http://dx.doi.org/10.7735/ksmte.2014.23.4.408 *ISSN 2233-6036*

로봇 및 자동화 부문 특별세션

피투사체 속도 향상을 위한 코일건의 기구 변수 최적 설계

이수정[a], 이주희[a], 이동연[a], 서태원[a], 김진호[a*]

Optimal Parametric Design of Coil Gun to Improve Muzzle Velocity

Su-Jeong Lee[a], Ju Hee Lee[a], Dong Yeon Lee[a], TaeWon Seo[a], Jin Ho Kim[a*]

[a] *School of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ., 280, Daehak-ro, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do, 712-749, Republic of Korea*

ARTICLE INFO

Article history:
Received 18 June 2014
Revised 25 July 2014
Accepted 29 July 2014

Keywords:
Robust design
Muzzle velocity
Coil gun
Onderdonk's equation
Magnetic force

ABSTRACT

An electromagnetic launching system presents a viable projectile propulsion alternative with low cost and minimal environmental drawbacks. A coil gun system propels a projectile using an electromagnetic force and the system is mainly employed in military weapon systems and space launch systems. In this paper, we perform optimization design to improve the muzzle velocity by analyzing the sensitivity. The muzzle velocity, which is the most important design function variable, is affected by design variables including the number of axial turns in the electromagnetic coil, number of radial turns in the electromagnetic coil, initial distance between the projectile and the coil, inner radius of the electromagnetic coil, and length of the projectile. An orthogonal arrays matrix is configured, and a finite element analysis is performed utilizing the commercial electromagnetic analysis software MAXWELL. The muzzle velocity of the optimal design is 62.4% greater than that of the initial design.

1. 서 론

전자기 발사체 시스템은 기존의 화학 에너지 발사시스템과는 달리 CO_2 등 오염 환경 물질이 거의 없는 관계로 최근 활발하게 연구 개발 되고 있다. 가장 진보된 전자기 발사체 시스템은 코일건이다. 코일건은 하나 혹은 여러 개의 솔레노이드 형태의 전자기 코일 내부에 탄체를 놓고 코일에 순간적으로 강한 전류를 흘려 자계를 만들고 발사체와 전류간의 상호 작용에 의해 고속의 자기 추진력을 발생시키는 발사장치이다. 현재 미국, 유럽, 러시아, 일본, 영국 등에서는 군사 무기 및 우주발사체 발사 방법으로 coil gun을 사용하기 위해서 coil gun의 전자기력을 이용한 발사 기술에 대한 연구 및 개발을 수행하고 있다[1-3]. 다음 Fig. 1과 같은 구조 및 원리를 가진다.

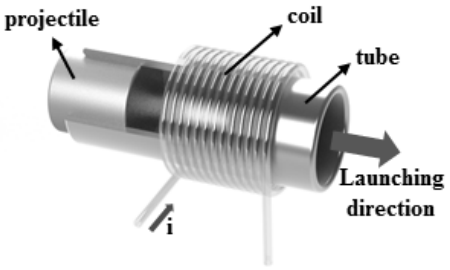


Fig. 1 Schematic of coil gun system

일반적으로 코일건에 대한 연구들은 첨단 무기나 위성발사 등에 적용을 목적으로 하기 때문에 높은 발사속도가 필요하다. 하지만, 위의 연구과 같이 코일건의 높은 출력을 얻기 위해서는 코일건의 사이즈가 커지게 된다. 이는 장치설치 공간, 운용, 유지, 보수에 따

* Corresponding author. Tel.: +82-53-810-2441
Fax: +82-53-810-462
E-mail address: jinho@ynu.ac.kr (Jin Ho Kim).

른 높은 비용을 초래한다. 따라서, 코일건을 대형화 하지 않고 코일건의 출력을 최대화 할 수 있는 연구가 필요하다[1-5].

본 논문에서는 코일건 주요 설계 변수와 발사속도의 관계에 대한 분석을 통해 제한된 코일건 사이즈에서 발사 속도를 극대화 할 수 있도록 견실최적설계를 수행한다. 코일건의 발사 속도를 최대화 하는 최적설계를 위해 최대 전류를 구속조건으로 고려하였으며, 코일의 축방향 권수 *N*, 반경방향 권수 *M*, 코일과 피투사체 간 거리 *z*, 피투사체의 길이 *L*, 솔레노이드 코일의 내반경 *R*을 각 3수준의 설계변수로 선정하였다. 이러한 설계변수들은 서로 독립적이지만 발사 속도를 결정짓는 자기력에 대해 비선형성적인 관계에 있다. 수직행렬 $L_{27}(3^{13})$을 활용하여 최소한의 해석을 통해 결과를 예측할수 있는 직교배열표를 작성하고, 상용 전자기 해석 소프트웨어 MAXWELL을 활용하여 유한요소해석을 수행하였다. 각 조합번호별 해석 결과 값을 통해 발사 속도 및 S/N ratio를 최대화 할 수 있는 설계변수를 선정하고 이를 바탕으로 설계를 하여 초기 모델과 비교를 하였다.

2. 설계 목표 및 문제 정의

2.1 설계 변수

본 연구는 코일건 발사 장치 내의 피투사체의 발사속도를 향상시키는 것을 목표로 하고, 발사속도는 기능 변수 이다. 이는 망대 설계목표에 속한다.

코일건은 코일에 전류가 인가되면 강자성을 띤 피투사체가 코일 쪽으로 이동하고, 전류가 차단되는 동시에 피투사체가 튜브 밖으로 발사되는 원리이다. 따라서, 기능 변수인 발사 속도에 영향을 미치는 변수를 설계 변수로 선정한다. Fig. 2는 코일건 발사장치의 개념도이며, 선정한 각 설계 변수를 Table 1에 나타내었다.

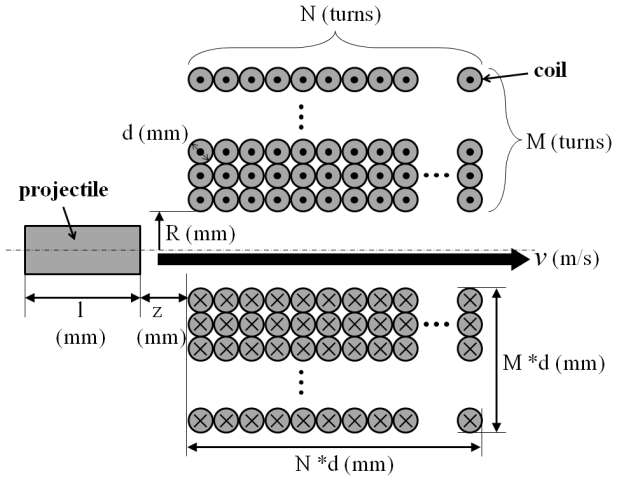


Fig. 2 diagram and variables of coil gun system

Table 1 Design variables

	Indication	Design variables
N	A	number of axial turns of coil (turns)
z	B	distance between projectile and coil (mm)
M	C	number of radial turns of coil (turns)
R	D	inside radius of winding coil (mm)
L	E	length of projectile (mm)

2.2 구속 조건

고객 제품 사용조건으로 코일 내부온도를 20°C로 고정하여 Onderdonk's equation; 식 (1)에 의해 사용하는 코일이 견딜 수 있는 최대 전류 및 최소 저항을 계산할 수 있다[6].

$$33\left(\frac{I}{A}\right)^2 s = \log\left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1\right) \tag{1}$$

I : 인가 전류 [Amp.]
A : 도선 단면적 [circ. mils]
s : 전류의 인가 시간 [seconds]
T_m : 녹는점 [°C]
T_a : 상온 [°C]

Table 2는 본 연구에 사용한 코일의 스펙이다. 이 값을 식 (1)에 대입하면 코일에 흘릴 수 있는 최대 전류를 얻을 수 있다. 캐패시터를 이용한 입력전압이 200[V]라 할 때, 코일의 저항은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며, 식 (3)과 같은 구속조건을 얻을 수 있다.

$$R_{coil} = \frac{V}{I_{\max}} = \frac{200[V]}{3900[A]} = 0.053[\Omega] \tag{2}$$

$$R_{coil} \geq 0.053[\Omega] \tag{3}$$

코일 저항은 코일 와이어 직경 d와 설계변수 A, C, D를 이용하여 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{coil} = \frac{2\pi N\left(MR + \frac{M^2 d}{2}\right)}{\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2} \times \rho_{copper} \tag{4}$$

Table 2 Specification for AWG 20

T_m[°C]	125
T_a [°C]	20
A[circ. mils]	5190
s[ms]	8

Table 3 Level values of design variables

Indication	Unit	Design variables	Level 1	Level 2 (initial)	Level 3
A	turns	number of axial turns of coil	15	17	19
B	mm	distance between projectile and coil	5	10	15
C	turns	number of radial turns of coil	8	9	10
D	mm	inside radius of winding coil	3	5	8
E	mm	length of projectile	5	7	10

식 (4)과 같이 코일의 저항 R_{coil}은 축방향 권수 N, 반경방향 권수 M, 솔레노이드 코일의 안쪽 반경 R, 코일 와이어의 직경 d에 영향을 받는다. 직경 d는 AWG 규격 #20을 사용하므로 상수이다. 따라서, 설계변수 *N*, *M*, *R*은 최소 저항 이상이 되도록 수준 설계를 하여야한다. 설계변수의 수준이란 견실최적설계 수행을 위한 초기값과 탐색크기를 정하여 각 설계변수마다 지정된 값을 의미한다. 기존의 연구 결과를 바탕으로 탐색크기를 정하였으며 수준은 3개이다. 각 설계변수 수준별 값은 Table 3에 나타내었다.

설계변수 5개 중 S/N ratio비에 대해서 상관관계가 있다고 예상되는 변수는 상관관계 변수조합을 선정하여야 한다. 피투사체의 발사속도는 발사가 되는 방향과 관계되는 변수가 영향이 클 것으로 예상하여 상관관계 변수조합은 설계 변수 A, B, E를 조합하여 다음 Table 4와 같이 선정하였다[7,8].

설계목표 기능변수를 만족하는 설계변수들을 결정하기 위한 설계문제를 정식화 하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} &\text{Design parameter} && A, B, C, D, E \\ &\text{Objective function} && \textit{Maximize the muzzle velocity} \\ &\text{Constraints} && Coil\,resistance\, R_{coil} \geq 0.053[\Omega] \end{aligned} \tag{5}$$

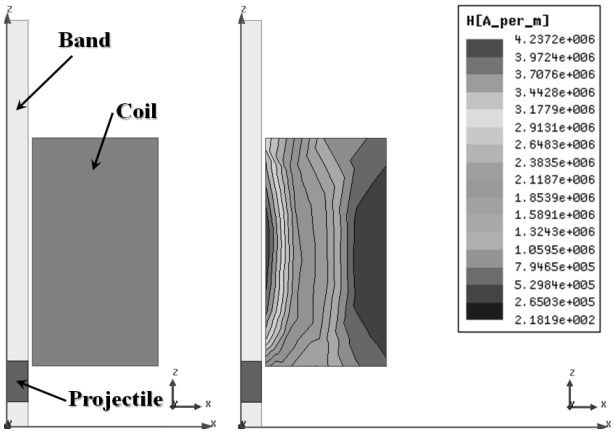
3. 설계 민감도 해석 및 최적설계

3.1 설계 민감도 해석

수직행렬 $L_{27}(3^{13})$를 활용하여 최소한의 해석을 통해 결과를 예측할 수 있는 직교배열표를 작성하고 상용 전자기 해석 프로그램 MAXWELL을 활용하여 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 3은 해석 모델 중 하나이며, 해석모델은 원통형 좌표계를 이용한 2D 모델이다. 피투사체와 피투사체가 발사되는 공간인 Band, 코일로 구성되어진다.

Table 4 Correlation between variables combination

Indication	
*A*B*	correlation of variables *N* and *z*
*B*E*	correlation of variables *z* and *L*
*A*E*	correlation of variables *N* and *L*



(a) (b)

Fig. 3 Magnetic intensity of coil gun (at 6 ms)

해석 결과를 토대로 민감도 해석을 위해 S/N 비를 계산한다. S/N 비는 신호처리장치의 성능지표 중의 하나로 증폭된 신호의 크기를 억제된 잡음의 크기로 나눈 것을 의미한다.

$$S/N\,ratio = \frac{Signal}{Noise} \tag{6}$$

견실 최적 설계에서는 S/N 비가 클수록 잡음(noise)에 의한 영향이 작아진다. 즉, 설계목표 기능변수의 변동폭이 작은 동시에 설계목표 기능변수가 망대(본 연구) 특성을 잘 구현한다는 것을 의미한다. 본 연구의 설계목표 기능변수는 망대 특성을 가지므로 S/N 비는 다음 식 (7)와 같다.

$$SN = -10\log\left|\frac{\left(\frac{1}{y_1}\right)^2+\left(\frac{1}{y_2}\right)^2+\cdots+\left(\frac{1}{y_n}\right)^2}{n}\right|[dB] \tag{7}$$

n : 고객 제품사용조건 수

y_n : n에서의 설계목표 기능변수의 값 (y_n: 양의 실수)

본 연구에서는 고객 제품사용조건을 고정하였으므로 *n*은 1의 값을 가진다. 해석을 통하여 구한 각 조합번호별 기능변수에 대한 S/N 비는 Table 5와 같다. Fig. 4은 각 설계변수별 민감도 해석한 결과를 보여준다.

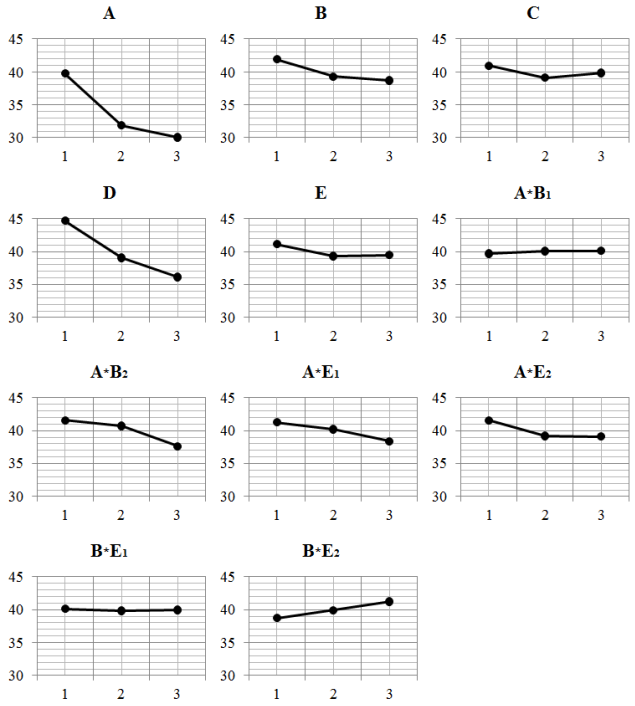


Fig. 4 Main effect plot for S/N ratios

Table 5 Configuration of orthogonal array matrix

No.	Design parameter													Velocity (m/s)	S/N ratio [dB]
	A	*B*	*A* B1*	*A* B2*	*E*	*A* E1*	*A* E2*	*B* E1*	*C*	*D*	*B* E2*	-	-		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	302	51.17
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	100.5	40.04
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	78	37.84
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	156	43.86
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	44.7	33.01
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	140.1	42.93
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	66.2	36.42
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	135.8	42.66
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	30.5	29.69
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	65.8	36.36
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	141	42.98
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	114.1	41.15
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	233.5	47.37
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	114.6	41.18
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	63.5	36.06
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	92	39.28
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	58.6	35.36
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	164.9	44.34
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	83.1	38.39
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	102	40.17
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	283.2	49.04
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	47.5	33.53
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	79	37.95
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	77.2	37.75
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	153.1	43.7
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	104.1	40.35
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	66.6	36.47

Table 6 S/N ratio and Muzzle Velocity of Initial Condition and Optimal Condition

	Initial model (A2B2C2D2E2)	Optimal model (A1B1C1D1E1)	Distinction
S/N ratio	41 dB	51.17 dB	10.17 dB
Velocity	113.4 m/s	302 m/s	188.6 m/s

각 설계변수에 대한 S/N 비의 결과 값을 나타낸 Fig. 3와 같이 A인자인 축 방향 코일 권수와 D인자인 솔레노이드 코일의 안쪽 반경이 발사 속도에 가장 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 보통은 A, D인자의 수준 1에서 S/N비가 최대가 되므로 수준 1에 해당하는 설계값에서 탐색방향 및 탐색 크기를 지정하여 2차 견실최적이 필요하지만 본 연구에서는 A, D인자의 수준 1에 해당하는 설계값이 2.2절의 구속조건에 해당하는 값이므로 더 이상 탐색할 수 없다. 이 결과를 통해 각각 최대의 S/N 비를 가지는 인자를 선정하게 되면 A1B1C1D1E1이 된다. 여기서 상관관계 변수 조합과 기존 최대 S/N 비를 가지는 설계변수를 비교하여 최대값을 가질 수 있는 인자를 선정하여 최적 설계된 모델은 A1B1C1D1E1이다. 최적설계단계 전 초기 모델 (A2B2C2D2E2)과 최적 설계된 모델 (A1B1C1D1E1)의 S/N 비를 비교 한 것을 Table 6에 나타내었다. 최적 모델의 발사속도는 초기 모델에 비해 약 62.4% 상승하였고, S/N 비는 10.17 dB 증가하였음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 코일건 발사장치에서 피투사체의 발사속도를 향상시키기 위해 견실최적설계를 수행하였다. 기존의 연구들을 바탕으로 발사속도에 영향을 미치는 설계변수 및 수준을 선정하였으며, 수직행렬 $L_{27}(3^{13})$을 활용하여 직교배열표를 작성하였다. 각 조설계변수 조합별 발사속도는 상용 전자기 해석 프로그램 MAXWELL을 활용하여 해석하였다. 해석 결과를 바탕으로 S/N 비 및 민감도 해석을 수행한 결과, A인자인 축 방향 코일 권수와 D인자인 솔레노이드 코일의 안쪽 반경이 다른 인자들에 비해 설계목표 기능변수인 발사속도에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 최적 설계된 모델 (A1B1C1D1E1)은 최적설계단계 전 초기 모델 (A2B2C2D2E2)에 비해 발사속도가 약 62.4% 상승하였고, S/N 비는 10.17 dB 증가하였다. 본 연구의 민감도 분석 결과 및 파라미터 값은 실제 코일건의 파라미터를 설계하는데 응용될 수 있다.

본 연구의 결과를 바탕으로 추후에 코일건 시스템을 제작 및 실험할 예정이다. initial model과 optimal model을 각각 제작 및 발사 실험하여 전자기 해석 결과와 비교하는 연구를 진행하려고 한다.

References

[1] Kim, S. W., 1993, An optimal design of capacitor-driven coilgun, Doctorate Thesis, Seoul National University, Republic of Korea.

[2] Haghmaram, R., Shoulaie, A., 2004, Study of Traveling Wave Tubular Linear Induction Motors, International Conference on Power System Technology 288-293.

[3] Fair, H. D., 2009, Advances in Electromagnetic Launch Science and Technology and Its Applications, IEEE Transactions on Magnetics 45:1.

[4] Joo, S.J, Han, J. M., Jo, J. U., Lee, M. S., Park, D. S., Park, J. U., Byun, J. H., Kim, D. S., Park, G. S., 2006, Development of the small electro -magnetic launcher using solenoid coil, KIEE ICEMS Conferences 402-404.

[5] Wang, D. -M., She, Q., Zhu, Y. -M., Chen, J. -J., 1997, The Magnetic Levitation of the Projectile in Coil guns, IEEE Transactions on Magnetics 33:1 195-200.

[6] Lee, S.-J., Kim, J.-H., Kim, J. H., 2013, Coil Gun Electromagnetic Launcher (EML) System with Multi-stage Electromagnetic Coils, Journal of Magnetics 18:4 481-486.

[7] Lee, J. H., Lee, K. H., 1995, Design Sensitivity Analysis and Optimal Design to Control Forced Harmonic Vibration of Structure, Transactions of the Society of Naval Architects of Korea 32:4 64-71.

[8] Kim, J.-H., Kim, J.-H., Kim, J.-H., 2012, Robust Design of Air Compressor-Driving Quadratic Linear Actuator in Fuel Cell BOP System using Taguchi Method, Journal of Magnetics 17:4 481-486.