

영구자석을 이용한 와전류 자기반발식 부상장치의 성능 향상 설계

장 석명, 권 정기, 성 호경*, 김 봉섭*, 이 성호**
 충남대학교, 한국기계연구원*, LG D/A 연구소**

Improved Efficiency Design of Eddy-current Magnetic Repulsion System Using Permanent Magnets

S.K. Jang, J.K. Kwon, H.K. Sung*, B.S. Kim*, S.H. Lee**
 Chungnam National Uni., KIMM*, LG D/A**

Abstract - This paper deals with eddy-current magnetic repulsion system. The passive system employing permanent magnets on the moving part maximizes levitation forces by using Halbach array and conducting plate. We predict force characteristics according to permanent magnet array and conducting bar

1. 서 론

자기부상 기술은 지난 수십 년 동안 독일과 일본을 중심으로 지속적으로 발전하였으며, 매우 다양하게 산업현장에 응용되어 왔다. 그 중에서도 자기부상열차, 플라이휠 등의 분야에서는 기존 시스템을 보완하는 동시에 자기부상의 장점을 살려 발전해 오고 있다.[1]

본 논문은 Halbach 배열 영구자석을 이용한 와전류 자기반발식 부상장치에 관한 것으로, 본 부상장치는 일정 속도 이상에서 요구 부상력이 발생하며, 항시 제동력이 작용하는 단점을 가지고 있으나, 전력 소비가 없고 제어장치가 불필요한 장점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 공간고조파법과 유한요소법을 이용하여 부상장치의 설계 변수에 따른 부상력과 제동력의 비를 확인하고, 부상력과 제동력의 비가 최대가 되는 설계 변수를 도출하였다. 또한 1차측 영구자석의 배열에 따른 힘특성과 2차측 도체의 형상에 따른 힘특성을 확인하고, 부상력과 제동력의 비가 최대가 되는 영구자석 배열 및 형상을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 와전류 자기반발식 부상장치 및 특성방정식

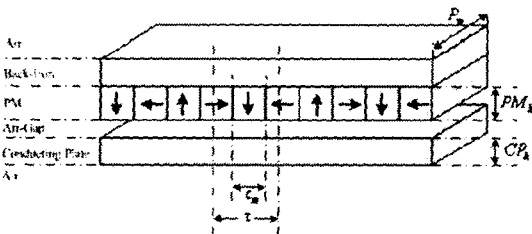


그림 1 Halbach 배열 영구자석 부상 시스템

그림 1은 와전류 자기반발식 부상장치를 보여주고 있다. 그림에서 영구자석은 Halbach 배열을 갖고 있으며, 2차측에는 도전성이 우수한 평판으로 구성되어 있다. 일반적으로 Halbach 배열 영구자석은 자기차폐 특성을 갖고 있으나 백아이언으로 보다 큰 공극 자속밀도를 얻을 수 있다.

맥스웰 방정식에 기초하여 그림 1의 모델에 대한 모든 영역에서의 지배방정식은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\nabla \times (\nabla \times A) = \begin{cases} \mu_i \nabla \times M \\ \sigma_i \mu_i [\nabla \times A] \end{cases} \quad (1)$$

여기서 M 은 영구자석의 자화량에 대한 수평 및 수직 성분의 n -차 푸리에 급수 전개식의 크기이다. 식(1)로부터 자기 벡터 포텐셜 A 는 식(2)와 같은 일반해와 특수해로 구성된다.

$$A_{zi} = [C_i e^{a_i z} + D_i e^{-a_i z}] \cdot e^{jk_x x} + S_i \quad (2)$$

식 (2)는 그림 1의 모델에 대하여 모든 영역에서 만족하는 해이다. 자속밀도와 자기 벡터 포텐셜의 정의식 $\nabla \times A = B$ 를 이용하여 모든 영역에서 자속밀도 방정식을 유도할 수 있으며, 식 (3)과 같다.

$$B_{xi} = \frac{\partial A_{zi}}{\partial y} = a_i [C_i e^{a_i z} - D_i e^{-a_i z}] \cdot e^{jk_x x} \quad (3)$$

$$B_{yi} = -\frac{\partial A_{zi}}{\partial x} = -jk_x [C_i e^{a_i z} + D_i e^{-a_i z}] \cdot e^{jk_x x} + S_{Bp}$$

그림 1의 모델에서 전류의 방향은 z -성분만 존재한다고 가정한다. 따라서 와전류의 방향도 z -성분만 존재하게 되고, 와전류가 분포하는 도체판에서 Ampere의 법칙에 의하여 식 (4)와 같은 와전류가 존재한다.

$$J_e = -j\omega K_n (C_e e^{a_e z} + D_e e^{-a_e z}) e^{jk_x x} \quad (4)$$

2.1.1 와전류 자기반발식 부상장치의 특성해석

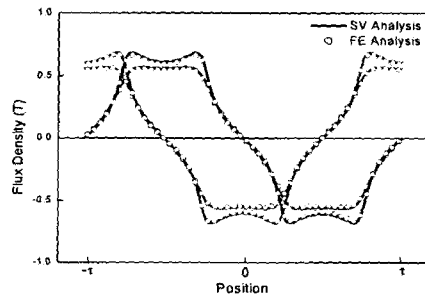


그림 2 도체판 및 공극에서의 자속밀도 비교

그림 2는 식 (3)을 이용하여 해석 모델의 공극과 도체판 표면에서 자속밀도의 접선 및 법선 성분을 도시하고 있으며, 유한요소해석 결과와 비교하였다. 그림 3과

4는 각각 자속밀도 특성식과 와전류 특성식을 이용하여 속도에 따른 특성 해석을 보여주고 있다. 여기에서 도체 판 표면에서의 접선 성분 자속밀도와 와전류 모두 속도가 증가함에 따라 증가함을 확인할 수 있다.

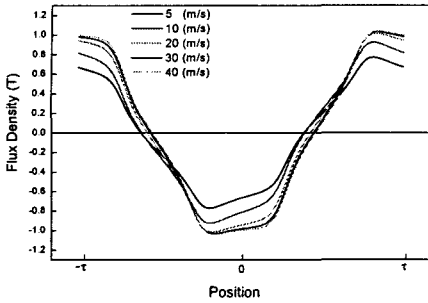


그림 3 도체판 표면에서의 속도에 따른 접선 성분 자속밀도

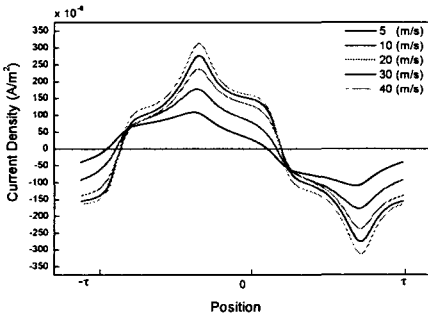


그림 4 도체판 표면에서의 속도에 따른 와전류 밀도

해석 모델의 힘특성식은 맥스웰 응력법을 이용하여 식 (5)와 같이 부상력과 제동력을 계산할 수 있다.

$$F_t = \frac{w_s \phi}{2\mu_0} \int_0^{2r} \text{Re}(B_{z2} B_{z2}^*) dx \quad (5.a)$$

$$F_n = \frac{w_s \phi}{4\mu_0} \int_0^{2r} (|B_{z2}|^2 - |B_{z1}|^2) dx \quad (5.b)$$

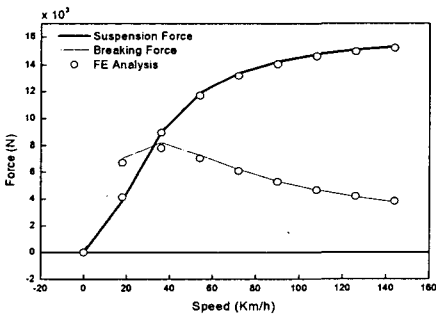


그림 5 해석 모델의 속도에 따른 부상력과 제동력

그림 5는 힘특성식을 이용하여 속도에 따른 부상력과 제동력을 보여주고 있다. 또한 유한요소법을 이용하여 힘특성을 비교하였으며, 그림 5에서와 같이 두 해석법에 의한 힘특성이 매우 잘 일치함을 확인할 수 있다.

2.2 설계 변수에 따른 부상장치의 힘특성

와전류 자기반발식 부상장치는 영구자석만을 이용하여 일정한 속도 이상에서 부상력을 얻는 장치이다. 하지만 일정한 제동력이 항상 존재하는 단점을 갖고 있다. 이런 제동력은 시스템의 부하를 증대시키는 악영향을 미치므로 가능한 감소시켜야 한다. 따라서 최대의 부상력과 최소의 제동력을 갖는 설계 변수를 찾는 것이 선행 과제이다.

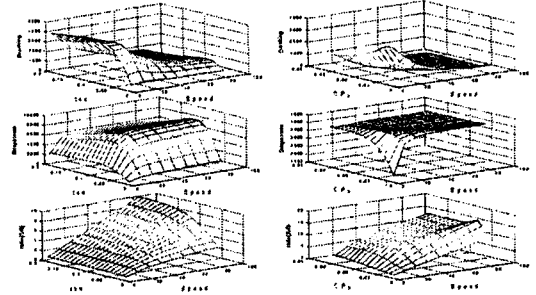


그림 6 설계 변수에 따른 힘특성

최대의 부상력과 최소의 제동력을 갖는 설계 변수를 찾기 위하여 제동력에 대한 부상력의 비가 최대가 되는 변수를 도출하고자 한다. 와전류 자기반발식 부상 시스템의 모든 외형적 설계 변수가 제동력에 대한 부상력의 비에 영향을 미치며, 설계 변수 중 가장 민감한 것으로는 극피치와 도체판의 두께이다. 그림 6은 각각 속도와 극피치의 변화에 따른 힘특성과 속도와 도체판의 두께에 따른 힘특성을 보여주고 있다. 그림 6에서 극피치와 속도가 증가 할수록 제동력에 대한 부상력의 비는 증가하며, 도체판의 두께는 제동력에 대한 부상력의 비를 최대로 하는 최적점이 존재함을 알 수 있다.

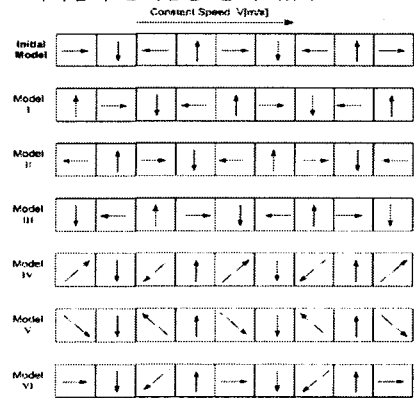


그림 7 Halbach 배열 영구자석 자화 패턴

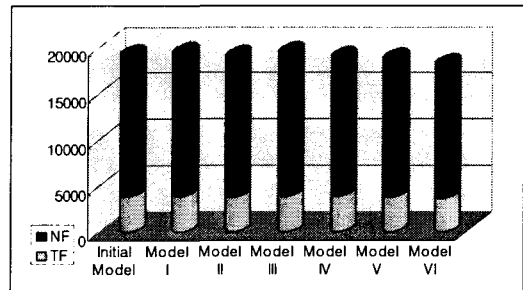


그림 8 영구자석 자화 패턴에 따른 부상력과 제동력

그림 7과 8은 영구자석의 자화 패턴에 따른 힘특성을

보여주고 있다. 그림 7에서 초기모델과 모델 1,2,3은 전형적인 Halbach 자화 패턴을 보여주고 있으며, 각각 초기 영구자석의 자화 방향이 서로 다른 차이점을 보이고 있다. 모델 4,5,6은 Halbach 자화 패턴 중 수평 성분 자화된 영구자석을 사선 성분 자화된 영구자석으로 대체한 모델이다. 그림 8은 그림 7에 제시된 모델에 대하여 힘특성을 도시하고 있다. 그림 8에서 자화 패턴에 따른 부상력과 제동력의 크기가 서로 유사함을 알 수 있다.

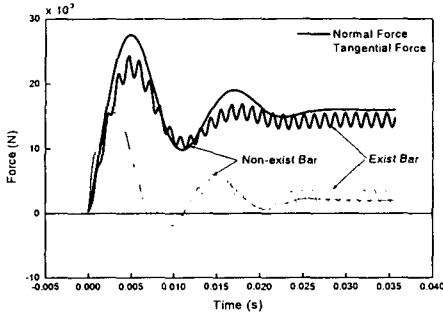


그림 9 사다리꼴 형태의 2차축을 갖는 모델의 과도 해석

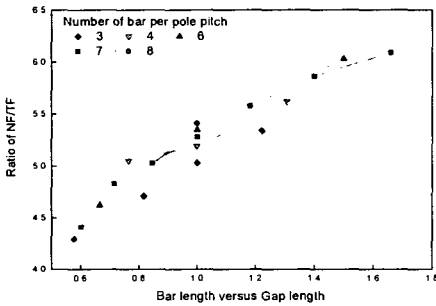


그림 10 도체바의 크기에 따른 힘특성

그림 9와 10은 2차축 도체판을 유도전동기의 농형바와 같이 도체바의 형태로 대체한 경우에 힘특성을 보여주고 있다. 그림 9는 동일한 조건에서 도체판을 도체바로 대체한 경우 과도해석을 수행한 결과이다. 그림 9에서 도체판이 도체바보다 힘특성이 우수하고 리플도 없음을 확인할 수 있다. 그림 10은 제작비의 저감을 위하여 도체바로 대체한 경우 도체바의 크기에 따른 힘특성을 보여주고 있다. 그림 10에서 도체바가 차지하는 면적이 클수록 힘특성이 우수해짐을 확인할 수 있다.

2.2.1 와전류 자기반발식 부상장치의 설계

표 2 요구사항을 만족하는 모진단

부상력[N]	제동력[N]	극수	극피치	공극	영구자석의 높이	1차축 길이	알루미늄의 두께	부상력/제동력
1229.88	170.53	2	0.22	0.01	0.016	0.1100	0.015	7.21
970.46	135.36	2	0.22	0.01	0.014	0.1100	0.015	7.17
1000.00	139.48	2	0.22	0.01	0.014	0.1133	0.015	7.17
1000.00	140.50	2	0.22	0.01	0.012	0.1496	0.015	7.12
1000.00	141.77	2	0.22	0.01	0.010	0.2086	0.015	7.05
1108.22	181.50	3	0.15	0.01	0.014	0.0730	0.013	6.11
1008.55	165.48	3	0.15	0.01	0.012	0.0892	0.013	6.09
1008.54	165.89	3	0.15	0.01	0.010	0.1232	0.013	6.08
1202.13	220.03	1	0.12	0.01	0.014	0.0600	0.013	5.46
1006.88	184.41	1	0.12	0.01	0.012	0.0651	0.013	5.46
1006.88	184.57	4	0.12	0.01	0.010	0.0891	0.013	5.46

와전류 자기반발식 부상장치의 성능 향상 설계를 위하여 설계 변수에 따른 힘특성을 확인하였고, 파라미터 추장기법을 이용하여 표 3의 설계 조건을 만족하는 부상장치를 표 2와 같이 설계하였다. 표 2에서 설계된 부상장치는 극수에 따라 최적의 설계 변수를 보여주고 있다. 표 2에서 1차축의 길이가 제한되었으므로 극수가 작을수록 극피치는 커진다. 따라서 극수가 작은 부상장치가 제동력에 대한 부상력의 비가 가장 우수함을 보이고 있다.

표 3 설계 사양 및 제약 조건

설계 사양	값	제약 조건	값
부상력	1000[N]	1차축 길이	300[mm]
정격 속도	30[m/s]	1차축 길이	500[mm]

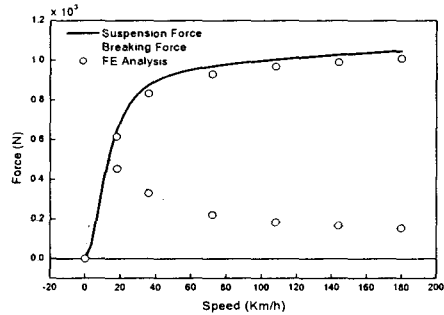


그림 11 p=4인 경우의 힘특성

그림 11은 표 2에서 4극을 갖는 부상장치에 대하여 속도에 따른 힘특성을 보여주고 있다. 여기에서 제동력의 최대값은 10[km/h]에 존재하므로 이 이상의 속도에서 부상력은 지속적으로 증가하며, 제동력은 감소함을 확인할 수 있다. 또한 설계된 부상장치를 검증하기 위하여 유한요소해석 결과와 비교하였다.

3. 결 론

와전류 자기반발식 부상장치는 자기부상열차의 보조 부상장치로 연구중이며, 본 논문은 제동력에 대한 부상력의 비가 최대가 되는 설계 조건을 제시하였다. 제동력에 대한 부상력의 비는 모든 설계 변수에 따라 매우 비선형적인 특성을 보이고 있으며, 도체바의 형상에 따라서도 매우 큰 차이를 보이고 있다. 하지만 Halbach 배열을 기본 모델로 하는 영구자석 자화 패턴에 따른 힘특성은 큰 차이를 보이고 있지 않으므로 자화 패턴의 변화가 힘특성에는 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다. 앞으로 지속적인 연구를 통하여 더욱 우수한 힘특성을 갖는 와전류 자기반발식 부상장치를 개발하고자 한다.

[참 고 문 헌]

[1] Jong Moon Kim, Do Hyun Kang, Min Kook Park, Young Kiu Choi, "A Levitation Controller Design for a Magnetic Levitation System", 전기학회논문지 2003 pp.342 350
 [2] Thompson, M.T., "Eddy current magnetic levitation. Models and experiments", Potentials, IEEE, Volume 19, Issue 1, Feb. March 2000 pp 40 44
 [3] Mirzamani, S.J.; Paul, R., Guidance dynamics of mixed mu levitators for MAGLEV vehicles, Magnetics, IEEE Transactions on, Volume 21, Issue 6, Nov 1985 pp. 2404 2407