

자기차폐 효과를 이용한 Coil-Gun 개발

이재호, 안현모, 전경원, 박국남, 성기훈, 한성진
 동아대학교 전기공학과

Development of Coil-Gun Using Magnetic Shielding Effect

Jae Ho Lee, Hyun Mo An, Kyung Won Jeon, Kug Nam Park, Ki Hoon Seong, Sung Chin Hahn
 Department of Electrical Engineering, Dong-A University

Abstract - 본 논문에서는 코일건의 설계시 자기차폐 효과에 따른 코일건 성능 향상 및 최적화에 대하여 연구하였다. 일반적인 솔레노이드 코일건과 솔레노이드 코일에 자기차폐시킨 코일건의 자기장 분포를 유한요소해석을 통해 비교함으로써 자기차폐를 한 코일건의 자속밀도와 투사체가 받는 힘이 향상됨을 알 수 있었다. 또한 자기차폐시킨 코일건을 동일 코일량에 대한 성능 최대화를 위해 솔레노이드 형상을 최적화하고, 그 모델을 실제 제작하여 성능을 검증하였다.

1. 서 론

화약의 발명 이후부터 현재까지 물체의 발사는 화약의 폭발에 의한 반작용을 이용하는 방법이 가장 많이 사용되어져 왔다. 19세기 말에 전기에너지의 생산과 이용이 가능해짐에 따라 전기에너지를 운동에너지로 변환시켜 물체를 발사시키는 장치인 Electro-Magnetic Launcher(EML)에 대한 연구가 이루어지기 시작했다. 비행기, 잠수함 또는 지하시설, 위험물 주의 장소에서 화약을 대신해 전기에너지를 이용하는 것이 더 안전하고, 연료와 산소탱크를 따로 준비할 필요가 없어서 더 효과적이기 때문이다. 이와 같은 이유로 무기로서의 EML 연구가 진행되어져 왔으며, 현재는 우주공간에서 물질의 전달 등을 목적으로 한 연구가 진행되고 있다.

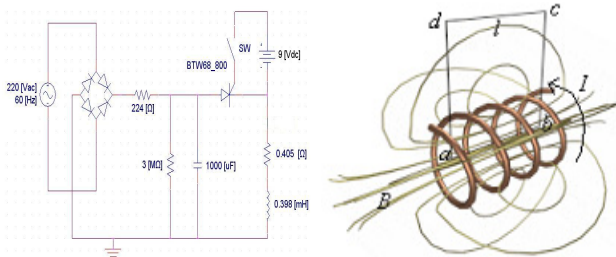
EML에는 크게 레일건과 코일건으로 구분되며, 이들은 모두 전류가 흐르면 발생하는 자기장과 전류에 의한 로렌츠 힘을 사용한다는 점에서 동일하지만 다음과 같은 차이점이 있다. 레일건은 레일과 투사체의 직접적인 마찰로 인한 마찰손실로 인하여 에너지 변환 효율이 낮고, 발사시 레일의 파손으로 재사용이 불가능하다. 그러나 코일건은 발사시 투사체가 솔레노이드의 중심으로 부상되어 발사되므로 마찰에 의한 손실과 솔레노이드의 파손없이 여러번의 재사용이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 코일건의 초기모델을 선정하여 일반적인 솔레노이드 코일건과 자기차폐시킨 코일건의 성능을 유한요소해석을 통해 비교하였다. 자기차폐시킨 코일건의 초기사양을 동일 코일량에 대한 코일건 성능을 최대화시키기 위해 코일건 형상을 최적화하고, 그 모델을 실제 제작하여 시험함으로써 자기차폐 효과에 의한 코일건의 성능을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 코일건의 구조 및 기본이론

코일건은 그림 1(a)의 회로도 및 같이 솔레노이드, 커패시터, 트리거회로, 브릿지 다이오드 등으로 구성된다. 솔레노이드에 여자전류를 투입시키면 암페어의 주회법칙에 의해 솔레노이드의 주위에는 그림 1(b)와 같이 자기장이 형성된다. 솔레노이드에 흐르는 전류와 자기장은 플레밍의 왼손법칙에 의해 솔레노이드의 양쪽 끝에서 로렌츠 힘을 발생시키고, 이 힘에 의해 솔레노이드의 한쪽 끝에 위치한 투사체는 솔레노이드의 중심을 통과하여 발사된다.



(a) 코일건의 회로도 (b) 솔레노이드의 자기장
 <그림 1> 코일건의 개념도

이때 자계세기 \vec{H} 를 임의의 폐곡로를 따라 선적분하면 그 폐곡로에 둘러싸인 전류와 같으므로

$$\oint_{path} \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad (1)$$

이며, 솔레노이드의 내부 자계세기 \vec{H} 는 다음과 같다.

$$\vec{H} = \frac{N \times I}{\ell} \hat{z} \quad (2)$$

여기서, N 은 턴수, I 는 솔레노이드에 흐르는 전류, ℓ 은 솔레노이드의 길이이다.

솔레노이드 내부의 자속밀도 \vec{B} 는 식 (2)에서 구해진 자계세기 \vec{H} 를 이용하면 다음과 같다.

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (3)$$

여기서, μ_0 는 자유공간의 투자율이다.

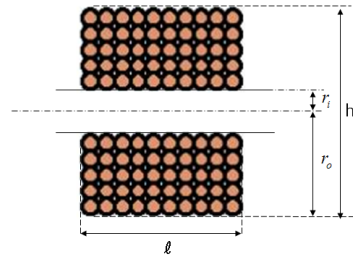
이때 투사체에 작용되는 흡인력은 다음과 같다.

$$F = \frac{B^2}{2\mu_0} S \quad (4)$$

여기서, S 는 투사체의 단면적이다.

2.2 코일건의 초기모델

코일건의 자기차폐 효과를 알아보기 위해 그림 2와 같이 코일건의 초기모델을 선정하였고, 표 1은 선정된 코일건의 초기모델 사양을 나타낸다.



<그림 2> 코일건의 초기모델

<표 1> 코일건 초기모델의 사양

코일두께 [φ]	길이 [mm]	높이 [mm]	내반경 r _i [mm]	외반경 r _o [mm]	턴수 [turn]
1	40	24	4	12	273

코일건 초기모델에서 코일저항은 다음과 같다.

$$R = \rho \frac{d}{S} \quad (5)$$

여기서, ρ 는 코일의 고유저항률, d 는 코일의 길이, S 는 코일의 단면적이다.

또한 코일건 초기모델의 인덕턴스는 휠러의 공식에 의해 다음과 같다.

$$L = \frac{0.0315 \times \text{turns}^2 \times \left(\frac{r_i + r_o}{2}\right)^2}{6 \times \left(\frac{r_i + r_o}{2}\right) + (9 \times l) + 10 \times (r_o - r_i)} \quad (6)$$

표 2는 식 (5)와 식 (6)을 이용해 구한 코일건 초기모델의 저항과 인덕턴스값을 나타낸다. 이는 코일건 회로구성시 코일에 인가되는 전류를 계산하는 기준이 된다.

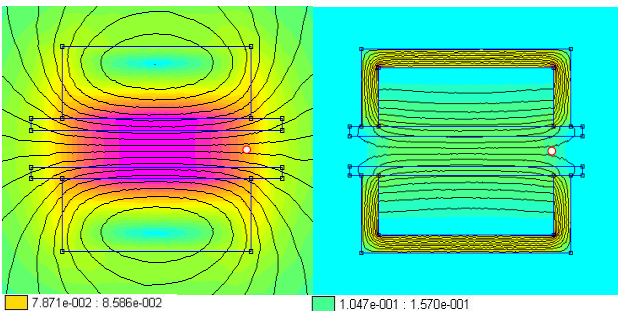
〈표 2〉 코일건 초기모델의 저항과 인덕턴스

저항[Ω]	인덕턴스[mH]
0.333	0.308

2.3 코일건의 자기차폐 효과

자기차폐란 자성체 내로 자속을 집중시켜 자기장의 영향이 다른 곳에 미치지 않도록 하는 것을 말하며, 본 논문에서는 이러한 자기차폐 효과를 앞 절에서 제시한 코일건 초기모델에 적용하여 그 성능 향상에 대하여 알아보았다.

일반적인 솔레노이드 코일건은 누설자속 때문에 솔레노이드 입구에서의 자속밀도가 높지 않다. 그러나 코일건의 솔레노이드를 자성체로 자기차폐시키면 대부분의 자속이 투자율이 높은 자성체를 통과하므로 솔레노이드 입구에서의 자속밀도가 증가하게 된다. 식 (4)에서 코일건의 투자체가 받는 힘은 자속밀도의 제곱에 비례하므로 자기차폐에 의해 코일건의 성능이 향상된다.



(a) 초기모델 (b) 자기차폐 모델
〈그림 3〉 솔레노이드의 자기장 분포

그림 3은 앞 절에서 제시한 코일건의 초기모델과 자기차폐시킨 코일건 모델의 자기장 분포를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 코일건 초기모델의 자속밀도는 83.7[mT]이고, 자기차폐시킨 코일건 모델의 자속밀도는 121.1[mT]이다. 자기차폐시킨 코일건 모델의 자속밀도가 초기모델에 비해 약 45% 크기 때문에 투자체가 받는 힘은 약 110% 증가함을 알 수 있다.

2.4 코일건의 최적화

자기차폐시킨 코일건의 초기사양을 동일 코일량에 대한 코일건 성능을 최대화시키기 위해 코일건의 솔레노이드 형상을 최적화하였다. 표 3에서 솔레노이드 저항이 일정할 때, 솔레노이드의 길이, 높이, 턴수에 따라 자기차폐시킨 코일건 모델의 전류와 자속밀도를 Matlab Simulink와 유한요소해석을 이용해 계산한 값을 비교하였다. 표에서 보는바와 같이 모델 I의 형상을 갖는 코일건에서 자속밀도가 최대가 되고, 초기모델의 코일건에 비해 약 82% 크기 때문에 투자체가 받는 힘은 약 231% 증가함을 알 수 있다.

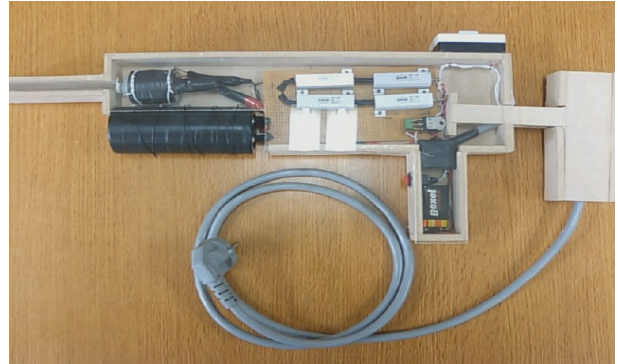
〈표 3〉 자기차폐 코일건 모델의 해석값

구분	길이 [mm]	높이 [mm]	턴수 [turns]	저항 [Ω]	전류 [A]	인덕턴스 [mH]	자속밀도 [mT]
모델	I	30	28	261	0.359	22.08	152.4
	II	40	24	273	0.333	21.72	121.1
	III	50	22	294	0.325	21.64	101.1
	IV	60	20	295	0.315	23.52	93.7

2.5 코일건의 제작 및 시험

앞 절에서 자속밀도가 최대인 모델 I의 형상에 Metal Disk와 Metal Plate를 이용해 솔레노이드를 완전 자기차폐시켜 최적화된 코일건을 직접 제작하였다. 그림 4는 자기차폐 효과를 이용하여 제작된 코일건의 모델이다.

또한, 시험을 통해 이 코일건의 인덕턴스와 자속밀도를 RLC미터와 가우스미터를 이용하여 측정하였고, 해석값과 비교하였다.



〈그림 4〉 제작된 코일건

〈표 4〉 자기차폐 코일건 모델의 측정값

	길이 [mm]	높이 [mm]	턴수 [turns]	저항 [Ω]	인덕턴스 [mH]	자속밀도 [mT]
측정값	30	27.5	262	0.351	0.508	148.6
해석값	30	28	261	0.359	0.41	152.4

3. 결 론

본 논문에서는 자기차폐 효과에 따른 코일건 성능 향상과 솔레노이드 코일의 최적화에 대하여 알아보았다. 이를 위하여 일반적인 솔레노이드 코일건과 자기차폐시킨 코일건의 자속밀도를 비교함으로써 코일건의 성능이 향상됨을 알 수 있었다. 아울러 동일 코일량에 대해 자속밀도가 최대가 되도록 솔레노이드의 형상을 최적화하였다. 최적화된 코일건을 실제 제작하여 인덕턴스와 자속밀도를 측정하고, 그 값을 유한요소해석을 통해 구한 해석값과 비교함으로써 자기차폐 효과에 의한 코일건의 성능을 검증하였다.

향후 코일건의 휴대성을 강화하기 위해 220[Vac] 전원을 휴대용 배터리로 대체함과 동시에 투자체가 솔레노이드의 중심을 통과할때 발생하는 저항력을 최소화하기 위해 스위칭 시간을 제어하고자 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] Qibin Deng; Jun Li; Yinchun Gui; Jiansheng Yuan; Zanji Wang, "Study of a Single-stage Electromagnetic Launcher System Using Pancake Coil", Electromagnetic Launch Technology 2004 12th Symposium, Page:282-284, 2005.
- [2] Kaye, R.J.; Turman, B.N.; Shope, S.L., "Applications of coilgun electromagnetic propulsion technology", Power Modulator Symposium, 2002 and 2002 High-Voltage Workshop. Conference Record of the Twenty-Fifth International, Page:703-707, 2002
- [3] Zabar, Z.; Naot, Y.; Birenbaum, L.; Levi, E.; Joshi, P.N., "Design and power conditioning for the coil-gun", Magnetics, IEEE Transactions on Volume 25, Issue 1, Page(s):627 - 631, 1989
- [4] Williamson, S.; Horne, C.D., "EFFECT OF TIMING ERRORS ON COIL-GUN PERFORMANCE", Pulsed Power Conference, 1993. Digest of Technical Papers. Ninth IEEE International Volume 2, Page(s):564, 1993
- [5] 장성만, 김석환, 한송엽, "유도형 코일건의 에너지 및 속도특성 해석", Journal of Korean Magnetics Society, Volume 2, Number 1, 1992
- [6] 김기봉, "EML에 관한 기술현황 및 linear induction launcher 기술의 발달", 대한전기학회지:전기의 세계, Page(s) : 36-43, 1994