역모델을 이용한 MR 댐퍼의 감쇠계수 제어

Control of Damping Coefficients for the Shear Mode MR Dampers Using Inverse Model

나 언 주*

Uhn Joo Na

(Received March 6, 2013 ; Revised April 3, 2013 ; Accepted April 5, 2013)

Key Words : Magneto-rheological Damper(MR 댐퍼), Semi-active Damper(반능동 댐퍼), Vibration Control(진동제어)

ABSTRACT

A new linearization model for MR dampers is analyzed. The nonlinear hysteretic damping force model of MR damper can be modeled as a hyperbolic tangent function of currents, positions, and velocities, which is an algebraic function with constant parameters. Model parameters can be identified with numerical method using experimental force-velocity-position data obtained from various operating conditions. The nonlinear hysteretic damping force can be linearized with a given slope of damping coefficient if there exist corresponding currents to compensate for the nonlinearity. The corresponding currents can be calculated from the inverse model when the given linear damping force is set equal to the nonlinear hysteretic damping force. The linearization controller is realized in a DSP controller such that the corresponding currents to satisfy a given damping coefficient should be calculated. Experiments show that the current inputs to the MR damper produce linearized damping force with a given slope of the damping coefficient.

1. 서 론

자기베어링시스템⁽¹⁾과 같은 능동 진동제어(active vibration control) 시스템은 힘의 크기와 방향을 직접적으로 변화시키는 것으로 진동제어에는 효과적이거나 에너지의 소모가 많고 외부 노이즈의 영향을 받으며 고장에 민감하게 반응하여 어려움이 있는 반면에 반능동 진동제어(semi-active vibration control)는 직접 힘을 전달하는 것이 아니라 수동 댐퍼의 상태를 변화시켜 전해지는 힘의 크기만을 변화시키기 때

문에 적은 에너지로도 탁월한 진동제어 성능을 보이며 고장에도 강건하다. 반능동 진동제어시스템에는 제어가능유체(controllable fluid)를 이용한 감쇠력 가변형 댐퍼가 사용되는데 제어가능유체는 전기장 또는 자기장이 없을 경우 일반 점성 유체와 마찬가지로 뉴턴 유체(Newtonian fluid)의 거동을 보이다가 전기장 또는 자기장이 가해지는 경우에는 Bingham유체 특성을 가지는 형태로 항복응력이 변하는 특성을 가진다. 특히 자기유변유체(magneto-rheological fluid)를 이용한 MR 댐퍼는 자기장의 세기에 의해 유체의 항복응력을 변화시키는 시간이

* Corresponding Author ; Member, Kyungnam University,
Dept of Mechanical Engineering
E-mail : uhnjoona@kyungnam.ac.kr
Tel : +82-55-249-2162, Fax : +82-55-249-2617

‡ Recommended by Editor Hyung-Jo Jung

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

짧기 때문에 높은 주파수의 진동 영역에서도 충분한 감쇠 성능을 보인다. MR 댐퍼는 유압댐퍼보다 내부 구조가 간단하고 감쇠력의 범위를 넓게 확보할 수 있을 뿐 아니라 시간응답 특성도 빠르기 때문에 자동차의 현가장치나 구조물의 진동제어 등에 적용되고 있다^(2,3).

MR 댐퍼의 특징은 인가되는 전류에 따른 자기장의 변화에 의해 가역적이고 연속적으로 감쇠력을 제어할 수 있는 것이다. MR 댐퍼는 속도가 증가할 때와 감소할 때의 감쇠력에 차이를 보이는 이력현상을 보이는 비선형 함수로 표현된다. MR 댐퍼를 제어하기 위해서는 입력전류에 따른 MR 댐퍼의 거동을 정확하게 반영할 수 있는 모델이 필요하다. 이러한 모델로는 간단한 Bingham 모델, Bouc-Wen 모델⁽⁴⁾, 그리고 Hyperbolic Tangent 모델⁽⁵⁾ 등이 있다. MR 댐퍼는 고유의 이력현상과 비선형성으로 인해 선형 제어시스템에의 적용에 어려움이 따른다. 따라서 비선형의 MR 댐퍼를 등가의 선형시스템으로 바꾸어 주는 연구가 수행되었다⁽⁶⁾.

이 논문은 이력현상을 보이는 비선형함수로 표현되는 MR 댐퍼의 감쇠력을 Hyperbolic tangent 함수로 모델링하고 역모델을 통하여 비선형 모델을 선형화하는 대응 전류를 구하고자 한다. 따라서 선형 감쇠계수 입력이 주어지면 선형감쇠력의 기울기를 유지할 수 있도록 대응되는 전류를 선형화 제어기를 통하여 구하여 MR 댐퍼에 입력전류로 인가하고 실제로 선형 감쇠력을 유지할 수 있도록 하는 것이다. 설계된 감쇠력 선형화 제어기는 MR 댐퍼 시험을 통하여 선형화 성능이 검증된다.

2. MR 댐퍼 모델

이 논문에 사용된 MR 댐퍼는 Fig. 1에 제시된 것 같이 댐퍼 내부에 위치한 전자석 코일에 의해 발생한 자기장의 세기에 따라 MR 유체 특성의 변화를 일으켜 감쇠력을 변화시킬 수 있는 형태의 댐퍼이다. 전자석 코일에 전류가 인가되면 요크와 MR 유체 공극, 피스톤 로드, 케이싱으로 구성된 자기경로에 따라 자속이 형성된다. MR 유체를 관통하는 자속밀도의 세기를 크게 하기 위해서는 요크, 케이싱, 피스톤 로드 등 자기경로를 이루는 재질을 높은 투자율을 가지는 강자성체로 구성해야 한다. 피스톤

로드의 재질은 S45C, 요크 및 케이싱의 재질은 S10C로 구성된다. 피스톤 로드와 요크 사이에는 MR 유체가 채워지며 이 논문에 사용된 MR 유체는 LORD사의 140CG 이다.

MR 댐퍼의 성능을 예측하기 위해 자기장 해석이 수행되었다. 사용된 MR 댐퍼는 상용 자기해석 프로그램인 MAXWELL3D를 이용하여 요한요소 모델링하였다. 2개의 각각의 보빈에는 1500 turns의 코일이 감겨 있으며 전류를 0 A에서 0.4 A까지 변화를 주면서 자기해석을 수행하였다. Fig. 2는 0.4 A의 전류가 인가되었을 때 케이싱과 피스톤 로드에서 자속밀도가 1.6 tesla에 이르러 자기 포화가 일어남을 알 수 있다. 이 논문에서 사용된 MR 댐퍼의 감쇠력은 성능시험을 통하여 검증하였다. 입력전류는 직류로 0 A에서 0.39 A까지 변화시키고 MR 댐퍼를 2 Hz의 사인파로 가진시키면서 그때의 감쇠력과 속도, 변위를 측정하였다.

Fig. 1의 MR 댐퍼는 순수한 감쇠력을 얻기 위해 스프링 강성이 제거되었다. 댐퍼 실험을 통해 얻은 감쇠력-속도, 감쇠력-변위 그래프는 Fig. 3과 Fig. 4에 보여진다.

감쇠력은 속도와 변위에 대해 이력현상을 보이며 전류의 크기가 커짐에 따라 감쇠력의 증가 추이를

Fig. 1 Schematic of the MR damper

Fig. 2 Magnetic analysis for the MR damper

보였다. 하지만 저속도 영역에서 감쇠력의 기울기(감쇠계수)는 전류가 증가 하더라도 큰 변화가 없을 수 있다. 따라서 DC전류가 증가 하더라도 저속영역에서 감쇠계수의 변화를 기대할 수 없다.

수동 댐퍼의 감쇠계수는 고정되기 때문에 다양한 주파수 가진 영역에 대응하기 어렵고 가변질량에 의한 모델의 변화에도 대응하기 어렵다. 또한 감쇠계수를 높게 설계하면 공진주파수 영역에서는 효과적으로 진동을 제어하지만 공진영역 밖에서는 전달력을 높여주는 효과가 있어 진동절연에는 악영향을 준다. 따라서 효과적인 진동제어를 위해서는 공진

영역에서는 감쇠계수를 높여주고 공진 영역 밖에서는 감쇠계수를 줄여주어 전달력을 최소화하는 방법이 필요하다. MR 댐퍼와 같은 가변댐퍼는 감쇠력을 전류에 따라 변화를 줄 수 있기 때문에 이와 같은 선택적 감쇠계수의 운용에 적합하다. 이 논문에서는 비선형의 MR 댐퍼를 선형화 과정을 통하여 선택적 감쇠계수를 유지할 수 있는 선형 감쇠력으로 치환할 수 있는지 알아보고자 한다.

3. 선형화 모델링

MR 댐퍼의 선형화를 위해서는 댐퍼의 거동을 정확하게 표현할 수 있는 모델을 수립하는 것이 중요하다. Bouc와 Wen은 일반적인 이력특성을 모사할 수 있는 미분방정식을 제안하였으며 이를 사용하여 MR 댐퍼의 이력특성을 모델링 할 수 있다. 또한 개선된 모델로서 저속도 영역에서의 롤-오프 현상을 고려하기 위한 모델로 Spencer 등에 의해 제안되었다⁽⁴⁾. 하지만 Bouc-Wen모델은 식이 복잡하고 미분방정식으로 이루어져 있어 모델링이 쉽지 않다. MR 댐퍼 모델링에 좀더 간단하고 이력현상을 잘 구현할 수 있는 모델은 hyperbolic tangent함수를 이용한 모델로 Kwok et al에 의해 제안되었다⁽⁵⁾. Hyperbolic tangent함수를 이용한 MR 댐퍼의 감쇠력은 다음과 같다.

Fig. 3 Damping force-velocity measured(2 Hz)

Fig. 4 Damping force-displacement measured(2 Hz)

$$F = c\dot{x} + kx + \alpha z \quad (1)$$

$$z = \tanh(\beta\dot{x} + \gamma \operatorname{sgn}(x)) \quad (2)$$

계수 c 와 k 는 댐퍼의 강성 및 점성감쇠계수이고 α 는 감쇠력의 크기이며, β 는 이력현상의 기울기를 나타내고 γ 는 이력현상의 폭을 나타낸다. x 와 $\dot{x}$ 은 MR 댐퍼의 변위와 속도를 나타낸다. 식 (1)과 식 (2)는 간단한 대수방정식으로 표현되며 각각의 계수는 여러 조건에서의 실험을 통해 구할 수 있다.

식 (1)~(2)의 높은 스프링 강성이 포함된 Kwok 모델은 순수 감쇠력 곡선을 왜곡할 수 있고 이 논문에서 제시하는 선형 감쇠력과 단순 비교할 수 없기 때문에 이 논문에서는 MR 댐퍼는 외부 스프링을 제거하여 식 (1)에서의 강성 k 항을 제외하였다. 수정된 hyperbolic tangent함수를 이용한 MR 댐퍼의

Fig. 5 Hysteresis parameters

감쇠력은 다음과 같다.

$$F = c\dot{x} + \alpha \tanh(\beta\dot{x} + \gamma \operatorname{sgn}(\dot{x})) \quad (3)$$

MR 댐퍼의 감쇠력은 c , α , β , γ 의 4가지 계수의 조합으로 간단히 표현된다. 예를 들면 c , α , β , γ 의 변화에 따른 MR 댐퍼 감쇠력의 변화는 Fig. 5에 보여진다.

Fig. 3과 Fig. 4에 나타난 감쇠력-속도-변위 데이터를 이용하여 식 (3)의 4가지 계수를 추정하는 해석을 수행하였다. MATLAB의 `lsqcurvefit` 명령어를 이용하여 계수를 추정하였다. 각각의 직류 전류 입력에 대한 추정된 계수는 Table 1에 나타내었다.

Fig. 6과 Fig. 7은 Table 1에서 구한 계수를 이용하여 식 (3)에 의해 추정된 감쇠력-속도-변위의 그래프를 보여준다.

Fig. 8과 Fig. 9에서는 Fig. 3과 Fig. 4의 측정된 감쇠력-속도 및 감쇠력-변위 그래프와 식 (3)에 의해

Table 1 Parameter identification for currents

Current (A)	c	α	β	γ
0	0.029	14.42	61	0.3
0.06	0.034	19.69	57	0.25
0.12	0.001	21.61	59	0.25
0.17	0.021	24.34	73	0.2
0.22	0.014	22.60	73	0.25
0.29	0.001	19.89	63	0.2
0.33	0.012	23.67	67	0.25
0.39	0.015	27.33	77	0.25

추정된 감쇠력-속도 및 감쇠력-변위의 그래프를 비교하였다. 식 (3)에 의해 추정된 감쇠력-속도 모델은 실제 측정된 감쇠력-속도 값에 근접하게 모델링되었으나 높은 속도 영역에서는 약간의 오차를 나타낸다.

Table 1에서 구해진 각각의 계수는 전류 i 의 함수로 표현할 수 있다.

Fig. 6 Damping force-velocity estimated(2 Hz)

Fig. 7 Damping force-displacement estimated(2 Hz)

$$c(i) = 271.3i^5 - 263.9i^4 + 89.95i^3 - 12.24i^2 + 0.435i + 0.03$$

$$\alpha(i) = 3133i^4 - 1232i^3 - 164.7i^2 + 99.63i + 14.4$$

$$\beta(i) = -44.32i^4 + 40.97i^3 - 12.45i^2 + 1.272i + 0.105$$

$$\gamma(i) = -2478i^5 + 2570i^4 - 959.7i^3 + 152.2i^2 - 9.12i + 0.796$$

전류의 함수로 표현된 계수 $c(i)$, $\alpha(i)$, $\beta(i)$, $\gamma(i)$ 를 반영한 MR 댐퍼의 감쇠력은 다음과 같다.

$$F = c(i)\dot{x} + \alpha(i) \tanh(\beta(i)\dot{x} + \gamma(i) \operatorname{sgn}(x)) - v\dot{x} \quad (4)$$

일반적인 감쇠계수 v 를 갖는 선형 감쇠력은 다음과 같다.

$$F = v\dot{x} \quad (5)$$

계수 v 는 감쇠계수를 나타낸다. 식 (4)의 비선형 감쇠력을 주어진 선형 감쇠력과 동일하게 놓고 대응하는 전류를 구하면 식 (4)의 감쇠력을 선형화 할 수 있다. 감쇠력 선형화를 위한 필요조건은 다음과 같은 대수방정식으로 표현된다.

$$g(i) = c(i)\dot{x} + \alpha(i) \tanh(\beta(i)\dot{x} + \gamma(i) \operatorname{sgn}(x)) - v\dot{x} = 0 \quad (6)$$

식 (6)은 전류 i 의 함수로 표현된 비선형 대수방정식으로 이 식의 해가 존재하면 주어진 감쇠계수 v 를 갖는 선형 감쇠력을 구할 수 있다. 예를 들면 v 를 300 N-sec/m의 감쇠계수로 주고 속도 및 변위값을 대입하면 식 (6)은 전류에 대한 대수방정식이 되며 이의 해를 구하면 선형 감쇠계수를 갖는 감쇠력을 발생시키는 전류를 구할 수 있다. 식 (6)은 Newton-Raphson의 수치해석 방법으로 각각의 sampling time에 대해 해를 구할 수 있다. 식 (6)의 gradient는 다음과 같다.

$$\nabla g = \frac{\partial g}{\partial i} = \frac{\partial c}{\partial i} \dot{x} + \frac{\partial \alpha}{\partial i} \tanh\left(\frac{\partial \beta}{\partial i} \dot{x} + \frac{\partial \gamma}{\partial i} \operatorname{sgn}(x)\right) \quad (7)$$

초기 전류값 $i(0) = 0$ 이 주어지면 전류의 해는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$i(k+1) = i(k) - \frac{g}{\nabla g} \quad (8)$$

식 (8)은 DSP 제어기에 프로그래밍 하여 측정된 변위 및 속도 x 와 $\dot{x}$ 을 피드백 받아 주어진 감쇠계수 v 에 대해 제어전압 V_c 를 실시간으로 계산할 수 있다. Fig. 10은 MR 댐퍼의 선형화 제어기 모델을 보여준다. 댐퍼 역모델로부터 나온 제어전압 V_c 는 전류증폭기를 이용하여 전류 i 로 바꾸어 주고 이를 실제 MR 댐퍼의 입력전류로 인가시키면 주어진 감쇠계수 v 를 갖는 선형화된 감쇠력을 얻을 수 있다.

4. 실험 결과

고정주파수로 MR 댐퍼의 변위와 속도를 가변시키는 시험기를 이용하여 선형화 제어기의 성능을 시험하였다. Fig. 11은 MR 댐퍼 시험장치를 보여준다.

Fig. 8 Comparisons of damping force-velocity

Fig. 9 Comparisons of damping force-displacement

MR 댐퍼 시험기는 2 Hz의 고정주파수로 진폭이 16 mm인 사인파로 MR 댐퍼를 가진시킨다. Fig. 10에서 제시된 선형화 제어기는 DSP 제어기에 구현되어 MR 댐퍼 시험기에서 감쇠력 선형화 시험이 수행되었다. MR 댐퍼의 변위와 속도는 레이저 센서로 측정하여 MR 댐퍼 선형화 제어기에 공급하였고 제어기에서 출력되는 전압은 전류증폭기에 의해 전류로 바뀌어 MR 댐퍼 구동기에 인가하였다. 감쇠력은 시험기에 부착된 로드셀에 의해 측정되었고 MR 댐퍼 입력전류는 제어기 출력전압 v_c 로부터 측정할 수 있다.

선형화 제어기 성능시험은 임의의 선택된 감쇠계수를 주고 주어진 감쇠계수를 유지하기 위해 필요한 전류를 선형화 제어기의 MR 댐퍼 역모델을 통하여 실시간으로 구한다음 이 전류를 MR 댐퍼 구동기에 인가하여 전류변화에 대응하는 감쇠력을 측정하는 것으로 구성된다.

먼저 $\nu = 300$ N-sec/m으로 주고 제어기의 성능시험을 수행하였다. 측정된 변위와 속도는 Fig. 12와

Fig. 10 Controller for linearized damping force

Fig. 11 MR damper test rig

Fig. 13에 보여진다. 댐퍼 속도는 레이저 센서로부터 측정된 변위를 sampling time(8 ms)으로 미분하여 구하였고 이러한 방식은 미분에러에 의한 순간적인 속도 피크를 발생시킬 수 있다.

Fig. 14는 선형화 제어기로 부터 계산된 전류를

Fig. 12 Measured displacement

Fig. 13 Measured velocity

Fig. 14 Input currents to MR damper measured for $\nu=300$

보여준다. Fig. 13의 순간 속도 피크는 식 (8)의 전류 해에 영향을 주어 전류 피크 에러를 발생시킨다.

Fig. 15는 전류 변화에 대응하는 감쇠력을 보여준다. MR 댐퍼의 감쇠력은 속도와 같은 주기인 2 Hz로 변화하지만 전류는 4 Hz로 변화한다. 이는 감쇠력은 대칭을 이루고 양의 감쇠력인 음의 감쇠력인 요구되는 전류는 동일하기 때문이다. 즉 감쇠력을 결정하는 MR 유체의 자속은 전류의 제곱에 비례한다. 전류 피크 에러는 Fig. 15와 같이 감쇠력 피크 에러를 발생시킨다. 속도 및 감쇠력 피크 에러는 속도 측정 방법을 개선하여 깨끗한 속도 값을 얻으면 감소시킬 수 있다.

측정된 감쇠력-속도 그래프는 Fig. 16에 보여진다. 감쇠력-속도 그래프는 5초 동안의 10 cycle의 감쇠력-속도를 나타낸다.

Fig. 15 Measured damping force for $v=300$

Fig. 16 Damping force-velocity measured for $v=300$

Fig. 16의 측정된 감쇠력-속도 그래프는 감쇠계수 $v=300$ N-sec/m의 기울기와 유사한 거동을 보여줄 수 있다. 하지만 Fig. 8에서 보여진 것 같이 MR 댐퍼 모델과 측정값 사이의 모델링 오차가 발생하고 측정된 속도 피크 에러로 인하여 감쇠력에 오차가 발생하여 선형 감쇠계수 기울기와는 차이가 발생한다.

다음으로 감쇠계수를 $v=400$ N-sec/m, $v=500$ N-sec/m, $v=600$ N-sec/m으로 변화 시키면서 선형화 제어기 성능시험을 수행하였다. 감쇠계수 $v=400$ N-sec/m에 대한 측정된 감쇠력-속도 그래프와 입력 전류는 Fig. 17과 Fig. 18에 보여진다.

감쇠계수 $v=500$ N-sec/m에 대한 측정된 감쇠력-속도 그래프와 입력 전류는 Fig. 19와 Fig. 20에 보여진다.

Fig. 17 Damping Force-velocity measured for $v=400$

Fig. 18 Input currents to MR damper for $v=400$

Fig. 19 Damping force-velocity measured for $v=500$

Fig. 22 Input currents to MR damper measured for $v=600$

Fig. 20 Input currents to MR damper measured for $v=500$

Fig. 21 Damping Force-velocity measured for $v=600$

감쇠계수 $v = 600$ N-sec/m에 대한 측정된 감쇠력-속도 그래프와 입력전류는 Fig. 21과 Fig. 22에 여진다.

선택된 감쇠계수 $v = 400$ N-sec/m, $v = 500$ N-sec/m, $v = 600$ N-sec/m에 대해 선형화 제어를 통해 구해진 전류를 인가한 MR 댐퍼의 감쇠력은 모두 주어진 감쇠계수의 기울기와 비슷한 감쇠력의 거동을 보여주었다. 따라서 설계된 선형화 제어기는 이력현상을 갖는 비선형의 MR 댐퍼의 감쇠력을 선택적인 감쇠계수를 갖는 선형화된 감쇠력으로 치환할 수 있는 가능성을 보여준다.

5. 결 론

이 논문은 이력현상을 보이는 비선형함수로 표현되는 MR 댐퍼의 감쇠력을 역모델을 통하여 구해진 전류를 제어하여 주어진 선형 감쇠계수의 기울기를 갖는 선형 감쇠력을 유지할 수 있도록 하는 선형화 제어를 설계하는 것이다.

먼저 이력현상을 보이는 비선형함수로 표현되는 MR 댐퍼의 감쇠력을 hyperbolic tangent 함수로 모델링하고 주어진 DC 전류에 대응하는 계수 c , α , β , γ 를 구하였다. 구해진 각각의 계수는 전류 i 의 함수로 표현할 수 있다.

Hyperbolic tangent 함수로 주어진 비선형 감쇠력을 선택된 선형 감쇠력과 동일하게 놓고 대응하는 전류를 구하는 방식으로 감쇠력을 선형화 할 수 있다.

이 논문에서 구현된 선형화 제어기는 선택된 선형 감쇠계수 입력이 주어지면 선형 감쇠력의 기울기를 유지할 수 있도록 대응되는 전류를 역모델을 통하여 구하고 실시간으로 MR 댐퍼 구동기에 인가하

여 실제로 선형 감쇠력을 유지할 수 있도록 하는 것이다. 구현된 선형화 제어기는 MR 댐퍼 성능시험을 통하여 효과적으로 감쇠계수를 제어할 수 있음을 보여주었다.

MR 댐퍼의 감쇠계수제어를 통해 공진영역에서는 감쇠계수를 높여주어 진동을 줄이고 공진 영역 밖에서는 감쇠계수를 줄여주어 전달력을 최소화하여 진동절연을 함으로서 효과적으로 진동제어를 실현할 수 있다.

향후 연구계획은 이 논문에서 제시된 선형제어기 기법을 전 주파수 영역으로 확대하여 MR 댐퍼를 선형화 하는 것이다. 이 제어기는 실제로 진동제어 시스템에 적용되어 감쇠계수를 효과적으로 제어하는 제어시스템에 적용될 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) Chang, I.-B. and Han, D.-C., 1995, Performance Study of Magnetic Bearing Considering the Performance Limit, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 5, No. 1, pp. 59~65.
- (2) Lee, S. K. and Choi, S. B., 2001, Hysteresis Model of Damping Forces of MR Damper for a Passenger Car, Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 9, No. 1, pp. 189~197.
- (3) Park, K. S., Koh, H. M., Ok, S. Y. and Seo, C. W., 2002, Semi-active Fuzzy Control of Bridge Structure with MR Damper, Transactions of the Korean

Society of Civil Engineers, Vol. 22, No. 4-A, pp. 847~857.

(4) Spencer, B. F., Dyke, S. J., Sain, M. K. and Carlson, J. D., 1997, Phenomenological Model for a Magnetorheological Damper, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 123, No. 3, pp. 230~238.

(5) Kwok, N. M., Ha, Q. P., Nguyen, T. H., Li, J. and Samali, B., 2006, A Novel Hysteretic Model for Magnetorheological Fluid Dampers and Parameter Identification Using Particle Swarm Optimization, Sensors and Actuators A, Vol. 132, No. 2, pp. 441~451.

(6) Lee, S. H., Min, K. W. and Lee, M. K., 2005, Performance Evaluation of MR Damper Using Equivalent Linearization Technique, Transactions of Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 9, No. 2, pp. 1~6.

Uhn Joo Na received PhD in mechanical engineering at Texas A&M University in 1999. He worked at KIMM as a senior researcher in 2002 before he joined Kyungnam university in 2004. He is an associate professor at Mechanical Engineering Dept. His research interests are rotordynamics, magnetic bearings, vibration control, and haptic teleoperation.