

Free Piston 엔진용 5kw급 원통형 선형 발전기의 개발

임재원*, 최호용**, 홍선기***, 임희수**, 오시덕***, 정현교*
 서울대학교*, (주)효성**, 호서대학교***

Development of 5kw Class Tubular linear Generator for Free piston Engine

Jaewon Lim*, Ho-Yong Choi**, Sun-Ki Hong***, Heesu Lim**, Si-Deok Oh**, Hyun-Kyo Jung*
 Seoul National University*, Hyosung. co.**, Hoseo University***

Abstract - 본 논문에서는 Free Piston 엔진용 5kw급 원통형 선형 발전기의 개발에 관하여 기술한다. 발전기의 주요 특성인 역기전력과 디텐트력은 유한요소법을 이용하여 해석하였으며 디텐트력의 저감을 위해 데미슬롯과 극피치 조정법을 적용하였다. 제안된 설계안은 실제 제작되었고 실험을 통해 검증되었다.

1. 서 론

고효율 수소 연소 리니어 동력 시스템은 수소연료를 초회박 연소 시켜 40% 이상의 시스템 효율을 달성하는 에너지 변환장치로 고성능의 선형 발전기와 결합할 경우 고효율, 고풍력을 기대 할 수 있다. 이 시스템은 기존의 발전 시스템에서 사용되고 있는 운동 변환장치를 사용하지 않으므로 운동변환 과정에서 발생하는 손실을 줄일 수 있으며 엔진의 피스톤과 발전기의 이동자가 직접적으로 체결되므로 기구적인 안정성이 좋고 따라서 높은 효율을 기대할 수 있다. 선형 발전기는 이 시스템의 핵심적인 역할을 하는 부분으로 선형운동을 하는 피스톤의 운동에너지를로부터 전기를 생산하는 역할을 수행한다.

본 연구에서는 선형 기기의 다양한 구조 중 원통형 영구자석기기를 기본 해석 모델로 선정하였으며 유한요소법을 이용하여 전자기 해석을 수행하였다. 목표 성능을 만족하기 위한 설계안을 도출하기 위하여 부하 조건 및 자계포화현상 등을 고려하여 해석하였으며 단부 디텐트력을 저감하기 위해 데미 슬롯을 적용하였다. 위의 설계 결과는 실제 제작을 통해 실험적으로 검증하였다.

2. 본 론

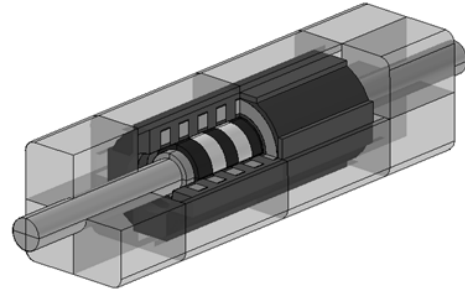
2.1 원통형 선형 발전기의 역기전력 해석

원통형 선형 발전기의 요구사항은 표 1에 나타내었다. 원통형 선형 발전기의 출력 파형은 가변속 구간이 많은 왕복 구동형 선형기의 특성상 정현적인 파형이 나오지 않는다. 따라서 발전기의 출력은 PCS를 거쳐 정현적인 전원으로 공급되어진다. 발전기의 효율과 PCS의 효율을 고려하여 출력은 6.1kw로 설계되어야 할 것이며 해석 시에는 이동자의 스트로크의 중심 부분에서 최대의 속도를 갖는 정현파 형태의 속도프로파일로 free piston 엔진의 움직임을 모사 하였다. 기기는 2극 3상의 구조의 발전기가 2모듈로 연결하여 구성하였으며 이동자의 경우 축 방향 자화된 자석과 자성체로 이루어진 풀 슈를 이용하여 반경방향 자속을 만드는 구조로 이루어져 있다. 고정자의 경우는 제작의 편이를 고려하여 4분할된 상태로 조립한 구조이다.

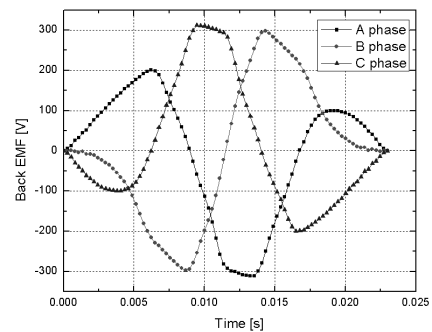
정현적인 속도를 가정한 역기전력의 해석 결과는 그림2와 같다. 이동자가 일정한 속도로 이동할 경우 역기전력 파형은 정현적인 형태로 나타나게 되나 앞에서 밝힌 바와 같이 이동자가 왕복 구동을 하기 때문에 양 끝에서는 방향전환을 위해 속도가 0이 되어야 하고 따라서 중앙에서 최대값, 양 끝에서 최소값을 갖는 역기전력 파형이 나타나게 된다.

2.2 원통형 선형 발전기의 디텐트력 해석

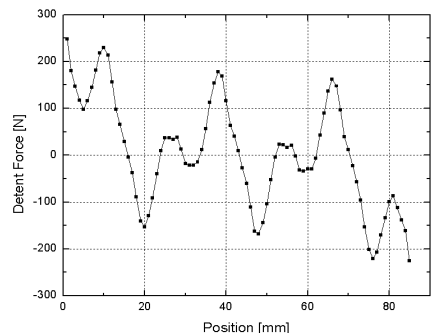
디텐트력은 영구자석으로 이루어진 이동자와 고정자 사이의 인력에 의한 것으로 기기의 정상적인 운전을 저해하는 요소로 작용한다. 디텐트력을 저감하기 위한 연구는 많이 진행되어왔으며 챔퍼링, 바이퍼 케이트, 스류 등이 그것이다. 하지만 원통형 발전기의 경우에는 비용의 측면에서 생각하여 볼 때에 곡면으로 이루어진 공극 면에 위와 같은 효과를 적용하기란 쉽지 않다. 따라서 본 발전기에서는 원통형 발전기의 디텐트력을 저감하기 위한 방법으로 이동자의 극피치의 조정과 데미슬롯을 적용하였다. 기본 모델의 디텐트력의 해석결과는 그림 3에 나타내었다. 그림 3을 살펴보면 단위에서의 디텐트력이 스트로크 중앙에서의 디텐트력보다 많이 나오는 것을 알 수 있다. 따라서 데미 슬롯을 추가하는 방법이 단위 디텐트력을 효과적으로 저감하는 방안이 될 수 있다.



〈그림 1〉 원통형 선형 발전기



〈그림 2〉 기본 발전기모델의 역기전력 파형



〈그림 3〉 기본 발전기모델의 디텐트력 파형

〈표 1〉 원통형 선형 발전기의 제원

항목	값	항목	값
출력	6[kw]	극/상	2극 3상
스트로크	84[mm]	최대 속도	5.2[m/s]
동작 주파수	22[hz]	평균 속도	3.7[m/s]

2.2.1 데미슬롯과 극피치 조정법의 적용을 통한 디텐트력의 저감

데미 슬롯은 고정자의 양 단부에 추가적인 슬롯 구조를 만들어주는 것으로 본 해석 모델과 같은 고정자의 길이가 이동자의 길이보다 긴 선형기의 경우 발생할 수 있는 큰 단부 디텐트력을 저감하는데 효과가 있는 방법이다. 특히 본 연구 대상인 free piston 엔진의 경우 엔진내의 연료의 연소에 의한 추력이 발전기의 이동자에 전달되기 시작하는 시점에

서의 단부 디텐트력이 발생하기 때문에 전체 발전기의 기계적인 손실로 작용할 것이다. 따라서 이와 같은 단부 디텐트력을 저감하기 위하여 본 해석모델에 더미 슬롯을 적용하여 디텐트력을 해석하여 보았으며 더미 슬롯을 적용하였을 때의 디텐트력의 파형은 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 나타나듯, 더미슬롯을 적용하게 되면서 단부에서의 디텐트력이 상당히 저감된 것을 확인할 수 있으며 디텐트력의 최대값도 약 73% 정도로 저감되는 것을 확인할 수 있었다.

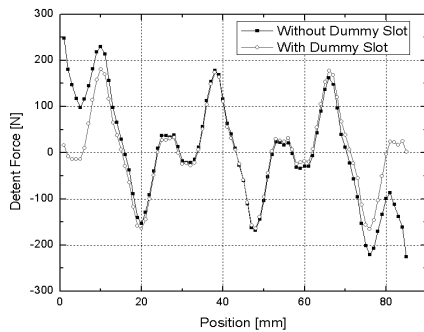
추가적인 디텐트력의 저감을 위하여 이동자의 극 피치 조절을 수행하였으며 이에 따른 디텐트력의 분포를 살펴보았다. 일반적으로 디텐트력은 극 피치와 치 피치의 최대 공약수를 주기로 나타나게 되는데 한 극 당 발생하는 디텐트력을 모든 극에 대한 합으로도 생각할 수 있다. 따라서 구조적으로 디텐트력이 위와 같은 주기를 갖게 되는 것이다. 극 피치 조절법은 이동자 극의 위치를 변경하므로 디텐트력의 주기를 불균일하게 만들어주며 따라서 이에 따른 디텐트력의 크기도 감소시키는 효과를 기대할 수 있다. 하지만 극 피치 조절법은 극의 주고 변경에 따른 역기전력의 변화도 동시에 수반하므로 이에 대한 고려도 반드시 함께 이루어져야 한다. 극피치 조절에 따른 디텐트력은 그림 5에 나타내었다. 2mm의 극피치 조절한 모델이 극피치 조절을 하지 않은 모델과 비교하여 볼 때 13%의 디텐트력 저감효과를 보이는 것으로 나타났으며 그 이후에는 오히려 디텐트력이 증가하는 모습을 보였다. 따라서 극 피치를 2mm 조절한 모델을 최종안으로 선정하였다.

2.2 제작 및 실험

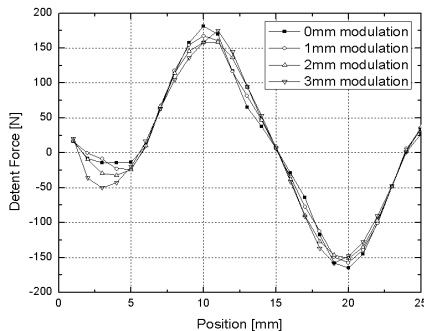
제작된 5kw급 원통형 선형 발전기는 그림 6에 나타내었다. 발전기의 독립운전 시험을 위하여 유도기를 동력원으로 구동된다. free piston 엔진과 같은 움직임을 모사하기 위해 별도의 크랭크 장치가 마련되었으며 유도기의 회전운동은 크랭크 장치에 의해 직선운동으로 변환된다. 크랭크축은 발전기의 이동자와 체결되어 동작하게 된다. 이동자는 고정자 양 끝의 리니어 베어링에 의해 지지되며 베어링에서의 열 발생과 마찰력을 최소화하기 위한 오일급유장치와 온도 센서를 부착하였다.

2.2.1 실험 결과

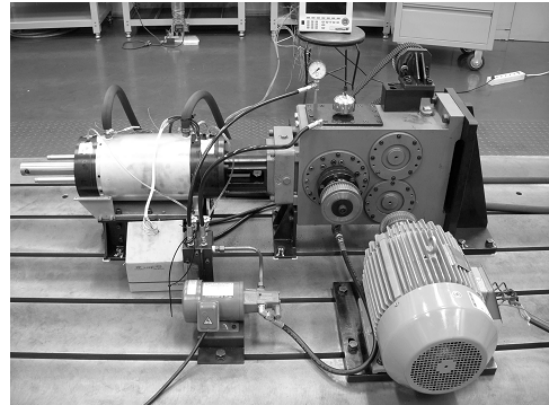
발전기의 정격 속도에서의 무 부하 시 출력전압 파형과 해석 값과의 비교는 그림 7과 같다. 전압의 실효치를 비교하여 볼 때 A상의 경우 해석 값은 167[V], 실험값은 157[V]로 약 5%의 오차가 남을 확인 할 수 있었으며 이는 실험과 해석이 비교적 잘 일치함을 알 수 있는 것이다. 저항 부하를 이용한 정격 속도에서의 풀 부하 실험 결과는 표 2에 명시하였다. 철손과 동손을 포함한 손실은 약 630[w]정도 발생이 되었고 이에 따른 발전기의 유효 출력은 약 5.5[kw]이다. 따라서 발전기 자체로는 89%의 효율을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 본 발전 시스템은 발전기의 출력을 PCS를 통해 정류하여 사용하기 때문에 PCS의 효율을 고려한다면 충분히 5[kw]의 최종 출력을 얻을 수 있을 것으로 기대할 수 있다.



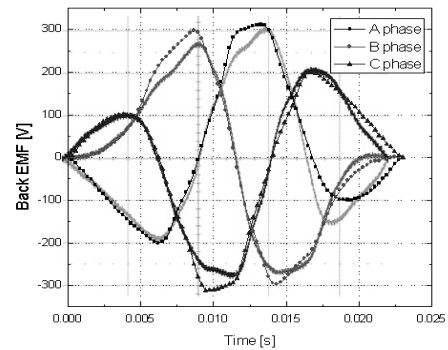
〈그림 4〉 더미 슬롯 유무에 따른 디텐트력의 비교



〈그림 5〉 극 피치 조절에 따른 디텐트력의 비교



〈그림 6〉 원통형 선형 발전기 실험 시스템



〈그림 7〉 무부하 역기전력 파형

〈표 2〉 발전기의 풀 부하 실험결과

출력	6.1[kw]
철손	323[w]
동손	309[w]
효율	89[%]

3. 결 론

본 논문에서는 free piston 엔진용 5kw급 원통형 선형 발전기를 설계에 관하여 연구 하였다. 역기전력과 디텐트력은 유한요소법을 이용하여 해석하였으며 원통형 선형기의 단부 디텐트력의 저감을 위하여 더미 슬롯을 적용하였고 추가적인 디텐트력의 저감을 위해 이동자의 극피치 조절법을 도입하였다. 제안된 설계안은 실제 제작하여 제안된 설계 및 해석의 타당성은 실험을 통해 검증 하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 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.
- [2] I. Boldea, S.A. Nasar, "Linear Electric Actuators and Generators".IEEE Trans. on Energy conversion, Vol. 14, pp712-717, September 1999
- [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.
- [5] Ho-Yong Choi, Jae-Won Lim, Hyun-Kyo Jung, Sun-Ki Hong, Dong-Hyeok Cho, "Design of Tubular-type Linear Generator for Free-piston Engine," LDIA2005.