

Free-Piston 엔진용 평판형 선형 발전기를 이용한 기동모드 해석

論 文

57-6-9

Starting Mode Analysis of Flat-type Linear Generator for Free-Piston Engine

金榮旭[†] · 林栽元^{*} · 鄭汝教^{**}

(Young-Wook Kim · Jaewon Lim · Hyun-Kyo Jung)

Abstract - Free-piston engine system is a new type energy converter which uses a linear motion of piston by using linear generator. In free-piston engine system, the piston is not connected to a crank-shaft. The major advantages of free-piston engine system are high efficiency and low mechanical loss from the absence of motion conversion devices. Linear generator of free-piston engine system is used as generator and starting motor. In design step, considering of back-emf and detent force characteristics for generating mode and thrust and control characteristics for starting mode is needed. In this research, generating mode of flat-type linear generator and tubular-type linear generator is analyzed by finite element analysis method and starting mode of both type linear generators is analyzed by using capability curve. Capability curve is plotted from electrical parameters of both type linear generator and motion profile is calculated from mechanical parameters.

Key Words : Free-piston engine, Linear generator, Starting mode, Capability curve

1. 서 론

free-piston 엔진 시스템은 분산 전원용으로 개발되고 있는 선형 수소 엔진 발전 시스템이다. 이 시스템은 그림 1에 나타낸 것과 같이 중앙의 피스톤 로드와 양쪽으로 연결된 두 개의 피스톤과 연소실로 구성되어 있으며 양쪽의 연소실에서는 이동자의 왕복운동에 따라 번갈아 연료의 압축, 폭발이 일어나며 이동자를 움직이는 추진력이 발생한다. 이 free-piston 엔진 중앙에는 선형 발전기가 위치하여 피스톤의 직선 왕복 운동을 운동변환 장치 없이 발전에 이용하게 되는데 기존 회전형 엔진과 비교하여 크랭크 축, 커넥팅 로드와 같은 운동변환장치를 사용하지 않기 때문에 에너지 변환 효율이 높고 구조가 간단하며 흡,배기 상태에 따른 연소실 내의 상황에 따라 최적 효율로 연소 가능한 것이 장점이다.[1-3] 이 free-piston 엔진은 정상 운전상태에서는 크랭크 축의 관성으로 연소실 안의 연료와 공기를 압축할 수 있지만, 초기 정지 상태에서는 연소가 정상적으로 이루어지지 못하므로 엔진이 정상운전할 수 있는 폭발력을 얻지 못한다.

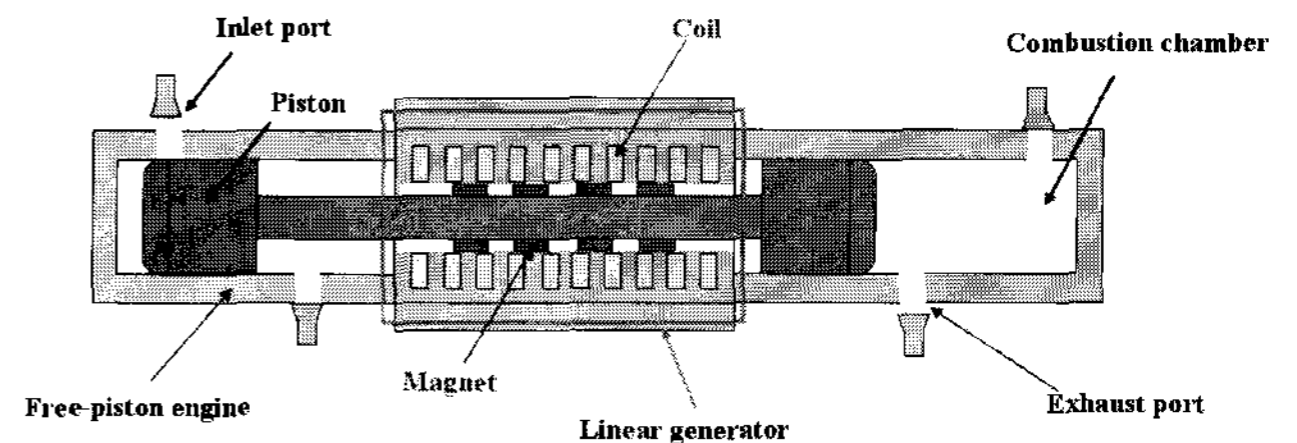


그림 1 free-piston 엔진 시스템
Fig. 1 Free-piston engine system

본 연구에서는 free-piston 엔진에서 사용하는 평판형 선형 발전기를 기동 시에 전동 모드로 구동하여 엔진을 기동시키고, 엔진이 정상 운전상태에 도달하면 발전기로 사용하려 한다. 평판형 선형 발전기의 전동 모드 기동 시에 필요한 속도와 힘을 만족시킬 수 있는지 결정하기 위해서 기기가 낼 수 있는 속도와 힘의 관계를 나타내는 능력곡선을 정의하였고, 요구되는 속도와 힘의 관계를 나타내는 운전 궤적에 의한 속도-추력곡선을 정의하여 이 두 곡선의 비교를 통해 운전 가능성을 결정하였다.

2. 평판형 선형 발전기

기동 연구를 적용할 평판형 선형 발전기의 개념도는 그림 2와 같다. 위 아래 고정자의 치에는 차례로 A, B, C 권선이 집중권 형태로 감겨 있으며 이동자는 양측식으로 2극 자석 모듈이 두 세트에 구성된 총 4개의 극을 가진 구조를 채택하였다.[4-6]

[†] 교신저자, 正會員 : (주)호성 중공업 연구소 연구원

E-mail : dangdangboy@hyosung.com

^{*} 正會員 : 서울대학교 전기컴퓨터 공학부 박사과정

^{**} 正會員 : 서울대학교 전기컴퓨터 공학부 정교수

接受日字 : 2008年 1月 26日

最終完了 : 2008年 4月 14日

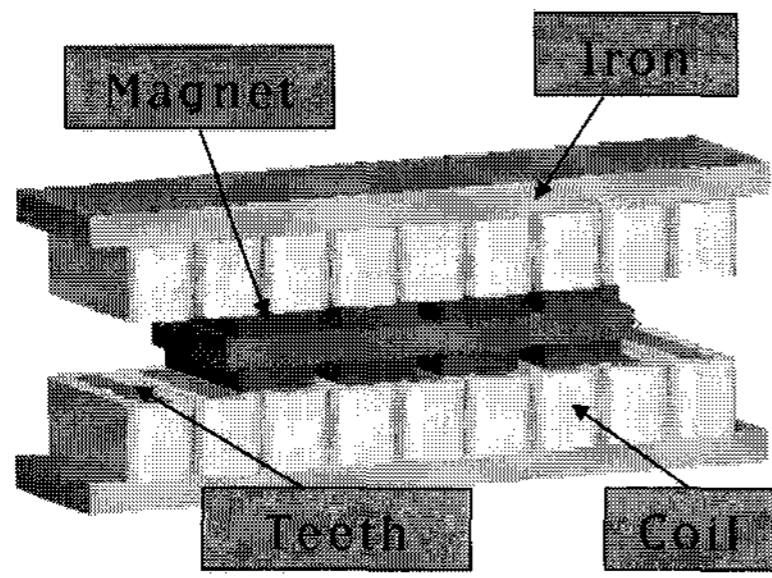


그림 2 평판형 선형 발전기
Fig. 2 Flat-type linear generator

표 1은 본 연구의 선형 발전기의 설계사양을 보여준다. 정격 출력은 1[kW]이고, 스트로크 72[mm]은 free-piston 엔진 스트로크에 의해 결정되며, 동작 주파수 30[Hz]는 수소엔진의 동작 주파수에 의해 결정된다.[6]

표 1 선형 발전기의 설계사양
Table 1 Specifications of the linear generator

출력	1[kW]
극/상	2극/3상
스트로크	72[mm]
주파수	30[Hz]
최대출력전압	300[V]

2.1 선형 발전기의 전동기 모드 해석

기동특성 해석을 위해서 먼저 기기의 능력 곡선(최대추력 vs 속도)과 운전 궤적에 의한 속도-추력 곡선(필요추력 vs 속도)를 정의한다. 기기의 능력 곡선은 기기의 전압과 전류 제한에 따라 기기가 낼 수 있는 최대 추력과 속도를 나타낸 곡선이고, 운전 궤적에 의한 속도-추력 곡선은 free-piston 엔진을 기동시키기 위해 필요한 운전 궤적을 정의 한 뒤 그 운전 궤적에 따라 기기가 동작하기 위해 필요한 추력과 속도를 나타낸 것이다. 이 능력 곡선과 운전 궤적에 의한 속도-추력 곡선을 비교하여 능력곡선이 운전 궤적에 의한 속도-추력 곡선보다 커야 충분한 추력을 낼 수 있다.

2.1.1 능력 곡선

선형 기기에서 d-q 전압 방정식은 다음과 같다.

$$V_d = R_s i_d + L_d i_d - \left(\frac{\pi}{\tau}\right) v L_q i_q \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V_q &= R_s i_q + L_q i_q + \left(\frac{\pi}{\tau}\right) v L_d i_d + \left(\frac{\pi}{\tau}\right) v \cdot \lambda_f \\ &= R_s i_q + L_q i_q + \left(\frac{\pi}{\tau}\right) v L_d i_d + K_e v \end{aligned} \quad (2)$$

입력단의 전압과 전류의 제한이 다음과 같이 정해져 있고

$$V_d^2 + V_q^2 \leq V_{\max}^2 \quad (3)$$

$$i_d^2 + i_q^2 \leq I_{\max}^2 \quad (4)$$

이동자의 구조를 생각할 때, 본 연구에서는 $i_d=0$ 제어를 적용한다. 이때 추력식은 (5)와 같다.

$$F = m \frac{dv(t)}{dt} + Bv(t) + F_l = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \lambda_f \cdot i_q = \frac{3}{2} \cdot K_e \cdot i_q \quad (5)$$

$i_d=0$ 제어를 한다면 (1)과 (2)는 다음과 같이 정리된다.

$$V_d = -\left(\frac{\pi}{\tau}\right) v L_q i_q \quad (6)$$

$$V_q = R_s i_q + L_q \dot{i}_q + K_e v \quad (7)$$

추력식 (5)를 (6)과 (7)에 대입하면 다음과 같이 정리된다.

$$V_d = -\frac{2F_e}{3K_e} L_q v \left(\frac{\pi}{\tau}\right) \quad (8)$$

$$V_q = \frac{2F_e}{3K_e} R_s + K_e v + \frac{2L_q}{3K_e} \left(m \frac{da}{dt} + Ba\right) \quad (9)$$

얻어진 (8)과 (9)를 전압 제한식 (3)에 대입하면 다음과 같다.

$$\left\{ \frac{2F_e}{3K_e} L_q v \left(\frac{\pi}{\tau}\right) \right\}^2 + \left\{ \frac{2F_e}{3K_e} R_s + K_e v + \frac{2L_q}{3K_e} \left(m \frac{da}{dt} + Ba\right) \right\}^2 \leq V_{\max}^2 \quad (10)$$

이것을 F_e 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\left[\left\{ \frac{2L_q}{3K_e} v \left(\frac{\pi}{\tau}\right) \right\}^2 + \left(\frac{2R_s}{3K_e} \right)^2 \right] F_e^2 \\ &+ 2 \left(\frac{2R_s}{3K_e} \right) \left\{ K_e v + \frac{2L_q}{3K_e} \left(m \frac{da}{dt} + Ba\right) \right\} F_e \\ &+ \left\{ K_e v + \frac{2L_q}{3K_e} \left(m \frac{da}{dt} + Ba\right) \right\}^2 - V_{\max}^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (11)$$

(11)을 F_e 에 대한 2차 방정식으로 보고, 근의 공식을 이용하면 다음과 같은 전압 제한을 고려한 최대 추력식을 얻는다.

$$F_{e,max} = \frac{3}{2} K_e \frac{C_1 + \sqrt{C_2 - C_3}}{R_s^2 + \left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2 L_q^2 v^2}$$

$$C_1 \equiv -R_s \left\{ K_e v + \left(\frac{2L_q}{3K_e}\right) \left(m \frac{da}{dt} + Ba\right) \right\}$$

$$C_2 \equiv \left\{ \left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2 L_q^2 v^2 + R_s^2 \right\} v_{max}^2$$

$$C_3 \equiv \left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2 L_q^2 v^2 \left\{ K_e v + \left(\frac{2L_q}{3K_e}\right) \left(m \frac{da}{dt} + Ba\right) \right\}^2 \quad (12)$$

이번에는 전류제한에 의한 최대 추력을 구한다. (5)에서 전류가 I_{max} 일때 최대 추력식은 다음과 같다.

$$F_{e,max} = \frac{3}{2} K_e I_{max} \quad (13)$$

이제 전압제한을 고려한 최대 추력식 (12)와 전류제한을 고려한 최대 추력식 (13)을 합치면 다음과 같다.

$$F_{e,max} = \frac{3}{2} K_e \min \left\{ \frac{C_1 + \sqrt{C_2 - C_3}}{R_s^2 + \left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2 L_q^2 v^2}, I_{max} \right\} \quad (14)$$

최대 추력식 (14)는 전압제한과 전류제한 모두를 포함하는 식이다. 식(14)를 속도에 따라 그린 것이 기기의 능력 곡선이 된다.[7] 그림 5에서 (14)에 의한 능력곡선을 나타내었다.

2.1.2 능력곡선과 운전궤적에 의한 속도-추력 곡선

free-piston 엔진의 운전 주파수는 30[Hz]이지만, 4[Hz] 정도부터 정상 운전이 가능하기 때문에 약 4.1[Hz]로 선형 발전기를 통해 기동시키려 한다. 이때 4.1[Hz]로 기동하기 위한 속도-시간 궤적과 가속도-시간 궤적을 결정하게 되는데, 본 논문에서는 스토르크가 짧아 등가속도 구간이 짧은 것을 감안하여 표 2와 같이 가가속도 및 가속도를 결정하였다. 표 2의 운전조건을 고려한 속도-시간 궤적은 그림 3에, 가속도-시간 궤적은 그림 4에 나타내었다.

표 2 기동모터로서 운전조건

Table 2 Operating constraints of starting motor

Index	Value
J _{max} [m/s ³]	1951
a _{max} [m/s ²]	44.1
v _{max} [m/s]	1.36
Δt ₁ [ms]	22.6
Δt ₂ [ms]	7.8

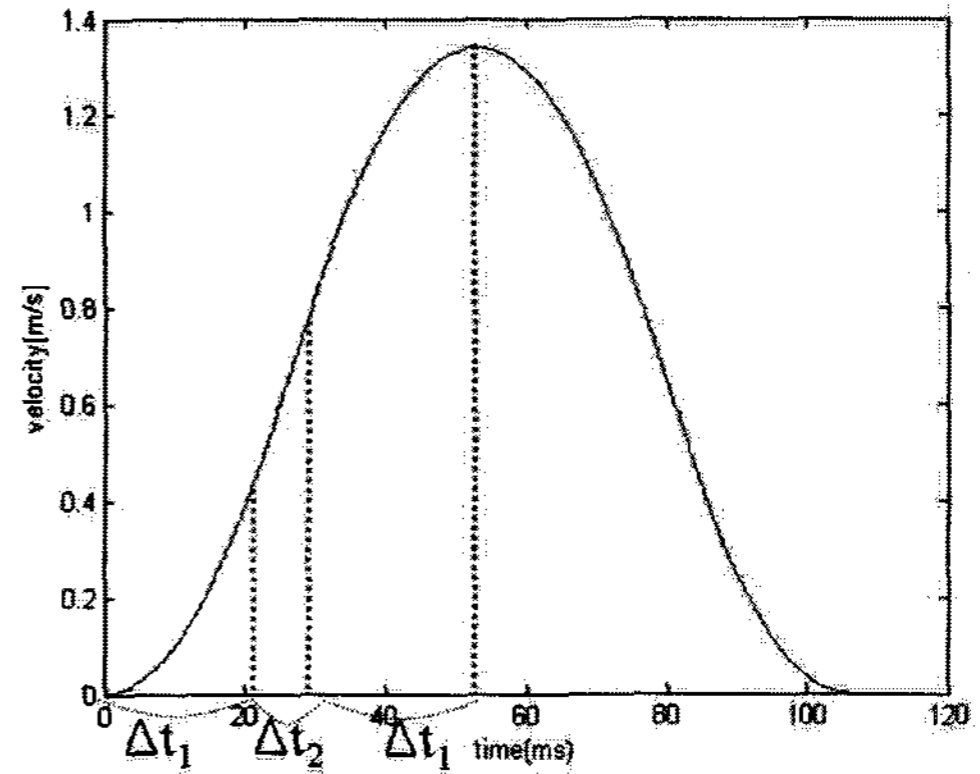


그림 3 기동시에 요구되는 속도 궤적
Fig. 3 Required velocity profile

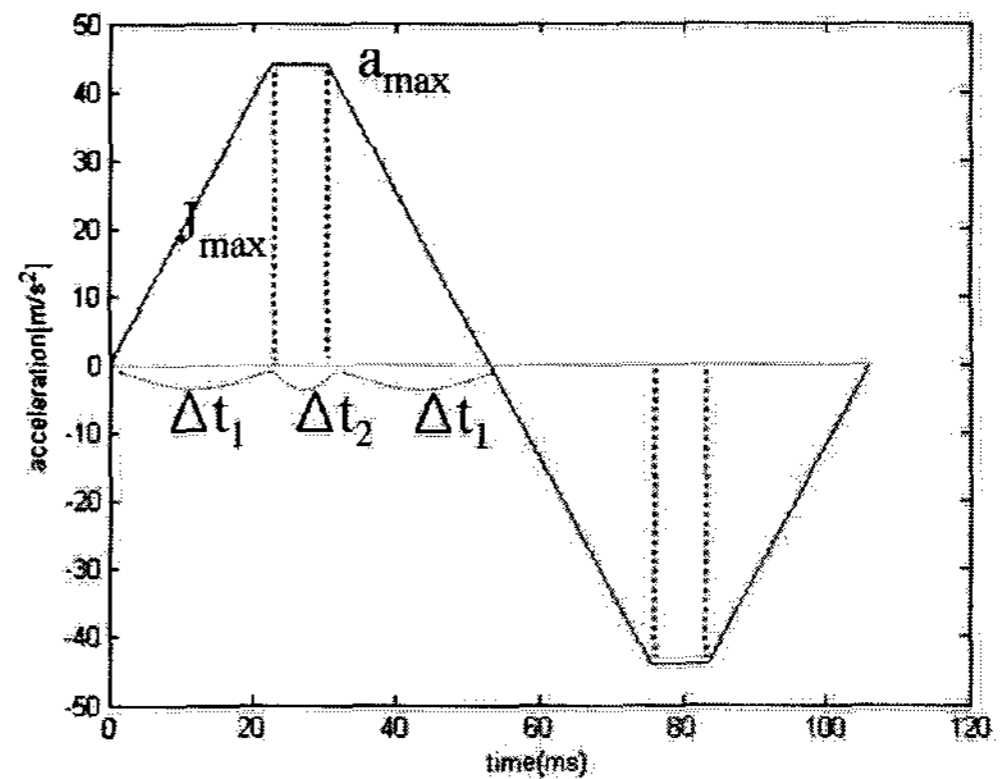


그림 4 기동시에 요구되는 가속도 궤적
Fig. 4 Required acceleration profile

이러한 속도로 운전하기 위해서 필요한 추력은 다음 식 (15)를 통해 그려진다.

$$F_e(t) = \begin{cases} m \sqrt{\frac{2a_{max}}{\Delta t_1}} v(t) + Bv(t) + F_l & \left(0 < v \leq \frac{a_{max}}{2} \Delta t_1 \right) \\ ma_{max} + Bv(t) + F_l & \left(\frac{a_{max}}{2} \Delta t_1 < v \leq a_{max} \left(\frac{\Delta t_1}{2} + \Delta t_2 \right) \right) \\ m \sqrt{\frac{2a_{max}}{\Delta t_1}} (v_{max} - v) + Bv(t) + F_l & \left(a_{max} \left(\frac{\Delta t_1}{2} + \Delta t_2 \right) < v \leq v_{max} \right) \end{cases} \quad (15)$$

이때 질량과 마찰력, 공기 저항 등의 상수가 주어지면, 요구되는 속도 제적대로 움직이기 위해 요구되는 추력을 구할 수 있는데, 평판형 선형 발전기의 상수는 표 3과 같고, (15)를 통해 그려지는 필요한 추력은 그림 5와 같다.

표 3 평판형 발전기의 기기상수

Table 3 Mechanical constant of linear generator

Index	Value
$R_s[\Omega]$	1.09
$L_s[mH]$	1.04
$\tau[mm]$	36
$K_e[V \cdot sec/m]$	25.54
$m[kg]$	1.12
$B[N \cdot sec/m]$	15
$F_l[N]$	12
$V_{max}[V]$	300
$I_{max}[A]$	6

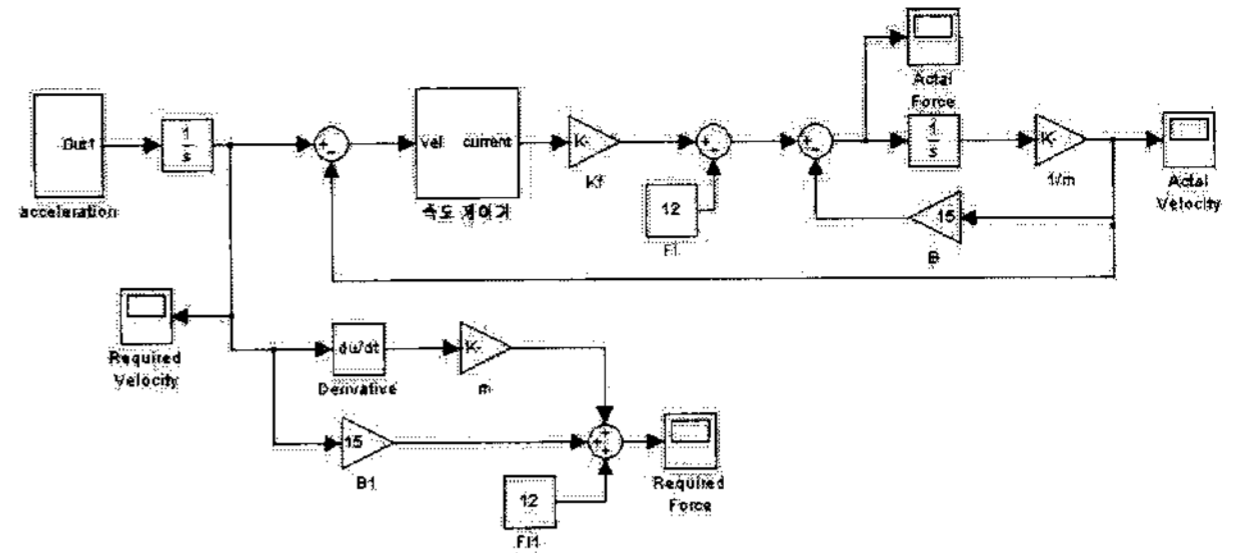


그림 6 제어 가능성 평가 블록도

Fig. 6 Block diagram to evaluate controllability

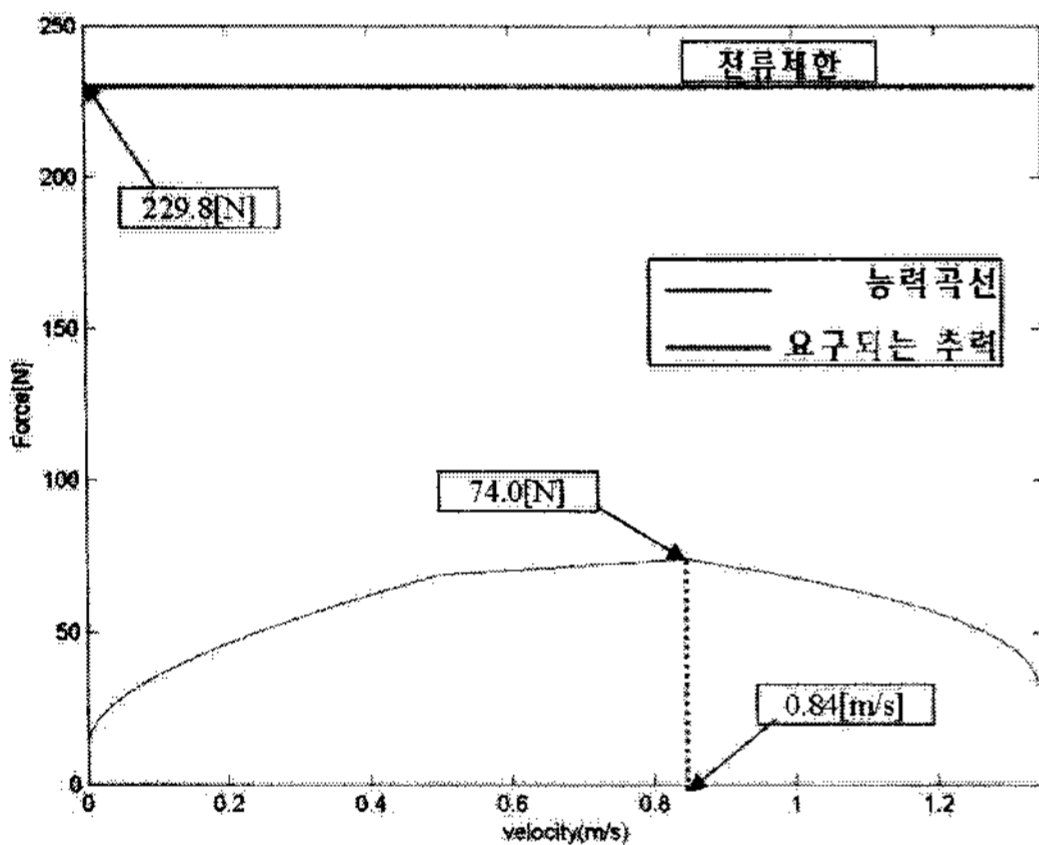


그림 5 능력곡선과 요구되는 추력
Fig. 5 Capability curve and required force

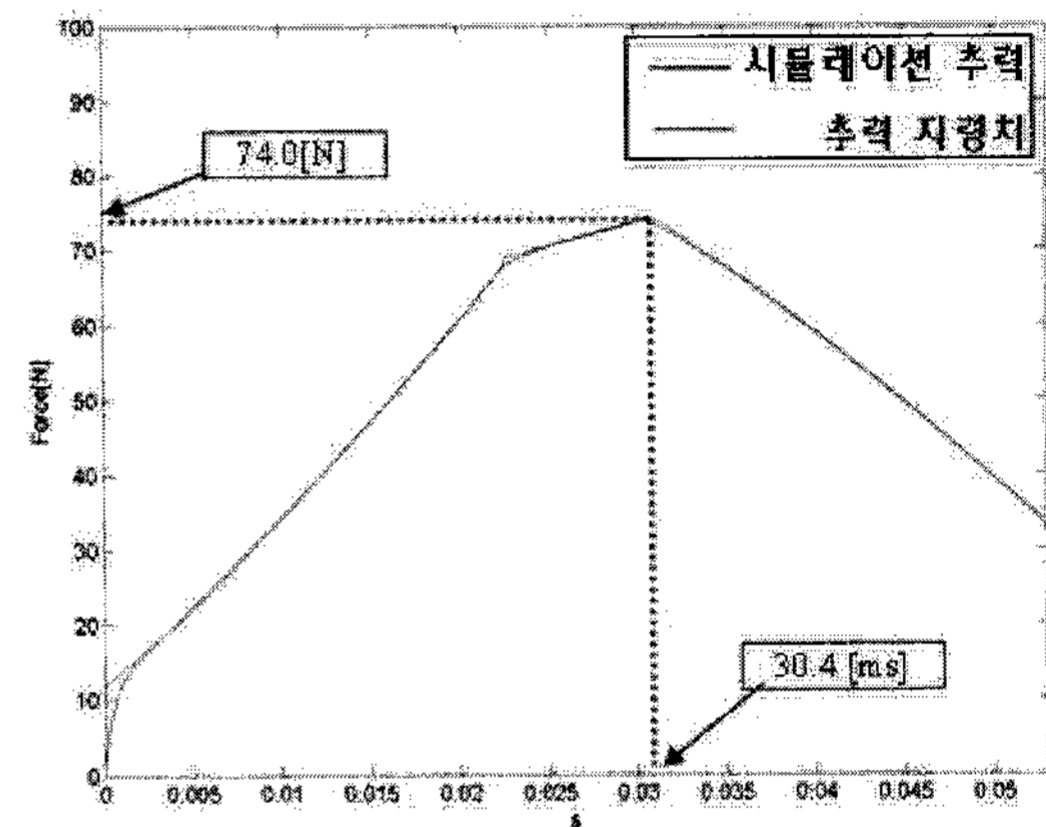


그림 7 추력제어 특성
Fig. 7 thrust control characteristic

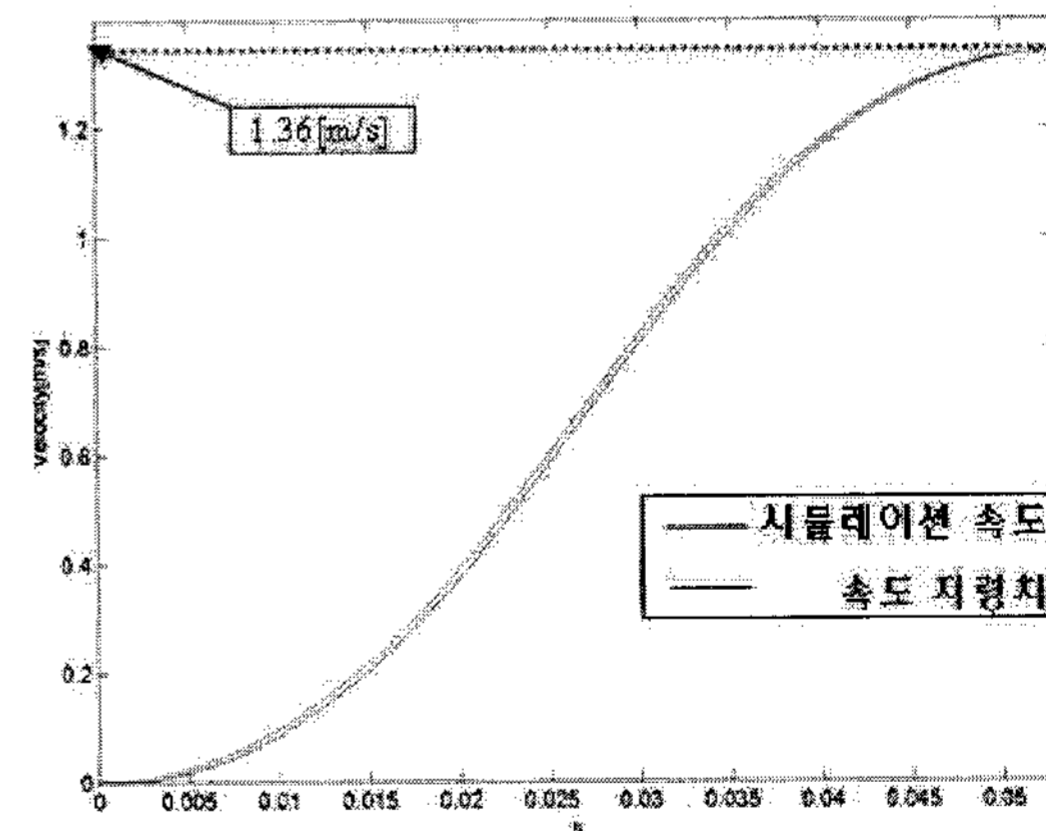


그림 8 속도제어 특성
Fig. 8 velocity control characteristic

그림 5의 그래프를 분석하면 먼저 식 (14)에 의한 능력곡선에서 전류의 제한에 의해 능력곡선이 직선으로 나타나는 것을 알 수 있고, 모든 속도 영역에서 free-piston 엔진을 기동시키기에 충분한 추력을 낼 수 있는 것을 알 수 있다. 이제 제어 특성을 알아보기 위하여 속도제어기를 꾸미고, MATLAB SIMULINK 통해 선형 발전기를 모델링 하였으며 그림 6에 제어 블록 다이어그램을 나타내었다. 시뮬레이션 결과 시간에 따른 추력 그래프는 그림 7과 같고 시간에 따라 실제 추력이 요구되는 추력을 잘 따라 갈 것으로 예상된다. 시간에 따른 속도 시뮬레이션 결과는 그림 8과 같으며 모든 시간 영역에서 실제 속도가 속도 지령을 잘 따라 갈 것으로 예상된다.

2.1.3 전동 모드를 이용한 기동 실험 결과

제작된 free-piston 엔진 시스템은 그림 9와 같다. 그림 10,11은 제작된 free-piston 엔진 시스템의 기동 실험결과를 나타낸다. Ch1은 이동자 위치정보, Ch2는 U상, Ch3는 V상, Ch4는 W상 전류를 의미한다. 전류 지령치를 7[A]로 주었을 때 약 8[Hz]의 주파수로 이동자가 움직이는 것을 측정하였고, 전류 지령치를 8[A]로 주었을 때 약 10[Hz]의 주파수

로 운동하는 것을 측정하였다. 측정된 결과 본 연구에서 사용된 평판형 선형 발전기로 free-piston 엔진을 충분히 기동할 수 있음을 확인할 수 있었다.

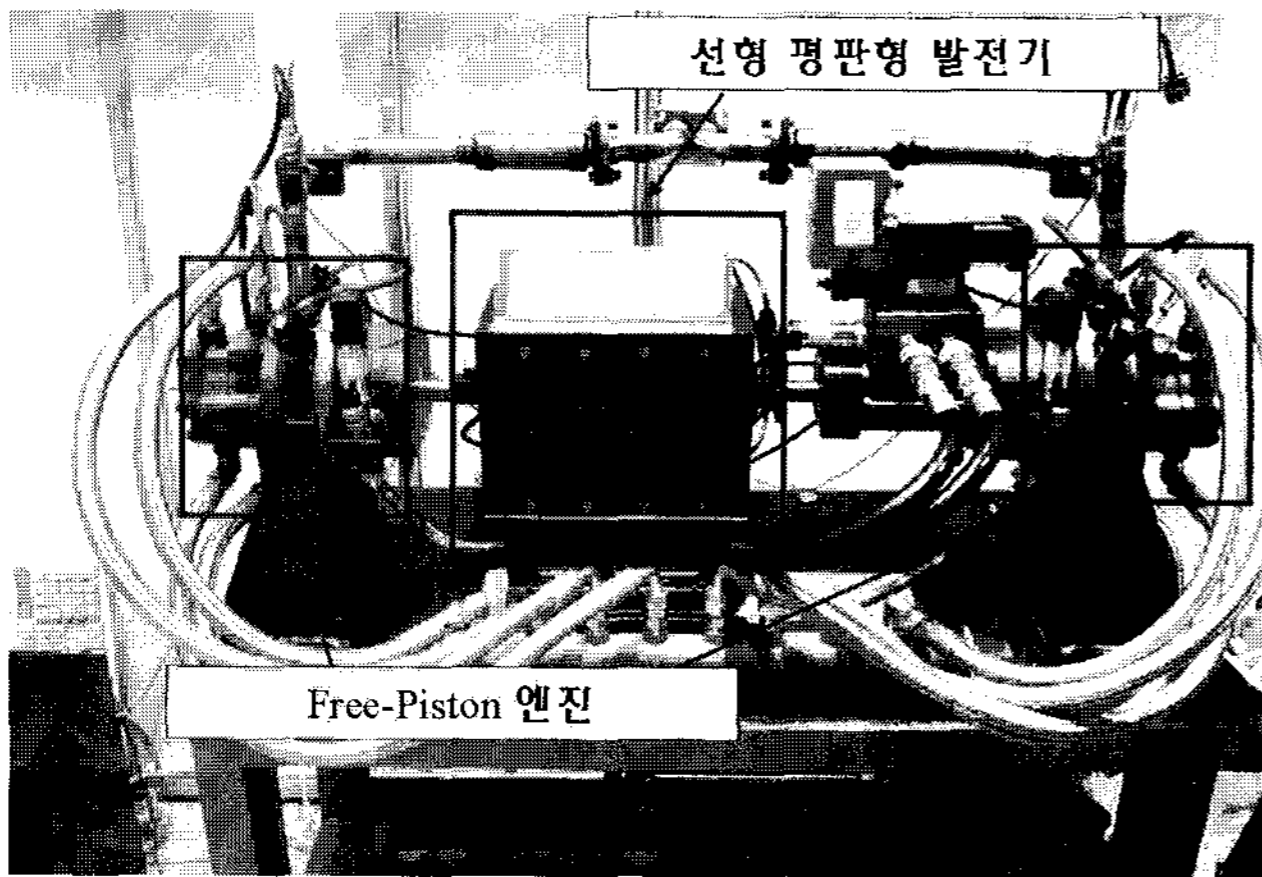


그림 9 실제 제작된 free-piston 엔진 시스템
Fig. 9 Manufactured free-piston engine system

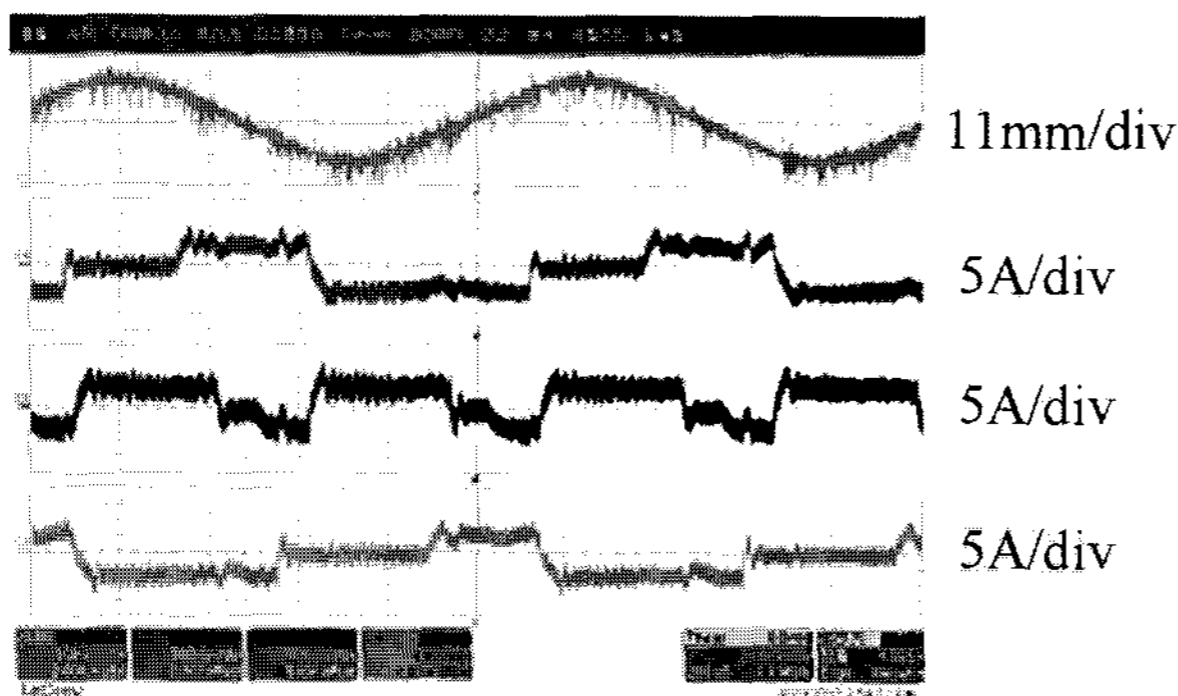


그림 10 전류 지령치 7[A]일 때의 위치, 전류파형
Fig. 10 Position and current waveform with current(7[A])

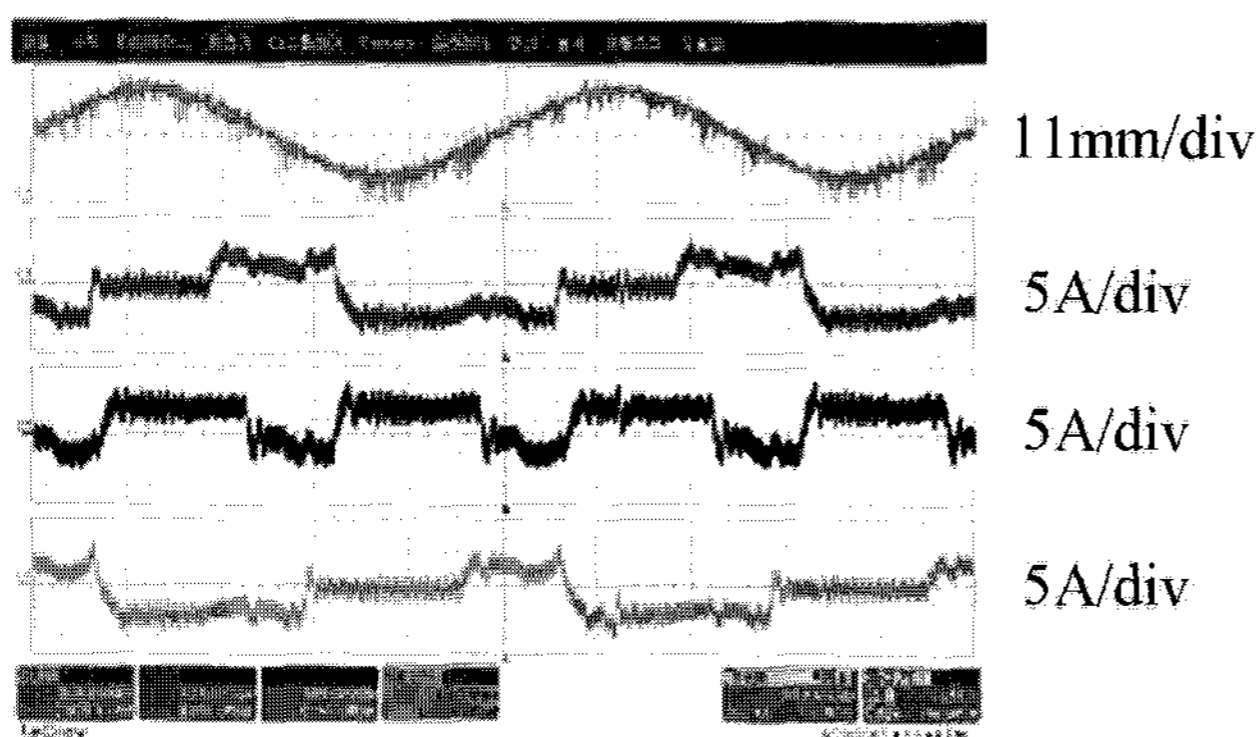


그림 11 전류 지령치 10[A]일 때의 위치, 전류파형
Fig. 11 Position and current waveform with current(10[A])

3. 결 론

본 연구에서는 기동특성을 고려하여 free-piston 엔진용 평판형 선형 발전기를 이용한 기동을 해석하기 위해 기기의 능력 곡선과 운전제적에 의한 속도-추력 곡선을 비교하여 나타내었다. 평판형 선형 발전기가 요구하는 최대 추력은 74[N]으로 발전기가 낼 수 있는 최대 추력 229[N] 보다 155[N] 여유가 있어 충분히 기동 가능할 것으로 생각되며 제어 특성을 확인한 결과 실시간으로 추력과 속도 지령치를 잘 따라 갈 것으로 예측되었다. 실제 제작된 free-piston 엔진 시스템으로 실험한 결과 본 연구에서 사용된 평판형 선형 발전기로 free-piston 엔진을 충분히 기동할 수 있음을 확인할 수 있었다.

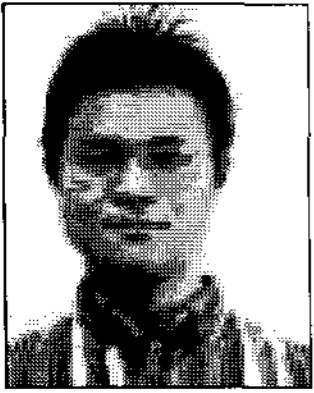
감사의 글

본 연구는 과학기술부의 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 연구개발사업(수소에너지 사업단)의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] H. Xia, Y. Pang and M. Grimble, "Hybrid Modeling and Control of a Free-Piston Energy Converter," IEEE International Conference on Control Applications, 2006.
- [2] Jabin Wang, David Howe, "A Linear Permanent Magnet Generator for a Free-Piston Energy Converter," IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005
- [3] Waqas M. Arshad, Thomas Backstrom, Peter Thelin and Chandur Sadarangani, "Integrated free-piston generators : an overview," Electrical Vehicle Symposium, 2002
- [4] William R. Cawthorne, "Optimization of a brushless permanent magnet linear alternator for use with a linear internal combustion engine," West Virginia University, 1999
- [5] 임제원, "Free-piston 엔진용 평판형 선형 발전기의 해석 및 설계", 서울대학교, pp.3-8, 2006
- [6] I. Boldea and S.A.Nasar, "Linear Electric Actuators and Generators," IEEE Trans. Energy Conversion, Vol.14, pp.712-717
- [7] Ho-Yong Choi, Jae-Won Lim, Hyun-Kyo Jung, Sun-Ki Hong, Dong-Hyeok Cho, Sang-Yeon Hwang and Si-Deok Oh, "Design of Flat-type Linear Generator for free-piston Engine," ICEMS, 2004
- [8] 정상용, "고추력용 철심형 영구자석 선형동기전동기 특성해석 및 설계", 서울대학교, pp.43-54, 2004

저 자 소 개



김 영 옥 (金榮旭)

1983년 4월 12일생. 2006년 서울대 전기공학부 졸업. 2008년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 석사과정. 2008~현재 (주)효성중공업 연구소 연구원

Tel : 031-596-1783

Fax : 031-596-1699

E-mail : dangdangboy@hyosung.com



임 재 원 (林栽元)

1981년 8월 6일생. 2004년 서울대 전기공학부 졸업. 2006년 동 대학원 대표학과 석사 졸업). 2006년~현재 동 대학원 박사과정

Tel : 02-880-7262

Fax : 02-878-1452

E-mail : einses@elecmech.snu.ac.kr



정 현 교 (鄭法敎)

1955년 8월 17일생. 1979년 서울대 전기공학부 졸업. 1981년 동 대학원 졸업(공학석사). 1984년 동 대학원 졸업(공학박사). 1985-1994년 강원대학교 전기공학과 교수. 1987-1989년 NY Polytech Univ. 방문 연구원. 현재 서울대학교 전기 컴퓨터 공학부 정교수

Tel : 02-880-7262

Fax : 02-878-1452

E-mail : hkjung@snu.ac.kr