

## 유도형 코일건의 에너지 및 속도특성 해석

장성만 · 김석환 · 한송엽

서울대학교 전기공학과

정현교

강원대학교 전기공학과

(1991년 12월 12일 받음)

본 논문에서는 커패시터로 구동되는 공진 유도형 코일건의 속도 및 에너지 전달 특성을 해석했다. 유도형 코일건은 설치가 자유롭고, 기계적 마모가 적고, 반복사용이 가능하며, 전달되는 힘이 피투사체의 표면에 고르게 분포한다는 장점을 가지고 있다. 특성해석을 위해 등가회로를 구성하여 회로방정식과 운동방정식을 유도하고, 이 방정식들을 Runge-Kutta 방법을 사용하여 수치적으로 풀었다. 그리고 구동회로의 공진주파수 및 커패시터의 충전전압에 대한 에너지 전달율을 구했으며, 또한 피투사체의 초기위치와 도전율, 구동회로의 점호각, 충전전압 및 구동코일의 저항 각각에 대한 피투사체의 포구속도의 변화를 구하였다.

### I. 서 론

지금까지 우주선이나 미사일과 같은 대형 및 여러가지 소형의 피투사체(projectile)들은 주로 화학적 폭발에 의해 가속, 발사되어 왔다. 그런데 이 방법은 발사장치의 설치 방향과 위치가 제한되어 있고, 경우에 따라서는 한번 발사한 후에는 발사장치를 버려야 하는 문제점을 가지고 있다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 제안된 것이 전자력을 이용하는 발사장치이다[1].

현재 연구가 진행되고 있는 전자력을 이용하는 발사장치는 크게 두 가지로 분류할 수 있는데, 그것은 레일건과 유도형 전자가속장치인 코일건이다. 두 가지 가속발속장치 중에서 레일건에 많은 연구가 집중되어 있긴 하지만, 코일건에 대한 연구도 몇몇 대학과 연구소 등에 의해 활발히 진행되고 있다[2~7].

코일건은 여러가지 방법으로 분류될 수 있는데 구동코일에 전원을 공급하는 방법에 의해 분류하면, 동기발전기에 의한 방법과 커패시터에 의한 방법 및 기타의 방법으로 크게 분류할 수 있다. 동기발전기에 의한 구동의 경우

이동장치의 주파수는 동기발전기의 회전수에 의해 결정된다. 커패시터에 의한 구동 방법의 경우, 각 상의 구동 코일이 커패시터에 연결되어있고, 이것을 순차적으로 점호시켜 LC 공진회로에 의한 이동장치를 만들어준다. 연속적으로 가속시켜 주기 위해 가속장치를 다단계(multi section)로 구성하고 점차적으로 빨라지는 이동장치를 만들어 주는 방법도 있다. 이 경우 단과 단의 통과시 다음 단의 구동코일에 전류를 흘려주는 방법에 따라, 센서에 의해 피투사체의 위치를 검출한 후 점호하는 방법과 미리 속도를 계산하여 피투사체가 다음 단에 진입하였을 때의 시간을 예측하여 점호하는 방법으로 나눌 수 있다.

코일건은 설치 방향과 위치가 자유롭고, 피투사체에 축중심방향의 힘이 작용하여 접촉 부분이 거의 없으므로 기계적 마모가 적고, 피투사체 및 발사장치의 마모가 극히 적어 반복사용이 가능하며, 전달되는 힘이 피투사체의 표면에 고르게 분포한다는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 커패시터로 구동되는 1단 공진 유도형 코일건의 속도 특성과 에너지 전달 특성을 해석하였다.

## II. 구조 및 동작원리

유도형 코일건은 그림 1과 같이 초기전압이 충전되어 있는 커패시터와 구동코일 그리고 도체인 피투사체로 되어 있다. 이것은 동작 원리는 다음과 같다. 먼저 커패시터에 충전된 전하를 순차적으로 구동코일을 통해 방전시켜 LC 공진을 시켜 준다. 이때 이동자계를 만들어 주기 위하여 먼저 A상을 (+)로 점호하고, 전체주기의 1/6 즉 위상각 60° 후에 C상을 (-)로 점호, 그리고 다시 60° 후에 B상을 (+)로 점호시켜 준다. 즉 대칭삼상형태의 전류를 만들어 준다. 여기서 60°를 점호간격이라 한다. 이 이동자계에 의해 피투사체의 표면에 와전류가 유기된다. 그리고 이동자계와 와전류의 상호작용에 의해 전자력이 발생하여 피투사체를 가속시킨다.

## III. 해석방법

피투사체에 유기되는 와전류는 축방향으로의 분포가 일정하지 못하므로 피투사체를 몇개의 절연된 코일로 나누어 해석한다. 피투사체를 많이 나눌수록 계산값은 정확하지만 대신 계산시간이 길어진다. 구동코일의 수는 피투사체의 질량, 원하는 속도등에 따라 달라진다. 본 논문에서는 피투사체를 m개의 단락코일로 등가화하고, 그림

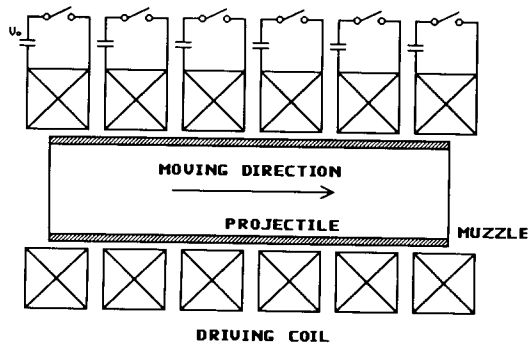


Fig. 1. Structure of coil gun.

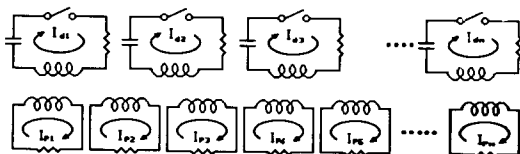


Fig. 2. Equivalent circuit.

2에서 보는 바와 같은 등가회로를 도출했다. 이 등가회로의 인덕턴스는 코일의 치수를 이용하여 적분형태의 수식을 얻고, 이 수식을 수치적으로 계산하여 구하였다.[8, 9] 여기에서 시변계수를 가진 1계 미분방정식 형태의 회로방정식과 운동방정식을 유도하고, Runge-Kutta 방법을 통해 해석함으로써 피투사체의 위치, 속도, 전류 그리고 구동코일의 전류의 시간에 따른 변화를 구하였다. 이 네 가지의 물리량을 사용하면 에너지 전달율, 힘 등의 특성값 등을 도출할 수 있다. 해석에 사용된 모델의 사양은 표 I 과 같다.

## IV. 시스템 방정식

등가회로에 대해 키르히호프의 전압법칙을 적용하여 회로방정식을 구하면 식 1과 같은 행렬방정식이 얻어진다.

$$[V] = [R] [I] + \frac{d}{dt} \{ [L] [I] + [M] [I] \} \quad (1)$$

여기서 피투사체 코일의 갯수를 m, 구동코일의 갯수를 n 이라 하면,  $[V]$ ,  $[I]$ 는  $(m+n) \times 1$ 의 크기를 갖는 피투사체와 구동코일의 전압, 전류 행렬이고,  $[R]$ ,  $[L]$ 은  $(m+n) \times (m+n)$ 의 크기를 갖는 저항, 자기인덕턴스 행렬, 그리고  $[M]$ 은  $(m+n) \times (m+n)$ 의 크기를 갖는 상호인덕턴스 행렬이다. 이때  $[M]$ 은 피투사체의 위치의 함수 즉 시간의 함수이다. 그리고 커패시터 전압과 구동코일 전류와의 관계로부터 다음식을 얻는다.

$$[C] \frac{d}{dt} [V] = -[I_d] \quad (2)$$

Table I. Specification of analyzed model

구동코일	코일 수	6(외경 1.5mm 구리선, 각 48턴)
	두께	6mm
	축방향 길이	25mm
피투사체	코일 내경	32.5mm
	길이	10cm
피투사체	두께	1.6mm
	외경	58.4mm
	재질	알루미늄
	무게	76g

여기서  $[C]$ 는  $n$ 개의 대각요소를 가지는 커패시턴스행렬이다.

마지막으로 피투사체에 작용하는 Lorentz 힘은

$$[F] = \frac{1}{2}[I]^T[G][I] \quad (3)$$

와 같이된다. 여기서  $[G] = \frac{d}{dx}[M]$ 이다. 식(1), (2), 및 (3)과 운동방정식을 사용하면, 시스템의 회로 방정식과 운동방정식은 다음과 같은 시변계수를 가진 4개의 1계 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} ([L] + [M]) \frac{d}{dt}[I] = \\ [V] - [R][I] - v_p[G][I] \end{aligned} \quad (4)$$

$$[C] \frac{d}{dt}[V_c] = -[I_d] \quad (5)$$

$$M_p \frac{dv_p}{dt} = \sum_{p=1}^m \sum_{d=1}^n I_p I_d \frac{dM_{pd}}{dx} \quad (6)$$

$$\frac{dx}{dt} = v_p \quad (7)$$

여기서  $M_p$ 와  $v_p$ 는 각각 피투사체의 질량과 속도이다. 식(4), (5), (6), 및 (7)을 연립하여 풀면 특성해석을 위한 모든 파라메타들을 구할 수 있다.

## V. 에너지 해석

유도형 코일건의 에너지 전달 특성을 살펴보기 위해 아래와 같이 에너지해석을 했다. 식(1)의 양변에  $[I]^T$ 를 곱해주고 정리하면 식 (8)을 얻는다.

$$\begin{aligned} [I]^T[V] = [I]^T[R][I] + \frac{d}{dt} \left\{ \frac{1}{2}[I]^T([L] + [M])[I] \right\} \\ + 12[I]^T v_p[G][I] \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)은 단위시간 당의 에너지에 관한 식이므로, 시간에 대해 적분하여 식 (9)와 같은 에너지 관계식을 얻었다.

$$W_{elec} = W_{ohm} + W_{mag} + W_{conv} \quad (9)$$

식 (9)의 각 항은 식 (10), (11), (12) 및 (13)과 같다. 식 (10)은 초기 커패시터에 충전된 전기적 에너지이고, 식 (11)은 저항손실, 식 (12)는 코일에 저장된 에너지, 식 (13)은 운동에너지로 변환되는 전달 에너지이다.

$$W_{elec} = \int_0^t [I]^T[V]dt = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} C_i V_i^2(0) \quad (10)$$

$$W_{ohm} = \int_0^t [I]^T[R][I]dt \quad (11)$$

$$W_{mag} = \frac{1}{2} \int_0^t \frac{d}{dt} ([I]^T([L] + [M])[I])dt \quad (12)$$

$$W_{conv} = \frac{1}{2} \int_0^t [I]^T v_p[G][I]dt \quad (13)$$

이때 기계적 에너지 손실을 무시하여 식 (13)의 전달 에너지가 모두 운동에너지로 변환된다고 가정하면 식 (14)가 성립된다.

$$W_{conv} = \int F \cdot dS \quad (14)$$

따라서 피투사체에 작용하는 힘  $F$ 는 식 (15)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} F = \frac{1}{2}[I]^T[G][I] \\ = \sum_{p=1}^m \sum_{d=1}^n I_p I_d \frac{dM_{pd}}{dx} \end{aligned} \quad (15)$$

## VI. 특성 파라메타

가속장치의 동작 성능을 알아 보기 위하여 다음과 같은 특성 파라메타 들을 계산한다. 평균 가속도  $a_{av}$ 는 피투사체에 가해진 힘을 피투사체의 질량으로 나누어서 구한다.

$$a_{av} = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} \frac{\sum_{p=1}^m \sum_{d=1}^n I_p I_d \frac{dM_{pd}}{dx}}{M_p} \quad (16)$$

여기서  $T_p$ 는 가속시간이다.

에너지 전달율(ETR: Energy Transfer Ratio)은 초기 전기에너지에 대한 피투사체의 운동에너지 비율로 정의되고 다음의 식과 같이 계산된다.

$$ETR = \frac{W_{kf} - W_{ki}}{W_{dec}} = \frac{\frac{1}{2} M_b (v_f^2 - v_i^2)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2} C_i V_i^2(0)} \quad (17)$$

에너지 손실율(ELR: Energy Loss Ratio)은 초기 전기에너지의 대한 피투사체 저항손실의 비율로 정의되고 다음의 식과 같이 계산된다.

$$ELR = \frac{W_{ohm}}{W_{elec}} = \frac{\int_0^{T_p} \sum R_p^2 I_p^2 dt + \int_0^{T_d} \sum R_d^2 I_d^2}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2} C_i V_i^2(0)} \quad (18)$$

### VII. 해석결과

이상에서 기술한 방법으로 표 I의 모델에 대한 특성을 해석하였다. 그림 3은 공진주파수의 변화에 따른 에너지전달율을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 주어진 모델에서 최대 에너지전달율을 얻기위한 공진주파수의 최적치가 존재함을 알 수 있다.

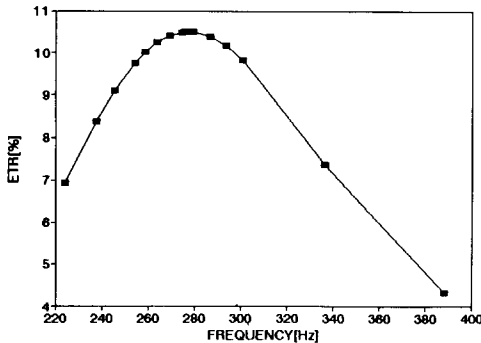


Fig. 3. 공진주파수의 변화에 따른 에너지전달율

또한 그림 4에서는 커패시터의 초기 충전전압이 변화할 때의 에너지전달율이 나타나 있으며 발사속도의 변화도 보였다. 이 결과에서 충전전압을 계속 증가한다고 해서

발사속도가 계속 증가하지는 않고, 에너지 전달율은 700V 이상의 전압에서는 오히려 줄어들고 있다는 것을 알 수 있다. 즉 충전 전압에도 최적치가 있다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 피투사체의 초기위치와 발사속도와의 관계를 나타내고 있다. 이 결과에서 발사 속도는 초기 위치에 따라 변한다는 것을 알 수 있다. 이 사실은 구동코일과 피투사체간의 자기적인 유도작용이 최적이 되는 위치가 있다는 것을 말해준다.

그리고 그림 6은 점호간격을 바꾸었을 때 발사속도의 변화를 나타내고 있다. 이 그림에서 각 상의 점호간격을 60°로 했을 때, 즉 대칭 3상의 형태로 전류를 흘려준 경우에 가장 빠른 발사속도를 얻을 수 있다는 사실을 알 수 있다.

구동코일의 저항과 피투사체의 도전율에 따른 발사속도의 변화들이 각각 그림 7과 그림 8에 나타나 있다. 이 결과 피투사체의 저항에 대해서도 최적치가 존재함을 알

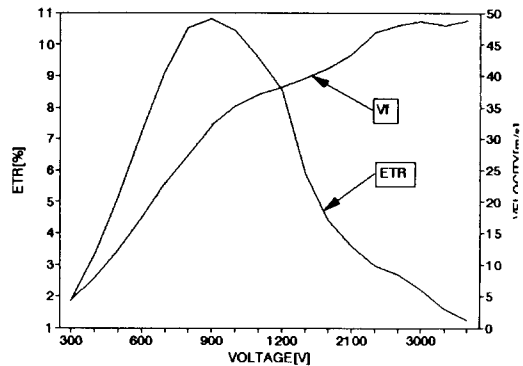


Fig. 4. 커패시터의 초기 충전전압에 따른 에너지 전달율.

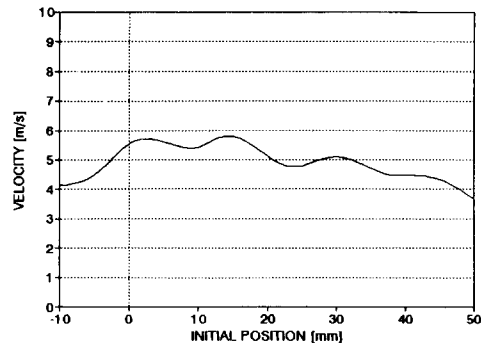


Fig. 5. 피투사체의 초기위치와 발사속도와의 관계.

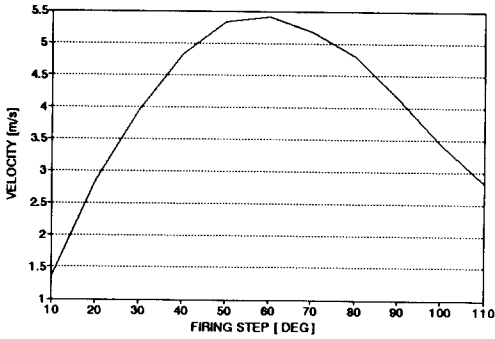


Fig. 6. 점호간격의 변화와 발사속도

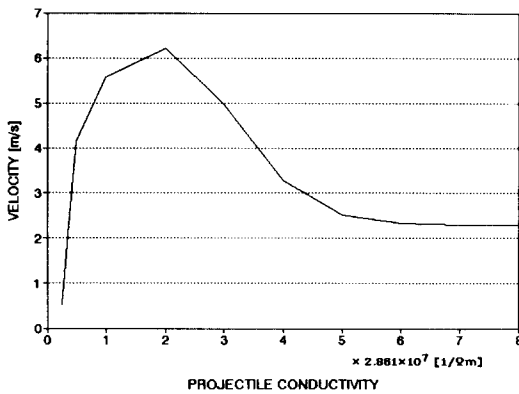


Fig. 7. 구동코일의 저항에 따른 발사속도의 변화.

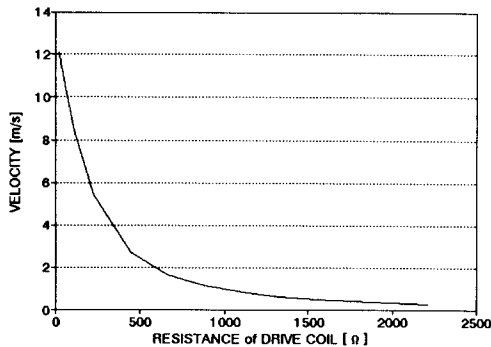


Fig. 8. 피투사체의 도전율에 따른 발사속도의 변화.

## VIII. 결 론

본 연구에서는 커패시터로 구동되는 코일건에 대해 등가회로를 구성하고, 이 등가회로에 대한 회로 방정식과 운동방정식을 풀어서 본 장치의 속도 및 에너지전달특성을 구하였다. 결과적으로 커패시터의 용량, 충전전압, 점호시간, 피투사체의 초기위치에 대해 최고의 발사속도, 또는 최고의 에너지전달을 얻기위한 최적치가 존재한다는 것을 알 수 있었다.

본 논문에서 제시된 방법을 사용하면 실제 모델의 설계에 있어서 여러가지 결과들을 예측할 수 있으므로, 최적의 커패시터 용량, 점호시간 그리고 피투사체의 초기 위치를 결정할 수 있다. 현재 진행중인 실험이 완료되면 해석의 결과를 보다 정확히 검증할 수 있을 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] H. Kolm, and P. Mongeau, "Basic Principle of Coaxial Launch Technology", IEEE Trans. Mag, **MAG-20**(2), 227-230(1984).
- [2] Jianling He, "Concerning the Design of Capacitively Driven Induction Coil Guns", IEEE Trans. Plasma Science, **17**(3), 429(1989).
- [3] Z. Zabar, Y. Naot, L. Birebaum, E. Levi, and P. N. Joshi, "Design and Power Conditioning for the Coil Gun", IEEE Trans. Mag. **25**(1), 627(1989).
- [4] D. G. Elliott, "Traveling wave Induction Launcher", IEEE Trans. Mag. **25**(1), 159 (1989).
- [5] K. Mckinney, and P. Mongeau, "Multiple Stage Pulsed Induction Acceleration", IEEE Trans. Mag. **MAG-20**(2), 239(1984).
- [6] M. Cowan, E. C. Cnare, B. W. Duggin, R. J. Kaye and T. J. Tucker, "The Reconnection Gun", IEEE Trans. Mag. **MAG-22**(6), 1429 (1986).
- [7] Z. Zabar, X. N. Lu, J. L. He, L. Birebaum, E. Levi, S. B. Kuznetsov, and M. D. Nahemow, "Test Result for Three Prototype Models of A Linear Induction Launcher", IEEE Trans.

수 있다. 그리고 액체질소 등의 냉매를 사용하여 구동코일의 저항을 줄여주면 더 빠른 속도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

- Mag. **27**(1), 588(1991).
- [8] T. H. Fawzi, and P. E. Burke, “The Accurate Computation of Self and Mutual Inductance of Circular Coils”, IEEE Trans, PAS, **PAS-97** (2), 464(1978).
- [9] Bartky W., “Numerical Caculation of Generalized Complete Elliptic Integral”, Rev. Modern Phys., **10**, 264(1938).
- [10] J. L. He, Z. Zaber, E. Levi and L. Birebaum, “Transient Performance of Linear Induction Launchers fed by Generators and Capacitor Bank”, IEEE Trans. Mag. **27**(1), 585(1991).

## Energy and Speed Characteristics of Induction Coil-Gun

S. M. Jang, S. W. Kim, and S. Y. Hahn

*Dept. of Electrical Engineering, Seoul National University*

H. K. Jung

*Dept. of Electrical Engineering, Kangweon National University*

(Received 12 December 1991)

This paper describes the energy and speed characteristics of an induction coil-gun. The coil-gun has some merits that it can be easily installed and repeatedly used many times, it does not damage mechanically in the course of launch and the force exerted on the projectile is distributed uniformly. An equivalent circuit is employed for modeling the coil-gun. The circuit equations and equation of motion are then derived based on the equivalent circuit. These equations are solved numerically by using Runge-Kutta method. Finally the energy transfer ratios are obtained according to the variations of the resonant frequency of driving circuit and charging voltage of capacitors. The muzzle velocities of projectile are also obtained according to the variations of electrical conductivity and initial position of projectile, firing angle of driving circuit, charging voltage of capacitor and resistance of driving coil, respectively.