

릴럭턴스 타입의 2단 코일건 개발

박일환, 김동우, 하은영, 강수엽, 백형용, 윤승호, 전은영, 박관수
부산대학교 전자전기통신공학부

Development of the 2-stage Coilgun using Reluctance type

H. Hwan Park, Dong Woo Kim, Eun Young Ha, Soo Yeop Kang, Hyung Yong Baek, Seung Ho Yoon, Eun Young Jeon, Prof. Gwan Soo Park
Division of Electronic, Electrical and Communication Engineering, Pusan National University

Abstract - 본 논문에서는 Multi-stage Electro-magnetic Launcher(EML)를 개발함에 있어, Photo Sensor Switching System을 구성하여 Reluctance type 의 2-Stage Coilgun을 설계, 제작하였다. 이를 위해, 솔레노이드 코일의 최적 aspect ratio와 발사체의 size를 F.E.M. 해석을 통해 결정하였고, 탄속측정기를 제작하여 실험을 통해 각 stage의 최적 시정수를 결정하였다.

1. 서 론

Electro-magnetic Launcher(EML)는 전자기력을 이용하여 발사체를 추진시키는 장치로서 19세기부터 계속적으로 연구되고 있다[1]. EML에 대한 본격적인 연구는 80년대 미국의 SDI 계획을 비롯하여, 화약 추진장치를 대체하기 위한 목적으로 많은 연구가 진행되고 있다[2]. EML의 한 종류인 Coilgun은 여러 개의 코일을 단으로 사용할 경우 속도 특성도 뛰어나고 발사체와 코일이 접촉하지 않아 마모손실이 거의 없다. Inductance type Coilgun은 Eddy Currents를 이용한 비자성 도체 발사방식이고, Reluctance type Coilgun은 플레밍의 오른손법칙을 이용한 자성제 발사 방식으로서 Inductance type에 비해 상대적으로 복잡하지 않고, 소모전류가 적으므로 개발상 유연성이 높아 많은 연구가 진행되고 있다[3-12].

본 논문에서는 솔레노이드 코일의 최적 aspect ratio와 발사체의 size를 F.E.M. 해석을 통해 결정하였고, 탄속측정기를 제작하여 실험을 통해 각 stage의 최적 시정수를 결정하였다. 또한, Photo Sensor Switching System을 구성하여 2-stage Reluctance type Coilgun을 개발하였다.

2. 본 론

2.1 릴럭턴스 타입 Coilgun의 원리

솔레노이드 코일에 전류가 공급되면 플레밍의 오른손법칙에 의해 Fig. 1과 같이 자기장이 형성된다.

정자계에서 성립하는 맥스웰방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot H = J \quad (1)$$

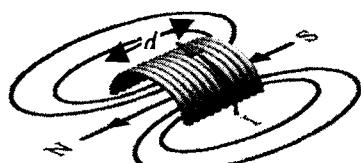


Fig. 1 솔레노이드 코일과 자기장

여기서 코일내부에 발생하는 자속 Φ 는

$$\Phi = \frac{B}{A} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 또한, 솔레노이드 코일에서의 인덕턴스 L 은

$$L = \frac{N \times \Phi}{I} \quad (3)$$

가 되고, 따라서

$$W = \frac{1}{2} L I^2 \quad (4)$$

와 같이 인덕턴스로부터 에너지를 구할 수 있다.

발사체가 받는 힘 F 는 에너지를 거리에 대해 미분하여 구할 수 있으므로, 발사체의 속도는 에너지 보존 법칙을 이용하여 전기에너지와 운동에너지를 이용하여 구할 수 있다.

따라서, 발사체가 받는 힘은

$$F = \frac{dW}{dx} = \frac{1}{2} NIS \frac{dB}{dx} \quad (5)$$

가 되고, 발사체의 속도는

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{W}{m}} \quad (6)$$

와 같이 구할 수 있다.

2.2 Photo Sensor Switching을 이용한 2단구성 개요
다단형 솔레노이드 EML은 Fig. 2와 같이 1·2단 코일부와 코일부에 전류를 인가시키기 위한 1·2단 회로부, 발사체의 위치를 감지하여 2단회로의 스위치로 작용하는 포토커플러 센서부로 구성된다.

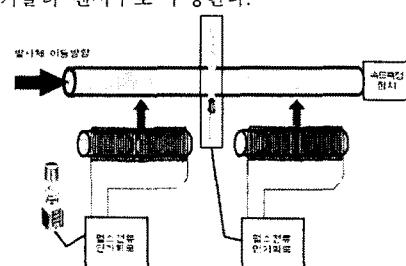


Fig. 2 2-stage Reluctance type Coilgun의 구상도

2.3 렐리던스 타입 Coilgun 설계

발사체에 작용하는 흡인력은 Fig. 3, Fig. 4와 같이 솔레노이드 코일의 자기장 분포에 의해 결정된다. 따라서, 솔레노이드 코일의 최적화 된 형태 산출을 위해, Fig. 5 과 같이 코일의 길이 대 높이의 비(Aspect ratio=b/a)를 기준으로 Table 1과 같이 8가지의 솔레노이드 형태를 분류하였다. 여기서, Table 2와 같이 환경변수를 설정하고, F.E.M. 해석툴을 이용하여, 자기장 분포와 자속밀도를 계산을 통해, Aspect ratio에 따른 에너지와 최종 속도를 비교하여 최적 Aspect ratio를 0.1(10:1)로 결정하였다.

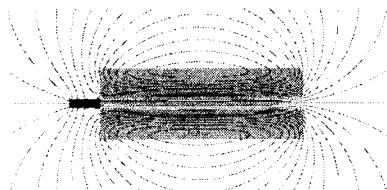


Fig. 3 발사체 추진시 Flux line 분포

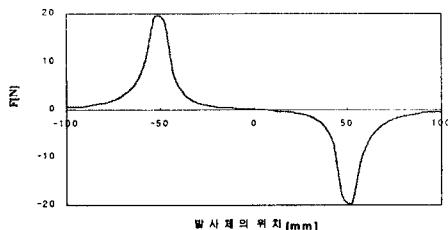


Fig. 4 발사체와 코일의 위치에 따른 흡인력

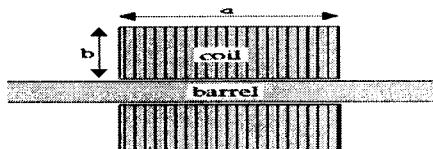


Fig. 5 Aspect ratio 설정을 위한 개념도

Table 1 Aspect ratio에 따른 에너지와 최종 속도

a (가로)	b (세로)	Aspect ratio($\frac{b}{a}$)	Energy [J]	Velocity [m/s]
10	1	0.1	0.314	26.117
6	1	0.167	0.225	21.213
3	1	0.333	0.156	17.664
2	1	0.5	0.160	17.889
1	1	1	0.216	20.785
1	2	2	0.200	20.000
1	3	3	0.232	21.541
1	6	6	0.229	21.401

Table 2 코일의 Aspect ratio 설계의 환경변수

발사체	길이	15mm
	지름	3mm
	질량	1g
코일	면적	625mm ²
	권선수	2500turn
	지름	0.45mm
총열	지름	6mm
	밀도	10A/mm

2.4 발사체의 설계

발사체의 최적화에 있어서, 발사체의 크기와 무게에 따라 발사체 주변의 자기 분포와 운동에너지가 달라진다. 따라서, F.E.M. 해석을 통해 Table 3와 같이 4가지 조건의 발사체에 대해서 총 에너지를 구하였고, 속도비교를 통해, 25mm, 1.53g의 강자성 발사체를 결정하였다.

2.5 스위칭 회로 설계

일정한 시간동안 전류를 인가하기 위해서는 단안정 멀티바이브레이터 회로가 필요하다. 본 연구에서는 Timer 소자를 이용하여 단안정 멀티 바이브레이터 회로를 구성하였다.

이를 이용하여 펄스 파형의 폭을 구할 수 있는데, 트리거 펄스가 가해지는 순간을 $t=0$ 으로 표시하면, v_c 의 지수 파형은

$$v_c = V_{\alpha} (1 - e^{-t/CR}) \quad (8)$$

와 같다. 여기서 시정수 계산을 위해 $t=T$ 에서

$$v_c = V_{TH} = \frac{2}{3} V_{\alpha} \quad (9)$$

$$T = CR \ln 3 \approx 1.1 CR \quad (10)$$

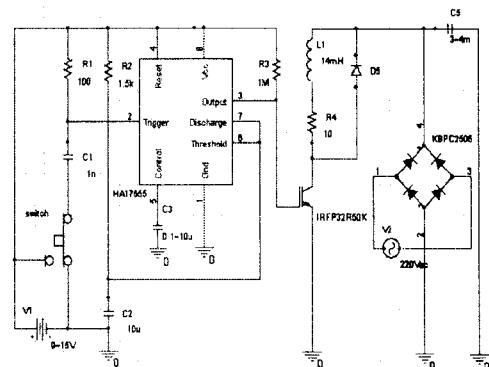
을 얻을 수 있다. 따라서 Fig. 6 의 회로에서 C2와 R2을 변화시키면 펄스간격 T를 변화 시킬 수 있다.

2.5.1 Photo Sensor Switching 회로 설계

이전 코일을 통과한 발사체의 속도는 여러 가지 환경 변수로 인해 완전히 균일할 수는 없다. 따라서 다단 회로에는 발사체의 동작에 따라 작동하는 센서 스위치가 필요하다. 본 연구에서는 Fig. 7과 같이 발광소자인 QED123, 수광소자인 QSC114를 사용하여 Fig. 8 의 Photo Sensor Switching 회로를 제작하였다.

Table 3 발사체의 길이에 따른 에너지와 최종속도 계산

발사체 길이 [mm]	발사체 질량 [g]	Energy [J]	Velocity [m/s]
15	0.79	0.3024	29.099
20	1.13	0.3248	30.157
25	1.53	0.4498	36.564
30	1.90	0.3206	29.961



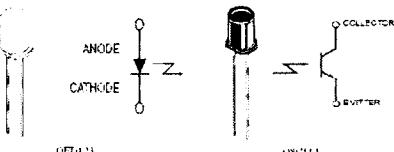


Fig. 7 Photo Sensor의 발광·수광 소자

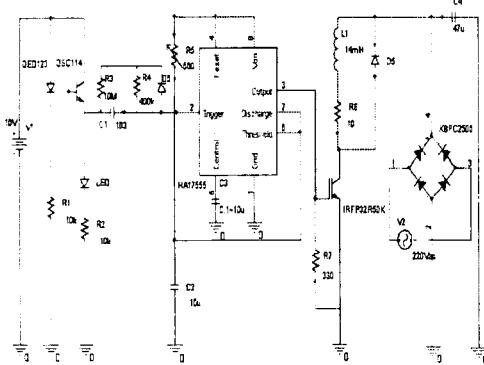


Fig. 8 Photo Sensor를 이용한 2nd-stage Coilgun 스위칭 회로

Fig. 8에서 R3, R4, C1와 D6을 사용한 High Pass Filter는 포토커플러에 의해 발생한 전압파형의 하강 Edge 신호를 검출하여 정해진 시정수만큼의 펄스 신호를 HA17555를 통해 발생시킬 수 있도록 하여 신호의 안정성을 확보하였다. 따라서, High Pass Filter를 거친 포토커플러 신호에 의해 R5와 C2로 조정된 필스폭을 가지는 펄스 전압이 발생되고 최종적으로 2단 코일에 펄스 전류가 흐르도록 제작하였다.

2.6 릴럭턴스 타입 2단 Coilgun의 제작

설계를 통해 Fig. 9와 같이 2-stage Reluctance type Coilgun을 제작하였다.

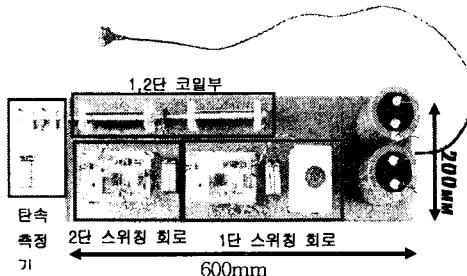


Fig. 9 2-stage Reluctance type Coilgun

Table 4 2-stage Reluctance type Coilgun의 성능

1단 EML	시정수	4ms
	평균 속도	16.810m/s
다단 EML	시정수	0.5ms
	최대 속도	27.739m/s
	최소 속도	21.379m/s
	평균 속도	23.635m/s

3. 결 론

본 논문에서는 Reluctance type의 2-Stage Coilgun을 설계, 제작하였다. F.E.M. 해석을 통해 코일과 발사체를 최적 설계, 제작하였고, Photo Sensor Switching 회로를 구성하여 Multi-stage의 trigger System을 설계, 제작하여 Multi-stage Coilgun의 개발 기반을 마련하였다.

성능 Test 결과 평균 총구속도 23.636 m/s로서 1단의 16.81m/s에 비해 41%의 속도 성능 개선이 있었다.

추후 과제로서 에너지 효율을 더욱 높일 수 있는 방안을 마련하고, Multi-stage로서 stage가 증가에 따른 시정수의 정밀한 제어에 더 많은 연구가 필요하다.

[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] J. A. Adams and M. A. Fischetti, "SDI : The grand experiment.", IEEE Spectrum, Special Rep., pp47-65, 1985
- [3] G. William, "A Simple Unified Physical Model for a Reluctance Accelerator.", IEEE Trans. on Magnetics, Vol 35, No.1, pp.4270-4276, Nov.2005
- [4] 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
- [5] 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
- [6] G. Hainsworth, "Finite Element Modelling of Flux Concentrators for Coilguns", IEEE Trans. on magnetics, Vol.33, No.1, Jan. 1997, pp.175-177
- [7] Ronald J. Kaye, "Operational Requirements and Issues for Coilgun Electromagnetic Launchers", IEEE Trans. on magnetics, Vol.41, No.1, Jan. 2005, pp.194-199
- [8] Peter P. Mongeau, "INDUCTIVELY COMMUTATED COILGUNS", IEEE Trans. on magnetics, Vol.27, No.1, Jan. 1991, pp.568-572
- [9] Peter P. Mongeau, "Inductively Commutated Coilguns", IEEE Trans. on magnetics. Vol.27, No.1, pp.568-572, Jan.1991
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 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