

전자기 시스템의 해석과 설계

Design and Analysis of An Electromagnetic System

朴省昱[†] · 金東勳^{*}
(Seong-Wook Park · Dong-Hun Kim)

Abstract - This paper presents the design of an electromagnetic system such as jumping ring system, and also considers the characteristics of dynamics for system with initial parameter. For the propose of system analysis, the MATLAB tool is to solve coupled differential equations with inductances and mutual inductance. To apply a real electromagnetic system, this paper implements the jumping ring system using design parameters, and analyzes the jumping ring system with proposal step.

Key Words : Electromagnetic System, Coupled Differential Equations, Jumping Ring System

1. 서 론

전자기 시스템은 주 코일에 교류전류를 인가하여 생긴 자속에 의해 유도 코일 또는 도전체에 유도전류가 흘러 플레밍의 왼손의 법칙에 따라 힘이 발생되고, 이 힘은 반발력으로 링이 부상되든지 2차 코일에 힘이 작용하여 초기위치에서 과도상태를 통해 정상상태의 높이에 도달하게 된다. 본 연구에서는 전자기 시스템을 해석하고 설계를 하기위한 과정과 방법을 연구하고 이를 통해 제어용 시스템으로 활용하고자 한다. 전자기 시스템은 전기 회로와 자기 회로가 결합되어 있어 수식으로 표현하면 서로 상관이 있는 두개의 미분 방정식으로 표현되어 있다. 그래서 해석방법으로 유한요소법으로 자장을 해석하고 또한 힘과 거리, 속도, 전류를 해석하지만 해석 시간이 오래 걸리는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 전기회로 변수를 먼저 유한요소법(FEM) 방법으로 해석한 후에 구한 변수를 이용하여 전자기 시스템을 해석하는 방법을 통해 시간을 줄이고 해석의 용이성을 제안하고자 한다[1]. 이 방법은[1] S. H. Lee에 의해 제안되었지만 본 연구에서는 이 방법을 통해 실제 시스템인 점핑링 시스템을 설계하여 해석하고 이를 통해 전자기 시스템을 해석하고자 한다.

2. 전자기 시스템의 해석

본 연구에서 다루고자 하는 전자기 시스템은 선형-자계 시스템으로 식 (1-2)와 같이 미분 방정식으로 표현된다.

$$v(t) = Ri(t) + \frac{d\lambda(t)}{dt} \quad (1)$$

$$f = m\ddot{z} + d\dot{z} + kz \quad (2)$$

여기서 $v(t)$ 는 교류 전원, $i(t)$ 는 주 코일에 흐르는 전류, R 은 코일의 저항, $\lambda(t)$ 는 자속, t 는 시간을 나타내며. 식 (2)에서 f 는 교류전원에 의해 유도 코일 또는 도전체에 작용하는 자계의 세기를 나타낸다. $z(t)$ 는 시간 t 에서 유도 코일의 부상 높이, 그리고 m, d, k 는 도체의 질량, 마찰계수, 스프링 상수를 각각 나타낸다. 자속은 전류와 부상높이에 따라 변화하며 아래의 식으로 표현된다.

$$\lambda = \lambda(L(z(t)), i(t)) \quad (3)$$

자계의 에너지 W_m 는 n 개의 결합 전자회로에서 식 (4)와 같이 표현된다.

$$W_m = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_{ij} I_i I_j \quad (4)$$

2.1 한 개의 코일을 사용한 전자기 시스템

주 코일에 의해 질량이 m 인 물체가 움직이는 plunger 시스템[1]에서 유한요소법으로 구하고자하는 변수는 주 코일의 자계 인덕턴스이다. 전자계 힘, f 에 의해 질량이 m 인 물체가 움직일 때, 물체의 높이 변화에 대한 자계 에너지가 힘이 되고 식 (5)와 같이 표현된다.

$$f = \frac{\partial W_m}{\partial z} = \frac{1}{2} I^2 \frac{\partial L}{\partial z} \quad (5)$$

여기서 z 는 물체의 움직이는 부분의 위치를 나타낸다. 코일에 교류 전류를 인가하면 코일이 여자되어 자속이 형성되고 이 자속에 의해 전자기 시스템이 동작하게 된다. 상태를 부상높이(y_1)와 속도(y_2)로 상태 방정식을 구할 수 있다[1].

$m = 0.1, d = 5, k = 1000$ 로 가정 하에 전류, $i(t)$ 를 $3.5 \sin(2\pi 10t)$ 인가하여 초기위치 0에서 과도현상을 사례

† 교신저자, 正會員: 龜尾1大學 컴퓨터응용전기전공 副教授 · 工博
E-mail : swpark@kumi.ac.kr

* 正會員: 慶北大 전기전자컴퓨터 학부 專任講師 · 工博
接受日字 : 2005年 11月 14日
最終完了 : 2002年 12月 21日

연구하였다. 인덕턴스는 부상높이에 따라 curve fitting하여 그림 1에 나타내었다.

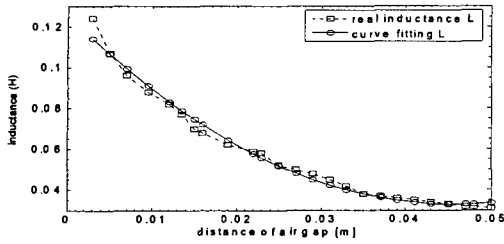


그림 1 부상 높이에 따른 인덕턴스의 변화량
Fig. 1 Inductance variation along the position and curve fitting of L

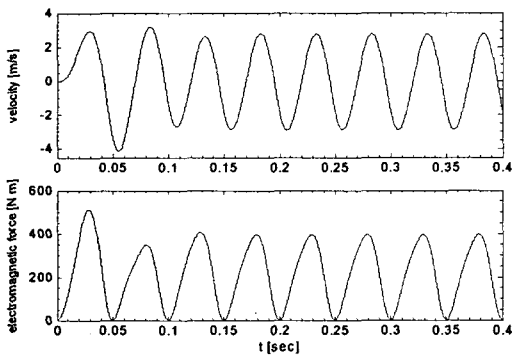


그림 2 전류원인가시 시스템의 속도와 힘
Fig. 2 Velocity and force of acting mass by applying current source

그림 2는 속도와 힘을 구하여 나타낸 그림이다. 교류를 인가하면 전류, 위치와 속도의 3개의 상태변수가 존재하고 상태방정식에서 L' 는 인덕턴스의 미분 항을 나타내고 L_4 은 누설리액턴스를 나타낸다. $R = 0.6 [m\Omega]$, $L_1 = 0.01 [H]$, $v(t) = 20 \sin(2\pi 10t)$ 의 전압을 인가하여 상태변수와 힘을 그림 3에 도시하였다. 그림 1에서 L 의 값, $L = 44.6358 (y_2 + 0.02)^2 - 4.0726 (y_2 + 0.02) + 0.1258$ 을 구하였고, 질량이 m 인 물체가 주 코일과 $0.02[mm]$ 간격만큼 간격을 유지하고 있는 것으로 하여 사례연구 하였다 [1]. 사례연구를 통해 물체가 $0.0216[m]$ 에 부상되었다.

2.2 두개의 코일을 사용한 전자기 시스템

두개의 코일을 사용한 전자기 시스템은 움직이는 부분이 유도코일이고, 전압원이 고정고일에 인가하면 유도 코일은 반발력에 의해 부상한다. 이 경우 표피효과와 와류전류는 없다고 가정하고 해석하였다. 입력은 $60[Hz]$ 이고 전압은 $220[V]$ 을 코일에 인가하였다. $m = 0.1, d = 5, k = 1000$ 의 기계적인 상수와 $R_1 = 0.6 [\mu\Omega], R_2 = 1.58 [\mu\Omega]$ 의 전기적인 상수 값을 사용하여 회로 변수 $L_{11} = 1.87 [H]$, $L_{12} = 0.0001y_3^2 - 0.0007y_3 + 0.0012$ 이고 L_{22} 는 $(-0.0398y_3^2 + 0.0398y_3 + 0.1218) \times 1e^{-6}$ 유한 요소법을 사용하여 추출하였다. 해석결과를 그림 4 도시하였다.

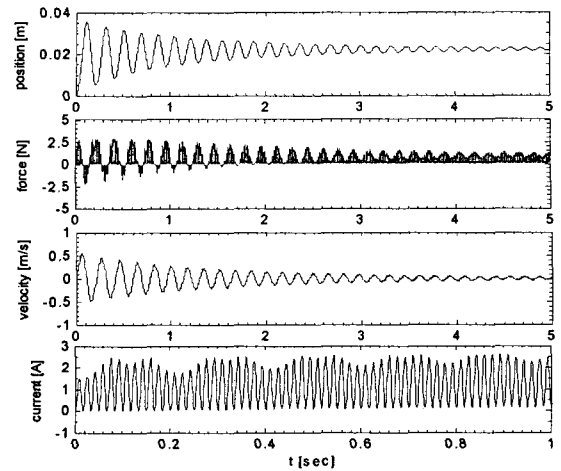


그림 3 교류전압을 입력으로 한 전자기 시스템의 상태변수와 힘
Fig. 3 State variables and force for one coil system by applying voltage source

3초 후에 유도 코일의 위치는 $0.0848[m]$ 에 부상되었다. 두개의 코일을 가진 전자기 시스템은 2×2 행렬의 인덕턴스 요소를 가지고 상태는 $y_1 = I_1, y_2 = I_2, y_3 = z, y_4 = \frac{dz}{dt}$ 이다.

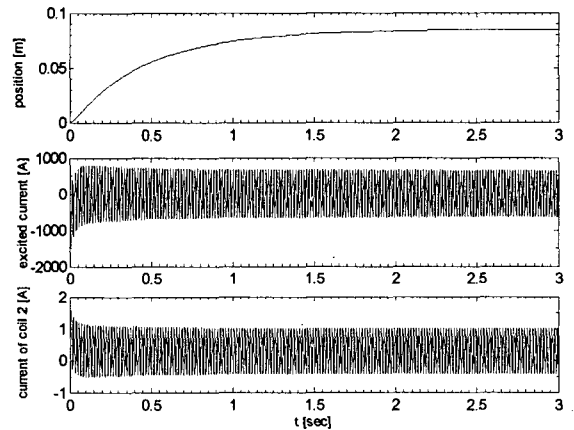


그림 4 위치, 여자전류, 유도 코일의 전류
Fig. 4 Position, excited current, and current of a coil2

2.3 점핑링 시스템의 제작과 해석

점핑링 시스템은 설계하여 구현된 시스템이다. 유도코일대신에 알루미늄 링을 사용하였고, 와류손에 의한 영향을 고려하여야 한다. 유한요소법으로 해석상의 오차와 와류손의 영향이 있다는 점을 고려할 때 실제 부상높이와 설계상의 오차는 존재한다. 와류손의 영향을 고려한 점핑링 시스템의 상태 방정식은 아래와 같다[2].

$$m \frac{d^2z}{dt^2} + d \frac{dz}{dt} + kz = F_e - mg \tag{6}$$

$$0 = R_1 i_1(t) + \frac{d\lambda_1(t)}{dt} \tag{7}$$

$$F_e = \frac{\partial W}{\partial z} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 I_i I_j \frac{\partial L_{ij}}{\partial z} \tag{8}$$

$y_1 = z, y_2 = \dot{z}, y_3 = I_1$ 그리고 $y_4 = I_2$ 라 두면, 상태 방정식은 참고문헌 [3]과 같이 표현된다. 본 연구에서는 점핑링 시스템 설계시의 파라미터 (1.2[mm] 주 코일 1,400[회], 링의 무게 92[g], 인가한 전압 220[V], 60[Hz], $L_{11} = 2.1495$ [H])를 기초하여 유한요소법으로 인덕턴스와 상호인덕턴스를 구해 그림 5에 도시하였다. 실제 시스템에 전압을 인가하고 자계식과 비교한 결과, $m = 0.092$ [kg], $d = 2.5$ [Ns/m], $k = 1.25$ [N/m]을 구하여 사례연구 한 결과를 그림 6에 도시하였다. 0.132[m]에 링이 위치하였고 실제로 유도전동기 전원을 통해 220[V]인가한 결과 0.13[m]에 위치하여 해석한 결과와 아주 근사한 결과를 얻을 수 있었다.

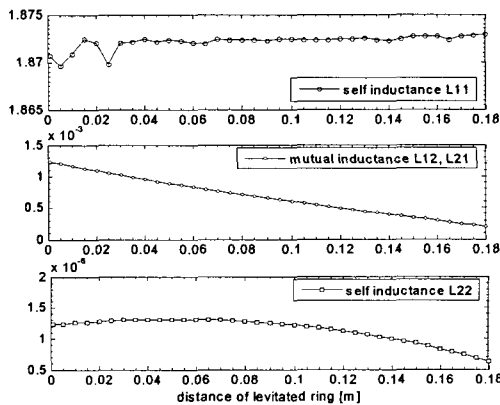


그림 5 주 코일과 링의 자체 인덕턴스와 상호인덕턴스
 Fig. 5 Self inductance and mutual inductances between main coil and aluminum ring

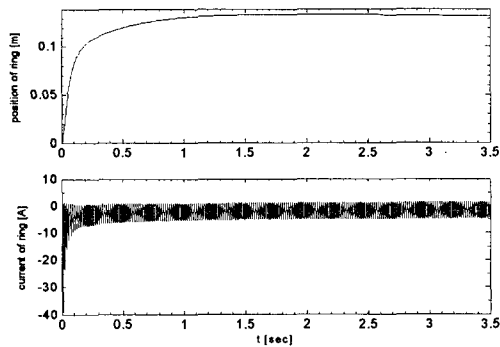


그림 6 전기회로 변수를 구해 해석한 링의 위치와 전류
 Fig. 6 Position and current of ring with proposal method

3. 결 론

본 연구에서는 전자기 시스템을 해석하기 위한 방법으로 먼저 전기회로 변수를 유한 요소법으로 구하고 이를 전기회로와 자계 회로에 대한 동력학 식에 포함시켜 해석하였다. 본 연구에서는 와류손의 영향을 고려한 실제 전자기 시스템인 점핑링 시스템을 대상으로 해석하여 유한요소법으로 자체인덕턴스와 상호 인덕턴스로 구해 해석한 값과 실험치를 비교하였다. 실험결과, 해석치가 2[mm]더 높은 값을 가지고 있었는데, 스프링 상수와 마찰계수의 추정에 기인한 것으로 실험을 통해 보상 될 수 있고 해석한 상태 방정식으로부터 원하는 위치로 제어 할 수 있는 상태방정식을 구하였다.

참 고 문 헌

[1] S.H. Lee and etal, "Fast Solving Technique for Mechanical Dynamic Characteristic in Electro magnetic Motional System by Electromagnetic State Equation Including Extracted Circuit Parameter", IEEE Trans, Applied superconductivity, Vol. 14, No. 2, 2004.
 [2] K.P. Patrick and etal, "Coupled Field and Circuit Analysis Considering the Electromagnetic Device Motion", IEEE Trans, Magnetics, Vol. 36, No. 4, 2000.
 [3] S.M. Lee and etal, "Reduced Modeling of Eddy Current-Driven Electromechanical System Using Conductor Segmentation and Circuit Parameters Extracted by FEA", IEEE Trans, Magnetics, Vol. 41, No. 5, 2005.