

단일 스테이지 코일건 설계를 위한 수학적 및 물리적 모델

김지훈*, 전상운**, 김주년***

A Mathematical and Physical Model for the Design of a Single Stage Coilgun

Ji-Hun Kim*, Sang-Woon Jeon**, Joonyun Kim***

Abstract

This paper deals with a single stage coilgun which is a variety of EML(ElectroMagnetic Launcher) and can be applied to launching a small satellite. We propose a mathematical and physical model in order to design a single stage coilgun and study physical characteristics related to design parameters. A proposed mathematical and physical model is verified by electromagnetic FEM software FEMM 4.2.

초 록

본 논문에서는 소형위성 발사장치에 적용할 수 있는 EML의 일종인 코일건에 관한 내용을 다루고있다. 단일 스테이지 코일건 설계를 위해서 수학적 및 물리적 모델을 구축하고 설계 인자에 따른 물리적 특성을 파악하였다. 또한 구축된 수학적 및 물리적 모델을 전자기 유한요소해석을 통하여 검증하였다.

키워드 : 전자기력 발사장치(ElectroMagnetic Launcher), 코일건(Coilgun), 솔레노이드 코일(Solenoid Coil), 전자기 유한요소해석(Electromagnetic FEM)

1. 서 론

소형위성은 비용 대비 효율성 면에서 기존의 대형위성에 비해 절대적인 우위를 차지하고 있다. 이런 이유로 세계 각국에서는 경쟁적으로 신기술 개발과 확보에 박차를 가하고 있다. 소형위성의 장점은 개발 소요 비용이 저렴하고 단기간에 개발이 가능하며 이를 통해서 보다 많은 우주 비행 기회가 제공되므로 신기술의 적용이 용이하

다는 점이다. 단점은 탑재체의 무게 및 전력에 제한이 있으며 단일점 실패에 민감하고 임무수명이 짧다는 점이다. 이러한 장점 및 단점을 고려하여 기존에 하나의 중대형 위성이 수행하던 기능을 다수의 소형위성을 이용하여 수행하기 위한 연구가 계속되고 있다.[1][2]

현재 소형위성 분야에서의 가장 큰 문제는 저비용의 신뢰성 있는 우주발사체를 개발하는 것이다. 이는 상용화를 위해서도 필수적인 부분이다.

접수일(2013년 9월 2일),

* 단체계팀/jihun@kari.re.kr

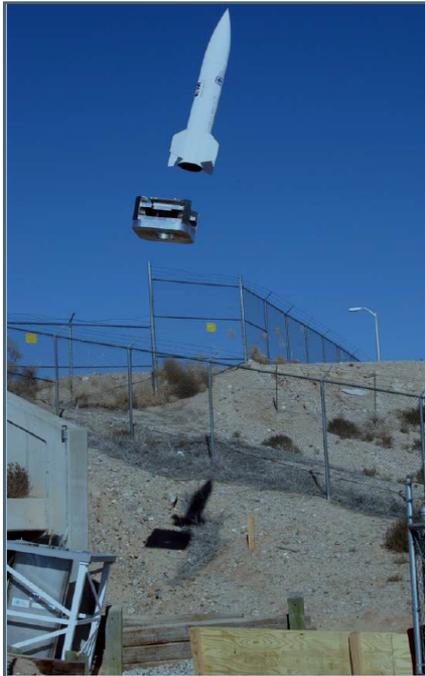
수정일(1차 2013년 10월 17일),

** 단체계팀/swjeon@kari.re.kr

게재 확정일(2013년 11월 1일)

*** 발사체전자팀/jnkim@kari.re.kr

우주발사체의 추진 방법으로 과거에 다양한 방법이 제안되었다. 크게 화학 에너지를 이용한 방법과 전자기력을 이용한 방법으로 분류할 수 있다. 화학추진로켓은 기술적으로 많은 발전이 있었으나 발사 비용을 줄이는 데에는 한계가 있었다. 또한 화학 연료를 사용함으로써 운용, 유지에 많은 시간과 비용이 소요된다. 이는 다수의 소형위성을 자주 발사하는 데에 어려움이 있다.[3]



TAKE OFF — The electromagnetic missile launcher ejects a missile shape and weighted sled that simulates the missile mass and elements of the electromagnetic propulsion system.
(Photo courtesy of Greg Mann, 15335)

그림 1 EML 시험 장면[8]

화학추진로켓을 대체하기 위해서 현재 전세계적으로 연구 및 개발되고 있는 것이 EML이다. EML이란 ElectroMagnetic Launcher의 약자로서 전자기력 발사장치의 영어 약칭이다. 전자기 에너지를 피투사체(Projectile)에 전달하여 이를 기계적인 운동 에너지로 변환시켜 주기 위한 특수한 Linear Motor들을 일컫는 말이다. 그림 1은 EML을 이용한 미사일 발사 시험 장면이다. EML을 이용하면 우주발사체만 구동시켜주면 되

므로 연료와 산소를 싣고 갈 필요가 없고 전기충전만 되면 계속해서 반복 사용할 수 있는 장점이 있다. 즉, 화학추진로켓과 달리 운용, 유지 및 보수에 소요되는 시간이 길지 않으므로 자주 발사할 수 있으며 이는 다수의 소형위성을 짧은 기간에 발사하기에 적합하다. 이러한 장점 때문에 300 kg의 소형위성을 발사하는 EML에 대한 연구도 진행되고 있다.[4][5][6][7][8]

본 논문에서는 소형위성 발사장치에 적용할 수 있는 EML의 일종인 코일건에 관한 내용을 다루고있다. 단일 스테이지 코일건 설계를 위해서 수학적 및 물리적 모델을 구축하고 설계 인자에 따른 물리적 특성을 파악하려고한다. 또한 구축된 수학적 및 물리적 모델을 전자기 유한요소 해석을 통하여 검증하려고 한다.

2. 본 론

2.1 수학적 및 물리적 모델

단일 스테이지 코일건 설계를 위해서는 수학적 및 물리적 모델을 구축해야 한다. 구축된 모델을 바탕으로 설계인자가 코일건의 기능 및 성능에 어떻게 영향을 미치는 지를 파악하고 요구되는 목표를 만족하도록 그 값을 결정할 수 있다. 단일 스테이지 코일건의 기하학적 형상을 정의하고 이에 대한 수학적 및 물리적 모델링을 수행하였다. 그 후 설계인자에 따른 시뮬레이션을 수행하여 각 설계인자가 미치는 물리적 결과를 확인하였다.

2.1.1 기하학적 형상

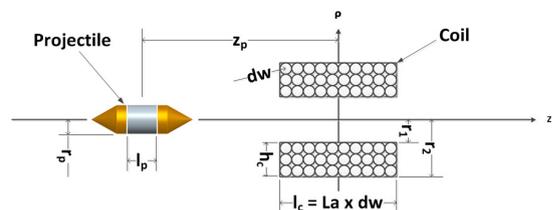


그림 2 단일 스테이지 코일건의 기하학적 형상

단일 스테이지 코일건 설계를 위한 수학적 및 물리적 모델을 구축하기 위해서 기하학적 형상을 그림 2와 같이 정의하였다. 코일은 단일 스테이지로 한 개의 코일로 구성된다. 코일의 중심을 지나는 길이 방향 축과 반경 방향 축을 각각 z 축, ρ 축으로 정의한다. 코일을 구성하는 와이어의 지름은 dw , 코일의 안지름은 r_1 , 코일의 바깥지름은 r_2 , 코일의 높이는 h_c 로 정의한다. 반경 방향의 코일턴수를 Ra 라고 하면 코일의 높이 h_c 는 $Ra \times dw$ 가 된다. 코일의 길이를 l_c , 길이 방향의 코일턴수를 La 라 하면 코일의 길이 l_c 는 $La \times dw$ 가 된다. 피투사체는 전자기력에 의해서 힘을 받는 강자성체 부분과 페이로드에 해당하는 부분으로 나뉜다. 페이로드는 비자성체이며 공기저항을 최소화하기 위해서 콘 모양으로 설계하였다. 강자성체의 길이를 l_p 라 하고 반경을 r_p 라 한다. 피투사체의 무게 중심 위치를 z_p 라고 정의한다. 표 1은 기하학적 형상 및 수학적/물리적 모델링 과정에서 사용되는 인자들을 정리한 것이다.

표 1 기하학적 형상 및 수학적/물리적 모델링 인자

표시	내용	단위
r_p	피투사체 반지름	m
l_p	피투사체의 자성체 길이	m
r_1	코일 안쪽 반지름	m
r_2	코일 바깥쪽 반지름	m
h_c	코일 높이(= $r_2 - r_1$)	m
dw	코일 와이어 지름	m
l_c	코일 길이	m
z_p	피투사체 중심의 위치	m
m_p	피투사체의 총 질량	kg
n	단위 길이당 코일 감긴 수	turns/m
N	총 코일 감긴 수	turns
Ra	반경 방향 코일 감긴 수	turns
La	길이 방향 코일 감긴 수	turns
μ	강자성체의 투자율	H/m
μ_o	공기의 투자율	H/m

2.1.2 수학적 및 물리적 모델링[9]

공급전원에 의해서 공급된 전기적인 에너지 ($Vi \Delta t$)는 식 (1)과 같이 코일에 저장되는 에너지(ΔE_m), 피투사체에 한 일(ΔW), 코일 저장 등에 의한 손실 일(ΔE_{loss})로 나타낼 수 있다.

$$Vi \Delta t = \Delta E_m + \Delta W + \Delta E_{loss} \quad (1)$$

코일에 전류 i 가 공급될 때 z 위치의 피투사체에 작용하는 힘($F(i, z)$)은 식 (2)와 같이 미소 변위(∂z)에 대한 Coenergy의 변화량(∂W_c)으로 계산할 수 있다.

$$F(i, z) = \frac{\partial W_c}{\partial z} \quad (2)$$

Coenergy는 비선형을 포함하면 식 (3)과 같이 표현된다. B 는 자속밀도(Tesla)이며 H 는 자기장의 세기(A/m)이다. V 는 계산되는 영역의 부피를 나타낸다.

$$W_c = \int_V \left[\int_0^H B dH \right] dV \quad (3)$$

코일에 전류 i 가 공급될 때 강자성체 내의 위치 z 에서의 자속밀도 B 를 $B(i, z) = \mu H(i, z)$ 라고 가정하고 코일에 전류 i 가 공급될 때 공기중의 위치 z 에서의 자속밀도 B 를 $B(i, z) = \mu_o H(i, z)$ 라고 가정하면 Coenergy의 변화량은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \partial W_c(i, z) &= \pi r_p^2 \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\mu_o} - \frac{1}{\mu} \right) \\ & \left[\int_{z+\frac{lp}{2}}^{z+\frac{lp}{2}+dz} B^2(i, z) dz - \int_{z-\frac{lp}{2}}^{z-\frac{lp}{2}+dz} B^2(i, z) dz \right] \quad (4) \end{aligned}$$

식 (4)를 식 (2)에 대입하여 정리하면 강자성체에 작용하는 힘 F 는 다음 식 (5)와 같다.

$$F = m \ddot{z} = \pi r_p^2 \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\mu_o} - \frac{1}{\mu} \right) [B^2(i, z + \frac{l_p}{2}) - B^2(i, z - \frac{l_p}{2})] \quad (5)$$

식 (6)과 같이 자화(magnetization) M 은 자속 밀도 B 와 자기장의 세기 H 로 표현된다. 그러므로 식 (5)의 일부분은 식 (7)과 같이 표현이 된다. 즉, 식 (7)은 단위체적당 자화에 의한 자기장의 에너지이다. 그러므로 강자성체에 작용하는 힘은 피투사체의 강자성체 면적에 자화에 의해서 강자성체 양 단($z_p - l_p/2, z_p + l_p/2$)에 생성되는 단위체적당 자화에너지의 차의 곱과 같다. 힘을 증가시키기 위해서는 피투사체의 반경 및 투자율을 증가시키면 된다. 또한 피투사체의 강자성체 양단에 발생하는 자속밀도를 제공한 것의 차를 크게 하면 작용하는 힘이 증가한다.

$$M = \frac{B}{\mu_o} - H \quad (6)$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\mu_o} - \frac{1}{\mu} \right) B^2(i, z) = \frac{1}{2} M(i, z) B(i, z) = \frac{\int_V [\int_0^B M dB] dV}{V} \quad (7)$$

$$H_o(i, z) = \frac{i n}{2(r_2 - r_1)} \left[\left(z + \frac{l_c}{2} \right) \ln \frac{\sqrt{r_2^2 + \left(z + \frac{l_c}{2} \right)^2 + r_2}}{\sqrt{r_1^2 + \left(z + \frac{l_c}{2} \right)^2 + r_1}} - \left(z - \frac{l_c}{2} \right) \ln \frac{\sqrt{r_2^2 + \left(z - \frac{l_c}{2} \right)^2 + r_2}}{\sqrt{r_1^2 + \left(z - \frac{l_c}{2} \right)^2 + r_1}} \right] \quad (8)$$

힘을 구하기 위해서는 강자성체 양단에서의 자속밀도 B 를 구하여야 한다. Biot Savart의 법칙을 적용하여 공기중의 코일에 전류 i 가 공급될 때 위치 z 에서의 자기장의 세기를 구하면 식

(8)과 같다. 자기장의 세기는 코일에 공급되는 전류, 단위길이당 코일 감김수(n)에 비례하며 코일의 높이에 반비례한다. 또한 코일의 기하학적 형상 등에 따라서 자기장 세기의 크기 및 위치에 따른 자기장 세기의 값이 변경된다. 공기만 있는 경우 자속밀도는 $B(i, z) = \mu_o H(i, z)$ 와 같다.

그러나 코일건의 경우 피투사체를 구성하는 강자성체가 코일의 중심을 따라 이동함에 따라 자기회로의 퍼미언스(Permeance)가 변하며 이는 자속밀도 또한 변한다는 것을 의미한다. 따라서, 피투사체의 위치변화에 따른 퍼미언스의 변화를 다음 식 (9)와 같이 근사화할 수 있다. α, β 는 강자성체의 위치, 길이에 관련된 계수이며, 전체 자기회로의 투자율을 두 계수의 함수로 표현하였다.

$$B(i, z) = \mu(\alpha, \beta) H_o(i, z) \quad (9)$$

피투사체가 z_p 위치에 있을 때 코일에 인가되는 전류를 $i(z_p)$ 라고 하자. 이 전류에 의해서 발생한 힘에 의해서 피투사체가 위치 z_1 에서부터 위치 z_2 로 이동할 때 한 일의 양(W)은 식 (10)과 같다. 힘과 변위(s)의 곱에 해당이 되므로 식 (5)로부터 식 (10)를 얻을 수 있다.

$$W = F s = \pi r_p^2 \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\mu_o} - \frac{1}{\mu} \right) \int_{z_1}^{z_2} [B^2(i, z + \frac{l_p}{2}) - B^2(i, z - \frac{l_p}{2})] dz \quad (10)$$

마찰 및 공기 저항력 등에 의한 손실이 없다고 가정하고 피투사체에 한 일이 모두 피투사체의 운동에너지로 전환이 된다면 피투사체의 속도(v)는 식 (11)과 같다. 동일한 전기에너지가 공급되었을 때 피투사체의 가장 빠른 속도는 피투사체의 중량을 최소화하면서 피투사체에 한 일의 양을 최대화 했을 때 얻을 수 있다. 즉, 설계인자의 최적설계를 통해서 동일한 전기에너지 공급시 최대속도를 얻을 수 있는 설계인자 값을 얻을 수 있을 것으로 보인다.

$$v = \sqrt{\frac{2W}{m_p}} \quad (11)$$

2.1.3 설계인자 및 이에 따른 시뮬레이션

설계인자 변화에 따른 자기장의 세기 및 피투사체에 작용하는 힘의 변화를 파악하기 위해 표 2와 같이 설계인자의 기준값을 설정하였다. 선택한 설계인자의 변화에 따라 자기장의 세기, 힘의 물리적 경향을 파악하였으며 선택하지 않은 설계인자는 기준값을 적용하였다. 피투사체의 반지름은 페이로드의 조건으로부터 주어진다고 가정하고 고정된 값으로 정하였다. 변위 및 길이와 관련된 물리량은 무차원화를 위해서 고정된 값인 r_p 의 비율로 나타내었다. 피투사체를 구성하는 강자성체에 의한 자속밀도의 변화는 무시하였다.

표 2 시뮬레이션을 위한 설계인자 기준값

설계인자	기준값
r_p	1.5 mm
r_1	$r_p \times 1.1$
r_2	$r_p \times 10$
l_c	$r_p \times 5$
l_p	$r_p \times 5$
N	40 turns

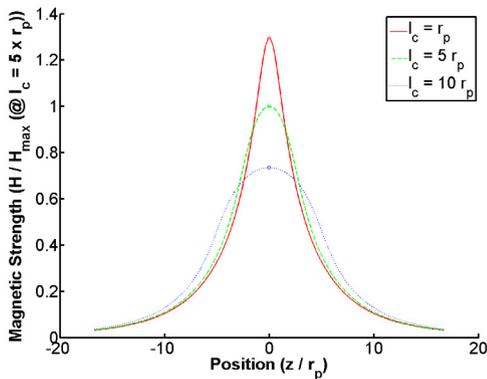


그림 3 위치에 따른 자기장의 세기

그림 3은 위치에 따른 자기장의 세기를 보여주고 있다. 자기장의 세기는 코일의 정가운데에서 최대값을 가지고 위치의 절대값이 크면 자기장의 세기는 작아진다. 코일의 길이를 r_p 에서부터 $10 r_p$ 까지 변화시키며 자기장의 세기를 구하였다. 코일의 길이 이외의 인자는 기준값을 그대로 적용하였다. 그림 상의 각 곡선은 코일의 길이가 피투사체 반경의 5배일 때의 최대 자기장의 세기를 기준으로 그 상대적인 값을 보여주고 있다. 코일의 길이가 짧을수록 최대 자기장의 세기는 커지지만 위치변화에 따른 자기장의 세기값의 변화가 크다. 코일의 길이가 길어질수록 최대 자기장의 세기는 작아지지만 위치변동에 따른 자기장의 세기값의 변동이 작다. 그림 상의 원은 그 곡선의 최대값을 표시한다.

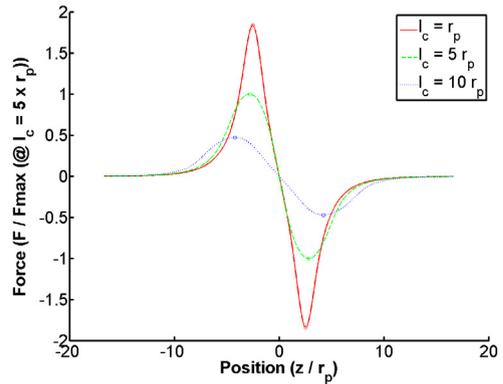


그림 4 코일 길이에 따른 힘

그림 4는 각 위치에서 피투사체에 작용하는 힘을 보여주고 있다. 식 (5)에서와 같이 피투사체의 양단에 발생하는 자속밀도가 같은 코일 정중앙에서 피투사체에 작용하는 힘은 0이다. 음의 위치에서는 양의 힘, 양의 위치에서는 음의 힘이 작용한다. 즉, 코일 정중앙 방향으로 피투사체에 힘은 작용한다. 그러므로 피투사체가 최대의 운동에너지를 가지도록 하기 위해서는 전원 인가 시에 양의 힘의 합을 최대화하고 음의 힘의 합을 최소화하도록 하여야 한다. 각 곡선은 코일의 길이에 따른 힘의 크기를 보여주고 있다. 코일의

길이가 짧을수록 최대 힘의 크기는 커지지만 위치변화에 따른 힘의 크기의 변화가 크다. 코일의 길이가 길어질수록 최대 힘의 크기는 작아지지만 위치변화에 따른 힘의 크기 변화는 작다. 그림 상의 원은 그 곡선의 최대값을 표시한다.

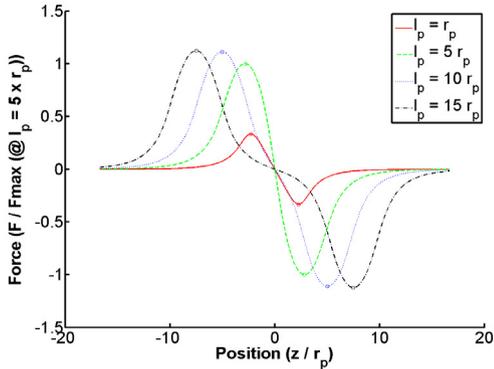


그림 5 피투사체 길이 변화에 따른 힘

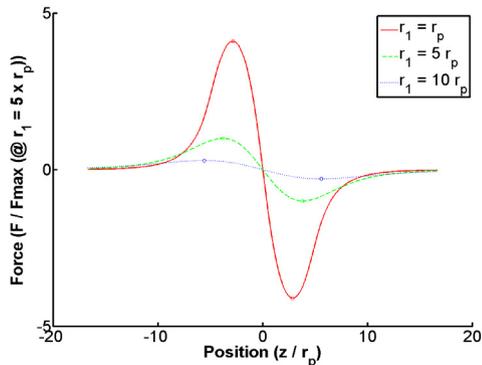


그림 6 코일의 내경에 따른 힘

그림 5는 피투사체의 길이에 따라 각 위치에서 피투사체에 작용하는 힘을 보여주고 있다. 그림 상의 원은 그 곡선의 최대값을 표시한다. 피투사체의 길이를 증가함에 따라서 피투사체에 작용하는 최대 힘의 크기는 커지며 그 위치는 코일의 중앙에서 멀어진다. 식 (5)에서 알수 있듯이 피투사체의 길이가 길어지면 피투사체 양단에 발생하는 자속밀도의 공급의 차가 커지므로 이에 따라 작용하는 힘의 크기도 커지는 것이다. 피투

사체의 길이를 증가시킴에 따라서 최대 힘의 값은 특정값에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 또한 피투사체의 길이가 증가하면 피투사체의 질량도 증가하므로 피투사체에 한 일의 양이 동일하다면 속도는 감소하게 될 것이다.

그림 6은 코일의 내경에 따라 피투사체에 작용하는 힘을 보여주고 있다. 코일의 내경이 증가함에 따라서 피투사체에 작용하는 최대 힘의 크기가 작아지며 위치 또한 코일 중앙으로부터 멀어진다. 코일의 두께는 일정값을 유지하였다. 최대힘을 얻기 위해서는 코일의 내경을 최대한 작게하여야 한다는 것을 확인할 수 있다. 하지만 코일의 내경과 피투사체의 간격이 작으면 피투사체가 움직이는 동안 코일의 내경과의 마찰 등이 발생할 수 있으며 심할 경우 피투사체가 코일 내부에 끼일 수도 있으므로 이를 고려하여 최대한 작은 값으로 설정하여야 한다.

이외의 설계인자에 대한 시뮬레이션을 통해서 얻은 물리적 특성은 다음과 같다. 코일의 외경의 경우 내경의 특성과 유사하다. 권선수 및 투자율의 경우 값의 증가에 따라 최대 힘의 크기가 커진다. 위의 물리적 특성은 유도된 수식을 통해서도 쉽게 확인할 수 있다.

2.2 전자기 유한요소해석을 통한 수학적 및 물리적 모델링 검증

표 3 시뮬레이션 및 전자기 유한요소해석에 사용된 각 인자 값

표시	내용	값	단위
r_p	피투사체 반지름	1.5	mm
l_p	피투사체의 자성체 길이	14	mm
l_c	코일 길이	16	mm

앞에서 수행한 수학적 및 물리적 모델링 결과를 검증하기 위하여 전자기 유한요소해석 결과와 비교 평가하였다. 수학적 및 물리적 모델링은 Matlab으로 구현하여 시뮬레이션을 수행하였다. 전자기 유한요소해석은 Open Source Code인

FEMM 4.2를 사용하여 수행하였다.[10] 표 3은 시뮬레이션 및 전자기 유한요소해석에 사용된 각 인자 값을 보여주고 있다. 일정전류 50 A가 코일에 인가된다고 하고 위치에 따른 주요 값들을 얻었다.

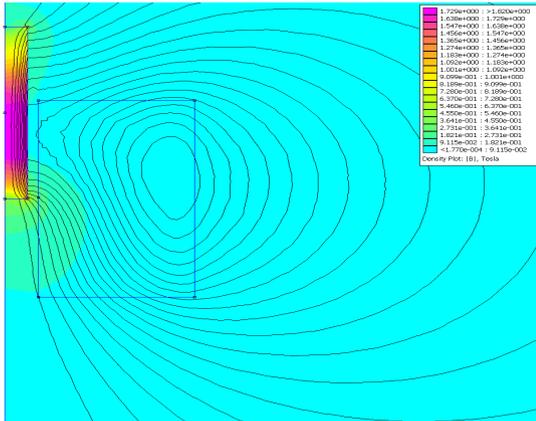


그림 7 전자기 유한요소해석 결과
(z_p : -7 mm, 최대힘 발생 위치)

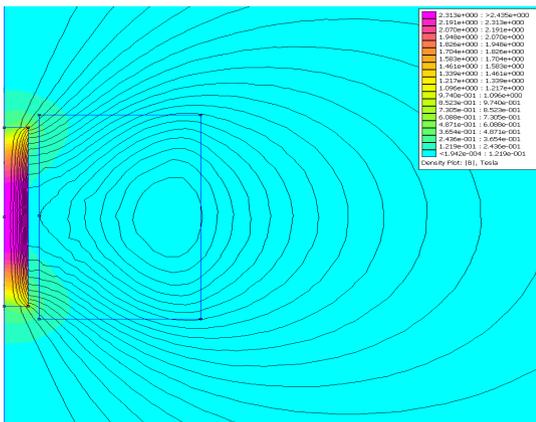


그림 8 전자기 유한요소해석 결과
(z_p : 0 mm, 최소힘 발생위치)

그림 7과 8은 FEMM 4.2를 사용하여 전자기 유한요소해석한 결과이다. 축대칭 문제이므로 그림에는 반쪽 해석결과를 보여주고 있다. 그림 7은 피투스사체의 위치가 -7 mm일 때의 전자기 유한요소해석 결과를 보여주고 있다. 이 위치에서

피투스사체에 가장 큰 힘이 작용한다. 강자성체 내의 자속밀도 분포를 보면 최대 자속밀도가 발생하는 위치가 피투스사체 중심(z_p)을 기준으로 보았을 때 코일의 중심($z=0$)에 치우쳐 있음을 볼 수 있다. 또한 강자성체의 양단 ($z_p - l_p/2, z_p + l_p/2$)에 생성되는 자속밀도 값의 차이가 존재하는 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 피투스사체의 위치가 0 mm일 때의 전자기 유한요소해석 결과를 보여주고 있다. 이 위치에서 피투스사체에 작용하는 힘은 없다. 강자성체 내의 자속밀도 분포를 보면 최대 자속밀도가 발생하는 위치가 피투스사체 중심이며 코일의 중심과 일치하는 것을 볼 수 있다. 반경 방향 축을 기준으로 대칭임을 확인할 수 있다. 즉, 강자성체 양단의 자속밀도가 같다.

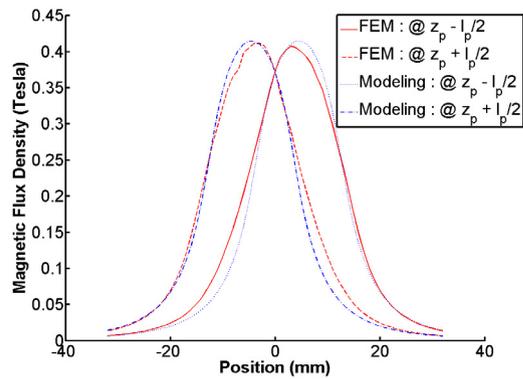


그림 9 전자기 유한요소해석 및 모델링의 자속밀도

그림 9는 전자기 유한요소해석과 모델링으로부터 구한 자속밀도 결과를 보여주고 있다. 4가지 자속밀도 곡선이 있다. 각각은 피투스사체의 강자성체 양쪽 끝단에서의 자속밀도를 나타낸다. 즉, 전자기 유한요소해석 및 모델링으로부터 각각 구한 두 개의 곡선은 피투스사체의 강자성체 양쪽 끝단에서의 자속밀도로 피투스사체 중심에서 $l_p/2$ 만큼 떨어진 위치에서의 자속밀도를 나타낸다. 각 자속밀도가 최대가 되는 위치는 피투스사체의 중심이 코일의 중심으로부터 약 $l_p/2$ 만큼

떨어진 위치에 있을 때 발생한다. 두 개 곡선의 차이값은 피투스체가 코일의 중심으로 갈수록 증가 후 감소하다가 코일의 중심에서 0이 된다. 즉, 피투스체의 강자성체 양단에 작용하는 자속밀도의 제곱 차가 없으므로 작용하는 힘은 0이 된다. 피투스체가 코일의 중심으로부터 멀어지면서 자속밀도의 제곱 차의 부호가 바뀌며 그 크기가 커진다. 즉, 피투스체가 코일의 중심으로 끌어당겨지는 힘을 받게 되며 그 크기는 더 커진다. 그림 9를 통해서 모델링을 통해서 구한 자속밀도값이 전자기 유한요소해석을 통해서 구한 자속밀도값과 유사함을 확인할 수 있다.

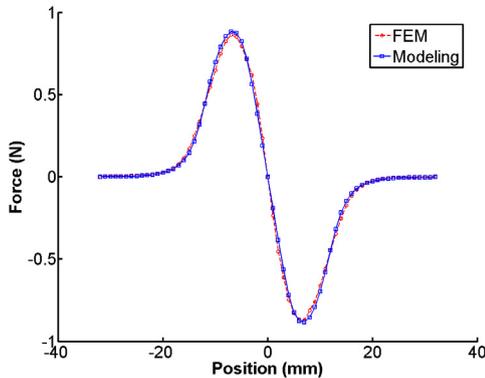


그림 10 전자기 유한요소해석 및 모델링으로부터 구한 힘

그림 10은 전자기 유한요소해석과 모델링으로부터 구한 피투스체에 작용하는 힘을 피투스체 위치에 따라 그 결과를 보여주고 있다. 전자기 유한요소해석과 모델링으로부터 구한 힘이 유사함을 확인할 수 있다. 그 오차는 최대 힘 대비 최대 8% 이내이다. 기준으로 사용한 전자기 유한요소해석의 힘은 FEMM 4.2에서 제공하는 Weighted Stress Tensor Volume Integral을 사용하였다.[10] 그림 9의 전자기 유한요소해석 및 모델링의 자속밀도 결과와 식 (5)를 통해서 알수 있듯이 자속밀도의 차가 큰 위치에서는 큰 힘이 발생하고 작은 위치에서는 작은 힘이 발생하는 것을 확인할 수 있으며 코일의 양끝단 부위에서

최대 약 0.9 N이 작용하는 것을 볼 수 있다. 코일의 중앙에 피투스체가 위치할 때 힘이 작용하지 않으며 이 후 코일의 중앙을 향해 피투스체를 당기는 음의 방향의 힘이 작용한다.

3. 결 론

본 논문에서는 소형위성 발사장치에 적용할 수 있는 EML의 일종인 코일건에 관한 내용을 다루었다. 단일 스테이지 코일건 설계를 위해서 수학적 및 물리적 모델을 구축하고 설계 인자에 따른 물리적 특성을 파악하였다. 또한 구축된 수학적 및 물리적 모델을 전자기 유한요소해석을 통하여 검증하였다. 이를 통해서 다음과 같은 결론을 내렸다.

1) 피투스체에 작용하는 힘은 피투스체의 면적, 강자성체의 투자율, 피투스체 양단에 작용하는 자속밀도의 제곱의 차에 비례한다. 그러므로 힘을 최대화하기 위해서는 이 값의 차를 크게 하여야 하며 이에 따라 설계인자를 결정하여야 한다.

2) 피투스체는 페이로드와 힘 생성에 필요한 강자성체 부분으로 나눌 수 있으며 동일한 전기 에너지 공급 조건에서 페이로드의 속도를 최대화하기 위해서는 피투스체에 한 일의 양을 최대화하면서 피투스체의 질량을 최소화하도록 설계인자를 결정하여야 한다.

3) 피투스체는 코일에 전류 인가시 코일의 중앙을 향하는 힘을 받으므로 피투스체가 코일의 중앙을 지나기 전에 코일에 인가되는 전류를 최소화하여 음의 힘의 합을 최소화하여야 한다.

4) 피투스체 강자성체의 물리적 특성에 따른 자속밀도 변화를 고려한 수학적 및 물리적 모델을 제시하였으며 전자기 유한요소해석을 통해서 이 모델의 유효성을 검증하였다.

생성된 수학적 및 물리적 모델을 바탕으로 동일한 전기에너지 공급 시 최대의 속도를 얻을 수 있는 기하학적 및 전기적인 설계인자를 찾기 위

한 최적설계를 수행할 예정이다. 이렇게 설계된 코일건을 제작 및 시험평가하여 구축된 수학적 및 물리적 모델에 대한 검증을 완료할 계획이다. 또한 시험을 통해서 얻은 데이터를 분석하여 물리적 동특성을 파악하고 이에 대한 연구를 계속해서 수행할 계획이다.

conference, 2005, pp 75 ~ 78
 9. Jacek F. Gieras, Zbigniew J. Piech, Bronislaw Z. Tomczuk, Linear synchronous motors, Newyork, CRC Press, 2011, pp. 158
 10. D. Meeker, "FEMM 4.2 User's Manual", Univ. of Virginia, 2012

참 고 문 헌

1. 방효충, 박훈철, "극초소형 위성 개발 현황 및 전망", 한국항공우주학회지, 제28권, 제5호, 2000, pp. 153 ~ 160
2. 장영근, "소형위성 기술 연구개발 동향과 전망", 한국항공우주학회지, 제31권, 제6호, 2003, pp. 118 ~ 132
3. 김지훈, "소형위성 발사를 위한 EML에 대한 연구", 한국항공우주연구원, KARI-SYT-TM-2012-035, 2012
4. 김기봉, "EML에 관한 기술현황 및 linear induction launcher 기술의 발달", 전기학회지, 제43권, 제5호, 1994, pp. 36 ~ 43
5. Ian R. McNab, "Launch to Space With an Electromagnetic Railgun", IEEE Trans. Magn., vol. 39, no. 1, 2003, pp. 295 ~ 304
6. L. A. Miller, E. E. Rice, R. W. Earhart, and R. J. Conlon, "Preliminary analysis of space mission applications for electromagnetic launchers", Battelle Columbus Lab., Final Tech. Rep. to NASA on Contract NAS 3-23 354, 1984
7. M. R. Palmer and A. E. Dabiri, "Electromagnetic space launch: A re-evaluation in light of current technology and launch needs and feasibility of a near-term demonstration", IEEE Trans. Magn., vol. 25, 1989, pp. 393 ~ 399
8. Aubuchon, M.S, T. R. Lockner, B. N. Turman, "Results from sandia national laboratories/lockheed martin electromagnetic missile launcher", IEEE Pulsed power