

실험을 통한 MR 댐퍼의 개선된 Bouc-Wen 모델링 구현

전형진, 정슬

충남대학교 메카트로닉스공학과 지능시스템 및 감성공학 실험실

Bouc-Wen Modeling of MR Damper by Experimental Studies

Hyeong-Jin Jeon, Seul Jung

Intelligent Systems and Emotional Engineering Lab, Chungnam National University

Abstract - 본 논문에서는 MR(Magneto-rheological)댐퍼의 특성을 파악하고 모델링하기 위해 실험 장치를 설계 및 제작을 하였다. 그리고 MR댐퍼의 특성 중 전향복(pre-yield) 영역에서의 속도가 증가하거나 및 감소할 때의 감쇠력의 차이를 보이는 이력현상을 모델링하기 위해 개선된 Bouc-Wen 모델을 이용하였다. 다양한 실험을 통해 Bouc-Wen 모델의 변수들을 이용하여 구하였다.

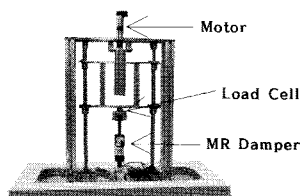
1. 서론

현재 다양한 형태의 반 능동 제어장치가 개발 및 연구되고 있다. 그 중 자기장 강도에 따라 MR유체가 반고체로 변화는 양을 조절할 수 있는 특성을 이용하여 만든 제품이 MR댐퍼이다. MR댐퍼는 MR유체를 이용하기 때문에 에너지 소모가 적고 기계적인 마찰이 적은 장점이 있다. 또한 ER유체보다 응답속도가 빠르다는 장점이 있다. 이런 장점 때문에 지진 발생 시 교량과 같은 건물 외부에 충격을 완화하는 장치에 많이 사용되고 있다. 그리고 감쇠력을 조절할 수 있는 댐퍼들은 전향복(pre-yield) 영역에서의 속도가 증가 및 감소할 때의 감쇠력의 차이를 보이는 이력현상(hysteresis)이 나타난다. 이런 비선형 특성을 갖고 있기 때문에 MR댐퍼를 시스템에 적용하여 원하는 성능을 얻기 위해서는 정확한 모델링이 필요하다. 모델링에 사용되는 모델에는 Bingham 모델, Bouc-Wen 모델, 개선된 Bouc-Wen 모델 및 Polynomial 형태의 모델 등의 다양한 모델들이 있다. 이 중 Bouc-Wen 모델은 Bouc가 제안하고, Wen과 여러 학자들에 의해 수정 보완됐으며, 시스템의 비선형적인 이력현상 특성을 모델링하는데 폭 넓게 사용되고 있다. Spencer[1]은 MR댐퍼의 비선형성과 이력현상 특성을 반영하는 모델링을 제안하였다. 본 논문에서는 MR댐퍼를 모델링하기 위해 실험 장치를 설계 및 제작하여 실험을 하였다. 이 장치를 이용하여 댐퍼의 변위 및 입력전압을 조절하여 특성을 실험하고, 실험 데이터를 바탕으로 개선된 Bouc-Wen 모델의 모델링을 하기 위한 변수들을 Matlab의 "Simulink Toolbox"를 이용하여 모델링하였다. 이 실험 사용된 MR댐퍼는 Load사의 "RD-1005-3"을 사용하였으며, 컨트롤하기 위해 "Wonder Box(UI7000)"을 사용하였다.

2. 본론

2.1 실험 장치 설계 및 제작

MR댐퍼의 특성을 실험하기 위해 그림 1과 같이 설계 및 제작을 하였다. 댐퍼의 압축 및 인장을 실험을 위해 DC Motor를 사용 제어를 제어하였고 제어주기는 4ms이다. 모터의 사양은 500rpm, 1.9kg·cm이고 댐퍼의 감쇠력을 측정하기 위해 ±100kg를 측정할 수 있는 로드셀을 사용하였다.



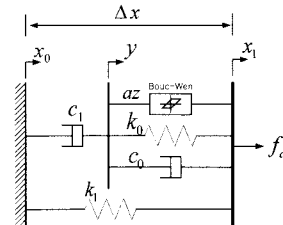
〈그림 1〉 MR 댐퍼 성능 실험 장치

2.2 MR댐퍼 모델링

2.2.1 MR댐퍼의 기본 특성

MR댐퍼는 MR 유체의 점성(viscous) 특성과 입력된 전류에 따른 특성변화에 기인하는 소성(plastic) 특성이 복합적으로 나타나는 점소성(viscous-plastic) 특성을 갖고 있기 때문에, 댐퍼의 운동속도 및 외부에서 입력되는 전압에 따른 비선형 특성을 표현하기 위한 비선형 모델로 개선된 Bouc-Wen 모델을 사용하였다.

2.2.2 개선된 Bouc-Wen 모델



〈그림 2〉 개선된 Bouc-Wen 모델

개선된 Bouc-Wen 모델(그림2)의 방정식[1]은 다음과 같이 주어진다.

$$c_1 \dot{y} = \alpha z + k_0(x - y) + c_0(\dot{x} - \dot{y}) \quad (1)$$

그리고 \dot{z} 는 다음과 같다.

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x} - \dot{y}|z|z|^{n-1} - \beta(\dot{x} - \dot{y})|z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad (2)$$

위 식에서 A, β, γ, n 는 댐퍼의 히스테리시스 소성특성을 결정하는 무차원 파라미터이며, \dot{y} 는 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{y} = \frac{1}{(c_0 - c_1)} \{ \alpha z + c_0 \dot{x} + k_0(x - y) \} \quad (3)$$

위 식에서 α (무차원 파라미터)와 c_0 및 c_1 는 댐퍼에 인가되는 전압의 함수로서 입력전압에 따른 이중점성 특성을 표현하며, 감쇠력 f_d 는 다음과 같이 주어진다.

$$f_d = \alpha z + c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) + k_1(x - x_0) \quad (4)$$

여기서 k_1 는 어큐뮬레이터(accumulator)의 강성, k_0 는 큰 속도에서의 댐퍼 강성, c_0 는 큰 속도에서의 점성 댐핑, c_1 는 저속에서 비선형 roll-off 특성을 표현하며, x_0 는 댐퍼의 초기변위이며, 최종 감쇠력은 다음과 같다.

$$f_d = c_1 \dot{y} + k_1(x - x_0) \quad (5)$$

MR댐퍼에 특성은 인가전압과 관계가 있으며, 이 관계는 다음 식에 의해 주어진다.

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \\ c_0 &= c_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u \\ c_1 &= c_1(u) = c_{1a} + c_{1b} u \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 u 는 외부 전압 v 와 다음 수식으로 표현되는 시간지연효과를 갖고 있다.

$$u = -\eta(u - v) \quad (7)$$

또한, MR댐퍼의 전압에 따른 최대 하중 및 등가점성 감쇠력(C_{eq})을 알아보기 위해 한 주기 당 소산되는 점성 에너지 식은 다음과 같다.[2]

$$U_d = \oint f_{MR} dx = \int_0^{2\pi/\omega} f_d \dot{x} dt \quad (8)$$

여기서 x 는 다음과 같이 주어지고,

$$x = X_0 \sin \omega t \quad (9)$$

식(8)과 식(9)을 이용하여 C_{eq} 을 구하면 다음과 같다.

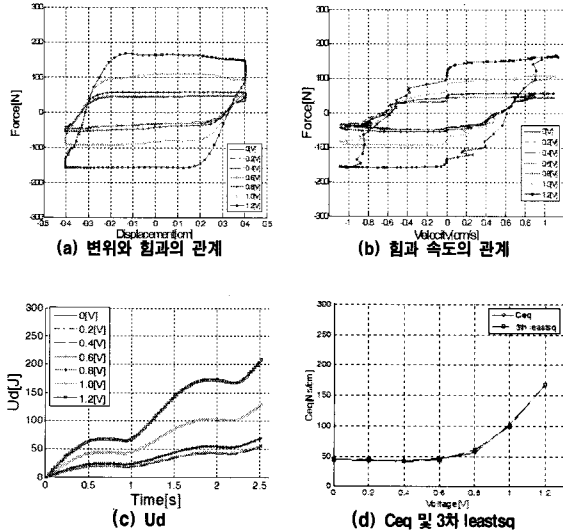
$$\begin{aligned} U_d &= \oint C_{eq} \dot{x} dx = C_{eq} \int_0^{2\pi/\omega} f_d(\dot{x})^2 dt \\ &= C_{eq} X_0^2 \omega^2 \int_0^{2\pi/\omega} \cos^2 \omega^2 t dt = C_{eq} \pi \omega X_0^2 \end{aligned} \quad (10)$$

위 식을 다시 정리하면 최종 식은 다음과 같이 주어진다.

$$C_{eq} = \frac{U_d}{\pi \omega X_0^2} \quad (11)$$

2.2.3 실험 방법 및 모델링

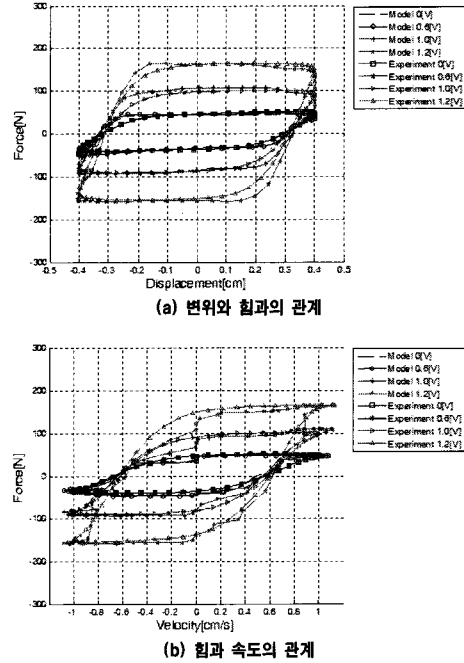
MR댐퍼의 특성을 확인하기 위해서 실험 장치에 변위 변화를 0.4mm 크기의 사인파를 입력하고, 사인파 주파수를 0.4Hz로 선택하였다. 그리고 MR댐퍼의 제어장치에 입력전압의 변화를 0.0V, 0.2V, 0.4V, 0.6V, 0.8V, 1.0V, 1.2V일 경우에 대해서 감쇠력을 측정해보았다.



〈그림 3〉 MR댐퍼의 특성 실험 결과

그림3은 특성 실험의 결과이고, 여기서 (a)는 변위와 힘과의 관계를 나타내고 있고 (b)는 힘과 속도의 관계를 나타낸다. 여기서 데이터의 떨림 현상은 실험장비의 성능에 의해서 발생하는 현상이다. 그리고 (c)는 한 주기 당 소산되는 점성 에너지를 나타내며, (d)는 전압에 따른 최대 하중 및 등가점성 감쇠력내고, 이를 바탕으로 3차 최소자승법을 이용하여 C_{eq} 을 함수형태로 보간을 하였다. 이를 통해 Bouc-Wen 모델에 필요한 변수 14개를 찾는데 사용하였다. 그리고 Matlab의 "Simulink Toolbox"를 이용하여 파라미터들의 값을 찾았고, 이를 바탕으로 모델링한 결과는 그림4이다. 이 그림에서 입력전압이 0V, 0.6V일 때를 보면 거의 동일하게 감쇠력이 나타나는데 그것은 MR댐퍼의 코일에 인가되는 전압이 일정한 값 이상인 경우만 전자석이 활성화되는 임계영역이 있기 때문이다. 그리고 그림4-b에서 입력전압 1.0V, 1.2V를 보면 속도가 (+)방향으로 증가할 때는 모델링 오차가 적지만 속도가 (-)방향으로 증가할 때는 모델링 오차가 많이 발생하였다. 그 이유는 MR댐퍼의 특성보다는 실험장비의 성능 중 인장능력이 압축능력보다 떨

이기 때문에 생기는 실험 오차라고 할 수 있다. 여기서 모델링에 사용된 모델의 변수들은 표1과 같다.



〈그림 4〉 실제 모델과 모델링 결과의 비교

〈표 1〉 모델의 변수들

변수	값	변수	값
C_{0a}	1.02005 [$N \cdot s/cm$]	α_{0a}	176.513 [N/cm]
C_{0b}	0.44804 [$N \cdot s/cm \cdot V$]	α_{0b}	77.5304 [$N/cm \cdot V$]
C_{0c}	-3.1464 [$N \cdot s/cm \cdot V^2$]	α_{0c}	-544.464 [$N/cm \cdot V^2$]
C_{0d}	3.9583 [$N \cdot s/cm \cdot V^3$]	α_{0d}	684.958 [$N/cm \cdot V^3$]
k_0	20 [N/cm]	γ	111.995 [cm^{-2}]
C_{1a}	2439.25 [$N \cdot s/cm$]	β	111.995 [cm^{-2}]
C_{1b}	1071.4 [$N \cdot s/cm \cdot V$]	A	12.843
C_{1c}	-7524 [$N \cdot s/cm \cdot V^2$]	n	2
C_{1d}	9465.5 [$N \cdot s/cm \cdot V^3$]	η	190 [sec^{-1}]
k_1	-3 [N/cm]	x_0	2 [cm]

3. 결 론

본 논문에서는 MR댐퍼를 모델링하기 위해 실험 장치를 설계 및 개발하였고, 이 장치를 사용하여 MR댐퍼의 성능을 실험하였다. 그리고 MR댐퍼의 특성 중 이력현상을 모델링을 하기 위해 개선된 Bouc-Wen 모델을 선택하고, 특성 실험에 나온 데이터를 이용하여 모델링에 필요한 변수들을 시뮬레이션 하여 모델링하였다. 실험을 통한 모델링과정에 발생한 오차를 줄이기 위해서 실험 환경을 개선할 필요가 있으며, 추후 MR댐퍼의 다양한 입력 변화에 맞게 좀 더 정확한 모델링하기 위해 변수들의 값들을 찾을 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과이며 지원에 감사드립니다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] B. F. Spencer Jr., S. J. Dyke, M. K. Sain, J. D. Carlson, "Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper", ASCE Journal of Engineering mechanics, 1996.
- [2] W H Li, G Z Yao, G Chen, S H Yeo and F F Yap, "Testing and steady state modeling of a linear MR damper under sinusoidal loading", Smart Materials and Structures Volume 9, Issue 1, pp95 - 102. 2000.
- [3] 최현, "유연한 구조물의 진동 제어를 위한 전자석 작동기 구동방식의 하이브리드 질량댐퍼", 연세대학교 대학원(기계공학과) 학위논문(박사), 2008