

## Coilgun의 발사체 속도 향상을 위한 Solenoid 형상 연구

박일환, 김재민, 서강, 박관수  
부산대학교 전자전기공학과

### A Study of Solenoid Shapes for a improvement in Projectile Velocity of a Coilgun

Il Hwan Park, Jae Min Kim, Kang Seo, Gwan Soo Park  
Electronic and Electrical Engineering, Pusan National University

**Abstract** - 본 논문에서는 Reluctance Type Coilgun의 발사체 속도 향상을 목적으로, 기존의 원통형 Solenoid Coil 외에 세 가지 형태의 Solenoid Coil을 해석하여 Magnetic Field, Force, 에너지에 있어서, 각각의 분포를 분석하여 Coilgun의 성능을 향상시킬 수 있는 Solenoid Coil 형상을 설계하였다.

#### 1. 서 론

차세대 추진방식으로 활발한 연구가 진행되고 있는 Electromagnetic Launcher(EML)중의 하나인 Coilgun은 Solenoid Coil에 의한 전자기적 반응으로 자성체를 추진시키는 방식이다. Coilgun에 주로 사용되고 있는 기존의 원통형 Solenoid는 제작이 용이하고, Solenoid 내부의 Magnetic Field가 거의 균일하며, 가속한계구간이 전체 Solenoid 길이의 1/2지점으로 명확하기에 Electromagnetic Launcher(EML)로서의 Coilgun 연구에 원통형 권선의 Solenoid가 주로 사용되어왔다. 그러나 Solenoid의 권선 형상에 따라 Solenoid 내부의 자계분포가 달라지므로, 여러 가지 다른 권선형상에 대한 연구를 통해 같은 입력조건에서 Coilgun의 성능을 향상시킬 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 자계분포에 영향을 주는 4가지 권선형상의 Solenoid를 유한요소법을 통해 분석하여 Reluctance Type Coilgun의 발사체 속도와 에너지를 향상시킬 수 있는 방법에 대해 연구하였다.

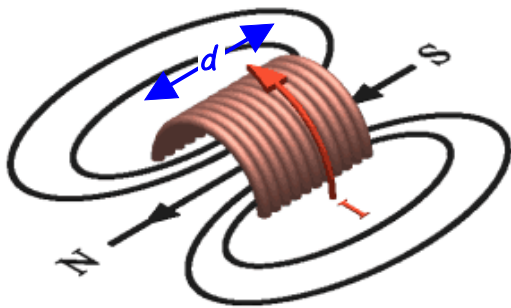
#### 2. 본 론

##### 2.1 Solenoid 형상 연구 개요

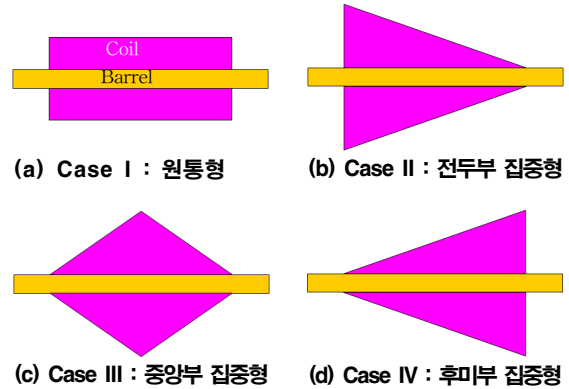
Solenoid type EML 인 Coilgun은 <그림 1>과 같이 Solenoid Coil에 전류가 인가되면 플레밍의 오른나사법칙에 따라 Solenoid 내부에 축방향의 자기장이 형성되고, 형성된 자기장에 의해 자성물체에 흡인력을 작용시키는 원리로 발사체를 가속시킨다. 원통형 Solenoid는 Force가 양(+인 구간만을 사용할 수 있기 때문에, 전체 Solenoid 길이의 1/2 부분이 가속한계구간이 되고, 나머지절반에 공급되는 에너지는 손실로 발생한다. 그러므로 Force가 양(+인 구간을 넓히거나, 그 구간에서의 Force를 크게 하면, 에너지 효율을 높일 수 있으며, 이는 곧 발사체에 전달되는 에너지의 증대로 이어져 발사체 속도를 향상시킬 수 있다.

##### 2.2 Solenoid Coil 형상 모델

Solenoid 형상에 따른 자계분포분석을 위해 <그림 2>와 같이 4가지 형상의 Solenoid 모델을 구성하였다. 각각의 Solenoid는 내경, 축방향 길이, turn수, 코일 굵기, 전류밀도가 동일한 조건에서 일반 원통형과 전두부 집중형, 중앙부 집중형, 후미부 집중형으로 나누었다.



<그림 1> 솔레노이드 코일과 자기장



<그림 2> Solenoid Coil 형상 모델

##### 2.3 Solenoid Coil의 추진력 및 속도 계산

정자계에서 성립하는 맥스웰방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

따라서 Solenoid Coil 내부에서 발생하는 자속밀도는 다음과 같다.

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2)$$

여기서 Solenoid Coil 내부에 발생하는 자속  $\Phi$  는

$$\Phi = BS \quad (3)$$

로 나타낼 수 있다. 또한, Solenoid Coil에서의 인덕턴스 L은

$$L = \frac{N \times \Phi}{I} \quad (4)$$

가 되고, 인덕턴스로부터 에너지를 구하면

$$W = \frac{1}{2} LI^2 \quad (5)$$

와 같으므로, 식 (5)와 식 (4), 식 (3) 으로부터

$$W = \frac{1}{2} NBSI \quad (6)$$

가 된다. 여기서 N은 Solenoid Coil의 권선 수,  $\Phi$ 는 Solenoid Coil 내부 자속, I 는 입력전류이다.

에너지로부터 발사체가 받는 힘 F는 에너지를 거리에 대해 미분하여 구할 수 있으며, 발사체의 속도는 에너지 보존 법칙을 이용하여 전기 에너지와 운동에너지를 이용하여 구할 수 있다. 따라서 발사체가 받는 힘은

$$\begin{aligned} F &= \frac{dW}{dx} \quad (7) \\ &= \frac{d}{dx} \left( \frac{1}{2} NBSI \right) \\ &= \frac{1}{2} NIS \frac{dB}{dx} \end{aligned}$$

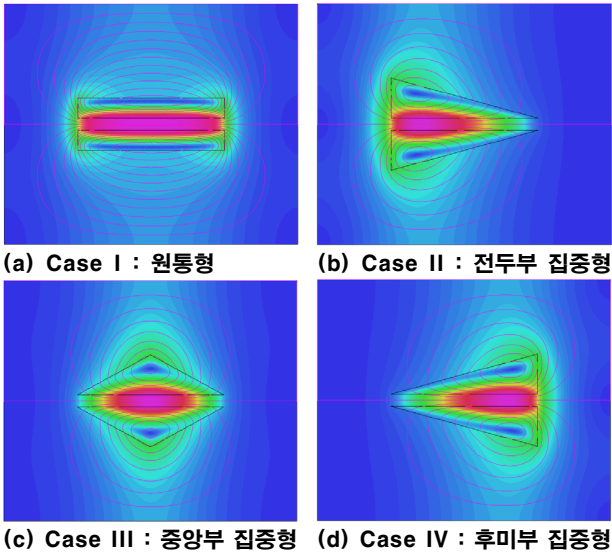
가 되고, 발사체의 속도는

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{W}{m}} \quad (8)$$

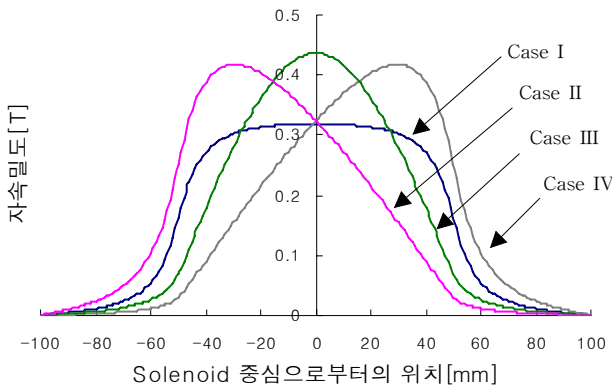
와 같이 구할 수 있다.

### 2.4 Solenoid Coil 형상별 자기장 분포 해석

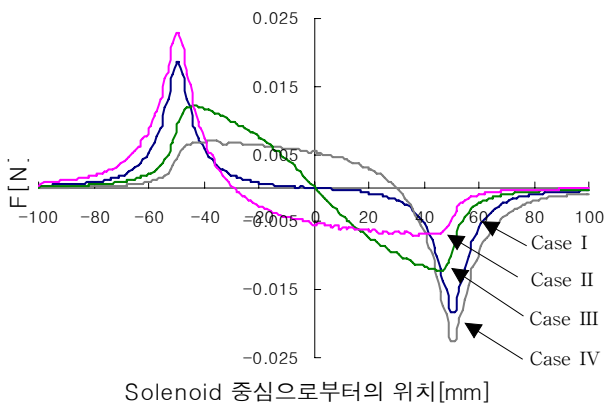
발사체의 속도는 Solenoid의 내부 자기장 분포에 의한 Force와 에너지에 의해 결정된다. 따라서 각 Solenoid의 형상을 요소분할하여 자기장 분포를 해석하였다.



<그림 3> Solenoid Coil 형상별 자기장 분포



<그림 4> Solenoid의 위치에 따른 자속밀도



<그림 5> Solenoid의 위치에 따른 Force

<표 1>

Solenoid 형상	Fmax[N]	Energy[J]	Velocity[m/s]	가속구간			
원통형	0.01852	100%	0.338	100%	21.03	100%	100
전두부 집중권	0.02284	123%	0.443	131%	24.05	114%	70
중앙부 집중권	0.01216	66%	0.463	137%	24.59	117%	100
후미부 집중권	0.00697	38%	0.443	131%	24.05	114%	130

### 2.4.1 Solenoid Coil 형상별 자기장 분석 결과

Solenoid Coil 형상별 자기장 분석 결과를 <표 1>에 나타내었다. 에너지 계산상으로는 중앙부 집중형이 원통형에 비해 약 17% 속도증가를 기대할 수 있으나, Fmax가 전두부 집중형의 53% 가량으로, 최초운동 속도를 얻기 어려움이 있다.

전두부 집중형은 Fmax가 원통형의 23% 가량 향상시킬 수 있어 최초구동에 유리하고, 가속한계구간 에너지는 31% 가량 향상되어, 발사체의 속도를 14.4%가량 향상시킬 수 있다.

후미부 집중형은 가속한계구간은 원통형보다 30% 가량 더 길지만 전구간의 F 값이 31% 가량으로 충분한 Force를 기대하기 어렵다.

### 3. 결 론

Reluctance Type Coilgun의 발사체 속도 향상을 목적으로, 기존의 원통형 Solenoid Coil 외에 세 가지 형태의 Solenoid Coil을 해석하여 Magnetic Field, Force, 에너지에 있어서, 각각의 분포를 분석하여 보았다.

분석에 따르면, Solenoid에서 Coil이 집중되는 위치에 따라 Field를 가속구간에 집중시킬 수 있어, 입력에너지에 대한 손실을 줄이고 발사체의 속도 향상을 위해 Solenoid 형태를 요구치에 맞게 변형할 필요가 있다.

따라서 Multistage Coilgun의 제작함에 있어서, 최적의 Solenoid 권선 형태 조합은 전두부 집중형을 제 1, 제 2 Stage에 사용하고, 중앙부 집중형을 Next Stage에 사용한다면, 발사체의 초기 추진력 획득과 함께, 속도증가에 따른 가속구간 요구치를 만족할 수 있을 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Ian R. McNab, "Early Electric Gun Research", IEEE Trans. on Magnetics, Vol 35, No.1, pp.250-261, Jan.1999
- [2] Seog-Wan Kim, Hyun-Kyo Jung, and Song-Yop Hahn, "Optimal Design of Multistage Coilgun", IEEE Trans. on magnetics, Vol.32, No.2, pp.505-508, Mar. 1996
- [3] G. Hainsworth, "Finite Element Modelling of Flux Concentrators for Coilguns", IEEE Trans. on magnetics, Vol.33, No.1, pp.175-177, Jan. 1997
- [4] G. William, "A Simple Unified Physical Model for a Reluctance Accelerator.", IEEE Trans. on Magnetics, Vol 35, No.1, pp.4270-4276, Nov. 2005