

전자기 발사장치에 적용 가능한 코일건 설계 및 실험

이수정¹, 김진호^{1*}
¹영남대학교 기계공학과

Design and Experiment of Coil gun to Apply Electromagnetic Launcher System

Su Jeong Lee¹, Jin Ho Kim^{1*}

¹Division of Mechanical Engineering, Yeungnam University

요약 본 논문은 전자기 발사체에서 피투사체의 높은 발사력을 위한 코일건 설계 및 실험을 다루고 있다. 현재 코일건은 전자기 발사체에 적용하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 코일건은 솔레노이드 형태의 코일에 전류 인가 시, 플레밍의 오른손 법칙에 의하여 발생하는 전자기력에 의해 피투사체를 추진시키는 원리이다. 피투사체의 발사력은 코일에 흐르는 전류가 생성하는 자기력과 비례한다. 전류는 코일의 수명에 영향을 미치므로 전류의 한계점이 존재한다. 따라서, 전류의 한계점을 초과하지 않고 피투사체가 받는 자기력이 최대가 되는 코일건의 설계가 요구된다. 이를 위해 먼저 코일건의 자속밀도, 자기력을 계산하고, Onderdonk's 식을 이용하여 코일의 전류 한계점을 찾는다. 솔레노이드를 설계하기 위해서 전류 한계점을 초과하지 않는 조건을 만족하며 코일건의 자기력을 최대로 가지는 권수를 알아낸다. 설계 결과에 따라 시제품을 제작하여 피투사체의 속도를 측정하기 위한 실험을 하였다. 발사된 피투사체는 CCD 카메라를 이용하여 촬영 및 분석하였으며, 평균 속도 21m/s임을 알 수 있었다. 또한, 상용 전자기 해석 소프트웨어 MAXWELL을 이용한 자속 밀도 해석값과 실험값을 비교한 결과, 오차는 약 9.5%이었다.

Abstract This paper reports the design and experiments for a high drive force of projectile in a coil gun system. Currently, the coil gun has been studied to apply an electromagnetic launcher. A coil gun launches a projectile by the attractive magnetic force of the electromagnetic coil. The drive force 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 coil gun design, which does not exceed the current limit and the magnetic forces are at the maximum, is required. For this purpose, this study calculated the magnetic flux density and forces of the coil gun system and determined the current limit of the coil using the Onderdonk's equation. Based on the design result, a prototype was manufactured and an experiment was conducted to measure the muzzle velocity of the projectile. The fired projectile was analyzed using a CCD camera, and the muzzle velocity was 21m/s. In addition, a comparison of the experimental value and analysis value using commercial electromagnetic analysis software MAXWELL revealed an error of approximately 9.5%.

Key Words : Coil gun, Electromagnetic Launcher, Magnetic force, Muzzle velocity, Solenoid design

1. 서론

현재 소형위성 분야에서 가장 큰 문제는 저 비용의 신뢰성 있는 우주발사체를 개발하는 것이다. 이는 상용화를 위해서도 필수적인 부분이다. 우주발사체의 추진 방법으로 과거에 다양한 방법이 제안되었다. 크게 화학 에

너지를 이용한 방법과 전자기력을 이용한 방법으로 분류할 수 있다. 화학 추진 로켓은 기술적으로 많은 발전이 있었으나 발사 비용을 줄이는 데에는 한계가 있었다. 또한 화학 연료를 사용함으로써 운용, 유지에 많은 시간과 비용이 소요된다. 이는 연속적인 발사 능력을 제한한다.

EML이란 Electromagnetic Launcher의 약자로써 전

*Corresponding Author : Jin-Ho Kim(Yeungnam Univ.)

Tel: +82-53-810-2441 email: jinho@ynu.ac.kr

Received February 10, 2014

Revised March 3, 2014

Accepted June 12, 2014

자기력 발사장치의 영어 약칭이다. 전자기 에너지를 Projectile에 전달하여 이를 기계적인 운동 에너지로 변환시켜 주기 위한 특수한 Linear Motor들을 일컫는 말이다. EML을 이용하면 우주발사체만 구동시켜주면 되므로 연료와 산소를 싣고 갈 필요가 없고 전기충전만 되면 계속해서 반복 사용할 수 있는 장점이 있다. 즉, 화학 추진 로켓과 달리 운용, 유지 및 보수에 소요되는 시간이 길지 않으므로 자주 발사할 수 있다[1,2].

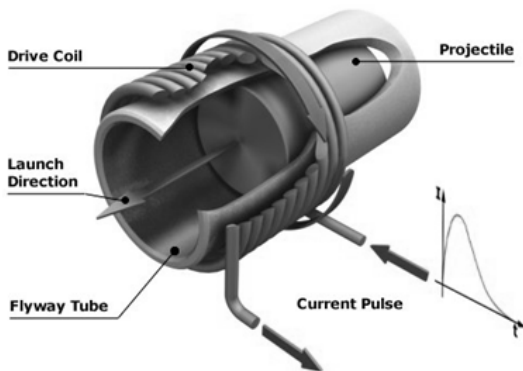
본 논문은 EML의 한 종류인 코일건을 이용하여 피투사체를 발사하기 위한 연구를 다룬다. 코일건에서 피투사체의 높은 발사력은 코일이 생성하는 자기력의 세기와 비례한다. 하지만, 코일의 수명에 있어서 코일에 인가할 수 있는 전류의 한계점이 존재한다. 따라서 본 논문에서는 전류의 한계점을 초과하지 않고 높은 자기력을 생성하는 코일을 설계하고자한다. 또한, 설계한 코일에 따라 코일건 시제품을 제작하여 피투사체를 발사하기 위한 실험을 수행하였다.

2. 본론

2.1 코일건

코일건은 솔레노이드 형태의 코일에 전류를 인가 시, 플레밍의 오른손 법칙에 의하여 발생하는 전자기력에 의해 피투사체를 추진시키는 원리이다. 코일건은 Fig. 1과 같이 원통형 코일 속을 지나면서 원형 코일의 축 방향으로 작용하는 힘을 받아 추진된다.

원형코일에 의해 피투사체의 원주에 작용하는 힘은 평형인 경우 원주 방향 성분과 축 방향으로 나누어

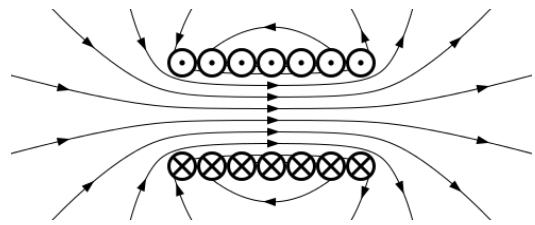


[Fig. 1] Schematic and principle of coil gun

지는 데, 이중에서 축 방향 성분의 힘에 의해 피투사체는 추진하게 된다. 또한 피투사체의 수평축이 flyway tube의 수평축과 일치하면, 원주 방향의 힘은 중심점에 대해 평형을 이루고 있으므로 피투사체는 flyway tube로부터의 기계적 마찰이 없이 추진될 수 있다. 따라서 이론적 한계속도는 없다[3-5].

2.2 수학적 모델링

솔레노이드 코일에 전류 I가 흐르고 있을 때 주어진 전류가 생성하는 자기장은 Fig. 2와 같다.



[Fig. 2] Magnetic field of solenoid coil

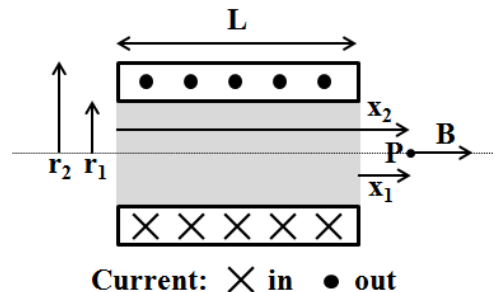
미소길이에 흐르는 전류 I에 의한 자계의 세기는 식 (1)과 같은 biot-savart law에 의해서 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$d\vec{H} = \frac{I d\vec{L} \times \hat{a}_R}{4\pi R^2} = \frac{I d\vec{L} \times \vec{R}}{4\pi R^3} [A/m] \quad (1)$$

$$\text{Where } \hat{a}_R = \frac{\vec{R}}{|\vec{R}|}$$

$$\vec{H} = \oint \frac{I d\vec{L} \times \hat{a}_R}{4\pi R^2} \quad (2)$$

Fig. 3과 같이 솔레노이드 코일에서 점 P의 자속밀도는 식 (3)과 같다[6-7].



Current: X in • out

[Fig. 3] variables of point P

$$B = \frac{\mu_0 n i}{2(r_2 - r_1)} \begin{bmatrix} x_2 \ln \frac{\sqrt{r_2^2 + x_2^2} + r_2}{\sqrt{r_1^2 + x_2^2} + r_1} \\ -x_1 \ln \frac{\sqrt{r_2^2 + x_1^2} + r_2}{\sqrt{r_1^2 + x_1^2} + r_1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

자기력 F는 자기장 에너지가 운동에너지로 변환하는 값으로 특정 공간의 자기장 에너지는 식 (4)와 같다.

$$u = Volume \times Magnetic \ Energy \ Density \quad (4)$$

$$= V \frac{B^2}{2\mu_s}$$

자속밀도가 자기장 내부에서 균일하다고 가정할 때, 투자율 μ_m 의 물질이 채워진 특정 공간에서 에너지 변화량은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

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

실제 자기장 속의 자속 밀도 B는 피투사체 위치 z에 따라 변화하는 함수이다. 따라서 projectile의 미소 부피 dV를 가지는 피투사체가 자기장 속에서 존재할 때 에너지 변화는 식 (6)과 같다.

$$d\Delta u = dV \frac{B(x_2)^2}{2} \left(\frac{1}{\mu_0} - \frac{1}{\mu_m} \right) \quad (6)$$

에너지 u와 자기력 F는 식 (7)과 같은 관계를 가진다.

$$F(x_2) = \frac{du}{dx_2} \quad (7)$$

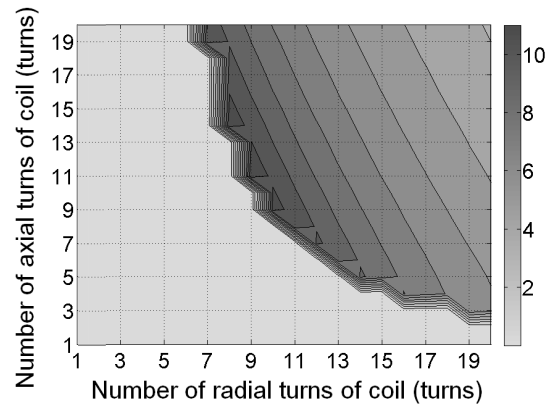
2.3 솔레노이드 설계

솔레노이드의 설계에 따라 솔레노이드에 흐르는 전류의 최대값 및 상승시간이 정해진다. 코일의 감은 수가 많아질수록 코일의 저항과 인덕턴스가 증가한다. 이는 전류의 최대값이 낮아지며 상승시간도 길어져 피투사체를 짧은 시간내에 발사시킬 수 없다. 따라서, 코일의 녹는점을 고려하여 전류의 최대값을 초과하지 않고, 전류의 상승시간이 짧은 코일의 감은 수의 설계가 요구된다. 이를 위해 솔레노이드의 축방향 감은 수와 반경방향 감은 수를 설계 변수로 선정하였다.

튜브는 피투사체가 발사되는 통로의 역할을 하는 동

시에 코일을 감기 위한 얼레의 역할을 한다. 튜브는 전기적 특성을 가지지만 자성을 띠지않는 알루미늄 재질을 사용한다. 또한, 외반경이 3.6mm이고 두께가 0.5mm인 관을 선정하였다.

솔레노이드 코일은 전류를 보다 많이 흐를 수 있도록 AWG 12(직경 2mm)를 사용하였다. 코일 와이어 직경이 2mm인 코일은 약 3700A을 12ms동안 흘릴 수 있다. 코일이 녹지 않는 3700A 이하의 전류를 인가한다고 가정했을 때, 최대 자속밀도 B값을 가지는 감은 수를 설계하였다. 솔레노이드의 축방향 감은 수와 반경방향 감은 수에 따라 자속밀도 B값을 Fig. 4에 나타내었다.



[Fig. 4] Magnetic density of longitudinal direction turns and radial direction turns

Table 1은 설계한 솔레노이드 수치를 나타낸다. Table 2는 설계된 솔레노이드에 따른 전기적 특성을 보여준다.

[Table 1] Specification of solenoid coil

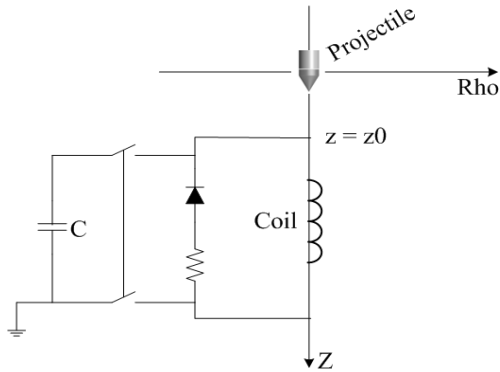
d	Diameter of wire	2 [mm]
N	Number of axial turns of coil	11 [turns]
M	Number of radial turns of coil	9 [turns]
r1	Inner radius of coil	3.6 [mm]

[Table 2] Electronic characteristics

Vc	Initial capacitor voltage	200 [V]
L	Inductance of coil	0.108 [mH]
R	resistance	0.0455 [ohm]
C	Capacity of capacitor	0.1 [F]

2.4 회로도

Fig. 5는 코일건에 대한 회로도이다. 캐패시터를 이용하여 충전하고 전압을 방전함으로써 솔레노이드 코일에 전류가 인가된다. 피투사체가 코일 입구에 위치할 때 자속밀도가 최대값을 가지므로 전류 스위치를 off 한다[8].

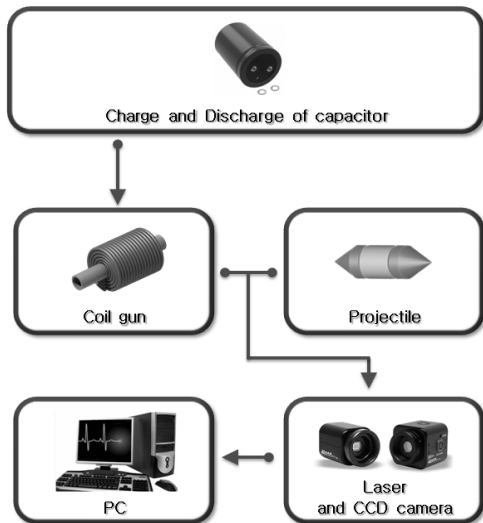


[Fig. 5] Circuit of coil gun

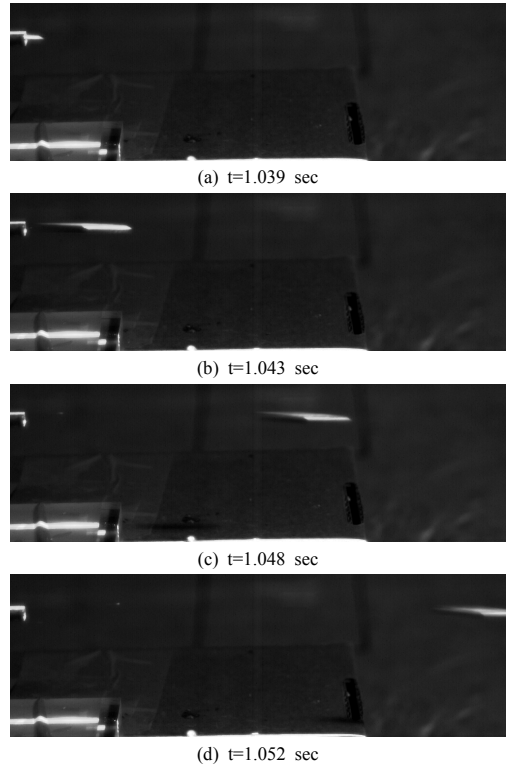
2.5 코일건 제작 및 실험

Fig. 6은 실험 과정을 간략하게 나타낸다.

코일건은 캐패시터의 방전으로 인해 전류를 인가됨으로써 피투사체가 발사된다. 다음 Fig. 7은 CCD(Charge Coupled Device; 전하결합소자) 카메라를 이용하여 피투사체의 발사를 촬영 및 캡처한 사진을 나타낸다. 피투사체는 약 1ms동안 21mm를 이동하여 평균 속도 21m/s임을 알 수 있었다.



[Fig. 6] Experiment process



[Fig. 7] Measure of muzzle velocity using the CCD camera

3. 결론

본 논문은 전자기 발사체(EML)에서 피투사체의 높은 발사력을 위한 코일건 설계하고 실험하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

1. 코일건에서 피투사체의 높은 발사력은 코일이 생성하는 자기력에 비례한다. 하지만, 코일에 허용되는 전류의 최대값이 존재한다.
2. AWG 12(직경 2mm)의 코일은 12ms동안 3700A를 허용한다. 입력전압이 200V일 때, 3700A 이하의 전류를 인가할 수 있는 솔레노이드 코일을 설계하였다.
3. 설계된 솔레노이드 코일의 축방향 감은 수는 11 turns, 반경방향 감은 수는 9 turns에서 조건을 만족한다.
4. 상용 전자기 해석 소프트웨어 MAXWELL을 이용한 해석과 설계된 코일건의 자속밀도 B값을 비교

하면 다음 Table 3과 같다. CCD 카메라를 이용하여 촬영한 결과, 평균 속도는 21m/s임을 알 수 있었다.

[Table 3] Comparison of result

	Analysis	Experiment
magnetic flux density B [T]	10.7299	11.8599

5. 전자기 발사체는 일반적으로 무기 및 위성 발사 등에 적용 된다. 코일건이 이에 활용되기 위해서는 발사 속도를 높일 수 있는 방법이 필요하다. 따라서 코일건 시스템의 발사 속도를 높일 수 있는 다단 코일건에 대한 연구가 필요하다.

References

- [1] Sung Joong Joo, Jae Man Han, Ji Ung Jo, Man Sung Lee, Dong Suk Park, Je Uk Park, Jong Hyuk Byun, Dong Sok Kim and Gwan Soo Park, "Development of the small electro-magnetic launcher using solenoid coil", 2006 KIEE EMECS Conference, pp. 402-404, Pusan National University, Korea (2006)
- [2] H. D. Fair, "Advances in Electromagnetic Launch Science and Technology and Its Applications", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.45, No.1, pp. 225-230 (2009)
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2008.2008612>
- [3] De-man Wang, Qun She, Yin-ming Zhu, Jian-jun Chen, "The Magnetic Levitation of the Projectile in Coil guns", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.33, No.1, pp. 195-200 (1997)
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/20.559945>
- [4] Giancarlo Becherini and Bernardo Tellini, "Helicoidal Electromagnetic Field for Coilgun Armature Stabilization", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.39, No.1, pp. 108-111 (2003)
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2002.805878>
- [5] Giancarlo Becherini, "Gyroscopic Stabilization of Launch Package in Induction Type Coil gun", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.37, No.1, pp. 116-122 (2001)
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/20.911803>
- [6] Lizhong Xu and Yanbo Geng, "Forces of rails for electromagnetic railguns", Applied Mathematical Modeling, Vol. 36, pp.1465-1476 (2012)
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2011.09.036>
- [7] Eric Dennison, "On-Axis Field of a Finite, Straight, Thin Shell Solenoid", Magnet Formulas web site, 2005, "<http://www.netdenizen.com/emagnet/index.htm>"
- [8] Jae Man Han, Sung Joong Joo, Ji Ung Jo, Man Sung Lee, Dong Suk Park, Je Uk Park, Jong Hyuk Byun, Dong Sok Kim and Gwan Soo Park, "Research of the driving characteristic in the electromagnetic launcher by switching circuit", 2006 KIEE EMECS Conference, pp. 595-596, Pusan National University, Korea (2006)

이 수 정(Su Jeong Lee)

[준회원]



- 2009년 3월 ~ 2013년 2월 : 영남대학교 기계공학부 (첨단기계전공)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 영남대학교 기계공학과 석사 (기계공학 전공)

<관심분야>

초정밀 모터 및 액츄에이터 설계

김 진 호(Jin Ho Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 한양대학교 공학사 (기계설계전공)
- 2002년 5월 : 미) U.C. Berkeley 공학 석사 (기계 공학전공)
- 2002년 9월 ~ 2005년 9월 : 미) U.C. Berkeley 공학 Ph.D. (기계 공학전공)
- 2007년 9월 ~ 현재 : 영남대학교 기계공학부 부교수

<관심분야>

초정밀 모터 및 액츄에이터 설계