# 프리피스톤 엔진용 1kW급 리니어 발전기의 효율 특성 연구

최동민*, 임희수**, 노태석***, 오시덕****
(주)효성 중공업연구소*

# An Efficiency Characteristic of 1kW Linear Generator for Free-Pision Engine

Dong-Min Choi*, Hee-Su Lim**, Tae-Seok Noh***, Si-Duck Oh****
Power & Industrial R&D Center, Hyosung Corp.

**Abstract** - 프리피스톤 기관은 크랭크가 없는 엔진을 동력원으로 리니어 발전기를 구동시켜 전기에너지를 생성하는 시스템으로 기존 왕복 구동식 기관에 비해 기계적 손실이 작고, 팽창 에너지를 최대한 활용할 수 있는 고효율 기관으로 평가되고 있다. 또한 프리피스톤 기관은 가솔린, 디젤, 수소, 천연가스와 같은 청정 연료를 사용할 수 있기 때문에, 최근 에너지 수급 문제 및 대체 에너지원으로 활용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 프리피스톤 기관에 적용되는 리니어 발전기의 경우 기존 회전형 발전기보다 효율은 다소 떨어지는 단점은 있으나, 동력 변환을 하지 않는 리니어 엔진에 적용할 경우에는 효율적 이득을 볼 수 있다. 본 논문에서는 리니어 발전기의 성능 측정을 위한 시험 장치를 구성하고, 프리피스톤용 기관에 적용되는 평판형 및 원통형 타입의 리니어 발전기의 손실 및 효율 특성을 비교하였다.

## 1. 서 론

프리피스톤 엔진용 리니어 발전시스템은 그림 1과 같이 프리피스톤 엔진, 리니어 발전기, 제어시스템으로 구성된다. 크랭크 기구가 없어 기계적 손실이 왕복 구동식 기관에 비해 작고 피스톤의 행정길이가 구속되지 않아 실린더내 압력을 최대한 팽창일로 전환시킬 수 있으며 피스톤 관성력에 의한 압축 증대 효과를 얻을 수 있다. 또한 구조가 간단하고 소형이므로 고비출력의 실현이 가능하며 가솔린 또는 디젤, 수소, 천연가스 등과 같은 청정 연료를 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

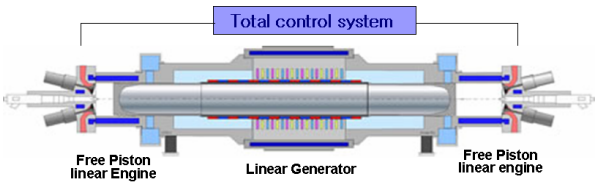


그림 1. 프리피스톤 엔진 리니어 발전시스템

프리피스톤 기관은 기관 구조상 우수한 효율 특성을 가지고 있어, 내연기관 초기부터 연구가 진행되었으며, 유압 발생장치 및 가스터빈등에 활용된 바 있다. 최근에는 하이브리드 자동차와 관련된 초저공해 자동차 분야와 아울러 열병합 분산발전용으로 그 범위가 확대되어 연구가 진행되고 있으며, 운전의 안정성 및 제어기술 확보의 어려움으로 아직 상용화 단계에는 이르지 못하고 있다.

프리피스톤 엔진용 리니어 발전시스템의 리니어 발전기는 엔진의 기계적 에너지를 전기에너지로 변환시키는 장치로써 엔진의 구동시 발생하는 진동에 대한 강한 내구성과 시스템의 효율을 높이기 위한 발전기 자체의 고효율이 요구된다. 본 논문에서는 프리피스톤 엔진용 리니어 발전시스템에 적용되는 평판형, 원통형 리니어 발전기를 설계·제작하여 시험장치를 구성하고 그 성능을 검증하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 프리피스톤 엔진용 리니어 발전기의 설계

프리피스톤 엔진용 리니어 발전기는 프리피스톤 시스템의 고효율화를 위한 발전기 자체의 발전효율 상승과 고속 및 장시간 운전을 위해 기구적 안정성이 확보되어야 한다. 리니어 발전기로 동작 가능한 전기기기는 매우 다양한 형태로 제작이 가능하다. 직류기의 경우 정류자와 브러쉬의 존재로 인해 기기의 크기가 커지며 브러쉬 마모에 의한 내구성 문제와 스파크 및 성능 감소 등의 문제가 있으며, 권선 계자형 동기기도 슬링링이 요구되어 직류기와 비슷한 단점을 가지게 된다. 유도기는 제작성이 뛰어나고 기구적 안정성이 높으나 기기 특성상 동작 효율이 낮아 엔진 시스템에는 적합하지 않다는 단점을 가지고 있다. Transverse-Flux 기기는 이론적으로 구조적 특성상 철심의 경제적 이용으로 인해 효율이 높고 기기 크기가 작으나, 실제 제작시 소형으로 제작할 경우 그 구조가 복잡하여 제작성이 떨어지고 제작 비용이 상승하며 이론적 성능을 현실적으로 발휘하지 못하는 문제점이 있다. [1-2] 따라서, 본 논문에서는 다양한 형태의 기기 특성을 검토한 결과 역률 특성이 우수하며 기기 동작 효율도 높은 영구자석 평판형, 원통형 발전기를 선정하였으며, 효율 향상을 위해 전기자 철심 구조를 채택하고 표면 부착형 영구자석 이동자를 적용하였다.

#### 2.1.1 평판형 리니어 발전기

그림 2는 평판형 선형 발전기의 개념도이다.

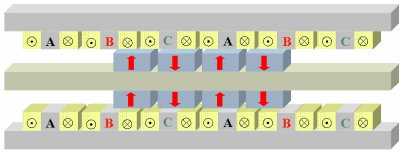

그림 2. 평판형 리니어 발전기의 개념도

그림에서 보는 것과 같이 고정자는 A,B,C상의 권선이 3세트로 구성되어 있으며, 9개의 치에 3상의 권선이 A,B,C상의 순서로 감겨져 있는 구조로 되어 있다. 발전기의 고출력을 위해 양측식 모델의 구조를 적용하였으다. [3]

#### 2.1.2 원통형 리니어 발전기

그림 3은 원통형 리니어 발전기의 기본 모델이다.

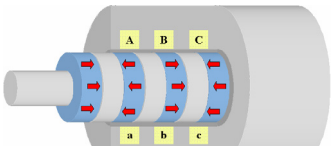


그림 3. 원통형 리니어 발전기의 개념도

3상 고리형 권선이 축을 따라 배치된 형태로 고정자가 구성이 되며, 효율 증가를 위해 권선 사이에는 고정자 철심이 들어가며 원통형 철심 구조가 자로를 형성한다. 이동자에는 자화된 고리형 자석이 적용되었다. 자석 사이에는 철심 자극이 배치되어 반경방향 자극을 형성하게 되며, 평판형과 마찬가지로 2극 자석 모듈 2개가 이동자에 적용되고 고정자에는 3상 권선 3세트를 적용하였다. [4]

프리피스톤 엔진의 사양에 적합하도록 설계된 평판형과 원통형 발전기의 설계 사양은 표 1과 같다.

표 1. 평판형/원통형 발전기의 설계 사양

| 형태 | 출력 | 극/상수 | 스트로크 | 주파수 | 선간최대 출력전압 |
|---|---|---|---|---|---|
| 평판형<br>원통형 | 1[kW] | 2극 3상 | 72[mm] | 60[Hz] | 300[V] |

### 2.2 리니어 발전기의 성능 측정

#### 2.2.1 시험 장치의 구성

프리피스톤 엔진용 리니어 발전시스템은 동력을 얻는 프리 피스톤 엔

진, 리니어 발전기, 전력변환장치로 구성된다. 평판형 및 원통형 발전기와 엔진을 연계하기 전에 리니어 발전기 자체의 성능을 검증하기 위하여 그림 4와 같이 프리피스톤 엔진 대신 PM전동기를 구동원으로 하여 리니어 발전기의 출력, 효율, 손실측정용 시험장치를 설계/제작하였다.

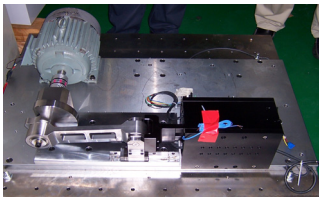

그림 4. 시험 장치의 구성

시험장치는 엔진과 리니어 발전기의 연계조건을 최대한 유사하게 모의하기 위해 회전형 모터와 크랭크장치로 구성하였으며, 커플링과 복열 앵귤러 볼베어링, 에어 댐퍼를 사용하여, 성능 측정시 모터와 크랭크 샤프트의 Alignment 불균형 및 진동으로 인한 문제를 최소화하였다.

### 2.2.2 시험 절차

프리피스톤 엔진용 리니어 발전기의 성능을 판단하기 위해 인버터를 이용하여 PM전동기를 구동시키고, 부하 저항을 연결하여 각 속도별 리니어 발전기의 성능을 측정하였으며, 그 절차는 그림 5와 같다.

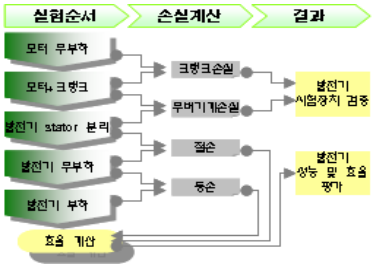


그림 5. 리니어 발전기 성능 측정 절차

크랭크손실 및 무버가이드에 의한 기계손은 프리피스톤 엔진과 리니어 발전기의 연계시에는 발생하지 않으므로 리니어 발전기의 손실 및 효율 계산시에는 무시하였다.

### 2.3 손실 및 효율 특성

위에서 제작한 시험장치를 이용하여 30Hz, 45Hz, 57Hz, 60Hz 속도 영역에 대하여 평판형과 원통형 리니어 발전기의 손실 및 효율을 측정하였다.

### 2.3.1 손실 특성 비교

프리피스톤용 평판형 및 원통형 리니어 발전기의 손실 특성은 그림 6, 7과 같다.

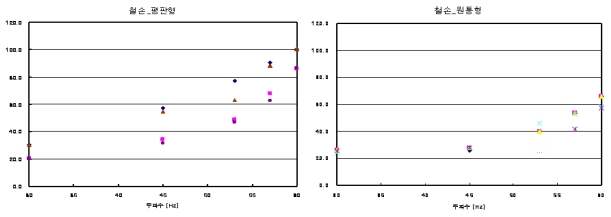


그림 6. 평판형/원통형 리니어 발전기의 철손

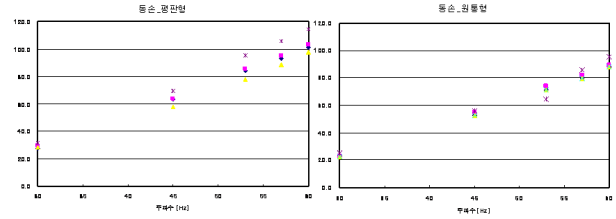


그림 7. 평판형/원통형 리니어 발전기의 동손

그림 6과 7에서 보는 것과 같이 손실(철손 및 동손)은 평판형 리니어 발전기가 원통형 발전기보다 크게 나타났다. 평판형의 경우 발전기의 설계시 원통형보다 코일의 턴수가 많게 설계 되어 있어 원통형발전기보다 상대적으로 손실이 크게 나타난 것으로 판단된다.

### 2.3.2 효율 특성 비교

평판형 및 원통형 리니어 발전기의 효율 특성은 그림 8과 같다.

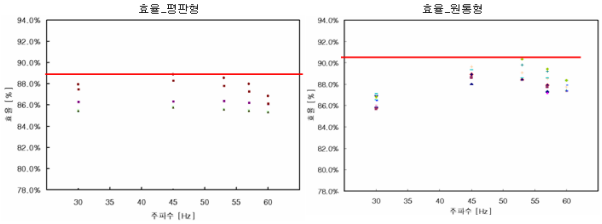


그림 8. 평판형/원통형 리니어 발전기의 효율

그림 8에서 평판형의 경우에는 최대 89%정도의 효율 특성을 보였으며, 원통형의 경우에는 최대 91%의 효율 특성을 보였다. 그림 8에서는 속도가 증가(주파수 상승)함에 따라 효율은 상승하다가 다시 감소하는 추세를 보였으나, 이는 속도 증가에 따라 부하저항의 온도가 높아져 상대적으로 부하저항의 값이 상승함에 따라 발전기의 출력이 낮아진 것으로 판단된다. 따라서, 부하저항의 온도상승에 따른 보상을 시행할 경우 효율 특성은 속도 증가에 따라 상승할 것으로 예상된다.

부하저항의 온도상승에 따른 보상은 아직 시행하지 않았으나, 평판형과 원통형 리니어 발전기의 효율 측정 조건 및 측정 시점이 동일함을 감안할 때, 평판형 리니어발전기보다는 원통형 리니어 발전기의 효율 특성이 더 좋을 것으로 판단된다.

### 2.4 프리피스톤 엔진-리니어 발전기의 연계

발전기 성능측정용 시험장치를 이용한 출력파형이 엔진-리니어 발전기 연계시에도 동일한 출력 파형 특성을 보이는지 여부를 판단하기 위하여 그림 9와 같이 전압 파형에 대하여 비교를 수행하였다.

그림 9. 전압 파형의 비교

그림에서 보는 바와 같이 엔진-발전기 연계시에도 발전기 단독테스트 결과와 파형 특성이 동일함을 확인할 수 있다. 이를 통해 엔진-발전기 연계시에도 리니어 발전기 단독 테스트를 통해 얻어진 손실 및 효율 특성을 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 프리피스톤 엔진용 리니어 발전시스템 개발을 위해 리니어 발전기의 타입별 손실 및 효율 특성에 대한 검토를 수행하였으며, 프리피스톤 엔진-발전기의 연계를 통해 프리피스톤 엔진용 리니어 발전시스템 개발의 타당성을 검토하였다. 현재는 1kW급 프리피스톤 엔진용 리니어 발전시스템 개발을 위해 프리피스톤 엔진-리니어발전기-전력변환기를 연계하여 테스트를 수행하고 있으며, 분산발전용 5kW급 프리피스톤 엔진용 리니어 발전시스템을 개발하고 있다.


## 감 사 의 글

본 연구(논문)은 고효율 수소에너지 제조·저장·이용 기술개발 사업단의 21세기 프론티어 연구개발사업 일환으로 수행되었습니다.


## [참 고 문 헌]


[1] William R. Cawthorne, "Optimization of a Brushless Permanent Magnet Magnet Linear Alternator for Use with a Linear Internal Combustion Engine", West Virginia University, 1999

[2] I. Boldea, S.A. Nasar, "Linear Electric Actuators and Generators", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, pp.712-717, September 1999

[3] Ho-Yong Choi, Jae-Won Lim, Hyun-Kyo Choi, Sun-Ki Hong, Dong-Hyeok Cho, Hee-Su Lim, "Development of Flat-type Linear Generator for Free-Piston Engin", LIDA, pp.322-325, 2005

[4] Ho-Yong Choi, Jae-Won Lim, Hyun-Kyo Choi, Sun-Ki Hong, Dong-Hyeok Cho, "Design of tubular-type linear generator for free-piston engin", LIDA, pp.379-382, 2005