

# Preisach 모델을 이용한 MR 유체의 히스테리시스 특성 고찰

## Hysteresis Investigation of Magnetorheological Fluid Using Preisach Model

한 영 민\* · 임 계 현\*\* · 최 승 북†

Y. M. Han, K. H. Lim and S. B. Choi

(2005년 5월 23일 접수 ; 2005년 12월 12일 심사완료)

**Key Words** : Magnetorheological Fluid(자기유변유체), Hysteresis(히스테리시스), Preisach Model(프라이작 모델)

### ABSTRACT

This paper presents a new approach for hysteresis modeling of a magnetorheological (MR) fluid. The field-dependent hysteresis of MR fluid is investigated using the Preisach model. The commercial MR product (MRF-132LD, Lord Corporation) is employed. Its field-dependent shear stress is then obtained using a rheometer (MCR 300, Physica). In order to show the applicability of the Preisach model to the MR fluid, two significant properties: the minor loop property and the wiping-out property are experimentally examined. Subsequently, the Preisach model for the MR fluid is identified using experimental first order descending (FOD) curves in discrete manner. The effectiveness of the identified hysteresis model is verified in the time domain by comparing the predicted field-dependent shear stress with the measured one. In addition, the hysteresis model proposed in this work is compared to Bingham model.

### 1. 서 론

최근 능동 및 반능동 제어시스템의 작동기로서 MR(magnetorheological) 유체를 비롯하여 압전세라믹, 형상기억합금, ER(electrorheological) 유체 등 다양한 지능재료들이 적용되고 있다. 이러한 지능재료를 이용한 작동기는 기존의 유압 및 전기 작동기에 비해 작은 크기와 빠른 응답속도 등의 여러 가지 잇점을 갖고 있다. 특히, MR 유체는 인가되는 자기장의 강도에 비례하여 그 역학적 특성이 변하는 유체로서 연속적인 제어와 단순한 설계가 용이하여 다양한 응용장치에 적용되어 많은 연구가 수행되어 왔으며,

최근 각종 차량부품(속업소바, 엔진마운트, 시트댐퍼, 팬클러치)에 실제 적용되고 있다<sup>(1)</sup>. 일반적으로 MR 유체는 자기장 인가 시 입자들이 체인 형 구조를 형성하여 항복전단응력을 갖는 빙햄(Bingham) 유체로 알려져 있다<sup>(2)</sup>. 이러한 거동을 표현하는 빙햄 모델은 간단하기는 하나 MR 유체가 갖고 있는 큰 히스테리시스 현상을 고려하지 못하기 때문에 실제 거동을 정확히 표현하기에는 많은 어려움이 있다.

히스테리시스 현상은 MR 유체뿐만 아니라 압전재료나 형상기억합금 등 대부분의 지능재료가 갖고 있는 공통적인 문제로써 작동기의 제어성능을 떨어뜨리는 주요한 요소로 작용하고 있다. 따라서 이를 개선하기 위한 작동기의 수학적 모델링과 제어기의 설계가 새로운 과제로 대두되고 있다.

대표적인 접근방법으로는 비선형 히스테리시스 모델<sup>(3-5)</sup>을 구축하고 히스테리시스에 의한 영향을 추정하여 보상하는 방법과 히스테리시스의 영향을 불확실성으로 고려하여 강건 제어기<sup>(6)</sup>를 구축하는 방법이 널

† 책임저자 : 정회원, 인하대학교 기계공학부  
E-mail : seungbok@inha.ac.kr  
Tel : (032) 860-7319, Fax : (032) 868-1716

\* 정회원, 인하대학교 대학원 기계공학부

\*\* 인하대학교 대학원 기계공학과

리 이용되어 오고 있다. 특히, 히스테리시스에 대한 정확한 모델 구축은 작동기의 제어성능 향상에 필수적인 요소이다. 최근 지능작동기 분야에서는 강자성 재료에 주로 적용되어 온 프라이작(Preisach) 모델<sup>(7)</sup>을 이용하여 압전재료와 형상기억합금, ER 유체 등의 히스테리시스 모델을 구축하고자 하는 연구가 이루어 지고 있다<sup>(3,4,8,9)</sup>.

MR 유체는 두 개의 서로 다른 히스테리시스 거동을 동시에 하는 것으로 알려져 있는데, 하나는 전단 속도비와 같은 동적부하의 변화에 기인하며, 나머지는 제어입력인 자기장의 변화에 따라 발생한다. 하지만, MR 유체의 히스테리시스 연구는 댐퍼 등 MR 응용장치의 전단속도 비에 따른 히스테리시스 모델 구축에 그 초점이 맞추어져 오고 있으며, 자기장에 따른 유체 자체의 히스테리시스 현상과 모델 구축에 대한 연구는 아직 미흡한 상태이다. Stanway<sup>(10)</sup> 등은 ER 댐퍼의 거동을 표현하기 위한 기계적 모델을 제안하였으며, 이는 댐퍼와 병렬로 연결되는 쿨롬마찰 요소로 구성된다. Spencer<sup>(11)</sup> 등은 Bouc-Wen 모델을 이용한 MR 댐퍼의 히스테리시스 모델을 제안하였으며, Kamath와 Werely<sup>(12)</sup>는 스프링과 댐퍼로 이루어진 전향복 영역과 댐퍼와 질량으로 이루어진 후향복 영역으로 나누어 고려한 비선형 점탄성-소성(nonlinear viscoelastic-plastic) 모델을 제안하였다. 이러한 관점에서의 접근은 특정 시스템의 모델링에는 유리한 측면이 있지만, 작동유체의 거동을 표현하는 보다 일반화 된 모델을 구축하지는 못한다. 또한, 전단속도 비에 대한 히스테리시스 모델에 국한되어, 응용장치에서 제어입력으로 작용하는 자기장에 의한 히스테리시스 현상을 전혀 고려하지 않음으로 인해 제어성능 향상에 상당한 어려움이 있다.

따라서, 이 연구에서는 프라이작 모델을 이용하여 자기장의 세기에 따른 MR 유체 자체의 히스테리시스를 고찰함으로써 더욱 정확한 MR 유체의 거동 모델을 구축하고, 응용장치의 제어 성능을 향상시키고자 한다. 이를 위해 점도계를 이용하여 MR 유체(MRF-132LD, Lord사)의 전단응력을 측정하였으며, 인가된 자기장의 세기에서의 변화에 따라 나타나는 히스테리시스 현상을 고찰하였다. 또한, 프라이작 모델의 마이너루프(minor loop) 특성과 와이핑 아웃(wiping-out) 특성 실험을 통해 프라이작 모델이 MR 유체의 히스테리시스 거동들을 잘 표현할 수 있음을 확인하였다. 그리고 MR 유체에 대한 실험적

FOD(first order descending) 데이터를 통해 프라이작 모델을 구축하고 이를 수치적으로 적용하였다. 제안된 모델의 추정값과 실험에 의한 측정값을 비교하였으며, 나아가 제안된 프라이작 모델과 병행 모델의 비교 연구를 수행 하였다

## 2. MR 유체의 히스테리시스 현상

MR 유체는 낮은 투자율의 용매에 강자성의 입자를 분산시킨 현탁액이다. 자기장 부하 시 분산된 입자들의 분극화에 의해 자기장에 평행한 방향으로 형성되는 체인구조는 외부에서 가해지는 전단력에 대해 저항할 수 있다. 이러한 유변학적 특성 변화에 의해 MR 유체는 자기장 세기에 따라 연속적으로 변화되는 항복응력을 갖게 되며, 이 때의 전단응력( $\tau$ )은 유체의 점성에 의한 전단응력( $\eta\dot{\gamma}$ )과 항복응력( $\tau_y$ )의 합으로 나타낼 수 있다. 이러한 거동은 일반적으로 병행 모델로 표현되고, 수학적으로 표현하면 다음과 같다<sup>(2)</sup>.

$$\begin{aligned}\tau(\dot{\gamma}, H) &= \eta\dot{\gamma} + \tau_y(H) \\ \tau_y(H) &= \alpha H^b\end{aligned}\quad (1)$$

여기서,  $\eta$ 는 유체의 점성계수,  $\dot{\gamma}$ 은 유체의 전단 속도비,  $H$ 는 MR 유체에 부하되는 자기장을 나타내며, 이 때 항복응력  $\tau_y(H)$ 은 자기장에 따라 지수적으로 증가한다. 그리고  $\alpha$ 와  $b$ 값은 MR 유체의 고유치로서 용매와 입자의 종류, 조성비, 조성환경 등의 정적인 인자에 의해 결정되는 고유 특성치이다. 병행 모델은 항복 이후의 MR 유체 거동을 적절히 근사할 수 있다는 장점 때문에 MR 응용장치의 제어에 널리 쓰이고 있다. 하지만 MR 유체는 상당히 큰 히스테리시스 거동 특성을 가지고 있기 때문에 기존의 병행 모델만으로는 MR 유체의 실제 거동을 기술하기 어렵다.

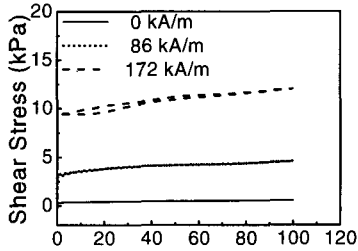
Fig. 1은 MR 유체의 히스테리시스 거동을 측정된 결과를 보여주고 있다. 식 (1)의 전단력이 동적부하 조건인 전단 속도비와 제어 입력인 자기장에 따라 결정되기 때문에 Fig. 1(a)와 (b)는 각각 전단 속도비와 자기장의 변화에 따라 전단력을 측정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 전단 속도비와 자기장의 세기에 따른 두 개의 서로 다른 히스테리시스 곡선이 확연히 존재함을 확인할 수 있다. 이때 히스테리시스 곡선의

방향은 반 시계 방향이다. 전단 속도비의 변화에 따른 MR 유체의 히스테리시스는 응용장치의 히스테리시스와 함께 많이 연구되어 왔다. 그러나 Fig. 1에서 알 수 있듯이 자기장 세기의 변화에 의한 히스테리시스가 오히려 더 크게 나타나고 있으며, 응용장

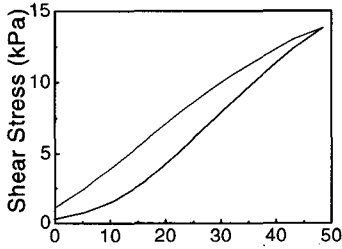
치에서 자기장은 제어입력으로 작용하기 때문에 이에 의한 제어성능의 저하는 필연적이라 할 수 있다. 따라서 MR 응용장치의 제어성능 향상을 위해서는 자기장에 따른 MR 유체 자체의 히스테리시스 거동이 반드시 고려되어야 한다. 하지만 기존의 빙햄 모델을 이러한 히스테리시스 비선형성을 고려하지 않은 모델이다.

실험에서 사용된 MR 유체는 LORD사의 MRF-132LD로 이미 상용화 단계에 있는 제품이다. MRF-132LD는 Carbonyl철 입자와 Hydrocarbon 오일을 혼합한 것으로 용매에 대한 입자의 중량비는 32%이며, 기본점성계수는 0.2 Pas이다. 그리고 실험적으로 구한 히스테리시스 곡선은 자기장 입력에 대해 전단응력(근사항복응력)의 출력으로 표현하였다. 이 연구에서 MR 유체의 점성계수는 Fig. 2(a)와 같이 최대 자기장에 대해서도 40 Pas 이하로 유지된다. 또한, 실험에서 전단 속도비를  $1s^{-1}$ 로 고정하였다. 따라서 식 (1)의  $\eta\dot{\gamma}$ 이 매우 작은 값을 갖게 되며, 이로 인해 식 (1)은  $\tau(\dot{\gamma}, H) \approx \tau_c(H)$ 로 표현될 수 있다. Fig. 2(b)는 실제 측정된 전단응력이며, 항복응력에 근사함을 확인할 수 있다.

이 연구에서는 MR 유체의 히스테리시스 거동을 모델링 하기 위해 다양한 히스테리시스 모델 중에서 프라이작 히스테리시스 모델을 도입하고자 한다. 프

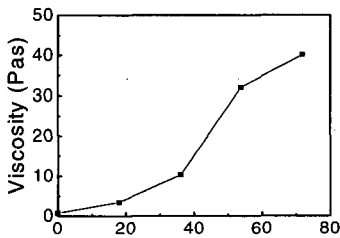


(a) vs. shear rate

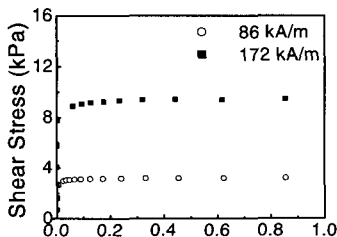


(b) vs. magnetic field

Fig. 1 Hysteresis behavior of the MR fluid

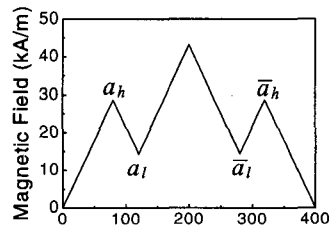


(a) Yield point

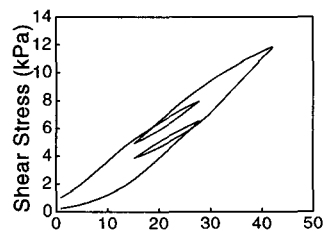


(b) Plastic viscosity

Fig. 2 Approximated yield stress of the MR fluid



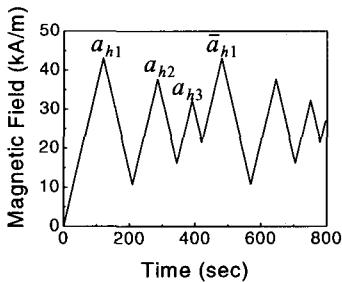
(a) Field trajectory



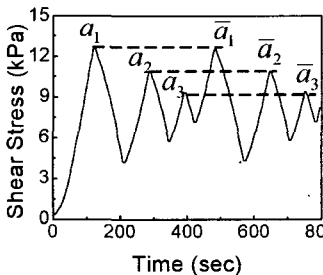
(b) Minor loop response

Fig. 3 The minor loop property of the MR fluid

라이자 모델은 전통적으로 자성재료의 히스테리시스 모델링을 위해 개발되어왔으며, 최근 각종 지능재료의 히스테리시스 거동도 효과적으로 표현할 수 있음이 입증되고 있다<sup>(13)</sup>. 특히, 프라이자 모델이 자성재료가 무수한 쌍극자로 구성되어 있다고 가정하고 이를 히스테리시스 릴레이로 표현하는 모델링 기법이므로, 각 입자의 자기분극에 의해 체인구조가 형성되는 MR 유체에 프라이자 모델의 개념을 적용하기가 매우 용이하다. 하지만 프라이자 모델을 MR 유체에 도입하기 위해서는 먼저 프라이자 모델의 주요한 두 가지 특성인 마이너루프 특성과 와이핑 아웃 특성을 만족하는지를 실험적으로 검증하여야 한다. 마이너루프 특성은 Fig. 3(a)와 같이 페루프를 형성하는 입력값 ( $a_l, a_h$ )와 ( $\bar{a}_l, \bar{a}_h$ )에 의해 형성되는 두 개의 마이너루프가 모양과 크기에서 서로 일치하여야 하는 것이다. 그리고 현재 히스테리시스 출력값은 과거의 극한 입력값들에 의해 결정되는데, Fig. 4(a)와 같이 최근의 큰 입력 극한값( $\bar{a}_{h1}$ )이 그 이전의 작은 입력 극한값( $a_{h1,h2,h3}$ )들의 영향을 소거하는 것이 와이핑 아웃 특성이다. MR 유체의 히스테리시스가 이러한 프라이자 모델의 특성들을 만족하는지의 여부는 마이너루프 특성과 와이핑 아웃 특성 실험을 수행함으로써 확인할 수 있다.



(a) Field trajectory



(b) Wiping-out response

Fig. 4 The wiping-out property of the MR fluid

Fig. 3은 마이너루프 실험을 수행한 결과이며, Physica사의 점도측정기(MRC 300)로 측정되었다. 이 때 인가된 자기장의 궤적은 Fig. 3(a)와 같으며, 측정된 한 쌍의 마이너루프는 만족할만한 수준에서 서로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4(a)는 와이핑아웃 실험을 위해 인가된 자기장의 궤적을 보여 주고 있으며, 인가된 자기장은 극대, 극소 값을 가지는 두개의 세트로 구성되어 있다. Fig. 4(b)의 측정 결과에서 보는 바와 같이 첫 번째 세트의 극대값 ( $a_{1,2,3}$ )들이 두 번째 세트의 극대값( $\bar{a}_{1,2,3}$ )과 잘 일치하고 있다. 이것은  $a_{h1,h2,h3}$ 에 의한 히스테리시스 효과가 보다 더 큰  $\bar{a}_{h1}$ 에 의해 소거되어, 과거의 입력값  $a_{h1,h2,h3}$ 는 현재의 출력 값에 더 이상 영향을 주지 않는 것을 의미한다. 이상의 결과로부터 MR 유체는 프라이자 모델의 두 가지 주요한 특성을 충분히 만족하므로, 그 적용 가능성을 확인할 수 있다. 이 연구에서는 이러한 결과를 바탕으로 프라이자 모델을 이용한 MR 유체의 히스테리시스 모델을 구축하였다.

### 3. 프라이자 모델

이 연구에서 MR 유체의 히스테리시스 거동을 기술하기 위해 도입한 프라이자 모델<sup>(7)</sup>을 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\tau_y(t) = \iint_{\Gamma} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}[H(t)] d\alpha d\beta \quad (2)$$

여기서,  $\gamma_{\alpha\beta}$ 는 히스테리시스 릴레이,  $\Gamma$ 는 프라이자 평면이며,  $H(t)$ 와  $\tau_y(t)$ 는 각각 자기장과 항복응력을 나타낸다. 그리고  $\mu(\alpha, \beta)$ 는 가중함수로서 전체 히스테리시스에서 개별 릴레이가 차지하는 가중치이며,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 릴레이를 상하로 전환시키는 입력값이다. 자기장 입력이 시간에 따라 변하면 개별 릴레이들은 입력값의 크기에 따라 상하로 전환되어 출력값을 결정하고, Fig. 5(a)과 같이 가중치를 고려하여 모든 릴레이들의 출력을 더하면 전체 시스템의 출력이 된다. MR 유체에 적용될 수 있는 가장 간단한 변환될 수 있다. 이 때,  $\alpha_0$ 와  $\beta_0$ 는 각각 부하 히스테리시스 릴레이는 Fig. 5(b)와 같다. MR 유체의 항복응력이 나타내는 히스테리시스 루프는 입력(자기장)과 출력(항복응력) 그래프상의 제 1사분면에 항상 존재하므로, 릴레이는 0과 1의 출력값을 갖도록 설정할 수

있다. 프라이작 평면은 Fig. 5(b)와 같이 릴레이와 전환 값 ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) 사이에 일대일 함수로서 기하학적으로 자기장의 상한과 하한을 나타낸다. 이 연구에서  $\alpha_0$ 는 0 kA/m이고  $\beta_0$ 는 53.84 kA/m이다. 이러한 프라이작 평면은 각 개별 릴레이들의 상태를 제공하게 되므로 다음과 같이 두 개의 시변 영역으로 나누어질 수 있다.

$$\begin{aligned} \Gamma_- &= \{(\alpha, \beta) \in \Gamma \mid \text{output of } \gamma_{\alpha\beta} \text{ is } 0\} \\ \Gamma_+ &= \{(\alpha, \beta) \in \Gamma \mid \text{output of } \gamma_{\alpha\beta} \text{ is } 1\} \end{aligned} \quad (3)$$

이 두 영역은 각각 릴레이가 0과 1의 출력값을 가지는 영역이다. 모든 릴레이는 초기에 0의 위치에 있다가 입력이 점진적으로 증가함에 따라 릴레이들은 1의 값으로 전환된다. 즉, 입력이 증가함에 따라 수평 경계선은 위로 이동하고,  $\Gamma_+$  영역이 증가한다. 그리

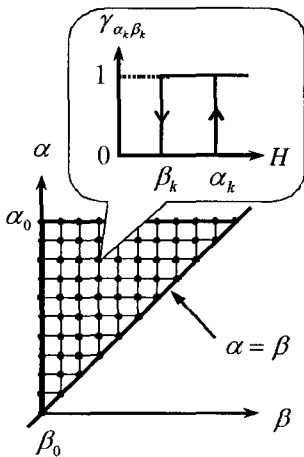
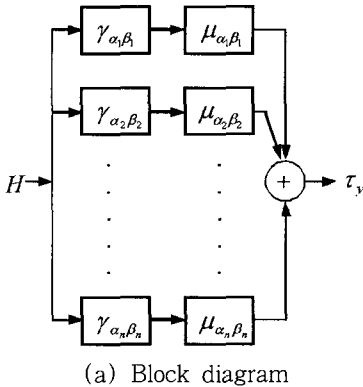


Fig. 5 Configuration of the Preisach model

고 다시 입력이 감소하기 시작하면, 수직 경계선은 오른쪽에서 왼쪽으로 이동하여  $\Gamma_-$  영역을 증가시키며, 릴레이의 값을 1에서 0으로 전환시킨다. 식 (3)의 정의로부터, 식 (2)는 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$\tau_y(t) = \iint_{\Gamma} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (4)$$

프라이작 모델<sup>(7)</sup>의 수치적 구현은 지능재료의 히스테리시스 거동 기술에 있어 매우 효과적인 것으로 증명되어 왔다. 따라서 이 연구에서는 프라이작 평면상의 각 ( $\alpha_k$ ,  $\beta_k$ )의 격자 값에 할당된  $\tau_y^{\alpha_k \beta_k}$ 를 이용한 수치함수를 적용하고자 한다. 이때 각 ( $\alpha_k$ ,  $\beta_k$ )의 격자값은 실험적으로 얻어진 FOD 곡선으로부터 구한 값이며, Fig. 6은 격자값 중의 한 예 ( $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ )에 대한 FOD를 보여주고 있다. 그 격자값에 해당하는 FOD 곡선은 점진적으로  $\alpha_1$ 까지 증가한 후  $\beta_1$ 으로 감소하면서 메이저루프내에 하강곡선을 만든다. 이러한 하강 곡선을 따라 생기는 히스테리시스 출력의 변화는

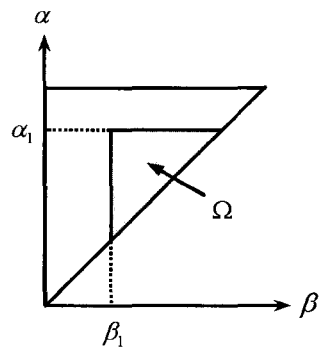
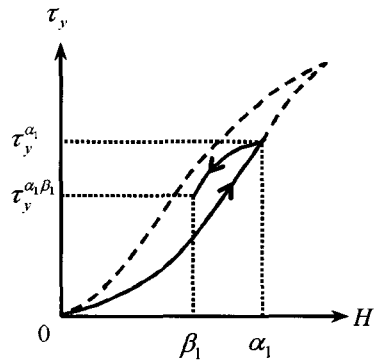


Fig. 6 A sample FOD

다음과 같이 수치적 함수로 표현된다.

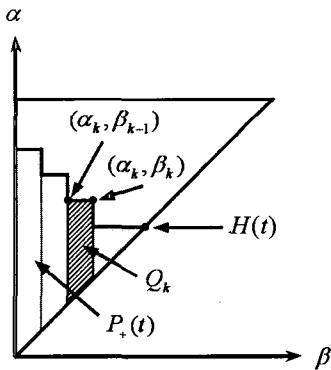
$$T(\alpha_k, \beta_k) = \iint_{\Omega} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = \tau_y^{\alpha_k} - \tau_y^{\alpha_k, \beta_k} \quad (5)$$

따라서, 프라이작 모델은 실험적으로 정의된 함수  $T(\cdot, \cdot)$ 에 의해 수치적으로 구현된다.

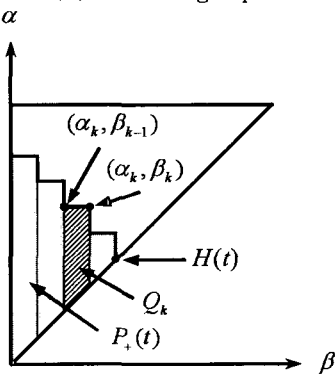
Fig. 7은 증감하는 일련의 입력 자기장을 보여준다. 이 때 릴레이가 1 상태에 있는  $\Gamma_+$ 의 영역은  $n$ 개의 사다리꼴  $Q_k$ 로 나누어 질 수 있다. 기하학적으로 각 사다리꼴  $Q_k$ 의 면적은 두 개의 수치적 함수  $T(\alpha_k, \beta_{k-1})$ 과  $T(\alpha_k, \beta_k)$ 의 차로 표현되며, 각 면적  $Q_k$ 의 출력은 다음과 같이 유도된다.

$$\iint_{Q_k} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = T(\alpha_k, \beta_{k-1}) - T(\alpha_k, \beta_k) \quad (6)$$

사다리꼴  $Q_k$ 의 면적을  $\Gamma_+$  전체의 면적으로 확장하면 출력은 다음과 같이 표현 된다.



(a) Increasing input



(b) Decreasing input

Fig. 7 Numerical implementation of the Preisach model

$$\tau_y(t) = \sum_{k=1}^{n(t)} \iint_{Q_k} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta = \sum_{k=1}^{n(t)} [T(\alpha_k, \beta_{k-1}) - T(\alpha_k, \beta_k)] \quad (7)$$

최종적으로 증감하는 일련의 자기장 입력에 대해 프라이작 모델의 출력  $\tau_y(t)$ 은 실험적으로 정의된  $T(\alpha_k, \beta_k)$ 에 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_{y,inc}(t) = \sum_{k=1}^{n(t)-1} [T(\alpha_k, \beta_{k-1}) - T(\alpha_k, \beta_k)] + T(H(t), \beta_{n(t)-1})$$

$$\tau_{y,dec}(t) = \sum_{k=1}^{n(t)-1} [T(\alpha_k, \beta_{k-1}) - T(\alpha_k, \beta_k)] + [T(\alpha_{n(t)}, \beta_{n(t)-1}) - T(\alpha_{n(t)}, H(t))] \quad (8)$$

여기서, *inc*와 *dec*는 각각 입력 자기장이 증감하는 것을 나타낸다. 프라이작 모델의 수치적 적용은 Fig. 5(b)와 같은 프라이작 평면내의 유한한 격자점 상에서  $T(\alpha_k, \beta_k)$ 를 실험적으로 구해야 한다. 실제적으로 유한한 수의 격자점과 그에 상응하는 유한한 측정 데이터는 연속적인 자기장 입력에 대해 측정 데이터를 보유하지 못하는 경우가 발생한다. 따라서, 입력 자기장이 격자점 상에 존재하지 않을 때는 보간 함수를 적용하여  $\tau_y^{\alpha, \beta}$ 를 구하고, 이로부터  $T(\alpha_k, \beta_k)$ 를 결정할 수 있다. 이 연구에서는 Fig. 5(b)와 같이 사각형 혹은 삼각형의 격자가 존재하므로 각각에 대해 다음과 같은 선형보간을 수행하였다.

$$\tau_y^{\alpha, \beta_k} = c_0 + c_1 \alpha_k + c_2 \beta_k + c_3 \alpha_k \beta_k, \text{ square cells}$$

$$\tau_y^{\alpha, \beta_k} = c_0 + c_1 \alpha_k + c_2 \beta_k, \text{ triangular cells} \quad (9)$$

이때 각 계수는  $10 \times 10$  행렬이다.

#### 4. 히스테리시스 모델 구축 및 결과

Fig. 8는 이 연구에서 제안한 모델을 검증하기 위한 실험장치의 개략도이다. 자기장에 따른 전단응력은 Physica사의 MR cell(TEK 70MR)을 장착한 점도측정기(MCR 300)로 측정되었고, 기계적 마찰 등에 의한 히스테리시스를 최소화하기 위해 공기 베어링이 도입되었다. 그리고 장치의 구동 온도는  $25^\circ\text{C}$ 를 유지하였으며, 회전 디스크의 직경은 20 mm이고, 회

전 디스크와 고정디스크 사이의 간극은 1 mm이다.

Fig. 9(a)은 FOD 곡선을 수집하기 위한 자기장 입력을 보여준다. 자기장의 영역은 0 kA/m에서 53.84 kV/m까지 인가하였으며, 10개의 영역으로 나뉘어져 있다. 이 때 자기장은 계단파형으로 인가되었으며, 정상상태 조건을 만족시키기 위해 20 sec 동안 유지하였다. 측정된 전단 응력으로부터 구축된 FOD 곡선은 Fig. 9(b)와 같으며, 이로부터 수치적 프라이작 모델을 구축하였다. 그리고 Fig. 9(b)의 가장 큰 히스테리시스 곡선에서 입력이 증가할 때의 궤적으로부터 빙햄 특성은  $66.7H^{1.4}$  kPa로 결정되었다.

제안된 프라이작 모델의 타당성을 입증하기 위하여

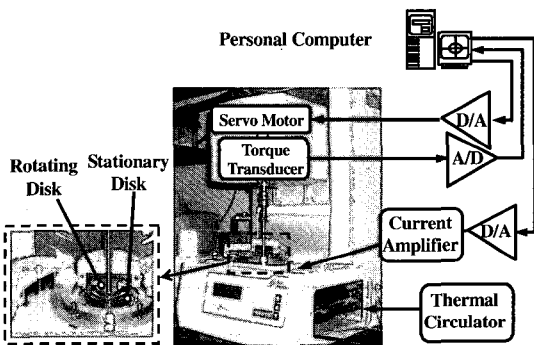
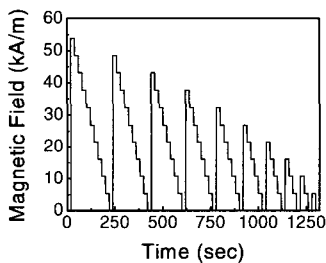
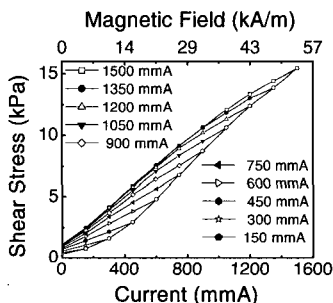


Fig. 8 Schematic configuration of experimental apparatus



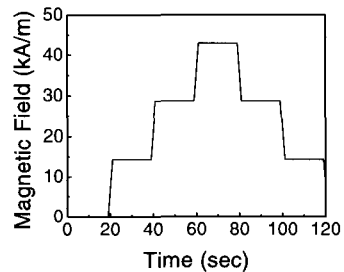
(a) Magnetic field input



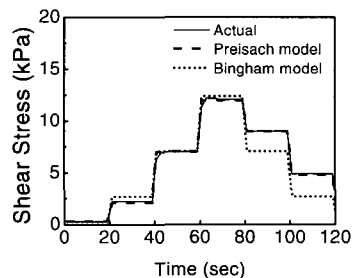
(b) FOD curves

Fig. 9 Measured FOD curves

측정된 실험결과와 모델에 의한 히스테리시스 추정결과를 비교하였다. 이 때 자기장은 계단 및 삼각파형으로 인가하였으며, 추정된 결과들은 빙햄 모델을 사용하여 얻은 결과와 비교하였다. 먼저, Fig. 10(a)에서와 같은 계단 입력에 따른 추정 히스테리시스 응답과 실제 히스테리시스 응답은 Fig. 10(b)와 같다. 증가하는 입력에 대해서는 프라이작과 빙햄 모델이 같은 응답을 보여주고 있으나, 입력이 감소하는 과정에서는 프라이작 모델이 실험결과를 잘 추정하고 있는데 반해, 빙햄 모델은 점점 오차가 커지고 있다. 이는 Fig. 9의 히스테리시스 크기와 비교할 때 일치하는 결과임을 알 수 있다. 이 때 프라이작 모델과 빙햄 모델의 정상상태 추정오차의 최대값은 각각 0.72 kPa와 2.49 kPa이다. Fig. 11은 삼각 입력에 대한 히스테리시스 응답을 보여주고 있다. 역시 빙햄 모델에 비해 프라이작 모델에 의한 추정결과가 실제 실험결과와 더 잘 일치함을 알 수 있으며 이는 시간이 경과함에 따라 극명하게 나타나고 있다. Fig. 11(c)에 나타난 프라이작 모델과 빙햄 모델의 추정오차 최대값은 각각 0.43 kPa와 2.49 kPa이다. Fig. 11(d)는 히스테리시스 루프 결과를 보여준다. Fig. 12은 기울기가 서로 다른 램프 입력이 조합된 임의의 입력 궤적에 대한 추정응답을 나타내고 있다. 프라이작 모델이 실험값을 잘 추정하



(a) Step input trajectory



(b) Hysteresis response

Fig. 10 Actual and predicted hysteresis responses under step input

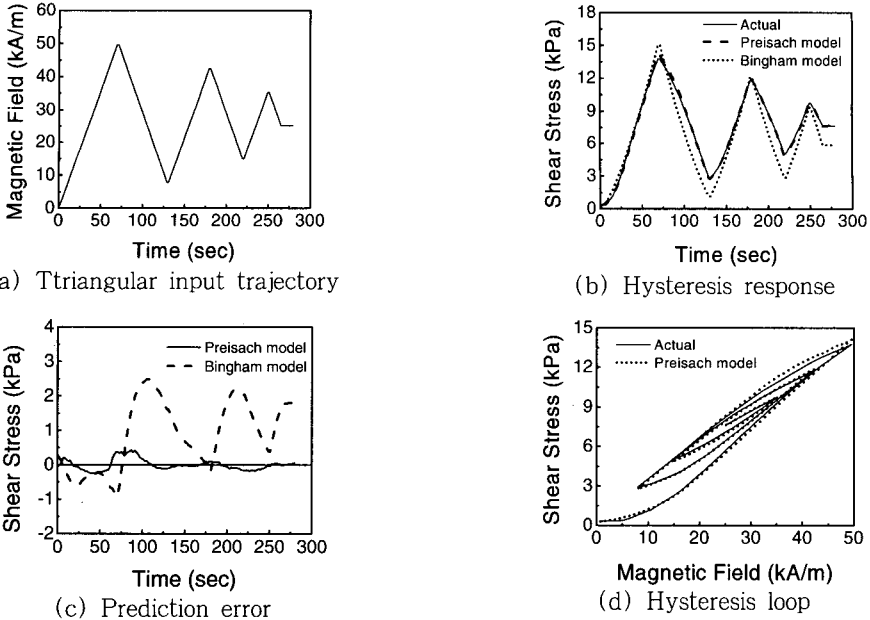


Fig. 11 Actual and predicted hysteresis responses under triangular input

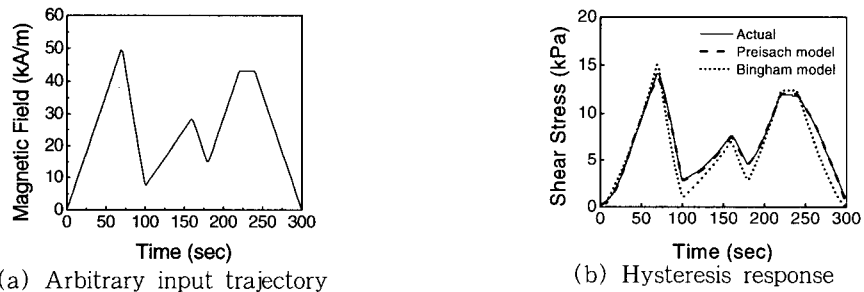


Fig. 12 Actual and predicted hysteresis responses under arbitrary input

는 것을 볼 수 있다. 결과들로부터 제안된 프라이작 모델이 제어입력인 자기장과 출력인 전단응력 사이의 히스테리시스 거동을 매우 잘 기술하는 것을 확인할 수 있으며, 응용장치에 적용 시 우수한 제어성능이 예상된다.

### 5. 결 론

이 연구는 MR 응용장치의 제어에 있어서 중요한 MR 유체 자체의 히스테리시스 현상을 규명하였으며, MR 유체의 비선형 히스테리시스 거동 특성을 식별하기 위해 Lord사의 MRF-132LD에 대한 프라이작 모델을 구축하였다. 먼저, MR 유체에 대한 프라이작 모델의 적용가능성은 마이너루프와 와이핑아웃 테스트를 통해 실험적으로 확인하였다. 이 결과를 바탕으로

FOD 곡선 데이터에 근거한 수치적 방법으로 프라이작 모델이 구축되었다. 그 타당성은 자기장에 따라 추정된 전단응력과 실제 전단응력을 비교하여 입증되었으며, 나아가 제안된 프라이작 모델과 빙햄 모델의 전단응력 추정에 대한 비교연구가 수행되었다. 제안된 프라이작 모델의 결과는 기존의 빙햄 모델의 추정결과와 비교하였을 때 76.2%의 오차 감소를 보였다. 향후 제안된 MR 유체의 프라이작 모델을 응용장치에 적용하기 위한 연구가 계속해서 수행될 예정이다.

### 후 기

이 연구는 국가지정연구소(national research laboratory : NRL) 프로그램의 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.



## 참고 문헌

- (1) Choi, S. B., Hong, S. R., Cheong, C. C. and Park, Y. K., 1999, Comparison of Field-controlled Characteristics Between ER and MR Clutches, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 10, No. 8, pp. 615~619.
- (2) Shames, I. H. and Cozzarelli, F. A., 1992, *Elastic and Inelastic Stress Analysis*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 313~315.
- (3) Gorbet, R. B., Wang, D. W. L. and Morris, K. A., 1998, Preisach Model Identification of a Two-wire SMA Actuator, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Leuven, Belgium, pp. 2161~2167.
- (4) Ge, P. and Jouaneh, M., 1997, Generalized Preisach Model for Hysteresis Nonlinearity of Piezoceramic Actuators, *Precision Engineering*, Vol. 20, pp. 99~111.
- (5) Mittal, S. and Menq, C. H., 2000, Hysteresis Compensation in Electromagnetic Actuators Through Preisach Model Inversion, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 5, No. 4, pp. 394~409.
- (6) Choi, S. B. and Lee, C. H., 1997, Force Tracking Control of a Flexible Gripper Driven by a Piezoceramic Actuator, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 119, No. 3, pp. 439~446.
- (7) Mayergoyz, I. D., 1991, *Mathematical Models of Hysteresis*, Springer-Verlag, New York.
- (8) Han, Y. M., Lee, H. G., Choi, S. B. and Choi, H. J., 2002, "Investigation on Temperature-dependent Hysteresis of Electro-rheological Fluid Using Preisach Model." *Transactions of the KSNVE*, Vol. 12, No. 8, pp. 648~656.
- (9) Hughes, D. and Wen, J. T., 1994, Preisach Modeling of Piezoceramic and Shape Memory Alloy Hysteresis, *Proceedings of the IEEE Control Conference on Application*, Albany, New York, pp. 1086~1091.
- (10) Stanway, R., Sproston, J. L. and Stevens, N. G., 1987, Non-Linear Modeling of an Electro-Rheological Vibration Damper, *Journal of Electrostatics*, Vol. 20, No. 2, pp. 167~184.
- (11) Spencer, B. F. Jr., Dyke, S. J., Sain, M. K. and Carlson, J. D., 1997, Phenomenological Model for a Magnetorheological Damper", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 123, No. 3, pp. 230~238.
- (12) Kamath, G. M. and Wereley, N. M., 1997, A Nonlinear Viscoelastic-Plastic Model for Electrorheological Fluids, *Smart Materials and Structures*, Vol. 6, No. 3, pp. 351~359.
- (13) Li, C. and Tan, Y., 2004, A Neural Networks Model for Hysteresis Nonlinearity, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 112, No. 1, pp. 49~54.