

## Improving Performance of Two-Stage Coilgun

Seon Myeong Kim and Jin Ho Kim\*

*School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsbuk 38541, Korea*

Seok-Won Kang

*Department of Automotive Engineering, Yeungnam University, Gyeongsbuk 38541, Korea*

(Received 5 January 2020, Received in final form 20 February 2020, Accepted 1 April 2020)

This paper reports the optimize of solenoid coil in the coil gun by adjusting the winding number of coil and the distance between coil and projectile, and the performance of the coil gun was improved by using the method of operating the SCR switch with the physical contact of the projectile to flow the current to the two-stage coil. In the coil gun, the velocity of the projectile is influenced by several factors. Cycle changes according to the capacity of capacitor, the winding of the solenoid coil and diameter of wire. Distance between projectile and coil also influences the final velocity during capacitor discharge. When projectile passes a certain part of the coil, receives the force in the reverse direction due to the Suction phenomenon and the speed decreases. Therefore, in order for the projectile to have the optimal speed, it is necessary to combine the above elements to find the optimal value. It is also important to control the discharge time of the solenoid coil when making the multi stage coil. The discharge method applied in this research has a simple circuit configuration than the previous method using a sensor, and the speed loss is less than the physical contact method of the general switch because the torque required for the switch operation is low, and It has the advantage that the coil gun system using the high voltage can be operated stably. The velocity of the projectile was calculated using Maxwell, an electromagnetic analysis program, and based on this, a prototype for coil gun and SCR discharge circuit was produced to measure the velocity of the projectile.

**Keywords :** two-stage coilgun, optimal design, discharge circuit, SCR, Maxwell

## 2단 전자기 코일건의 성능향상을 위한 연구

김선명 · 김진호\*

영남대학교 기계IT대학 기계공학부, 경북 경산시 대학로 280, 38541

강석원

영남대학교 기계IT대학 자동차기계공학과, 경북 경산시 대학로 280, 38541

(2020년 1월 5일 받음, 2020년 2월 20일 최종수정본 받음, 2020년 4월 1일 게재확정)

본 논문에서는 코일의 권선수와 코일과 발사체간의 거리를 조절하여 코일건의 솔레노이드 코일을 최적설계하였으며, 발사체의 물리적인 접촉으로 SCR 스위치를 작동시켜 2단코일에 전류를 흐르게 하는 방법을 사용하여 코일건의 성능을 향상하였다. 코일건에서 발사체의 속도는 여러 요인의 영향을 받는다. 캐패시터의 용량, 솔레노이드 코일의 감는 방식과 wire의 직경에 따라 주기가 달라지고, 충전전압, 캐패시터 방전시 코일과 발사체 간의 거리도 최종속도에 영향을 미친다. 발사체는 코일의 일정 부분을 지나면 Suction 현상으로 인해 발사 방향과는 역방향으로 힘을 받으며 속도가 감소하게 된다. 따라서 발사체가 최적의 속도를 갖기 위해서는 위의 여러요소들을 조합해 최적값을 찾아내야 한다. 또한 다단코일건을 제작할 때 솔레노이드 코일의 방전 시점을 제어하는 것도 중요하다. 본문에서 적용한 방전방식은 이전의 센서를 이용한 방법보다 회로구성이 간단하고, 일반 스위치의 물리적인 접촉방법보다 스위치 작동에 필요한 토크가 적어 속도손실도 적으며 고전압을 사용하는 코일건 시스템을 안정적으로 작동시킬 수 있다는 이점이 있다. 전자기 해석 프로그램인 Maxwell을 이용하여 발사체의 속도를 계산하였고 이를 토대로 코일건과 SCR 방전회로에 대한 시제품을 제작하여 발사체의 속도를 측정해 보았다.

**주제어 :** 2단 코일건, 최적설계, 방전회로, SCR, Maxwell

## I. 서 론

코일건은 솔레노이드 코일에 전류를 흘려보내 발생한 전자 기력으로 탄환을 가속 시키는 장치이다. 자기포화점이 존재하므로 단일 코일건으로는 속도상승에 한계가 있기 때문에 성능 향상을 위해 솔레노이드 코일의 다단 설계가 필요하다. 코일건에서 캐패시터 방전시 발사체와 코일간 거리는 최종속도에 큰 영향을 미치며 다단코일의 경우 발사체가 운동하는 도중 다음 코일의 방전 시점을 제어하는 방법이 필요하다. 캐패시터의 방전시점을 제어하기 위해 SCR 스위치 회로를 응용하였다. SCR(Silicon Controlled Rectifier)이란 역저지 3단자 사이리스터를 말한다. 사이리스터는 3개 이상의 P-N 접합을 1개의 반도체 기판 내에 형성함으로써 전류가 흐르지 않는 상태와 전류가 흐를 수 있는 상태의 2개의 안정된 상태가 있고, 또한 오프 상태에서 온 상태로, 온 상태에서 오프 상태로 이행이 가능하다. 사이리스터는 일반적인 전력용 트랜지스터에 비해 고내압에서 우수한 특성이 있으므로 코일건 회로에 적합하다. 이전 코일건 연구에서는 광센서를 이용한 방법이나 스위치의 물리적 접촉방식을 한 사례가있다. 광센서를 이용한 방전회로를 구성하게 되면, 전체적인 회로가 복잡해지게 되고 고전압, 고전류를 사용하는 코일건 회로의 특성상 센서의 오작동을 야기할 수 있다. 또한 물리적 접촉방식은 스위치의 작동에 필요한 토크가 존재하며 발사체의 무게와 형상에 따라 작동성이나 속도에 영향을 미칠 수 있다. 본 논문에서는 발사체의 물리적인 접촉을 스위치로 하여 SCR의 작동에 필요한 전류를 공급해 주면 솔레노이드 코일에 전류가 흐르게 하는 방식을 채택하였다. 일반 물리 스위치에 비해 작동에 필요한 토크가 적고 센서를 이용한 회로보다 회로 구성도 간단하며 고전압, 고전류를 사용하는 코일건 시스템을 안전하게 운용할 수 있다는 장점이 있다. Maxwell 프로그램을 이용하여 코일건 모델을 해석하였으며 발사체가 최적 속도를

갖게 설계하고 이를 토대로 시제품을 제작하였다. 제작한 시제품에 SCR 방전회로를 적용시켜 프로그램의 해석값과 실험에서의 최종속도를 비교해 보았다.

## II. 본 론

### 1. 코일건 회로 설계 및 코일건의 수학적 모델

코일건은 캐패시터에 전압을 충전하여 솔레노이드 코일에 짧은시간 동안 충전된 전압을 인가하여 솔레노이드 코일에 생성된 자기장에 의해 발사체를 운동시키는 장치이다. 캐패시터의 충전을 위해 12 V, 1 A 직류전원장치를 부스터 컨버터를 이용하여 350 V까지 승압시켜 충전회로를 제작하였다. 방전회로는 사이리스터 SCR을 사용하였으며 1차 코일의 방전은 일반 스위치로, 2차 코일은 발사체가 운동하는 도중 일정 지점에 도달하면 자동으로 방전이 가능하도록 설계하였다.

코일건에서 발사체가 받는 자기력은 자속밀도, 투자율 등의 영향을 받는다. 발사체의 위치에 따라서 자속밀도는 계속 변화하며  $z$ 의 위치에서 발사체가 받는 힘은 다음과 같이 표현된다.

$$F(z) = \frac{du}{dz} \tag{1}$$

여기서  $u$ 는 특정 공간에서의 자기장 에너지를 나타내며 부피와 자기밀도의 곱으로 표현된다. 투자율이  $\mu_m$ 인 물질이 채워졌을 때  $\Delta u$ 는 식으로 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta u = V \frac{Bz^2}{2} \left( \frac{1}{\mu_0} - \frac{1}{\mu_m} \right) \tag{2}$$

위 식을 종합하여 발사체가 받는 힘  $F$ 를 구할 수 있다.

$$F(z) = \frac{du}{dz} = \frac{\pi r^2}{2} \left( \frac{1}{\mu_0} - \frac{1}{\mu_m} \right) \frac{d}{dz} \left[ \int_z^{z+L} B(\zeta)^2 d\zeta \right] \tag{3}$$

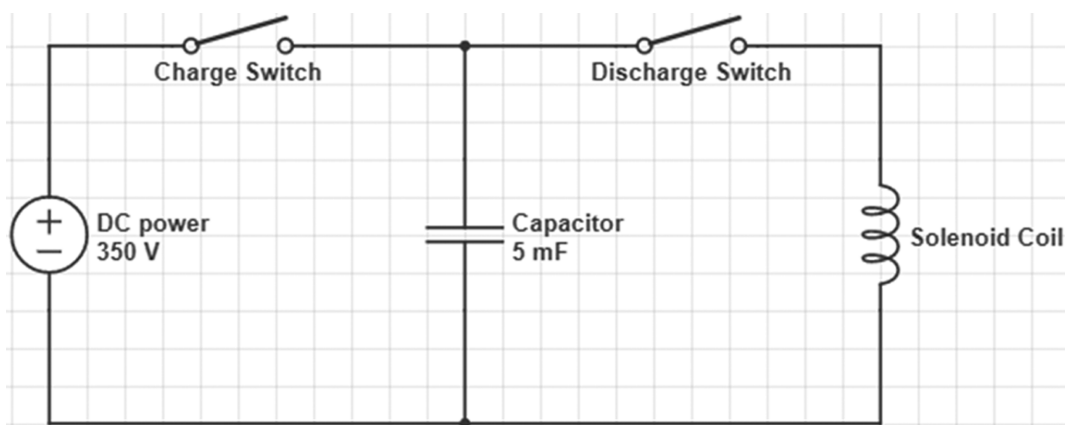


Fig. 1. Circuit diagram of single stage coilgun.

여기서 자기장  $B$  또한 발사체의 거리  $z$ 에 따라 변화하므로 자기장  $B$ 에 대한 방정식을 정의하여야 한다. 여러 방정식이 복잡하게 얽여있으므로 Matlab이나 Maxwell 같은 해석 프로그램을 사용하는 것이 효율적이며 본 논문에서는 전자기 해석 프로그램인 Maxwell을 이용하여 해석을 진행하였다.

**2. 코일건 최적설계 및 Maxwell을 이용한 해석**

코일건의 발사체의 속도는 여러 요인들에 의해 결정된다. 본 연구에서는 캐패시터 용량과 충전전압을 고정하고 솔레노이드 코일의 권선수와 코일과 발사체 간의 거리를 변수로 하여 최적값을 찾아 보았다. 코일의 권선수에 따라 저항과 인덕턴스 값이 달라지며 RLC 함수에서 주기가 결정된다. 주기와 발사체의 운동을 참고하며 발사체와 코일간의 거리를 조정해 발사체가 발사 방향으로 최대의 힘을 받고 suction 현상으로 인한 반대 방향의 힘을 최대한 적게 받도록 하는 것을 최적 설계의 중점으로 두었다. 코일제작에는 시제품 제작의 편의성을 위해 직경 1 mm의 구리선을 사용하였고, 캐패시터의 충전은 승압회로를 이용하여 350 V를 충전하였다. 캐패시터 용량은 1차 코일에 5000  $\mu$ F, 2차 코일에는 주기를 짧게 하기 위해 3000  $\mu$ F로 설정하였다. 발사체는 직경 10 mm의 구형 steel\_1010이 사용되었다.

발사체의 속도를 계산하기 위해 전자기 해석 프로그램인 Maxwell을 사용하였다. 해석시간을 단축시키기 위해 Fig. 2 과 같이 솔레노이드 코일과 발사체, 발사관을 2D로 모델링 하였으며 Cylindrical about Z를 사용하여 Z축을 중심으로 회전체 해석을 수행하도록 모델링 하였다. Maxwell 프로그램 상에서 솔레노이드 코일 자체의 저항은 계산되지 않으므로 Maxwell circuit editor을 이용하여 Fig. 3처럼 전자기력을 생성하기 위한 RLC 전기 회로를 구성하고 식(4)로 코일의 저항값을 계산하여 입력하였다. 인덕턴스 값은 Maxwell에서 자

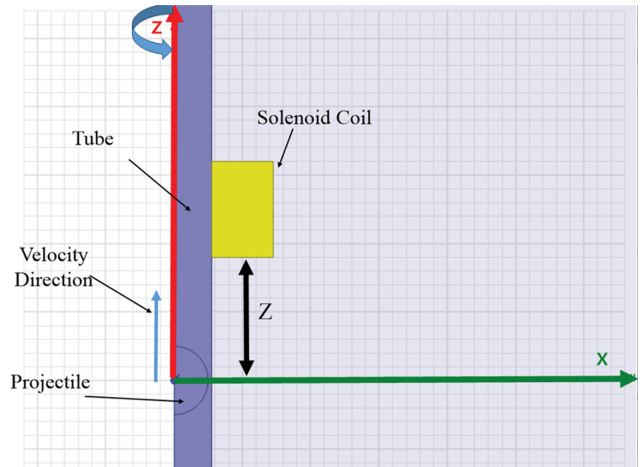


Fig. 2. (Color online) Schematic diagram of coilgun.

동으로 계산된다.

$$R_{coil} = \frac{2\pi N \left( MR + \frac{M^2 d}{2} \right)}{\pi \left( \frac{d}{2} \right)^2} \times \rho_{copper} \quad (4)$$

1차 코일은 축방향(N) 14~17, 반경방향(M) 9~12, 코일간 거리(Z) 18 mm~21 mm로 각 4개의 변수를 설정해 총 64개의 변수가 생성되었으며, 2차 코일은 축방향 10~13, 반경방향 7~10, 코일간 거리 31 mm~34 mm로 각 4개의 변수를 설정해 총 64개의 변수가 생성되었다. 2차 코일의 최적값은 Maxwell 코일건 모델에 1차 코일에서의 최종속도를 발사체의 초기속도로 설정하여 해석을 진행하였다. 짧은 시간 동안 속도가 변하기 때문에 시뮬레이션의 해석 방식은 Transient로 설정하였다.

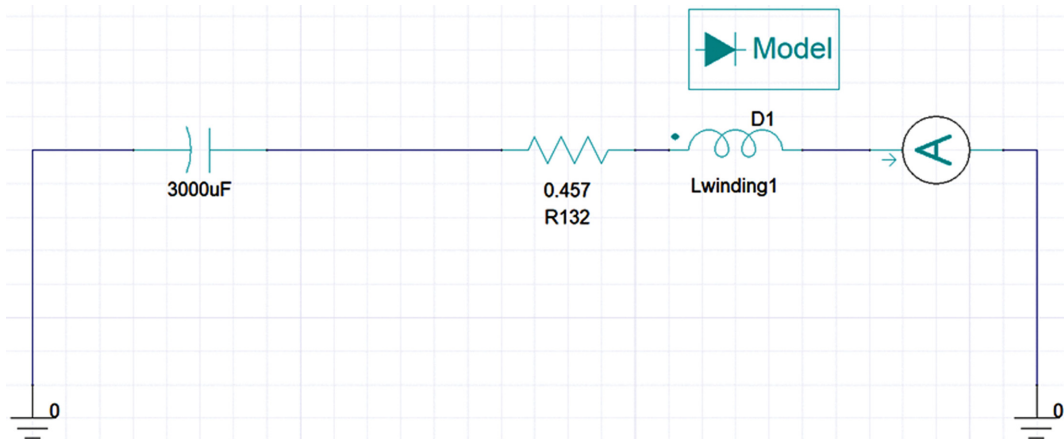


Fig. 3. (Color online) External circuit of coilgun in MAXWELL.

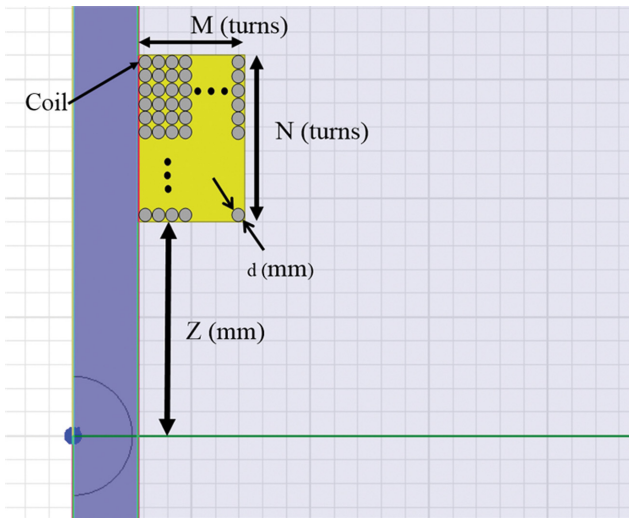


Fig. 4. (Color online) Diagram and variables of solenoid coil.

Table I. Specification of solenoid coil.

$R$	Inside of winding coil (mm)
$N$	Number of axial turns of coil (turns)
$M$	Number of radial turns of coil (turns)
$d$	Diameter of coil (mm)
$\rho_{copper}$	Specific resistance ( $\Omega \times m$ )

3. 1차 코일 해석 및 결과

프로그램 해석결과 총 64개 변수 중 1차 코일의 최적값은 축방향 14번, 반경방향 10번으로 감았을 때, 발사체와 코일간 거리가 18 mm일 때 최종속도 25 m/s로 최적 속도가 계산되었다.

Fig. 5와 Fig. 6은 위 최적조건에서 계산된 발사체의 속도와 솔레노이드 코일에 인가된 전류의 그래프이다. 그래프를

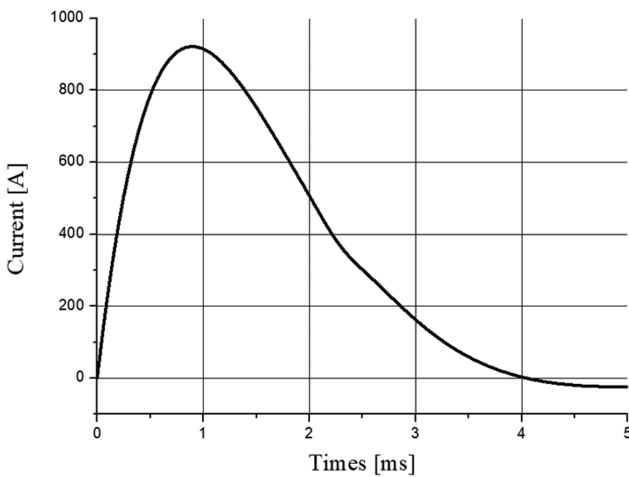


Fig. 5. Current flow in 1st coil.

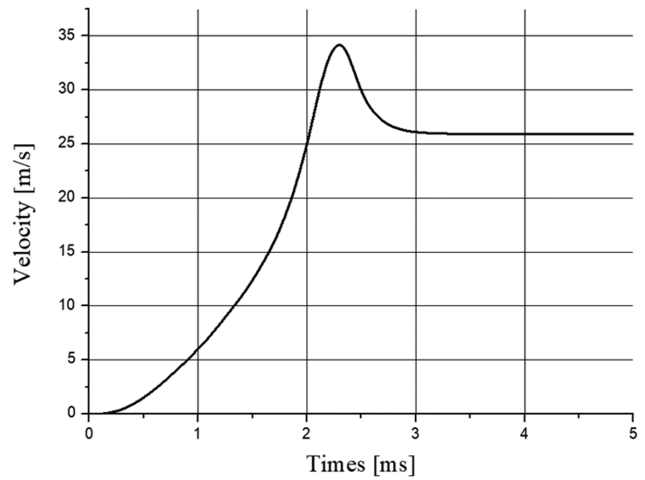


Fig. 6. Projectile velocity of 1st coil gun.

Table II. Material of Steel\_1010.

Saturation flux density $B_{sat}$ [T]	2.275
$H (\mu_{max})$ [A/m]	318.31
Relative permeability $\mu$ [-]	902.6
Electrical resistivity [ $\Omega \cdot cm$ ]	$1.43 \times 10^{-5}$

분석해보면 2.3 ms부터 발사체는 코일의 중심을 지나면서 suction 현상으로 인해 역방향으로 힘을 받아 속도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 발사체의 위치에 따라 지속밀도가 변화하며 그에 따라 받는 힘의 크기 또한 달라진다. 코일에 인가되는 전류의 크기도 시간에 따라 계속 변하며 그래프에서 전류는 1.1 ms에서 최고값을 가지고 2.3 ms에서는 전류의 크기가 감소하고 있는 모습을 보인다. 이처럼 상대적으로 발사 방향으로 힘을 받는 크기가 역방향으로 받는 힘의 크기보다 클 때 최적값을 갖는다는 것을 확인할 수 있다. 따라서

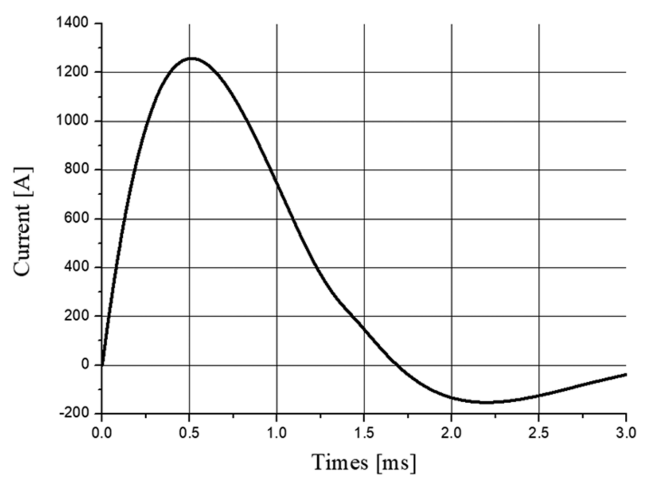


Fig. 7. Current flow in 2nd coil.

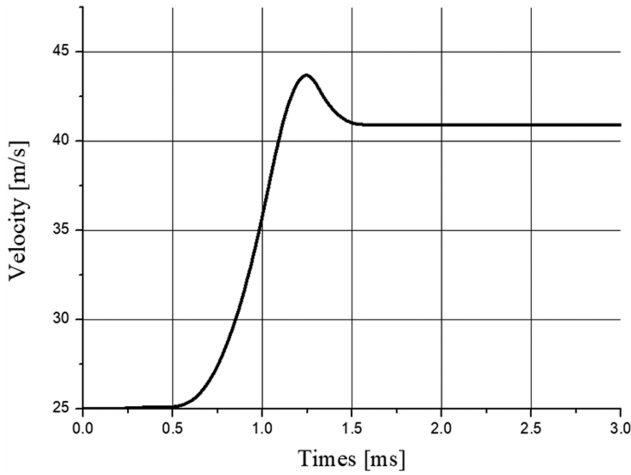


Fig. 8. Projectile velocity of 2nd coil gun.

최적값을 찾기 위해서는 발사체의 운동과 RLC 회로에서 주기를 비교해 가며 발사체의 초기위치를 결정하고, 코일의 저항과 인덕턴스 값을 고려하여 코일의 권선수를 결정해야 할 것이다.

4. 2차 코일 해석 및 결과

발사체가 1단 코일을 지나 초기속도 25 m/s를 가지므로, 그

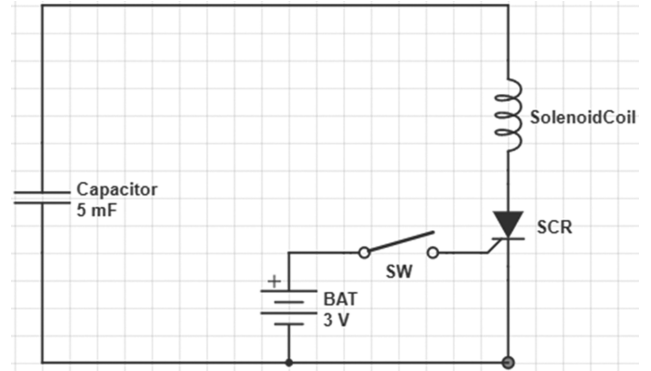


Fig. 9. Discharge circuit using SCR switch.

에 따라 RLC회로의 주기를 짧게 하기위해 캐패시터 용량을 3000  $\mu$ F로 줄이고 코일의 저항과 인덕턴스 값을 줄이기 위해 코일의 권선수를 1차 코일보다 적은 값으로 조정하였다. 발사체의 초기속도를 25 m/s로 설정하고 동일한 Maxwell 모델을 사용하여 해석한 결과 2차 코일의 최적값은 축방향 12번, 반경방향 7번, 발사체와 코일간 거리는 31 mm일 때 최종속도 41 m/s가 최적값으로 계산되었다.

2차 코일의 최적값에서도 발사체는 1.3 ms부터 발사 반대 방향으로 힘을 받으며 전류는 0.5 ms부터 감소하는 것을 확인할 수 있다. 1차 코일에서 가속되어 초기속도가 존재하므

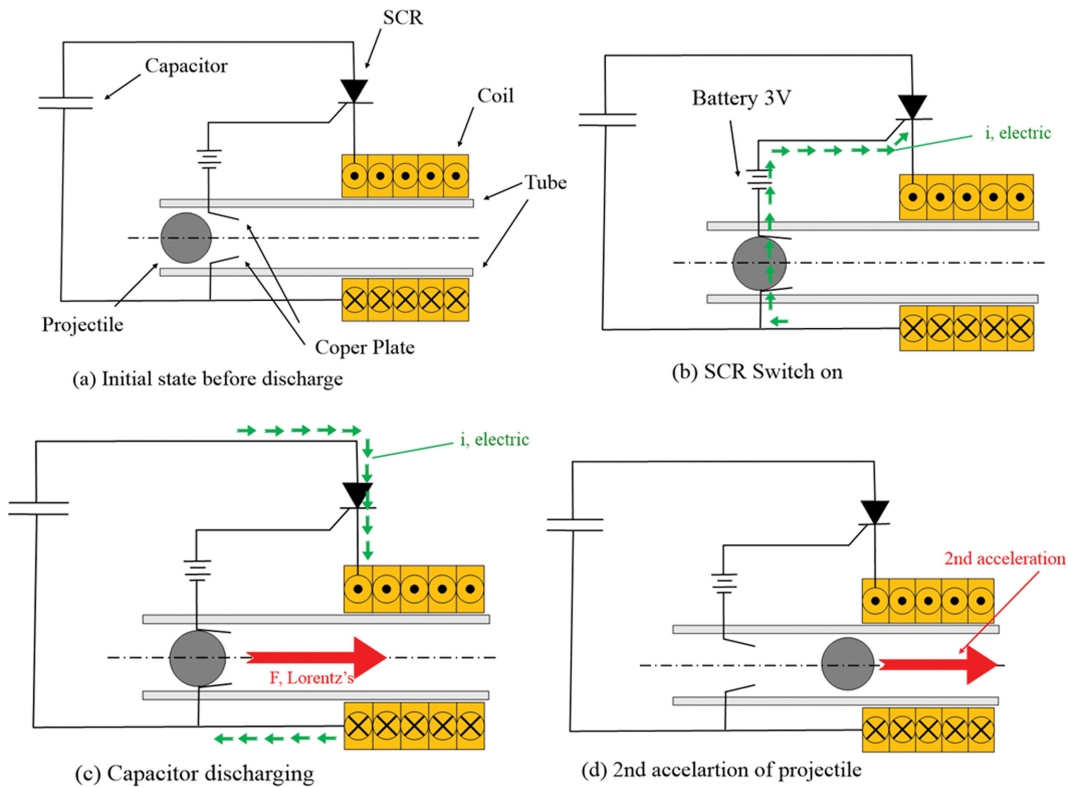


Fig. 10. (Color online) A conceptual diagram of 2nd capacitor discharging.



로 2차 코일에서 자기력을 받는 시간이 1차 코일에서 받는 시간보다 적으며 효과적으로 자기력을 운동에너지로 변환시키려면 솔레노이드 코일에 인가되는 전류의 주기를 짧게하여 설계하는 것이 필요하다. 2차 코일을 설계한 방법을 응용하여 3단 이상의 다단코일건을 설계할 때 솔레노이드 코일과 발사체의 위치를 계산해 다단코일의 방전 시점을 구할 수 있을 것이다.

**5. SCR 스위치 방전시스템에 대한 개념**

Fig. 9은 1차 코일의 방전에 사용된 SCR을 이용한 코일건의 방전 시스템의 회로도이다. 스위치가 닫히면 SCR의 작동 전류가 흐르게 되고 캐패시터에 저장된 전하가 솔레노이드 코일로 방전이 되는 방식이다. 작동에 필요한 스위치는 SCR의 가동에 필요한 전류만 흘려주면 되기 때문에 고전압, 고전류를 사용하는 코일건 시스템에서 안전하게 실험을 진행할 수 있다.

Fig. 10은 Fig. 9의 SCR 방전회로를 응용한 다단코일의 방전 시스템이다. (a)에서 1차 코일에서 힘을 받아 운동하는 발사체가 (b)에서 구리판에 접촉하여 SCR로 작동전류를 흘려주게 된다. (c)에서 SCR이 작동하며 솔레노이드 코일에 전류가 인가되어 (d)처럼 발사체가 2차로 가속이 진행된다.

**6. 시제품 제작 및 결과**

Maxwell 해석의 결과값을 적용하여 시제품을 제작하였다. 1차 코일은 축방향 14번, 반경방향 10번 감아 솔레노이드 코일을 제작하였고 2차 코일은 축방향 12번, 반경방향 7번감아 코일을 제작하였다.

Fig. 11은 제작한 시제품의 전체 모습이며 부스터컨버터 승압모듈을 이용하여 12 V를 350 V까지 승압시켜 캐패시터를

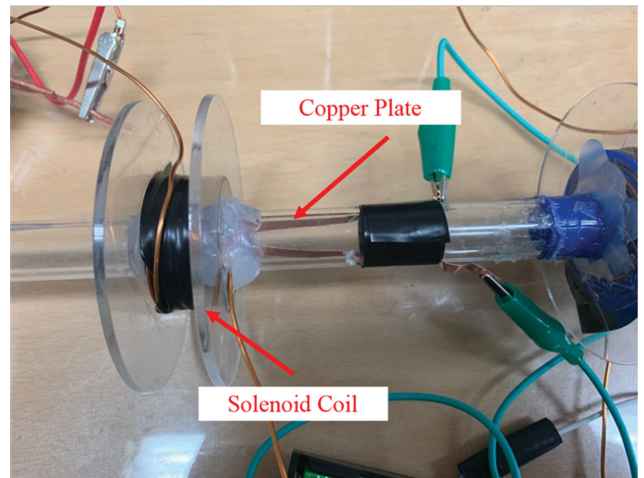


Fig. 12. (Color online) Discharge method of 2nd capacitor.

충전할 수 있는 충전 시스템을 구현하였다. 캐패시터의 충전 후 1차 코일의 방전은 일반적인 스위치를 통해 SCR 작동 전류를 인가시켜 방전이 진행되며 2차 코일의 방전은 발사체가 1차 코일에 의해 운동하는 도중 스위치가 작동하며 2차 코일에 전류를 자동으로 인가시키게 된다. Fig. 12는 Fig. 11의 노란 원 부분을 확대한 2차 코일의 방전회로의 일부이다. 1차 코일에서 힘을 받고 운동하는 발사체가 구리판에 접촉시 SCR 작동전류가 흘러 SCR이 작동되며 2차 코일의 방전회로가 작동된다.

Fig. 13의 속도측정장치를 이용하여 발사체의 속도를 측정하였으며 속도의 단위는 m/s로 설정하여 측정하였다. 1차 코일만 사용하여 가속한 발사체 속도의 평균값은 22 m/s로 측정되었으며, 2차 코일까지 사용하여 가속한 발사체의 속도는 평균값 34 m/s로 측정되었다. 두 실험 모두 10번씩 속도를

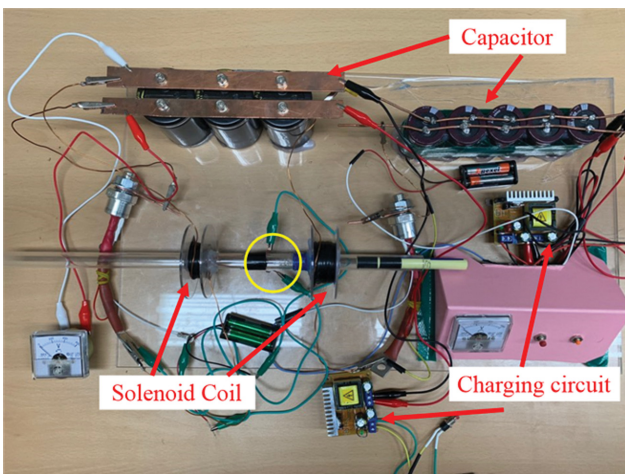


Fig. 11. (Color online) Coilgun with a discharging system.



Fig. 13. (Color online) Speed measuring device.

측정하여 평균값을 내었으며 최종속도는 시뮬레이션 값과 17% 만큼의 오차가 발생하였다. 이러한 오차는 시뮬레이션과 달리 발사체는 통로의 중앙에 위치하지 않아 마찰력을 받고, 시뮬레이션 상에서는 발사관의 내부가 진공상태로 설정되어 있으며 실험환경과 차이점이 있기 때문이다. 또 2차 코일의 설계변수에서 초기속도를 25 m/s로 설정하여 설계한 것에 반해 실제 1차 코일에서 측정된 속도는 22 m/s로 차이가 있으므로 이를 감안하여 2차 코일을 설계해야 할 것이다.

### III. 결 론

본 연구는 전자기 해석 프로그램인 Maxwell을 이용하여 2 단 코일건을 설계하였으며 발사체가 최고속도를 갖기 위한 솔레노이드 코일의 형상과 코일과 발사체간의 거리를 조절하며 해석을 진행 하여 지정한 범위 내에서 최적값을 찾아내었다. 발사체가 받는 자기력은 솔레노이드에 인가되는 전류와 비례하므로 최적값은 발사체가 발사 방향으로 운동할 때 받는 힘을 최대로 하고 역방향으로 받는 힘을 최소로 하는 값의 전류 주기의 형태가 최적값으로 계산되었으며 이에 따라 인덕턴스와 저항값을 고려하여 솔레노이드 코일을 설계하고 발사체의 운동과 코일에 인가되는 전류의 주기를 비교하여 캐패시터 방전시 코일과 발사체의 거리를 조절해야 최적 속도가 계산될 것이다. 프로그램 해석 결과를 토대로 솔레노이드 코일을 제작하였으며 발사체의 물리적인 접촉으로 SCR을 작동시키는 2차 코일 방전회로를 구성하였다. 해석 프로그램으로 계산한 2단 코일건의 최종속도는 41 m/s이었으며, 이를 토대로 제작한 시제품에서는 평균속도 34 m/s가 측정되었다. 시뮬레이션과 달리 실험에서는 17%의 오차가 발생했으며 이는 발사관과 발사체간의 마찰이 존재하고, 시뮬레이션 상에서는 진공상태에서 해석하였으므로 이러한 오차가 발생하며 1차 코일에 의한 가속또한 실험에서 오차가 발생하지만 2차 코일을 설계할 때 이러한 오차를 고려하지 않았다. 이를 고려하여 2차 코일에서의 초기속도를 정하고 2차 코일을 설계하여야 한다. 본 연구에서 적용한 방전회로는 이전의 센서를 이

용한 방전 제어방식보다 회로구성이 간단하고, 오작동률이 적으며 저렴한 비용으로 제작이 가능하다. 물리적인 스위치 접촉방식보다 스위치 작동에 필요한 토크값이 적어 속도손실이 적다는 것이 장점이다. 실험에서 사용한 SCR 스위치는 저전력으로 작동하기 때문에 고전압, 고전류를 이용하는 코일건 시스템의 안정적인 작동이 가능하다. 본 논문에서는 캐패시터 용량, 충전전압, 코일제작에 사용된 와이어의 직경을 고정하였지만 위의 변수들에 의해서도 발사체의 속도가 결정된다. 직경이 큰 와이어를 사용하면 솔레노이드 코일의 저항값과 인덕턴스를 줄일수 있어 주기를 짧게 설계할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 직경이 큰 와이어는 코일제작이 힘들어 솔레노이드 제작비용이 증가하게 된다. 따라서 코일 설계시 이를 고려하여 설계해야 할 것이다. 본 연구에서 사용된 2차 코일의 최적설계 방법과 SCR 스위치 방전회로를 3단 이상의 다단코일건을 설계할 때에도 적용할 수 있을 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2017R1D1A3B0303213).

### References

- [1] S. Kim and J. Kim, Adv. Mech. Eng. **11**, 9 (2019).
- [2] S. J. Joo, J. M. Han, J. U. Jo, M. S. Lee, D. S. Park, J. U. Park, J. H. Byun, D. S. Kim, and G. S. Park, Trans. Korean Inst. Electr. Eng. 402 (2006).
- [3] S. J. Lee and J. H. Kim, J. Korea. Acad Ind. Coop Soc. **15**, 3455 (2014).
- [4] J. H. Jang, J. H. Kim, and S. J. Lee, J. Korean Magn. Soc. **25**, 87 (2015).
- [5] C. H. Park and J. H. Kim, J. Korean Soc. Manuf. Process Eng. **17**, 118 (2018).
- [6] C. H. Park and J. H. Kim, J. Korean Soc. Manuf. Process Eng. **17**, 131 (2018).