

Free-Piston 엔진용 원통형 선형 발전기의 개발

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

Development of Tubular Type Linear Generator for Free-Piston Engine

Jaewon 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 이용하여 해석되었으며 극 피치조정법을 사용하여 기기의 운전에 악영향을 미치는 디텐트력을 저감하였다. 제안된 설계안은 실제 제작되었고 실험을 통해 검증하였다.

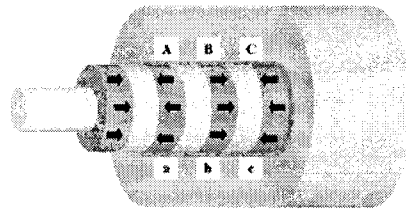


그림 1. 원통형 선형 발전기의 개략도

1. 서 론

Free-piston 엔진을 이용한 선형 발전 시스템은 연소 실로부터의 기계적인 입력을 중앙의 선형 발전기가 전기적인 출력으로 변환시켜주는 시스템이다. 이 시스템은 기존의 발전 시스템에서 필요한 로드, 크랭크축 등의 운동변환장치가 필요 없으므로 운동의 변환과정에서 생기는 손실을 줄일 수 있으며 따라서 고효율의 선형 발전기와 결합할 경우 전체 시스템의 에너지 효율을 극대화할 수 있다. 또한 구조가 단순하여 기계적인 안정성이 좋고, 피스톤의 움직임에 제한이 없어 다양한 압축비를 갖는 다양한 연료를 사용할 수 있다는 장점이 있다[1].

본 연구에서는 원통형 선형 발전기를 해석 및 설계 하였다. 원통형은 평판형에 비해 높은 효율을 갖으며, 적용 가능한 다양한 기기 중에서 효율과 역률측면에서 우수한 연구자석기기를 선정하여 해석하였다.[2] 성능을 가능하는 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. 이 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 속도 프로파일을 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 2과 그림 3에 나타내었다.

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

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	6.11[m/s]
동작 주파수	30[Hz]
평균 반작용력	250[N]

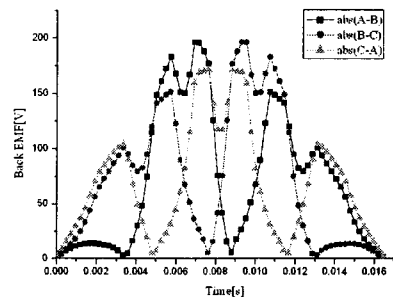


그림 2. 기본 모델의 역기전력

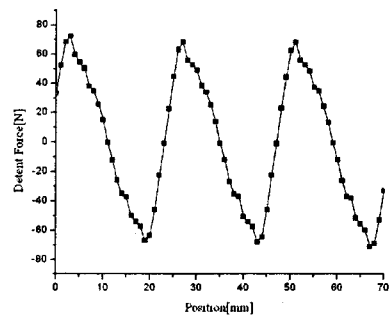


그림 3. 기본 모델의 디텐트력

기본 모델의 해석 결과, 역기전력은 선간 최대 전압이 약 200[V], 디텐트력은 약 70[N] 정도 나오는 것으로 확인되었다. Free-Piston 엔진으로 부터의 반작용력이 약 250[N]임을 감안할 때 디텐트력이 저감되어야 함을 알 수 있다.

## 2.2 극 피치 조절

디텐트력을 저감하는 방법으로는 스큐, 챔퍼링 등이 널리 알려져 있는데 이러한 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 어렵기 때문에 위와 같은 방법들을 적용하기 힘들다. 때문에 본 발전기에서는 디텐트력을 저감하기 위해 극 피치 조정법을 적용하였다. 전동기의 경우 극 피치를 불균일 하게 할 경우 각 상간의 평형이 깨져 기기의 제어 특성에 악영향을 준다. 하지만 3상의 출력을 정류하여 사용하는 본 발전기의 특성상 상간 평형을 고려할 필요가 없어 디텐트력을 줄이기 위한 좋은 방법이 될 수 있다.

극 피치 조정은 그림 4에서 보이는 바와 같이 4 개로 이루어진 이동자의 극 중 중앙의 두 극을 각각 x, y의 변수로 이동시키므로 행해진다. 이 두 변수는 각각 -3~3[mm]의 폭으로 이동되었고 이 과정에서 폴 슈의 크기, 즉 자극 폭은 고정하였다. 일반적으로 디텐트력은 극 피치와 고정자 치 피치 간의 최대 공약수를 주기로 일어나게 되는데 극 피치를 불균일하게 조정함으로 이 주기를 어긋나게 하는 효과를 얻을 수 있다. 따라서 디텐트력의 크기도 감소하는 효과를 얻을 수 있게 되는 것이다. x, y에 따른 디텐트력의 변화는 그림5와 그림6에 나타내었다. 디텐트력의 주기성을 고려하여 한주기만 표시 하였으며 그림에서 알 수 있는 것과 같이 x=3[mm]일 때 디텐트력이 최소가 됨을 알 수 있고, 상대적으로 y=-3[mm]일 때 디텐트력이 최소가 됨을 알 수 있다. 이때의 디텐트력의 최대값은 25[N]으로 정격 입력의 10% 수준이며 기기의 정상 운전에 크게 지장이 없을 것으로 생각된다. 그림 7은 x=3[mm]로 고정하고 y값을 변화시켰을 때의 선간 역기전력 값이다. y값이 감소함에 따라 이동자의 자극 구조가 점차 대칭적으로 변하게 되며 따라서 역기전력 파형도 대칭성을 갖게 되고 또한 고조파 성분이 감소하는 방향으로 변하게 됨을 알 수 있다.



그림 4. 극 피치 조정 변수

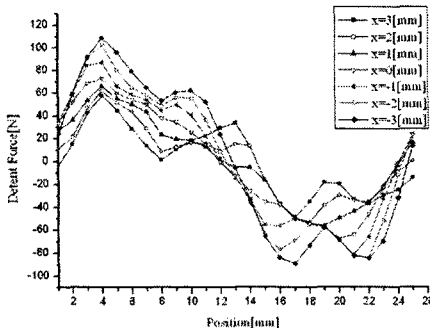


그림 5. x값 변화에 따른 디텐트력

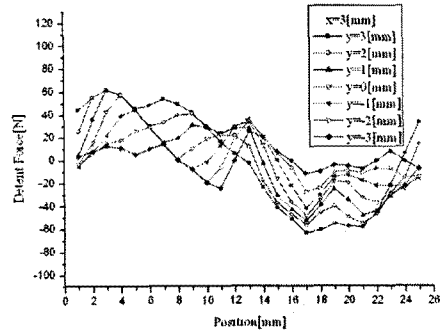


그림 6. y값 변화에 따른 디텐트력

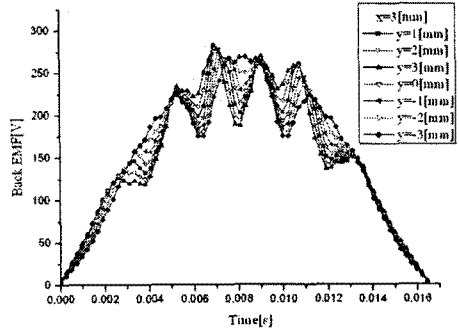


그림 7. y값 변화에 따른 역기전력

## 2.3 역기전력 조정

극 피치 조정을 통해서 구한 선간 역기전력의 최대값은 약 265[V]이다. 제한된 조건 안에서 더 큰 출력을 얻기 위해서는 역기전력 값이 더 커져야 하고 이를 위해 권선을 더 추가함으로 역기전력을 보상에 주었다. 권선을 추가하기 위하여 고정자의 외경을 늘려 주었으며 이 과정에서 공극에서의 자기적인 변화는 없으므로 자기적인 특성이나 디텐트력의 변화는 없을 것으로 보인다. 권선 보상을 통해 역기전력을 증가시킨 결과는 그림 8에 나타내었다. 선간 전압의 최대치는 약 298[V]로 주어진 사양을 만족하며 최대의 출력을 얻을 수 있을 것으로 보인다.

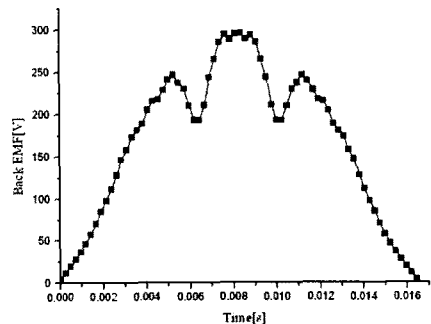


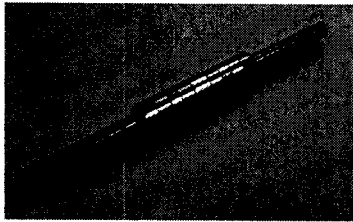
그림 8. 조정된 역기전력

## 3. 제작 및 실험

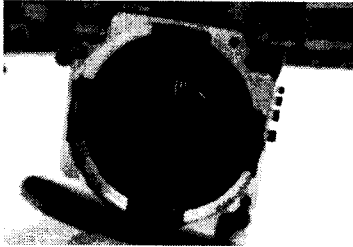
### 3.1 실험장치

제작된 이동자와 고정자는 각각 그림 9에 나타내었다. 이동자는 리니어 부서에 의해 고정자에 지지되고 전체적

으로 결합된 실험 장치는 그림 10에 나타내었다. 발전기의 실험을 위해 유도기를 크랭크 축에 연결하였고 이로부터 이동자에 선형 움직임을 줄 수 있게 된다. 이동자의 진동으로부터 오는 기구적인 파손을 막기 위해 크랭크축에 대칭이 되는 질량체를 달아주었고 크랭크축과 이동자간의 연결부도 리니어 가이드로 고정하였다.



(a)



(b)

그림 9. 제작된 원통형 선형 발전기  
(a) 이동자 (b) 고정자

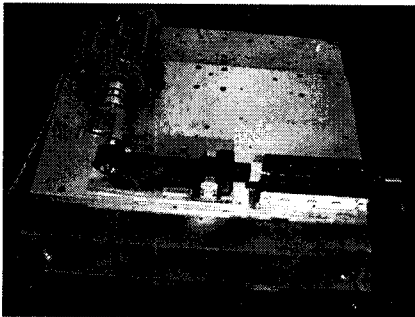


그림 10. 원통형 선형 발전기의 실험 장치

### 3.2 공극 구조 변경

원통형 선형 발전기의 제작, 조립 과정 중에 발생한 이동자의 편심 현상과 축 휨 현상 때문에 공극이 1[mm]로 균일하게 유지 되지 못하는 것이 실험 중에 발견되어 이러한 문제점을 해결하기 위해 고정자를 수정하여 공극을 2[mm]로 늘리는 방안을 마련하였다. 1[mm]의 공극에서의 편심현상은 2[mm]의 공극에 대해 0.1[mm]정도로 상당히 감소하였고 기기의 운전에 있어서 더 이상 편심의 영향을 고려하지 않아도 될 것으로 보인다.

### 3.3 실험 결과

2[mm]로 수정된 공극에 대한 해석결과는 그림 11에 나타나 있다. 공극이 1[mm]일 때와 비교하여 약 10% 정도 감소된 값인 순간 최대값 265[V]의 결과를 보이고 있다. 그림 12는 실험값을 보이고 있는데 (C-A)의 순간 전압을 나타내고 있다. 이 값은 정류전의 값이고 첨두치가 500[V]로 해석 치와 약 6%의 오차를 보이고 있음을 알 수 있다.

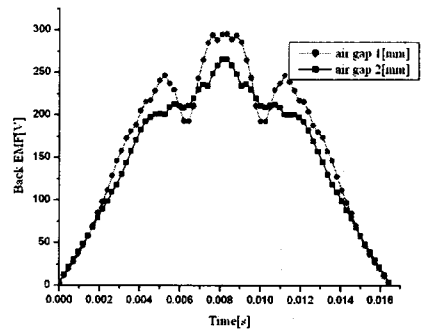


그림 11. 공극이 2[mm]일 때의 역기전력 파형

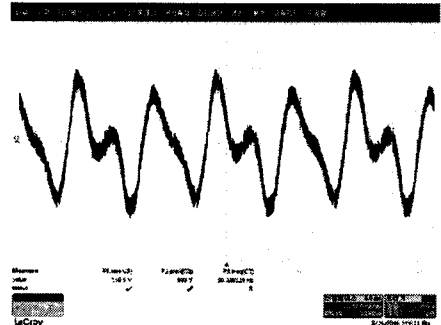


그림 12. 제작된 발전기의 역기전력 실험 값

## 4. 결 론

본 논문에서는 원통형 선형 발전기를 설계, 해석하였으며 제안된 기기는 실제로 제작되어 검증되었다. 제작의 편의성과 가격을 고려하여 축 방향으로 자화된 자석과 폴 슈의 이동자 구조를 적용하였다. 역기전력과 디텐트력은 유한요소법을 이용하여 해석되었고, 디텐트력의 저감을 위해 극 피치 조정법을 적용하였다. 실험과정 중 발생한 기구적인 문제점을 해결하기 위해 공극을 2[mm]로 증가 시켰으며, 이 구조는 재해석되어 실험값과 비교 하였다.

## [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 (NOR pie 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 Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition (EV S-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, S un-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, S un-Ki Hong, Dong-Hyeok Cho, "Design of Tubular-type Linear Generator for Free-piston Engine," LDIA2005.