

전자력 가속기 성능해석에 관한 연구

이 주*, 김진성, 안충호, 문갑태, 문상규
국방과학연구소

A Study on The Performance Analysis of Electromagnetic Launcher

J. Lee, J.S. Kim, C.H. Ahn, G.T. Moon, S.K. Moon
Agency for Defense Development

Abstract

In this paper, we calculate the inductance and resistance of the electromagnetic launcher by means of the 3D FEM and the analytical method. And, the dynamic models of the electromagnetic launcher are presented to calculate it's performance. We compared the analysis results with the experimental results and conclude that the presented analysis methods are reasonable.

1. 서론

핵융합, 신소재 개발 및 군사적인 목적으로 물체를 고속으로 가속시키는 연구가 활발히 이루어져 많은 발전이 있었으나 가스팽창력유 이용하여 물체를 가속시킬경우 가속기 내의 압력특상상 그 기술적 한계가 약 2500m/s로 예상되며, 현재 기의 한계점에 도달한 것으로 판단된다. 오늘날 세계각국에서는 이러한 속도한계를 극복하기 위한 연구를 활발히 진행하고 있으며 그 중 가장 가능성있는 혁신적인 기술로 전자력유 이용한 가속기속이 연구되어지고 있다. [1]

본 연구는 전자력가속기(일명:레일건)의 성능예측을 위한 연구로서 목표성능을 달성하는 가속기를 설계하기 위하여 정확하고 올바른 해석법의 정립이 요구된다. 레일건의 성능예측을 위해서는 전자기장, 열, 기계적 복합문제를 다루어야하며 특히 전자기장적 문제는 비정상적인 전류분포, 고전류 및 짧은 가속시간 등으로 해석이 난해해진다.

본 논문에서는 전자력 가속기 성능해석을 위하여 전자력 가속기의 고유 파라미터이며 시스템 성능에 크게 영향을 미치는 레일의 인덕턴스 및 저항을 각각 3차원 유한요소법과 해석적인 방법으로 계산하고, 이를 이용 등가회로를 구성하여 레일건 동작을 모델링하였다. 또한 계산치와 실험결과치를 비교하여 성능해석법의 타당성을 입증하였다.

2. 전자력 가속기의 추진력 발생 원리

그림1에서와 같이 전류가 레일과 아마추어에 흐르게 되면 레일 사이에는 지면에 수직한 자장이 형성되고 이 자장과 아마추어에 흐르는 전류에 의해 아마추어에는 로렌츠의 힘 $J \times B$ 가 발생되어 가속재를 가속시키게 된다.

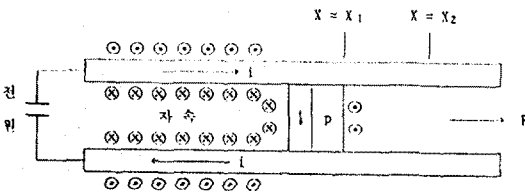


그림1. 전자력 가속기의 추진력 발생원리

이때 전원에서 공급되는 에너지 W_E 에 계에 축적되는 에너지 W_{Fm} 가 계가 하는 기계적 일을 W_m 이라 하고 이 계가 손실없는 보존계라고 하면 에너지 보존법칙에 의해 식(2-1)이 성립된다.

$$dW_E = dW_{Fm} + dW_m \quad (2-1)$$

그림1에서 가속체의 위치가 X_1 또는 X_2 인 경우, 전류 I 와 자속 ϕ 의 자기회로 특성이 그림2와 같이 선형적이라고 하면 $t=t_2-t_1$ 사이에 공급되는 전기에너지변화 ΔW_E , 자기에너지 변화 ΔW_{Fm} 와 운동에너지 ΔW_m 은 각각 식(2-2), (2-3), (2-4)로 표시된다.

$$\Delta W_E = \int_{t_1}^{t_2} e i dt = \int_{\phi_1}^{\phi_2} (NI) d\phi = \text{면적 } a'abb'a' \quad (2-2)$$

$$\Delta W_{Fm} = [X_2 \text{ 위치에서의 자기에너지}] - [X_1 \text{ 위치에서의 자기에너지}] = \text{면적 } obb'o - \text{면적 } oaa'o \quad (2-3)$$

$$\therefore \Delta W_m = \Delta W_E - \Delta W_{Fm} = \text{면적 } oba'o - \text{면적 } oaa'o = W_{Fm}'(i, x_2) - W_{Fm}'(i, x_1) \quad (2-4)$$

$$\text{여기서, } W_{Fm}': \text{자기수반에너지} (= \frac{1}{2} LI^2)$$

따라서 $dW_m = F \cdot dx = \Delta W_{Fm}(i, x)$ 로부터 힘 F 은 (2-5)식으로 주어진다.

$$F = \frac{dW_{Fm}'(i, x)}{dx} \Big|_{i=\text{const.}} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL(x)}{dx} \quad (2-5)$$

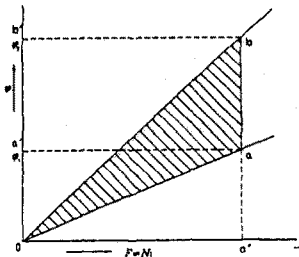


그림2. 기자력 - 자속특성 곡선

3. 전자력 가속기 회로정수 계산

전자력가속기의 회로정수중 레일의 저항, 인덕턴스는 아마추어 이동에 따라 변하며 전자력가속기 성능에 큰 영향을 미친다.

가. 유한요소법에 의한 인덕턴스 산출

본 연구에서는 범용 유한요소법 패키지인 Ansys를 이용하여 3차원 유한요소법에 의해 인덕턴스를 산출하였다. [5]

1) 지배방정식

정상 자기인 경우 맥스웰 방정식과 자계의 상관 관계식으로부터 스칼라 포텐셜 ϕ 를 정의하여 지배방정식을 유도하면 식(3-1)과 같다.

$$\nabla \cdot \mu \nabla \phi - \nabla \cdot \mu H_s - \nabla \cdot \mu_0 M_0 = 0 \quad (3-1)$$

ϕ : 스칼라 포텐셜

H_s : 근원 자계

M_0 : 보자력

해석영역에 영구자석이 없으면 식(3-1)은 식(3-2)로 표현된다.

$$\nabla \cdot \mu \nabla \phi - \nabla \cdot \mu H_0 = 0 \quad (3-2)$$

2) 정식화

식(3-1)의 지배방정식에 변분원리를 적용하기 위하여 에너지 범함수를 유도하면 식(3-3)과 같다.

$$\Pi(\phi) = \int_Q (\nabla \phi)^T \mu (\nabla \phi) dQ + 2 \int_Q \phi \nabla \cdot \mu H_0 dQ \quad (3-3)$$

식(3-3)에 변분원리를 적용하면 식(3-4)와 같은 행렬식으로 표현된다.

$$[K](\phi) = (F) \quad (3-4)$$

3) 인덕턴스 산출

해석영역에서 저장에너지 W_m 은 각요소의 자기에너지 $W_{Fm}[Joule/M^3]$ 에 요소면적 $\Delta(\sigma)$ 을 곱하여 전요소에 대한 합으로 구해진다.

$$W_m = \sum_{c=1}^{N_e} W_m(\sigma) \Delta(\sigma) \quad [Joule] \quad (3-5)$$

N_e : 전 요소수

$$W_m = 1/2 LI^2 \quad (3-6)$$

$$L = \frac{2W_m}{I^2} \quad (3-7)$$

나. 레일 저항의 산출 [2]

그림3과 같이 전류는 레일의 좌측 끝단에서 아마추어로 가까이 진행됨에 따라 유효단면적이 감소된다. 따라서 아마추어 위치에 따른 레일 저항의 산출이 필요로 된다.

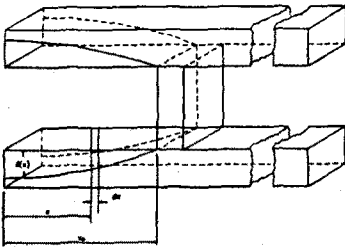


그림3. 레일의 유효단면적 변화

가속체가 받는 가속도가 일정하다고 가정하면 시간 T 동안 가속 물체의 이동거리 X 는 식(3-8)과 같다.

$$X = \int \int a dt^2 = 1/2 a T^2 \quad (3-8)$$

X 위치에서 전류의 침투깊이 $\delta(X)$ 는 식(3-9)와 같다.

$$\delta(X) = \left[\frac{2\rho \Delta t}{\pi \mu} \right]^{1/2} \quad (3-9)$$

Δt : 아마추어 $X-X_0$ 이동시간
 ρ : 도전율

레일의 유효저항 R 은 다음 식(3-10)로 구해진다.

$$R = \frac{1}{P} \left(\frac{\rho \mu}{2} \right)^{1/2} \left(\frac{a}{2} \right)^{1/4} \left[\frac{8}{3} X^{3/4} \right] \quad (3-10)$$

4. 전자력가속기의 동작 모델링

가. 전자력가속기 등가회로

전자력가속기의 등가회로는 그림4와 같다.

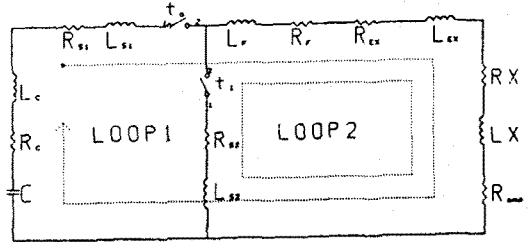


그림4. 전자력가속기 등가회로

등가회로와 가속체의 운동방정식을 이용하면 식(4-1)과 같은 상태방정식을 구할 수 있다.

$$i' = \frac{V_c - (R_1 + R'_x + L'v) i}{L_1 + L'_x} \quad (to \leq t \leq t_1) \quad (a)$$

$$i' = \frac{(R_2 + R'_x + L'v) i}{L_2 + L'_x} \quad (to \leq t \leq t_1) \quad (b)$$

$$V_c' = -\frac{f}{C} \quad (c)$$

$$v' = \frac{F}{m} \quad (d)$$

$$x' = v \quad (e) \quad (4-1)$$

여기서, $R_1=R_c+R_{s1}+R_f+R_{EX}+R_{AMA}$, $R_2=R_{s2}+R_f+R_{EX}+R_{AMA}$.

$L_1=L_c+L_{s1}+L_f+L_{EX}$, $L_2=R_{s2}+L_f+L_{EX}$

v : 가속체 속도, F : 가속체의 추진력, m : 이동체 질량
식(4-1)에서 추진력 F 는 아마추어에서 발생하는 로렌츠 힘, 플라즈마와 가속체의 가속기 내벽과의 마찰, 가속기 내벽의 용발에 의한 플라즈마 질량의 증가에 의해 결정되며 이들의 관계식은 식(4-2)와 같이 제시된다. [4]

$$F = F_L + F_T - F_P - F_A - F_D = (m_a + m_p) \frac{dv}{dt} \quad (4-2)$$

여기서, F_L : 로렌츠 힘, F_T : 플라즈마의 열팽창력,

F_P : 가속체와 가속기와의 마찰력, F_A : 용발손에 의한 항력,

F_D : 플라즈마의 점성마찰력, m_a : 플라즈마 아마추어 질량,

m_p : 가속체의 질량

나. 로렌츠 힘

전자력가속기의 추진력인 로렌츠 힘은 아마추어에 흐르는 전류와 레일의 인덕턴스 정도에 의해 결정된다.

$$F_L = 1/2 L' I^2 \quad (4-3)$$

다. 아마추어 열팽창에 의한 추진력

금속박에 큰 필드전류가 흐를 때 금속박이 플라즈마로 변화되는 과정에 발생하는 열팽창으로 가속체가 가속력을 받는다. 플라즈마 열팽창에 의해 가속체가 얻는 속도는 보통 실험치로 얻어질 수 있으며 본 논문에서 택한 모델과 유사한 외국 실험의 경우를 보면 그속도는 수백 m/s이다.

라. 가속체의 마찰력

가속체가 로렌츠힘과 아마추어 열팽창에 의해 가속될 때 가속기 내벽과의 사이에서 마찰이 발생되어 가속체의 순수 추진력을 감소시킨다. 이때 가속기 구조물은 강성, 가속체용 동방성물질, 또한 추진력에 의해 발생하는 가속체 내의 용력분포가 선형적이고 가정하면 마찰력은 식(4-4)로 표현된다.

$$F_P = \frac{\mu F_L}{1-\mu A} I_P (\mu_1 W + \mu_2 h) \quad (4-4)$$

여기서, μ : 가속체의 Poisson's Ratio, I_P : 가속체의 길이,

μ_1, μ_2 : 가속기 강내 표면 마찰계수, A : 가속체의 단면적($W \times h$)

마. 가속기 내부의 용발 항력 [3], [4]

플라즈마에 고전류(수백KA)가 흐를 때 수만 K의 복사열이 발생하여 가속기 내벽 일부가 용해, 증발된다. 이 용발된 물질이 플라즈마 아마추어와 혼합되어 아마추어 전류를 증가시키므로써 식(4-5)와 같이 순수 가속체의 추진력이 감소된다.

$$F = \frac{d}{dt} \left\{ (m_a + m_p) v \right\} = (m_a + m_p) \frac{d}{dt} v + v \frac{d}{dt} m_a \quad (4-5)$$

식(4-5)의 플라즈마 질량변화율은 식(4-6)과 같이 정의된다.

$$\frac{d}{dt} m_a = \alpha I V_a \quad (4-6)$$

여기서, α : 용발상수, V_a : 아아크 전압, I : 아아크 전류
식(4-5), (4-6)에서 용발손에 의한 항력을 구하면 식(4-7)과 같이 된다.

$$F_a = v \frac{d}{dt} m_a = dIv \quad (4-7)$$

바. 플라즈마 아마추어의 점성 마찰력
플라즈마 아마추어와 가속기 내벽과의 점성마찰로 인하여 가속체의 추진력이 감소된다. 플라즈마의 점성마찰력을 Reynolds응력에 의해 표현하면 식(4-10)과 같다.

$$F_D = \sigma_R S = \frac{C_f v^2 (W + h) dIv}{W \times h} \quad (4-10)$$

여기서, σ_R : Reynold 응력, C_f : 점성 마찰력,
S: 내벽과 플라즈마 접촉면적

5. 계산결과 및 검토

본 연구에서는 제안된 전자력가속기 성능해석 방법을 국과 연-한국전기연구소에서 제작, 실험한 전자력가속기 모델에 적용하여 계산결과와 실험결과를 비교, 검토하였다.

가. 인덕턴스 산출결과 및 측정결과
그림5은 해석모델의 요소분할도이다.

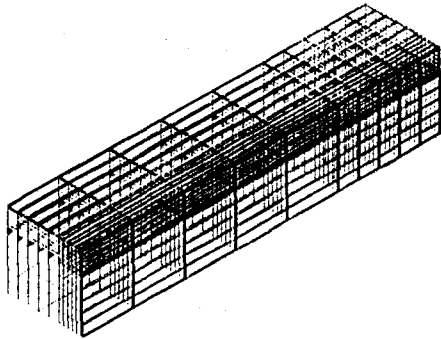


그림5. 요소분할도

본 모델에는 자기적 비선형성을 갖는 재료가 없으므로 선형해석을 하였고 또한 레일을 둘러싼 지지물 소재는 비전도성 소재이므로 도체내의 전류를 일정(DC)하다고 가정하여 해석한 결과 그림6과 같은 자속밀도와 인덕턴스값을 얻었다.

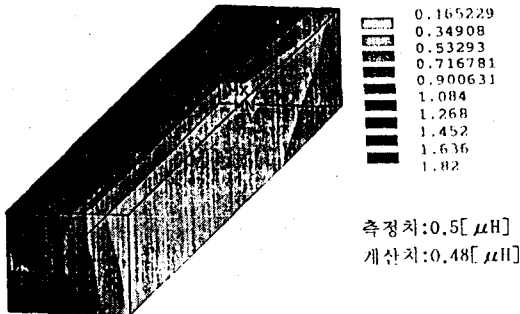


그림6. 자속밀도도와 인덕턴스값

계산된 인덕턴스값과 측정치가 비슷하여, 본 연구의 인덕턴스 계산법의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

나. 전기저항 산출결과 및 측정결과

그림7.은 가속체 위치에 대한 레일저항의 변화와 보였다.

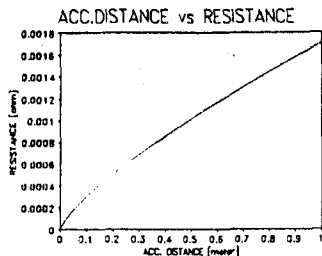


그림7. 가속물체의 위치에 대한 전기저항의 변화

가속체가 가속되어 가속기에서 이탈할 때의 위치(X=1m)에서 레일의 저항값은 계산치 17.1[mΩ], 측정치 15[mΩ]으로 13%의 오차가 있었다. 이러한 오차는 레일 저항 산출시 도체의 유효면적 오차로 판단되며 계산치가 실제의 실험 저항치에 비해

다. 동작특성 해석결과 및 실험결과

그림8은 계산된 전자력가속기의 파라메타를 식(4-1)의 특성 방정식에 대입하여 얻어진 전류 및 속도특성곡선이다.

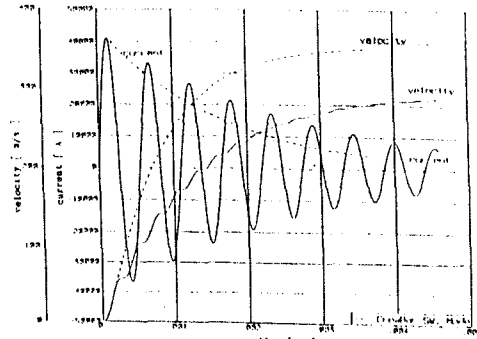


그림8. 전류 및 속도 특성

그림에서 알 수 있는 바와 같이 크로바스위치를 사용하지 않는 경우 전류가 진동하므로 속도가 지속적으로 증가하지 못하지만 크로바 스위치를 침투전류에서 동작시킬 경우 전류의 진동특성이 없으므로 속도를 더 증가시킬 수 있음을 알 수 있다. 표1은 두가지 실험에 대한 속도 측정치 및 계산치를 보였다. 실험2는 실험1보다 캐패시터 충전전압을 높이고 전체 인덕턴스인 47[μH]에서 10[μH]로 감소시켜 회로를 구성하여 실험한 결과 가속효율이 높아짐을 알 수 있었다. 계산치와 실험치를 비교하여 보면 물체의 가속기 이탈시간 및 속도에는 약 20%의 오차가 발생하였다. 이 오차의 주된 요인은 산출된 파라메타 및 플라즈마 동특성, 실험 오차가 누적되어 발생된 것으로 판단된다.

표.1 전자력가속기 성능 계산치 및 실험치

항 목	C.S. 무		C.S. 유
	실험치	계산치	
속도(M/S)	1000(246)	1218(289)	1753(352)
효율(%)	0.5(0.07)	0.7(0.09)	1.5(0.14)
가속시간(ms)	1.72(-)	1.2(4.5)	0.88(3.65)
실험1 : $V_c=23KV, m_p=1g, E_c=43.6KJ$ 실험2 : $V_c=40KV, m_p=1.3g, E_c=132KJ$ (-) : 실험1, C.S. : Crow_Bar Switch			

6. 결론

본 연구는 전자력가속기의 성능예측을 위한 연구로써 가속기의 특성 파라메타를 유한요소법과 해석적 방법으로 구하여 전자력 가속기 동가회로를 구성하여 가속기 성능 및 동작특성을 예측하였다. 또한 구해진 결과와 실험치를 비교 검토한 결과 본 연구에서 제시한 회로 파라메타 산출 방법 및 전자력 가속기 동작특성 해석법의 타당성을 입증할 수 있었다. 앞으로 기계 및 열 문제와 플라즈마 동특성 문제를 고려하여 성능해석을 수행한다면 보다 정확하고 신뢰성 있는 성능예측이 가능하고 또한 복표성능을 갖는 전자력가속기의 설계에 활용될 수 있는 것으로 판단된다.

REFERENCE

1. 분상기, 안충호, 김진성, 이주, "레일건 특성해석에 관한 연구"
2. D.R.Sadedin, "Efficiency equations of the railgun," IEEE Tran. Mag. vol. 20, March, 1984, pp268
3. N.M.Schnurr, J.F.Kerrisk, "numerical studies of ablation and ionization of railgun materials," AIAA 18th Fluid Dynamics and Plasma Dynamics, Lasers Conference, July, 1985, Cincinnati Ohio
4. M.Shahinpoor, R.S.Hawke, "Analytic Solutions to Dynamics equations of plasma armature railguns," IEEE tran.Mag., vol. 25, NO.1, Jan.1989
5. ANSYS USER'S MANUAL