

# 미진동 저감을 위한 복합형 전자기식 액추에이터 설계 Design of Hybrid Electromagnetic Actuator against Microvibration

문석준† · 최상민\* · 정종안\* · 김철호\*\*

S. J. Moon, S. M. Choi, J. A. Jeong and C. H. Kim

**Key Words** : Vibration Control (진동제어), Electromagnetic Actuator(전자기식 작동기), Air Spring (공기스프링), Microvibration (미진동), Design(설계)

## ABSTRACT

A hybrid electromagnetic actuator with an air spring is designed so as to achieve the desired isolation reduce the vibration efficiency on the floor vibration. The performance specification of the hybrid electromagnetic actuator is determined based on the vibration criterion for vibration-sensitive equipment. In basic design stage of the electromagnetic actuator, the simple reluctance method is adapted to analyze magnetic circuits. The result is verified by finite element analysis using ANSYS Emag. Finally, some design parameters are optimized under several constraint conditions. Through this study, the design procedure for a specific electromagnetic actuator is set up using a simple reluctance method.

## 1. 서 론

LCD 등 디스플레이(display) 산업에서의 대형화, 집적화, 다기능화 등의 성능을 만족하기 위해서는 관련 가공/생산/검사장비 등이 매우 높은 정밀도를 보유하여야 한다. 불량률의 감소에 따른 수출 증대와 생산 공정의 안정화가 고도의 정밀가공이 필요한 생산제품의 경제성과 직접적인 관계를 가지고 있다. 현재 디스플레이 생산 현장에서 발생하는 난제들 중의 하나는 여러 장비들이 주변 미세 진동들에 의하여 기능저하가 됨으로써 수율이 떨어진다는 것이다. 이러한 문제들을 고려하여 디스플레이 공장 건물들에 대해 진동허용 규제를 하고 있으나, 실제 운용되는 정밀 장비들의 진동 허용 규제치는 더욱 높은 조건을 요구하고 있다.

정밀장비의 진동허용 기준을 만족시키기 위하여 일반적으로 사용하는 방법은 공기스프링과 같은 수동형 탄성받침을 사용하여 외부의 진동이 장비로 전달되는 것을 차단하는 것이다. 그러나 고정밀장비의 진동허용치가 더욱 낮아지

고, 장비 자체의 이동 질량에 의한 동하중이 진동원으로 작용함으로써 최근 생산 라인의 운용에서 진동에 의한 심각한 문제들이 발생하고 있다. 따라서 장비의 내부 가진원에 의해 발생하는 과도응답을 제어하고, 외부로부터의 진동을 효과적으로 차단할 수 있는 효과적인 제진장비의 개발이 요구되고 있다<sup>(1)</sup>.

일반적으로 널리 사용하고 있는 공기스프링과 같은 수동형 진동제어방식은 큰 정하중 용량을 보유하고 있으며, 약 20 Hz 이상의 주파수 영역에서 우수한 진동차단 효과를 얻을 수 있다. 그러나 저주파수 영역의 자체 공진주파수에서는 내부 가진원에 의한 변위가 크게 발생하는 단점이 있다. 예를 들면, 대용량 이동 질량을 가지고 있는 노광기와 같은 장비에는 단독으로 적용하는 데에는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 다양한 연구가 진행되고 있으며, 대표적으로 능동형 공기스프링을 활용한 방법에 대한 연구가 발표되고 있다<sup>(2,3,4)</sup>. 또한 수동형, 반능동형 및 능동형 등 다양한 진동제어 장치의 특성을 활용하여 내/외부 진동을 제어함으로써 고정밀 생산장비의 생산성을 증대할 수 있는 통합적인 진동제어 시스템의 개발 및 적용에 대한 지속적인 연구가 요구되고 있다. 통합 진동제어시스템의 반능동형 제진장치로는 MR/ER 댐퍼, 오리피스 댐퍼, 마찰 댐퍼 등이 있으며, 능동형 제진장치로는 공압스프링, 전자기식 작동기<sup>(5)</sup>, 압전 작동기, 자기변형 작동기 등을 고려할 수 있다.

본 논문에서는 능동형 진동제어장치 중 전자기식 작동기

† 교신저자 : 정희원, 한국기계연구원  
E-mail : sjmoon@kimm.re.kr  
Tel : (042) 868-7428, Fax : (042) 868-7418

\* 한국기계연구원

\*\* 생산기술연구원

의 설계방법에 대한 연구를 다루고 있다. 고정밀 장비에 대한 통합 진동제어시스템에서의 전자기식 작동기는 공기스프링과 같은 수동형 제진장치와 함께 사용하는 것을 전제로 한다. 모든 정하중은 수동형 장치가 지지하고, 전자기식 작동기는 내/외부 기진원에 의한 동하중에 의해 유발되는 진동만을 제어하는 것을 목표로 하고 있다. 내부 기진원 중 큰 과도진동은 MR 댐퍼 등 다른 진동제어장치가 담당을 하고, 전자기식 작동기는 정상상태(steady state)에서의 진동제어만을 고려한다. 본 연구에서는 미진동용 전자기식 작동기를 간편하고 효과적으로 설계하기 위해 검증된 방법을 통해 설계절차를 정립하고자 한다. 본 논문에서 다루고 있는 전자기식 작동기는 자기 베어링 타입이며, 설치 편의 및 공간문제 등을 고려하여 공기스프링과 결합된 복합형이다.

## 2. 사양 결정

고정밀을 요구하는 첨단 가공/생산설비의 진동허용치(vibration criteria)는 장비의 사용목적 및 특성 등에 따라 다르게 적용될 수 있으나, 미국 IEST에서 제시하고 있는 Fig. 1<sup>(6)</sup>을 활용할 수 있을 것이다. Fig. 1의 각 허용치를 적용할 수 있는 일반적인 장비를 기술하면 Table 1과 같이 정리될 수 있다.

Fig. 1을 기준으로 볼 때, 수동형 공기스프링이 설치되어 있는 장비는 외부 기진원에 대해 VC-B ~ VC-C 정도의 진동허용치를 만족하고 있는 것으로 알려져 있다. 첨단 가공/생산설비가 VC-D 이하의 조건을 요구할 경우, 전자기식 작동기 등 추가적인 제어장치를 통해 1 ~ 2 단계의 진동레벨을 제어할 수 있어야 한다. 단, 약 20 Hz이상의 주파수영역에서는 공기스프링만으로도 VC-D 이하의 조건을 만족하는 것으로 알려져 있다. 따라서 전자기식 작동기는 저주파수영역은 4 Hz ~ 20 Hz에서 2단계 이상의 진동레벨을 제어할 수 있어야 하며, Table 1의 속도 기준으로 약 20  $\mu\text{m/s}$  이상의 진동을 저감해야 한다.

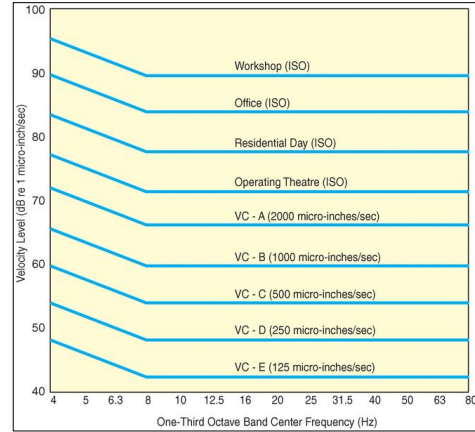


Fig. 1 Generic vibration criterion curves for vibration sensitive equipment<sup>(7)</sup>

본 연구에서는 Fig. 2와 같은 자기 베어링 형태의 작동기를 설계하고자 한다. 중앙에 공기 스프링이 설치되어 있으며, 그 주위에 전자기식 작동기가 감싸고 있다. 코일은 상하에 설치되어 있어 양방향 진동제어에 용이하도록 하였다. 단, 진동에 의해 가동자(armature)와 고정자(stator)사이의 갭(air gap) 크기가 변경되어 제어기 설계를 할 경우에는 비선형성을 고려해야 할 것이다. 위에서 기술한 바와 같은 내용을 고려하여 전자기식 작동기의 제어력은 500 N으로 결정하였다. 복합형 전자기식 작동기에서 채용한 공기스프링은 상용제품을 수정 없이 사용하는 것을 가정하였다.

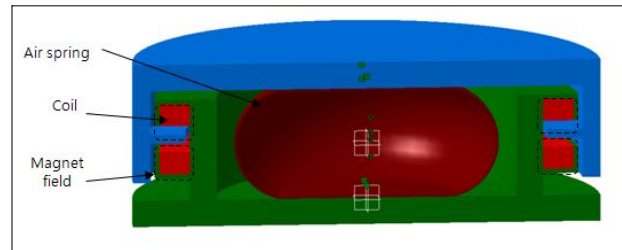


Fig. 2 Conceptual design of an electromagnetic actuator

Table 1 Application and interpretation of criterion curves<sup>(8)</sup>

Criteria curve	RMS amplitude ( $\mu\text{m/s}$ )	Detail size (microns)	Description of use
VC-A	50	8	Optical microscopes to 400X, Microbalance, Optical balances, Proximity, Projection aligners
VC-B	25	3	Optical microscopes to 1000X, Inspection and lithography equipment
VC-C	12.5	1 - 3	Most lithography and inspection equipment (including electron microscopes)
VC-D	6	0.3 - 1	Semiconductor, Photolithography, Electron microscopes (TEMs and SEMs), E-beam system
VC-E	3	< 0.1	Nanotechnology equipment, Long-path, laser-based small target system

### 3. 설계 방법 및 검증

#### 3.1 Reluctance 방법

Fig. 2에서 코일이 감긴 부분만을 확대하여 다시 도시하면, Fig. 3 같이 나타낼 수 있다. 코일이 상단과 하단에 별개로 설치된 구조이며, 코일이 감긴 부분을 고정자(stator)라고 하고, 감기지 않은 가운데 부분을 가동자(armature)라고 한다. 고정자와 가동자 사이에는 약간의 갭(air gap,  $g$ )이 있으며, 이 부분에서 전자기력이 발생한다. 갭은 진동 수준에 따라 변경될 수 있으며, 기본설계 단계에서는 진동이 없는 상태에서의 해석을 수행하고자 하였다. 또한 자기 흐름을 고려하여 고정자와 가동자의 폭( $w$ )은 동일한 것으로 가정하였으며, 상부 고정자와 하부 고정자는 동일하므로 상부 고정자만을 해석에 고려하였다. Fig. 3에서의 화살표는 자기회로가 형성되는 폐 경로(closed path)를 나타내고 있다. 단, 외부로 방출되는 누설(leakage) 및 fringing flux는 없는 것으로 가정하였다.

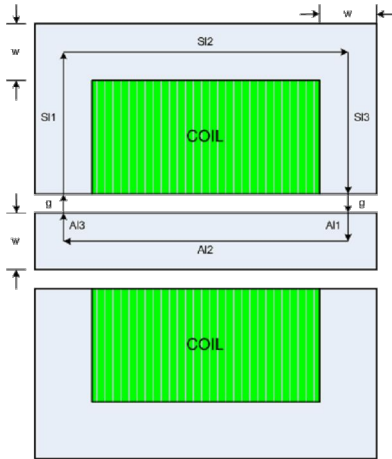


Fig. 3 Cross section of the electromagnetic actuator

본 연구에서는 기본설계단계에서 효과적으로 활용할 수 있는 Ampere 법칙을 이용한 reluctance 방법을 채용하여 제어력과 응답성을 산정하고자 하였다. 이 방법은 아래의 식 (1), (2)으로부터 출발한다.

$$\oint H \cdot dl = NI \quad (1)$$

$$\sum_k H_k l_k = NI \quad (2)$$

여기서  $H$ 과  $l$ 는 각각 field intensity와 자기회로의 길이이고,  $N$ 과  $I$ 는 코일의 턴 수(감긴 수)와 코일에 흐르는 전류이다. 자기 회로를 구성하고 있는 고정자와 가동자의 물성치가 상이하므로, 이를 고려하기 위해서 flux density

( $B$ )를 도입하여 식 (2)를 표현하면 다음과 같다.

$$\sum_k (B_k / \mu_k) l_k = NI \quad (3)$$

여기서  $\mu$ 는 투자율(permeability)이다. 식 (3)에 자기 flux( $\phi$ )를 도입하고, 자기 flux는 항상 일정하다는 조건을 고려하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi \sum_k R_k = NI \quad (4)$$

여기서  $R = l / (\mu S)$ 이며, reluctance라고 부른다. 식에서  $S$ 는 단면적이다. Reluctance의 역을 permeance라고 부르고, 이를 이용할 경우 permeance 방법이라 한다.

Reluctance 방법을 Fig. 3에 적용하면, 고정자, 갭, 가동자에서의 reluctance는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_{stator} = (S11 + S12 + S13) / (\mu_{stator} \cdot w \cdot \pi \cdot diameter)$$

$$R_{gap} = g / (\mu_{air} \cdot w \cdot \pi \cdot diameter)$$

$$R_{armature} = (A11 + A12 + A13) / (\mu_{armature} \cdot w \cdot \pi \cdot diameter)$$

따라서 전체 reluctance는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_{total} = R_{stator} + 2R_{gap} + R_{armature} \quad (5)$$

식 (5)로부터 다음의 식들을 구할 수 있다.

$$\phi = NI / R_{total}$$

$$B_{gap} = \phi / w$$

$$pressure_{gap} = 2 \cdot B_{gap}^2 / (2 \cdot \mu_{air})$$

위 식들부터 전자기력( $F$ )는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F = pressure_{gap} \cdot w \cdot \pi \cdot diameter \quad (6)$$

작동기의 응답성은 시정수(time constant)로도 나타낼 수 있으며, 전자기식 작동기의 시정수는 inductance( $L$ )와 resistance( $r$ )로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$time\ constant = L / r = (N \cdot \sigma \cdot Sc) / (lt \cdot R_{total}) \quad (7)$$

여기서  $\sigma$ 은 코일의 전도성이며, 코일의 온도에 따라 변경

된다. 전류의 흐름과 발열작용에 의해 코일의 온도가 상승하면, 코일의 전도성이 저하되고 동시에 시정수도 감소한다.  $Sc$ 는 코일의 단면적이며 AWG(American Wire Gauge) 번호로 나타낼 수 있다. AWG 번호가 클수록 직경은 작아진다.  $lt$ 는 코일 한 턴 수의 길이이며, 각각은 아래로 식으로 표현할 수 있다.

$$\sigma = \frac{5.8^7}{1 + 0.00393(T - 20^\circ C)} \quad [S/m]$$

$$Sc = \pi d^2 / 4 = \pi [0.00826 \cdot 1.123^{-AWG}]^2 / 4 \quad [m^2]$$

$$lt = \pi \cdot diameter$$

또한, 코일이 감기는 공간( $Sw$ )이 충분한지를 검토해야 한다. 일반적으로 코일은 단락방지를 위한 코팅이 되어 있으므로, 코팅의 두께를 고려해야 한다. 즉, 아래와 같은 packing factor( $F_p$ )를 고려한다.

$$F_p = N \cdot Sc / Sw \quad (8)$$

일반적으로  $F_p$ 는 약 0.7이하로 설정한다<sup>(9)</sup>. 즉, 설계를 위해서는 식 (6), (7) 및 (8)을 만족하는 코일을 설정하고, 코일의 턴 수 및 전류를 결정해야 한다.

### 3.2 FEM 해석을 통한 검증

3.1절에서 제시한 reluctance 방법의 유효성을 검증하기 위해 FEM 방법을 활용하였다. 본 연구과제에서 고려한 S/W 도구는 ANSYS/Emag 11.0이며, 해석을 통해 제어력과 시정수를 비교해 보았다. 설계 대상체는 좌우 대칭 형상을 가지고 있으므로 계산시간의 절약을 위해 1/4만 모델링을 하였다. Fig. 4는 모델링에 사용된 모델을 나타내고 있다.

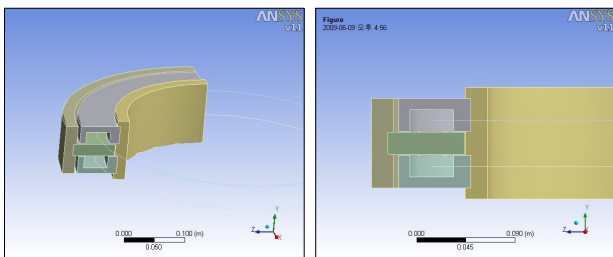


Fig. 4 FEM modelling

FEM을 통한 전자기 해석의 모델링 단계에서 중요한 것은 갭 부분에 대한 meshing을 조밀하게 해야 한다는 것이다. 그러나 너무 조밀하게 하면, 연산시간이 많이 요구되므로 경험에 의한 meshing 정도의 조절이 필요하다.

Reluctance 방법과 FEM 방법의 결과를 비교하기 위해

수치해석 예제를 선택하였다. 예제의 각 파라미터 값은 Table 2에 정리하였다. 고정자와 가동자의 재료는 일반 강재로 가정하였으며, 갭은 2 mm로 고정하였다.

FEM 해석으로부터 얻은 결과를 reluctance 방법의 결과와 비교하여 Table 3에 정리하였다. Table 3에서 보는 것과 같이 제어력에서는 약 7 %의 오차를, 시정수에서는 약 33 %의 오차를 보이는 것을 알 수 있다. FEM 해석을 수행할 경우, Fig. 5와 같이 다양한 방향에서 검토를 수행할 수 있는 장점이 있는 반면, 모델링 및 해석 시간에 많은 소요시간이 필요하다는 단점이 있다.

Table 2 Numerical example

Item	Parameter	Value
Gap	g	2 mm
Stator	SI1	25 mm
	SI2	50 mm
	SI3	25 mm
	w	10 mm
Armature	AI1	5 mm
	AI2	50 mm
	AI3	5 mm
	w	10 mm
Permeability	$\mu_{air}$	$12.57 \times 10^{-7}$ H/m
	$\mu_{steel}$	$1257 \times 10^{-7}$ H/m
Coil	N	400 turns
	I	2 A

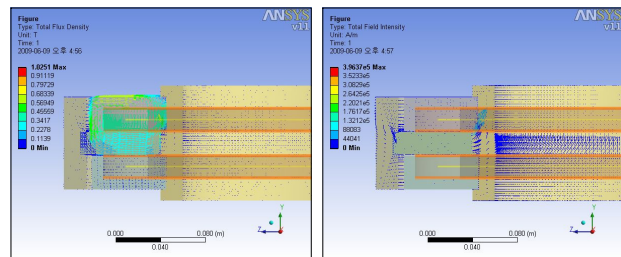


Fig. 5 FEM result: flux density and flux intensity

따라서, reluctance 방법이 비록 시정수 부분에서 큰 오차를 보이고 있지만, 다수의 조합을 고려해야 하는 기본 설계단계에서는 매우 유용한 방법으로 평가할 수 있는 것으로 판단된다. 기본설계단계에서는 reluctance 방법을 사용하고, 설계가 완성된 후 상세설계단계에서는 FEM 방법을 통해 다양한 관점에서 설계 결과를 검토하는 것으로 판단된다.

Table 3 Analysis result

Item	Reluctance method	FEM	Error
Force	924 N	993 N	7 %
Inductance	0.607 H	0.409 H	33 %
Time const.	79 ms	53 ms	33 %

#### 4. 설계 최적화

3장에 기술된 식들을 살펴보면, 설계변수 사이에 복잡한 관계가 설정되어 있는 것을 알 수 있다. 예를 들면, 시정수를 줄이기 위한 방안과 그 영향은 아래의 사항과 같다.

- 코일 턴 수를 감소시킨다. → 제어력이 감소하므로 전류가 증가시켜야 한다.
- 코일의 직경을 감소시킨다. → 허용 전류 밀도가 감소한다.
- 간극(gap)을 증가시킨다. → 제어력이 감소하므로 전류를 증가시켜야 한다. → 전류공급장치가 커지며, 에너지 손실이 증가된다. → 비용이 상승한다.

위의 모든 경우, 식 (8)을 반드시 만족해야 한다. 따라서 2장의 설계사양의 여러 제한조건을 만족하는 전자기식 작동기를 설계하기 위해서는 설계변수를 최적화해야 한다. 이를 위해 최적화 문제를 Table 4와 같이 설정하였다. Table 4에서는 3개의 목적함수를 설정하고 있다. 즉, 전력공급장치를 고려한 최소 소요전력, 제어력을 고려한 최대 제어력, 그리고 응답속도를 고려한 최소 시정수이다. 설계변수로는 코일이 감기는 공간의 크기, 코일의 변호 및 감는 수, 코일에 흐르는 전류 등을 선정하였다.

Table 5에 최적화 문제부터 얻은 결과를 정리하였다. 목적함수에 따라 설계변수의 값들이 다소 차이가 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 정확한 목적함수의 설정이 중요하며, 최적화 절차를 통해 설계변수를 결정하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

Table 5 Optimized parameters from the optimization problem

Objective	Space_a (mm)	Space_b (mm)	Coil AWG	Current (A)
	Coil turns	Power (W)	Force (N)	Time Const. (ms)
Min. supply power	20	22	16	2.8
	210	32	507	42
Max. control force	20	28	17	3.6
	230	72	1000	36
Min. time constant	20	20	23	1.0
	710	69	741	28

#### 5. 결론

본 연구에서는 고정밀을 요구하는 첨단 가공/생산설비의 통합 제진시스템에 필요한 전자기식 작동기를 간편하고 효과적으로 설계하기 위한 절차를 정립하였다. 무엇보다도 정확한 설계사양이 중요하며, 이를 진동허용(vibration criteria) 조건을 통해 제시하였다. 또한 자기회로 설계를 간단하고 편리한 reluctance method를 통해 수행하였으며, 정확성을 검증하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 이를 통해 제시한 방법이 기본설계단계에서 유용하게 사용할 수 있음을 확인하였다. 마지막으로 설계 최적화 절차에서는 다양한 목적함수에 따른 설계변수의 결정을 통해 최적화절차의 필요성을 제안하였다. 본 연구에서 사용된 reluctance 방법은 최적화 절차를 포함한 기본설계단계에서 효율적으로 적용할 수 있으나, 상세설계단계에서는 다양한 관점에서 결과를 검토하기 위해서는 FEM 해석이 필수적이다. 하지만 FEM 해석에는 많은 노력과 시간이 필요함을 명심해야 한다.

Table 4 Optimization problem

Objective	I: Min. supply power II: Max. control force III: Min. time constant
Constraints	· control force > 500 N · time constant = 35 ms ± 20 % · coil current density < 4.0 A/m <sup>2</sup>
Design parameter	· coil space · coil AWG · coil turns · current

정립된 설계절차에 따라 설계된 전자기식 작동기의 제작 및 실험 등에 관련된 연구가 진행되고 있으며, 이를 통해

전자기식 작동기의 제작에 관련된 논문도 추후 발표할 예정이다.

## 후 기

본 논문의 내용은 중장기산업기술개발사업인 “첨단 정밀 가공/생산설비의 다축 통합제진마운트 기술개발”의 연구결과 중 일부분입니다.

## 참 고 문 헌

(1) Jang, H. K., Hong, S. I., Kim, H. S., Lee, D. H. and Lee, K. D., 2006, “A Vibration Isolation System Design for a Vibration-Sensitive Equipment”, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol.16, No. 3, pp. 307~312.

(2) An, C. H., Yim, K. H., Jin, K. B. and Rim, K. H., 2007, "Active Control of Vibration Isolation Table Using Air-Spring", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol. 17, No. 7, pp. 565~571.

(3) Shin, Y. H., Oh, K. Y., Lee, J. H. and Kim, K. J., 2007, “Performance Enhancement of Pneumatic Vibration Isolation Table in Low Frequency by Active Control”, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol. 17, No. 1, pp. 72~79.

(4) Sun, J. O., Shin, Y. H. and Kim, K. J., 2007, “A Study on Response Analysis of 6-DOF Pneumatic Vibration Isolation Table by Transient Movements of Carriage on It”, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol. 17, No. 6, pp. 515~523.

(5) Kim, H. T., Kim, C. H., Lee, K. W., Lee, G. S., Son, S. W. and Chun, C. K., 2009, “Performance Estimation of Active Electro-Magnetic Isolator for Semiconductor Manufacturing Machine”, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 579~580.

(6) Gordon, C. G., 1991, "Generic Criteria for Vibration-Sensitive Equipment", Proceedings of SPIE Conference on Vibration Control and Metrology, pp. 71~85, San Jose, CA

(7) <http://www.newport.com>

(8) Amick, H., Gendreau, M., Busch, T. and Gordon, C. G., 2005, "Evolving Criteria for Research Facilities: I - Vibration", Proceedings of SPIE Conference on Buildings for Nanoscale Research and Beyond, pp. 1~13,

(9) Braucer, J. R., 2006, Magnetic Actuators and Sensors, IEEE Magnetic Society, Wiley-Interscience.