자기변형 구동기의 실시간 히스테리시스 보상

Real-time Hysteresis Compensation for Magnetostrictive Actuator

*박해정[1], #박영우[1]

*H. J. Park[1], #Y. W. Park(ywpark@cnu.ac.rk)[1]

[1]충남대학교 메카트로닉스 공학과

Key words : Magnetostrictive actuator, Hysteresis compensation, Real-time, R-C circuit

1. 서론

1842년에 James joule에 의해 자기변형 현상이 발견된 이후로, 자기변형에 대한 연구가 끊임없이 진행되었다[1]. 이후 거대 자기변형재료가 개발됨에 따라 Sonar, 음향 재생 등에 적용분야가 날로 증가되고 있다. 하지만, 자기변형 재료의 히스테리시스 현상은 정밀구동 및 효율 면에 있어서 방해 요소가 되고 있으며, 이를 보상하기 위해 많은 방법들이 시도·연구되고 있다. 현재 히스테리시스 보상에 사용되는 기법은 대표적으로 현상학적으로 접근한 프라이작 모델을 들 수 있다. 프라이작 모델의 경우는 많은 연산자들의 계산을 통해 보상파형을 생성하는 과정에서 많은 시간이 소요되어 실시간 제어를 어렵게 하는 원인이 된다.

따라서 이러한 문제를 해결하기 위해, 연산시간의 감소를 위해 알고리즘을 개선하는 방법들이 제안되었지만, 실시간 히스테리시스 보상을 이루기에는 해결해야할 부분들이 많이 남아있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하고자 R-C 회로를 이용한 자기변형 구동기의 실시간 히스테리시스 보상에 대한 방법을 제안하고자 한다.

2. 히스테리시스 실시간 보상 방법

자기변형 구동기에 삼각파형을 입력하면, fig. 1의 (a)와 같이 히스테리시스가 포함된 출력이 나오게 된다. 프라이작 모델은 이러한 입력 *u(t)*에 대한 히스테리시스를 포함한 출력 *y(t)*에 대해서 다음과 같이 수학적으로 표현하고 있다[2].

$$y(t) = \iint_{\beta \geq \alpha} \mu(\alpha,\beta)\,\widehat{\gamma_{\alpha\beta}}\,u(t)\,d\alpha d\beta \qquad (1)$$

여기서, α와 β는 프라이작 연산자의 경계 값이며, $u(\alpha,\beta)$는 프라이작 연산자를 나타내며, $\widehat{\gamma_{\alpha\beta}}$는 각 연산자의 가중치를 나타낸다. 히스테리시스를

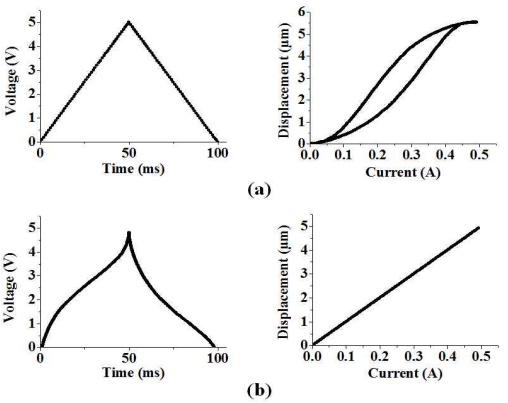

Fig. 1 (a) Hysteresis output by ramp input and (b) linear output by hysteresis compensated input.

보상하기 위한 입력 *u(t)*를 생성하기 위해, 수식 (1)의 연산자의 pseudo inverse 이용할 수 있으며, 수학적으로는 다음과 같이 표현 된다[2].

$$u(t) = \iint_{\beta \geq \alpha} v(\alpha,\beta)\,\widehat{\gamma_{\alpha\beta}}\,y(t)\,d\alpha d\beta \qquad (2)$$

여기서, $v(\alpha,\beta)$는 $u(\alpha,\beta)$의 pseudo inverse이다.

수식 (2)를 통해 얻어진 히스테리시스 보상입력을 이용하여, 자기변형 구동기에 인가하면 fig.1의 (b)와 같은 선형 출력을 얻을 수 있다. 여기서 생성

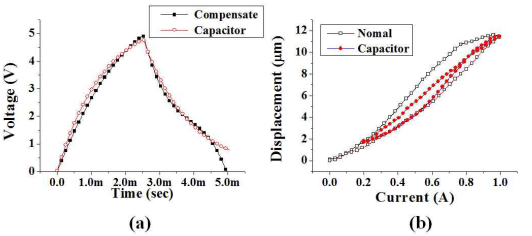

Fig. 2 (a) Similarity of compensated input and capacitor voltage, and (b) their out put.

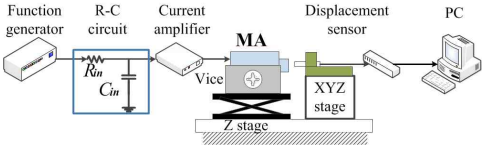

Fig. 3 Experimental setup with a R-C circuit.

된 보상 입력과 R-C 회로를 거친 전압의 형상이 유사함을 fig.2 (a)에서 찾아볼 수 있으며, 이를 이용하여 히스테리시스의 감소를 fig.2 (b)에서 볼 수 있다. 히스테리시스 보상파형과 유사한 형태의 파형을 나타내는 커패시턴스 C 값과 V_{in} 값을 찾기 위해, 수치해석적인 방법인 non-linear regression 기법을 이용하며, 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$f(t;v_{in},c) = V_{in}(1-e^{-t/rc}) \quad (3)$$

3. 히스테리시스 측정 실험 및 결과

자기변형 구동기의 히스테리시스를 측정하고, R-C회로를 이용하여 보상하기 위한 실험 장치는 fig. 3과 같이 구성되어 있다. 입력 파형을 생성할 수 있는 함수발생기와 전류를 생성할 수 있는 전류 앰프 사이에 R-C회로가 위치하게 되며, 자기변형 구동기의 변위를 측정하기 위해 변위센서가 이용되었다. 측정된 변위는 PC를 이용하여 데이터 수집을 하였다. 실험 방법은 100 ~ 800 *Hz*에 해당하는 히스테리시스 보상 입력을 수식 (2) 를 통해 얻어낸 후, 수식 (3)을 이용하여 얻어진 각각의 커패시터를 R-C회로에 삽입한다. 그 이후 각각의 주파수에서 히스테리시스를 측정하였다.

Fig. 4 (a)는 100 Hz인 경우의 히스테리시스 곡선을 보여주고 있다. V_{in}이 8 *V*에 77 *uF*의 커패시터가

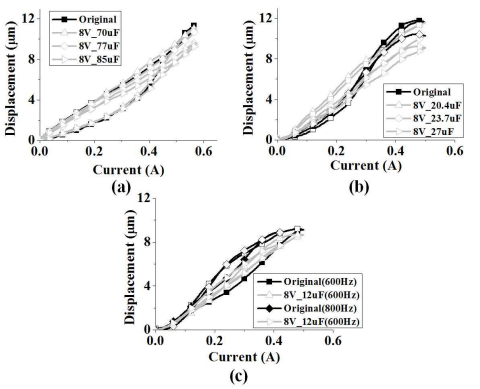

Fig. 4 Experimental results of (a) 100 *Hz*, (b) 300 *Hz* and (c) 600 and 800 *Hz*.

Table 1 Experimental results of hysteresis loss

Frq. (Hz)	C (uF)	HL(Origin)	HL(Cap.)
100	77	12.24 %	9.3 %
200	42.8	13.15 %	4.86 %
300	23.7	13.67 %	2.33 %
400	17.9	20.00 %	1.41 %
500	14.6	13.67 %	1.13 %
600	12	13.10 %	2.88 %
700	12	11.05 %	2.55 %
800	12	5.05 %	3.36 %

가장 좋은 효율을 보여주고 있으며, fig. 4 (b)는 300 *Hz*에서 23.7 *uF*, fig.4 (c)는 각각 600 *Hz*, 800 *Hz*에서 12 *uF*에서 가장 효율이 좋은 것을 보여주고 있다. 각각의 커패시터와 히스테리시스 감소율은 Table 1에 정리되어 있다. 히스테리시스가 최대로 감소된 구간은 400 *Hz*에서 나타났으며, 커패시터를 적용하기 전의 히스테리시스 손실은 20 %에서 적용 후 손실은 1.41 %로 약 18 % 이상의 히스테리시스 감소율을 보였다.

4. 결론

본 논문은 자기변형 구동기의 실시간 히스테리시스를 보상하기 위해 R-C 회로를 이용하는 방법을 제안하였다. 실험을 통해 400 *Hz*에서 최대 18% 이상의 히스테리시스 감소율을 확인하였으며, 이러한 방법으로 자기변형 구동기의 효율을 높일 수 있다는 가능성에 대해 제시하였다. 하지만 제안된 방법은 주파수에 대한 영향을 고려하지 않은 모델이다. 따라서 이러한 영향을 고려한 모델이 필요하며, 이와 같은 부분을 보완한다면 주파수가 변하는 시스템에서도 히스테리시스 실시간 보상이 가능해 질 수 있다.

후기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2011-0004393).

참고문헌

1. Joule, J. P., ""On the Effects of Magnetism upon the Dimensions of Iron and Steel Bars", Edinburgh and Dublin philosophical magazine and journal of science 30, Third Series: 76-87, 1847.
2. Isaak D. Mayergoyz, "Mathematical models of hysteresis", Ieee Transactions on magnetics, Vol. Mag-22, No. 5, Sep. 1986.