

자기 시스템의 해석과 설계

Design and Analysis of Electromagnetic System

박성욱*, 오진훈*, 윤시섭**

S. W. Park*, J. H. Oh*, and S. S. Yoon**

Abstract - This paper presents the design and analysis of the electromagnetic system such as jumping ring system. Also, we study the characteristics of dynamics for system with initial parameter. For the propose of system control, first, we simulate the MATLAB tool solving coupled differential equations with electric parameter, inductance and mutual inductances. Therefore, we design a jumping ring system using design results, implement, and analyze the jumping ring system real situation. For the near time, we present a control process, and compare of real system and software technique.

Key Words : electromagnetic system, design and analysis of the jumping ring system

1. 장 서 론

전자기 시스템은 1차 코일에 교류전류를 인가하여 생긴 자속에 의해 2차 코일 또는 링(도전체)에 유도전류가 흘러 2차측에 플레밍의 왼손의 법칙에 따라 힘이 발생되고, 이 힘은 반발력 작용으로 링이 부상되든지 2차 코일에 힘이 작용하여 초기위치에서 과도상태를 통해 정상상태의 높이에 도달하게 된다. 본 연구에서는 전자기 시스템을 해석하고 설계를 하기 위한 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 유한 요소법으로 자장을 해석하고 또한 힘과 거리, 속도, 전류를 해석하지만 해석 시간이 오래 걸리는 단점을 가지고 있다. 그래서 본 연구에서는 전기회로 상수를 FEM 방법으로 해석한 후에 이변수를 이용하여 전자기 시스템을 해석하는 방법을 통해 시간을 줄이고 해석의 용이성을 제안하고자 한다[1]. 이 방법은 참고문헌[1]이 S.H.Lee에 의해 제안되었지만 본 연구에서는 이 방법을 통해 실제 시스템을 설계하고 실제 시스템을 해석하고 이를 통해 전자기 시스템을 해석하고자 한다. 또한 실제 시스템을 구현하여 설계상과 실제 시스템상의 문제점을검토하여 향후 제어용 시스템으로 활용하는데 연구 목적을 두었다.

2. 장 전자기 시스템의 해석방법

전자기 시스템은 선형 자계 동력시스템으로 미분 방정식으로 나타내면 식 (1), (2)와 같이 표현된다.

*구미1대학 전기전공 부교수 · 공박

**서초초전자고등학교 전자과 교사

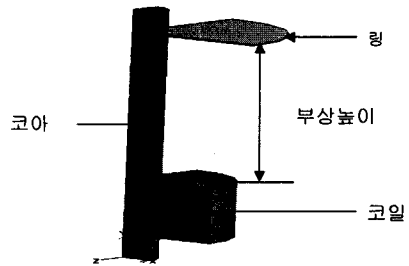


그림 1. 점핑링 전자기 시스템
Fig. 1. Jumping ring electromagnetic system.

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

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

여기서 $i(t)$ 는 인가교류 전류, $i(t)$ 는 코일에 흐르는 전류, R 은 코일의 저항, $\lambda(t)$ 는 자속, t 는 시간을 나타낸다. 식 (2)에서 f 는 자계에 인가한 힘을 나타내고, $z(t)$ 는 시간 t 에서 링의 부상 높이, 그리고 m, d, k 는 링의 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 전자기회로에서 식 (4)와 같이 표현된다.

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

여기서, M_{ij} 는 상호인덕턴스를 나타낸다. 본 논문에서는 3가지 전자기 시스템을 대상으로 사례연구 하고자 한다.

2.1 절 1개의 코일 시스템

한 개의 코일 시스템인 경우, 전기회로가 하나이고 전기회로 변수는 1차 코일의 자체 인덕턴스뿐이다. 전자계 힘, f 는 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 움직이는 부분의 위치를 나타낸다. 한 개의 코일 시스템을 해석하는 방법은 입력을 전류원과 전압원으로 하여 해석할 수 있다[1].

A. 입력이 전류원인 경우

입력 교류전원을 인가하면 코일이 여자되어 자속이 형성되고 이 자속에 의해 전자기 시스템이 동작하게 된다. 상태변수를 부상높이(y_1)와 속도(y_2)로 하면 아래와 같이 상태 방정식을 구할 수 있다.

$$\dot{y}_1 = y_2 \quad (6)$$

$$\dot{y}_2 = \frac{f - dy_2 - ky_1}{m} \quad (7)$$

B. 입력이 전압원인 경우

교류전원을 입력으로 인가하면 식 (1)의 전류값이 상태변수가 되어 움직이는 부분의 위치와 속도의 3개의 상태변수가 존재한다. 상태 방정식은 아래와 같다.

$$\dot{y}_1 = \frac{v(t) - Ry_1 - y_1 y_3 L'}{L + L_l} \quad (8)$$

$$\dot{y}_2 = y_3 \quad (9)$$

$$\dot{y}_3 = \frac{f - dy_3 - ky_2}{m} \quad (10)$$

여기서 L' 는 인덕턴스의 미분 항을 나타내고 L_l 은 누설리액턴스를 나타낸다.

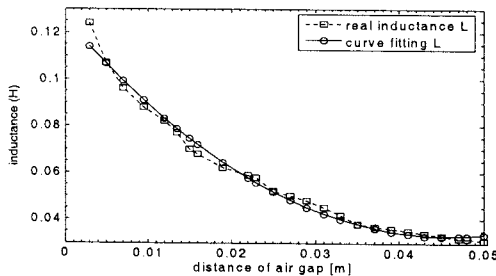


그림 2. 공극에 따른 인덕턴스의 변화량
Fig. 2. Inductance along the distance of air gap.

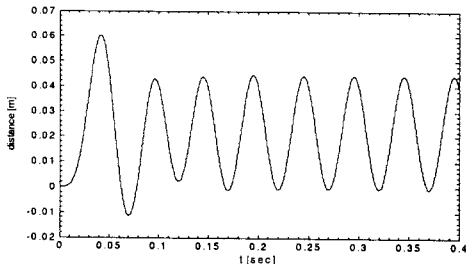


그림 3. 전류원으로 해석한 시스템의 높이 변화
Fig. 3. Position by analyzing a current source.

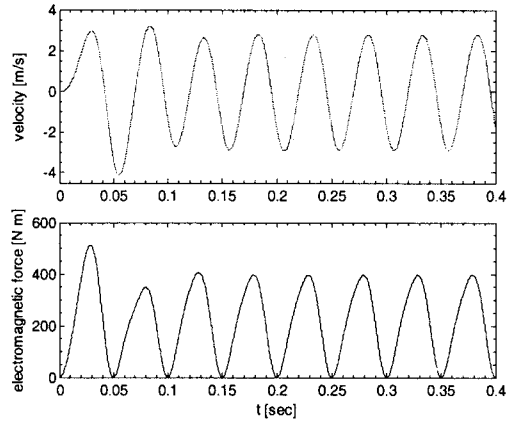


그림 4. 전류원으로 해석한 시스템의 속도와 힘
Fig. 4. Velocity and force of acting mass by a analyzing current source.

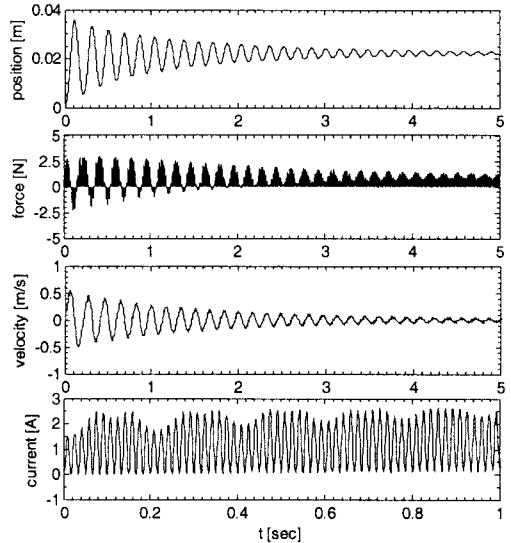


그림 5. 전압원으로 해석한 시스템의 상태 추이
Fig. 5 State variables for one coil system with a voltage source.

그림 2는 코일 1개인 시스템의 여자코일과 움직이는 부분의 차이를 공극이라 할 때 인덕턴스의 변화를 도시하였다. 26개의 공극에 대한 인덕턴스의 값을 커브 피팅한 것을 함께 도시하였다. 커브 피팅한 결과, 실제 값과 유사함을 알 수 있었다. 그림 3은 전류가 $i(t) = 3.5 \sin(2\pi 10t)$ 일 때 전류원인 경우에 높이를 도시한 그림이고, 그림 4는 움직이는 부분(질량)의 속도와 힘을 나타낸 결과 그림이다. 그림 5는 입력이 전압원인 경우로, $i(t) = 220 \sin(2\pi 10t)$, 상태변수와 전자계 힘을 도시한 그림이다. 본 사례연구에서는 참고문헌[1]과 동일한 변수 값, $m = 0.1, d = 1000, k = 5$ 을 사용하여 실험하였다.

2.2 절 2개의 코일 시스템

그림 6은 두개의 코일을 사용한 시스템으로 움직이는 부분

이 코일이고, 전압원이 고정고일(1차코일)에 인가하면 2차 코일은 반발력에 의해 부상한다. 이 경우에 2차코일에 100회 이상 코일을 감아서 표피효과와 와류전류는 없다고 가정하고 해석하였다. 입력은 60[Hz]이고 전압은 220[V]을 코일에 인가하였다. 해석의 편의성을 위해 실제 파라미터(점핑링의 설계 데이터)을 이용하여 전기회로 변수를 추출하였다. 해석결과를 그림 8에 도시하였다. 해석결과, 코일 2의 위치는 0.0848[m]에 부상되었다.

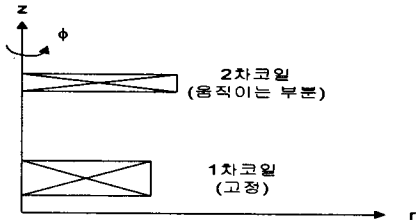


그림 6. 2차 코일 시스템
Fig. 6. Two coil system

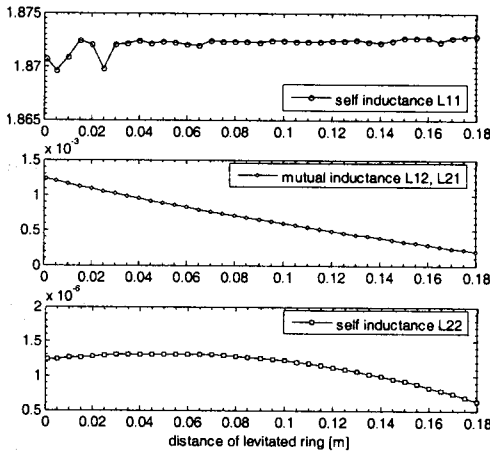


그림 7. 코일 1과 2의 인덕턴스와 상호인덕턴스
Fig. 7. Self inductance and mutual inductances between coil 1 and coil 2.

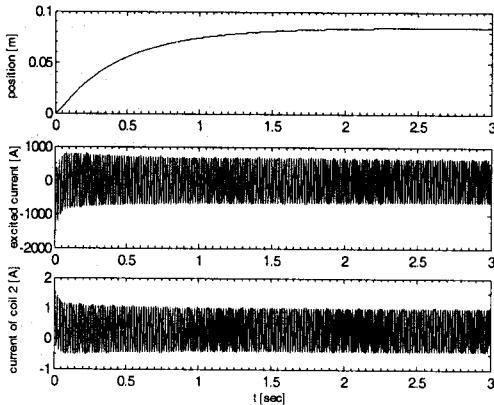


그림 8. 위치, 여자전류, 코일2의 전류
Fig. 8. Position, excited current, and current of a coil 2.

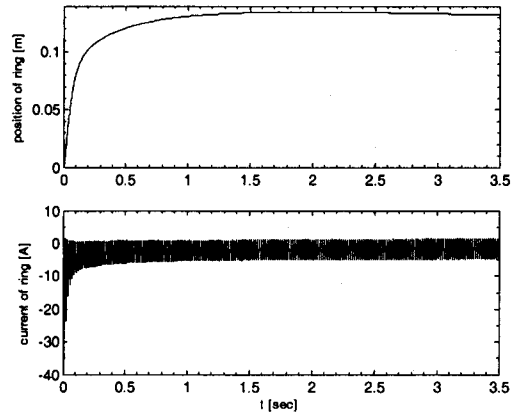


그림 9. 점핑링 인 경우, 링의 위치와 전류
Fig. 9. Position and current of ring with the jumping ring system.

3. 장 점핑링 시스템

실제 전자기 시스템인 점핑링 시스템을 대상으로 실험하고자 한다. 2차 코일 시스템에서 2차 코일대신에 전도체인 알루미늄 링을 사용하였다. 그래서 와류손에 의한 영향을 고려하여야 한다. FEM이 해석상의 오차와 와류손의 영향이 있다는 점을 고려할 때 실제 부상높이와 설계상의 오차는 존재한다. 점핑링 시스템 설계시의 파라미터 (1.2[mm] 1차코일 1,400[회], 링의 무게 92[g], 인가한 전압 220[V], 60[Hz])를 기초하여 설계한 결과 인덕턴스와 상호인덕턴스가 그림 7에 도시하였다. 실제 시스템에 전압을 인가하고 자체 식과 비교한 결과, $m = 0.092 [kg]$, $d = 2.5 [Ns/m]$, $k = 1.25 [N/m]$ 로 이 데이터를 가지고 사례연구하였고 결과를 그림 9에 도시하였다. 0.123[m]에 점핑링이 위치하여 이론치와 차이가 있음을 알았다.

4. 장 결론

본 연구에서는 전자기 시스템을 해석하기 위해 전기회로와 자체 회로에 대한 동력학 식을 유도하였고 이를 FEM으로 해석시 생기는 시간 손실을 보상하였다. 또한 실제 시스템인 점핑링 시스템을 대상으로하여 실제 시스템 데이터로부터 구한 인덕턴스와 상호 인덕턴스로부터 점핑링 시스템과 코일 2 시스템과 결과를 분석하였다.

참고 문헌

[1] S.H. Lee, I.G. Kwak, H.S. Chol, S.M. Lee, I.H. Park, and W.K. Moon, "Fast Solving Technique for Mechanical Dynamic Characteristic in Electromagnetic Motional System by Electro-Magnetic State Equation Including Extracted Circuit Parameter", IEEE Trans, Applied superconductivity, Vol. 14, No. 2, 2004.