

## 초전도 벌크를 이용한 자기부상 시스템의 한계

한 승용, 한 송엽  
서울대학교 공과대학 전기공학부

### Limitation of a levitation system using a superconducting bulk

Seungyong Hahn, Song-yop Hahn  
School of electrical engineering & computer science, Seoul National University

updragon@super-em.snu.ac.kr

**Abstract** - Levitation force of a new magnetic levitation system using a superconducting bulk magnet(SBM) and a permanent magnet(PM) was numerically calculated. The non-linear J-E relation of a SBM was modeled using a critical state model and iteration method, and demagnetization of a PM was considered using a demagnetization curve of a real PM. The maximum limitation of levitation force was found according to increasing the trapped field in a SBM. Finite element method was used for numerical calculation.

고속 플라이휠 에너지 저장장치보다 시스템 제어  
가 쉽고, 교류손실이 작으며, 유도 발전기/전동  
기와 쉽게 연계되어 컨버터와 같은 부대장치가  
필요하지 않아 경제적으로도 유리하다[3].

본 연구에서는 초전도 벌크 자석과 영구자석으로 이루어진 간단한 자기부상 시스템의 부상력을 수치적으로 계산하였다. 초전도 벌크에서 발생하는 J-E 비선형 관계를 해결하기 위해 임계전류 밀도 모델과 반복계산 기법[4]을 사용하였으며, 영구자석은 등가 자화전류로 치환하여 고려하였다. 실제 영구자석의 감자곡선을 사용하여, 영구자석이 탈자되지 않는 범위에서 부상력의 변화를 수치적으로 계산하였다. 수치해석 기법으로는 유한요소법을 이용하였다.

## 1. 서 론

초전도 벌크와 영구자석으로 이루어진 자기부상시스템을 기반으로 한 플라이휠 에너지 저장장치는 에너지 저장 효율이 높고 환경 친화적인 강점을 가지고 있어서 활발한 연구가 진행되고 있다[1],[2]. 특히, 플라이휠 에너지 저장장치의 에너지 저장 용량을 높이는 방법에 많은 연구의 초점이 맞춰지고 있다. 에너지 저장 용량을 늘리는 방법으로 플라이휠의 회전속도를 높이는 것과 플라이휠의 무게를 늘리는 것 두 가지가 있다. 이 중 후자의 방법은 초전도 벌크와 영구자석 사이에 발생하는 부상력의 한계로 인해 크게 제약 받는다.

본 연구에서는 시스템의 부상력을 증가시키기 위해 지금까지 초전도 벌크를 수동소자로 사용해 왔던 것과 달리 초전도 벌크에 자장을 포획시켜 초전도 벌크 자석을 만들어 능동소자로 사용하는 새로운 자기 부상 시스템을 제안하였다. 최근의 연구에 따르면, 초전도 벌크에 포획시킬 수 있는 자장은 2T 이상이며 이 경우 초전도 벌크를 수동소자로 쓴 자기부상 시스템 보다 5배 이상의 부상력을 발생시킬 수 있다. 따라서, 같은 양의 에너지를 저장한다고 할 때, 고중량 저속 플라이휠 에너지 저장장치를 구현할 수 있으며, 저중량

## 2. 해석 이론

### 2.1 기본 수식

초전도 벌크의 전자장 수치해석은 맥스웰 방정식을 기본으로 하며, 이를 식 (1)-(3)에 나타내었다.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

영구자석은 등가자화 전류로 치환하였으며 등가자화 전류와 자화와의 관계는 식 (4)와 같이 나타내어진다.

$$\mathbf{J}_m = \nabla \times \mathbf{M} \quad (4)$$

따라서, 식 (2)의 전류밀도,  $\mathbf{J}$ 는 식 (5)와 같이 분류할 수 있다.

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_o + \mathbf{J}_{sc} + \mathbf{J}_m \quad (5)$$

단,  $J_o$ 는 외부전류원에 의한 전류밀도,  $J_{sc}$ 는 초전도체 내부에 흐르는 전류밀도,  $J_m$ 은 영구자석에 의한 등가자화 전류밀도이다.

본 연구에서는 3차원 축대칭 모델을 사용하였으며, 이를 위해 자기벡터 포텐셜을 도입하였다. 자기벡터 포텐셜,  $A$ 와 자속밀도  $B$ 와의 관계는 식 (6)과 같다. 수치해석에 필요한 지배방정식은 식 (7)에 나타내었고, 해석에 필요한 전계는 식(8)로부터 구해진다.

$$B = \nabla \times A, \text{ 단, } A = (0, A_\theta, 0) \quad (6)$$

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{r^2}\right)A_\theta = -\mu_0 J \quad (7)$$

$$E = -\frac{\partial A_\theta}{\partial t} \quad (8)$$

## 2.2 영구자석의 감자곡선

초전도 벌크자석의 자장은 2T 이상이 가능하며 영구자석에 가해지는 자계의 세기가 매우 클 경우 영구자석의 탈자 현상이 발생한다. 따라서, 수치해석에서도 이를 고려할 필요가 있다.

그림 1.은 한국 마그넷 알로이사에서 제공하는 N-33SH Nd-Fe-B 영구자석의 감자곡선이다. 그림에서 보면 잔류자속  $B_r=1.15$  T 이고  $B=0$ 이 되는 자계의 세기,  $H_c$ 는 약 836 kA/m, 탈자가 발생하는 자계의 세기,  $iH_c$ 는 약 1592 kA/m이다.

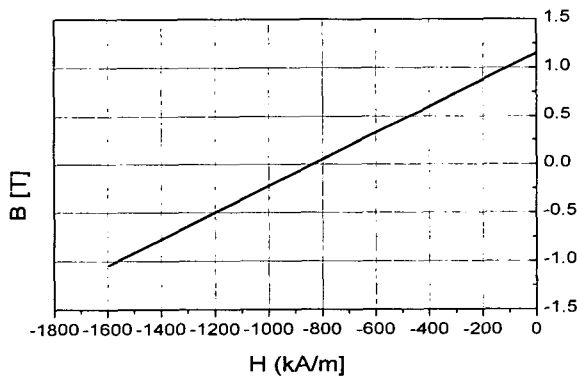


Fig. 1. Demagnetization curve of N-33 SH Nd-Fe-B permanent magnet. Data from Korea Magnet Alloy Corp.

감자곡선 구간은 기울기,  $\mu_r=1.095$  인 직선으로 근사하여 식 (9)를 이용하여 영구자석의 감자곡선을 모델링하였다(5).

$$B = \mu H + B_r \quad (9)$$

단,  $\mu = \mu_0 \mu_r$ 이고,  $B_r$ 은 상수이다. 그림에 살펴보면 영구자석은  $iH_c$  이상의 자계에서 탈자

되는데 본 연구에서는 이 값에 10%의 여유를 두어 1433 kA/m 이상의 자계가 걸리는 경우 탈자되는 것으로 영구자석을 모델링하였다.

## 2.3 초전도 벌크의 비선형 해석

초전도 벌크는 J-E 관계가 매우 비선형적이며 이러한 비선형 문제를 풀기위해, 임계전류 밀도 모델과 반복계산 기법을 도입하였다. 식 (10), (11)은 본 연구에서 사용한 임계전류 밀도 모델이며, 해석의 편의를 위해 임계전류 밀도가 자장에 대해 변화가 없는 빈 모델(6)을 사용하였다.

$$\frac{\partial J}{\partial t} = 0 \quad \text{if } |E| = 0 \quad (10)$$

$$J = J_c \frac{E}{|E|} \quad \text{if } |E| \neq 0 \quad (11)$$

그림 2는 영구자석의 탈자를 고려하며 초전도 벌크의 비선형을 해결하기 위한 반복계산 기법의 순서도이다. 초전도 벌크 자석의 초기 전류 분포를 결정하기 위해, 역시 비선형 해석을 수행한다. 이 과정에 대한 설명은 참고문헌에 자세히 나와 있으므로 본 논문에서는 생략한다(4). 반복계산 과정에서 영구자석 내부에 자계의 세기가 탈자 한계인  $iH_c$ 를 넘어가는 경우 반복계산을 강제 종료한다. 초전도 벌크 내부의 전류분포를 결정하기 위한 식은 식 (12), (13)과 같다.

$$J_n = J_{n-1} + \delta J \cdot \text{sign}(E_n) \quad \text{단, } J_n \leq J_c, |E_n| > \epsilon \quad (12)$$

$$J_n = J_{n-1} \quad \text{단, } |E_n| < \epsilon \quad (13)$$

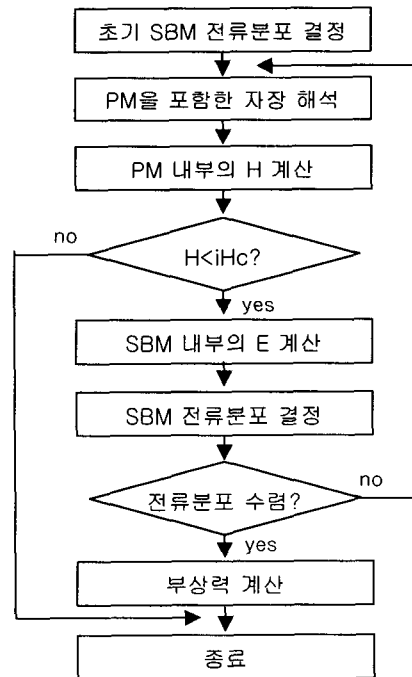


Fig. 2. Flow chart for calculating the levitation force with considering the J-E non-linear relation of a SBM and demagnetization of a PM.

### 3. 해석 사례

#### 3.1 해석 모델

그림 3은 본 연구에서 수치적으로 계산하기 위한 자기부상시스템을 나타낸다. 시스템은 초전도 벌크와 영구자석 및 초전도 벌크를 착자시키기 위한 코일부로 구성되어 있다. 실제 초전도 벌크를 착자시키는 코일은 보다 복잡한 형상이 되겠지만, 본 연구에서는 해석의 편의를 위해 간단한 솔레노이드 코일로 구성된 전자석으로 모델링하였다. 코일부의 면적은 4mm(가로)×8mm(세로)이며 초전도 벌크자석과의 간격은 3mm, 초전도 벌크의 측면 중심부에 위치한다. 이 코일에 흐르는 전류밀도의 변화에 따라 초전도 벌크 자석에 포획되는 자장의 세기가 달라진다. 영구자석과 초전도 벌크와의 거리는 6mm로 설정하였다. 이는 실제 시스템에서 초전도 벌크가 냉동기 안에 들어가는 상황을 가정한 것으로, 진공층 및 냉동기의 재질을 고려할 때 6mm 이하는 사실상 불가능하다[7].

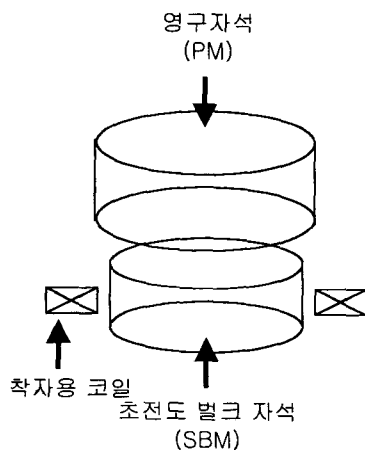


Fig. 3. Schematic diagram of a magnetic levitation system using a SBM and a PM.

해석에 사용된 초전도 벌크와 영구자석의 사양을 표 1, 표 2에 정리하였다. 영구자석의 사양은 앞의 2.2절에서 살펴본 한국 마크넷 알로이사에서 제작한 Nd-Fe-B 영구자석의 재질을 바탕으로 설정하였고, 초전도 벌크의 경우 30K 동작온도에서 최대 포획자장이 약 3.5T 인 초전도 벌크를 고려하여 임계전류 밀도를 결정하였다.

Table 1. Specification of a SBM

항 목	사 양
지름	5 cm
두께	2 cm
동작온도	30K
최대 포획 자장	3.5T
임계전류밀도	$3.0 \times 10^8 \text{ A/m}^2$

Table 2. Specification of a PM

항 목	사 양
지름	6 cm
두께	2 cm
$B_r$	11.5 KG
$H_c$	11.0 KOe
$iH_c$	20.0 KOe
$\mu_r$	1.095

#### 3.2 해석 결과

그림 4는 초전도 벌크 자석과 영구자석 사이의 거리를 6mm로 고정시킨 상황에서 초전도 벌크 자석에 포획되는 자장의 세기에 따른 부상력을 그래프로 나타낸 것이다. 그림 4에서 포획 자장의 세기가 0인, x축 상의 원점은 무자력 냉각법(Zero field cooling)을 거쳐 만들어진 초전도 벌크에 영구자석을 가까이 가져간 경우이다. 최대 포획 자장이란 초전도 벌크 자석의 상부 표면 중 자장의 세기가 가장 큰 값을 의미하며, 그 발생 위치는 벌크 자석 상부 표면의 중앙이 된다.

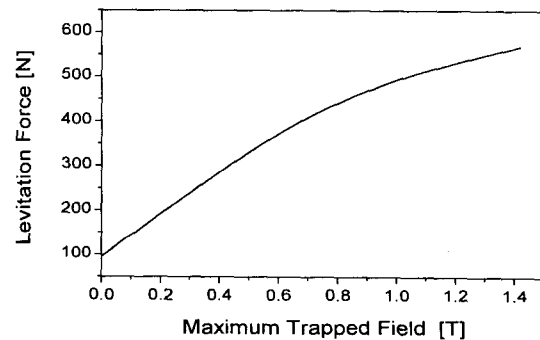


Fig. 4. Variation of levitation force according to the maximum trapped field.

그림 4에서 보면, 최대 포획 자장이 0T인 경우 부상력은 약 100N 정도이며 최대 포획 자장이 1.4T인 경우 부상력은 약 550N으로 5.5배 정도 증가하는 것을 알 수 있다. 초전도 벌크에 포획된 자장의 세기가 1.4T 이상으로 증가하는 경우, 영구자석이 탈자되는 현상이 발생하였다. 따라서, 본 해석사례에서 다른 자기부상 시스템의 부상력 한계는 약 550N이라고 할 수 있다.

그림 5는 영구자석 내에서 최대 자계가 가해지는 부분에서의 동작곡선(Load line)을 영구자석의 감자곡선 상에 나타낸 것이다. 그림 5를 보면 초전도 벌크자석의 자장의 세기가 커질수록 동작곡선이 영구자석의 탈자지점에 가까워 지는 것을 알 수 있다. 초전도 벌크자석에 포획된 자장이 1.4T 정도인 경우 동작곡선이 본 연구에서 한계 값으로 잡은,  $iH_c = 1433 \text{ kA/m}$ 에 거의 근접한 것을 알 수 있다. 또한, 감자곡선 상에서

동작곡선이  $B=0$  이하로 내려감에 따라 부상력의 증가분은 포화된다. 그림 4에서 보면, 포획 자장이 0.8T 이상인 경우, 부상력이 포화되는 것을 확인할 수 있으며, 영구자석이 탈자되는  $iH_c$  값이 증가하는 경우 보다 큰 부상력을 기대할 수 있다.

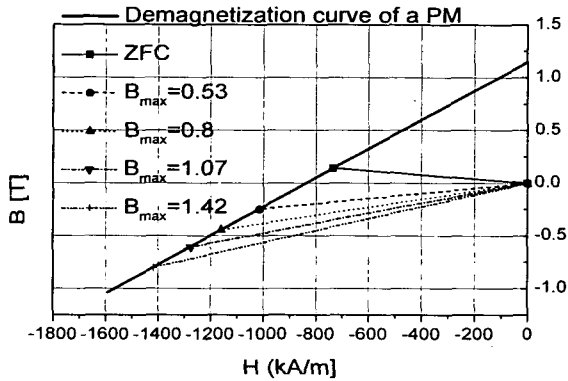


Fig. 5. Load line on demagnetization curve of a PM according to the maximum trapped field.

### 3. 결 론

고중량 저속 플라이휠 에너지 저장장치를 위한 새로운 자기 부상시스템으로 초전도 벌크를 수동소자가 아닌 초전도 벌크 자석을 만들어 영구자석과 함께 사용하는 방식을 제안하였다. 이러한 시스템에서는 초전도 벌크 자석의 세기가 커지면, 영구자석이 탈자되는 현상이 발생한다. 본 연구에서는 이처럼 영구자석이 탈자되는 현상 및 초전도 벌크 자석이 가지는 비선형 특성을 고려하여, 새롭게 제안된 자기부상시스템에서 초전도 벌크 자석의 세기에 따라, 발생하는 부상력의 변화를 수치적으로 구해보았다. 수치해석 결과 초전도 벌크 자석을 이용한 새로운 자기부상 시스템은 초전도 벌크를 수동소자로 사용한 기존의 시스템에 비해 부상력이 약 5배 이상 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 같은 양의 에너지를 저장하는 같은 플라이휠 크기의 시스템을 만드는 경우 속도를 60% 정도 감소시킬 수 있게 된다. 본 논문에서 제안된 자기부상 시스템을 이용하여 만들어진 고중량 저속 플라이휠 에너지 저장장치는 유도 발전기/전동기 등과 연계되어 기존의 계통에 쉽게 연결 될 수 있는 등 여러 가지 장점을 가지고 있어, 플라이휠 에너지 저장장치의 실용화를 한발 앞당기는데 기여할 것으로 생각된다. 본 논문에서 제안된 수치해석 방법은 이러한 연구를 진행하는데 있어서, 기초 자료를 구성하는데 효과적으로 사용될 수 있다.

### (참 고 문 헌)

- [1] T. A. Coombs, A. M. Campbell and D. A. Cardwell, "Development of an active superconducting magnetic bearing," *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, vol. 5, no. 2, pp. 630-633, June 1995
- [2] T. Coombs, A. M. Campbell, R. Storey and R. Weller, "Superconducting magnetic bearings for energy storage flywheels," *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, vol. 9, no. 2, pp. 968-971, June 1999.
- [3] S. H. Kim, S. Y. Hahn, "Analysis and design of a induction generator with a superconducting bulk magnet rotor," *IEEE Trans. Appl. Supercon.* vol. 10, no. 1, pp. 931-934, March 2000.
- [4] 한 승용, 한 송엽, "초전도 벌크의 부상력 해석 프로그램 개발," 한국 초전도·저온공학회 논문지, 1권 2호, pp. 20-24, 1999.
- [5] S. S. Udpa, Y. S. Sun and W. Lord, "Alternative demagnetization curve representations for the finite element modeling of residual magnetism," *IEEE Trans. Magn.* vol. 24, no. 1, January 1988.
- [6] M. N. Wilson, *Superconducting Magnets*, Clarendon Press Oxford, 1983.
- [7] 김 지훈, "고온 초전도 선재를 이용한 플라이휠 부상장치," 서울대학교 석사논문, 2001.