

## 온도를 고려한 전기-기계 결합 시스템의 운동 특성 해석

최윤석\*, 곽대용, 성탄일, 김영선, 박일한  
성균관대학교

### Dynamic Characteristic Analysis of Electro-Mechanical Coupled System Considering a Temperature

Yoon-Seok Choi, Dae-Yong Kwak, Tan-Il Sung, Young-Sun Kim, Il-Han Park  
Sungkyunkwan University

**Abstract** - As the system with current is heat generation system, it has to be analyzed to consider effect in virtue of temperature. Hence this paper examined the solution of the coupled thermal-electro-mechanical problem. Mechanical modeling, force computation, electromagnetic field solution, and heat transfer modeling are addressed. It accomplished electro-mechanical coupled system analysis considering a temperature, the analysis method is by using extracted circuit parameters with resistivity by heat transfer analysis and inductance by electromagnetic analysis.

Key word - Electro-mechanical system, Heat transfer, Coupled system.

#### 1. 서 론

한 물리적 시스템을 목적에 부합하도록 제어하기 위해서는 가상의 시스템 모델을 가지고 분석하고, 이해하여, 실험하는 것이 필요하다. 특히 전기-기계 결합시스템은 전기적인 입력에 의한 기계적인 출력 특성뿐만 아니라 전체 시스템과의 상호 작용에 의한 다양한 동특성의 해석을 필요로 하게 된다. 이미 많은 논문들이 이런 결합 시스템에 대해서 발표되어 왔으며 최근에는 전자기 시스템의 회로정수를 비교적 정해에 가깝게 분석할 수 있게 되어 전자기 시스템에 대한 제어분야와 기계역학 분야에서 보다 실제 상황에 가까운 시뮬레이션이 가능하게 되었다[1]. 본 논문에서는 보다 정확하고 실제에 가까운 해를 구하기 위해 기존의 전기-기계 결합 시스템의 해석방법에 더하여 온도 문제를 결합한 열-전기-기계 결합 시스템의 운동 특성을 해석하였다.

#### 2. 해석 이론

열-전기-기계 결합 시스템은 서로 상호 관계를 갖는 상태방정식으로 표현할 수 있다. 본 장에서는 상태방정식을 완성하기 위한 파라미터를 추출하기 위한 해석 이론에 대해 설명하였다.

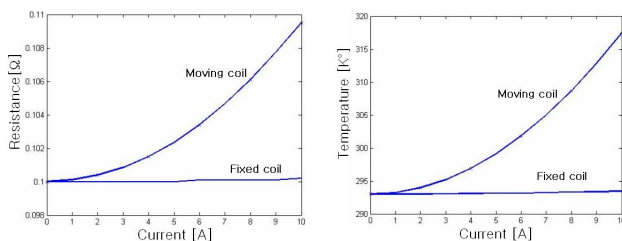
##### 2.1 열전달 해석

온도에 따른 저항의 변화를 해석하기 위해서 식 (1)과 (2)를 이용하여 비선형 열전달 해석을 수행하였다.

$$-\frac{\kappa(T)}{\rho(T)} \nabla^2 T = J^2 \tag{1}$$

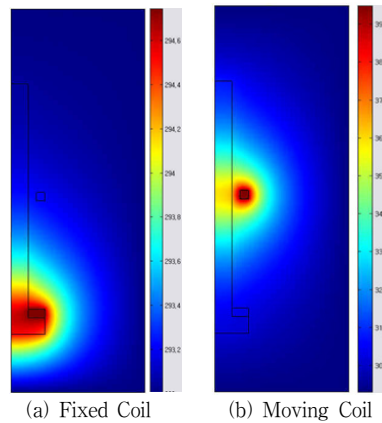
$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha(T - T_0)) \tag{2}$$

여기서,  $\kappa$ 는 코일의 열전도도,  $\rho_0$ 는 코일의 비저항,  $\alpha$ 는 코일의 열전달 계수,  $J$ 는 전류밀도,  $T$ 는 온도이다. 그림 1에 전류의 변화에 따른 온도의 변화와 온도의 변화에 따른 저항의 변화를 나타내었다.



<그림 1> 전류에 따른 온도 및 저항

그림 2는 열전달 해석을 통한 해석 모델의 온도 분포이다.



<그림 2> 온도 분포

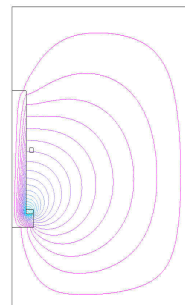
##### 2.2 전자기장 해석

식 (3), (4)를 이용하여 3차원 축대칭 정자장 해석 및 위치 변화에 따른 인덕턴스  $L$ 을 계산하였다.

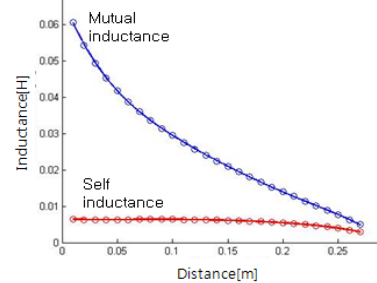
$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu \vec{J} \tag{3}$$

$$L = \frac{N}{I} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s} = \frac{N}{I} \oint_l \vec{A} \cdot d\vec{l} \tag{4}$$

$A$ 는 자기벡터 포텐셜,  $B$ 는 자속밀도,  $N$ 은 코일의 턴수,  $I$ 는 전류이다. 그림 3은 해석 모델의 등포텐셜 분포이고, 그림 4은 위치에 따른 자기 인덕턴스 및 상호 인덕턴스이다.



<그림 3> 등포텐셜 분포



<그림 4> 인덕턴스

##### 2.3 열-전기-기계 결합 시스템 해석

열-전기-기계 결합시스템의 해석을 위하여 식 (5)의 회로 방정식을 도입하였다. 방정식에 사용되는 저항  $R(T(i))$ 과 인덕턴스  $L(z(t))$ 는 파라미터로 처리하였다.

$$V(t) = I(t)R(T) + \frac{d\lambda}{dt} \quad (5)$$

$$\lambda = \lambda(L(x(t)), I(t)) \quad (6)$$

식 (7)은 기계적 특성을 고려하기 위한 운동방정식으로  $M$ 은 질량,  $D$ 는 감쇄계수,  $K$ 는 스프링 상수 및  $F$ 는 시스템에 가해진 힘이다. 힘  $F$ 는 전자기력과 중력의 합으로 식 (8)과 같이 표현된다.

$$M\ddot{z} + D\dot{z} + Kz = F \quad (7)$$

$$F = F_e - F_g = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{dz} - Mg \quad (8)$$

식 (5)와 식(7)을 연립하여 계산함으로써 열을 고려한 전기-기계 결합시스템의 특성을 파악할 수 있다.  $y_1 = I_1$ ,  $y_2 = I_2$ ,  $y_3 = v$ ,  $y_4 = z$ 에 대한 상태방정식은 아래의 식과 같다. 여기서,  $I_1$ ,  $I_2$ 는 Fixed coil과 Moving Coil의 전류,  $v$ ,  $z$ 는 Moving coil의 속도와 변위이다.

$$\dot{y}_1 = \frac{AL_{22} - BL_{12}}{L_{11}L_{22} - L_{12}L_{21}} \quad (9)$$

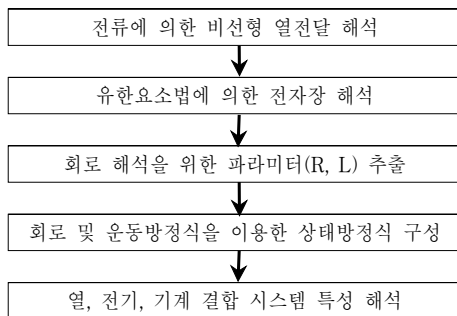
$$\dot{y}_2 = \frac{BL_{11} - AL_{21}}{L_{11}L_{22} - L_{12}L_{21}} \quad (10)$$

$$\dot{y}_3 = y_4 \quad (11)$$

$$\dot{y}_4 = \frac{F - Dy_4 - Ky_3}{M} \quad (12)$$

위 식에서  $A = V - R_1y_1 - y_2L'_{12}y_4$ ,  $B = -R_2y_2 - y_1L'_{21}y_4 - y_2L'_{22}y_4$ 이다.  $L_{11}$ ,  $L_{22}$ 는 각 코일의 자기인덕턴스이고,  $L_{12}$ ,  $L_{21}$ 은 두 코일 간의 상호인덕턴스이며,  $L_{12} = L_{21}$ 이다[2].

그림 5는 결합시스템의 해석 흐름도를 나타내었다.



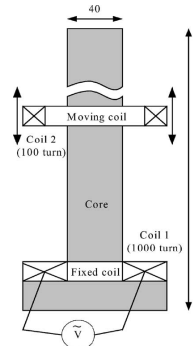
<그림 5> 결합시스템 해석 흐름도

### 3. 적용 사례

제한한 해석 이론을 적용하기 위하여 Jump Ring 모델을 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 본 장에서는 해석 모델의 제원과 결과에 대하여 설명하였다.

#### 3.1 해석 모델

해석 모델은 그림 6과 같이 두 개의 코일로 이루어진 시스템으로 Fixed coil에 교류전압을 인가하면 Moving coil에 유도전류가 발생하여, 두 코일 사이에 밀어내는 힘을 발생하게 된다[3]. 표 1은 해석 모델의 세부적인 제원을 나타내고 있다[2].



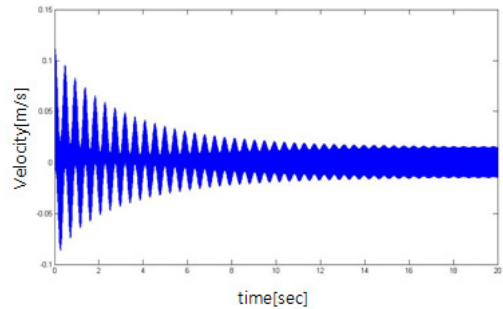
<그림 6> 점프 링 모델

<표 1> 해석 모델의 제원

Details	value	unit
mass of moving coil	0.1	kg
number of turns(moving coil)	100	turns
number of turns(fixed coil)	1000	turns
source	$220\sin\omega t$	V
frequency	60	Hz
Inductance of fixed coil	0.7065	H
Initial position	30	mm

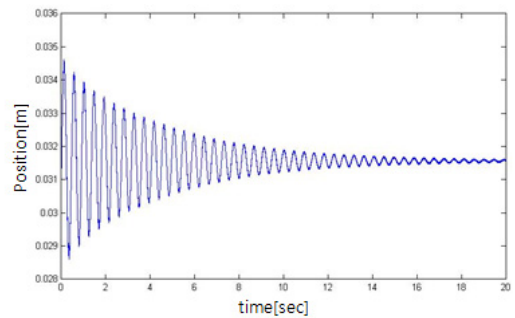
#### 3.2 해석 결과

그림 7에 온도를 고려하여 해석한 Moving coil의 속도변화를 나타내었다.



<그림 7> 시간에 따른 속도

그림 8은 시간에 따라 변하는 Moving coil의 위치 변화이다.



<그림 8> 시간에 따른 Moving coil의 위치

### 4. 결론

전류를 포함한 시스템은 열을 발생하게 된다. 발생된 열은 저항을 증가시켜 시스템 파라미터를 변화시키므로 시스템 해석을 위해서는 열에 대한 해석이 필요하다. 본 논문은 두 개의 코일로 이루어진 전기-기계 결합시스템에 대하여 온도를 고려한 해석 모델의 운동 특성을 해석하였다.

#### [참고 문헌]

- [1] P. Kuo-Peng, N. Sadowski, N. J. Batistela, and J. P. A. Bastos, "Coupled field and circuit analysis considering the electromagnetic device motion", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.36, No.4, pp. 1458-1461, July 2000
- [2] Se-Hee Lee, In-Gu Kwak, Hong-Soon Choi, Seung-Myen Lee Il-Han Park and Won-Kyu Moon, "Fast Solving Technique for Mechanical Dynamic Characteristics in Electromagnetic Motional System by Electro-Mechanical State Equation Including Extracted Circuit Parameter", IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol.14, No.2, pp. 1926-1929, June 2004
- [3] David J. Griffiths, "Introduction to Electrodynamics (Second Edition)", Prentice Hall, Inc., 1995