

영구자석기기의 히스테리시스 특성해석을 위한 Preisach 모델

박관수 · 한송엽

서울대학교 공과대학 전기공학과

이기식

단국대학교 공과대학 전기공학과

정현교

강원대학교 공과대학 전기공학과

(1992년 3월 27일 받음, 1992년 5월 18일 최종 수정본 받음)

강자계 내에서 영구자석의 자화량은 변한다. 따라서 영구자석을 포함하는 자기 시스템의 정확한 해석을 위해서는 영구자석의 자화량의 변화를 고려해 주어야 한다. 그런데 영구자석의 자화량은 히스테리시스 특성을 가지고 변하므로 단순한 수식으로 표현이 되지 않으므로 종래의 방법으로는 수치모사가 불가능하다. 본 논문에서는 Preisach 모델과 결합된 유한요소법으로 히스테리시스 특성을 갖는 영구자석의 자화량을 수치모사하였다. 보자력과 잔류자속밀도 값이 다른 두 자석을 서로 접근시킬 때 작용하는 힘을 본 방법으로 계산한 값과 strain gauge type load cell로 측정된 값이 잘 일치함을 보임으로써, 본 방법이 자화량의 변화가 발생하는 영구자석기기의 해석에 적합함을 보였다.

I. 서 론

영구자석 제조기법이 발달함에 따라 높은 보자력과 잔류자속밀도를 갖는 강력한 자석들이 개발되고, 이것들은 영구자석 기기에 광범위하게 응용되고 있다. 종래의 전류 여자 방식을 대체한 영구자석 전동기, 또는 보자력이 서로 다른 종류의 영구자석들을 조합한 기기들에서부터 센서에 이르기 까지 고성능 자석에 대한 응용은 그 범위가 날로 확대될 전망이다[1-2].

영구자석은 착자된 후 공기중에 있을 때 또는 다른 기기와 조합될 때 감자작용으로 인하여 자석의 자화량은 변한다. 특히 영구자석 기기들은 전류원 또는 고성능 자석 기기들에 의하여 발생하는 강력한 자장하에서 동작되도록 설계 된다. 그런데 강력한 자장하에서 영구자석의 자화량은 가해지는 자장의 세기와 자기이력(magnetic history)에 따라 다른값을 가지므로 영구자석을 이용한 기기를 해석하거나 설계할 때 올바른 해석을 위해서는 이것을 고려해 주어야 한다.

종래의 영구자석을 이용한 기기의 설계 또는 해석에는

영구자석의 자화량을 변하지 않는 것으로 보거나, 또는 major loop를 이용한 비선형문제로 취급하여 해석한바 있다[3-4]. 그러나 이러한 방법으로는 가해 지는 자장의 값과 그 이력에 따라 다른값을 갖는 히스테리시스 특성을 수치모사하였다고 보기 어렵다. 이러한 히스테리시스 특성을 단순한 수식형태로 표현한 식은 실제와의 오차가 크므로, 에너지 관계식이나 실측데이터에 기초한 모델링이 필요하다[5-8].

본 논문에서는 Preisach 모델과 유한요소법이 결합된 알고리즘으로 영구자석의 자화량의 변동이 고려된 수치기법을 확립하고, 이것을 이용하여 보자력과 잔류자속밀도의 값이 서로 다른 두자석이 서로 접근할 때 자석간에 작용하는 힘을 계산하고 strain gauge type load cell을 이용하여 측정된 실측치와 비교함으로써 본 방법의 유용성을 입증하였다.

II. 해석방법

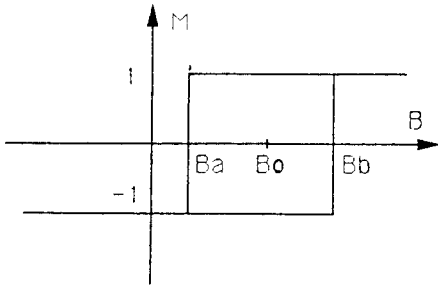
Preisach 모델은 실측 데이터에 기초한 것으로 복잡한 히스테리시스 특성을 해석하기에 적합한 것으로 간주되

고 있다[10]. 그림 1의 (a)와 같이 B_a 와 B_b 에서 출력 값이 변하는 히스테리시스 작용자 r 를 정의하고 실측된 자화량 전이곡선으로부터 그림 1의 (a)에 해당하는 단위자기 입자들의 밀도를 밀도분포함수 $P(B_a, B_b)$ 로 나타내면 그림 1의 (b)와 같은 밀도 분포를 얻는다. 그림 1의 (b)에서 횡축과 종축은 그림 1의 (a)에서 B_a 와 B_b 에 해당하는 값이며 등고선은 밀도분포의 값 $P(B_a, B_b)$ 을 나타낸다. 이때 주어진 자장의 값에 대한 자화량의 값은 가해진 자장의 이력에 따라 밀도 분포함수를 적분함으로써 아래식과 같이 얻어진다[11].

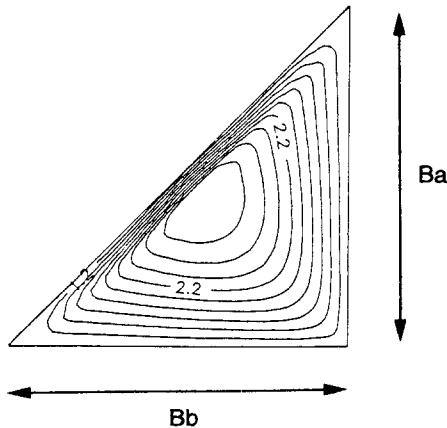
$$M(t) = \iint \gamma B(t) P(B_a, B_b) dB_a dB_b \quad (1)$$

정자계문제의 유한요소 행렬식은 아래와 같이 구할수 있다[12].

$$[K] [A] = [F] \quad (2)$$



(a) Hysteresis operator



(b) Distribution function

Fig. 1. Hysteresis operator and distribution function.

여기서 $[K]$ 는 시스템 행렬, $[A]$ 는 자기 벡터 포텐셜, 그리고 $[F]$ 는 구동 행렬이다. 그런데 $[F]$ 는 자화량의 함수로 주어지므로, 유한요소법에 의하여 자장의 값이 계산되면, 이 값으로 Preisach 모델을 이용하여 자화량을 구하고, 새로 계산된 자화량의 값으로 다시 식(2)에 의해 자장의 값을 구하는 것을 반복하여 수렴시키면 영구자석에서 감자작용이 고려된 상태의 자화량의 값을 구할 수 있다.

III. 사례연구

같은 극성을 가진 두개의 자석이 서로 접근하면 척력이 생긴다. 이때 영구자석에 가해지는 자장은 자화량을 줄이는 감자작용을 하게 된다. 만일 영구자석의 자화량이 변하지 않는다고 할 경우 두 자석이 가까워짐에 따라 척력은 커진다. 그러나 보자력이 다른 두자석을 접근시키면 보자력이 적은 자석의 자화량은 변하므로 두 자석사이에 작용하는 힘은 달라진다. 그림 2는 해석하는 모델의 네오뎀계의 자석과 페라이트계의 고무자석의 상대위치를 그린 것이다. 네오뎀계의 자석은 보자력 875 kA/m, 잔류자속밀도 값이 1.1 T이며 페라이트계의 고무자석은 보자력이 180 kA/m, 잔류자속밀도의 값이 0.32 T이다.

두 자석사이에 작용하는 힘의 계산값은 앞절의 해석방법과 Maxwell stress tensor 법[13-14]을 이용하여 계산하였으며, 힘의 측정값은 한 자석을 고정시키고 다른 자석은 strain gauge type load cell에 부착하여 두 자석사이의 거리를 변화시키며 측정하였다. 두 자석은 착자된 후에는 감자작용으로 인하여 그림 2의 페라이트 자석 P와 Q 지점의 자화량은 그림 3의 히스테리시스 곡선상의 P1 및 Q1 점에 있게 된다. 그림 3은 그림 2의 고무

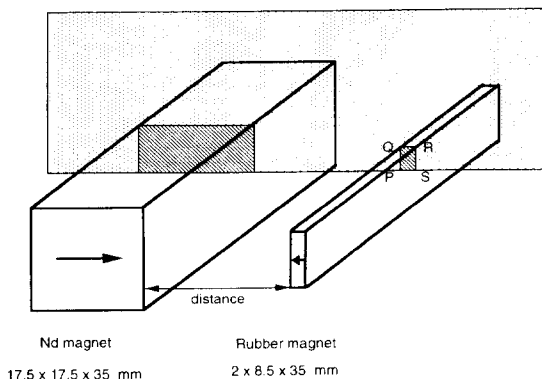


Fig. 2. Analysis model with two magnets.

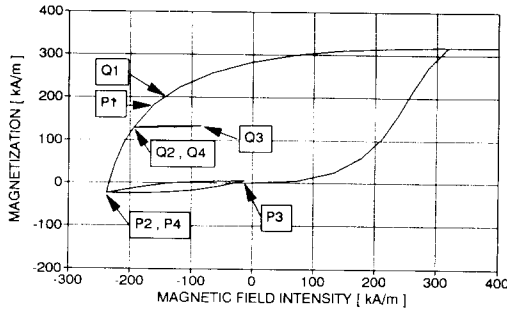


Fig. 3. Hysteresis curves of ferrite magnet. P and Q represent the points in Fig. 2. State 1 : $d = 25$ mm at first approach, State 2 : $d = 0$ mm at first approach, State 3 : $d = 25$ mm at second approach, State 4 : $d = 0$ mm at second approach.

자석 P와 Q 지점의 자계의 세기를 X축, 자화량을 Y축으로 한 히스테리시스 곡선으로, 자석의 거리에 따른 작용점(operating point)의 변화를 나타낸다.

자석은 먼저 25 mm 거리에 두고 천천히 접근시키면 척력이 점점 커진다. 그러나 거리가 가까워지면 보자력이 작은 자석의 자화량은 줄어들기 시작하여 반발력은 포화되고, 거리가 더욱 가까워짐에 따라 자석에 가해지는 자계의 세기가 보자력을 넘어서는 일정거리 이하에서 자석은 보자력이 센 자석의 자장으로 인하여 부분적으로 역으로 자화되어 자석사이의 힘은 인력으로 변한다.

두 자석이 붙었을 때 그림 2의 P와 Q 지점의 자화량

은 그림 3의 히스테리시스 평면상의 P2, 및 Q2 점에 있게 된다. P지점의 자화량은 3상한, Q지점의 자화량은 2상한에 있으므로 Q지점의 자화량은 양의 방향을 유지하고 있으나, P지점의 자화량은 역으로 자화되었음을 볼 수 있다. 그림 4는 거리 25, 1, 그리고 0 mm에서의 자화량의 분포를 나타낸 것인데 1 mm와 0 mm에서 자석 중앙부분 P점 부근에서의 자화량은 반전되어 있는것을 볼 수 있다.

다시 자석을 분리시키면 자석의 자체 감자작용에 의하여 P3, Q3 점에 있게 된다. 두번째로 자석을 접근시키면 자석의 자화량은 마이너루프를 따라 P4, Q4 점으로 오게 되며, 이미 역으로 자화된 부분의 자화량 때문에 첫번째 접근때와는 달리 척력은 없고 인력만 있게 된다.

각각의 거리에 대하여 자화량의 변화를 고려한 본 논문의 방법으로 계산된 힘의 값과, strain gauge type load cell을 이용하여 측정된 값을 나타낸 것이 그림 5이다. 그림 5에서 양수의 값은 인력, 음수의 값은 척력을 나타내며, 계산값은 실측치와 잘 일치함을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 Preisach 모델과 결합된 유한요소법으로 자화량이 변하는 영구자석시스템을 해석하였다. 보자력과 잔류자속밀도값이 서로다른 두자석을 접근시켰을 때 두 자석사이에 작용하는 힘은 자석이 가까워짐에 따라 보자력이 작은 자석의 자화량이 보자력이 큰 자석의 자장에 의하여 역으로 자화되고, 이에 따라 두 자석사이에 작용하는 척력은 인력으로 변하게 되는데, 본 논문의 방법

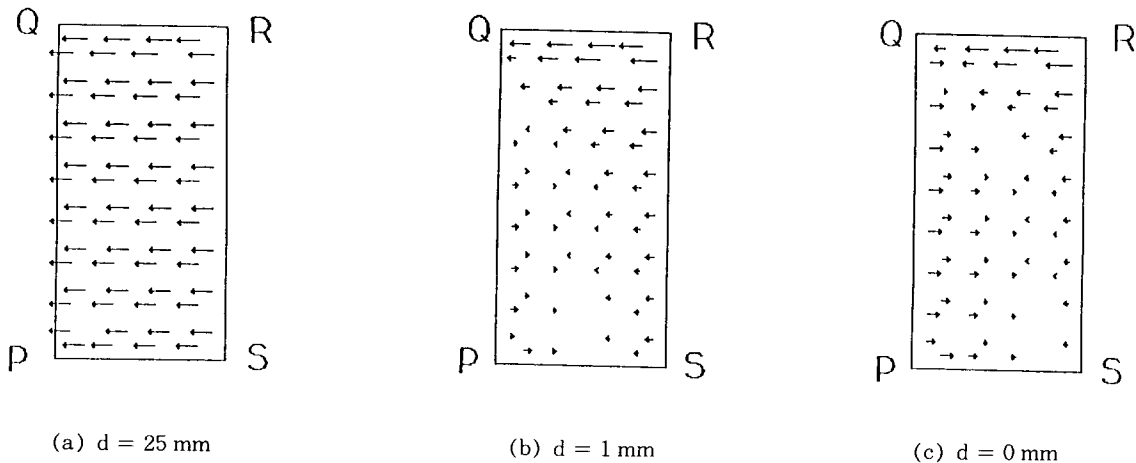
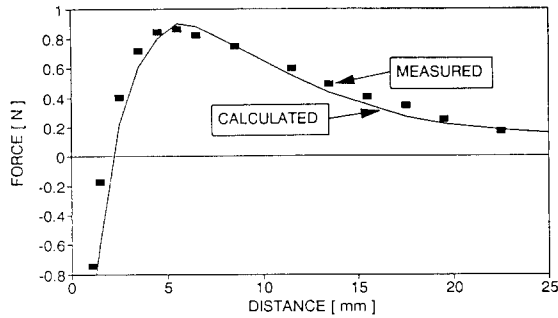
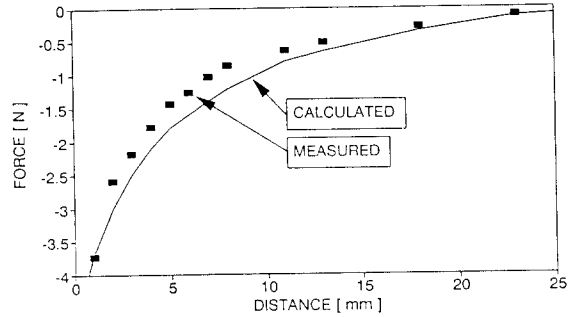


Fig. 4. Distribution of the magnetization at the plane (PQRS) in Fig. 2.



(a) At the first approach



(b) At the second approach

Fig. 5. Forces between two magnets.

으로 계산한 힘의 값은 실측치와 잘 일치함을 보임으로써 본 방법은 영구자석의 복잡한 히스테리시스 현상을 잘 고려할수 있음을 보였다.

영구자석을 사용한 기기에서 영구자석의 자화량은 전류원 또는 다른 영구자석에 의하여 변하므로 영구자석을 사용한 기기를 해석하거나 설계할때는 자석의 자화량의 변동을 고려해 주어야 한다. 영구자석의 변하는 자화량을 고려해 주기 위해서는 복잡한 히스테리시스 현상을 수치 모사할 수 있어야 하며, 본 논문의 방법은 자화량의 변화가 발생하는 영구자석기기의 해석에 적합함을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] T. Nakata, N. Takahashi, A. Imada, N. Tabuchi and M. Kumada, IEEE Trans., **MAG-23**, No. 5, 3774(1987).
- [2] C. G. Anderson and S. H. Salter, IEEE Trans., **MAG-23**, No. 5, 3836(1987).
- [3] K. J. Binns, M. A. Jabbar and W. R. Barnard, IEEE Trans., **MAG-11**, No. 5, 1538(1975).
- [4] H. Gutt and R. Lust, IEEE Trans., **MAG-26**, No. 2, 532(1990).
- [5] Y. Saito, S.Hayano, T. Yamamura and N. Tsuya, **MAG-20**, No. 5, 1434(1984).
- [6] C. D. Bdey, IEEE Trans., **MAG-25**, No. 5, 392 (1989).
- [7] S. Prusty and M. V. S. Rao, IEEE Trans., **MAG-20**, No. 4, 606(1984).
- [8] J. Chavanne, G. Meunier, S. C. Sabonnadiere, IEEE Trans., **MAG-25**, No. 5, 3581(1989).
- [9] R. Gupta, T. Yoshino and Y. Saito, IEEE Trans., **MAG-26**, No. 2, 383(1990).
- [10] F. Ossart and G. Meunier, IEEE Trans, **MAG-26**, No. 5, 2837(1990).
- [11] I. D. Mayergoyz and G. Friedman, IEEE Trans., **MAG-24**, No. 1, 212(1988)
- [12] O. C. Zienkiewicz, The Finite Element Method, McGraw-Hill, London(1977).
- [13] W. Müller, IEEE Trans, **MAG-26**, No. 2, 1058 (1990).
- [14] M. Ito, f. Jajima and H. Konazaun, IEEE Trans, **MAG-26**, No. 2, 1035(1990).

Preisach Model for Analyzing the Permanent Magnet System with Hysteresis Characteristics

Gwan-soo Park and Song-yop Hahn

Dept. of Electrical Engineering, Seoul National University

Ki-sik Lee

Dept. of Electrical Engineering, Dankook University

Hyun-kyo Jung

Dept. of Electrical Engineering, Kangweon National University

(Received 27 March 1992, in final form 18 May 1992)

Magnetization of permanent magnet in the strong magnetic field is changeable. So the change of magnetization must be considered for the accurate analysis of the system with permanent magnets. But the hysteresis characteristic of permanent magnet cannot be represented in simple mathematical form. In this paper, Preisach model combined with finite element method which can describe the hysteresis phenomena is applied to analyze the permanent magnet system. To validate the method, it is applied to the force calculations between two magnets with different coercivities and the numerical results are compared with measured data.