

## 강자성체의 히스테리시스 역 보상 모델

박영우<sup>\*</sup>(충남대 메카트로닉스공학과), 한광섭(충남대 메카트로닉스공학과)

### Inverse Compensation of Hysteresis in Ferromagnetic Materials

Y. W. Park(Mechatronics. Eng. Dept. CNU), K. S. Han (Mechatronics Eng. Dept., CNU)

#### ABSTRACT

This paper addresses the development of inverse compensation techniques for a class of ferromagnetic transducers including magnetostrictive actuators. In this work, hysteresis is modeled through the domain wall theory originally proposed by Jiles and Atherton[1]. This model is based on the quantification of the energy required to translate domain walls pinned at inclusions in the material with the magnetization at a given field level specified through the solution of an ordinary differential equation. A complementary differential equation is then employed to compute the inverse which can be used to compensate for hysteresis and nonlinear dynamics in control design.

**Key Words** : Hysteresis, Domain, Domain Wall, Preisach, Jiles-Atherton

#### 1. 서론

철, 니켈 등의 자성원자로 이루어진 금속물질은 강한 자기장에 놓이면 강하게 자화되는데 이것을 강자성체라고 하며 이러한 강자성체는 대부분의 공학 분야에서 모터, 스위치, 센서, 액츄에이터로서 사용되고 있다.

강자성체는 히스테리시스(Hysteresis), 와전류(Eddy Current) 손실 등 여러 가지 특성을 갖고 있다. 그 중에서 히스테리시스는 시스템을 제어할 때 발생하는 어려움 중에 하나라고 할 수 있으며, 시스템의 정밀한 제어를 위해서는 반드시 보정 되어야 한다. 히스테리시스를 나타내는 모델은 크게 현상적인 모델과 물리적인 모델로 분류할 수 있다. 현상적인 모델은 실험에 의해 얻어진 히스테리시스 데이터를 통해 커브의 위치에 따른 차별화된 가중치를 부여함으로써 선형화 시키는 방법으로 Preisach 모델이 대표적이다. 물리적인 모델은 자기장 내에서 발생하는 자기 모멘트와 에너지와의 관계식에 의해서 히스테리시스 관계식을 유도해 내고, 역 보상 과정을 거쳐 선형화 시키는 방법으로 Jiles-Atherton 모델이 대표적이다.

Jiles-Atherton 모델은 도메인 벽의 휘어짐과 변이 운동의 해석에 의한 모델이며, Preisach 모델에

비해서 해석 시간이 두 배 이상 빠르기 때문에, 실시간 제어에 적합한 모델이라 할 수 있다. 반면에, 모델 파라미터에 따라서 Preisach 모델에 비해 부정확한 데이터를 얻을 수 있기 때문에, 모델링을 위한 여러 파라미터의 설정이 매우 중요하다. 파라미터의 설정은 히스테리시스 커브 특정 부분의 실험 데이터와 여러 최적화 방법에 의해서 결정할 수 있으며 본 과정을 통해서 얻어진 모델은 역 보상 방법에 의해 여러 시스템에 적용되게 된다.

본 연구에서는 강자성체의 히스테리시스를 Jiles-Atherton 모델을 이용하여 구현하고, 이것을 역 보상화하여 히스테리시스를 제거하려고 한다.

#### 2. Jiles-Atherton 모델

##### 2.1 Jiles-Atherton 모델의 전개

Jiles-Atherton 모델은 솔레노이드를 통해 강자성체에 자기장이 형성 되었을 때 재료 내부의 도메인 자기 모멘트가 발생될 때 생성되는 에너지 관계에 기반을 두고 있다.

Jiles-Atherton 모델의 구성은 크게 Anhyseresis Magnetization, Irreversible Magnetization, Reversible Magnetization, Total Magnetization 으로 나뉘어진다.

Anhyseresis Magnetization 이란 무결점 상태에서

의 Magnetization 을 말한다. 대부분의 환경에서 무결점은 존재하지 않으며 이값은 이상적인 값으로 히스테리시스가 존재하지 않는 Magnetization 이다. 그리고 Anhyseresis Magnetization 을 통해 Irreversible and Reversible Magnetization, Total Magnetization 을 구하게 된다.

Fig.1 에서 보는것과 같이 도메인과 도메인의 경계를 도메인 벽이라고 하며 이 벽은 자기장에 의해서 소성변형과 탄성변형을 갖게 되는데 도메인 벽의 전이 운동인 소성 변형에 의한 Magnetization 을 Irreversible Magnetization 이라고 하며 도메인 벽의 휘어짐 운동 즉, 탄성변형에 의해서 생성되는 Magnetization 을 Reversible Magnetization 이라고 한다. 실제로 강자성체에 소량의 전류를 흘려 주었을 때 탄성변형인 Reversible Magnetization 만이 존재하며 대량의 전류를 흘려 주었을 때 Irreversible Magnetization 이 같이 존재 하게 되는데 Irreversible Magnetization 이 강자성체의 히스테리시스를 일으키는 주요한 원인이라고 할 수 있겠다.

최종적인 Total Magnetization 은 Irreversible Magnetization 과 Reversible Magnetization 의 합으로 표현할 수 있으며 이것은 Jiles-Atherton 모델의 최종식이 된다..

### 2.1.1 Effective Magnetic Field

일반적으로 Effective Magnetic Field 는 솔레노이드에 의해서 생성되는 자기장, 자기 도메인의 상호작용, 비등방성에 영향을 받아 형성된다. 이것은 재료의 내부에서 형성 되어지는 자기장을 의미하며 Magnetization 에 직접적인 영향을 주는 자기장이라고 할 수 있다. 그리고 이것은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_e = H + \alpha M \quad (3)$$

여기서  $H$ 는 솔레노이드에 의한 자기장을 나타내며  $\alpha$ 는 도메인 사이의 커플링 상수이다. 결국 외부에서 같은 자기장을 걸어주더라도 Effective Magnetic Field 는 재료마다 다른 값을 갖게 된다는 것을 알 수 있다.

### 2.1.2 Anhyseretic Magnetization

Anhyseresis Magnetization 은  $H_e$  에 대해 Langevin 표현을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{an} = M_s [\coth(H_e / a) - a / H_e] \quad (4)$$

위 식에서  $M_s$ 는 포화 자화를 나타내며,  $a$ 는

$M_{an}$ 의 모양 상수로서  $a = Nk_B T / \mu_0 M_s$ 이다. 여기서  $N$ 은 평균 도메인 밀도를 나타내며  $k_B$ 는 볼츠만 상수,  $k_B T$ 는 볼츠만 열 에너지이다.  $M_{an}$ 을 구하기 위해서는 위의 상수들을 모두 알아야 하지만  $N$ 은 미지수 이기 때문에  $a$  값을 얻기 위해서는 실험데이터를 통해 최적화된 상수값을 구할 수 밖에 없다.

### 2.1.3 Irreversible, Reversible and Total Magnetization

Anhyseresis Magnetization 는 Irreversible, Reversible Magnetization 을 얻기 위한 이상적인 Magnetization 이며 Anhyseresis Magnetion 을 이용하여 Irreversible, Reversible Magnetization 을 구할 수 있다.

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{M_{an} - M_{irr}}{k\delta - \alpha(M_{an} - M_{irr})} \quad (5)$$

위 식에서  $k = \langle p \rangle \langle \varepsilon_\pi \rangle / 2m\mu_0(1-c)$ 이며  $\langle p \rangle$ 는 벽과 벽이 교차하는 부분의 평균밀도,  $\langle \varepsilon_\pi \rangle$ 는 벽에서 발생하는 평균 에너지,  $c$ 는 reversibility 상수,  $m$ 은 도메인의 마그네틱 모멘트이다. 그리고 파라미터  $\delta$ 는 다음 값을 갖게 된다.

$$\delta = \begin{cases} +1, (dH > 0) \\ -1, (dH < 0) \end{cases} \quad (6)$$

그리고 Reversible Magnetization 과 관련된 식은 다음과 같다.

$$M_{rev} = c(M_{an} - M_{irr}) \quad (7)$$

최종적인 자화의 형태는 다음과 같이 나타낼 수 있으며 식 (8)을 통해 얻어진 자화 값은 샘플링 시간 후에 다시 식(3)의 Magnetization 으로 대입되게 된다.

$$M_{Tot} = M_{rev} + M_{irr} \quad (8)$$

### 2.2 모델 파라미터

상대적으로 Jiles-Atherton 모델은 Preisach 모델에 비해서 부정확 값을 갖게 된다. 그 이유는 Preisach 모델은 센서를 이용한 실험데이터이고 Jiles-Atherton 모델은 순수한 물리적 이론에 따른 수식 전개 및 그것에 따른 파라미터의 설정에 의한 모델이기 때문이다. 그래서 Jiles-Atherton 모델은 파라미터에 따라 다양한 모양의 히스테리시스를 생성할 수 있으며 최적화 된 파라미터의 설정은 보다 근사화된 히

스테리시스식의 필수 요건이라 할 수 있을 것이다.

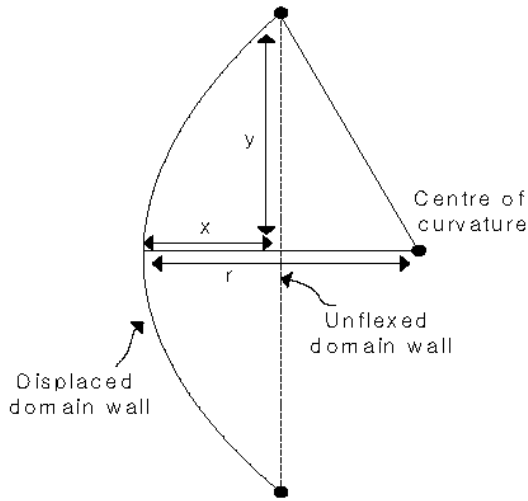


Fig. 1 Bending of a magnetic domain wall between two pinning sites under the influence of a magnetic field

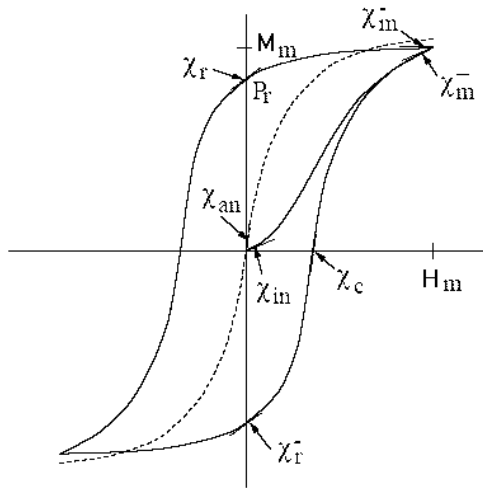


Fig. 2 Hysteresis curve with differential susceptibilities employed for parameter determination

파라미터는 구동 환경에서의 자기변형재료의 실험 데이터값을 구하고 특정 부분에서의 데이터의 최적화 과정을 거쳐 얻게 된다. Fig.3 에서 파라미터를 얻기 위한 특정 구간을 보여주고 있다.

Table1 은 Jiles-Atherton 모델의 대표적인 파라미터를 보여주고 있으며 각각의 파라미터가 히스테리시스 곡선에 미치는 영향에 대해서 기술해 놓았다.

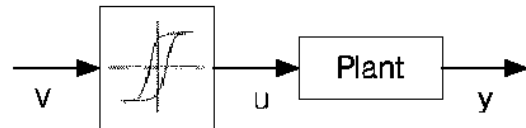
Table 1. Property of Parameters

Parameter	Physical Property	Effects on Model
$\alpha$	Quantifies domain interactions	Increased values lead to steeper slopes for anhysteretic and magnetization curves
$a$	Shape parameter for Man	Increased value decreases slope of Man
$k$	Average energy required to break pinning sites	Increased value produces narrower hysteresis curve and minor loop
$C$	Reversibility coefficient	Decrease in value leads to wider hysteresis curve
$M_s$	Saturation magnetization	Increase leads to large saturation value for magnetostriction

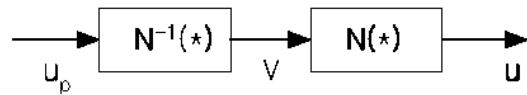
### 2.3 역 보상 모델

파라미터 최적화 과정 후 최종적인 자화식 (8)을 역 보상 하게된다. 역 보상 과정을 통해서 Fig.1 과 같이 히스테리시스를 제거 할 수 있으며 관련된 식은 다음과 같다.

$$M(M^{-1}(H)) = M^{-1}(M(H)) = H \quad (9)$$



(a) Plant with input actuator hysteresis  $N(*)$



(b) Inverse compensator  $N^{-1}(*)$  for the hysteresis

Fig. 3 Inverse Compensation for Hysteresis

### 3. 시뮬레이션

Table 2. Parameter for 1% manganese steel

Parameter	Data
$\alpha$	0.0033
$a$	3750 A/m
$k$	0.0019
$M_s$	1.6 MA/m

앞에서 살펴본 식을 이용하여 히스테리시스 곡

선을 나타내 보았다. 아래 결과 보여지는 히스테리시스는 망간 함급에 대한 데이터를 기반으로 나타낸 것이다.[1]

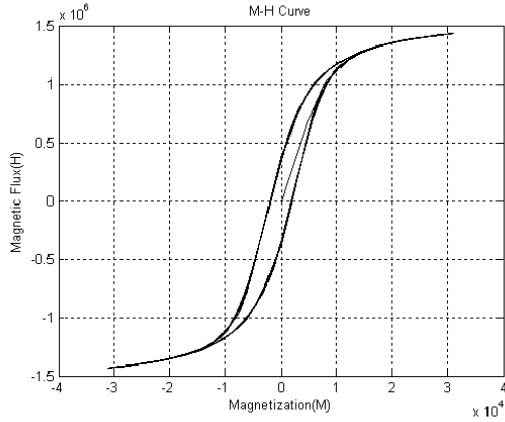


Fig. 4 Theoretical Hysteresis curve for 1% manganese steel

### 3.1 파라미터에 관한 곡선 실험

최적화 과정을 거쳐 얻어진 파라미터가 Jiles-Atherton 모델의 히스테리시스 곡선에 미치는 영향에 대해서 살펴 보았다. 여기서  $M_s$  는 재료마다 규격화 되어 있고 히스테리시스 곡선의 모양에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 배제하였으며 파라미터 C 역시 수식 전개 과정에서 상쇄되어 지기 때문에 비교 대상에서 제외되었다.

#### 3.1.1 $\alpha$

$\alpha$ 가 증가함에 따라서 히스테리시스 곡선의 폭이 넓어 지고 Anhysteresis Magnetization 과 Magnetization의 기울기가 증가하는 것을 Fig.5에서 확인해 볼 수 있다.

#### 3.1.2 $a$

$a$ 는 Anhysteresis Magnetization에 대한 모양 파라미터를 나타낸다.  $a$ 를 증가시켜 주었을 때 Anhysteresis Magnetization의 기울기값이 감소하는 것을 Fig.6에서 확인해 볼 수 있다.

#### 3.1.3 $k$

$k$ 는 도메인 벽이 귀속되어 있는 상태에서 벗어나기 위한 평균 에너지에 대한 파라미터이다. 이것이 증가하게 되면 히스테리시스 곡선은 Fig.7과 같이 히스테리시스 곡선의 폭이 좁아지는 현상이 나타나게 된다.

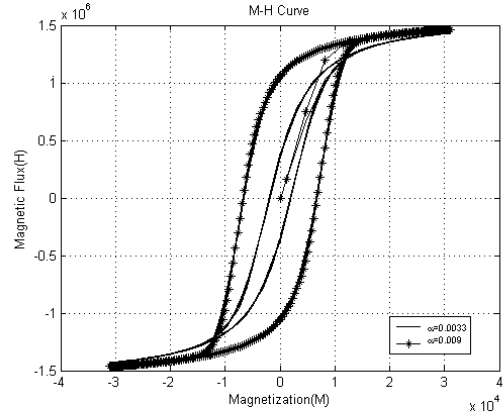


Fig. 5 Theoretical Hysteresis curve with  $\alpha$  variance

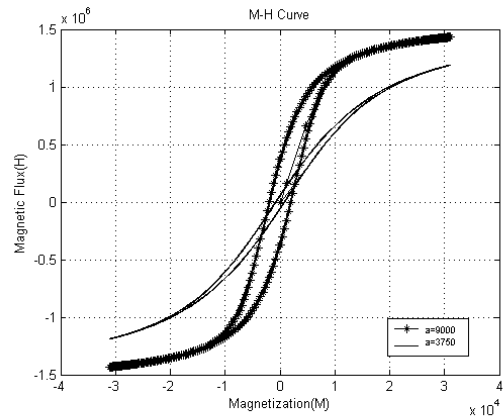


Fig. 6 Theoretical Hysteresis curve with  $a$  variance

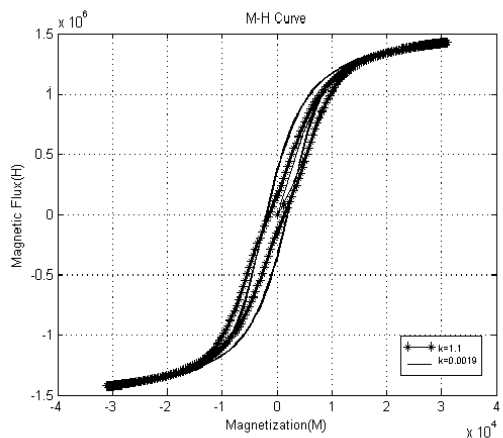


Fig. 7 Theoretical Hysteresis curve with  $k$  variance

### 3.2 히스테리시스 곡선을 이용한 역 보상

Fig.8은 Jiles-Atherton 모델을 이용한 히스테리시스 곡선을 역 보정한 곡선이다. 이러한 역 보

상 과정을 거쳐 Fig.1 처럼 시스템의 입력전에 히스테리시스 비선형성을 제거해 줌으로서 시스템제어를 보다 용이하게 할 수 있다.

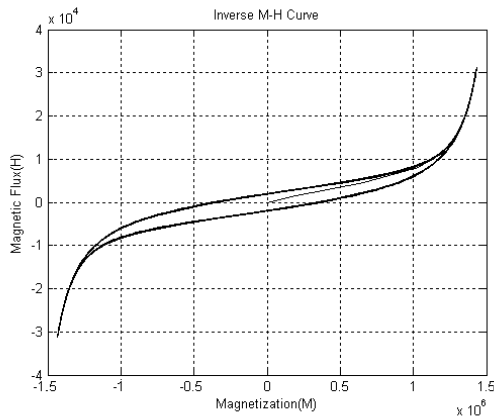


Fig. 8 Theoretical Hysteresis curve Inversed

#### 4. 결론

본 연구는 여러 액추에이터에 사용되는 강자성체 물질에 대한 히스테리시스 특성에 대해 이해하고 그것을 Matlab 을 이용하여 시뮬레이션 해 보았다. 여기서 사용한 Jiles-Atherton 모델은 물리적인 이론을 기반으로 이루어진 모델로서 대표적인 현상적 모델인 Preisach 모델에 비해 Computation 시간이 2 배이상 빠를 뿐만 아니라 파라미터의 최적화를 통해 실험데이터와 근사한 데이터를 얻을 수 있다는 특징을 갖고 있다.

시뮬레이션 과정에서 각 파라미터의 비교를 통해 각각의 파라미터들이 히스테리시스 곡선에 미치는 영향에 대해서 살펴 보았으며 최종적으로 완성된 히스테리시스 곡선을 역 보상 과정을 거쳐 비선형성을 띄고 있는 히스테리시스의 영향을 보상해 줄 수 있게 되었다.

향후 더욱 빠르고 정교한 히스테리시스 파라미터의 최적화를 통한 히스테리시스 역보상 알고리즘을 이용하여 마이크로액추에이터의 제어 모델에 적용할 것이다.

#### 참고문헌

1. D.C. Jiles and D.L. Atherton, Theory of ferromagnetic Hysteresis, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 61, 48-60, 1986..
2. R.C. Smith, Inverse Compensation for Hysteresis in Magnetostrictive Transducer, Mathematical and Computer Modelling 33, 285-298, 2001..

3. J.B. Thoelke and M. K. Devine, Numerical Determination of Hysteresis Parameters for the Modeling of Magnetic Properties Using the Theory of Ferromagnetic Hysteresis, IEEE TRANSACTIONS, VOL. 28, NO 1, January 1992.
4. R.C Smith, A Domain Wall Model for Hysteresis in Piezoelectric Materials, NASA ICASE Report No. 99-52, 1999.
5. F.T. Calkins, R.C. Smith and A.B. Flatau, Energy-Based Hysteresis Model for Magnetostrictive, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 36, NO. 2, MARCH 2000.
6. M.G. Salloker, Nonlinear Modelling and Parameter Identification of Magnetostrictive Actuators Based on Jiles-Atherton Models, ACTUATOR 2002, 8<sup>th</sup> International Conference on New Actuators, 10-12 June 2002.