

레일건 가속특성 분석

이영현^{*,1)} · 김성호¹⁾ · 이병하¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 지상기술연구원

Analysis of Acceleration Characteristics of a Railgun

Young-Hyun Lee^{*,1)} · Seong-Ho Kim¹⁾ · Byung-Ha Lee¹⁾

¹⁾ Ground Technology Research Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 29 March 2021 / Revised 27 May 2021 / Accepted 16 July 2021)

Abstract

To accelerate a launch mass with a low level of pressure as possible in a railgun, it is required to hold supplied current nearly constant during launch phase. We obtained the discharging conditions for required current shaping by modeling and analysis of circuit equations coupled to acceleration equation of the launch mass. The acceleration characteristics of the railgun in the conditions were analyzed by comparing experimental and theoretical results.

Key Words : Railgun(레일건), Electromagnetic Force(전자기력), Current Shaping(전류성형)

1. 서론

레일건은, 화학에너지를 사용하는 재래식 화포와는 달리, 전기에너지만으로 발사체를 가속시킬 수 있으며 2000 m/s 이상의 초고속 추진이 가능하다.

Fig. 1과 같이 전기전도도가 높은 두 개의 레일과 그 사이에 발사체를 놓고 전류(I)를 흘리면 발사체 후방으로 자기장(B)이 만들어진다. 이 자기장과 발사체에 흐르는 전류가 상호작용을 일으켜 전류의 공급에 비례하는 추진력(로렌츠 힘)이 형성되면서 발사체는 가속되어 나간다. 레일건에 흐르는 전류의 크기가 클

수록 추진력이 증가하지만 레일에 작용하는 척력 또한 증가하므로 레일을 지지해주는 구조물의 설계에 주의가 필요하다^{1,2)}.

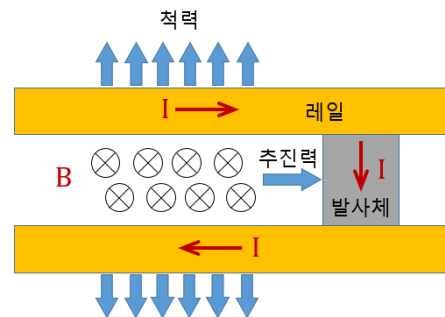


Fig. 1. Principle of railgun

* Corresponding author, E-mail: younghyun@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

발사체의 추진속도는 전원장치로부터 공급되는 전류파형 의하여 결정된다. Fig. 2에서와 같이 발사체가 포구를 이탈하는 시간(Exit Time)까지 만들어지는 추진력 곡선 아래의 면적은 발사체의 포구속도(Exit Velocity or Muzzle Velocity)를 의미한다. 포구속도가 동일한 두 개의 추진력 곡선 A 및 B에 대하여 두 곡선 아래의 면적은 동일하다. 그러나 곡선 A와 같이 순간적으로 높은 추진력이 작용하게 되면 레일에 작용하는 척력 또한 증가하게 되므로 견고한 지지력을 형성하기 위해서는 레일을 지지하는 구조물이 매우 커져야한다.

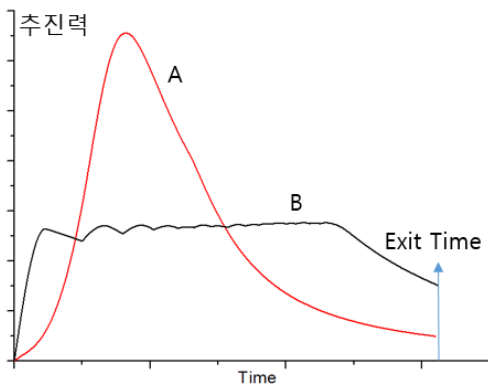


Fig. 2. Comparisons of acceleration forces

이와 같은 경우가 발생하지 않도록 하기 위해서는 곡선 B와 같이 추진력의 최고값이 거의 일정하게 유지되는 사다리꼴에 가까운 모양으로 만들어주는 것이 중요하다.

추진력 곡선이 B와 같이 사다리꼴에 가까울 경우 발사체의 가속도가 A에 비하여 매우 낮아 발사체에 대한 응력설계 측면에서도 유리한 장점을 갖는다. 재래식 화포의 경우 화학적 추진제의 연소특성으로 인하여 A와 같이 특정시간에서의 추진력이 매우 높아질 수밖에 없지만, 레일건에서는 전류파형을 제어할 수 있기 때문에 B와 같은 평탄한 모양의 추진력을 만들 수 있다.

레일건용 전원장치는 R, L, C로 구성되는 단위모듈 수십~수백 개가 병렬로 연결된 구조를 가지며, 이 모듈들의 충전전압 및 방전시간 등을 변화시킴으로써 전류파형을 원하는 형태로 제어할 수 있다.

전원장치 및 레일건의 제원이 알려져 있다면 규정된 포구속도를 달성할 수 있는 최소 크기의 전류파형

을 구할 수 있다. 레일에 흐르는 전류는 전기회로상수들 뿐 아니라 시시각각으로 변하는 발사체의 가속위치 및 속도에도 영향을 받는다^[3]. 따라서 규정된 포구속도를 달성할 수 있는 최적의 전류파형을 얻기 위해서는 전원장치와 연결된 레일건의 가속특성에 대한 정확한 이해가 요구된다.

이를 위하여 본 논문에서는 전원장치 및 레일건의 전기회로 방정식 및 발사체의 가속운동 방정식으로 구성되는 연립 미분방정식을 유도하였다. 이들을 해석하여 규정된 포구속도 달성에 필요한 최적의 전류파형, 시간 변화에 따른 발사체의 가속위치 및 속도, 에너지 분포 등을 계산하고 계측결과와 비교분석함으로써 레일건의 가속특성을 확인하고자 하였다.

2. 전기회로방정식 및 발사체 가속운동방정식 유도

2.1 전기회로방정식의 유도

전원장치는 전기에너지 요구조건에 따라 수십~수백 개의 단위모듈로 구성된다. 각 모듈은 Fig. 3에서와 같이 커패시터, 스위치, 크로바 다이오드, 인덕터 및 저항 등으로 이루어지진다. 레일건은 전원케이블을 통하여 전원장치에 연결된다.

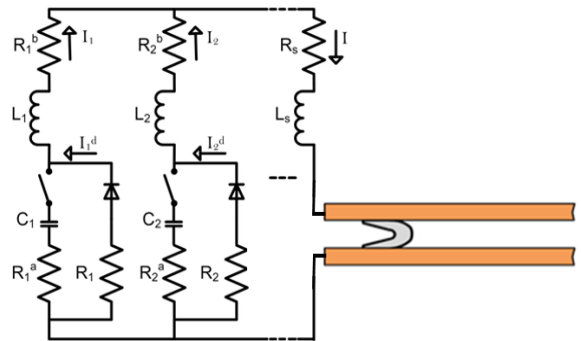


Fig. 3. Electrical circuit of railgun system

커패시터에 저장된 전기에너지의 방전이 시작되면 회로 내에 전류가 흐르며 인덕터를 거쳐 부하에 전달된다. 방전시간이 경과하여 커패시터 전압이 음의 값으로 바뀌는 순간부터 다이오드 방향으로도 전류가 흘러들어가게 된다. 그 후 커패시터 전압의 시간변화율이 영이 되는 순간부터 커패시터는 방전을 멈추며 전류는 더 이상 커패시터 방향으로 흐르지 못하고 다

이오드 방향으로만 흐르게 된다. 각 모듈은 시간차 방전 또는 동시방전이 가능하며 방전시간 및 충전전압 제어를 통하여 레일건에 전달되는 전류과형을 조절할 수 있게 된다.

레일 저항 및 레일 인덕턴스는 발사체의 이동거리에 비례하여 증가하는 것으로 가정할 수 있다^[4]. Table 1에서와 같은 기호를 사용하면, 발사체가 초기위치로부터 x 만큼 이동했을 때의 레일전압 및 발사체에 작용하는 전압은 각각 다음과 같다.

Table 1. Nomenclature in circuit equations

기호	설명
V_i	i 번째 모듈의 커패시터 양단 전압
I_i	i 번째 모듈의 전류
I_i^d	i 번째 모듈의 다이오드 전류
R_i^a	i 번째 모듈의 커패시터 내부 저항
R_i^b	i 번째 모듈의 인덕터 및 케이블 저항
R_i	i 번째 모듈의 다이오드스택 저항
C_i	i 번째 모듈의 커패시턴스
L_i	i 번째 모듈의 메인 인덕턴스
R_s	부하(레일건)까지의 연결 저항
L_s	부하(레일건)까지의 연결 인덕턴스
R_r'	단위길이당의 레일(2개 레일) 저항
L_r'	단위길이당의 레일(2개 레일) 인덕턴스
R_{arm}	발사체 저항
L_{arm}	발사체 인덕턴스
x_0	발사체 초기위치
x	발사체 이동위치
\dot{x}	발사체 이동속도
\ddot{x}	발사체 이동가속도
I	레일에 흐르는 전체전류
V_{rail}	레일에 작용하는 전압
V_{arm}	발사체에 작용하는 전압
V_{i0}	커패시터 초기충전전압

$$V_{rail} = R_r'(x_0 + x)I + \frac{d(L_r'(x_0 + x)I)}{dt} \tag{1}$$

$$= R_r'(x_0 + x)I + L_r'\dot{x}I + L_r'(x_0 + x)\frac{dI}{dt}$$

$$V_{arm} = R_{arm}I + L_{arm}\frac{dI}{dt} \tag{2}$$

Fig. 3과 같은 전원장치 및 레일건으로 이루어지는 전기회로에 대하여 전압평형을 고려하면 다음과 같은 관계식을 유도할 수 있다.

$$-V_i + R_i^a(I_i - I_i^d) + L_i\frac{dI_i}{dt} + R_i^bI_i + L_s\frac{dI}{dt} + R_sI + V_{rail} + V_{arm} = 0 \tag{3}$$

$$V_i - R_i^a(I_i - I_i^d) + R_iI_i^d = 0 \tag{4}$$

$$V_i = -\frac{1}{C_i} \int (I_i - I_i^d) dt \tag{5}$$

(5)를 미분하여 정리하면, 커패시터에 흐르는 전류는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_i - I_i^d = -C_i\frac{dV_i}{dt} \tag{6}$$

(4) 및 (6)으로부터, 다이오드스택에 흐르는 전류는 다음과 같이 주어진다.

$$I_i^d = -\frac{V_i}{R_i} - \frac{R_i^a}{R_i}C_i\frac{dV_i}{dt} \tag{7}$$

(6) 및 (7)로부터, i 번째 모듈의 전류는 다음과 같다.

$$I_i = -\frac{V_i}{R_i} - \left(\frac{R_i^a}{R_i} + 1\right)C_i\frac{dV_i}{dt} \tag{8}$$

레일에 흐르는 전체전류는 각 모듈 전류의 합으로서 다음과 같다.

$$I = \sum_{i=1}^n I_i \tag{9}$$

각 모듈의 커패시터 양단전압을 해석해야할 변수로 정하고, (1)~(9)를 이용하여 전압방정식을 정리하면 다음과 같은 행렬식을 유도할 수 있다.

$$[M]\{\ddot{V}\}+[D]\{\dot{V}\}+[K]\{V\}=0 \quad (10)$$

(10)에서 M, D, K 행렬의 성분들은 다음과 같이 시간에 따라 변화하는 발사체의 위치 및 속도에 종속되어 있음을 알 수 있다. 따라서 발사체의 가속운동방정식에 대한 해석을 통하여 위치 및 속도에 대한 정보를 획득해야할 필요가 있다.

$$M_{ij} = (L_i + L_s + L_r'(x_0 + x) + L_{arm}) \left(\frac{R_i^a}{R_i} + 1 \right) C_i \quad : i = j$$

$$= (L_s + L_r'(x_0 + x) + L_{arm}) \left(\frac{R_j^a}{R_j} + 1 \right) C_j \quad : i \neq j$$

$$D_{ij} = \frac{L_i + L_s + L_r'(x_0 + x) + L_{arm}}{R_i} + (R_i^a + (R_i^b + R_s + R_r'(x_0 + x) + L_r'\dot{x} + R_{arm}) \left(\frac{R_i^a}{R_i} + 1 \right)) C_i \quad : i = j$$

$$= \frac{L_s + L_r'(x_0 + x) + L_{arm}}{R_j} + (R_s + R_r'(x_0 + x) + L_r'\dot{x} + R_{arm}) \left(\frac{R_j^a}{R_j} + 1 \right) C_j \quad : i \neq j$$

$$K_{ij} = 1 + \frac{R_j^b + R_s + R_r'(x_0 + x) + L_r'\dot{x} + R_{arm}}{R_j} \quad : i = j$$

$$= \frac{R_s + R_r'(x_0 + x) + L_r'\dot{x} + R_{arm}}{R_i} \quad : i \neq j$$

i 번째 모듈이 방전을 시작하는 시간을 t_i 라고 하면, $t = t_i$ 시간에서 커패시터 전압 및 전압변화율에 대한 초기조건은 다음과 같다.

$$V_i = V_{i0}$$

$$\frac{dV_i}{dt} = 0$$

2.2 발사체의 운동방정식 유도

레일건 내부를 이동하는 발사체에는 Fig. 4에서와 같이 가속력, 수직항력 및 마찰력이 작용한다. 레일과 발사체의 접촉면에서 높은 전류가 전달될 수 있도록 강한 접촉을 유도하기 위하여 발사체에 초기압축력을 추가하게 된다. 또한 발사체 표면을 따라 흐르는 전류에 의하여 발사체를 레일에 밀착시키는 유도전자기력이 발생한다. 이와 같이 발사체의 초기압축력 및 유도전자기력은 발사체에 대한 수직항력의 형태로 나타난다.

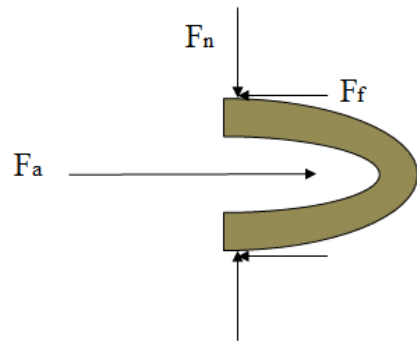


Fig. 4. Forces acting on launch mass

Table 2에서와 같은 기호를 사용하면 발사체의 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다^[5].

$$m\ddot{x} = F_a - 2\mu F_n = \frac{1}{2} L_r' I^2 - 2\mu \left(\alpha \frac{1}{2} L_r' I^2 + F_p \right) \quad (11)$$

또한 발사체 운동에 대한 초기조건은 $t = 0$ 시간에서 다음과 같다.

$$x = 0$$

$$\dot{x} = 0$$

회로방정식 (10) 및 운동방정식 (11)에서 알 수 있는 바와 같이 레일에 흐르는 전체전류, 발사체 위치 및 속도에 의하여 서로 종속되어 있는 연립 미분방정식임을 알 수 있다. 이와 같은 미분방정식의 수치해석을 통하여 규정된 포구속도를 달성할 수 있는 적절한 전류파형을 구할 수 있게 된다.

Table 2. Nomenclature in motion equation

기호	설명
m	발사체의 질량
μ	발사체와 레일의 마찰계수
F_a	추진력 또는 가속력
$F_f = \mu F_n$	발사체와 레일 사이의 마찰력
F_n	발사체에 작용하는 수직항력
F_p	초기압축력
α	보정계수
$\alpha \frac{1}{2} L_r' I^2$	가속력에 수직한 유도전자기력

3. 해석 및 실험결과 비교

3.1 실험 개요

회로방정식 및 운동방정식에 대한 모델링 및 해석 결과의 타당성 확인을 위하여 발사실험을 수행하였다. 레일건에서 나타나는 전기적 특성을 확인하기 위하여 Fig. 5에서와 같이 레일건의 포미전압 및 레일에 흐르는 전류를 측정하였다. 포미전압은 상용 전압 프로브를 사용하였으며 전류측정을 위하여 로고스키 코일 프로브를 적용하였다.

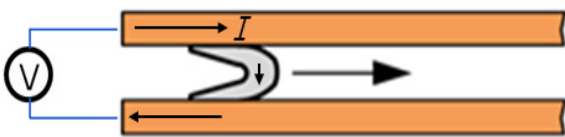


Fig. 5. Breech voltage and current

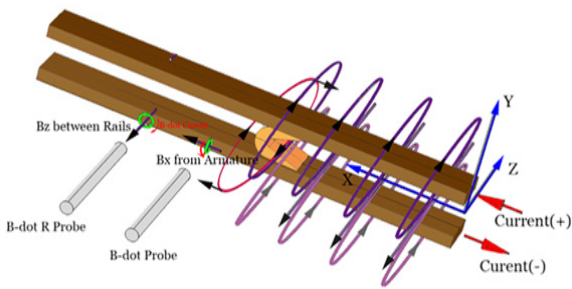


Fig. 6. Installation of B-dot probes

시간에 따른 발사체의 이동위치 및 속도를 측정하기 위하여 Fig. 6에서와 같이 수십 개의 B-dot 프로브를 레일건의 길이 방향으로 배치하여 사용하였다. 발사체가 각 프로브의 설치 위치에 다다른 순간 그 프로브에 나타나는 자기장이 최대가 되는 원리를 이용한다.

발사실험에 사용된 전원장치는 최대 12.8 MJ의 전기에너지를 충전할 수 있다. 이중 8 MJ은 8 개의 세그먼트로 이루어져 있고, 각 세그먼트는 10 개의 단위 모듈로 구성되며 각 모듈에는 60 μH 의 인덕터가 조립되어 있다. 나머지 4.8 MJ 또한 8 개의 세그먼트로 이루어지지만, 각 세그먼트는 6 개의 단위모듈로 구성되며 각 모듈에는 30 μH 의 인덕터가 부착되어 있다.

이 전원장치를 레일건과 연결하고 300 그램의 발사체를 가속시켜 약 2000 m/s 이상의 포구속도를 얻기 위한 발사실험을 수행하였다. 먼저 전기회로방정식 및 가속운동방정식을 해석하여 가능한 평탄한 형상의 전류파형을 제공할 수 있는 충전 조건을 구하였다.

Fig. 7은 12.8 MJ의 전원장치를 구성하는 128 개 전체 모듈을 4.9 kV로 충전한 후 Table 3과 같은 시간 순서로 방전했을 때 나타나는 전류, 전압, 발사체 위치 및 속도를 측정하여 해석결과와 비교한 것이다. 이때의 모듈별 방전순서는 Table 3과 같다. 해석결과는 발사체가 레일건을 이탈하는 순간까지를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 여러 가지 물리량들에 대한 계측 및 해석결과가 잘 일치함을 알 수 있는데, 이것은 전기회로방정식 및 발사체 가속운동방정식 모델의 타당성을 증명할 뿐 아니라 해석에 사용된 많은 상수값들이 물리적인 토대에서 비교적 정확하게 결정되었음을 보여주는 대표적인 사례라고 할 수 있다.

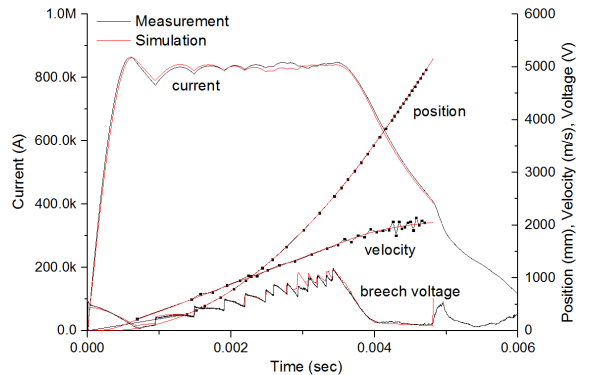


Fig. 7. Comparisons of measured and predicted data

Table 3. Discharging time

구분	세그먼트번호 (모듈번호)	방전시간(ms)
8 MJ	1~4 (1~40)	0
	5 (41~50)	0.94
	6 (51~60)	1.48
	7 (61~70)	1.90
	8 (71~80)	2.19
4.8 MJ	1 (1~6)	2.48
	2 (7~12)	2.59
	3 (13~18)	2.78
	4 (19~24)	2.93
	5 (25~30)	3.07
	6 (31~36)	3.20
	7 (37~42)	3.32
	8 (43~48)	3.41

먼저 8 MJ 부분의 4 개 세그먼트를 동시 방전하여 약 850 kA까지 상승시키고 이 값을 유지시키기 위하여 그 다음 4 개 세그먼트를 각각 0.94, 1.48, 1.90, 2.19 ms 마다 순차적으로 방전한 후, 4.8 MJ 부분의 세그먼트 8 개를 각각 2.48, 2.59, 2.78, 2.93, 3.07, 3.20, 3.32, 3.41 ms 마다 순차적으로 방전하는 방법으로 전류파형을 형성하였다.

3.2 해석 및 실험결과 분석

Fig. 7에서와 같이 전류는 0.6 ms에서 약 850 kA에 도달한 후 정해진 시간간격에 따라 순차방전에 의하여 3.5 ms까지 평탄한 파형을 유지하고 그 시간 이후 감소해 나가며, 발사체가 레일건을 이탈하는 4.8 ms 이후 대기 중으로 아크방전이 발생하면서 급격하게 감소한다.

전류가 최대 상승하는 0.6 ms까지의 방전초기 구간에서 발사체는 마찰력의 영향이 크기 때문에 이동 거리가 매우 작다. 그러나 0.6 ms부터 3.5 ms까지의 구간에서는 높은 전류의 영향으로 이동거리가 빠르게 증가하며, 이후에는 감소하는 전류의 영향으로 증가율이 둔화됨을 볼 수 있다.

각 세그먼트의 방전시간 차이로 인하여 약 3.5 ms 까지 전류곡선이 과도모양을 나타내는데, 과도 차이가 크지 않기 때문에 (11)에서와 같이 전류의 제곱을 적분한 형태로 나타나는 속도는 Fig. 7에서와 같이 큰 변화없이 거의 선형적으로 증가하는 모양을 보이게 된다. 발사체의 속도는 전류가 유지되는 3.5 ms까지 계속적으로 증가하지만 그 이후 전류 감소와 더불어 증가율이 약화됨을 알 수 있다.

위치 및 속도 곡선에서 나타나는 점들은 발사체의 이동방향에 따라 레일건의 특정위치에 설치된 수십 개의 B-dot 프로브를 사용하여 측정한 값을 나타낸다. 이 프로브들이 설치된 위치에 발사체가 도착하는 시간을 측정하고 이것을 미분하여 평균속도를 구한 것이다. 발사체가 정지상태로부터 가속되기 시작하면 레일건에 진동이 발생한다. 발사체가 2650 mm 위치에 도달하는 3.5 ms 시간 이후부터 그 영향이 두드러지며 이에 따라 레일건에 설치된 프로브들이 좌우로 진동하면서 위치오차를 발생시킨다. 이로 인하여 시간미분으로 구해지는 속도오차가 증가하기 때문에 Fig. 7에서와 같이 진동하는 속도곡선이 나타나게 된다. 포구 가까운 곳에는 다른 곳에 비하여 프로브들이 더 촘촘하게 설치되어 있기 때문에 사격진동의 영향이 더 커서 미분오차(속도오차)가 증가함을 볼 수 있다.

레일건에 설치된 B-dot 프로브의 마지막 위치는 4950 mm 지점이며 이 위치에서의 속도는 2035 m/s이지만 발사체는 이보다 205 mm를 더 이동한 5155 mm 지점에서 레일건을 떠난다. 따라서 B-dot 프로브로는 마지막 205 mm 구간에서의 속도를 알 수 없기 때문에 측정한 속도 곡선과 일치하는 해석곡선을 이용하면 발사체가 포구를 이탈할 때의 속도는 2050 m/s가 됨을 알 수 있다.

Fig. 7에서와 같은 포미전압은 포미(breech)로부터 발사체 위치까지의 레일에 작용하는 전압과 발사체 양단에 작용하는 전압을 더한 값이다. 즉, 2.1 절의 (1)과 (2)를 더한 값으로 표시된다.

발사체에 작용하는 전압은 매우 작기 때문에 무시하면 이때 포미전압은 Fig. 8과 같은 세가지 성분으로 나누어 표시할 수 있다.

방전초기의 전류가 상승하는 구간에서는 발사체의 이동량 및 속도가 낮은 반면, 전류변화율이 높기 때문에 $L_r'(x_0+x) dI/dt$ 의 영향이 지배적이다.

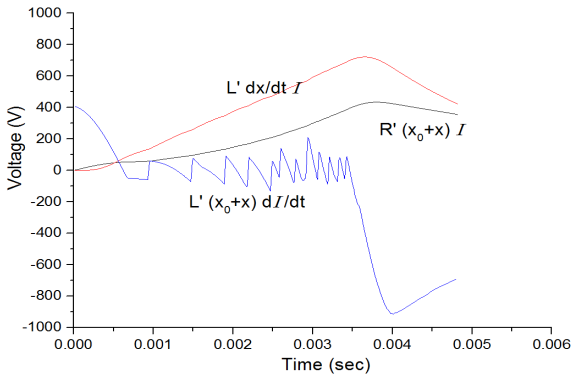


Fig. 8. Components of breech voltage

전류가 일정한 수준을 유지하는 구간에서는 발사체의 이동량 및 속도가 빠르게 상승하기 때문에 $L_r \dot{x} I$ 및 $R'(x_0+x)I$ 의 영향이 커지므로 포미전압이 증가한다.

전류가 하강하는 구간에서는 전류변화율의 급격한 감소로 인한 $L_r'(x_0+x)dI/dt$ 의 영향을 크게 받아 포미전압 또한 급격하게 감소함을 알 수 있다.

전원장치에 충전되어 있던 총에너지는 방전과 동시에 커패시터, 인덕터, 저항 등의 회로 성분들로 분산되면서 저장되거나 손실되어 나간다.

Fig. 9에서와 같이 발사체가 가속되는 특정시간에서 총에너지 E_t 는 전원장치로부터 레일건 연결부까지 저장되거나 손실된 에너지 E_1 및 레일건 연결부로부터 발사체가 위치한 레일의 특정위치까지 저장되거나 손실된 에너지 E_2 로 나눌 수 있다.

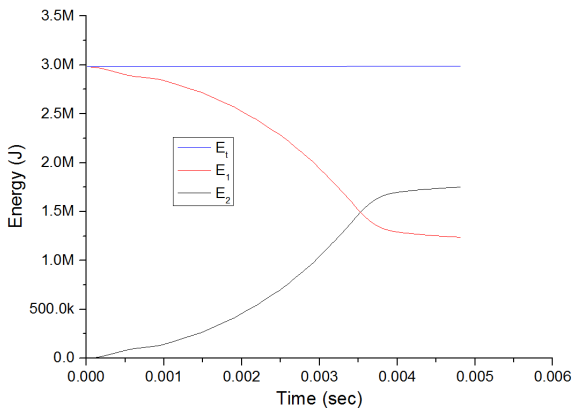


Fig. 9. Energy changes of E_1 and E_2 during acceleration phase

E_2 는 레일건 내부의 레일을 통하여 투입되는 에너지라고 할 수 있다. E_2 는 총에너지 E_t 에서 차지하는 비중이 크지만 이중 일부분만이 발사체의 운동에너지로 전환되게 된다.

(1) 및 (2)를 이용하면 레일에 투입되는 에너지 E_2 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E_2 = \int_0^t (V_{rail} + V_{arm}) I dt \approx \int_0^t V_{rail} I dt \quad (12)$$

(12)에서 레일과 발사체의 전기적 접촉상태가 양호할 경우 V_{arm} 은 V_{rail} 에 비하여 매우 작기 때문에 무시하였다. 따라서 (12)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E_2 = \int_0^t R_r'(x_0+x) I^2 dt + \int_0^t \frac{d(L_r'(x_0+x)I)}{dt} I dt \quad (13)$$

$$= E_r + E_u$$

(13)에서 E_r 은 레일 저항열에 의하여 손실되는 에너지를 나타내고, E_u 는 레일건 내부에서의 자기장에 의하여 유도되는 에너지를 나타내며 다음과 같이 전개 가능하다.

$$E_u = \frac{1}{2} L_r'(x_0+x) I^2 + \int_0^t \frac{1}{2} L_r' \dot{x} I^2 dt \quad (14)$$

$$= E_{u1} + E_{u2}$$

(14)에서 자기장 에너지 E_u 는 발사체의 위치와 관련된 에너지(E_{u1}) 및 속도와 관련된 에너지(E_{u2})의 합이라는 것을 알 수 있다. 여기서 E_{u2} 는 (11)을 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E_{u2} = \frac{1}{2} \int_0^t L_r' \dot{x} I^2 dt = \int_0^t (m \frac{d\dot{x}}{dt} + 2\mu F_n) \dot{x} dt \quad (15)$$

$$= \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \int_0^t 2\mu F_n \dot{x} dt = E_{kin} + E_{fri}$$

(15)에서 발사체의 속도에 의하여 유도된 자기장 에너지 E_{u2} 는, 운동에너지(E_{kin}) 및 마찰에너지(E_{fri})와 같은 기계적 에너지로 변환된다는 것을 알 수 있다.

Table 4는 (12)~(15)를 사용하여 발사체가 레일건을 이탈할 때(T_{exit}) 계산된 에너지 값들을 정리한 것이다.

총에너지(E_t) 2990 kJ 중에서 1240 kJ은 전원장치로

부터 레일건 연결부까지 저장되거나 손실된 에너지(E_1)이며 나머지 1750 kJ이 레일에 투입된 에너지(E_2)이다.

E_2 중에서 776.5 kJ은 레일 저항열에 의하여 손실된 에너지(E_r)를 나타내고 나머지 973.5 kJ은 자기장에너지(E_u)가 된다.

E_u 중에서 230.5 kJ은 발사체의 위치와 관련된 자기장에너지(E_{u1})이며 나머지 743 kJ은 발사체의 속도와 관련된 자기장에너지(E_{u2})이다.

최종적으로 E_{u2} 가 기계적 에너지로 변환되는데 그 중 630 kJ 만이 운동에너지(E_{kin})가 되고 나머지 113 kJ은 마찰에너지(E_{fri})로 손실된다. Table 4의 경우 총에너지 2990 kJ 대비 21 %인 630 kJ이 운동에너지로 이용되었음을 알 수 있다.

방전이 시작된 시점부터 발사체가 가속되어 포구를 이탈한 후 전류가 0이 될 때까지 투입된 총에너지(E_t) 중에서 운동에너지(E_{kin})를 제외한 모든 에너지는 전원 장치 내부 저항, 레일 저항, 아크 저항 등에 의한 저항열 및 발사체와 레일의 마찰열 등의 형태로 손실된다.

Table 4. Energy distribution at time = T_{exit}

에너지 구성				에너지 값(kJ)	
E_t	E_1			1240	
	E_2	E_r			776.5
		E_u	E_{u1}		230.5
			E_{u2}	E_{kin}	630
				E_{fri}	113

4. 결론

레일건을 사용하여 가능한 낮은 수준의 내부압력을 유지하면서 발사체를 가속시키기 위해서는 거의 일정한 전류를 투입하는 것이 필요하다. 이를 위하여 발

사체의 가속운동과 연계된 회로방정식의 모델링 및 해석을 수행하고 원하는 전류파형 형성에 요구되는 방전조건을 얻었다. 발사실험으로부터 여러 가지 물리현상들을 계측한 후 해석결과와의 비교를 통하여 레일건 내부에서 가속되는 발사체의 가속특성을 분석하였다.

동일한 총에너지를 투입하면서 전류를 더 상승시키는 방향으로 방전한다면 발사체는 더 빠른 시간에 포구를 이탈하게 되고 포구속도가 증가한다. 이 경우 에너지 효율이 상승하게 되지만 전류 상승에 따른 압력 증가로 인하여 레일건의 내구성에 좋지 않은 영향을 미치므로 레일건의 설계압력을 고려하여 주의 깊게 운용하여야 한다.

References

- [1] Jerome Tzeng, Alexander Zielinski, Edward Schmidt, "Design Considerations for Electromagnetic Railguns," Trans. of the ASME, Vol. 128, pp. 263-266, May, 2006.
- [2] Jerome T. Tzeng and Edward M. Schmidt, "Comparison of Electromagnetic and Conventional Launchers Based on Mauser 30-mm MK 30-2 Barrels," IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. 39, No. 1, pp. 263-266, Jan, 2011.
- [3] D. Putley, R. C. McLachlan, T. A. Mace and J. W. Gray, "Railgun Sytem Simulation Using the Connie Circuit Analysis Code," IEEE 7th Pulsed Power Conference, pp. 610-613, 1989.
- [4] Jerry F. Kerrisk, "Electrical and Thermal Modeling of Railguns," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 20, No. 2, pp. 399-402, March, 1984.
- [5] Young-Hyun Lee, Seong-Ho Kim, Byung-Ha Lee, et al., "Experimental Tests of a 25mm Square-bore Railgun," IEEE 16th Internaional Symposium on Electromagnetic Launch Technology, 2012.