

## 솔레노이드 코일을 이용한 소형 electromagnetic launcher의 개발

주성중, 한재만, 조지웅, 이만성, 박동석, 박제욱, 변중혁, 김동석, 박관수  
부산대학교 전자전기통신공학부

### Development of the small electromagnetic launcher using solenoid coil

Sung Joong Joo, Jae Man Han, Ji Ung Jo, Man Sung Lee, Dong Suk Park, Je Uk Park Jong Hyuk Byun,  
Dong Sok Kim, Gwan Soo Park

Division of Electrical and Communication Engineering, Pusan National University

**Abstract** - Electro-magnetic launcher(EML)는 전자기력을 이용하여 발사체를 추진시키는 장치이며, 그 종류에는 레일건과 코일건이 있다. 본 논문에서는 소형, 경량의 발사체를 추진, 가속시키기 위한 솔레노이드형 EML을 설계, 제작하여 시험 발사하고 그 특성을 분석하였다. 개발된 EML은 소형이기 때문에 launcher의 직경이 작아 자기장을 한 지점으로 집중시키는 장치가 필요없고, 전기에너지를 줄이기 위한 별도의 시스템이 필요하지 않으며, 솔레노이드의 형태와 발사체의 위치, 스위칭 시간에 의해 발사체의 추진력과 속도를 조절할 수 있는 장점이 있었다.

#### 1. 서 론

수백년 동안 눈부신 발전을 거듭해온 발사장치(Launcher)는 화학적 에너지를 사용한 총포류가 대부분이었다. 그러나 이러한 화학적 에너지를 이용한 Launcher의 경우는 제약조건이 많아서 강력한 에너지를 발생시키기 힘들다. 이런 이유로 화학적 에너지를 사용하는 방식에서 벗어나 새로운 방식으로 발사체를 발사하여 기존의 Launcher보다 수천 배 이상 강력한 효과를 보이는 Launcher 개발이 이루어지고 있다. 그중 전자기력을 이용한 EML이 개발 되었으며, 이에 대한 연구는 1970년대 초에 병기개발을 시작으로 80년대에는 SDI계획을 통해 다양한 연구가 행해졌고 현재까지 진행 중에 있다. 대부분의 연구가 군사목적용 미사일이나 대포에 적용되고 있다.

전자기력을 이용한 EML의 종류에는 레일건과 코일건이 있다. 레일건은 전류를 공급하는 코일이 발사체의 양쪽에 위치하여, 자기장을 발생시키고 도체인 발사체에 전류가 여자되어 발사체를 추진, 가속시키는 로렌츠 포스가 생성된다. 로렌츠 포스에 의해 음속 이상의 속도를 낼 수 있고 여자전류와 자기장에 의한 발사체의 속도조절이 용이하다. 반면 발사체에 전류가 여자되어야 하기 때문에 발사체와 레일이 접촉된 상태로 발사가 이루어져

야 하며, 고속에서는 이러한 접촉으로 인한 발사체와 레일의 파손이 발생한다. 그러나 코일건은 발사체와 추진체가 접촉될 필요가 없기 때문에 발사체가 파손되는 경우가 없지만 여자된 코일에서 발생하는 자기장에 의해 발사체에 인력이 발생하는 원리이기 때문에 레일건보다 가속도와 효율이 떨어진다. 가속도와 효율을 증가시키기 위해서는 많은 전력이 필요하게 되고 시스템이 그림 1과 같이 대형화 되어야 한다.

따라서 본 논문에서는 소형, 경량의 솔레노이드형 EML을 개발하고자 한다. 이를 위해 솔레노이드 형태와 발사체의 위치, 스위칭 시간에 따른 발사체의 추진속도를 해석, 측정하였다. 또한 발사물의 속도를 높일 수 있는 솔레노이드형 EML을 설계하였다.

#### 2. 솔레노이드형 EML의 구조와 해석

##### 2.1 솔레노이드형 EML의 구조와 동작원리

그림 2는 솔레노이드형 EML의 구조를 나타낸 것이다. 솔레노이드 코일에 임펄스 전류를 여자시키면 암페어의 주회법칙에 의하여 전류와 수직인 방향으로 자기장이 형성되고, 형성된 자기장은 발사체에 흡인력을 발생시키고 발사체가 추진, 가속된다. 자기장은 기자력(magnetic motive force; mmf)에 비례하며 기자력은 여자전류와 턴수에 의해 결정된다. 그러므로 여자전류와 턴수를 조정함으로써 발사체의 속도를 조절할 수 있다.

##### 2.2 솔레노이드형 EML의 추진력 해석

솔레노이드 코일에 의해 유도되는 자기장의 세기는

$$H = \frac{N \times I}{d} \quad [\text{A/m}] \quad (1)$$

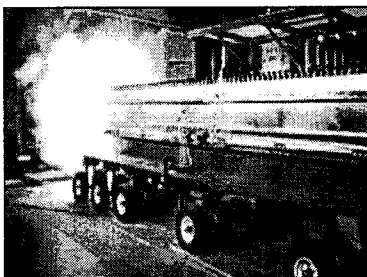


그림 1 대형 EML

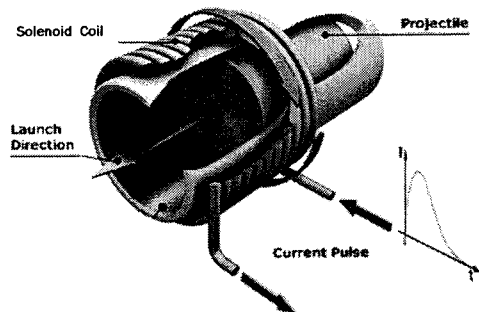


그림 2 솔레노이드형 EML의 구조

와 같으며, 여기서  $N$ 은 턴수,  $I$ 는 코일에 흐르는 전류,  $d$ 는 솔레노이드 코일의 길이이다. 식 (1)에서 구해진 자기장의 세기를 이용하여 총열 안쪽에서 발생하는 자속밀도를 구해보면

$$B = \mu_0 H \times \frac{\pi r_2^2}{\pi r_1^2} \quad (2)$$

와 같다. 여기서  $\mu_0$ 는 공기투자율,  $r_1$ 는 발사체의 반지름,  $r_2$ 는 총열반지름이다. 발사체에 작용하는 흡인력은

$$F = \frac{B^2}{2\mu_0} S \quad (3)$$

이 된다. 여기서  $S$ 는 발사체의 단면적이다. 흡인력  $F$ 가 발사체에 작용할 때 발사체가 받는 가속도는 Newton의 운동법칙인  $F=ma$ 에 의해 가속도  $a$ 가 구해지고, 가속을 받는 시간은

$$t_0 = \sqrt{\frac{2d}{a}} \quad (5)$$

이다. 따라서 발사체의 최종 속도는

$$v = at_0 \quad (6)$$

가 된다.

### 2.3 솔레노이드형 EML의 자기장분포 해석

발사체에 작용하는 흡인력은 솔레노이드형 EML의 자기분포에 의해 결정된다. 따라서 그림 3과 같이 솔레노이드형 EML을 요소분할하여 자기장분포를 해석하였다. 그림 4는 발사체가 솔레노이드형 코일의 흡인력에 의해 추진되는 자기장 분포이며, 그림 5는 발사체가 가속되는 자기장 분포이다. 자기장이 솔레노이드 코일 내부로 이동하면서 자기장이 더욱 집중되고 흡인력이 증가하여 발사체가 가속하게 된다.

### 3. 솔레노이드형 EML의 제작 및 실험

솔레노이드 코일의 높이와 길이의 비에 따른 발사체의 속도를 확인 위하여 표 1, 2와 같이 두 가지의 솔레노이드형 EML 모델을 제작하였다. 제작된 솔레노이드형 EML과 발사체를 그림 6, 7에 나타내었다. 제작된 두 가지의 솔레노이드형 EML의 성능확인을 위해 그림 5와 같이 길이를 달리하여 발사체의 속도를 측정하고 이론값과 비교하였다. 결과는 다음 표 3, 4와 같다.

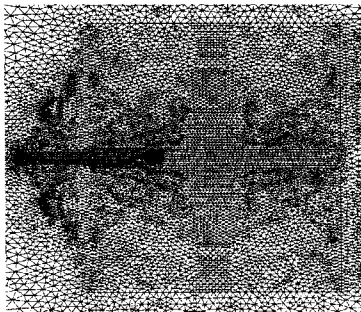
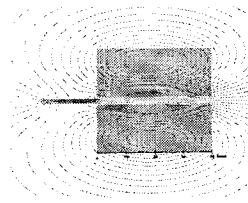
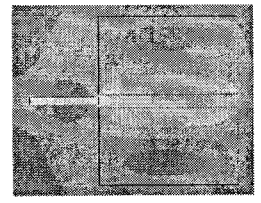


그림 3 솔레노이드형 EML의 요소 분할

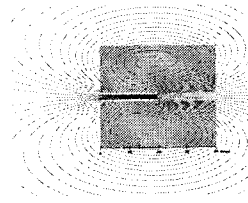


(a) Flux line

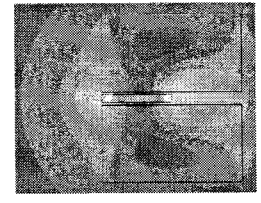


(b) 자기장 분포

그림 4 발사체가 추진될 때의 자기장 분포

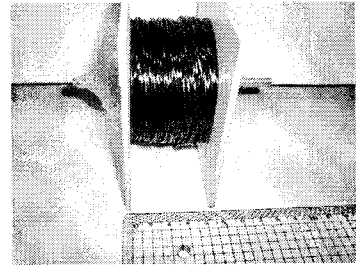


(a) Flux line

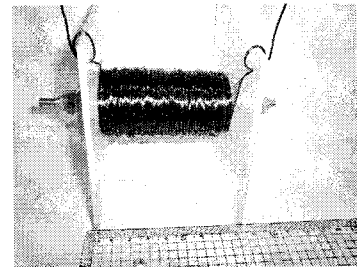


(b) 자기장 분포

그림 5 발사체가 가속할 때의 자기장 분포



(a) Model I



(b) Model II

그림 6 솔레노이드형 EML 제작

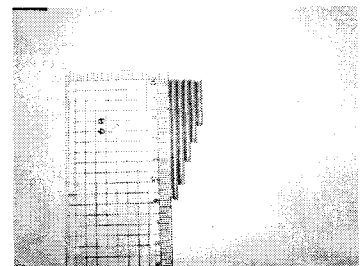


그림 7 발사체

표 1 솔레노이드형 EML 형태

		Model I	Model II
솔레노이드 코일	높이	25[mm]	12.5[mm]
	길이	40[mm]	80[mm]
총열	직경	4[mm]	4[mm]
	길이	80[mm]	120[mm]

표 2 솔레노이드형 EML 회로상수

	Model I		Model II	
	실험값	이론값	실험값	이론값
저항[Ω]	2.66	2.2	1.78	1.28
인덕턴스[mH]	0.11	0.396	0.0378	0.192
시정수[msec]	23.64	0.18	47.09	0.15
턴수(T)	1000	1000	1000	1000
인가 전류[A]	10	10	10	10
자속밀도[G]	294.72	352.12	110.48	132.5

표 3 Model I 발사체의 크기에 따른 속력의 이론값과 실험값

발사체	이론값 (v [m/s])	실험값 (v [m/s])
2cm (2g)	5.9238	5.33
3cm (3g)	4.8368	5.2
4cm (4g)	4.1888	5.08
5cm (5g)	3.7466	4.78
6cm (6g)	3.4201	4.61

표 4 Model II 발사체의 길이에 따른 속력의 이론값과 실험값

발사체	이론값 (v [m/s])	실험값 (v [m/s])
2cm (2g)	4.188	5.304
3cm (3g)	3.4201	4.76
4cm (4g)	2.9619	4.76
5cm (5g)	2.6492	4.76
6cm (6g)	2.4184	3.905

표 3, 4를 통해 Model I에서 발사체의 속도가 Model II의 속도보다 더 빠르게 나타남을 확인할 수 있다. 그 이유는 솔레노이드 코일의 길이가 짧을수록 자기장을 집중시켜 흡인력이 증가하여 발사체의 속도가 증가하기 때문에 Model II보다 Model I에서 발사체의 속도가 빠르게 나타나는 것이다. 그리고 발사체의 길이가 작을수록 속력이 높아지는 것을 관찰 할 수 있었다. 이것은 발사체의 길이가 작을수록 총열과의 마찰 면이 작아지므로 발사체에 작용하는 흡인력이 상대적으로 커지기 때문이다.

그림 8은 발사체의 위치에 따른 솔레노이드 코일내부의 자기장 분포를 나타내는 것이다. 발사체가 솔레노이드 코일 내부로 이동하면서 자속밀도가 증가하게 되어 가속하게 되고 솔레노이드 코일의 중에 위치할 경우는 자속밀도가 가장 크지만, 흡인력이 솔레노이드 코일의 양쪽에서 발생하여 오히려 속도를 감소시키게 된다. 그림 9는 Model I, II에서의 발사체의 길이에 따른 속도를 나타낸 것으로 솔레노이드 코일의 길이가 짧을수록 큰 흡인력이 발생하여 속도가 Model I에서 크게 나타난다.

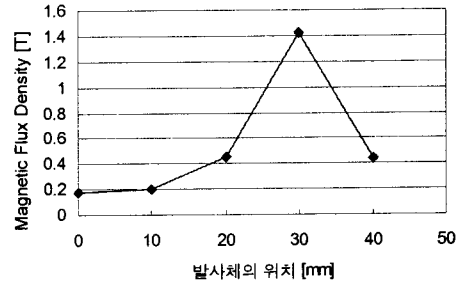


그림 8 발사체의 위치에 따른 자기장 분포

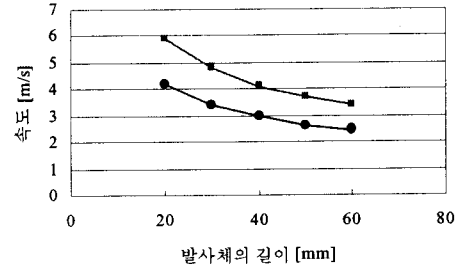


그림 9 발사체의 길이에 따른 발사체의 속도 (■ : Model I, ● : Model II)

## 6. 결 론

본 논문에서는 발사체를 추진, 가속시키기 위한 흡인력을 계산하고 이에 필요한 자기장 분포를 해석하여 솔레노이드형 EML을 설계하였다. 설계된 솔레노이드 코일의 길이를 달리한 두 가지 모델의 솔레노이드형 EML을 제작하여 자기장분포를 측정하고 이론값과 비교하였다. 또한 발사체의 길이에 따른 속도를 측정하고 이론값과 비교하였다. 솔레노이드 코일의 길이와 발사체의 길이가 작을수록 발사속도가 증가함을 확인하였다. 이것은 솔레노이드 코일의 길이가 짧을수록 더 큰 자기장을 집중시킬 수 있고 발사체의 길이가 짧을수록 마찰면적이 감소하여 속도가 증가하는 것이다. 그러나 실험에서는 스위칭 시간을 정확하게 조절하기 어려워 측정치와 이론치가 약간의 오차를 보인다. 따라서 스위칭 소자를 이용한 정확한 스위칭 시간을 조절과 자기장을 집중시킬 수 있는 구조의 솔레노이드형 EML에 대한 연구가 필요하다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Jianliang he, Enrico levi, Zivan zabar, Leo Birenbaum, "Concerning the Design of Capacitively Driven Induction Coil Guns", IEEE Trans. on plasma science. Vol.17. No.3, Jan. 1989, pp.627-631
- [2] Seog-Whan Kim, Hyun-Kyo Jung, and Song-Yop, "HahnOptimal Design of Multistage Coilgun", IEEE Trans. on magnetics, Vol.32, No.2 Mar. 1996, pp.505-508
- [3] G , Hainsworth, "Finite Element Modelling of Flux Concentrators for Coilguns", IEEE Trans. on magnetics, Vol.33, No.1, Jan. 1997, pp.175-177
- [4] Ronald J. Kaye, "Operational Requirements and Issues for Coilgun Electromagnetic Launchers", IEEE Trans. on magnetics, Vol.41, No.1, Jan. 2005, pp.194-199
- [5] Peter P. Mongeau, "INDUCTIVELY COMMUTATED COILGUNS", IEEE Trans. on magnetics, Vol.27, No.1, Jan. 1991, pp.568-572