

유한요소법(FEM)을 이용한 Zero Power 제어 자기부상시스템의 동적시물레이션

이주영, 김윤현, 김솔, 이주, 이철직
 한양대학교 전기공학과, * 대림대학교 전기공학과

Dynamic Simulation of Zero Power Control Maglev System by Finite Element Method

Ju Young Lee, Youn Hyun Kim, Sol Kim, Ju Lee, and Chul Jik Rhee*
 Dept. of Electrical Eng. Hanyang Univ., Dept. of Electrical Eng. Daelim College*

Abstract - It is a indispensable condition that the simulation and the experiment to improve a efficiency of maglev system. We usually carry out the simulation using the approximate equation, because it is impossible to use a exact modeling such as a practice modeling.

This paper proposed a ideal simulation ap to the maglev system modeling by Finite Ele Method. To save the electrical energy, zero p control method is used, and verifying the feasibi FEM dynamic simulation, we make an exper with a TI DSP TMS320F240-based hardware.

1. 서 론

자기부상시스템은 기존의 바퀴접촉방식의 반송장치와 비교해볼 때 소음, 진동이 적고 본진이 발생되지 않는 장점을 가지고 있어, OA기기에서 자기부상열차에 이르기까지 많은 범위에서 연구가 진행되고 있다[1]. 이 자기부상시스템 중에서 시스템 하부에 장착된 하이브리드 전자석(Hybrid Controlled PM)의 흡인력을 이용한 상전도 흡인식(EMS)이 한국의 UTM(Urban Transit Maglev)모델로 선정되어 많은 연구가 진행된 바 있다. 전자석 흡인식 타입은 구조가 간단하고, 부상에 필요한 전력을 최소로 할 수 있는 제로파워제어가 가능하다. 제로파워제어기법을 사용할 경우 과도상태에서만 전력의 감소가 발생하여 경제적인 운전이 가능하며, 히트류계와 같은 높은 보자력을 갖는 영구자석을 사용할 경우 평형 상태에서 최소의 전력으로 충분한 부상력을 얻을 수 있다[2].

자기부상시스템의 제어성능 향상을 위해서는 시물레이션과 실험이 필수적이다. 여기서, 시물레이션의 수행시 실제모델과 같은 정확한 모델링이 불가능하므로 근사식을 이용한 시물레이션이 수행되고 있다. 근사식을 사용한 해석에서는 실제 시스템과의 차이로 인하여 항상 오차를 수반하게 되어 정확한 시물레이션이 이루어지지 못하게 된다.

따라서, 본 논문에서는 유한요소법(FEM)을 이용하여 자기부상시스템을 모델링하여 시물레이션을 수행할 수 있음을 보인다. 시간의 변화에 따른 속도, 변위, 전류를 알아내기 위해 운동방정식과 전압방정식을 고려하고, 시간차분 유한요소법을 이용하여 해석한다. 또한 부하의 변화에 따른 전력의 손실을 최소화 하기 위하여 제로파워 제어기법을 이용한다. 공극에 따른 전자기력의 비선형성을 고려한 Extended Luenberger Observer(ELO)를 이용하여 부하를 관측하고, 관측한 부하를 이용하여 공극을 보상하여 FEM을 이용한 시물레이션을 수행하였다. 마지막으로 TI사의 DSP TMS 320F240을 이용한 실제 실험을 통하여 본 시물레이션의 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 자기부상시스템의 모델링

그림1은 본 논문에서 구성한 상전도흡인식 자기부상시스템의 모델링을 나타내며, 그림2는 이 모델링을 이용하여 자기등가회로를 구성한 것이다. 표1은 자기부상시스템의 제원을 보여준다. 자기등가회로로부터 전자기력 F_m , 인덕턴스 L , 쇄교자속 B 를 유도할 수 있으며 각 결과는 식 (1), (2), (3)과 같이 표현할 수 있다[3].

자기 부상 시스템은 비선형시스템이기 때문에, 선형화를 위하여 운동 방정식을 Taylor 급수로 전개하여 첫 번째 항을 취하면 식 (4)와 같은 선형화된 식으로 나타낼 수 있다. 여기서 Taylor 급수로 전개하면서 2번째항 이후를 모두 무시하였으므로 필연적으로 오차가 발생하게 된다. 또한 쇄교자속 유도시에도 계산의 편의를 위하여 미소한 값을 갖는 항을 모두 소거하였으므로, 항상 오차를 수반하게 된다.

이런 경우 모델링하는 단계에서부터 오차를 포함하고 있기 때문에, 해석적 방법으로는 정확한 시물레이션을 수행할 수가 없다. 따라서 본 논문에서는 모델링 단계에서의 오차를 최소화하기 위하여 FEM을 이용한 동적인 시물레이션을 수행하였다.

$$F_m = -\frac{\partial W}{\partial z} = \frac{S}{2\mu_0} \left(\frac{B_r - bi}{1+az} \right)^2 \quad (1)$$

$$L = \frac{N^2}{R} = \frac{N^2 \mu_0 S}{\frac{l_c}{\mu_c} + 2z + \frac{l_p}{\mu_m}} \quad (2)$$

$$B = \frac{\phi}{S} = \frac{B_r + Ni \frac{\mu_m}{l_p}}{\frac{\mu_m}{l_p} 2z + 1} \quad \text{여기서 } \left(a = \frac{\mu_m}{\mu_0} \frac{2z}{l_p}, b = \frac{\mu_m}{l_p} N \right) \quad (3)$$

$$m \frac{d^2 \Delta z}{dt^2} = \frac{S}{\mu_0} \left(b \frac{(B_r - bi)}{(1+az_0)^2} \Delta i + a \frac{(B_r - bi_0)^2}{(1+az_0)^3} \Delta z \right) \quad (4)$$

$$\frac{d\Delta i}{dt} = \frac{1}{L_0} (-R\Delta i + \Delta E) \quad (5)$$

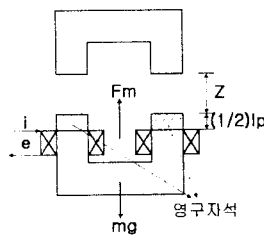


그림1. 자기부상모델링

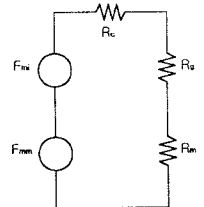


그림2. 자기등가회로

표 1. 자기부상시스템의 제원

고정자	전 체 높 이	40(mm)
	전 체 길 이	107(mm)
	치 높 이	30(mm)
	치 폭	5(mm)
CPM	중 량	3.91(kg)
	코 일 턴 수	334(turn)
	영구자석단면적	629.35(mm ²)
	전류 자속 밀도	1.2(T)

2.2 확장 Luenberger 관측기

자기부상시스템에 가변부하가 인가되었을 경우, 각각의 부하에 따라 전류가 영으로 수렴하는 평형공극의 위치를 알아내는 것이 불가능하므로, 부하관측기를 이용한 공극 보상기를 설계하여 제로파워제어에 사용한다. 제로파워제어를 수행할 경우 부하의 변화에 따라 관측한 부하량 만큼 공극이 보상되어 평형공극을 추종하도록 제어할 수 있다. 본 논문에서는 ELO를 사용하여 부하량을 관측하여 공극을 보상하였다.

ELO는 상태방정식을 구성함에 있어서, 상태부분과 가변하는 파라미터 값들을 분리하여 상태방정식을 고려한다. 선형 Luenberger Observer는 가변하는 파라미터인 인덕턴스(L)를 고려해주지 못함으로써 실제 제어시 응답성이 낮고 큰 리플이 발생하는데, ELO에서는 이와 같은 인덕턴스를 고려해줌으로써 비선형적인 요소를 포함한 제어를 수행해줄 수 있다. ELO에서 전차원관측기로 구성할 경우 계인의 수가 많으므로 최소차원관측기를 사용하여 계인의 수를 줄일 수 있다.

그림3은 최소차원관측기를 이용한 공극보상기로 제로파워를 수행한 블록선도를 나타내며, ELO를 이용하여 상태방정식을 구성하면 식(6)과 같고, 최소차원관측기를 유도하기 위해 식(7)과 같은 조건식을 사용한다.

$$z'(t) = \begin{pmatrix} F_L \\ L' \end{pmatrix} = Fz(t) + K(x)y(t) + H(x)u(t) + G(x)$$

$$= \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_L \\ L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z \\ v \\ i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} H_1 \\ H_2 \end{pmatrix} E + \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$TA(\dot{x}(t)) - FT = K(\dot{x})C$$

$$TB = H$$

$$G(\dot{x}) = Tg(x) \quad (7)$$

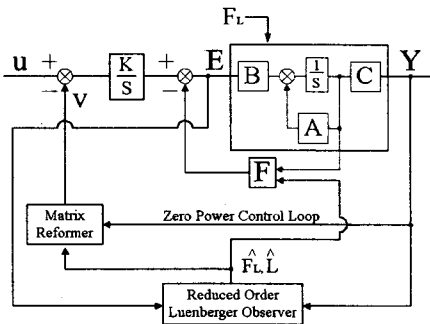


그림3. ELO를 사용한 제어블록도

$$T = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} & T_{15} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} & T_{25} \end{pmatrix}, F = \begin{pmatrix} F_{11} & 0 \\ 0 & F_{22} \end{pmatrix}$$

$$P_1 = \frac{1}{a_{23}} \left\{ a_{21} - \frac{F_{11}^2}{a_{12}} \right\}, S_{12} = - \left(\frac{F_{11}a_{33} - F_{11}^2}{a_{35}} \right) P_1 \left\{ \frac{F_{11}^2}{a_{11}a_{35}} - a_{32} \right\}$$

$$S_{21} = \frac{F_{22}}{a_{24}} a_{21} - \left(\frac{F_{22}^2}{a_{12}a_{24}} \right), S_{23} = \frac{a_{32}}{a_{12}a_{35}} (F_{22}^2) + a_{51}$$

$$S_{31} = \frac{F_{22}}{a_{24}} a_{23}, S_{33} = \frac{F_{22}a_{33} - F_{22}^2}{a_{35}}$$

$$R_1 = k_{11} + \frac{F_{11}}{a_{12}} k_{12} - P_1 k_{13}, R_2 = k_{21} + \frac{F_{22}}{a_{12}} k_{22} - \frac{S_{21}k_{23}}{S_{31}}$$

$$T_{25} = - \frac{S_{31}R_2}{S_{33}S_{21}}, T_{15} = - \frac{(S_{23}S_{31} - S_{21}S_{33})T_{25} - R_2S_{31}}{S_{21}S_{32}}$$

$$T_{24} = \frac{k_{23} - S_{33}T_{25}}{S_{31}}, T_{14} = \frac{a_{24}}{F_{11}a_{23}} \left\{ k_{13} - \left(\frac{F_{11}a_{33} - F_{11}^2}{a_{35}} \right) T_{15} \right\}$$

$$T_{21} = \frac{1}{a_{12}} \left\{ k_{22} + \left(\frac{F_{22}}{a_{24}} \right) T_{24} - \frac{F_{22}}{a_{35}} a_{32} T_{25} \right\}, T_{12} = \frac{F_{11}}{a_{24}} T_{14}, T_{13} = \frac{F_{11}}{a_{35}} T_{15}$$

$$T_{11} = \frac{1}{a_{12}} \left\{ k_{12} + \left(\frac{F_{11}}{a_{24}} \right) T_{14} - \frac{F_{11}}{a_{35}} a_{32} T_{15} \right\}, T_{22} = \frac{F_{22}}{a_{24}} T_{24}, T_{23} = \frac{F_{22}}{a_{35}} T_{25}$$

이상의 수식들을 이용하여 식(8)와 식(9)와 같이 부하와 인덕턴스를 관측할 수 있다.

$$F_L' = (F_{11}F_L + F_{12}L) + (K_{11}z + K_{12}v + K_{13}i) + H_1E + G_1 \quad (8)$$

$$L' = (F_{21}F_L + F_{22}L) + (K_{21}z + K_{22}v + K_{23}i) + H_2E + G_2 \quad (9)$$

2.3 시뮬레이션과 실험

FEM을 이용한 자기부상시스템 해석의 순서도는 그림 4와 같다. 먼저 요소분할을 수행한후 Maxwell Stress Tensor 법을 이용하여 전압이 인가되었을 때 공극에서의 전자기력을 얻어냈다.

$$F_x = \int \frac{w}{2\mu_0} \{ n_x (B_x^2 - B_y^2) + 2n_y B_x B_y \} dl \quad (10)$$

여기서

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} = \frac{1}{2\Delta} (d_i A_i + d_j A_j + d_k A_k) \quad (11)$$

$$B_y = \frac{\partial A_z}{\partial x} = \frac{1}{2\Delta} (c_i A_i + c_j A_j + c_k A_k) \quad (12)$$

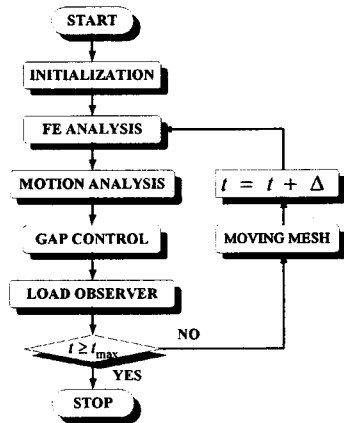


그림4. 해석 순서도

이 전자기력을 운동방식에 적용하여 공극, 속도, 가속도를 얻어냈다. 또한 전압인가시의 발생하는 전류를 전압방정식으로부터 얻어냈다. 시간에 따른 시스템의 연속적인 변화를 알아보기 위해 Moving Mesh를 이용하여 공극의 변화에 따른 전자기력의 변화를 해석하였다.

ELO를 이용한 제로파워제어를 수행하기 위해서는 부하와 인덕턴스를 관측해야 한다. FEM을 이용할 경우 절점의 자속으로부터 각각의 공극에서의 실제 인덕턴스를 간단하게 구할 수 있다는 장점이 있다. 인덕턴스의 관측은 식(9)를 이용하여 부하, 인덕턴스, 공극, 속도, 전류, 전압에 적당한 게인값을 곱하여 얻어냈다. 시간의 변화에 따른 실제 인덕턴스와 관측한 인덕턴스를 살펴보면 그림5와 같고, 두 파형을 비교해 볼 때 실제값과 비슷한 관측파형을 얻어낼수 있었다. 여기서 얻어진 인덕턴스의 파형을 이용하여 인가되는 부하를 관측하게 된다.

FEM을 이용한 시뮬레이션은 총 10초동안 수행되었다. 처음 0초 ~1초사이는 초기 상태를 나타내며, 3.5초~7.5초사이에 1.3kg의 부하가 인가되었다. 그림 6과 그림 7은 FEM을 이용한 공극과 전류의 파형을 나타낸다. 그림7을 보면, 부하인가시 전류가 영으로 수렴하는 제로파워제어가 수행됨을 알수 있다.

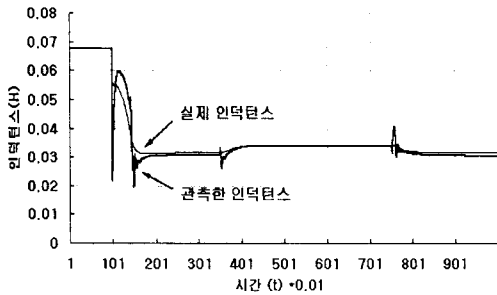


그림5. FEM을 이용하여 얻은 실제 인덕턴스와 관측한 인덕턴스

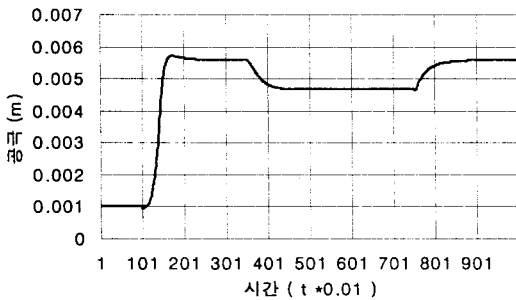


그림6. FEM으로 시뮬레이션한 ELO의 공극파형

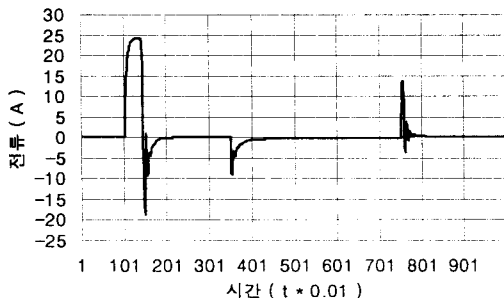


그림7. FEM으로 시뮬레이션한 ELO의 전류파형

FEM을 이용한 시뮬레이션의 타당성을 검증하기 위하여 자기부상실험장치를 설계하여 공극과 전류의 변화를 알아보았다.

그림 8은 자기부상 실험장치의 개략도를 나타낸다. 본 실험장치는 제어기의 고속연산을 위하여 TI사의 TMS 320F240을 이용하였다. 실제 파형과 비교해볼 때 FEM을 이용하여 시뮬레이션 하였을 경우 오버슈트와 언더슈트가 별로 발생하지 않는 실제 파형과 비슷한 파형을 얻을 수 있었다.

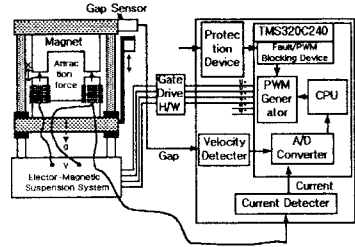


그림8. 실험 장치

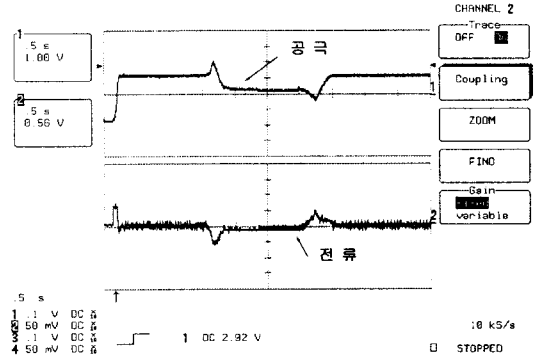


그림9. 실험 파형 (ELO)

3. 결 론

자기부상시스템을 FEM을 이용하여 시뮬레이션한 결과 오버슈트나 언더슈트가 없는 이상적인 파형을 얻어낼 수 있었다. 근사식을 사용하였을 때 실제모델과의 차이로 인해 생길수 있는 오버슈트나 언더슈트등이 거의 발생하지 않았으며, 실험결과와도 비슷한 파형을 얻어낼 수 있었다.

FEM을 이용한 시뮬레이션은 정확한 시뮬레이션을 수행할 수 있다는 장점이 있는 반면, 한번 시뮬레이션 하였을 때 시간이 오래 걸려 게인값을 구하기가 어렵다는 단점이 있었다. 그러나, 컴퓨터의 성능이 계속 향상되고 있으므로 시뮬레이션 구동 시 걸리는 시간은 현저히 단축될 것이며, 앞으로 정확한 시뮬레이션을 수행할 수 있는 강력한 수단으로 사용될 수 있을것으로 보인다.

(참 고 문 헌)

- [1] K. Yosida, J.Lee, Y.J.Kim "3-D FEM field Analysis in controlled-PM LSM for maglev vehicle", *IEEE Trans. Magnetics* vol 33, 1997
- [2] M. Morishita et al, "A new Maglev system for magnetically levitated carrier system," *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, vol. 32B, no. 4, 1989, pp. 230-236
- [3] 김광민, 김윤현, 전연도, 이주, 김학련 "부하 관측기에 의한 공극 보상기를 포함한 제로파워 부상제어", *대한전기학회 2000년 하계학술대회*