

코일건의 속도향상에 관한 연구

박창형*, 김진호*[#]

*영남대학교 기계공학과

Improving Speed of Coil Guns

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

[#]School of Mechanical Engineering, Yeungnam UNIV.

(Received 29 December 2017; received in revised form 2 January 2018; accepted 5 January 2018)

ABSTRACT

Coil guns are known worldwide as inexpensive space launch vehicles. The principle of Fleming's right-hand rule allows the coil gun to accelerate the projectile by applying enormous voltage to the solenoid coil. This study was performed to improve the speed of the coil gun using MATLAB, a commercially available numerical program for high launching force of electromagnetic projectiles. To maximize the speed of the projectile, the largest coil of American wire gauge was used, and the number of windings in the radial and axial directions of the solenoid coil was optimized. Optimal length of the projectile was obtained by calculating the optimal aspect ratio between the axial length of the solenoid coil and the length of the projectile.

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

1. 서 론

현재 소형 위성 개발 시 가장 중요한 것은 신뢰성 있는 저비용 우주발사체를 개발하는 것이다. 이와 같은 이유로, 전 세계적으로 저비용 우주 발사체의 개발에 박차를 가하고 있다. 과거에는 발사체의 추진력을 화학에너지를 통해 많이 이용하였으나 발사 비용이 크고 유지보수에 많은 시간과 비용이 필요하기 때문에 어려움을 감수해야만 했다. 또한 순간적으로 강력한 에너지를 발생시키기에는 여러 가지 제약이 있었고, 이는 발사속도의 한계를 초래하였다. 따라서 최근에는 이와 같은 문제점을 해결

하기 위해 새로운 방식의 발사체가 개발되었다. 전자기력 발사장치의 약칭인 EML은 Electromagnetic Launcher의 약자로서, 코일에 순간적으로 강한 전류를 흘려 전자기 에너지를 기계적 운동에너지로 변환시킴으로써 발사체를 가속시키는 방식이다. 즉, 앞서 언급한 화학에너지를 이용한 가속방식의 한계를 극복한 방식이다. 바꿔 말하면, 발사체와 코일의 접촉이 없어서 마찰 손실이 거의 없다는 특징을 이용해 다단코일로 속도를 연속적으로 가속하게 될 경우 이론적인 한계 속도가 없다는 특성을 활용하여 화학에너지를 이용한 가속방식의 한계를 극복한 것이다. 또한 EML은 화학에너지를 통한 발사 장치에 비해 유지 보수에 소요되는 시간과 비용이 현저히 적기 때문에 단기간에 자주 발사할 수 있다는 장점이 있어 전도유망한 발사 방식이라 할 수 있다^[1-4].

Corresponding Author : jinho@ynu.ac.kr
Tel: +82-53-810-2441, Fax: +82-53-810-4627

이와 같이 전자기력을 이용한 발사장치 개발에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. Lee^[4]는 코일건의 수학적 모델링 및 솔레노이드 설계를 통해 실험을 수행하였다. 또한 발사체의 속도를 높이기 위해 최적의 솔레노이드 코일 직경을 찾는 연구를 하였다^[4-6]. 또한 Park^[7]은 솔레노이드 코일의 최적 aspect ratio를 통해 발사체의 최적의 속도를 구하는 연구를 수행하였다. 본 논문에서는 미국전선규격(AWG) #12(∅2.05mm)를 사용하여 솔레노이드 코일의 설계를 수행하였다. 또한 발사체의 속도를 계산하기 위해서 발사체에 작용하는 힘과 솔레노이드 코일에 흐르는 전류 사이의 상관관계를 풀어야 한다. 하지만 이 두 관계의 강한 비선형성 때문에 수학적 모델을 통해 풀기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 일정시간동안 코일에 인가되는 전류의 평균치를 계산하여 발사체의 속도를 구하였다. 또한 상용 전자기 해석프로그램인 MAXWELL을 사용하여 계산한 속도의 타당성을 검증하였다.

2. 본론

2.1 코일건의 원리

Fig. 1은 코일건의 모식도이다. 코일건은 솔레노이드 형태의 코일에 전류를 인가할 때, 플레밍의 오른손 법칙에 의해 발생하는 전자기력에 의해 전기 에너지를 자기에너지로, 자기에너지를 기계적 운동 에너지로 변환시킴으로써 발사체를 가속시키는 원리로 구동된다. 이렇게 발생하게 된 전자기력은 축 방향 힘과 원주 방향의 힘으로 나누어지는데, 축 방향 성분의 힘은 발사체를 가속시키고, 발사체의 진행방향과 튜브의 수평축이 일치한다면 원주방향의 힘은 중심점에 대해 평형을 이루게 된다. 따라서 발사체와 튜브 사이의 기계적 마찰 없이 발사체가 가속되기 때문에 코일건의 이론적인 한계속도는 없다.

2.2 수학적 및 물리적 모델

솔레노이드 형태의 코일에 전류를 인가할 때 자속 밀도(B), 발사체에 작용하는 힘(F), 발사체의 속도(v)를 구하기 위해 수학적 및 물리적 모델을 제작

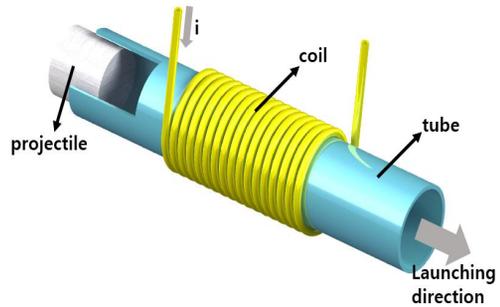


Fig. 1 Mimetic diagram of coil gun

하였다. 먼저, 솔레노이드 코일에 전류 I 가 인가되면 코일 주변에 생성되는 자기장은 Fig. 2와 같다. 또한 발사체에 작용하는 힘(F)는 자기장 에너지가 기계적 운동에너지로 변환되는 것이므로 특정 공간의 자기장 에너지는 식(1)과 같다.

$$u = Volume \times MagneticDensity = V \frac{B^2}{2\mu_s} \quad (1)$$

자속밀도가 자기장 내부에서 전체적으로 균일하다고 가정한다면, 특정 물질의 투자율이 μ_m 인 물질이 채워졌을 때 에너지 변화량은 식(2)와 같다.

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

또한 자속밀도 B 는 발사체와 솔레노이드 코일 사이의 거리와 인가된 전류에 따라 변화한다. Fig. 3와 식(3)은 발사체(점 P)에 작용하는 자속밀도를 구하는 그림과 식이다. 즉, 떨어진 거리를 z , 인가된 전류를 I 라 정의하여 발사체에 작용하는 자속밀도를 구한 것이다.

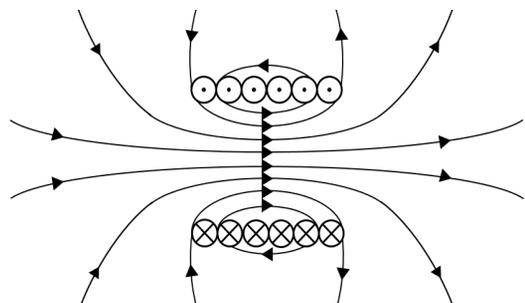


Fig. 2 Magnetic field of solenoid coil

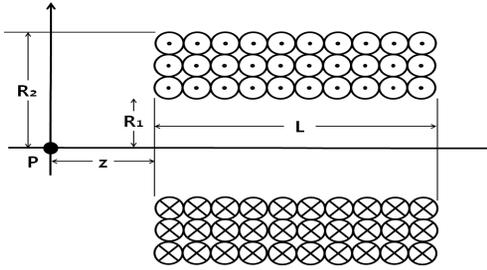


Fig. 3 Magnet flux density at the point P

$$B(I, z) = \frac{\mu_0 NI}{2} \left[\begin{aligned} & (z) \ln \frac{\sqrt{R_2^2 + (z)^2} + R_2}{\sqrt{R_1^2 + (z)^2} + R_1} \\ & - (z-L) \ln \frac{\sqrt{R_2^2 + (z-L)^2} + R_2}{\sqrt{R_1^2 + (z-L)^2} + R_1} \end{aligned} \right] \quad (3)$$

여기서 B는 자속밀도, μ_0 는 공기의 투자율, N은 단위길이당 솔레노이드 코일의 총 권수, I는 솔레노이드 코일에 인가된 전류, z는 발사체와 솔레노이드 코일 입구 사이의 거리, L은 솔레노이드 코일의 길이, R_1 은 솔레노이드 코일의 내반경, R_2 는 솔레노이드 코일의 외반경을 나타낸 것이다. 코일건의 구동원리가 전기에너지가 자기에너지를 거쳐 기계적 운동에너지로 변환되는 것이기 때문에 식(4)과 같이 발사체에 작용하는 힘은 에너지를 위치 z로 미분한 형태로 나타낼 수 있다. 또한 자속밀도를 거리에 대해 적분하여 상수를 곱한 형태로 나타낼 수 있다.

$$F(z) = \frac{du}{dz} = \frac{\pi r_p^2}{2} \left(\frac{1}{\mu_0} - \frac{1}{\mu_m} \right) \frac{d}{dz} \left[\int_z^{z+L} B^2(\zeta) d\zeta \right] \quad (4)$$

따라서 식 (5)과 같이 발사체의 최종 속도를 구할 수 있다.

$$F(I, z) = m_p a = m_p \ddot{z} \Rightarrow v = \dot{z} = \frac{1}{m_p} \int F dt \quad (5)$$

식 (4), (5)에서 r_p 와 m_p 는 각각 발사체의 반경과 질량이다. 또한 적분과정에서 발생하는 적분상수는 발사체의 초기속도 $v_0 = 0 m/s$ 를 대입해 계산한다.

2.3 코일에 흐를 수 있는 최대전류

식 (6) Onderdonk's equation을 이용하여 코일에 순간적으로 인가할 수 있는 최대전류를 계산할 수 있다.

$$I = A \times \sqrt{\frac{\log\left(1 + \frac{T_m - T_a}{234 + T_a}\right)}{33 \times t}} \quad (6)$$

여기서 I는 최대전류(A), A는 코일의 단면적(mm^2), t는 전류인가시간(sec), T_m 은 애나멜의 녹는점($^{\circ}C$), T_a 는 상온($^{\circ}C$)이다. 전류인가시간은 20 ms, 애나멜의 녹는점은 $1083^{\circ}C$, 상온은 $25^{\circ}C$ 로 설정하였다. 식 (6)으로 얻은 전류의 최대치는 4270 A로 계산되었다.

2.4 솔레노이드 설계(자속밀도가 최대가 되는 코일의 권수)

솔레노이드 코일에 전류를 인가시킬 때 코일 주변에는 Magnetic flux가 생성된다. 이를 통해 발사체에 흡인력이 작용하게 되고, 발사체는 가속된다. 또한 솔레노이드 코일의 자기장 분포에 의해 흡인력이 결정되기 때문에 발사체의 성능을 향상시키기 위해서는 최적화된 솔레노이드 코일의 형태가 설계되어야 한다. 만약 코일의 권수에 상관없이 코일 당 동일한 전류가 흐른다고 가정하면 코일의 권수가 증가함에 따라 발사체에 작용하는 자기력 또한 커지기 때문에 발사속도를 증가시킬 수 있다. 하지만 실제 코일건의 솔레노이드에는 전류가 아닌 막대한 전압을 순간적으로 인가하기 때문에 권수가 증가할수록 솔레노이드의 저항과 인덕턴스가 증가하여 역기전력을 발생시킨다. 이는 발사체의 속도를 오히려 감소시킨다. 즉, 무조건 권수가 크다고 발사체의 속도를 키울 수 있는 것이 아니라, 각각의 코일 규격마다 가장 큰 출력을 낼 수 있는 권수가 존재함을 의미한다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 Park[7]은 발사체의 속도를 극대화시킬 수 있는 방법을 반경방향 권수와 축방향 권수의 비인 aspect ratio를 통해 연구를 수행하였다. 이 연구를 바탕으로 본 연구에서는 반경방향 권수와 축방향 권수를 변수로 두고 발사체의 속도에 영향을 미치는 자속밀도가 최대가 되는 권수에 대해 분석하였다. 발사속도의 극대화를 위해서 미국전선규격(AWG) #12($\varnothing 2.05mm$)을 선정하고 발사체의 속도가 최대가 되는 반경방향과 축방향 권수를 상용수치연산프로그램인 MATLAB을 통해 구하였다. 또한 식(6)과 같이 발사

체의 속도는 자속밀도의 함수이므로 자속밀도가 최대가 되는 권수를 구함으로써 발사체의 속도가 최대가 되는 권수를 계산하였다. 솔레노이드 코일의 저항은 식(7)과 같이 코일의 축방향권수 N , 반경방향권수 M , 솔레노이드코일의 내경 R , 코일의 직경 d , 구리의 비저항 ρ 를 통해 나타낼 수 있다. 즉, 입력전압이 일정하기 때문에 코일의 권수가 커짐에 따라 솔레노이드 코일의 저항이 증가하게 된다. 단위길이당 솔레노이드 코일의 권수(N)는 반경방향의 권수와 반경방향의 권수의 곱을 단위길이로 나누어 준 값이고, 솔레노이드 코일의 길이(L)은 반경방향의 권수와 코일 직경의 곱이다. 또한 발사체가 통과하는 통로 역할을 하는 동시에 코일을 감는 열레 역할을 하는 튜브는 자성은 없지만 전기적 특성이 있는 알루미늄 재질의 관을 사용하였고. 튜브의 외반경은 12mm, 두께는 1mm, Air gap은 1mm로 선정하였다. 따라서 솔레노이드 코일의 내반경(R_1)은 12mm, 솔레노이드 코일의 외반경(R_2)은 12mm + 반경방향의 권수와 코일의 직경의 곱으로 나타낼 수 있다. 마지막으로 발사체의 중심과 솔레노이드 코일 입구 사이의 거리(z)는 25mm로 설정하였다. 솔레노이드 코일의 최적의 권수를 계산하기 위해서 축방향 권수(A), 반경방향 권수(R)을 변수로 두고 MATLAB의 for문을 통해 각각의 변수를 1부터 100까지 변화시키면서 자속밀도가 최대가 되는 권수를 계산하였다. 그 결과값은 반경방향 8 turns, 축방향 18turns로 나타났다.

2.5 전기 관련 수식

본 논문에서 사용된 코일건의 원동력은 커패시터에 충전된 전하를 순간적으로 방전시킴으로써 솔레노이드 코일에 막대한 전류를 흘려주고, 이로 인해

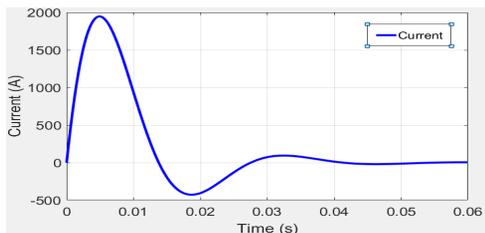


Fig. 4 The current of solenoid coil

발생하는 Magnetic flux에 의해 발사체가 가속되는 원리이다. 따라서 시간에 따른 전류의 변화를 구하기 위해서는 식 (7)과 같은 RLC 직렬회로의 2차미분방정식을 풀어야 한다.

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

여기서 L 은 솔레노이드 코일의 인덕턴스이고, C 는 커패시터의 용량, R 은 커패시터와의 등가저항과 솔레노이드 코일 저항의 합이다. 또한 초기값은 $i(0) = 0A$, $V_c(0) = V_0$ 이다. Table 1은 전기적 스펙을 나타내고 Fig. 4는 시간에 따른 전류의 변화를 나타낸다. 앞서 언급한 바와 같이 발사체에 작용하는 힘은 시간에 따른 전류와 발사체의 위치에 따라 바뀌는 형태로 커플링 되어 있어 비선형성이 강하다. 따라서 본 연구에서는 시간에 따른 전류를 간단하게 정의하기 위해 전류의 평균값을 사용하였고, 전류가 반대방향으로 흐르게 되는 0.0138s에서는 발사체의 진행방향과 반대로 힘이 작용하기 때문에 전류를 차단시켜줘야 하므로 전류의 평균치는 약 1174A이다. 이를 바탕으로 발사체의 속도를 계산하였다.

Table 1 Electrical specifications

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

2.6 발사체의 최적설계

발사체의 길이 또한 발사속도에 영향을 미친다. 즉, 솔레노이드 코일의 축방향 길이와 발사체의 길이의 비에 따라 발사체의 속도가 변할 수 있다. 발사체의 속도는 식(8)와 같이 발사체에 작용하는 자기장 에너지의 제공근에 비례하고, 질량의 제공근에 반비례한다. 여기서 W 는 자기장이 한 일, m_p 은 발사체의 질량이다.

$$W = \frac{1}{2} m_p v_p^2 \rightarrow v_p = \sqrt{2 \frac{W}{m_p}} \quad (8)$$

즉, 길이가 길어지는 만큼 자기장 에너지를 많이 받을 수 있지만, 반면 질량은 커지기 때문에 자기장 에너지의 극대화와 질량의 최소화 사이에 최적화가 필요한 것이다. 따라서 솔레노이드 코일의 축방향 길이(L)와 발사체의 길이(L_p)의 최적의 비를 구하기 위해 솔레노이드 코일의 길이를 100등분하여 for문을 활용해서 1~100까지의 곱을 구함으로써 발사속도가 최대가 되는 솔레노이드 코일과 발사체의 길이비를 계산하였다. 계산결과 L_p/L의 비가 0.208일 때 발사체의 속도가 최대가 됨을 확인하였다. 따라서 발사체의 길이는 7.5mm일 때 약 70m/s의 결과를 얻었다.

3. 시뮬레이션

상용전자기해석프로그램인 MAXWELL을 사용해서 앞서 계산한 수식을 검증하였다. 솔루션 타입은 시간에 따라 변하는 전류, 그에 따라 변화는 자속밀도, 발사체의 움직임을 표현할 수 있는 transient 해석을 수행하였고, 해석시간을 줄이기 위해 2D-model 중 Z축을 기준으로 회전체 해석을 수행할 수 있는 cylindrical about Z를 사용하였다. 또한 전체 해석시간은 1.4ms, time step은 10μs로 설정하였다. Fig. 5 (A)는 2D-model의 치수들, (B)는 자기력에 의해 발사체가 가속되는 모습을 보여주는 그림이다. Fig. 6는 발사체의 속도를 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 발사체의 속도는 1.3ms때 약 63m/s로 나타났다.

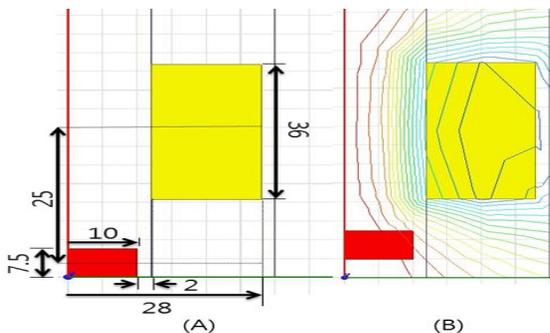


Fig. 5 (A) 2D-modeling (B) Magnetic flux of model

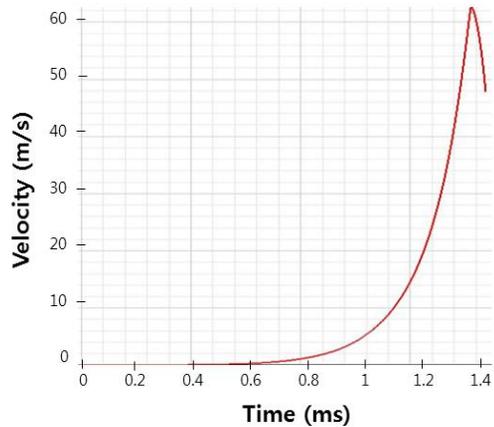


Fig. 6 The velocity of projectile

그 후에는 속도가 급격히 감소하는데 이는 발사체가 솔레노이드 코일의 중앙부를 통과하였기 때문에 진행방향과 반대방향의 힘이 작용하기 때문이다. 따라서 시뮬레이션 및 시제품 제작 시 1.3ms에서 전류를 차단하여 이와 같은 suction 현상을 방지해야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 발사체의 속도를 극대화시킬 수 있는 코일건의 속도향상에 관한 연구를 진행하였다. 먼저, 본 논문에서는 미국전선규격(AWG) #12(∅ 2.05mm)를 사용하여 솔레노이드 코일의 설계를 수행하였다. 또한 발사체의 속도가 최대가 될 수 있도록 솔레노이드 코일의 반경방향과 축방향의 권수를 최적화하였고, 솔레노이드 코일의 축방향 길이와 발사체의 길이 사이의 최적의 aspect ratio를 구함으로써 발사체의 최적의 길이를 구하였다. 이를 통해 발사체의 속도 향상을 가능하게 하였다. 또한 수학적모델을 통해 얻은 결과를 시뮬레이션 함으로써 타당성을 검증하였다. 오차는 약 10%로 나타났는데, 그 원인은 수학적 모델의 경우 에너지 손실 없이 전기에너지가 모두 발사체의 운동에너지로 변환되기 때문에 약 70m/s로 계산된 반면 시뮬레이션에서는 발사체 외곽에도 magnetic flux가 형성되기 때문에 에너지 손실이 발생하기 때문이다.

후 기

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

REFERENCES

1. Jae-Hwan Jang, Seong-Jin Cho, Jin Ho Kim, "Lumped Parameter Modeling and Analysis of Electromagnetic Linear Actuator", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.15 No.5, pp.18~24, 2016
2. 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 electromagnetic launcher using solenoid coil", 2006 KIEE EMECS Conference, pp. 402-404, Pusan National University, Korea, 2006
3. 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
4. Su Jeong Lee, Jin Ho Kim "Design and Experiment of Coil gun to Apply Electromagnetic Launcher System", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.15, No.6 pp. -, 2014
5. Jae-Hwan Jang, Jin Ho Kim "Parameter Study on the Design of solenoid to Enhance the Velocity of Coilgun", Journal of the Korean Magnetics Society 25(3), 1-5, 2015
6. Jong-Cheon Park, Seung-Min Shin "A Simulation-based Optimization of Design Parameters for Cooling System of Injection Mold by using ANOVA with Orthogonal Array", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 5, pp. 121-128, 2012
7. Seong Jin Cho, Jin Ho Kim, "A Study on Optimal Design for Linear Electromagnetic Generator of Electricity Sensor System using Vibration Energy Harvesting", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.16, No.2, pp.7~15, 2017
8. Il Hwan Park, Dong Woo Kim, Eun Young Ha, Soo Yeop Kang, Hyoung Yong Baek, Seung Ho Yoon, Eun Young Jeon, Gwan Soo Park "Development of the 2-stage Coilgun using Reluctance type", The Korean Institute of Electrical Engineers, 2007
9. Ji-Hun Kim, Sang-Woon Jeon, and Joonyun Kim, "A Mathematical and Physical Model for the Design of a Single Stage Coilgun", Korea Aerospace Industry Technology 11, 127, 2013