

코일건 발사 시스템의 발사속도 향상을 위한 최적설계

박창형*, 김진호*.[#]

*영남대학교 기계공학과

Optimal Design to Improve Launch Velocity of Coilgun Launching System

Chang Hyung Park*, Jin Ho Kim*.[#]

*School of Mechanical Engineering, Yeungnam UNIV.

(Received 31 May 2018; received in revised form 4 July 2018; accepted 10 August 2018)

ABSTRACT

Research on space development and satellites is being actively pursued. An interesting field is the study of reliable low-cost space launch vehicles. Since chemical fuel-based launching systems are expensive and take a lot of time and cost to maintain, the EML system, which is an electromagnetic force launching apparatus, is attracting attention. The EML system converts electrical energy stored in a capacitor into magnetic energy, and converts magnetic energy into mechanical kinetic energy, thereby accelerating the projectile. Although studies are actively conducted in the field, it is difficult to solve the equation because the impedance and speed change with time and the nonlinearity is strong. Many researchers have solved this equation in a variety of methods. In this paper, the velocity analysis of the projectile was carried out by FEM (finite element method) using the commercial electromagnetic analysis program MAXWELL.

Key Words : Coilgun(코일건), Space Launch Vehicle(우주발사체), Electromagnetic Analysis(전자기해석), Optimal Design(최적설계)

1. 서 론

전 세계적으로 우주개발에 관한 연구는 꾸준히 성장하고 있다. 단연 인공위성에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. 그 중 가장 큰 관심분야는 신뢰성 있는 저비용 우주발사체에 관한 연구일 것이다. 과거에는 발사체의 추진력을 얻기 위해 화학에너지를 이용해서 발사하였으나, 발사비용이 크고 유지보수에 많은 시간과 비용이 들기 때문에 여러 어려움을 겪어야했다. 또한 순간적으로 폭발적인 에너지를 발생시키기에는 한계가 있어 발사속도의 제약을 초래하였다. 이와 같은 문제점

을 해결하기 위해 새로운 발사체 방식이 도입되었다. 전자기력 발사장치인 EML은 Electromagnetic Launcher의 약자로, 솔레노이드 코일에 짧은 시간 내에 막대한 전류를 인가하여 코일 주변에 발생하는 전자기력으로 발사체에 추진력을 이용해 발사체를 가속하는 방식이다. 즉, 커패시터에 저장된 전기에너지를 기계적 운동에너지로 변환시키는 방식이다. 화학에너지를 이용한 발사 방식과는 달리, 발사체와 코일의 접촉이 없기 때문에 multi-stage 솔레노이드 코일을 이용한다면 부가적인 가속이 가능하여 이론적인 한계속도가 없다는 큰 장점이 있다. 또한 기존 발사방식과 달리 발사체의 반영구적 사용이 가능하다는 점과, 유지보수 시간과 비용이 적다는 특징 때문에 전도유명한 발사 방식이라 할 수 있다^[1-3]. 현재 EML에 관한 연구는 활발히 진행되고 있고,

Corresponding Author : jinho@ynu.ac.kr

Tel: +82-053-810-2441, Fax: +82-053-810-4627

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

발사체의 수학적 모델을 세우고 이를 다양한 방법으로 풀어 발사체의 속도에 관해 연구하고 있다. 하지만 이렇게 작성한 수학적모델이 시간에 따라 변하고 전기와 기계적 시스템이 커플링 되어 있기 때문에 비선형성이 강해서 수식적으로 풀기 어렵다. 따라서 많은 연구자들이 다양한 방법을 통해 이와 같은 수학적 모델을 풀고자 노력하였다. 이와 같은 연구에 이바지하기 위해 본 논문에서는 단일 코일건의 수학적 모델을 작성하고, 관련 수식을 정리하였다. 또한 상용전자기해석프로그램인 MAXWELL을 사용하여 FEM으로 해석함으로써 전기 시스템과 기계 시스템이 커플링되어 비선형성이 강한 코일건 시스템의 발사체 속도를 구하였다. 또한 발사체의 속도를 극대화하기 위해 최적설계프로그램인 PIANO를 사용하여 최적설계를 수행하였다.

2. 원리 및 수학적 모델링

2.1 릴럭턴스 코일건의 원리

코일건의 한 종류인 릴럭턴스 코일건은 Fig. 1과 같이 솔레노이드 코일에 전류를 흘려줄 때 코일 주변에 발생하는 전자기력을 통해 발사체를 가속시키는 방식이다[4]. 따라서 릴럭턴스 코일건의 발사체는 자성을 띠는 물질로 만들어지며 대표적으로 iron과 steel로 만들어진다. 또한 발사체는 발사튜브의 끝부분에 위치하며 솔레노이드 코일에서 발생하는 전자기력(흡인력)으로 가속된다. 또한 발사체가 솔레노이드 코일의 중점을 지나게 되면 발사체의 진행방향과 반대로 힘이 작용하여 속도가 감소하게 되는데 이를 suction 현상이라 한다. 이 현상을 방지하기 위해 발사체가 솔레노이드 코일의 중점을 지날 때 전류를 차단시켜 더 이상 해당 솔레노이드 코일에서는 전자기력이 발생하지 않도록 제어한다. 그리고 발사체는 관성에 의해 날아가게 된다.

2.2 수학적 모델링

플레밍의 오른손법칙에 의해 솔레노이드 코일에서 전자기력이 생성된다. 즉 전기에너지를 자기에너지로 변환시키고 다시, 자기에너지를 기계적 운동에너지로 변환시킴으로써 발사체를 가속시키는

$$F(z) = \frac{du}{dz} \quad (1)$$

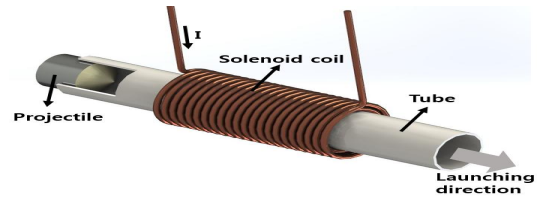


Fig. 1 Schematic diagram of single coilgun

$$u = Volume \times MagneticDensity = V \frac{B^2}{2\mu_m} \quad (2)$$

$$\Delta u = u_m - u_0 = V \frac{B^2}{2} \left(\frac{1}{\mu_0} - \frac{1}{\mu_m} \right) \quad (3)$$

것이다. 전자기력은 식 (1)과 같이 에너지를 변위 z 에 관해 미분한 형태로 나타낼 수 있다. 또한 특정 공간의 자기에너지는 식 (2)와 같다.

여기서 V 는 발사체의 부피, B 는 자속밀도, μ_m 는 특정 물질의 투자율이다. 자속밀도가 자기에너지가 작용하는 공간 내부에서 전체적으로 균일하다고 가정하면, 투자율이 μ_m 인 물질의 에너지변화량은 식 (3)과 같다.

Fig. 2와 식 (4)는 거리가 z 만큼 떨어진 P 점에서의 자속밀도를 나타내는 그림과 식이다. 여기서 B 는 자속밀도, μ_0 는 공기의 투자율, N 은 단위길이당 솔레노이드 코일의 총 권수, I 는 솔레노이드 코일에 인가된 전류, z 는 발사체와 솔레노이드 코일 입구 사이의 거리, L 은 솔레노이드 코일의 길이, R_1 은 솔레노이드 코일의 내반경, R_2 는 솔레노이드 코일의 외반경을 나타낸 것이다. 즉, 식 (3)을 식 (1)에 대입하면 식 (5)와 같이 전자기력은 에너지를 변위 z 로 미분한 형태로 나타낼 수 있다. 식(4)에서 B 는 자속밀도, μ_0 는 공기의 투자율, N 은 단위길이당 솔레노이드 코일의 총 권수, I 는 솔레노이드 코일에 인가된 전류, z 는 발사체와 솔레노이드 코일 입구 사이의 거리,

$$B(I, z) = \frac{\mu_0 NI}{2} \left[(z) \ln \frac{\sqrt{R_2^2 + (z)^2} + R_2}{\sqrt{R_1^2 + (z)^2} + R_1} - (z-L) \ln \frac{\sqrt{R_2^2 + (z-L)^2} + R_2}{\sqrt{R_1^2 + (z-L)^2} + R_1} \right] \quad (4)$$

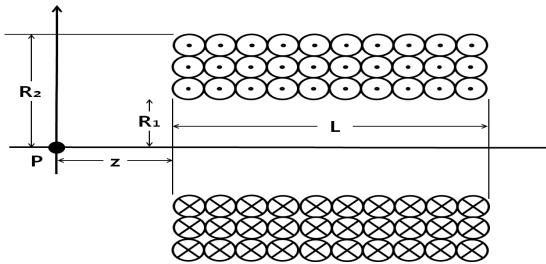


Fig. 2 Magnet flux density at the point

L 은 솔레노이드 코일의 길이, R_1 은 솔레노이드 코일의 내반경, R_2 는 솔레노이드 코일의 외반경을 나타낸 것이다. 즉, 식 (3)을 식 (1)에 대입하면 식 (5)와 같이 전자기력은 에너지를 변위 z 로 미분한 형태로 나타낼 수 있다. 또한 운동방정식의 형태로 전자기력을 식 (6)과 같이 표현할 수 있다. 전자기력은 변위 z 와 전류 I 의 함수로 나타난다. 여기서 힘을 시간에 대해 적분하고 발사체의 질량으로 나뉘주면 발사속도를 계산할 수 있다.

$$F(z) = \frac{du}{dz} = \frac{\pi r_p^2}{2} \left(\frac{1}{\mu_0} - \frac{1}{\mu_m} \right) \frac{d}{dz} \left[\int_z^{z+L} B^2(\zeta) d\zeta \right] \quad (5)$$

$$F(I, z) = m_p a = m_p \ddot{z} \Rightarrow v = \dot{z} = \frac{1}{m_p} \int F dt \quad (6)$$

2.3 전기 수식

릴턴스 코일건의 경우 커패시터를 방전시킴으로써 코일에 전류를 흘려주기 때문에 RLC 직렬회로의 형태이고, 식 (7)와 같이 표현된다. R 은 솔레노이드 코일의 저항과 커패시터의 저항의 합, L 은 솔레노이드 코일의 인덕턴스, C 는 커패시터의 용량을 나타낸다. 그리고 식 (7)은 식 (8)와 같이 표현된다. 여기서 λ 는 시스템에 작용하는 코일의 flux linkage이다. 또한 λ 는 식 (9)와 같이 표현된다. N 은 코일의 권수, B 는 자속밀도, A 는 솔레노이드의 단면적이다. 따라서 식 (7)는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt = 0 \quad (7)$$

$$Ri(t) + \frac{d\lambda}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt = 0 \quad (8)$$

$$\lambda = N \int_A B dA \quad (9)$$

$$Ri(t) + \frac{d}{dt} (N \int_A B dA) + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt = 0 \quad (10)$$

식 (10)과 같이 전류는 전기와 기계 방정식이 서로 커플링되어 있고, 비선형성이 강하기 때문에 풀기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 FEM을 통해 발사체의 속도를 계산하였다.

3. 시뮬레이션

본 연구에서는 릴턴스 코일건의 수학적 모델을 FEM을 통해 해석함으로써 발사가능성을 검증하고 최적화된 속도를 얻기 위해 상용전자기해석프로그램인 MAXWELL을 사용하여 발사 시뮬레이션을 수행하였다.

3.1 초기모델의 해석

Fig 3은 MAXWELL을 사용해서 초기모델을 제작하고, 해석하여 전자기력에 의해 발사체가 가속되는 모습을 나타낸 사진이다. 초기모델의 스펙은 각 치수의 중복설명을 피하기 위해 최적설계를 마친 후 언급하였다. 발사체의 재질은 steel 1010, 솔레노이드 코일의 재질은 구리, 발사 튜브와 비행공간은 진공으로 설정하였다. 또한 해석시간 단축을 위해 2D-Z축 회전체 모델로 설정하였다. 과도상태해석(transient analysis)을 수행함으로써 시간에 따른 발사체의 속도와 솔레노이드 코일에 인가되는 전류를 분석하였다. 전체 해석 시간은 10ms이고 시간간격은 0.01ms로 설정하였다. 최대발사속도는 2.07ms에 약 87.5m/s로 나타났다.

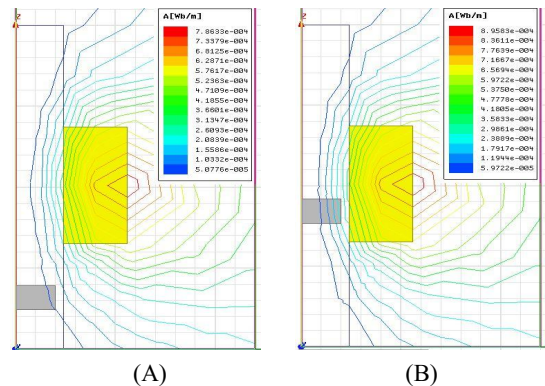


Fig. 3 The magnetic flux at (A) 1.8ms, (B) 2.2ms

3.2 전기 회로

발사체를 가속시키는데 필요한 전자기력을 생성하기 위해 충분한 전류를 공급할 수 있는 전기회로가 필요하다. 본 논문에서는 상용전자기해석프로그램인 MAXWELL의 회로 편집기를 이용하여 전기 회로를 제작하였다. Table 1은 전기 회로의 각 요소들의 스펙을 나타낸 것이다. 수학적 모델링에서 RLC 직렬회로의 해를 계산할 때 솔레노이드코일의 저항과 인덕턴스를 각각 계산하여 시간에 따른 전류의 변화를 구하기 때문에 커패시터의 용량, 솔레노이드 코일의 저항, 솔레노이드 코일의 인덕턴스와 같은 스펙들을 통해 수식을 완성한다. 반면 MAXWELL의 회로 편집기에서는 솔레노이드코일의 인덕턴스를 입력하지 않는다. 이와 같은 이유는 식 (8)에서의 인덕턴스와 스피던스가 시간에 따라 동시에 변하기 때문에 MAXWELL에서는 식 (9)와 같이 시간에 따른 flux linkage의 변화로만 나타내게 된다. 따라서 수학적 모델링을 통해 계산한 해와 약간 상이할 수 있는데 Fig. 4는 이와 같은 전류의 그래프를 나타낸다.

4. 최적설계

4.1 설계변수

틸터턴스 코일건의 속도를 극대화하기 위해 최적설계를 수행하였다. 먼저, 발사속도에 영향을 미칠 수 있는 설계변수를 설정하고 각 설계변수의 제약조건 및 범위를 선정하였다.

1. 발사체의 반경과 길이 또한 발사속도에 영향을 미치는 요소이다. 반경과 길이는 전자기력을 받을 수 있는 부피와 비례한다. 반면 부피가 커지게 되면 발사체의 무게 또한 증가하기 때문에 발사속도는 감소하게 될 것이다. 따라서 발사속도에 최적화 된 반지름과 길이를 설계변수로 사용해야 한다.

2. 솔레노이드 코일의 권수도 중요한 요소이다. 만약 권수에 상관없이 코일 당 일정한 전류가 흐르게 된다면, 코일의 권수를 증가시킬수록 자속밀도는 커지게 되므로 발사속도가 극대화 될 것이다. 하지만 실제로 코일에는 일정한 전류가 흐르는 것이 아니다. 왜냐하면 커패시터에 충전된 전하를 짧은 시간 내에 방전시킴으로써 코일에는 전압이 인가되는데, 이 때 솔레노이드 코일의 권수가 증가할수록 저항과 인덕턴스가 증

Table 1 Electrical specifications

L	Inductance of coil	$4.722 \times 10^{-4} H$
R	Resistance	0.104Ω
C	Capacity of capacitor	$0.033 F$
V_c	Initial capacitor voltage	$400 V$

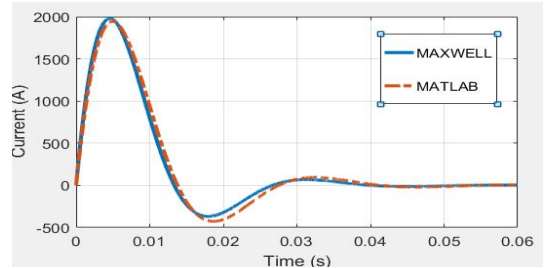


Fig. 4 The current of solenoid using SW

가하여 더 큰 역기전력을 발생시키게 된다. 이는 발사속도를 감소시킨다. 따라서 발사속도를 극대화하기 위해 코일의 권수 또한 최적설계 되어야 한다.

3. 초기 발사체 위치(솔레노이드 코일과 발사체 사이의 거리)는 매우 중요한 요소이다. 솔레노이드 코일 주변에 생기는 전자기력에 의해 발사체가 가속되기 때문에 코일과 발사체 사이의 거리가 가까울수록 더 큰 흡인력을 받게 된다. 반면 이 거리가 멀게 되면 커패시터에 충전된 전기에너지를 충분히 이용하지 못하고 발사체는 코일을 빠져나가게 된다. 따라서 발사속도를 극대화하기 위해서는 최적의 발사 위치를 선택해야 한다. Fig. 5과 같이 앞서 언급한 발사체의 반경(P_R)과 길이(P_L), 솔레노이드 코일의 축 방향(A), 반경 방향 권수(N), 발사체 위치(z) 총 5가지의 설계변수로 설정하고 최적설계를 수행하였다. 여기서 d 는 코일의 직경이다. 각 변수의 범위는 식 (11)와 같이 설정하였다.

4.2 실험계획법

최적설계를 수행할 때 모든 실험점에 대해 해석을 할 수 없으므로 효과적인 실험점 분포를 통해 정확도가 높은 근사모델을 만들어 내는 것이 중요하다. 본 연구에서는 최적설계 툴인 PIANO에서 제공하는 직교매열표를 활용하여 변수의 개수와 각 변수의 수준수를 통해 $L_{72}(3^5)$ 를 선정하였다^{5,6)}.

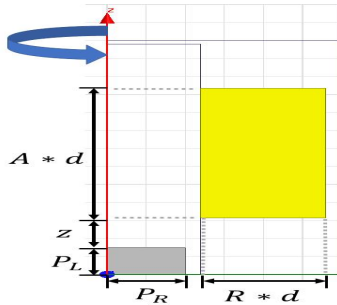


Fig. 5 Schematic diagram of single coilgun

Find P_R, P_L, A, R, z
 to maximize Velocity of projectile
 subject to $1 \leq P_R \leq 20 (mm)$
 $1 \leq P_L \leq 20 (mm)$ (11)
 $1 \leq A \leq 20 (turns)$
 $1 \leq R \leq 20 (turns)$
 $1 \leq z \leq 20 (mm)$

여기서 변수의 개수는 5개, 각 변수의 수준은 비선형성이 강하기 때문에 3수준으로 설정하였다. 또한 전자기 해석의 경우 앞서 수행하였던 초기 모델에 사용한 해석시간, 시간간격 등 동일하게 수행하였다.

4.3 근사모델

근사모델이란 연구자가 중점적으로 연구하고자 하는 관심영역의 일부 또는 전 영역에서 실제 해석모델의 해석을 통해 얻은 해석값과 변수 사이의 관계를 근사화하여 작성한 것을 의미한다^[7]. 앞서 실험계획법에서 직교 배열표를 통해 생성한 각 실험점의 해석값을 통해 크리깅 모델을 생성하였다. 대표적인 보간 모델인 크리깅은 설계변수가 많고 비선형성이 강한 시스템에서 우수한 예측성능을 보이고, 값을 알고 있는

Table 2 The optimal value using 4 algorithm

Algorithm	P_R (mm)	P_L (mm)	A (turns)	R (turns)	z (mm)	V (m/s)
PQRSM	11.46	19.1	18.46	10.75	49.76	115.6
MGA	10.5	19.07	19.07	10.62	49.52	114.6
CMA-ES	11.46	19.22	18.57	10.59	49.84	115.7
EA	11.47	19.2	18.55	10.59	49.84	115.7

주위의 값들을 선형적인 조합으로 예측하는 통계학적 기법이다^[8,9]. 이를 이용해 72개의 실험점에 대한 시뮬레이션 해석 결과를 통해 PIANO에서 제공하는 근사화 기법을 이용하여 크리깅 모델을 생성하였다.

4.4 최적화기법

생성된 근사모델을 바탕으로 최적설계를 수행하기 위해 특정 알고리즘을 사용하여 최적값을 도출하는 방법을 의미한다. Table 2와 같이 PIANO에서 제공하는 4가지 알고리즘을 사용하여 최적값을 도출하고 각 알고리즘에서 도출한 값이 일관성이 있는지를 비교하였다. 알고리즘의 종류에 상관없이 비슷한 값을 도출하였다.

4.5 최적설계 결과

근사모델을 이용해 최적설계를 수행하였기 때문에 근사모델의 정확도에 따라 결과값이 달라질 수 있다. 따라서 최적설계값으로 모델링하여 시뮬레이션을 수행함으로써 검증이 되어야 한다. 본 논문에서는 4가지 알고리즘 중 진화알고리즘(Evolution Algorithm : EA)을 이용하여 모델을 검증하였다. Table 3는 각 변수의 상하한 경계와 초기값, 최적값을 나타내는 표이다. 최고속도는 Fig 6과 같이 약 107.6 m/s이다. 발사체는 3.07ms 만에 솔레노이드 코일의 절반을 지나게 되고, suction 현상이 발생하여 속도가 급격하게 떨어 짐을 관찰하였다. Fig 7은 초기모델, 근사모델, 해석결과를 나타낸 것이다. 초기모델의 속도는 87.5m/s, 진화 알고리즘을 이용해 최적설계를 수행한 결과 발사속도는 115.7m/s로 나타났다. 또한 근사모델에서 얻은 최적값을 모델링하여 시뮬레이션을 수행한 결과는 107.6m/s로 나타났다. 근사모델과 해석결과는 각각 초기값보다 32.2%, 23.0% 증가하였고, 근사모델과 해석결과의 오차는 약 7%로 나타났다.

Table 3 Table of initial value & optimal value

Design variables	Lower boundary	Initial value	Optimal value	Upper boundary
$P_R(mm)$	1	10	11.47	20
$P_L(mm)$	1	7.5	19.2	20
$A(turns)$	1	18	18.55	20
$R(turns)$	1	8	10.59	20
$z(mm)$	20	25	49.84	50
$V(m/s)$	-	87.5	115.7	-

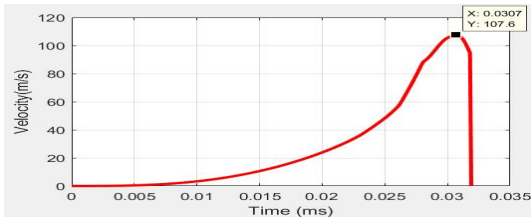


Fig. 6 The velocity graph where optimal design

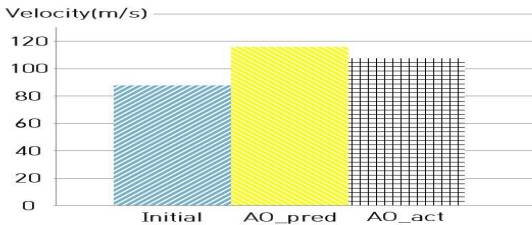


Fig. 7 The velocity of projectile at each model

6. 결론

본 연구에서는 단일 솔레노이드 코일건의 수학적 모델을 제작하였다. 이와 같은 수식은 전기와 기계 시스템이 커플링 되어 있어서 비선형성이 강하다. 따라서 이와 같은 수식의 해를 구하는 것은 어렵다. 본 논문에서는 이와 같은 수식을 상용 전자기 해석프로그램인 MAXWELL을 사용하여 FEM으로 해석하였고, 발사체의 발사속도를 구하였다. 또한 발사속도 극대화를 위해 발사속도에 영향을 미칠 수 있는 5가지 설계변수를 선정하고, 상용 PIDO틀인 PIA_{NO}를 사용하여 최적설계를 수행하였다. 최적설계를 통해 얻은 발사속도는 초기값 대비 23% 증가하였다. 이와 같이 두 시스템이 커플링 되어 있어 비선형성이 강한 수식을 FEM을 통해 해석함으로써 코일건 연구에 이바지하였다.

후 기

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2017R1D1A3B03032139)

REFERENCES

1. Joo, S. J., Han, J. M., Jo, J. U., Lee, M. S., Park, D.

S., Park, J. U., Byun, J. H., Kim, D. S. and Park, G. S., "Development of the small electromagnetic launcher using solenoid coil", 2006 KIEE EMECS Conference, pp. 402-404, Pusan National University, Korea, 2006.

2. Fair, H. D., "Advances in Electromagnetic Launch Science and Technology and Its Applications", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, No. 1, pp. 225-230, 2009.

3. Lee, S. J., Kim, J. H., "Design and Experiment of Coil gun to Apply Electromagnetic Launcher System", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 15, No. 6, 2014.

4. Kim, S. W., Jung, H. K., Hahn, S. Y., "An Optimal Design of Capacitor-Driven Coilgun", Deptment of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, South Korea, (in Korean).

5. Hedayat A. S., Sloane N. J. A., Stufken J. Orthogonal Arrays: Theory and Applications. Springer Series in Statistics, 1999.

6. Lee, K. B., Park, C. H., Kim, J. H., "Optimal Design of One-Folded Leaf Spring with High Fatigue Life Applied to Horizontally Vibrating Linear Actuator in Smart Phone", Journal of Advances in Mechanical Engineering, Volume 2014, Article ID 545126, 7 pages.

7. Song, B. C., Kim, S. R., Kang, Y. G., Han, M. H., "A Study on the Comparison of Approximation Models for Multi-Objective Design Optimization of a Tire", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 5, pp. 117-124, 2011.

8. Ha, H. G., Oh, S. J. and Yee, K. J., "Feasibility Study of Hierarchical Kriging Model in the Design Optimization Process," Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, Vol. 42, No. 2, pp. 108-118, 2014.

9. Kim, J. G. and Lee K. H., "A Structural Design of Microgyroscope Using Kriging Approximation Model," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 7, No. 4, pp. 149~154, 2008.

10. Lee, H. R., Ahn, J. H., Shin, J. O., Kim, H. Y., "Design of a Cylinder Valve Solenoid for a CNG Vehicle using Electromagnetic Field Analysis", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15 No. 2, pp.89~96, 2016.