

커패시터로 구동되는 유도형 전자(電磁) 가속장치의 연구

장성만*, 김석환*, 정현교**, 한승엽*

* 서울대학교, ** 강원대학교

A Study on Capacitor-Driven Induction Coil Guns *

S.M. Jang*, S.W. Kim*, H.K. Jung**, S.Y. Hahn*

* Seoul National Univ. ** Kangwon Univ.

ABSTRACT This paper describes the analysis of a capacitor-driven induction coil-gun employing an equivalent circuit. The system differential equations are solved by using Runge-Kutta method. The velocity characteristics of projectile and current building in barrel coils are studied. From the results, it is shown the optimal capacitance of capacitors, charging voltage and initial position of the projectile can be determined. These results will be used as the basis data for the design of capacitor driven coil-guns.

1. 서론

유도형 전자 가속장치는 그림 1 과 같이 초기전압이 충전되어있는 커패시터와 구동코일 그리고 도체인 피루사체로 되어 있다. 이것의 동작 원리는 다음과 같다. 1) 커패시터에 충전된 전하를 순차적으로 구동코일을 통해 방전시켜 LC 공진을 시켜 준다. 2) 순차적인 LC 공진에 의해 이동자계가 발생되고 이 이동자계에 의해 피루사체의 표면에 와전류가 유기된다. 3) 이동자계와 와전류의 상호작용에 의해 전자기력이 발생하여 피루사체를 가속시킨다.

이 전자 가속장치는 설치 방향과 위치가 자유롭고, 종전의 한 번 사용하면 버려야 하는 화학적 폭발을 이용한 발사장치와는 달리 반복 사용이 가능하다. 또 구동 코일과 피루사체 간에는 반발력이 작용하고 있으므로 접촉이 없는 상태로 가속된다. 따라서 기계적인 마모가 없고, 와전류는 피루사체의 표면에 고르게 분포하므로 피루사체가 받는 응력(stress)이 작다는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 커패시터로 구동되는 코일형 유도 가속장치의 동작 특성각 에너지 전달 특성을 해석했다.

2. 해석 방법

본 연구에서는 유도형 전자 가속장치를 해석하기 위해서 그림 2 에서 보는 바와 같은 등가회로를 도출했다. 여기에서 시변계수를 가진 1개 미분방정식의 회로 방정식과 운동방정식을 유도하고, Runge-Kutta 방법을 통해 해석함으로써 피루사체의 위치, 속도, 전류 그리고 구동코일의 전류의 시간에 따른 변화

를 얻었다. 이 4 가지의 물리량을 사용하면 에너지 전달률, 힘, 온도 상승 등의 특성값 들을 도출할 수 있다. 해석에 사용된 모델은 표 1과 같다.

표 1 해석모델사양

구동코일	코일 수	6 (외경 1.5 mm 구리선, 각 64턴)
	두께	6 mm
입피루사체	축방향 길이	25 mm
	코일 내경	32.5 mm
피루사체	길이	15 cm
	두께	2 mm
	외경	58.4mm
	재질	알루미늄
	무게	141 g

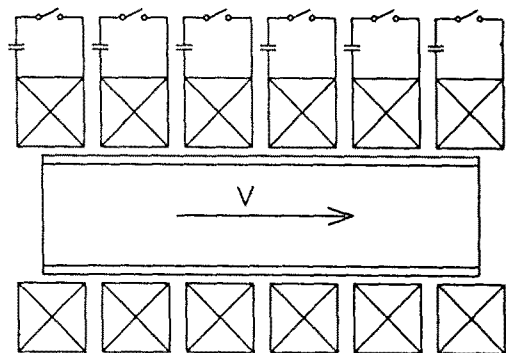


그림 1. 유도형 전자가속장치의 개념도

3. 시스템 방정식

피루사체에 유기되는 와전류의 축방향으로의 분포가 일정하지 못하므로 피루사체를 몇개의 절연된 코일로 나누어 해석한다. 피루사체를 많이 나눌수록 계산값은 정확하지만 그대신 계

산시간이 길어진다. 구동코일의 수는 피부사체의 질량, 원하는 속도등에 따라 달라진다.

동가회로에 키르히호프의 전압법칙을 적용하면

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

피부사체 코일의 갯수를 m, 구동코일의 갯수를 n 이라하면, [V], [I]는 1 x (m+n) 의 크기를 갖는 피부사체와 구동코일의 전압, 전류 행렬이고, [R], [L]은 (m+n) x (m+n)의 저항, 자기 인덕턴스 행렬, [M]은 (m+n) x (m+n)의 상호인덕턴스 행렬이다. 그리고 [M]은 피부사체의 위치의 함수 즉 시간의 함수이다.

커패시터 전압과 구동코일 전류와의 관계는

$$[C] \frac{d}{dt} [V_0] = - [I_d] \quad (2)$$

[C]는 n요소의 대각행렬이다.

피부사체에 작용하는 Lorentz 힘은

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

$$[G] = \frac{d}{dx} [M]$$

식 (1)-(3)과 운동방정식을 사용하면 시스템의 회로 방정식과 운동방정식은 식 (4) ~ 식 (7) 과 같은 시변계수를 가진 4 개의 1계 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

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

$$[C] \frac{d}{dt} [V_0] = - [I_d] \quad (n) \text{개} \quad (5)$$

$$M_p \frac{d\nu_p}{dt} = \sum_{p=1}^m \sum_{d=1}^n I_p I_d \frac{d\phi_{pd}}{dx} \quad (1) \text{개} \quad (6)$$

$$\frac{dx}{dt} = \nu_p \quad (1) \text{개} \quad (7)$$

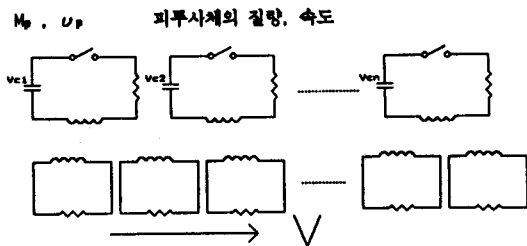


그림 2. 유도형 전자 가속장치의 동가회로

4. 에너지 해석

유도형 전자 가속장치의 에너지 전달 특성을 살펴보기 위해 아래의 같이 에너지해석을 했다. 식 (1)의 양 변에 [I]^T를 곱해주고 정리하면

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

(8)식에서 좌변은 초기 커패시터에 충전된 전기적 power이고, 우변의 첫 식은 저항손실, 두번째 식은 코일에 저장된 power, 마지막 식은 운동에너지로 변환되는 전달 power이다. (8)식을 시간에 대해 적분해서 에너지를 구하면

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

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

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

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

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

피부사체의 코일내에서의 운동시간이 아주 짧으므로 외부로의 열 방출이 없다고 가정하면,

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

따라서

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

5. 특성값

가속장치의 동작 성능을 알아 보기 위하여 다음과 같은 특성 값들을 계산한다. 평균 가속도는 피부사체에 가해진 힘을 피부사체의 질량으로 나누어서 구한다.

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

여기서 T_p 는 가속시간이다.

에너지 전달율은 초기의 전기에너지에 대한 피부사체의 운동 에너지의 비율이므로 다음의 식과 같이 계산된다.

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

에너지 손실율은 초기의 전기에너지에 대한 피부사체의 저항 손실 비율이므로 다음의 식과 같이 계산된다.

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

온도상승은 다음의 식과 같이 계산된다.

$$\theta_p = \frac{\int_0^{T_p} R_p I_p^2 dt}{C_p \cdot V_{vol} \cdot \rho} \quad (19)$$

$$\theta_d = \frac{\int_0^{T_p} R_d I_d^2 dt}{C_d \cdot V_{vol} \cdot d}$$

C_p, C_d [$J/m^3 \cdot ^\circ C$] : 비열 × 질량밀도

$V_{vol} \cdot \rho, V_{vol} \cdot d$: 피부사체, 코일의 부피

6. 해석결과

표 1의 모델에 대해 해석하여 그림 3~그림 7의 결과를 얻었다. 그림 3은 공진주파수의 변화에 따른 에너지전달율(ETR)을 보였다. 그림에서 알 수 있듯이 주어진 모델에서 최대에너지전달율을 얻기위한 커패시턴스의 최적치가 존재함을 알 수 있다. 그림 4에서는 커패시터의 초기 충전전압이 변화할 때의 ETR과 탈출속도를 보였다. 충전전압이 증가함에 따라 ETR의 최적치가 존재하고, 탈출속도는 계속 증가하나 많은 양의 에너지가 방전되지 않고 커패시터에 남아있게 된다. 그림 5는 피부사체의 초기위치가 구동코일의 끝과 일치할 때 보다는 약간 앞서 있는 것이 ETR이 좋다는 것을 알 수 있다. 이것은 구동코일과 피부사체간의 커플링이 최적이 되는 위치가 있다는 것을 말해준다. 그림 6은 피부사체의 표면에 유기되는 와전류의 변화와 그에의한 온도상승이다. 그림에서 보면 알 수 있듯이 A상 - C상 - B상의 절호에 따라 코일내부에 이동자계가 발생함을 알 수 있다. 또 온도분포는 피부사체가 구동코일의 내부를 지나는 시간이 아주 짧으므로 그렇게 심각하지 않다는 것을 알 수 있다. 그림 7은 그림 3.의 최대 에너지전달율때 구동코일의 전압, 전류의 변화, 피부사체의 가속도, 속도의 시간에 따른 변화이다.

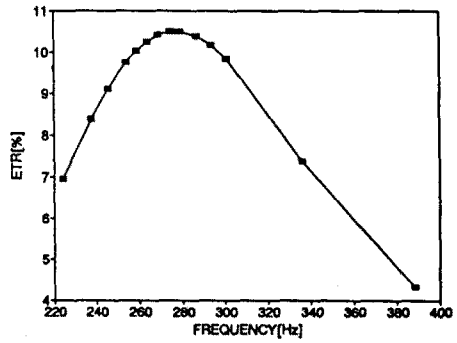


그림 3. 공진주파수의 변화에 따른 에너지전달율(ETR)

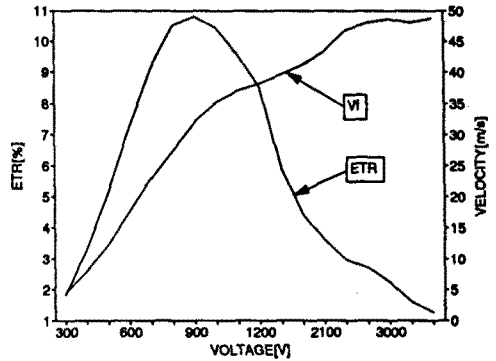


그림 4. 충전전압의 변화에 따른 ETR 과 탈출속도

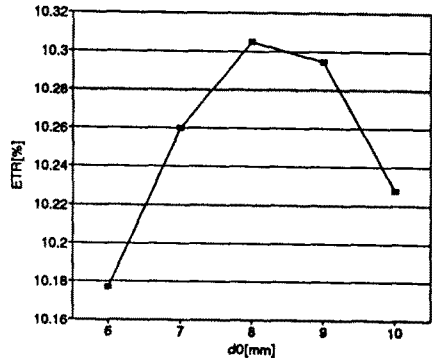


그림 5. 초기위치의 변화에 따른 ETR

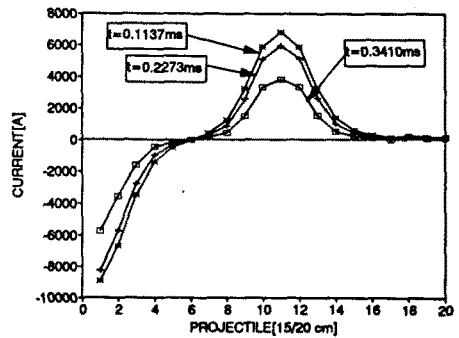


그림 6-1. 시간에 따른 피부사체 유기전류의 변화 (A 상 절호)

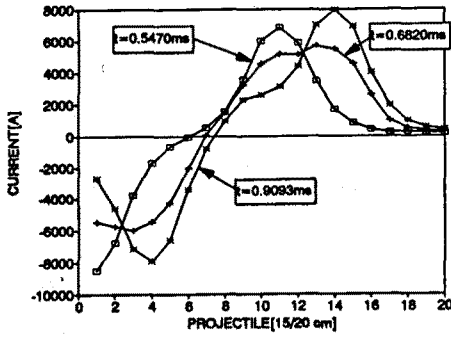


그림 6-2. 시간에 따른 피부사체 유기전류의 변화 (A-C 상 절호)

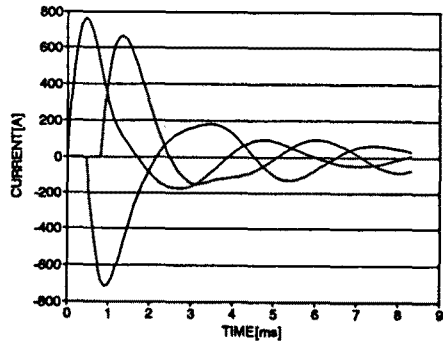


그림 7-2. 1 단계 모델 해석 (커패시터의 전류변화)

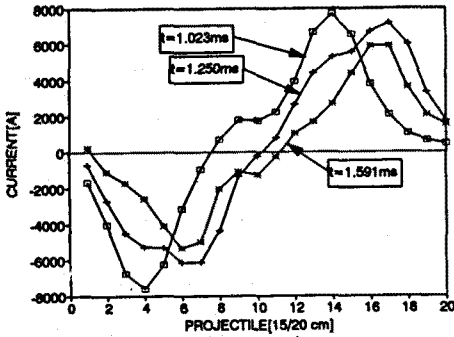


그림 6-3. 시간에 따른 피부사체 유기전류의 변화 (A-C-B 상 절호)

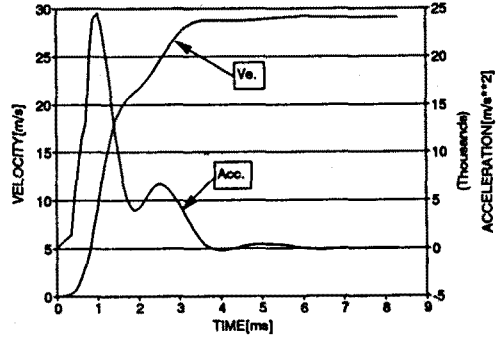


그림 7-3. 1 단계 모델 해석 (피부사체의 가속도 및 속도)

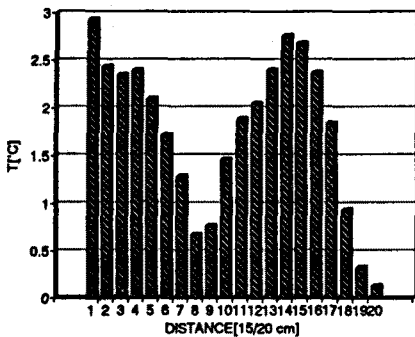


그림 6-4. 피부사체의 온도상승

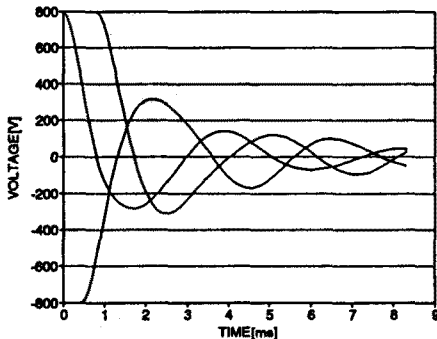


그림 7-1. 1 단계 모델 해석 (커패시터의 전압변화)

7. 결론

본 연구에서는 커패시터로 구동되는 유도형 가속장치에 대해 동기회로를 구성하고, 이 동기회로에 대한 회로 방정식과 운동 방정식을 풀므로써 본 장치의 여러가지 특성을 해석하였다. 해석의 결과 커패시터의 용량 및 충전전압, 절호시간, 피부사체의 초기위치는 각각 최적치를 갖는다는 것을 알 수 있었다.

이 해석 방법을 사용하면 실제 모델이 주어졌을 경우 결과를 예측할 수 있으므로, 최적의 커패시터 용량, 절호시간 그리고 피부사체의 초기위치를 결정하는데 큰 도움을 줄 수 있다. 현재 준비 중인 실험이 완료되면 해석의 결과를 검증할 수 있리라 사료된다.

8. 참고문헌

1. JIANLING HE, "Concerning the Design of Capacitively Driven Induction Coil Guns", IEEE Trans. Plasma Science, Vol. 17, No. 3, pp 429-438, June, 1989
2. Z. Zabar, Y. Neot, L. Birebaum, E. Levi, and P. N. Joshi, "Design and Power Conditioning for the Coilgun", IEEE Trans. Magnetics, Vol. 25, No. 1, pp 627-631
3. D. G. Elliott, "Traveling wave Induction Launcher", IEEE Trans. Magnetics, Vol. 25, No. 1, pp 159-163, 1989
4. T. H. Fawzi, P. E. Burke, "The Accurate Computation of Self and Mutual Inductance of Circular Coils", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-97, No. 2, pp 464-468, March/April, 1978
5. Bartky W., "Numerical Calculation of Generalized Complete Elliptic Integral", Rev. Modern Phys., Vol. 10, pp 264-269, Oct, 1938