

# MR 댐퍼의 비선형해석을 이용한 반능동형 제진대에 관한 연구

## A Study on Semi-active Vibration Isolation Table using a Nonlinear Analysis of the MR Damper

김도영\*·전종균†·권영철\*\*

DoYoung Kim, ChongKeun Chun and YoungChul Kwon

(Received September 2, 2014 ; Revised November 7, 2014 ; Accepted November 7, 2014)

**Key Words** : MR Damper(MR 댐퍼), Frequency Response Function(주파수응답함수), Least Squares Method(최소자승법), Instrumental Variable Method(보조변수법), Parameter Estimation(매개변수 규명), Nonlinear Damping Force(비선형 감쇠력)

### ABSTRACT

In this study, a semi-active isolator was constructed from applying a MR damper that used the MR fluid to an isolator. The parameter identification was also performed to determine the characteristics of this semi-active isolator during which the least squares method and the auxiliary variable method were applied to produce a value closest to the true value. In addition, the MR damper's nonlinear damping force was closely analyzed to greatly reduce the range of error. Based on this analysis, it was discovered that the parameter tended to increase with more electric current. Such analysis of the dynamic properties of semi-active isolator proved that constructing an isolator that provides a more stable operation could be achieved.

## 1. 서론

현재 디스플레이 및 반도체 등 초정밀 가공 및 생산 검사 장비의 운용이 고집적화 및 대형화됨에 따라, 외부에서 장비로 전파되는 진동의 차단 및 내부 진동원에 따른 과도 응답의 저감이 매우 중요시 되고 있다. 따라서 이에 대한 대책방안으로 공기스프링 등 방진재를 사용하여 수십 Hz 이상의 중고주파 및 충격 과도진동을 상쇄시켜 방진 영역을 확보하고 있지만 장비 자체의 이동에 대한 동적 진동과 낮은 고유진동수에 기인하는 과도응답에 대하여 매

우 취약함을 나타내고 있다. 이에 대응하는 연구로 Kato 등<sup>(1)</sup>은 새로운 형태의 고정밀 고속 공압 조절기를 설계하고, 이를 이용한 공압 방진테이블의 능동제어를 제안하였다. Huang 등<sup>(2)</sup>은 전자기 작동기를 이용한 유연구조물의 능동진동제어를 연구하였으며, 더불어 Hong 등<sup>(3)</sup>은 ER 마운트와 최적제어기법을 이용한 구조물의 진동제어를 제안하였다. Lee 등<sup>(4)</sup>은 충격성 동하중에 의한 과도 응답 제어를 위한 MR 댐퍼를 조합한 하이브리드 방진 시스템을 고안하여 제진 및 방진 성능을 확인하였다. 이러한 연구의 일환으로 이 논문에서는 과도 응답을 제어하기 위해, 작은 크기와 적은 동력으로 효과적인 진동제어가 가

† Corresponding Author ; Member, The Dept. of Mech. Eng. Sunmoon University

E-mail : ckchun@sunmoon.ac.kr

Tel : +82-41-530-2331, Fax : +82-41-530-2981

\* RMSTechnology Corporation

\*\* The Dept. of Mech. Eng. Sunmoon University

‡ Recommended by Editor SungSoo Na

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

능한 MR 댐퍼를 도입하여 제진대 하부에 지지하는 반능동형 제진대를 구현하였다. 반능동형 제진대의 모델링은 3자유도 선형 시불변 시스템으로 가정하여 유도하였으며, MR 댐퍼 부하 전류를 변화시키고 반복 실험을 통해 주파수응답함수를 추출하였다. 추출한 데이터를 바탕으로 매개변수 규명을 수행하였으며 전류 변화에 따른 특성을 분석하였다. 매개변수 규명 방법으로는 최소자승법 및 보조변수법을 도입하였으며, 이 방법으로 검증된 연구결과로 조준현 등<sup>(5)</sup>은 IV(보조변수법) 방법을 이용하여 잡음이 포함된 베어링의 매개변수 규명을 실시한바 있다. 반면 이러한 방법들은 선형적 특성이 강한 규명 방법으로 비선형 특성이 강한 MR 댐퍼에 도입하는데 오차가 발생한다. 따라서 최소자승법과 보조변수법으로 추출된 매개변수와 비선형적인 MR 댐퍼 감쇠력의 결합을 통해 오차를 대폭 감소시켰다.

## 2. 시스템 모델링

### 2.1 반능동형 제진대 모델링

반능동형 제진대의 운동방정식은 Fig. 1과 같이 직육면체 형태의 프레임 상에 고정되어 있으며 총 6 자유도의 매우 복잡한 구조의 시스템이다. 하지만 본 논문에서는 큰 강성으로 거동이 적은 자유도를 제외하고 총 3자유도( $\alpha, \beta, z$ ) 시스템으로 구성하였으며 운동방정식은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$[M] \begin{Bmatrix} \ddot{z} \\ \ddot{\alpha} \\ \ddot{\beta} \end{Bmatrix} + [C] \begin{Bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{Bmatrix} + [K] \begin{Bmatrix} z \\ \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_z \\ T_\alpha \\ T_\beta \end{Bmatrix} \quad (1)$$

### 2.2 좌표 변환

반능동형 제진대의 운동방정식은 무게중심(C.G.)을 중심 좌표로 구성되어 유도되는 형식이지만, 실제 제어시스템의 구성에 있어 가속도센서 및 방진장치 설치 위치가 제진대의 무게중심으로 위치하는 것은 어렵다. 따라서 센서 위치에 대하여 제진대의 무게중심으로 좌표변환 시스템이 요구된다.

Fig. 2에서 보논바와 같이 총 3개의 Z(수직)방향 가속도센서를 적용하였으며, 제진대의 3자유도를 고

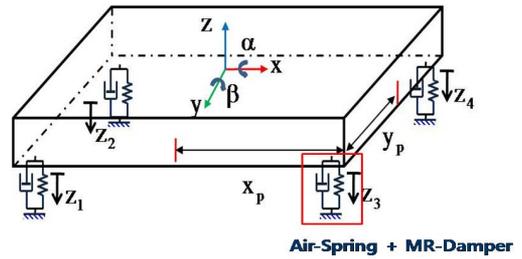


Fig. 1 Semi-active vibration isolation table(3DOF model)

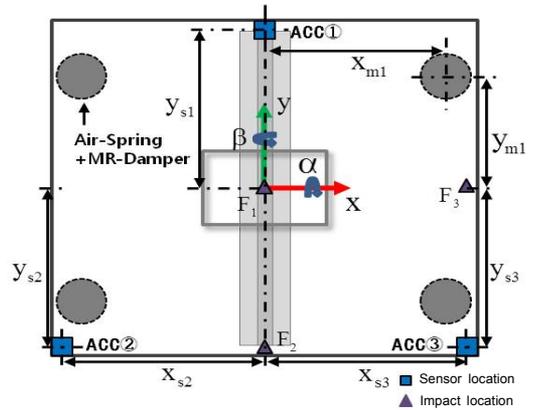


Fig. 2 Sensor position on table

려하여 센서 1개당 출력 관계식은 아래와 같이 표현된다.

$$S_{iz} = \begin{Bmatrix} 1 & y_{s1} & -x_{s1} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} z \\ \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} \quad (2)$$

총 3개의 수직방향 센서에 대한 출력 관계식을 일반화하면 아래의 행렬관계식으로 정의할 수 있으며 역행렬을 이용한 좌표계의 역변환이 이용된다.

$$\begin{Bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & y_{s1} & 0 \\ 1 & -y_{s2} & -x_{s2} \\ 1 & -y_{s3} & x_{s3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z \\ \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} \quad (3)$$

## 3. 실험 및 규명 방법

### 3.1 모달테스트

이 논문에서는 반능동형 제진대에 주파수 force를

인가하여 가진력과 응답을 추출함으로써 전달함수를 측정하였다. 측정 방법은 Fig. 2와 같이 가속도 센서를 부착하였고, impact hammer를 이용하여 충격 입력을 가하였다. 총 3개의 가속도 센서와 3개의 가진 지점으로 구성되어 수행하였으며 그 위치는 제진대 시스템 특성을 3자유도로 잘 표현되는 지점과 응답 출력이 큰 지점으로 고려하여 측정을 실시하였다. 위와 같은 방법으로 공기스프링만을 설치한 시스템과, 공기스프링+MR 댐퍼 시스템을 구분하여 각각 측정이 수행되었다. 또한 MR 댐퍼 전류는 0.05A와 0.1A로 변화시키면서 측정이 진행되었다.

### 3.2 매개변수 규명 방법

#### (1) 최소자승법

진동 실험 시 잡음신호의 제거 및 매개변수 규명에 대해 널리 사용되는 최소자승법을 도입하였다. 이 논문에서는 간단한 2자유도 시스템을 통해 최소자승법 과정을 나타내었으며, 주파수응답함수인 [H]는 감쇠행렬에 의해 복소수 형태를 가진다.

$$[H] = \begin{bmatrix} \text{real}H_{11} + i\text{imag}H_{11} & \text{real}H_{12} + i\text{imag}H_{12} \\ \text{real}H_{21} + i\text{imag}H_{21} & \text{real}H_{22} + i\text{imag}H_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

위의 주파수응답함수는 실험값이라 할 수 있으며, 해석적인 강성행렬과의 관계식을 통해 매개변수가 유도될 수 있다. 그때의 관계식은 식 (5)와 같다.

$$[H] \cdot [B_{\text{Anal}}] = [E] + [S] \quad (5)$$

[B<sub>Anal</sub>]는 해석적인 강성행렬을 의미하며 전개하게 되면 아래의 식과 같으며, 실수부와 허수부분으로

나누어서 전개 하면 식 (7)과 같다.

$$[H] \cdot \{[K] - \omega^2[M] + j\omega[C]\} = [E] + [S] \quad (6)$$

$$\begin{aligned} [rH][K] - \omega^2[rH][M] + j\omega[rH][C] &= [E] + [rS] \\ [iH][K] - \omega^2[iH][M] + j\omega[iH][C] &= [E] + [iS] \end{aligned} \quad (7)$$

[rH], [iS]는 각각 실험한 주파수응답함수 행렬과 측정 시 잡음 등에 의해서 생기는 노이즈 행렬의 실수부분을 의미하며, [iH], [iS]는 허수부분을 의미한다. 따라서 식 (7)을 정리하면  $\omega$ 에 대한 총 6개의 식으로 표현되며 행렬 형태로 일반화 시키면 아래와 같이 표현된다.

$$[A] \cdot [X] = [E] + [S] \quad (8)$$

[A]는 가진에 대한 진동수  $\omega$ 와 주파수응답함수로 이루어진 행렬이며, [X]는 규명해야 할 동특성 매개변수 행렬을 의미하며, [E]는 단위행렬, [S]는 측정 오차 및 시스템에 미치는 외적 잡음에 대한 잡음 오차 행렬을 나타낸다. 전개하면 식 (9)와 같다.

$$[A] = \begin{bmatrix} rH_{11} & rH_{12} & -\omega^2 \cdot rH_{11} & -\omega^2 \cdot rH_{12} & -\omega \cdot iH_{11} & -\omega \cdot iH_{12} \\ rH_{21} & rH_{22} & -\omega^2 \cdot rH_{21} & -\omega^2 \cdot rH_{22} & -\omega \cdot iH_{21} & -\omega \cdot iH_{22} \\ iH_{11} & iH_{12} & -\omega^2 \cdot iH_{11} & -\omega^2 \cdot iH_{12} & +\omega \cdot rH_{11} & +\omega \cdot rH_{12} \\ iH_{21} & iH_{22} & -\omega^2 \cdot iH_{21} & -\omega^2 \cdot iH_{22} & +\omega \cdot rH_{21} & +\omega \cdot rH_{22} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[X] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \\ m_{11} & 0 \\ 0 & m_{22} \\ c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \quad [E] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

위 식의 역변환을 통해 규명하는 방법을 최소자승법이라 하며 역변환에 대한 관계식은 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} [A]^T [A] [X] &= [A]^T [E] + [A]^T [S] \\ [X] &= ([A]^T [A])^{-1} ([A]^T [E] + [A]^T [S]) \end{aligned} \quad (10)$$

#### (2) 보조변수법

앞서 설명한 최소자승법은 오차 행렬 [S]의 값이 이상적인 값일 경우에 매개변수 값이 참값에 잘 추종하지만, 잡음 행렬의 값이 클 경우에는 그에 대한 영향을 고려하고 보완될 수 있는 방법이 보조변수법이며 과정은 다음과 같다. 식 (10)을 통해 규명한 질



Fig. 3 Modal testing of the isolation table

량행렬 및 강성행렬, 감쇠행렬 값을 해석적인 전달 함수를 이용해서 [A] 행렬과 동일하게 [Q]행렬이 유도되며 그때의 관계식은 아래의 식과 같다.

$$\begin{aligned}
 [Q]^T[A][X] &= [Q]^T[E] + [Q]^T[S] \\
 [X] &= ([Q]^T[A])^{-1} ([Q]^T[E] + [Q]^T[S])
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

위의 설명된 과정을 통해 규명한 값이 참값과의 오차가 만족하지 않을 시, 식(11)의 반복적인 과정을 통해 오차가 만족되는 매개변수 [X]를 규명할 수 있게 된다.

### 4. 비선형 감쇠력

#### 4.1 비선형 감쇠력 추정

일반적인 구조물은 대부분 비선형 시스템이지만 통상적으로 스프링력이 변위에 비례하며, 감쇠력은 속도에 비례하는 선형 모델을 이용해 해석하고 있다. 하지만 실제적으로 감쇠 및 강성계수는 동적 변수들과 감쇠지수 같은 시스템의 구조적 변수들에 의해 종속적인 비선형 특성을 가지고 있으므로, 비선형 거동의 특성을 결정짓는 매개변수를 규명하여야 한다. 따라서 이 논문에서는 MR 댐퍼의 비선형 감쇠력을 추정하였다.

MR 댐퍼의 구조는 Fig. 4와 같이 피스톤 축과 피

스톤 헤드, 실린더, 가스 챔버로 구성되어 있으며 이와 같은 MR 댐퍼의 감쇠력은 아래의 식과 같이 표현 될 수 있다.

$$F_d = k_e x_p + c_e \dot{x}_p + F_{MR} \tag{12}$$

여기서  $x_p$ 와  $\dot{x}_p$ 는 각각의 피스톤에 대한 변위와 속도,  $k_e$ 는 고무판의 탄성,  $c_e$ 는 유체의 감쇠 계수를 나타내며 전류에 따른 항복 감쇠력  $F_{MR}$ 은 식(13)과 같이 표현된다.

$$F_{MR} = (A_p - A_r) P_{MR} \text{sgn}(\dot{x}_p) \tag{13}$$

여기서  $A_p$ 와  $A_r$ 은 각각의 피스톤 헤드와 피스톤 축의 면적,  $\text{sgn}(\dot{x}_p)$ 은 속도에 비례하지는 않고 부호

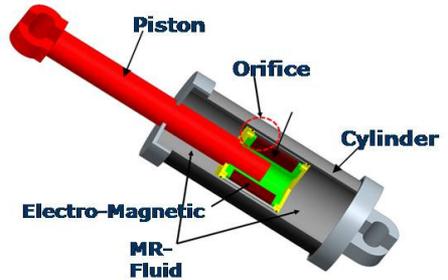


Fig. 4 Configuration of the MR-damper

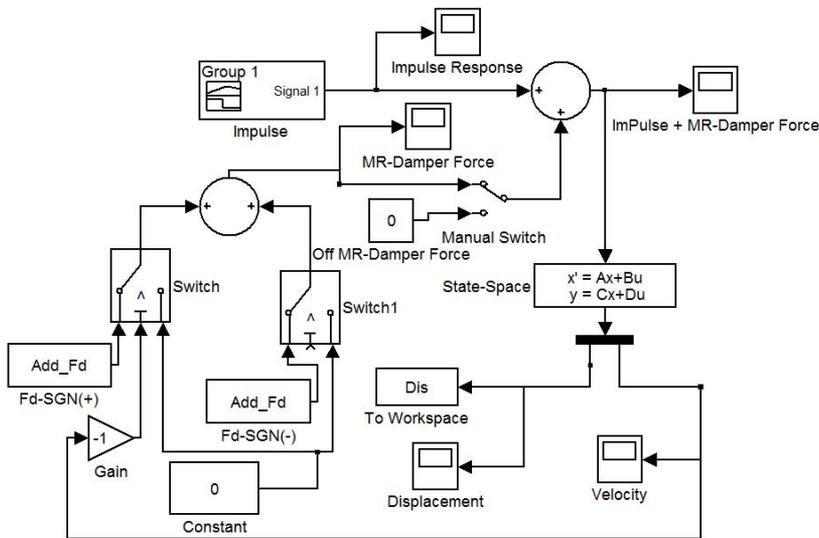


Fig. 5 Simulink code

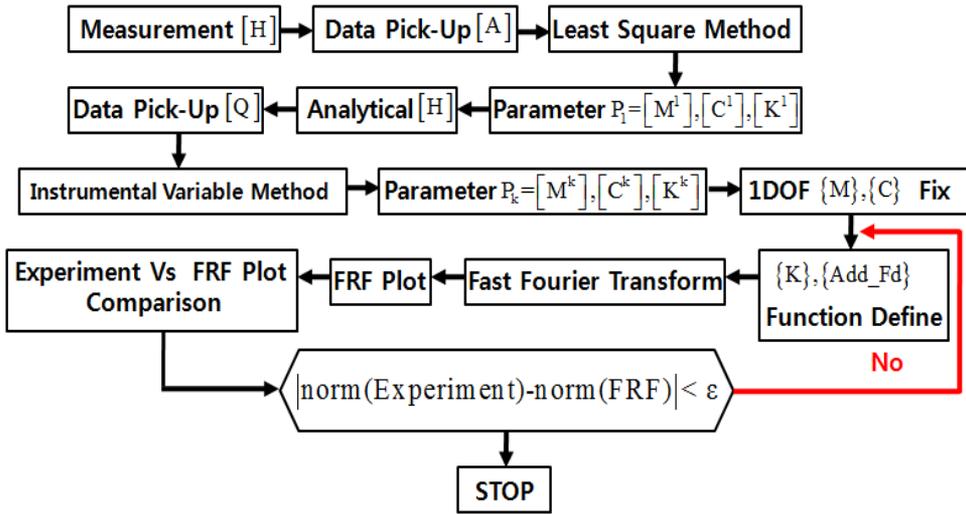


Fig. 6 Flow chart of MR-damper parameter identification

에만 비례되는 함수를 의미한다. 이 논문에서는 비선형 거동을 나타내는 MR 댐퍼의 감쇠력을 파라미터로 이용하여 매개변수로 파악하는 것이 목적이므로 앞서 설명한 MR 댐퍼 관계식에  $\text{sgn}(\dot{x}_p)$ 를 제외한 모든 파라미터 값을  $F_{\text{total}}$  함수로 정의하여 아래와 같이 표현 될 수 있다.

$$F_d = F_{\text{total}} \text{sgn}(\dot{x}_p) \tag{14}$$

따라서 위 식을 포함한 반능동형 제진대의 비선형 운동방정식은 식 (15)와 같이 유도될 수 있다.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} + \{F_d(t)\} \tag{15}$$

### 4.2 감쇠력 규명

MR 댐퍼의 감쇠력은 속도의 부호에 비례하는 특성을 가지고 있어 속도에 따라 달라지는 감쇠력과, 상태공간방정식을 통해 시간에 따른 응답 운동방정식을 표현하였으며 Fig. 5와 같다. 비선형을 발생시키는 MR 댐퍼의 감쇠력을 규명하기 위한 방법은 다음과 같다. 우선 최소자승법과 보조변수법에 의해 규명된 매개변수 값을 상태방정식에 적용해 시간에 따른 응답으로 추출한다. 다음으로 속도 부호에 비례하는 MR 댐퍼의 감쇠력 함수 Add\_Fd를 상태방정식에 추출된 속도에 더하여 시간에 따른 응답을 반복적으로 추출한다. 이때 실험 데이터와의 오차가

Table 1 Parameter identification result

Parameter identification	
Stiffness matrix $K = \begin{bmatrix} 1191371 & 0 & 0 \\ 0 & 703828.8 & 0 \\ 0 & 0 & 862147.26 \end{bmatrix}$	Damping matrix $C = \begin{bmatrix} 1011.2 & 0 & 0 \\ 0 & 1110.2 & 0 \\ 0 & 0 & 871.5 \end{bmatrix}$
Natural frequency $\text{Hz} = \begin{bmatrix} 3.05 & 0 & 0 \\ 0 & 3.49 & 0 \\ 0 & 0 & 4.56 \end{bmatrix}$	Damping ratio $\zeta = \begin{bmatrix} 0.008 & 0 & 0 \\ 0 & 0.017 & 0 \\ 0 & 0 & 0.014 \end{bmatrix}$
MR-damping force $F_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	

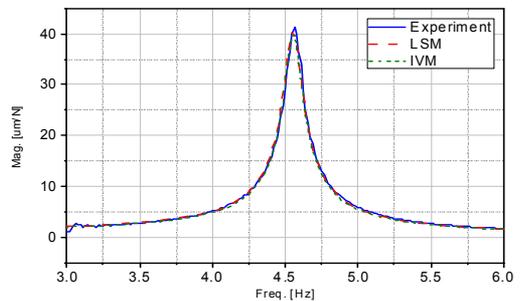
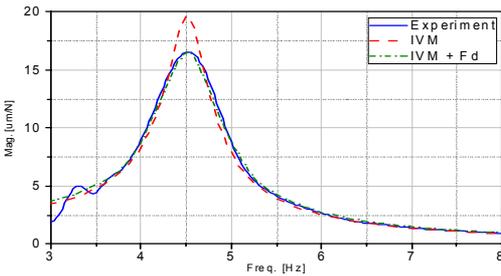


Fig. 7 Comparison experiment with  $\beta$  axis estimation (air-spring)

가장 적은 함수값이 추종되면 중단하는 방법을 이용하였으며 구성도는 Fig. 6과 같다.

**Table 2** Parameter identification result(0.05A)

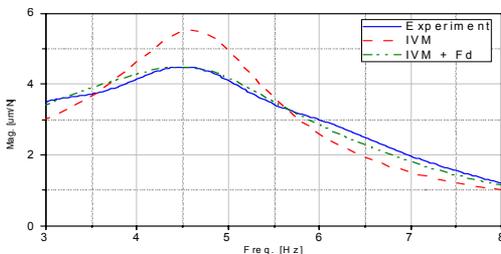
Parameter identification	
Stiffness matrix $K = \begin{bmatrix} 1352624.2 & 0 & 0 \\ 0 & 765324.2 & 0 \\ 0 & 0 & 910243.6 \end{bmatrix}$	Damping matrix $C = \begin{bmatrix} 2340 & 0 & 0 \\ 0 & 2607 & 0 \\ 0 & 0 & 1893 \end{bmatrix}$
Natural frequency $Hz = \begin{bmatrix} 3.22 & 0 & 0 \\ 0 & 3.59 & 0 \\ 0 & 0 & 4.62 \end{bmatrix}$	Damping ratio $\zeta = \begin{bmatrix} 0.04 & 0 & 0 \\ 0 & 0.07 & 0 \\ 0 & 0 & 0.05 \end{bmatrix}$
MR-damping force $F_d = \begin{bmatrix} 0.23 & 0 & 0 \\ 0 & 0.47 & 0 \\ 0 & 0 & 0.28 \end{bmatrix}$	



**Fig. 8** Comparison experiment with  $\beta$  axis estimation - 0.05A(IVM+Fd)

**Table 3** Parameter identification result(0.1A)

Parameter identification	
Stiffness matrix $K = \begin{bmatrix} 1044609 & 0 & 0 \\ 0 & 360467 & 0 \\ 0 & 0 & 517736 \end{bmatrix}$	Damping matrix $C = \begin{bmatrix} 13841 & 0 & 0 \\ 0 & 9630 & 0 \\ 0 & 0 & 6177 \end{bmatrix}$
Natural frequency $Hz = \begin{bmatrix} 3.58 & 0 & 0 \\ 0 & 3.85 & 0 \\ 0 & 0 & 4.75 \end{bmatrix}$	Damping ratio $\zeta = \begin{bmatrix} 0.16 & 0 & 0 \\ 0 & 0.30 & 0 \\ 0 & 0 & 0.17 \end{bmatrix}$
MR-damping force $F_d = \begin{bmatrix} 1.8 & 0 & 0 \\ 0 & 1.8 & 0 \\ 0 & 0 & 1.5 \end{bmatrix}$	



**Fig. 9** Comparison experiment with  $\beta$  axis estimation - 0.1A (IVM+Fd)

## 5. 매개변수 규명

### 5.1 공기스프링 제진대 매개변수

공기스프링만으로 지지되는 제진대는 선형 특성을 가지고 있어  $\beta$ 방향인 Fig. 7과 같이 참값에 잘 추종되는 것으로 나타났으며 각 방향 매개변수는 Table 1과 같다.

### 5.2 반능동형 제진대 0.05A의 매개변수

MR 댐퍼에 0.05A 전류 부하 시 각 방향 매개변수 규명 값은 Table 2와 같으며,  $\beta$ 방향인 Fig. 8에서 보는바와 같이 MR 댐퍼 감쇠력을 더해줌으로서 오차가 줄어들었다.

### 5.3 반능동형 제진대 0.1A의 매개변수

MR 댐퍼에 0.1A 전류 부하 시 각 방향 매개변수 규명 값은 Table 3과 같으며,  $\beta$ 방향인 Fig. 9에서 보는바와 같이 MR 댐퍼 감쇠력을 더해줌으로써 오차가 감소하였다.

## 6. 결 론

이 논문에서는 공기스프링으로 지지되는 제진대 시스템에 MR 댐퍼를 도입하여 반능동형 제진대를 구현하였다. 이러한 시스템에 MR 댐퍼 전류를 변화시켜 반복 실험(모달테스트)을 수행하였고 주파수 응답함수를 추출하였다. 추출한 주파수응답함수 데이터를 바탕으로 최소자승법과 보조변수법을 통해 매개변수 규명을 실시하였으나 MR 댐퍼의 비선형 감쇠특성에 의해 큰 오차가 발생 하였다. 이에 MR 댐퍼의 비선형적인 감쇠력을 함수로 표현하여 최소자승법과 보조변수법으로 규명된 매개변수 값과 MR 댐퍼 감쇠력 함수를 더해줌과 동시에 반복적인 규명 절차를 통해 오차 범위가 대폭 감소하여 참값에 추종하였다. 또한 MR 댐퍼의 전류에 따른 매개변수들은 전류가 증가할수록 MR 유체 마찰력이 증가하여 강성을 증가시키는 효과로 인해 강성계수 및 고유진동수 매개변수들이 증가하는 경향을 파악하였다. 따라서 구조 동역학적인 관점에서 볼 때 이 연구의 성과 방법을 토대로 구조물에 미치는 동특성을 규명함으로써 보다 안정적인 구조물을 기대 할 수 있다.

이 논문에서는 MR 댐퍼의 총 감쇠력 파라미터로 이용하여 규명을 실시하였으나 향후 MR 댐퍼의 비선형적 감쇠력에 대한 상세 연구를 통해 보다 정확한 매개변수 규명을 실시할 예정이다.

## Reference

- (1) Kato, T., Kawashima, K., Funaki, T., Tadano, K. and Kagawa, T., 2010, A New, High Precision, Quick Response Pressure Regulator for Active Control of Pneumatic Vibration Isolation Tables, Precision Engineering, Vol. 34, pp. 43~48.
- (2) Huang, X., Elliot, S. J. and Brennan, M. J., 2003, Active Isolation of a Flexible Structure from Base Vibration, Journal of Sound and Vibration, Vol. 263, pp. 357~376.
- (3) Hong, S. R., Choi, S. B. and Han, M. S., 2002, Vibration Control of a Frame Structure Using Electro-rheological Fluid Mounts, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 44, pp. 2027~2045.
- (4) Lee, G. S., Son, S. W., Lee, H. G., Han, H. H. and Chun, C. K., 2009, The Hybrid Control System for the Vibration Isolation and the Transient Response Reduction of precision Equipment, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 3, pp. 185~189.
- (5) Jo, J. H., Ryu, G., Lee, Y. B. and Kim, C. H., 2004, A Study on the Dynamic Characteristics of Air Foil Bearings Using LS(Least Square) / IV(Instrumental Variable) Method, Transactions of the Korean Society

for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 677~684.



**Do Young Kim** is a deputy at RMS Technology Corp. He received his B.S., M.S. degree in the Dept. of Mechanical Engineering in Sunmoon Univ. His research interests are dynamic behavior of structures and vibration characteristics.



**Chong Keun Chun** is a professor at the Dept. of Mechanical Engineering of SunMoon Univ. He received his B.S. for mechanical design from Seoul National Univ. and M.S. and Ph.D. for mechanics and structures from the Univ. of California, Los Angeles(United States). His research interests are vibration and applied mechanics.



**Young Chul Kwon** is a professor at the Dept. of Mechanical Engineering of SunMoon Univ. He received his B.S. for precision mechanical engineering from Pusan National Univ. and M.S. and Ph.D. for mechanical engineering from POSTECH. His research interests are thermal fluid and mechanics.