

초고속 자기부상열차를 위한 초전도 반발식 자기부상 특성 해석

배덕권, 이종민*, 조한욱*, 한형석*
국립충주대학교, *한국기계연구원

Analysis on Superconducting Electrodynamic Suspension for Very High Speed Maglev

Duck Kweon Bae, Jongmin Lee, Han-Wook Cho, and Hyung-Suk Han
Chungju National University, Korea Institute of Machinery and Materials

Abstract - This paper presents the numerical simulation results on the moving type electrodynamic suspension (EDS) simulator. Superconducting EDS system is generated by the interaction between the magnetic field made by the induced eddy current in the ground conductor and the moving magnetic field made by onboard superconducting magnet. The levitation force of EDS system, which is proportional to the strength of the moving magnetic field, becomes saturated according to the increase of the velocity. Especially, the levitation force is influenced by the structure of HTS magnet and ground conductor. The 3-D numerical analysis with FEM was used to find the distribution of the magnetic field, the optimal coil structure, and the calculation of the levitation force.

1. 서 론

첼레일 위에서 회전하는 철차륜으로 차량을 추진시키는 방식을 기존 내연기관에서 전동기로 바꾸면서 열차의 속도가 빨라졌지만 현재의 방식으로는 더 이상의 속도 증가가 어려운 점이 있다. 기존 고속열차는 전동기 및 다른 장비들이 차량에 탑재되고 차량 상부의 전선으로 전력을 공급받으며 바퀴가 레일 위를 달리는 기존의 철도방식을 이용하고 있는데 현재의 방식으로는 시속 350 km 이상으로 속도를 증가시킨다는 것은 매우 어려운 일이다. 열차의 속도를 더 이상 증가시키기 어려운 기존 철도의 몇 가지 본질적인 제한은 첫째 차량에 탑재된 장비들의 큰 부피 및 하중, 둘째 고속열차로의 집전이 어려움, 셋째 고속에서 바퀴와 레일의 마찰력 감소에 따른 바퀴의 미끄러짐 현상 등에 기인한다 [1].

자기부상열차는 크게 흡인식 자기부상열차와 반발식 자기부상열차로 나뉜다. 흡인식 자기부상열차는 고정밀 제어기로 열차를 8-10mm 정도 부상 시키고 반발식 자기부상열차는 움직이는 자장에 의해 지상코일에서 발생하는 와전류에 의한 자장과 차량에 설치된 자석의 자장이 상호 반발하는 원리로 차량을 부상시킨다 [2], [3]. 반발식 자기부상에 초전도를 응용하면 매우 강한 자석을 발생시킬 수 있어 일본의 MLX01과 같이 높은 높이의 안정된 부상을 얻을 수 있으므로 이를 바탕으로 시속 500km 이상의 초고속 자기부상열차의 구현이 가능할 수 있다 [3]. 특히 반발식 자기부상은 고정밀 제어기를 필요로 하지 않으므로 제어기의 동작 불량에 따른 부상계의 고장 가능성을 원천적으로 제거할 수 있다. 초전도체를 이용한 반발식 자기부상은 차량 정지시에는 부상력이 없어 일정속도까지는 기존 열차 방식으로 차량을 견인해주어야 하는 점이 있으나 기존의 방식으로 도달하기 힘든 부상높이 및 차량속도를 구현할 수 있어 미래의 신 교통수단으로 각광받고 있다.

2. 부상자석 및 자장분포 해석

2.1 부상자석의 사양

표 1은 본 연구에서 해석한 부상자석의 사양을 나타낸다. 내경 100mm, 외경 316mm인 두 개의 더블팬케익형 고온초전도 코일을 직렬로 연결하여 부상자석을 설계하였으므로 팬케익형 코일 4개가 적층된 형상이고 총 턴수는 1228턴이었다. 사용된 초전도선의 길이는 총 800m이었으며 계산된 인덕턴스는 283.5 mH이었다.

반발식 자기부상은 지상도체 상부에서 부상자석이 움직임에 따른 지상도체와 부상자석사이의 상대적 속도에 의해 발생된다. 이 때 지상도체에 쇄교되는 자장의 변화가 생기기 때문에 패러데이의 법칙(Faraday's law)에 의해 지상도체에 전류가 유도되고 이 유도된 전류는 렌츠의 법칙(Lenz's law)에 의해 지상도체의 자장과 반대방향의 자장이 발생되기 때문에 부상자석과 지상도체 사이에 반발력이 발생하게 되고 부상자석이 탑재된 물체(차량)는 중력의 반대방향으로 부상하게 된다 [4], [5].

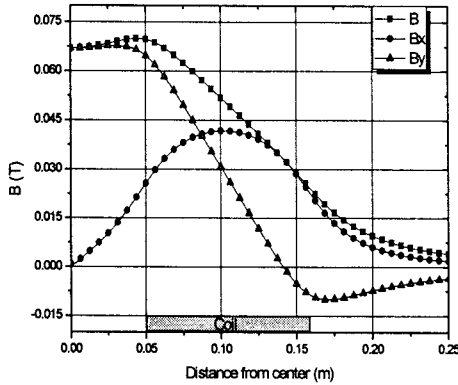
반발식 자기부상에서 발생하는 자기부상력 $F(t)$ 는 지상코일에서 유기된 자장과 움직이는 고온초전도 부상자석 사이의 상호작용에 의한 것으로 아래 식 (1)로 표현할 수 있다 [5].

$$F_{(t)} = [i(t)]^2 \frac{dM(x, y, t)}{dy} \tag{1}$$

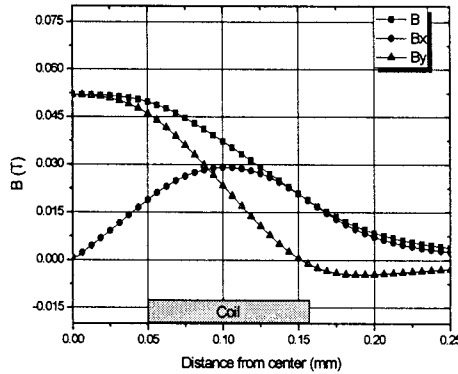
여기에서 $i(t)$ 는 초전도 부상자석에 흐르는 전류이고 $M(x, y, t)$ 는 부상자석과 지상도체 사이의 상호인덕턴스이다. y 방향은 지상도체 표면에 수직한 방향이고 x 방향은 초전도 부상자석의 진행방향이다. 식 (1)에서 부상력은 시간에 따른 y 방향의 자속변화(B_y)에 대한 함수라는 것을 알 수 있다. 다시 말하여 초전도 부상자석에서 발생한 이동자장 중 y 방향 성분의 크기가 부상력에 크게 관여한다. 따라서 지상도체에 쇄교되는 B_y 의 크기를 계산하는 것이 부상자석의 최적 설계를 위해 필요하다.

Table 1. Specification of HTS levitation magnet

	Specification
Number of double-pancake	2 ea
Inner diameter	100 mm
Outer diameter	316 mm
Number of turns	1228 turns
Inductance	283.5 mH
Thickness of spacer	1 mm
Wire length	800 m
Critical current	40-45 A (@77K, 1 V/cm)



(a) 20mm below magnet



(b) 40mm below magnet

Fig. 1. Distribution of magnetic flux density

그림 1은 초전도 부상자석 하부 20mm 지점과 40mm 지점에서의 자장분포를 나타낸다. 반발식 자기부상에서는 지상도체의 표면과 수직이 되는 B_y 가 부상력에 큰 영향을 미치는데 자석 20mm 하부의 경우 부상자석의 외경보다 작은 직경 약 282mm인 지점에서 B_y 가 0이 되고 40mm 하부의 경우에는 직경 약 302mm인 지점에서 B_y 가 0이 된다. 부상자석에서 거리가 멀어질수록 자장의 크기는 감소하고 B_y 가 0이 되는 직경은 증가하는 것으로 해석결과 나타났는데 이는 부상자석 외부에서는 부상자석의 자장이 확산되기 때문으로 생각된다. 식(1)에서와 같이 부상력은 B_y 의 변화량에 영향을 받으므로 이 해석은 지상도체의 크기를 결정하는 데에 참고가 될 수 있다. 본 연구에서도 이 해석을 바탕으로 판형태의 여러 가지 지상도체를 모델링하여 부상력 변화를 해석하였다.

3. 부상특성 해석

그림 2는 초전도 반발식 부상력(levitation force) 및 항력(drag force)을 계산하기 위한 3차원 모델을 나타낸다. 해석은 유한요소해석 프로그램인 MagNet을 사용하였으며 3차원 정자장 과도해석기법으로 고정된 지상도체 위를 움직이는 고온초전도 부상자석에 대한 부상력 및 항력을 계산하였다. 본 해석에 사용된 지상도체는 두께 35 mm의 알루미늄 판이었으며 도전율은 3.8×10^7 siemens/m였다. 본 해석에서 지상도체와 부상자석 사이

의 간격은 30mm로 가정하였다. 그림 1에 나타난 바와 같이 부상력에 가장 큰 영향을 미치는 수직성분의 자장 성분인 B_y 가 0이 되는 것을 고려하여 폭 292mm와 320mm인 두 가지 판형 지상도체에 대한 부상력 및 항력을 계산한 결과를 그림 3에 나타내었다 [7]. 그림 3에 나타내었듯이 두 가지의 해석 결과에서 부상력에서는 큰 차이를 보이진 않았으나 너비 320mm의 지상도체와 부상자석으로 계산한 항력이 너비 292mm의 지상도체의 결과보다 큰 것으로 나타났다. 속력 80m/s에서의 부상력/항력의 비는 너비 292mm의 지상도체에서는 약 29배, 너비 320mm의 지상도체에서는 약 11배로 계산되어 두

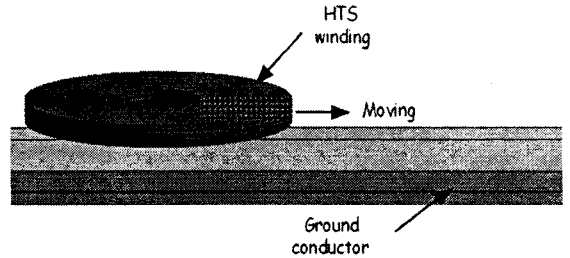


Fig. 2. Analytic 3D model of EDS simulator

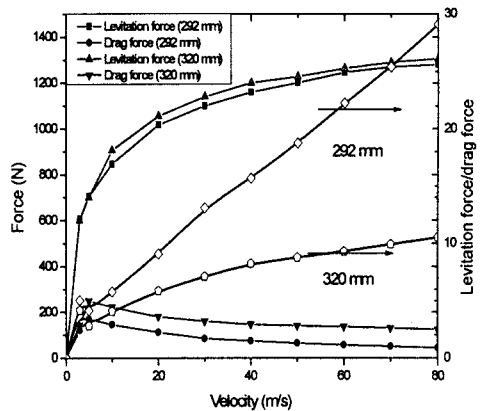


Fig. 3 Simulation result with 292 mm wide and 320 mm wide ground conductor

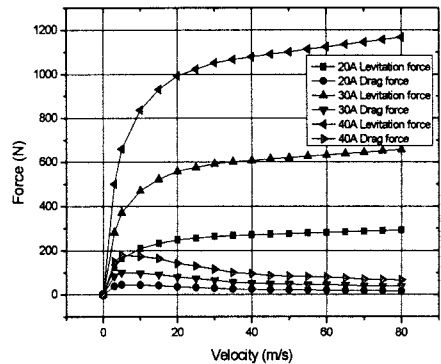


Fig. 4 Simulation results [6]

계산결과와 비율은 약 30배에 다다른다. 따라서 부상 특성의 중요한 요소가 되는 부상력/항력의 비율에서 지상도체에 수직한 자장의 성분이 0이 되는 것을 고려한 좁은 너비의 지상도체가 더 우수한 것으로 나타났다.

그림 4는 그림 3의 해석결과를 바탕으로 선택한 너비 292mm의 지상도체와 그 위를 움직이는 부상자석 사이의 부상력 및 항력을 해석한 결과를 나타낸다. 부상자석에 20, 30, 40A를 인가한 상태에서 고정된 지상도체위를 움직이는 해석을 수행하여 지상도체에 발생되는 부상력을 구하였다. 이 때의 부상높이는 30mm 였다. 부상자석의 속도가 증가함에 따라 부상력은 포화되는 현상을 나타내어 전형적인 반발식 부상자석의 부상특성을 나타내었다. 본 해석결과 부상력은 속력 20m/s 이후에서 포화되는 경향을 나타내었는데 부상자석의 속력이 10m/s를 지나면서부터 부상력의 증가율이 둔화되기 시작하여 속력 30m/s 이후에서는 속력 증가에 따른 부상력의 증가가 매우 작아진 상태에서 속력증가에 따른 부상력 증가가 선형적인 양상을 나타내었다. 60m/s의 속력에서 부상자석 전류가 20, 30, 40일 때 계산된 부상력은 각각 약 281, 632, 1123N으로써 부상력은 로렌츠의 법칙을 따라 전류의 제곱에 비례하는 특성을 나타내었다. 항력 또한 전류의 제곱에 비례하는 특성을 나타냈다. 항력은 약 5m/s 이후에 급격히 감소하는 경향을 나타내었으며 이 또한 약 40m/s 이후에서는 포화되는 경향을 나타내었다. 속력 80m/s는 288km/h의 속력에 해당한다.

4. 결 론

본 논문에서는 초고속 자기부상열차의 유력한 후보가 될 수 있는 초전도 반발식 자기부상의 특성을 연구하기 위한 부상력 및 항력의 특성을 유한요소법을 이용한 3차원으로 해석하였다. 본 해석에서는 부상자석이 고정된 지상도체 위를 움직이는 조건의 과도해석으로 부상력 및 항력의 특성을 계산하였다. 본 해석 결과 반발식 자기부상력은 지상도체에 쇄교되는 자장의 분포에 영향을 받는 것으로 나타났다. 부상력 및 항력은 부상자석의 전류의 제곱에 비례하는 것으로 나타났다. 부상력은 20m/s 이후에 포화되는 경향을 나타내었고 항력은 5m/s 이후에 급격한 감소를 나타내었으며 40m/s 이후에 포화되는 경향을 나타내었다. 본 연구의 결과는 초고속 자기부상열차의 부상특성에 대한 기본 자료로 활용될 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Kazuo Sawada, "Superconducting maglev developed by RTRI and JR central," Japan Railway & Transport Review 25, pp. 58-61, October, 2000
- [2] Philip Holmer, "Faster than a speeding bullet train," IEE Spectrum August 2003, pp. 30-34, August 2003.
- [3] Motoharu Ono, Shunsaku Koga, and Hisao Ohtsuki, "Japan's Superconducting Maglev Train," IEEE Instrumental & Measurement Magazine, pp. 9-15, March 2002.
- [4] David K. Cheng, Field and Wave Electromagnetics, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1992.
- [5] P. K. Sinha, Electromagnetic Suspension Dynamics & Control, Peter Peregrinus Ltd., 1987.
- [6] Duck Kweon Bae, Hungje Cho, and Jongmin Lee, "Characteristic Analysis of HTS Levitation Force with Various Conditions of Ground Conductors," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 18, No. 2, pp. 803-807, June, 2008.