

**스위칭 회로를 이용한 electromagnetic launcher의 동작특성에 관한 연구**

한재만, 주성중, 조지웅, 이만성, 박동석, 박재욱, 변종혁, 김동석, 박관수  
부산대학교 전자전기통신공학부

**Reserch of the driving characteristic in the electromagnetic launcher by swiching circuit**

Jae Man Han, Sung Joong Joo, 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 장치이다. EML은 크게 레일건의 형태와 코일건의 형태로 구분되며, 본 논문에서는 코일건의 형태로 설계, 제작하였다. 코일건의 형태인 EML은 솔레노이드에 여자되는 전류에 의해서 발사체에 흡인력이 발생하여 추진, 가속되므로 솔레노이드의 최적형태를 설계하고, 이를 바탕으로 제작하여 EML의 스위칭 시간에 따른 속도를 측정하여, 여자전류의 스위칭 시간에 따른 동작특성을 해석, 실험하여 분석하였다.

**1. 서 론**

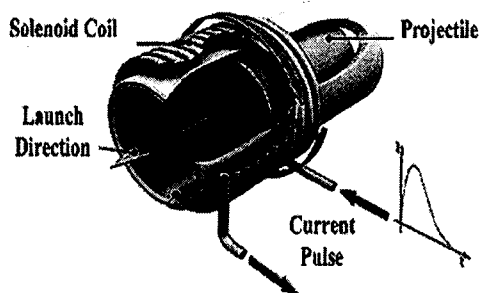
수백년 동안 눈부신 발전을 거듭해온 발사장치(Launcher)는 화학적 에너지를 사용한 총포류가 대부분이었다. 그러나 이러한 화학적 에너지를 이용한 Launcher의 경우는 제약조건이 많아서 강력한 에너지를 발생시키기 힘들었다. 이런 이유로 화학적 에너지를 사용하는 방식에서 벗어나 새로운 방식으로 발사체를 발사하여 기존의 Launcher보다 수천 배 이상 강력한 효과를 보이는 Launcher 개발이 이루어지고 있다. 그중 전자기력을 이용한 EML이 개발 되었으며, 이에 대한 연구는 1970년대 초에 병기개발을 시작으로 80년대에는 SDI계획을 통해 다양한 연구가 행해졌고 현재까지 진행 중에 있다. 대부분의 연구가 군사목적용 미사일이나 대포에 적용되고 있다. 이러한 EML은 크게 레일건의 형태와 코일건의 형태로 구분되며, 레일건의 경우는 로렌츠 포스를 이용하는 것으로 음속의 빠른 속도를 낼 수 있는 장점이 있지만 발사체가 추진할 때 발사체와 레일이 마모되는 단점이 있다. 코일건의 형태는 여러 개의 코일을 단단으로 사용할 경우 속도 특성도 뛰어나고 발사체와 코일이 접촉하지 않아 레일건의 단점을 보완할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 단단의 솔레노이드형 EML을 개발하기 위한 기초 연구로 한 개의 솔레노이드에서 발생하는 전자기력을 이용하여 최적의 솔레노이드 형태와 스위칭 시간을 최적화하여 단단에 적용하고자하였다. 이를 위하여 발사체가 추진, 가속하기에 적합한 솔레노이드의 형태를 설계하고, 설계된 솔레노이드 코일에 적합한 스위칭 소자와 스위칭 시간을 해석, 측정하여 솔레노이드형 EML의 동작특성을 분석하였다.

**2. 본 론**

**2.1 솔레노이드형 EML의 구조와 동작원리**

그림 1은 솔레노이드형 EML의 구조를 나타낸 것이다. 솔레노이드 코일에 임펄스 전류를 여자 시키면 암페어의 주회법칙에 의하여 전류와 수직한 방향으로 자기장이 형성되고, 형성된 자기장은 발사체에 흡인력을 발생시키고 발사체가 추진, 가속하게 된다. 자기장은 기자력(magnetic motive force; mmf)에 비례하며 기자력은 여자전류와 턴수에 의해 결정된다. 그러므로 여자전류와 턴수를 조정함으로써 발사체의 속도를 조절할 수 있다.



<그림 1> 솔레노이드형 EML의 구조와 원리

**2.2 솔레노이드형 EML의 추진력 해석**

솔레노이드 코일에 의해 유도되는 자기장의 세기는

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

와 같으며, 여기서 N은 턴수, I는 코일에 흐르는 전류, d는 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 S는 발사체의 단면적이다.

흡인력 F가 발사체에 작용할 때 발사체가 받는 가속도는 Newton의 운동법칙인  $F = ma$ 에 의해 가속도 a가 구해지고, 가속을 받는 시간은

$$t_0 = \sqrt{\frac{2d}{a}} \quad (4)$$

이다. 따라서 발사체의 최종 속도는

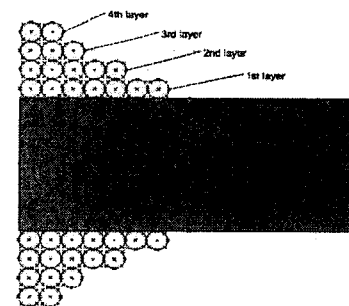
$$v = at_0 \quad (5)$$

가 된다.

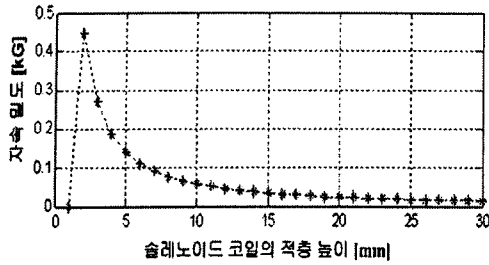
**2.3 솔레노이드형 EML의 최적설계**

솔레노이드 코일의 높이와 길이의 비에 따른 발사체의 속도를 구하기 위하여 그림 2처럼 코일이 이상적으로 적층되어진다고 가정하고 적층될 때 발생하는 자기장을 해석하였다.

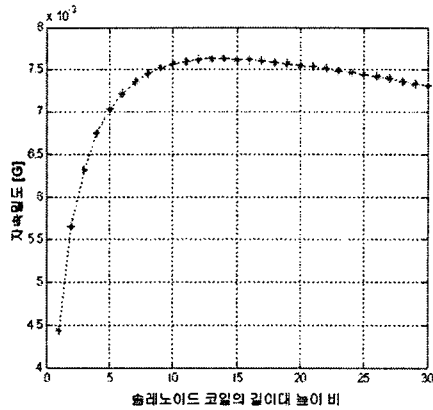
그림 3은 솔레노이드의 길이대 높이 비에 따른 탈출속도를 각 경우별로 계산하고 그래프형태로 나타낸 것이다. 처음에 한 층으로 1000턴을 감는 것으로 하고, 두 번째엔 두 층으로 500턴, 세 번째 경우에는 세 층으로 333턴을 감는 것으로 하여 30턴까지 나타내어 보았다. 그 결과 13턴을 감았을 때까지 속도가 증가하고, 그 이후로는 감소하는 것을 볼 수 있다. 그 결과로 길이대 높이의 비, 즉 Aspect Ratio가 0.17임을 알 수 있다.



<그림 2> 솔레노이드의 코일 적층 형태



<그림 3> 코일의 층수에 따른 발사체의 탈출 속도



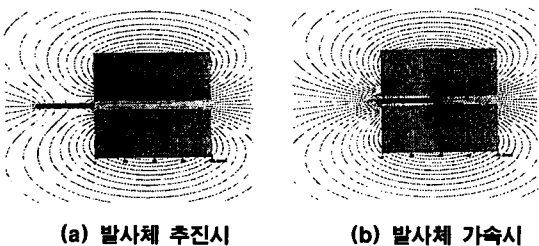
<그림 4> 코일의 층수에 따른 발사체의 탈출 속도

**2.4 솔레노이드형 EML의 자기장 분포 해석**

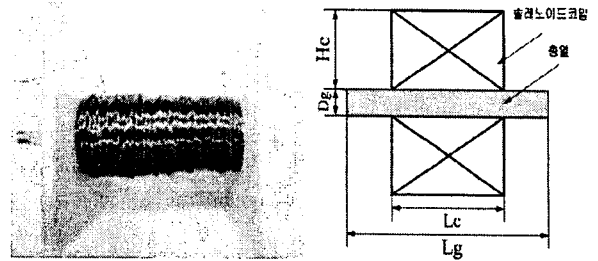
발사체에 작용하는 흡인력은 솔레노이드형 EML의 자기분포에 의해 결정된다. 따라서 솔레노이드형 EML을 요소분할하여 자기장 분포를 해석하였다. 그림 3은 한쪽 면만을 그려 확대칭으로 회전하여 실제 솔레노이드형 EML과 같은 자기장 분포를 가지도록 해석하였다. 발사체가 솔레노이드형 코일의 흡인력에 의해 추진되어 가속구간인 중심까지의 자기장 분포이다. 발사체가 솔레노이드 코일 내부로 이동하면서 자기장이 더욱 집중되고 중심에서 최대의 자속 밀도를 가진다. 발사체는 이때 최고 속도로 가속되어 지고 이후로 반대방향으로 힘을 받게 되므로 이때 전류의 흐름을 끊어야 한다.

**3. 솔레노이드형 EML의 동작 특성**

솔레노이드형 EML은 솔레노이드에 의해서 발생하는 자기장과 스위칭 시간에 의해서 발사체에 작용하는 흡인력이 결정된다. 따라서 솔레노이드형 EML의 동작특성의 확인하기 위해서는 스위칭 시간을 조절하기 위한 스위칭 장치가 필요하며, 이를 이용한 적합한 스위칭 패턴이 필요하다. 따라서 스위칭 시간에 따른 속도를 확인하기 위하여 그림 5와 같이 솔레노이드형 EML를 제작하고 그림 6과 같이 스위칭 시간을 조절하기 위한 회로를 구성하고 그 회로의 스위칭 전압, 입력 전압, 여자 전류를 측정하였다. 회로는 솔레노이드 코일에 전류 12A를 흐르게 하고 보는 것처럼 스위칭 시간을 변화시켜 속도를 측정하였다. 그림 6의 파형에서 알 수 있듯이 전압을 인가 하고 스위칭 시간에 따라 끊어 줬을 때 역기전력은 인가 시간에 비해 매우 짧은 시간에 발생되어지고 출력전류에 영향을 미치지 못하는 것을 확인 할 수 있었다. 그리고 표 1에서 확인할 수 있듯 속도는 스위칭 시간이 15초일 때 최대 속도가 나오게 되었다.

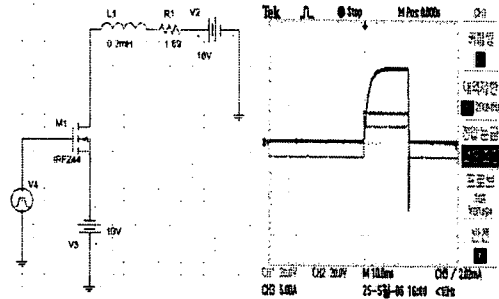


<그림 5> 발사체가 추진, 가속할 때의 자속밀도 분포

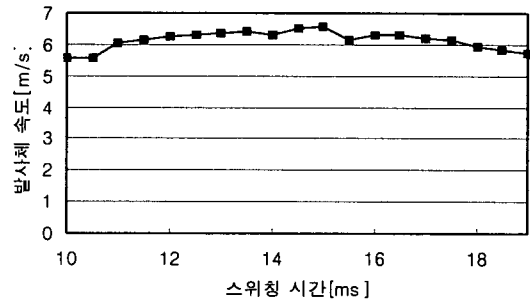


(Hc:13mm, Dg:6mm, Lc:77mm, Lg:130mm)

**<그림 5> 솔레노이드형 EML 제작**



<그림 6> 스위칭 시간을 조절하기 위한 회로와 파형



<그림 7> 스위칭 시간에 따른 발사체의 속도

**4. 결 론**

본 논문에서는 발사체를 추진, 가속시키기 위한 흡인력을 계산하고 발사체가 최대의 속력을 가질 수 있는 길이대 높이 비를 구하였다. 이에 필요한 자기장 분포를 해석하여 발사체가 솔레노이드의 중심까지 가속하여 최대의 속력을 가지기 위한 이동 거리와 시간을 확인하였다. 제작된 솔레노이드 EML을 여러 스위칭 시간에 따라 속도를 측정하고 최적의 스위칭 시간이 있는 것을 확인하였다. 그러나 제작된 솔레노이드형 EML은 발사체의 총열의 마찰력으로 인해 솔레노이드에서 발생하는 흡인력이 모두 전달되지 않아 효율이 떨어지고 속도가 크지 못했다. 차후 마찰력을 최소화 시키고 좀 더 높은 전압을 입력할 수 있는 회로에 대한 더 많은 연구가 필요하다.

**[참 고 문 헌]**

- [1] Peter P. Mongeau, "Inductively Commutated Coilguns", IEEE Trans. on magnetics. Vol.27, No.1, pp.568-572, Jan.1991
- [2] J. L. He, E. Levi, Z. Zabar, L. Birenbaum, Y. Naot, "Analysis of induction-type Coilgun Performance Based on Cylindrical Current Sheet Model", IEEE Trans. on magnetics. Vol.27, No.1, pp.579-584, Jan.1991
- [3] J. L. He, Z. Zabar, E. Levi, L. Birenbaum, "Transient Performance of Linear Induction launchers Fed by Generators and by Capacitor Bank", IEEE Trans. on magnetics. Vol.27, No.1, pp.585-590, Jan.1991
- [4] E. Levi, Z. Zabar, J. L. He, Z. Zabar, L. Birenbaum, "Guidelines for the Design of Synchronous-Type Coilguns" IEEE Trans. on magnetics. Vol.27, No.1, pp.628-633, Jan.1991