

Free-Piston 엔진용 원통형 선형 발전기의 개발

김동현*, 임재원*, 최호용***, 홍선기**, 임희수***, 오시덕***, 정현교*
 서울대*, 호서대**, (주)효성***

Development of Tubular Type Linear Generator for Free-Piston Engine

Dong-Hyun Kim*, Jae-won Lim**, Ho-Yong Choi, Sun-Ki Hong**, Hee-Su Lim, Si-Doek Oh and Hyun-Kyo Jung
 Seoul National University*, Hoseo University**, Hyosung Co.,

Abstract - 본 논문에서는 Free-Piston 엔진용 원통형 선형 발전기의 개발에 대하여 기술한다. 발전기의 주요 특성인 역기전력과 디텐트력은 유한요소법을 통하여 해석되었고, 극 피치조정법을 사용하여 기기의 운전에 악영향을 미치는 디텐트력을 저감하였다. 제안된 설계안은 실제 제작되었고 실험을 통해 검증되었다.

1. 서 론

Free-Piston 엔진을 이용한 선형 발전 시스템은 기존 발전 시스템에서 필요로 하는 로드, 크랭크축 등의 운동변환장치를 필요로 하지 않으므로 운동변환과정에서 생기는 손실을 줄일 수 있다. 따라서 고효율의 선형 발전기와 결합할 경우 전체 시스템의 에너지 효율을 극대화할 수 있는 장점을 가진다. 또한 해당 시스템의 경우, 구조가 단순하여 기계적인 안정성이 뛰어나며, 피스톤의 움직임에 제한이 없기 때문에 다양한 압축비를 갖는 여러가지 연료를 사용할 수 있다는 장점을 가진다[1-2].

본 연구에서는 원통형 선형 발전기를 해석 및 설계 하였으며, 특히 적용 가능한 다양한 기기 중에서 효율과 역률측면에서 우수한 영구자석기기를 선정하여 해석하였다.[3-4] 성능을 가늠하는 가장 중요한 요소인 역기전력과 디텐트력은 유한요소법을 이용하여 계산되었고 그 결과를 바탕으로 최종 설계안을 제시하였다.

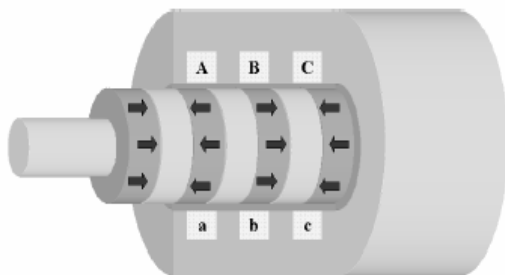
2. 본 론

2.1 원통형 발전기의 역기전력과 디텐트력 해석

원통형 선형 발전기의 개략도는 그림 1에 나타나 있다. 해당 발전기는 축방향으로 자화된 자석으로 이루어진 이동자와 3상의 코일이 연결된 고정자로 이루어져 있으며 축방향으로 자화된 자석은 자석과 자석 사이의 폴 슈를 통해 반경방향의 자속을 형성하게 된다. 이동자의 속도는 최대 6.11[m/s]이고 정현적인 속도를 갖는다. 선간 최대 전압은 300[V]로 제한되어 있으며 요구되는 발전 출력은 1[kW]이다. 원통형 선형 발전기의 사양은 표 1에 나타내었다.

기본 모델은 요구되는 출력조건을 만족하기 위해 2극 3상으로 이루어진 하나의 모듈을 두 개의 모듈로 연결하여 구성하였으며 기본 모델의 역기전력과 디텐트력의 해석 결과는 그림 2에 나타내었다.

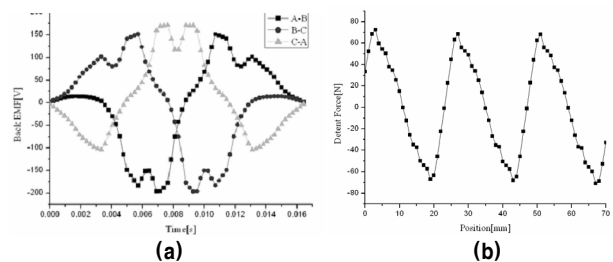
선형 기기의 특성상 이동자의 스트로크에는 한계가 있으므로 이동자는 스트로크의 중앙에서 최대의 속도를 가지고 양쪽 끝에서 반드시 멈추어야만 한다. 실제 Free-Piston 엔진에서는 이동자의 최대 속도로 운전하는 지점이 정 중앙은 아니지만, 실험값과 비교하기 위해 실험 세트에서와 같이 중앙에서 최대 속도가 발생하는 것으로 가정하고 해석을 진행하였다.



〈그림 1〉 원통형 선형 발전기의 개략도

〈표 1〉 원통형 선형 발전기의 사양

사양	치수
출력	1[kw]
극/상	2극 3상
스트로크	72[mm]
선간 최대 전압	300[V]
최대 속도	6.2[m/s]
동작 주파수	30[Hz]
평균 반작용력	250[N]
공극	2[mm]



〈그림 2〉 기본 모델의 (a)역기전력, (b)디텐트력

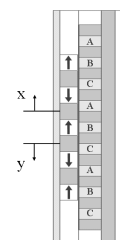
기본 모델을 해석한 결과, 역기전력은 선간 최대 전압이 약 200[V], 디텐트력은 약 70[N] 정도로 나오는 것으로 확인되었다. Free-Piston 엔진으로 부터의 반작용력이 약 250[N]임을 감안하면 디텐트력이 저감되어야 함을 알 수 있다.

2.2 극 피치 조절

디텐트력을 저감하는 방법으로는 스큐, 챔퍼링 등의 방법은 제작이 쉽고 효과 또한 커서 매우 유용한 디텐트력 저감법이 될 수 있다. 하지만 본 발전기에 있어서는 원통형기기의 특성상 곡면에 스큐 및 챔퍼링을 주는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 발전기에서는 디텐트력을 저감하기 위하여 극 피치 조정법을 적용하였다. 전동기의 경우 극 피치를 불균일하게 하면 상간 평형이 깨져 기기의 제어 특성에 악영향을 준다. 하지만 3상 출력을 정류하여 사용하는 본 발전기의 특성상 상간 평형을 고려할 필요가 없으므로 이는 디텐트력을 줄이는 좋은 방법이 될 수 있다.

일반적으로 디텐트력은 코어 디텐트력 및 치 디텐트력으로 나뉜다. 본 발전기에서는 요크부가 1차축을 덮을 만큼 충분히 크기 때문에 치 디텐트력이 주된 관심사이다. 치 디텐트력은 상대적인 주기를 가지고 있는데 이는 극피치 및 치피치의 최대 공약수의 함수로 나타난다. 치 디텐트력의 주기가 커짐에 따라, 디텐트력의 크기는 커진다. 극피치 조정법은 치 디텐트력의 주기를 짧게 만드는 효과를 가지고 있으며 결과적으로, 치 디텐트력은 그 크기가 저감된다.

극피치를 조정할 때, 극피치는 그림 4의 x,y에 따라 변화하며, 극수가 고정된 사이클일 경우 x,y의 값은 -3[mm]에서 3[mm]까지 변화한다.



〈그림 4〉 극피치 조정

2.2.1 디텐트력 분석

y 값이 고정되어 있을 때, x가 증가함에 디텐트력은 증가한다. 특히 x=3[mm]일 때 가장 작은 디텐트력이 나타난다. x가 고정되어있을 때에도 같은 현상을 확인할 수 있다. y=3[mm]은 좋은 성능을 보여준다. 이러한 결과는 중앙 근처에 위치한 두 개의 극이 디텐트력을 줄이기 위해 더욱 멀리 떨어져 있어야 함을 설명 해준다. 반대 방향일 때에는, 디텐트력이 증가하는 경향을 보인다. x=3[mm]이고 y=3[mm]일 때, 디텐트력은 최고의 성과를 보이며, 최대 디텐트력은 약 25.9[N]이 된다.

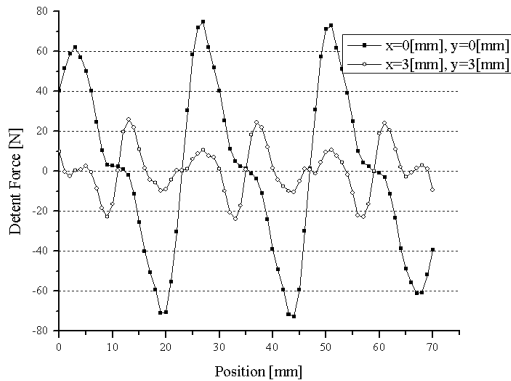
그림 5에서는 이동자의 위치에 따른 디텐트력 파형을 비교하고 있다. 이 그림에서는, 기본 모델의 디텐트력 및 마지막으로 수정된 모델의 디텐트력이 나타나 있다. 극피치가 변화되지 않았을 때, 디텐트력의 주기는 24[mm]이다. 이는 극피치 및 치피치 GCD의 두 배인 셈이다. 극피치 조절을 하면, 각각의 치 디텐트력에서 상 차이가 생성된다. 따라서 치 디텐트력의 합의 줄어들 것이다. 극피치 조절은 디텐트력 뿐만이 아니라 역기전력의 파형에도 영향을 주므로 함께 고려해야 한다. 디텐트력의 최대값은 기본 모델에 비해 35[%]로 줄어들게 된다.

3. 제작 및 실험

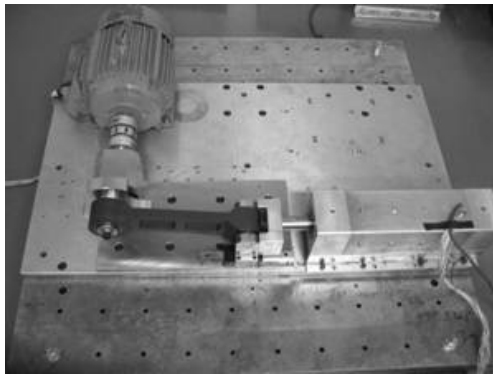
제작된 원통형 선형 발전기 및 실험 장치는 그림 6에 나타나 있다. 이 동자는 각각의 고정자의 측면에 붙어 있는, 선형 부쉬에 의해 지지된다. 발전기 독립시험을 위해, 유도 전동기가 Free-Piston 엔진 대신에 사용되었다. 크랭크 구조는 회전 움직임을 직선 움직임을 바꾸는데 이용되었다. 기계적인 진동을 줄이기 위해, 팬 형태의 크랭크 구조가 유도 모터의 축에 부착되었다. 전부하 상태 실험을 위해 저항 회로가 부하로 사용되었다.

그림 7에는 무부하 상태에서 시뮬레이션 된 결과와 실험 결과의 비교 결과가 나타나 있다. 동작 주파수는 30[Hz]이다. 그래프를 통해 실험과 해석은 서로 일치함을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 피크 전압은 298[V]이고 실험된 결과는 292[V]이다. 에러는 2.1[%]이다.

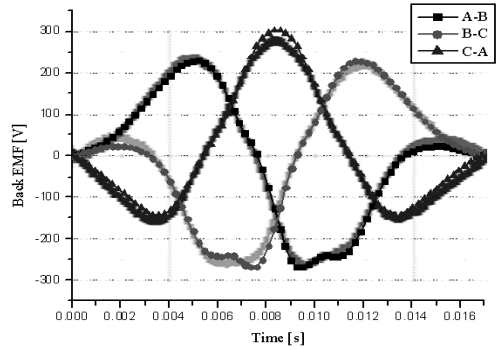
전부하 동작의 실험 결과는 그림 8에 나타나 있다. 출력 전압의 상은 시뮬레이션 결과와 잘 맞아 떨어진다. 내부 저항에서의 전압 강하를 고려하면, 최종적으로 출력 전압은 4.7[%]정도의 오차를 보인다.



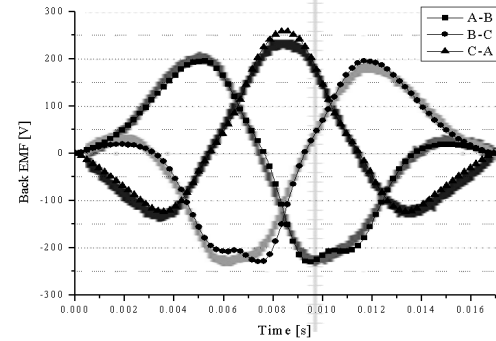
〈그림 5〉 x=3[mm], y=3[mm]일 때 디텐트력



〈그림 6〉 선형 발전기 실험 시스템



〈그림 7〉 무부하 상태에서의 역기전력



〈그림 8〉 전부하 상태에서의 역기전력

〈표 2〉 전부하 상태에서 실험 결과

종목	값
철손	28[w]
동손	82[w]
역률	98[%]
효율	90.1[%]
출력	1,111[w]

해당 출력 및 손실은 표 2에 나타나 있다. 발전기의 출력은 PCS를 통해 정류되어 사용되므로 90[%] 이상의 효율을 같은 PCS를 통해 1[kw]의 출력을 얻을 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는, Free-Piston 엔진 시스템에서의 원통형 선형 발전기가 분석되고 설계되었다. 역기전력 및 디텐트력은 유한요소법을 통해 계산되었다. 디텐트력을 줄이기 위해, 극피치 조절이 적용되었다. 극피치 조절은 역기전력 파형에서 고조파를 줄인다. 이는 디텐트력을 줄이는 데에 좋은 효과를 갖는다. 또한 해당 설계된 기기는 제작되고 실험되었다. 실험 결과는 시뮬레이션과 합치되는 결과를 보여주었고, 이를 통해 해당 설계 방법의 타당성은 증명될 수 있었다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] Waqas M. Arshad, Thomas Backstrom, Peter Thelin and Chandur Sadarangani, "Integrated free-piston generators : an overview", Proceedings of the Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORpie 2002), August 2002, Stockholm, Sweden.
- [2] Waqas M. Arshad, Chandur Sadarangani, Thomas Backstrom, and Peter Thelin, "Finding an appropriate electrical machine for a free piston generator", Proceedings of the International Battery, Hybrid and Fuelcell Electric Vehicle Symposium & Exhibition (EVS-19), p. 22, October 2002, Busan, Korea.
- [3] A. Cosic, J. Lindback, W. M. Arshad, M.Leksell, P. Thelin, E. Nordlund, "Application of a free-piston generator in a series hybrid vehicle," LDIA2003
- [4] Ho-Yong Choi, Jae-Won Lim, Hyun-Kyo Jung, Sun-Ki Hong, Dong-Hyeok Cho, Sang-Yeon Hwang, Si-Deok Oh, "Design of Flat-type Linear Generator for Free-piston Engine," ICEMS2004.