

논문 2008-45SC-1-5

히스테리시스를 갖는 미세 구동기의 실시간 제어 알고리즘

(Preisach model based Real-time control for systems with Hysteresis)

이 아 람*, 이 지 흥**

(Ah-Ram Lee and Jihong Lee)

요 약

본 논문에서는 자기변형재료를 이용한 미세 구동기의 개발과 실시간 제어 알고리즘에 관한 내용을 다룬다. 자기변형재료는 빠른 응답속도, 미세변위동작, 높은 에너지 효율 등의 장점을 가지고 있어 미세 구동기의 재료로 적합하지만 히스테리시스 특성도 함께 갖고 있어 제어에 많은 어려움이 따른다. 본 논문에서는 자기변형재료의 히스테리시스를 제어하기 위해 Preisach model을 바탕으로 구동기를 모델링 하였다. 기존의 Preisach 모델은 실험적 데이터를 바탕으로 하기 때문에 정밀한 제어를 하기 위해서는 많은 양의 데이터가 필요하고 결과적으로는 처리해야 할 데이터의 양이 많아져 연산하는데 많은 시간이 걸리는 문제가 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 기존의 Preisach 모델의 데이터를 선행 처리하여 일정구간 구동기의 움직임을 저장해 놓은 확장된 Preisach 모델을 제안하였다. 본 논문에서는 Terfenol-D라는 자기변형재료를 사용하여 미세구동기를 제작하고 제어 실험을 통하여 제안된 모델의 우수성을 증명하였다.

Abstract

This paper presented the development and real-time control of a magnetostrictive micro actuator. Magnetostrictive material has many advantages such as high response time, precision displacement and powerful output force. But Magnetostrictive material has characteristic of hysteresis. Conventional Preisach model which based on experimental data is not suitable to the real-time control because of controlling a magnetostrictive system by Preisach model costs a lot of calculating time. And, we prove the validity of proposed model through the experimental comparison between the classical Preisach model and the proposed one.

Keywords : Hysteresis, Extended Preisach model, Magnetostrictive Actuator

I. 서 론

최근 미세 분야의 전자, 기계 시스템의 개발이 활발히 진행됨에 따라 미세구동 시스템에 적합한 마이크로 구동원의 요구가 증가하고 있다. 미세 구동기는 마이크로(10^{-6} m)이나 나노미터(10^{-9} m) 수준의 아주 세밀한 작동을 위해 사용되며 레이저 간섭계내의 구리거울의

미소한 위치결정을 하는 초정밀 위치결정 시스템, 방진 시스템 등에 적용되고 있다.^[1] 본 연구에서는 레이저 간섭계내의 거울과 렌즈제어 시스템에 적용되는 미세 구동기를 제작하고 제어하였다.

이러한 미세 구동기에는 주로 지능 재료가 사용되는데 지능 재료에는 자기변형 재료, 형상기억 합금, 압전 재료 등이 있다. 이들 중 본 연구에서는 자기변형재료를 사용해 구동기를 제작하였다. 자기변형(Magnetostriction)이란 어떤 강자성 재료가 자장에 반응하는 특성을 말하며 대표적인 자기변형재료로는 Terfenol-D가 있다. Terfenol-D는 Terbium, Iron, Naval Ordinance Lab, Dysprosium로 구성된 합성어로 최대 2000ppm 정도의 자기 변형률을 낼 수 있고 수 마이크로초의 빠른 응답속도를 가지고 있으며 PZT보다 10배 이상의 변형

* 정희원, 충남대학교 메카트로닉스공학과
(Department of Mechatronics Engineering,
Chungnam National University)

** 정희원, 충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단
(BK21 Mechatronics Group at Chungnam National
University)

※ 본 논문은 산업자원부의 “지역혁신 인력양성 사업”
의 연구 결과로 수행되었습니다.

접수일자: 2007년10월26일, 수정완료일: 2008년1월17일

를 갖는다. 또한 넓은 주파수 특성으로 응용범위가 넓으며 에너지 밀도와 에너지 효율이 뛰어난 특성을 가지고 있어 미세 구동기 구성에 적합하다.^[2] 이러한 우수한 특성에도 불구하고 자기변형 재료가 널리 쓰이지 못하는 이유는 히스테리시스라는 특성을 갖고 있기 때문이다.

히스테리시스 특성을 제어하기 위한 히스테리시스를 나타내는 모델은 크게 물리적인 모델과 현상적인 모델로 분류할 수 있다. 물리적인 모델은 자기장 내에서 발생하는 자기 모멘트와 에너지의 관계식에 의해서 히스테리시스 관계식을 유도해 내고, 역 보상 과정을 거쳐 선형화 시키는 방법으로 Jiles-Atherton 모델이 대표적이다.^[3] 현상적인 모델은 실험에 의해 얻어진 히스테리시스 데이터를 통해 커브의 위치에 따른 차별화된 가중치를 부여함으로써 선형화 시키는 방법으로 대표적인 모델로는 Preisach 모델이 있다.^[4] Jiles-Atherton 모델은 물리적 해석에 의한 모델이며 Preisach 모델에 비해서 해석시간이 두 배 이상 빠르기 때문에 실시간 제어에 적합하나 Preisach 모델에 비해 데이터가 부정확하다는 단점이 있다. 반면 Preisach 모델은 실제 측정을 바탕으로 한 모델링이기 때문에 정확한 모델을 만들 수 있으나 계산량이 많아서 실시간 제어에 부적절하다는 단점이 있다.^[5]

본 논문에서는 이러한 Preisach 모델의 단점을 극복하기 위해 확장된 Preisach 모델이라는 개념을 제시하고 이것을 바탕으로 한 실험 결과를 기존 Preisach 모델의 실험 결과와 비교분석 하였다.

II. 펨토초 레이저용 초미세 가공 자동초점 제어

본 논문의 연구 목적은 펨토초 레이저용 초미세 가공 자동초점 기술에 필요한 자기변형 구동기를 개발하고 이 구동기를 Open Loop으로 제어하는 것이다.

전체시스템은 펨토초 레이저와 가공할 대상체를 움직이는 스테이지 그리고 레이저의 각도와 거리 초점을 조절해주는 거울과 렌즈로 구성되어 있다(그림 1). 이 시스템은 가공할 대상체에 레이저의 가공 에너지를 최대한 전달하기 위해 대상체 표면의 미세 영역에 대한 길이를 측정하여 레이저의 초점과 대상체 가공점간의 거리오차를 보정하고, 거울각도를 움직여 대상체의 패턴을 그리는 시스템이다(그림 2. (a),(b)).^[6] 이때 자기변형 미세 구동기가 거울과 렌즈를 구동해주는 구동기 역할을 하게 된다.

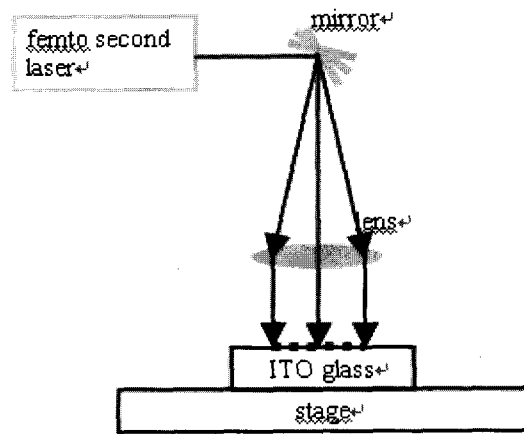
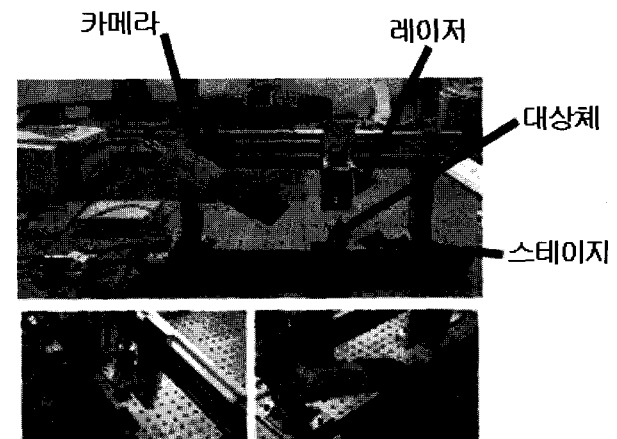
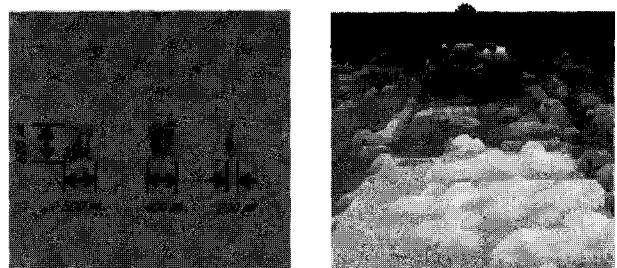


그림 1. 설계된 펨토초 레이저용 초미세 가공 시스템
Fig. 1. Designed system for femto-second laser micro-machining.



(a)



(b)

(c)

그림 2. (a) 개발된 표면 높이 측정 레이저 스캐닝 시스템
(b) IOT glass 2차원 복원 영상
(c) IOT glass 3차원 복원 영상
Fig. 2. (a) Developed laser scanning systems for detecting height,
(b) 2-dimensionally,
(c) 3-dimensionally reconstructed shape of ITO glass surface by system(a).

제어의 흐름은 각 구동기의 모델을 선형화 시킨 다음, 실제 가공할 대상체의 표면 정보인 길이를 입력으

로 하는 제어 알고리즘을 각 구동기에 적용하면 된다. 특히 거울 구동기는 세 개의 직선운동을 하는 구동기의 조합으로 이루어져 있으며 각 구동기의 움직인 거리에 따라 거울의 각도가 결정됨으로, 각 구동기의 이동거리에 따른 각도 변화는 정확히 계산되어야 한다.

1. 거울 구동기

거울 구동기는 미세 자기변형 구동기 3개를 120° 각도로 배치하여 거울의 2축 각도 제어를 하는 메커니즘이다.

그림 3의 (a)는 구동 메커니즘을 나타내고 (b)는 거울 구동기의 평면도(Top View)이다. z축을 중심으로 회전하는 각도를 θ_z 라하고 y축을 중심으로 회전하는 각도를 θ_y 라하고 하면 거울이 움직이는 각도 θ_z, θ_y 는 각 액추에이터의 힘과 모멘트의 조합으로 나타낼 수 있다.^[7]

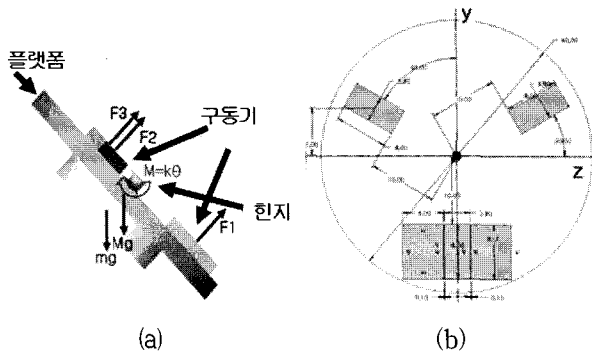


그림 3. (a) 설계된 거울 구동 메커니즘
(b) 거울 구동기의 평면도
Fig. 3. (a) Designed mechanism of Mirror actuator.
(b) Top View of Mirror actuator.

2. 렌즈 구동기

렌즈 구동기는 미세 구동기를 이용하여 구동기 자체가 렌즈구동기가 되는 메커니즘이다. 히스테리시스를 보상하는 기본 개념은 히스테리시스를 수학적인 모델로 표현한 후, 이를 역변환을 통해 보상 해 줌으로써 히스테리시스를 제거하게 된다^[4, 8]. 본 연구에서는 현상에 기초한 Preisach 모델을 적용해 히스테리시스를 제어했다. 렌즈 구동기는 하나의 자기변형 구동기로 이루어져 있어 히스테리시스 모델만 정확히 세울 수 있다면 정확한 제어가 가능하게 되기 때문에 히스테리시스 역 보상이 제어 알고리즘의 가장 중요한 특징이 된다.

III. 미세 구동 시스템의 구성

1. 미세 자기변형 구동기의 설계

가. 자기변형재료(Terfenol-D)

자기변형 재료는 자기장에 의해 변형을 일으킨다. 이러한 자기장과 변형률의 관계를 이용하여 구동기에 적합한 재료를 선정해야한다. 본 연구에서 목표로 잡고 있는 구동기의 변위 성능은 30 μ m이다. 자기변형 재료의 변형률을 1000으로 보고 목표치를 50 μ m로 결정하여 길이 50mm, 직경 10mm의 치수를 갖는 Gansu Tianxing Rare Earth Functional Material 사의 원기둥형 자기변형 재료(Terfenol-D)를 선정하였다(표1).

표 1. TX사의 Terfenol-D 성능
Table 1. Specification of TX Terfenol-D.

Diameter(D)	Length(L)
$\phi 4-\phi 7$	$5 \leq L \leq 60$
$\phi 8-\phi 10$	$5 \leq L \leq 100$
$\phi 10-\phi 50$	$5 \leq L \leq 200$
grain oriented in the direction of the rod axes	
Magnetostriction	$\geq 1000 \times 10^{-6}$ (80kA/m, 10MPa)

나. 미세 자기변형 구동기의 구조

자기변형미세구동기의 구조는 가운데 자기변형재료인 Terfenol-D가 들어가게 되고 Terfenol-D의 바로 바깥부분은 보빈을 통해서 코일이 감긴다. 그 바깥부분은 영구자석이 감싸게 된다(그림4).^[9] 구동기의 아랫부분은 예압을 받을 수 있도록 Prestress 스프링을 설치하였다.^[10~12]

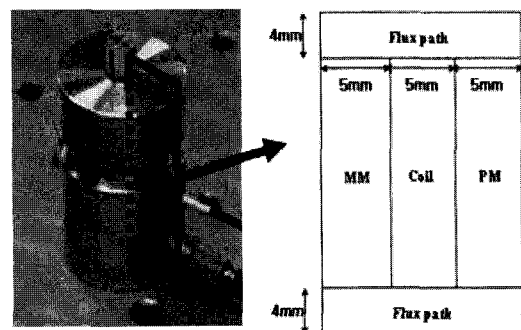


그림 4. 설계된 미세 자기변형 구동기 구조
Fig. 4. Designed structure of micro actuator.

2. 미세 자기변형 구동기의 성능평가

본 장에서는 자기해석을 바탕으로 실제 구동기를 제작하고 성능 평가 실험을 하였다.

변위측정에 사용된 센서는 분해능이 0.05nm인 ADE Technology사의 MicroSense II 4810센서를 사용하였고 힘 측정 실험에 사용된 센서는 PCB PIEZOTRONICS사의 480E09 모델을 사용하였다. 표2에 나타나듯이 입력전압으로 10V를 넣어주면 구동기에는 약 2A의 전류가 흐르고 이때 구동기가 내는 최대 힘은 200N, 스트로크는 32 μ m이다.

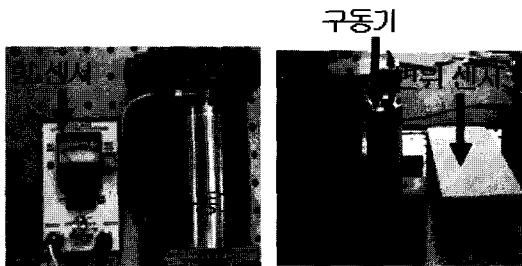


그림 5. 개발된 구동기의 힘/변위 측정 시스템
Fig. 5. Measurement system of developed Actuator Force and Displacement.

표 2. 개발된 미세구동기 힘, 변위 측정결과
Table 2. Developed results of measurement.

입력 전압(V)	최대힘(N)	스트로크(μ m)
10V	200	32

IV. 히스테리시스 제어 모델

1. 기존 Preisach 모델

구동기의 히스테리시스를 극복하기 위한 방법으로는 센서를 이용, closed-loop를 만들어 에러를 보상하는 방법이 있고, open-loop로 제어하기 위해 히스테리시스 특성을 수학적으로 모델링함으로써 해결하는 방법이 있다. 본 연구에서는 open-loop 제어에 적합한 Preisach 모델을 적용하였다.

Preisach 평면에서의 출력 길이는 다음 식(1)과 같이 표현된다.

$$y(t) = \iint_{S(\alpha, \beta)} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha, \beta} [u(t)] d\alpha d\beta \quad (1)$$

여기서 $S(\alpha, \beta)$ 는 순방향으로 바뀌는 입력치 α , 역방향으로 바뀌는 입력치 β 값들로 이루어지는 적분영역을 의미하고 $\mu(\alpha, \beta)$ 는 실험적으로 구한 출력 값의 차,

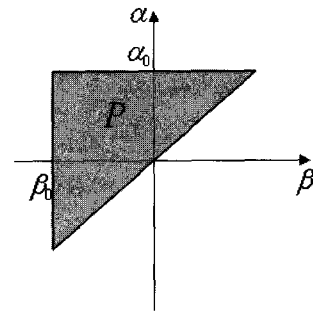


그림 6. Preisach 평면 P
Fig. 6. Preisach Plane P.

즉 weighting function을 의미한다. $\gamma_{\alpha, \beta}$ 는 입력 값 α, β 가 순방향으로 바뀌느냐 역방향으로 바뀌느냐에 따라 붙는 부호함수이다.^[11] 가중치 $\mu(\alpha, \beta)$ 을 구했다고 하더라도 최종적으로 출력 길이를 구하기 위해서는 두 번의 적분식을 계산해야하는 문제가 있다.^[4] 그림 6은 Preisach 평면을 나타내고 이평면의 영역은 모든 동작 시간 내의 출력 길이를 포함하고 있다.

Preisach 모델은 현상적인 모델이기 때문에 정확한 모델링을 위해선 많은 측정 데이터가 필요하고 많은 측정 데이터를 모델링 하게 됐을 경우 적분계산이 아주 많아지게 되어 실제 제어 할 때 모델에 따른 연산 시간이 오래 걸려 실시간 제어에 어려움이 따른다.

2. 확장된 Preisach Model

Preisach 모델링의 결과로 나온 Preisach 행렬은 단일 행렬로 전체 시스템 히스토리를 기억하고 제어한다. 구동기의 stroke가 크거나 구동범위내의 움직임은 미세하게 조정하고 싶을 때에는 Preisach 행렬의 크기가 커지게 된다. Preisach 모델을 통해 정확한 Preisach 행렬을 다 구했다 하더라도 행렬의 크기가 커지면 실제 시스템에 적용 했을 경우 연산양이 많아지기 때문에 실시간 제어에 적용하기 어려운 문제점이 있다(그림 7 (a)). 이러한 문제를 해결하기위해서 일정 구간의 움직임을 미리 계산해놓은 확장된 Preisach 행렬을 구하여 시스템에 적용시킬 수 있다(그림 7 (b)). 제안된 모델은 한번의 데이터 로드나 두 번의 데이터 로드와 한번의 연산만 필요로 하므로 연산시간을 단축할 수 있다. 기존의 Preisach 행렬을 사용했을 때 $n \times n$ 의 행렬에서 총 스트로크를 구동하고 원래 상태로 돌아오는데 필요한 계산량은 $n^2 + n$ 번의 데이터 load와 $n^2 + n - 2$ 번의 덧셈이 필요하지만 제안된 방법을 이용하면 $2n$ 번의 덧셈만 필요하게 된다.

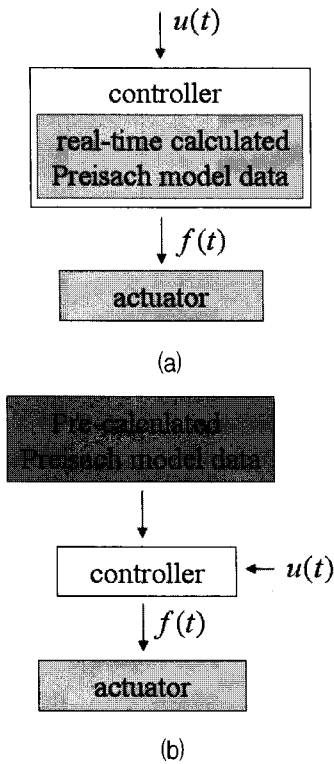


그림 7. (a) 기존 Preisach 모델 처리과정
 (b) 확장된 Preisach 모델 처리과정
 Fig. 7. (a) Process of classical Preisach model.
 (b) Process of extended Preisach model.

효율적인 연산을 위해 확장된 Preisach 행렬은 단조 증가, 증가-감소의 경우로 나누어 생각할 수 있다.

가. 연속증가 Preisach 행렬

연속증가 Preisach 행렬은 구동기의 출력 변위가 감소 없이 연속적으로 증가해야 하는 경우에 쓰인다. 기존 Preisach 모델의 Preisach 평면 P에서는 출력이 연속적으로 증가해야 할 경우 평면상에서 α_n 에서 α_0 의 방향으로 원하는 출력 길이가 나올 때 까지 계속 적분을 해 줘야 한다(그림 8.(a)). 이렇게 될 경우 Preisach 행렬이 $n \times n$ 일 때 최대 스트로크 까지 계속 증가하기 위해서는 $1+2+3+\dots+n-1+n$ 번 덧셈이 필요하므로 전체 덧셈은 등차가 1이고 끝항이 n 개인 등차수열의 합에서 1을 빼준 것과 같고 $N_{classic}(n)$ 이라 정의 하면 다음 식과 같이 나타난다.

$$N_{classic}(n) = \frac{n^2 + n}{2} - 1 \tag{2}$$

$$L_{classic}(n) = \frac{n^2 + n}{2} \tag{3}$$

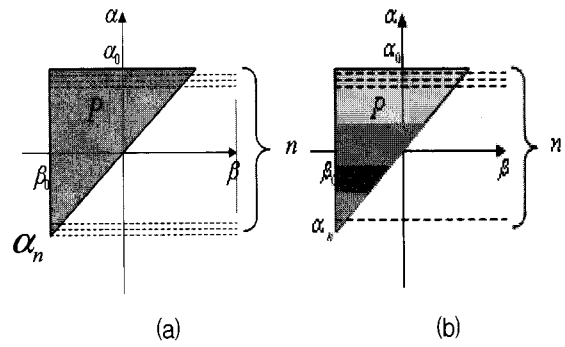


그림 8. (a) 기존 Preisach 평면 P
 (b) 단조증가 Preisach 평면 P
 Fig. 8. (a) Classical Preisach Plane P.
 (b) Continual increased Preisach Plane P.

마찬가지로 data load 횟수를 $L_{classic}(n)$ 이라고 하면 식(3)과 같이 표현할 수 있다. 따라서 행렬이 클 경우 연산시간이 오래 걸리고 똑같은 계산을 매번 반복해 줘야하는 단점이 있다. 제안된 방법은 α_n 부터 α_0 까지 각 행의 열값들을 미리 더해 그 결과 값을 $n \times 1$ 의 행렬로 저장해 놓아 연속적으로 증가하는 어떤 경우라도 α_n 부터 α_0 까지 범위 내에서 단 한 번의 데이터 load만으로 구동기에 넣어줄 입력 전압 값을 출력해 줄 수 있다(그림 8. (b)). 따라서 기존의 Preisach 행렬이 $n \times n$ 일 때 $n \times 1$ 의 크기를 갖는 연속 증가 행렬이 생성되고, 이 행렬을 이용하면 하나의 구동기 대한 입력 전압은 하나의 값으로 바로 출력될 수 있다. 따라서 최대스트로크를 구동하는데 필요한 덧셈 횟수와 로드횟수 $N_{extend}(n), L_{extend}(n)$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_{extend}(n) = n - 1 \tag{4}$$

$$L_{extend}(n) = n \tag{5}$$

나. 증가-감소 Preisach 행렬

증가감소 Preisach 행렬은 구동기 제어 시 가장 많이 나타나는 증가-감소-증가-감소의 형태의 구동기 출력 변위에 사용되는 행렬이다. 기존 Preisach 모델의 Preisach 평면 P에서는 구동기 출력이 증가-감소의 형태를 띠 경우 이전 증가했던 최종 출력 값에서 감소한 부분을 제외한 나머지 영역의 적분 값을 구해서 출력한다. 이 과정은 이전 증가했던 최종 출력 값에서 감소한 부분을 빼주는 과정으로 대체 할 수 있다. 여기서 감소한 부분은 최종 증가했던 α 값과 동일한 β ($\alpha = \beta$)에

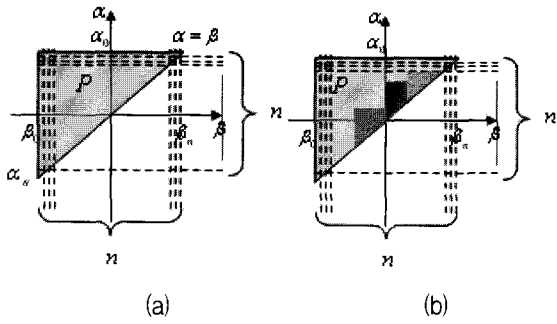


그림 9. (a) 기존 Preisach 평면 P
 (b) 증가-감소 Preisach 평면 P
 Fig. 9 (a) Classical Preisach Plane P.
 (b) Increased and decreased Preisach Plane P.

서 β_0 의 방향으로, 각 열마다 α 보다 크지 않은 모든 행을 더하는 방법으로 구해준다(그림 9. (a)). 이런 기존의 방법을 사용하여 $n \times n$ 크기의 Preisach 행렬을 연산했을 경우, 최대 스트로크까지 변위를 냈다가 원래 길이로 돌아오는 데는 연속증가 Preisach의 경우와 마찬가지로 $\frac{n^2+n}{2} - 1$ 번의 덧셈과 $\frac{n^2+n}{2}$ 의 data load가 필요하다(식(2),(3)). 앞서 말한 것과 마찬가지로 행렬의 크기가 커지게 되면 나타나는 단점들 때문에 이러한 방법은 실시간 제어에 적합하지 않다. 제안된 증가-감소 행렬은 이전에 증가했던 영역에서 감소하는 모든 경우를 가지고 있다.

예를 들어 그림 10. (a)는 평면 P가 영역 ①만큼 증가

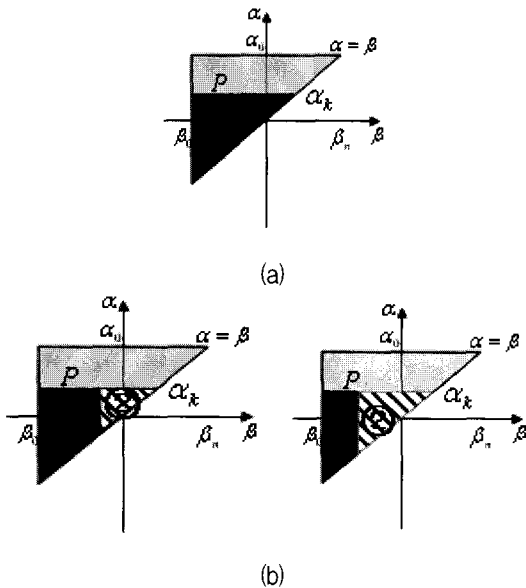


그림 10. (a) 증가된 영역
 (b) 증가-감소된 영역
 Fig. 10. (a) Increased area.
 (b) Increased and decreased area.

표 3. 기존 모델과 제안된 행렬의 최대스트로크 구동 시 데이터 계산 횟수 비교

Table 3. Compared the number of calculation between classical model and extended model.

n	기존행렬 계산 횟수 $n^2 + n - 2$ (식(2)*2)	확장된 행렬 계산 횟수 $2n - 2$ (식(4)*2)	비 (기존/ 확장)
10	108	18	6
100	10098	198	51
1000	100998	999	101

했을 경우를 나타낸다. 이때 α 의 값은 α_k 가 된다. 여기서 구동기의 출력변위가 감소해야할 경우 ①의 영역은 β_k 에서 β_0 방향으로 ② 영역처럼 삼각형모양의 영역을 그리며 감소한다. 제안된 증가-감소행렬에서는 이 경우 ②가 될 수 있는 모든 경우 영역의 합을 저장해 놓고 있다(그림 10. (a)).

이전 증가영역에서의 α 가 α_n 이면 ②가 될 수 있는 가짓수는 n 개가 되며 α_{n-1} 이면 $n-1$ 개가 된다. 따라서 기존 Preisach 모델 행렬이 $n \times n$ 이라면 $1 \times \frac{n^2+n}{2}$ 의 크기를 갖는 증가-감소 행렬이 생성된다. 제안된 모델을 사용해 최대 스트로크를 냈다가 다시 원래의 길이로 돌아오는 데는 n 번의 데이터 load와 $n-1$ 번의 연산만 필요하게 되므로 많은 계산 시간을 단축 할 수 있다. 최대스트로크를 구동했다가 돌아오는데 필요한 계산횟수와 로드횟수는 식(4),(5)와 같다.

V. 실험 장치 및 결과 분석

1. 실험 장치 구성

실험 장치의 구성은 자기변형 구동기, 변위센서, 전류 드라이버, PC, DAQ카드, 전원 공급 장치가 사용되었다. 제어의 흐름은 그림 11과 같다. 실험에 사용된 변위센서는 ADE Technology사의 MicroSense II 4840을 사용하였으며 센서의 분해능은 0.05nm이다. DAQ 카드는 National Instrument사의 6024E를 사용하였고 전류 드라이버는 OP Amp PA74A를 사용해 제작한 전류 증폭기를 사용하였다.

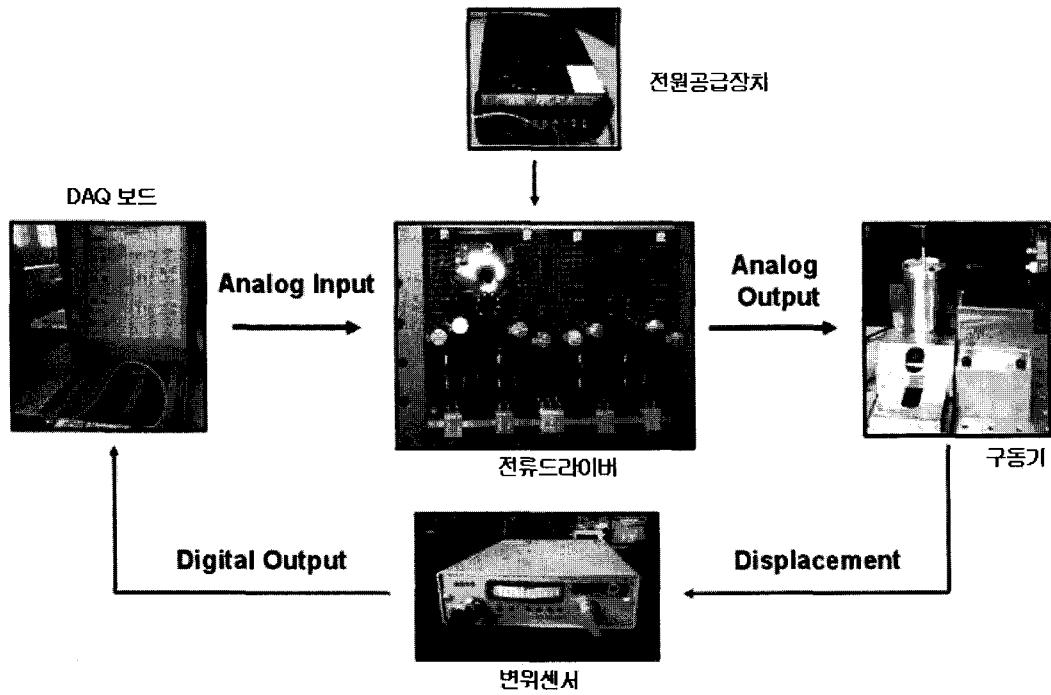


그림 11. 실험 장치 데이터 처리 흐름
Fig. 11. Data flow of performance test.

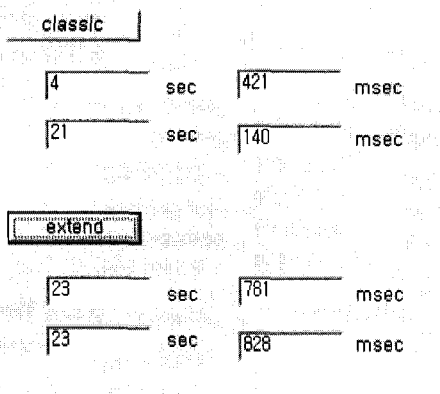


그림 12. Visual C++ GUI 실행창
Fig. 12. Visual C++ GUI executive window.

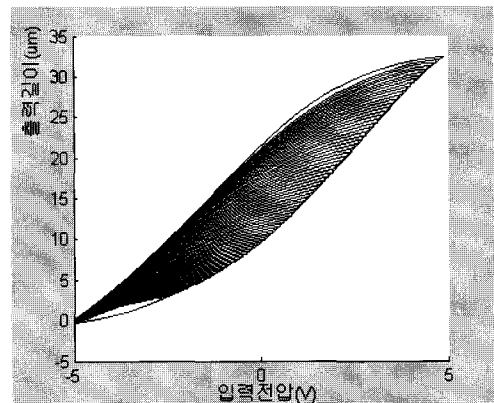


그림 13. 미세구동기의 히스테리시스 측정 결과
Fig. 13. Hysteresis measurement of miro-actuator.

또한 PC기반의 제어를 하기 위해 Microsoft Visual C++ 6.0 프로그램을 사용하였다(그림12).

2. 실험 결과 분석

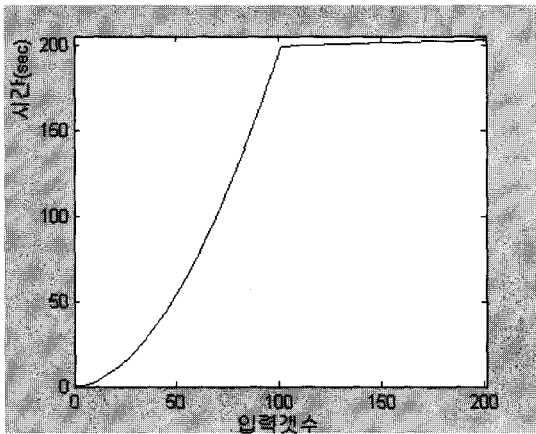
가. 구동기의 히스테리시스 측정

그림 13은 구동기에 +5~-5V의 입력을 넣어줬을 때 스트로크 변화이고 (b)는 (a)에 나타난 데이터를 필터 처리 한 후의 데이터이다. 측정결과 +5~-5V의 입력을 넣어줬을 때 목표치인 총 스트로크 30 μ m 이상을 낼 수 있으며 양방향으로 대칭적으로 변위가 분포함을 확인하였다.

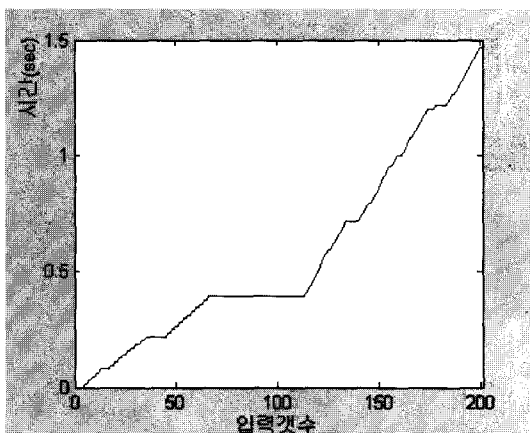
나. 실제 구동기 실험 및 계산시간 측정

그림 14 (a)는 기존의 Preisach 행렬을 이용한 계산 시간을 Matlab으로 시뮬레이션한 시간결과를 나타낸다. 행렬의 크기는 992*992이고 시스템은 0~10 μ m를 0.1 μ m간격으로 총 201개의 입력 값을 갖도록 설정했다.

실험 결과를 보면 기존의 Preisach 모델을 사용하면 총 누적 계산시간이 202.73초, 제안된 모델이 1.468초로 두 모델간의 계산 시간 차이가 많이 나는 것을 볼 수 있다(그림 14 (b)). 표4은 실제 시스템에 적용해서 실험했을 때 Micro Visual C++6.0을 통해 계산한 결과



(a)

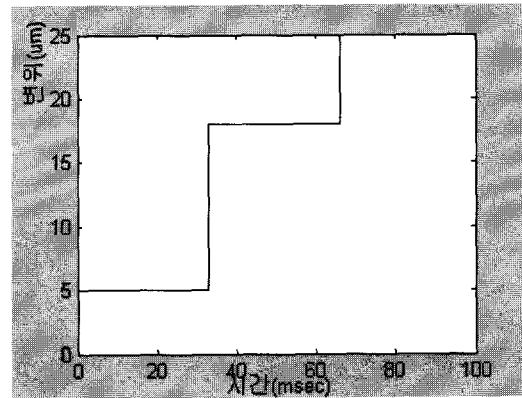


(b)

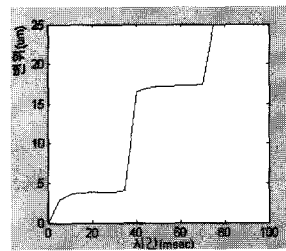
그림 14. (a) 기존 Preisach model 계산시간
(b) 확장된 Preisach model 계산시간
Fig. 14. (a) Processing time of classical Preisach model.
(b) Processing time of extended Preisach model.

표 4. 기존 모델과 제안된 모델을 통해 계산된 7개 입력의 계산시간 비교
Table 4. Compared the calculated time of 7 inputs between classical model and extended model.

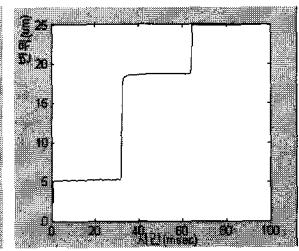
입력값 (V)	일반 계산 시간		확장모델계산시간	
	시작시간	종료시간	시작시간	종료시간
	sec	sec	sec	sec
-5.0	0	0.047	0	0
-1.64	0.047	0.062	0	0
1.23	0.062	0.062	0	0
4.23	0.062	0.072	0	0.016
-1.35	0.072	3.603	0.016	0.016
-3.66	3.603	4.072	0.016	0.016
-5.0	4.072	4.072	0.016	0.032



(a)



(b)

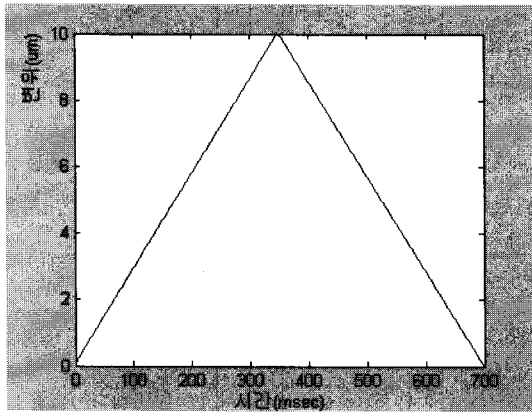


(c)

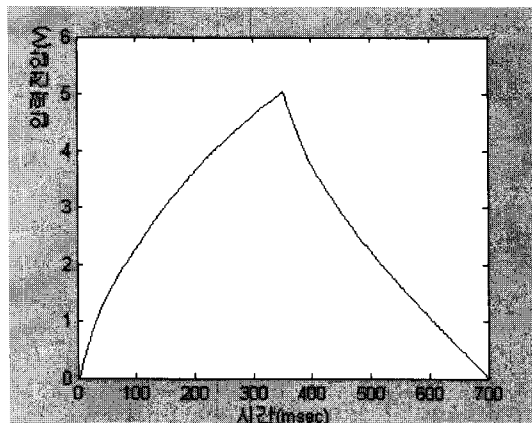
그림 15. (a) 제어해야할 변위의 경로
(b) 기존 Preisach model,
(c) 확장된 Preisach model 계산입력에 따른 출력경로
Fig. 15. (a) Trajectory of Displacement for control,
(b) Output trajectory of input through classical Preisach model,
(c) extended Preisach model.

값이다. 표에서도 매텔랩 시뮬레이션처럼 확장 모델의 계산시간이 훨씬 빠른 것을 확인할 수 있었다. 그림15. (b),(c)는 그림15. (a)의 변위를 따라가는 출력을 내보냈을 때 기존모델과 확장된 모델 출력의 일부분이다. 기존의 모델을 사용한 출력 결과는 제어가 잘 되지 않는 것을 보여준다.

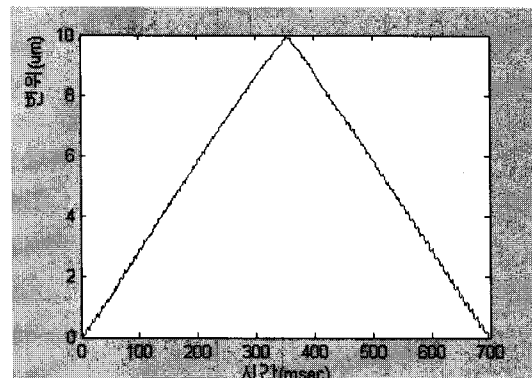
그림 16 (b)는 구동기의 변위가 0 μ m부터 10 μ m까지 0.1 μ m간격으로 올라갔다다 다시 0 μ m로 내려오는, 확장된 Preisach 모델로 계산된 제어 입력 값들이다. 그림 15 (c)는 입력값 (b)로부터 얻어진 구동기의 출력 변위이다 이처럼 Preisach model의 연산량이 많은 경우에 제안된 방법으로 연산 시간을 감소 할 수 있었고 이보다 더 많은 연산이 필요한 경우 더욱 효과적으로 연산을 수행할 수 있을 것이다.



(a)



(b)



(c)

그림 16. (a) 제어해야할 변위의 경로
 (b) 확장된 Preisach model로 계산된 입력경로
 (c) 구동기에 (b)를 넣은 출력경로
 Fig. 16. (a) Trajectory of Displacement for control
 (b) Calculated trajectory of input through extended Preisach model
 (c) Output trajectory of input(b)

VI. 결 론

본 연구에서는 펄스 레이저용 초미세 가공 자동 초

점 제어에 사용되는 미세 자기변형 구동기를 제작하고 제어하는 연구를 수행하였다. 구동기에 사용된 자기변형 재료는 빠른 응답속도, 미세변위동작, 높은 에너지 효율 등의 장점을 가지고 있어 미세 구동기의 재료로 적합하지만 히스테리시스 특성도 함께 갖고 있어 제어에 많은 어려움이 따른다. 이런 히스테리시스를 나타내는 방법으로 Preisach 모델이 많이 쓰이는데 기존의 Preisach 모델은 정밀제어를 요하거나 구동기의 스트로크가 커지면 연산시간이 많이 걸려 실시간제어에 적합하지 않다. 이 문제를 해결하기 위해 모든 연산구간을 선행처리한 확장된 Preisach 모델을 제안하고 일정구간 계산비교 실험과 일정시간 계산을 통한 제어비교 실험을 통하여 제안된 방법이 기존 방법보다 계산시간이 최대 127배 빠른 것을 확인할 수 있었다. 추후 연구에서는 구동기를 시스템에 부착하여 실제 표면 오차를 보정해주는 연구를 진행할 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] Xu WL, Han L, "Piezoelectric actuator based active error compensation of precision machining", *Meas Sci Technol*, Vol. 10, pp.106-111, 1999.
- [2] E.Quandt, F. Claeysen, "Magnetostrictive materials and actuators(review), 7th International Conference on New Actuators", *ACTUATOR 2000*, pp.100-105, 2000.
- [3] M.G. Salloker, Nonlinear Modeling and Parameter Identification of Magnetostrictive Actuators Based on Jiles-Atherton Models, *ACTUATOR 2002*, 8th International Conference on New Actuators, 10-12, 2002.
- [4] Xiabo Tan, Ram Venkataranam, P. S. Krishnaprasad, "Control of hysteresis: Theory and experimental results", *Institute for Systems Research*, 2001.
- [5] I. D. Mayergoyz, *Mathematical Models of Hysteresis*. Springer-Verlag, New York, 1991.
- [6] 박정홍, 이지홍, 고윤호, 박영우, "펄스 레이저 미세가공을 위한 3차원 형상 복원 시스템의 최적 설계 및 구현", *대한전자공학회논문지*, 제43권, SC 편 제6호, 2006.
- [7] Kyoung-Bin Im, Young-Woo Park, Jeong-Yong Chung, "Identification and Reconfiguration of Weight Functions in Preisach Model for Nanomotion Applications", *ISNM*, pp.108-111, 2006,11
- [8] Dong-Hee Sul, Young-Woo Park, and Hae-Jung

Park, "Lumped Modeling of Magnetic Actuator using the Inverse Magnetostrictive Effect", *10th Joint MMM/INTERMAG CONFERENCE* pp.410, Baltimore, Maryland, USA 2007,1

- [9] 김도연, 박영우, 임민철, "자기변형 마이크로 작동기의 설계", *한국정밀공학회지*, 제 21권, 제5호, pp. 174-181, 2004.
- [10] 박영우, 김도연, "자기변형 마이크로 액츄에이터 개발 및 제어", *충남대학교*, 2002.
- [11] 박영우, 임민철, "히스테리시스 보상을 이용한 자기 변형 액츄에이터의 되먹임제어", *충남대학교*, 2002.

— 저 자 소 개 —



이 아 람(정희원)
 2005년 충남대학교 메카트로닉스 공학과(공학사)
 2005년~현재 충남대학교 메카트로닉스 공학과 석사과정 재학 중.
 <주관심분야 : 로보틱스, 제어, 국방로봇>



이 지 흥(정희원)
 1983년 서울대학교 전자공학과(공학사)
 1985년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)
 1991년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사)
 1993년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수.
 <주관심분야 : 로보틱스, 국방로봇, HCI, FSS>