


그림 5. 리니어모터(LSM)과 커플링 된 튜블러 발전기

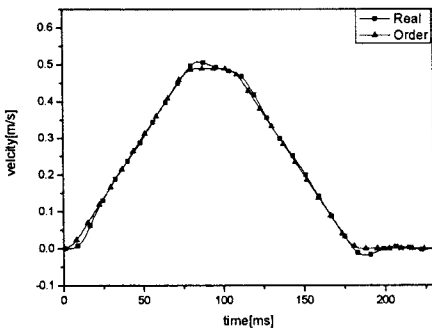


그림 6. LSM의 속도 프로파일

그림 5는Tubular type PMLSG이다. 유기전압을 측정하기 위한 구동용 모터(LSM)를 그림 5와 같이 연결하였

다. 무버의 속도는  $0.5[\text{m/s}]$ , 이동거리는  $50[\text{mm}]$ 로 설계되었으나, 구동용 모터의 가감속에 지연이 발생함은 물론 가속구간에서 등속구간으로의 전환 시 속도의 오버슈

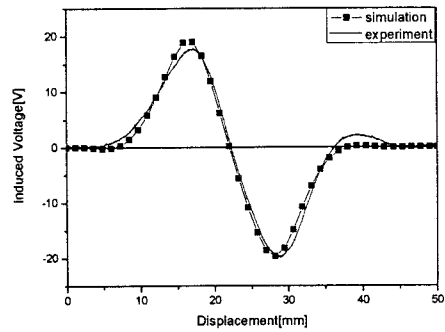


그림 7. 유기전압 비교

트가 발생하게 되고, 감속구간에서 정지구간으로의 전환 시에도 오버슈트가 발생하여 그림 6와 같은 속도프로파일로 tubular type PMLSG의 무버를 움직이게 된다.

그림 6의 속도 프로파일을 유한요소 해석에 적용하여 해석하였으며, 실험치와 해석치의 유기기전력을 그림 7에 비교 하였다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 소전력 파력발전용 tubular type PMLSG를 설계하고 비교, 분석하였다. 공기 터빈을 이용하는 이전의 방식은 체적이 크고 비용이 많이 들지만, 과도의 왕복운동을 회전운동으로 바꾸는 기계적 장치 필요 없이 직접적으로 발전에 이용하는 tubular type PMLSG는 터빈 형식 발전보다 규모나 비용, 효율면에서 월등히 뛰어나다. 또한, 같은 PM체적에서 flat type PMLSG과 비교하여 코일에 end-turn이 없고 구조적으로 수직력이 발생하지 않는 tubular type PMLSG가 보다 뛰어난 것을 알 수 있다. PM을 halbach-array하여 유효 쇄교자 속량을 늘리고, 공심형으로 설계하여 detent force가 없어, 발전을 위한 구동력이 적음으로 소전력 파력발전에 적합함을 증명하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 정수권, 이동엽, 장기봉, 김규택 "양축식 선형발전기의 부하가변에 따른 특성 고찰", 2008년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회 춘계학술대회 논문집, pp41-43, 2008 4. 25
- [2] Shibaike, AkihikoSanada, MasayukiMorimoto, Shigeo, "Suitable Configuration of Permanent Magnet Linear Synchronous Generator for Wave Power Generation", Power Conversion Conference - Nagoya, 2007. PCC '07, pp. 210-215, 2007.
- [3] Polinder, H. Mecrow, B.C. Jack, A.G.Dickinson, P.G.Mueller, M.A., "Conventional and TFPM linear generators for direct-drive wave energy conversion", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 20, No. 2, pp. 260-267, 2002.