ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 25(3), 87-91 (2015) http://dx.doi.org/10.4283/JKMS.2015.25.3.087

Parameter Study on the Design of Solenoid to Enhance the Velocity of Coilgun

Jae-hwan Jang and Jin-ho Kim*
School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Gyengbuk 712-749, Korea

Su-jeong Lee
Gyeongbuk Institute for Advancement of Eco-Friendly Auto Parts Technology, Gyeongbuk 712-210, Korea

(Received 27 February 2015, Received in final form 18 May 2015, Accepted 1 June 2015)

This paper reports the design of solenoid in a coilgun for high velocity of projectile in a coilgun system, according to diameter of coil. Coilgun using a magnetic force means a mechanism that can control the magnetic material. When momentarily supply a large current to the solenoid instantaneous magnetic field is created around the coil, the projectile is fired by receiving a magnetic force towards the center of the coil, based on the right-hand rule of Fleming. The velocity of projectile is proportional to the magnetic force generated by the electromagnetic coil. The current affects the life of the coil and the current limit exists. Therefore, the coilgun design, which does not exceed the current limit and the magnetic forces are at the maximum, is required. In this paper, whether it is possible fire looking for the optimal number of turns according to the diameter of the coil from AWG #6 to AWG #18 for the design of the solenoid coil, and comparative analysis firing rate associated with it.

Keywords : coilgun, solenoid, magnetic flux density, diameter of coil, velocity of projectile

Coilgun 성능향상을 위한 솔레노이드 코일 설계

장재환 · 김진호*
영남대학교 공과대학 기계공학과, 경북 경산시 대학로 280 325호, 712-749

이수정
경북그린카부품진흥원, 경북 경산시 삼풍로 27 2205호, 712-210

(2015년 2월 27일 받음, 2015년 5월 18일 최종수정본 받음, 2015년 6월 1일 게재확정)

본 논문에서는 코일건 발사 시스템의 성능 향상을 위한 솔레노이드 설계에 대해 연구하였다. 즉, 코일건 솔레노이드의 코일 직경에 따른 피투사체의 발사속도에 대한 분석을 수행하였다. 코일건은 자기력을 이용하여 피투사체를 발사시키는 시스템이다. 솔레노이드에 순간적으로 큰 전류를 흘려주면 코일 주위에 순간적인 자기장이 만들어지고, 발사체는 플레밍의 오른손 법칙에 따라 코일의 중심 방향으로 자기력을 받아 발사된다. 피투사체의 발사 속도는 솔레노이드 코일이 생성하는 자기력과 비례한다. 하지만, 솔레노이드 코일은 규격에 따른 최대허용 전류가 존재한다. 따라서, 한계 전류 내에서 피투사체에 작용하는 자기력이 최대가 되는 솔레노이드 코일의 설계가 필요하다. 본 논문에서는 솔레노이드 코일의 설계를 위해 AWG(American Wire Gauge)6부터 AWG18까지의 코일의 직경에 따른 최적의 권수를 찾아서 발사가능여부와 그에 따른 발사속도를 비교 분석한다.

주제어 : 코일건, 솔레노이드, 자속밀도, 코일직경, 발사속도

I. 서 론

현재 우주시대를 위한 우주발사체 시스템의 연구가 활발히 진행 중이며, 액체연료나 고체연료를 연소시켜 추진력을 얻는 방법을 많이 이용하고 있다. 이는 많은 비용이 요구될 뿐만 아니라 폭발의 위험성과 같이 실패할 가능성이 상당히 존재한다. 최근, 기존의 발사체 시스템을 대체하기 위해 전자기 발사 시스템에 대한 연구가 대두시 되고 있다. 전자기 발사 장치란, 전자기 코일을 이용하여 고속의 자기 추진력을 발생

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-53-810-2441,
Fax: +82-53-810-4627, e-mail: jinho@ynu.ac.kr

시키는 시스템이다. 전자기 발사 시스템은 액체연료나 고체연료를 연소 시킬 필요가 없으며, 이에 따른 환경문제 또한 발생하지 않는 장점이 있다. 또한 기존의 우주발사체와 달리 전기충전만 되면 반복해서 사용할 수 있다. 코일건은 주로 최첨단 무기나 우주발사체 등을 목적으로 하기 때문에 높은 발사 성능이 요구된다[1]. 코일건 시스템에서 솔레노이드 설계는 피투사체의 발사 성능을 좌우하며, 특히, 솔레노이드 코일의 직경에 따라 코일에 인가되는 최대전류, 솔레노이드의 축방향 턴수, 반경 방향 턴수가 결정된다. 또한 코일의 권선수가 증가할수록 인덕턴스의 값이 증가하여 응답속도가 낮아지는 경향이 있다[2].

본 논문에서는 솔레노이드 코일직경에 따른 피투사체의 발사속도에 대한 분석을 수행한다. 기존의 코일건 연구에서는 솔레노이드 코일의 직경을 선정한 다음 그에 따라 솔레노이드를 설계하였다[3]. 하지만 본 논문에서는 미국 전선 규격인 AWG(American Wire Gage) #6부터 AWG #18까지 코일의 직경 d를 설계변수로 선정하고, 코일의 축방향 턴수 N, 반경 방향 턴수 M, 최대전류 I, 코일의 저항 R을 종속변수로 선정하였다. 수치연산 상용 프로그램인 MATLAB을 이용하여 각각의 코일 직경에 따른 발사속도에 대해 시뮬레이션을 수행하였다[4].

II. 본　　론

1. 설계변수

본 논문은 전자기 발사체에서 피투사체의 높은 발사속도를 위한 최적의 솔레노이드 코일 직경을 찾는 것이 목적이고, 발사속도는 기능 변수이다. 따라서, 발사속도에 가장 큰 영향을 미치는 코일의 직경 d를 설계변수로 선정한다.

코일건은 자기력을 이용하여 자성체를 발사할 수 있는 장치를 말한다. 솔레노이드에 순간적으로 큰 전류를 흘려주면 코일 주위에 자기장이 만들어진다. 코일건의 개략도는 Fig. 1과 같이 플레밍의 오른손 법칙에 의하여 발생하는 자기력을 받아 코일 중심 방향으로 피투사체가 발사 된다. 설계변수인 코일의 직경 d에 따른 종속변수를 Table I에 나타내었다.

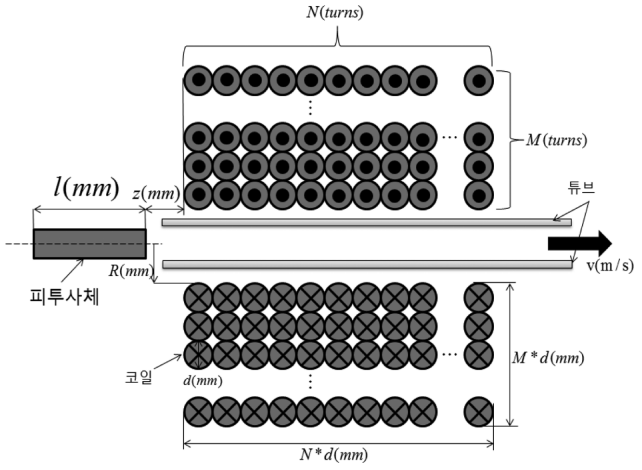

Fig. 1. Schematic diagram of coil gun.

Table I. Subordination variable.

N	Number of axial turns of coil [turns]
M	Number of radial turns of coil [turns]
I	Mamximum current [A]
R	Resistence of coil [Ω]

2. 최대전류

솔레노이드 내부의 코일온도를 상온인 25 ºC로 설정하여 Onderdonk's equation; 식(1)을 이용하여 코일에 흐를 수 있는 최대 전류를 계산할 수 있다[5].

$$I = A \times \sqrt{\frac{\log\left(1 + \frac{T_m - T_a}{234 + T_a}\right)}{33 \times t}} \tag{1}$$

I: 최대전류[A]
A: 코일의 단면적[mm^2]
t: 전류 인가 시간[sec]
T_m: 애나멜의 녹는점[ºC]
T_a: 상온[ºC]

설계변수인 코일의 직경 d를 식(1)에 대입하여 각각의 코일에 흐를 수 있는 최대 전류를 Table Ⅱ에 나타내었다.

3. 솔레노이드 설계

코일의 직경에 따라 흐르는 전류의 양과 상승시간이 달라

Table II. Maximum current of each coil.

Coil	Diameter [mm]	maximum current [A]
AWG #6	4.11	17205
AWG #7	3.65	13596
AWG #8	3.25	10739
AWG #9	2.89	8521
AWG #10	2.59	6815
AWG #11	2.30	5375
AWG #12	2.05	4270
AWG #13	1.83	3402
AWG #14	1.62	2686
AWG #15	1.44	2130
AWG #16	1.29	1704
AWG #17	1.14	1327
AWG #18	1.01	1048

Table III. Electronic characteristics.

Initial capacitor voltage [V]	190
Resistance of capacitor [Ω]	12.4×10^{-3}
Capacity of capacitor [F]	0.09
The resistivity of the coil [Ω/m]	1.724×10^{-8}
Permeability [H/m]	$4\pi \times 10^{-7}$

진다[6]. 만약 코일의 권선수에 상관없이 동일한 전류가 흐를 수 있도록 전류 입력을 한다면, 코일의 권선수 증가할수록 발사체에 작용하는 자기력이 증가하므로 발사속도가 증가한다. 하지만 실제로는 코일에 전류가 아닌 고압의 전압이 인가되기 때문에 코일에 권선수가 증가할수록 코일의 저항과 인덕턴스가 증가하면서 역기전력이 생겨서 발사속도가 줄어들 수도 있다. 또한, 코일의 녹는점을 염두하여 최대전류를 넘지 않는 설계가 요구된다. 따라서, 솔레노이드 코일의 최적의 권수를 찾기 위하여 축방향권수 N과 반경방향권수 M을 각각 1부터 100까지 100 × 100 직교행렬표로 만들어 수치연산 상용프로그램인 MATLAB을 이용하여 최대전류보다 낮은 전류가 흐르는 코일의 권수에서 가장 큰 자속밀도가 발생하는 권수를 추출하기 위한 실험을 수행하였다.

Table III은 솔레노이드 코일의 설계에 사용된 초기조건이다. 피투사체가 통과되는 통로 역할을 하는 튜브는 자성이 없고 전기적 특성을 가지는 알루미늄 재질의 외반경 3.6 mm, 두께 0.5 mm인 관으로 선정하였다. 또한 코일과 발사체 사이의 거리는 25 mm로 선정하였다.

각 코일의 저항은 코일의 직경 d와 축방향권수 N, 반경방향권수 M을 이용하여 식(2)와 같이 수식으로 나타낼 수 있다.

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

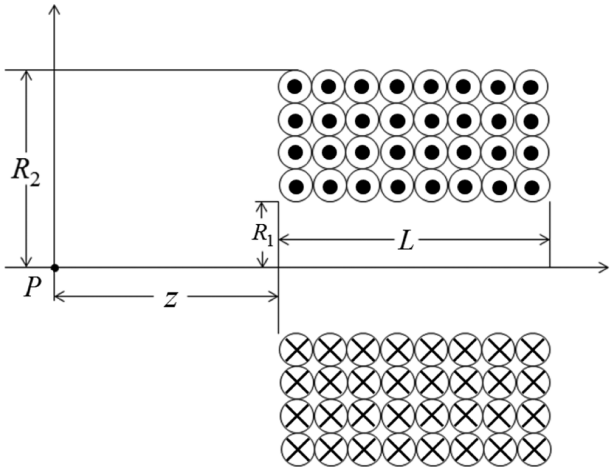

Fig. 2. Magnetic flux density at the point P.

N: 축방향 권수[turns]
M: 반경방향 권수[turns]
R: 솔레노이드 코일의 안쪽 반경[mm]
d: 코일의 직경[mm]
ρ_{copper}: 구리의 비저항[Ω · m]

Fig. 2와 같이 점 P에서의 자속밀도는 식(3)와 같이 나타낼 수 있다[7].

$$B = \frac{\mu NI}{2}\left[(z+L)\ln\frac{\sqrt{R_2^2+(z+L)^2}+R_2}{\sqrt{R_1^2+(z+L)^2}+R_1} - (z)\ln\frac{\sqrt{R_2^2+z^2}+R_2}{\sqrt{R_1^2+z^2}+R_1}\right] \tag{3}$$

B = 자속밀도[Wb/m^2]
I = 인가전류[A]
L = 축방향으로 권선된 코일의 길이[mm]
R_1 = 솔레노이드 코일의 안쪽 반경[mm]
R_2 = 솔레노이드 코일의 전체 반경[mm]
z = 코일과 발사체 사이의 거리[mm]
μ = 투자율[H/m]

입력전압이 일정할 때, 전류는 저항의 크기에 따라 달라진다. 또한 코일 와인딩 권수가 증가할수록 저항도 증가한다. 따라서, Table III의 초기조건을 이용해서 Table II의 최대전류보다 낮은 전류가 흐르는 권수 중에서 식(3)을 이용해 피투사체의 빠른 발사속도를 위해 가장 큰 자속밀도를 갖도록 설계한다.

Table IV는 시뮬레이션을 통해 설계된 코일규격에 따른 최대의 자기장을 형성하는 권수를 보여준다.

Table IV. Optimum number of coil winding turns.

Coil	Number of axial turns of coil (N turns)	Number of radial turns of coil (M turns)
AWG #6	7	6
AWG #7	10	6
AWG #8	10	7
AWG #9	12	7
AWG #10	12	8
AWG #11	12	9
AWG #12	13	10
AWG #13	14	10
AWG #14	14	11
AWG #15	16	11
AWG #16	19	11
AWG #17	19	12
AWG #18	18	13

4. 발사속도

자기력 F는 자기에너지가 발사체의 운동에너지로 변환하는 값으로 특정 공간에서의 자기장 에너지는 식(4)와 같다.

$$u = Volume \times Magnetic\ Density = V\frac{B^2}{2\mu_s} \tag{4}$$

자속밀도가 자기장 전체에서 균일하다고 가정할 경우, 어떤 공간에서 투자율이 μ_m인 물질이 채워졌을 때 에너지 변화량은 식(5)와 같다.

$$\Delta u = u_m - u_0 = V\frac{B^2}{2}\left(\frac{1}{\mu_0} - \frac{1}{\mu_m}\right) \tag{5}$$

코일건의 자속 밀도 B는 발사체의 위치에 따라 변화한다. 따라서 발사체가 자기장 내의 z 위치에 존재할 때 발생하는 에너지 변화는 식(6)과 같다.

$$\Delta u = V\frac{Bz^2}{2}\left(\frac{1}{\mu_0} - \frac{1}{\mu_m}\right) \tag{6}$$

따라서, 에너지와 힘은 식(7)과 같은 관계를 가진다.

$$F(z) = \frac{du}{dz} \tag{7}$$

식(7)을 이용하여 자기장 내의 z 위치에서 발사체가 받는 힘 F를 구할 수 있다.

$$F(z) = \frac{du}{dz} = \frac{\pi r^2}{2}\left(\frac{1}{\mu_0} - \frac{1}{\mu_m}\right)\frac{d}{dz}\left[\int_z^{z+L} B(\zeta)^2 d\zeta\right] \tag{8}$$

$$F = m\ddot{x} \Rightarrow v = \dot{x} = \frac{1}{m}\int F\,dt \tag{9}$$

피투사체의 발사속도 해석을 위해 식(8)을 Newton의 운동방정식을 이용하여 식(9)와 같이 표현가능하며 수치연산 상용프로그램인 MATLAB의 ODE45 함수로 피투사체의 발사속도 해석하였다. 발사속도 해석을 위해 발사체의 초기속도는 0으로 설정하였다. 피투사체의 반지름은 2 mm, 질량은 5.56 gram이다.

Table V. Velocity of projectile according to diameter of coil.

Coil	Velocity of projectile
AWG #6	111.38 m/s
AWG #7	109.65 m/s
AWG #8	103.83 m/s
AWG #9	101.36 m/s
AWG #10	99.8961 m/s
AWG #11	91.8143 m/s
AWG #12	79.8941 m/s
AWG #13	74.0578 m/s
AWG #14	72.7092 m/s
AWG #15	69.1247 m/s
AWG #16	66.0159 m/s
AWG #17	58.9320 m/s
AWG #18	48.8442 m/s

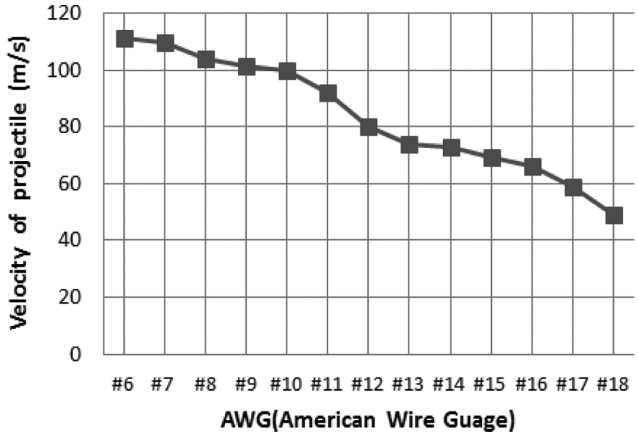

Fig. 3. Velocity comparison according to the diameter of coil.

Table V는 솔레노이드 코일의 지름에 따른 피투사체의 발사속도를 나타낸다.

각 코일의 지름에 따른 발사속도의 비교를 Fig. 3에 나타내었다.

III. 결 론

본 논문에서는 전자기 발사체에서 피투사체의 높은 발사력을 위한 코일건 내의 솔레노이드의 코일 직경에 따른 발사속도의 비교를 수행하였다. 코일의 직경 d를 설계변수를 선정하였으며, 코일에 흐를 수 있는 최대전류를 계산해서 수치연산 상용프로그램인 MATLAB을 이용하여 코일 AWG 규격에 따른 최적의 권수를 설계하여 비교하였다. 직경이 굵을수록 더 높은 발사속도를 보였으며, 직경이 얇은 코일에서는 상대적으로 낮은 발사속도를 보였다. 따라서, Coilgun 제작 시 상대적으로 직경이 큰 코일을 이용하여 솔레노이드를 활용하면 발사속도가 증가할 것으로 기대되지만 코일 직경이 커질수록 코일의 권선 및 가공이 상대적으로 힘들어져서, 솔레노이드 제작비용이 증가한다. 따라서, 코일 직경 설계시 발사속도 및 제작비용을 고려하여 설계하여야 할 것이다.

References

[1] J. H. Kim, S. W. Jeon, and J. Y. Kim, KARI **11**, 127 (2013).
[2] E. J. Yun, T. B. Lee, J. W. Kim, Y. S. Kim, C. H. Hong, and W. C. Seo, KIEE 1521 (2002).
[3] S. J. Lee, J. H. Lee, D. Y. Lee, T. W. Seo, and J. H. Kim, KSMTE **23**, 408 (2014).

[4] S. J. Joo, J. M. Han, J. U. Jo, M. S. Lee, D. Park, J. U. Park, J. H. Byun, D. S. Kim, and G. S. Park, KIEE ICEMS Conferences 402 (2006).
[5] S. J. Lee, J. H. Kim, B. S. Song, and J. H. Kim, J. Magn. **18**, 481 (2013).
[6] I. H. Park, J. M. Kim, K. Seo, and K. S. Park, KIEE 733 (2008).
[7] S. J. Lee and J. H. Kim, Journal of the KAIS **15**, 3455 (2014).