

미진동 저감을 위한 복합형 전자기식 작동기의 개발에 대한 연구

A Study on the Development of a Hybrid Electromagnetic Actuator Against Microvibration

문 석 준* · 박 수 홍** · 정 종 안* · 허 영 철* · 김 철 호*** · 최 상 민****
S. J. Moon, S. H. Park, J. A. Jeong, Y. C. Huh, C. H. Kim and S. M. Choi

(2011년 4월 6일 접수 ; 2011년 5월 6일 심사완료)

Key Words : Microvibration(미진동), Electromagnetic Actuator(전자기식 작동기), Air Mount(공기 마운트), Vibration Control(진동제어), Hybrid Vibration Mount(복합형 방진마운트)

ABSTRACT

A hybrid electromagnetic actuator with an air mount 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 the 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, in order to confirm the design performance, a dynamic characteristic test is carried out for the prototype of a hybrid electromagnetic actuator.

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 수율 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 의해 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 낮아지고, 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 제진 장비의 개발이 요구되고 있다⁽¹⁾.

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

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

* 정회원, 한국기계연구원
** 정회원, 한국산업기술시험원
*** 정회원, 한국생산기술연구원
**** (주)수퍼센츄리

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⁽²⁻⁴⁾. 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 공압 스프링, 전자기식 작동기⁽⁵⁾, 압전작동기⁽⁶⁾, 자기변형 작동기 등을 고려할 수 있다.

이 논문에서는 능동형 진동제어장치 중 전자기식 작동기의 개발에 대한 연구를 다루고 있다. 고정밀 장비에 대한 통합 진동제어시스템에서의 전자기식 작동기는 공기 마운트와 같은 수동형 제진장치와 함께 사용하는 것을 전제로 한다. 모든 정하중은 수동형 장치가 지지하고, 전자기식 작동기는 내/외부 가진원에 의한 동하중에 의해 유발되는 진동만을 제어하는 것을 목표로 하고 있다. 내부 가진원 중 큰 과도진동은 MR 댐퍼 등 다른 진동제어장치가 담당을 하고, 전자기식 작동기는 정상상태(steady state)에서의 진동제어만을 고려한다. 이 연구에서는 미진동용 전자기식 작동기를 간편하고 효과적으로 설계하기 위해 검증된 방법을 통해 설계절차를 정립하고, 정립된 절차에 따라 복합형 방진마운트를 개발하고자 한다. 이 논문에서 다루고 있는 전자기식 작동기는 자기 베어링 타입이며, 설치 편의 및

공간문제 등을 고려하여 공기 마운트와 결합된 형태이다.

2. 개념 설계

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^(7,8)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 가진원에 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

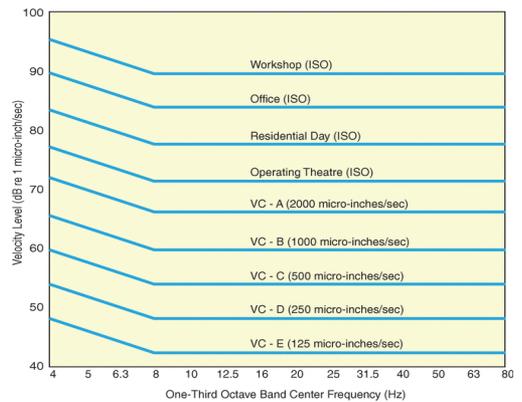


Fig. 1 Generic vibration criterion curves for vibration sensitive equipment⁽⁸⁾

Table 1 Application and interpretation of criterion curves⁽⁹⁾

Criteria curve	RMS amplitude (μm/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

있어야 한다. 단, 약 20 Hz 이상의 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 μm/s 이상의 진동을 저감해야 한다.

이 연구에서는 Fig. 2와 같은 자기 베어링 형태의 전자기식 작동기를 제안하며, 설계·제작하고자 한다. 제안된 작동기는 상하부 하우징, 코일 및 중앙에 설치된 공기 스프링 등으로 구성되어 있다. 코일은 상하에 2부분으로 나누어서 감기게 되어 있어 수직 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. 고려할 수 있는 다른 형식으로는 보이스 코일(voice coil) 방식의 작동기가 있으나, 구조가 복잡하고 제어력이 일반적으로 작게 발생하는 것으로 고려되어 이 연구 대상에서는 제외하였다.

위에서 기술한 바와 같은 내용을 고려하여 전자기식 작동기의 제어력은 (4~20) Hz 주파수 범위 안에서 최대 150 N으로 결정하였다. 복합형 전자기식 작동기에서 채용한 공기 마운트는 상용제품을 수정 없이 사용하는 것을 가정하였다.

3. 자기회로 설계 및 검증

3.1 Reluctance 방법

Fig. 2에서 코일이 감긴 부분만을 확대하여 다시 도시하면, Fig. 3같이 나타날 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

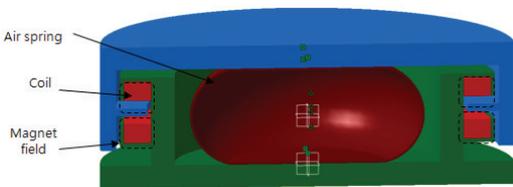


Fig. 2 Conceptual design of a electromagnetic actuator

전자기력이 발생한다. 갭은 진동수준에 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 프린징 플럭스(fringing flux)는 없는 것으로 가정하였다.

이 연구에서는 기본설계단계에서 효과적으로 활용할 수 있는 암페어(Ampere) 법칙을 이용한 자기 저항(reluctance) 방법을 채용하여 제어력과 응답성을 산정하고자 하였다. 이 방법은 식 (1), (2)로부터 출발한다.

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

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

여기서 H 과 l 는 각각 필드 강도(field intensity)와 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 플럭스 밀도(flux density,

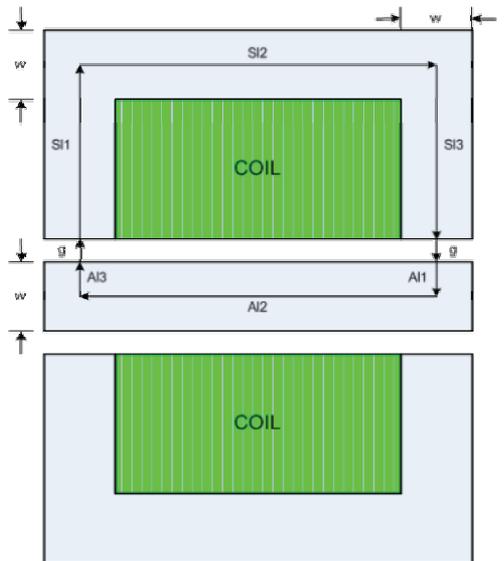


Fig. 3 Cross section of the electromagnetic actuator

B)를 도입하여 식 (2)를 표현하면 다음과 같다.

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

여기서 μ 는 투자율(permeability)이다. 식 (3)에 자기 플럭스(ϕ)를 도입하고, 자기 플럭스는 항상 일정하다는 조건을 고려하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 $R=l/(\mu S)$ 이며, 자기 저항이라고 부른다. 식에서 S 는 단면적이다. 자기 저항의 역을 투자도(permeance)라고 부르고, 이를 이용할 경우 투자도 방법이라 한다.

자기저항 방법을 Fig. 3에 적용하면, 고정자, 갭, 가동자에서의 자기 저항은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_{stator} = (Sl1 + Sl2 + Sl3) / (\mu_{stator} \cdot w \cdot \pi \cdot diameter)$$

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

$$R_{armature} = (Al1 + Al2 + Al3) / (\mu_{armature} \cdot w \cdot \pi \cdot diameter)$$

따라서 전체 자기 저항은 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 유도 계수(inductance, L)와 저항(resistance, r)로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 σ 은 코일의 전도성이며, 코일의 온도에 따라 변경된다. 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.

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

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

$$lt = \pi \cdot diameter$$

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

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

일반적으로 F_p 는 약 0.7 이하로 설정한다⁽¹⁰⁾. 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 자기저항 방법의 유효성을 검증하기 위해 유한요소 해석방법을 활용하였다. 이 연구과제에서 고려한 해석도구는 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 있으며, 약 260,000개의 노드와 140,000개의 요소가 사용되었다. 유한요소 해석방법을 통한 전자기 해석의 모델링 단계에서 중요한 것은 갭 부분에 대한 메쉬(meshing)를 조밀하게 해야 한다는 것이다. 그러나 너무 조밀하게 하면, 연산시간이 많이 요구되므로 경험에 의한 메쉬 정도의 조절이 필요하다.

자기저항 방법과 유한요소 해석방법의 결과를 비교하기 위해 수치해석 예제를 선택하였다. 예제의 각 파라미터 값은 Table 2에 정리하였다. 고정자와

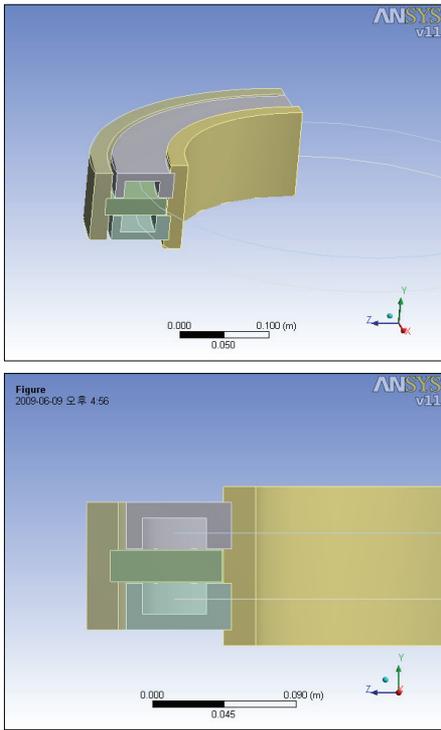


Fig. 4 FEM modelling

Table 2 Numerical example

Item	Parameter	Value
Gap	g	5 mm
	S11	25 mm
Stator	S12	50 mm
	S13	25 mm
	w	10 mm
	AI1	5 mm
Armature	AI2	50 mm
	AI3	5 mm
	w	10 mm
	Permeability	μ_{air}
μ_{steel}		1257×10^{-7} H/m
Coil	AWG	16
	N	400 turns
	I	2 A

가동자의 재료는 일반 강재로 가정하였으며, 갭은 5 mm로 고정하였다.

유한요소 해석으로부터 얻은 결과를 자기저항 방법의 결과와 비교하여 Table 3에 정리하였다. Table 3에서 보는 것과 같이 제어력에서는 약 7%의 오차를,

Table 3 Analysis result

Item	Reluctance method	FEM	Error
Force	154 N	165 N	7 %
Inductance	0.249 H	0.168 H	33 %
Time const.	32 ms	21.5 ms	33 %

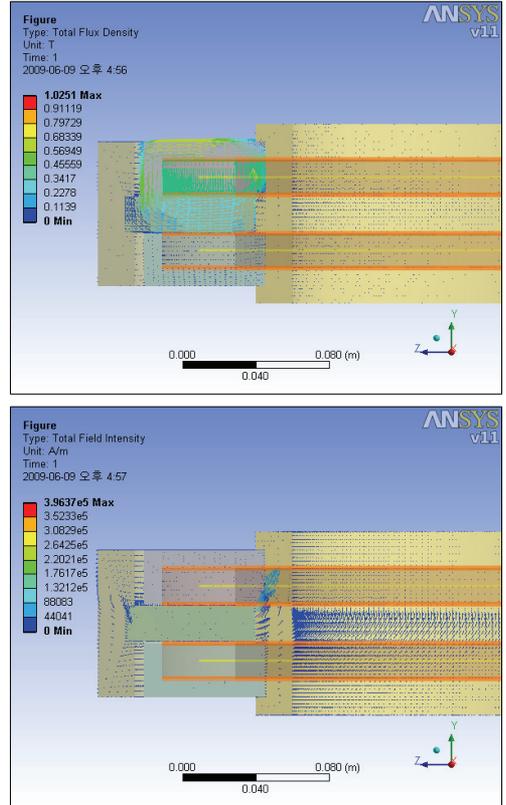


Fig. 5 FEM result: flux density and flux intensity

시정수에서는 약 33%의 오차를 보이는 것을 알 수 있다. 유한요소 해석을 수행할 경우, Fig. 5와 같이 다양한 방향에서 검토를 수행할 수 있는 장점이 있는 반면, 모델링 및 해석 시간에 많은 소요시간이 필요하다는 단점이 있다.

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

3.3 설계 최적화

3.1절에 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(Space_a, Space_b), 코일의 변호(coil AWG) 및 감는 수(coil turns), 코일에 흐르는 전류(current) 등을 선정하였다. 제한조건으로 설계사양 및 코일의 발열 등의 문제를 고려하여 Table 4에 표시한 바와 같이 3개의 조건식을 고려하였다. 일반적으로 코일은 직경이 클수록 많은 전류를 흐를 수 있으나, 과도한 전류가 흐를 경우 발열 문제로 인하여 장시간 사용할 경우 성능의 저하가 발생할 수 있어 제한조건에 포함시켰다. 중요 설계변수 중 겹(g)와 고정자/가동자의 폭(w)은 최적화 문제에서는 설계변수로 고려하지 않고 일정한 수치를 가정하였다. 또한 코일이 감기는 공간에

대한 중요변수는 포장계수는 0.7로 일정한 값을 고려하였다.

4. 제작 및 실험 결과

Fig. 6의 오른쪽 사진은 공기 마운트와 전자기식 작동기가 결합되어 있는 복합형 방진 마운트의 단품 모습이다. 공기 마운트에 공기를 주입하기 위한 주입장치와 압력계가 설치되어 있는 것을 확인할 수 있다. 전자기식 작동기에 전류를 공급하기 위해서는 주변장치가 필요하며, Fig. 6과 같은 주변장치를 구성하였다. 전자기식 작동기의 상·하단에 설치되어 있는 코일에 전류를 투입하면, 자기장이 발생하여 제어력이 생성된다. 코일에 전류를 투입하기 위해서는 전류공급장치(current driver)가 필요하며, 전류공급장치를 사용하기 위해서는 별도의 전원장치(power supply)가 필요하다. 또한 작동기의 응답 특성을 향상시키기 위해 오프셋(offset) 전압(Fig. 6에서는 3V로 표시되어 있음)을 투입하도록 구성하였다.

또한 코일에 전류를 투입하면, 전류의 부호(+, -)에 상관없이 항상 당기는 방향 즉 인력만이 발생하므로, 상단과 하단의 전류투입을 부호에 따라 변경할 수 있는 장치를 개발하였다. Fig. 7과 같은 신호분배장치를 개발하여 외부에서 제공되는 명령신호에 따라 전자기식 작동기의 제어력이 발생하도록 하였다. 오른쪽에 보이는 BNC 커넥터로 파형을 입력하면, 정위상의 파형과 역위상의 파형을 출력하게 된다(Fig. 8 참조). 또한 오프셋 전압의 크기를 조정하기 위해 조절단자를 설치하여 (0~5)V까지 조정이 가능하도록 하였다. 오프셋 전압과 신호분배장치의 출력파형들이 더해져 상·하단의 코일에 입력되는

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 ²
Design parameter	· Coil space · Coil AWG · Coil turns · Current

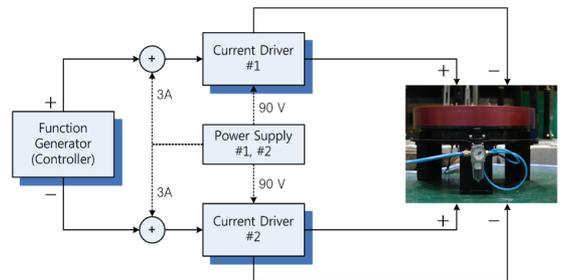


Fig. 6 System configuration for the hybrid mount

전압차가 발생하여 입력파형을 추종하는 제어력이 발생하게 된다.

방진 마운트의 동특성을 파악하기 위해 Fig. 9와 같은 실험장치를 구성하였다. 방진 마운트 단품에 대한 동특성 파악 실험은 공기 마운트의 상부질량 불균형에 의한 불안정성 문제로 인하여 많은 어려움이 있다. 따라서 전자기식 작동기에 의해 발생하는 제어력 특성만을 파악하기 위해 실험 지그를 사용하여 마운트 상·하면을 고정하였으며, 실험 지그와 마운트 사이에 3개의 로드 셀(load cell)을 설치하여 제어력을 계측하였다. 또한 코일에 투입되는 전류를 계측하기 위해 전류측정기를 사용하였다. 신호발생기를 이용하여 다양한 정현파를 공급하면서 전류의 양 및 제어력의 크기 등을 계측하였다.

신호발생기로부터 발생된 1V~5V의 정현파가 1V 간격으로 입력되었을 때, 로드 셀에서 계측된 제어력을 보여주고 있다. 이때의 오프셋 전압은 3V이다.



Fig. 7 Signal distributor for the hybrid mount

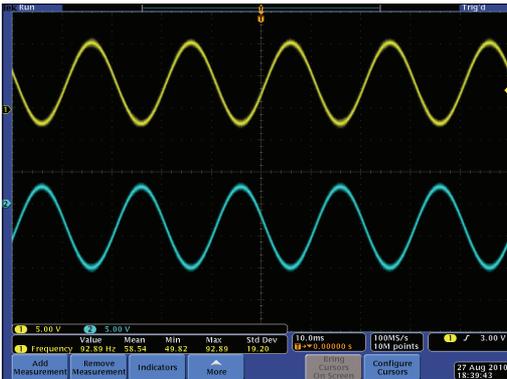


Fig. 8 Output signals from the signal distributor

입력 전압의 크기가 증가할수록 제어력이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 정현파의 주파수 변화에 따른 제어력의 변화는 없는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 입력전압과 제어력의 관계를 도식적으로 보여주고 있으며, 보는 바와 같이 선형성이 매우 강한 것을 알 수 있다. Fig. 11 내부의 식은 선형 근사화(fitting)하였을 때의 수식을 나타낸다. 신호발생기의 전압 변화에 따른 전류측정기에서 계측된

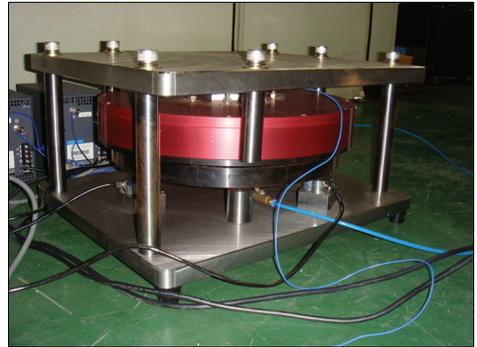


Fig. 9 Test setup for dynamic characteristics

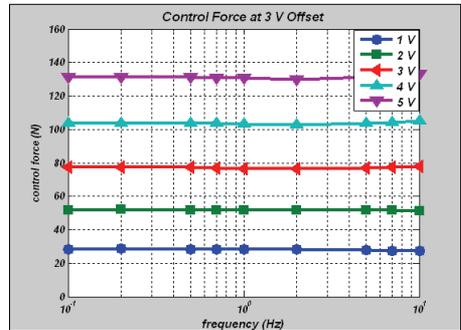


Fig. 10 Control force vs. input voltage

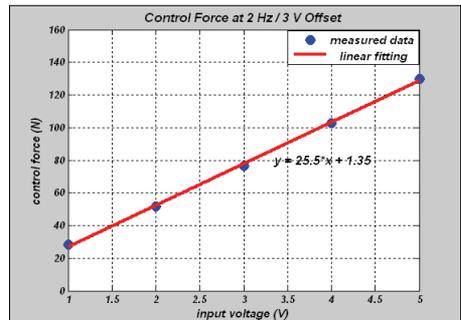


Fig. 11 Linear characteristics of the control force

전류를 도식화한 것이다. Fig. 10 및 Fig. 11에서 보면, 약 4 V 입력전압에서 약 100 N의 제어력이 생성되는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 실험을 통해 계측된 코일에 입력된 전압과 전류를 표시한 것이다. 위쪽 그림은 상단 코일, 아래쪽 그림은 하단 코일에 대한 실험 및 분석 결과이다. 상단과 하단의 코일에 대해 전압과 전류의 관계는 선형성이 강한 것을 확인할 수 있으나,

최대 7% 정도의 차이가 있는 것을 확인할 수 있다. 제작 과정에서 코일의 턴 수는 동일하지만, 사용된 코일의 길이가 상이함에 의해 저항의 차이가 발생한다. 이로 인해 코일 특성의 차이가 전압-전류 관계에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 이러한 오차는 제어력 파형에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이를 확인하기 위해 제어력 파형을 분석하여 보았다. Fig. 13에 보이는 바와 같이 제어력 파형의 크기가 변동하는 것을 확인할 수 있다. 이는 상·하단의 코일에서 발생하는 힘이 상이하기 때문이다. 추후 제어를 구성할 때, 이러한 전자기식 작동기의 동특성을 반드시 고려할 예정이다.

설계사양 2 A 전류는 Fig. 12로부터 약 6 V의 전압일 때 발생한다. 이때 발생하는 제어력은 Fig. 11의 선형 근사화 식으로부터 계산하면, 약 150 N으로 추정된다. 추정된 제어력과 Table 3의 자기저항 방법/유한요소해석방법으로 계산된 값을 비교하면 10% 이내의 오차를 확인할 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 고정밀을 요구하는 첨단 가공/생산설비의 통합 제진시스템에 필요한 복합형 전자기식 작동기를 개발하였다. 이를 위하여 먼저 설계절차를 정립하고, 정립된 절차에 따라 제작된 작동기에 대해 일련의 성능실험을 수행하였다. 이 연구에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 미진동 제어를 위해 자기 베어링 형태의 복합형 전자기식 작동기를 제안하였다. 설계 단계에서의 자기회로 설계를 간단하고 편리한 자기저항 방법을 통해 수행하였으며, 정확성을 검증하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 이 연구에서 사용된 자기저항 방법은 최적화 절차를 포함한 기본설계단계에서 효율적으로 적용할 수 있으나, 상세설계단계에서는 다양한 관점에서 결과를 검토하기 위해서는 유한요소해석이 필수적이다.

- 정립된 설계절차에 따라 설계된 전자기식 작동기의 성능실험을 통해 설계절차가 적절하게 정립되었음을 확인하였다. 자기 베어링 형태의 전자기식 작동기에 전류투입을 부호에 따라 변경할 수 있는 장치를 개발하였으며, 실험을 통해 적절히 작동함을 확인하였다.

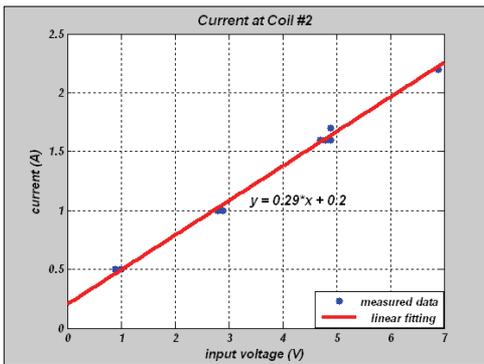
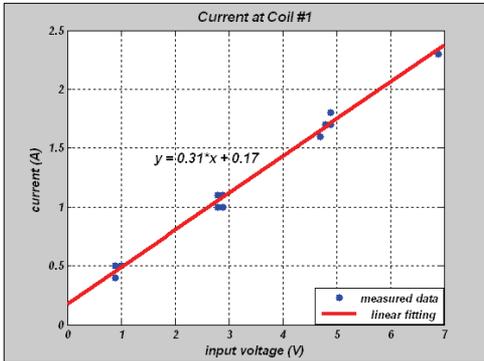


Fig. 12 Linear characteristics of the current

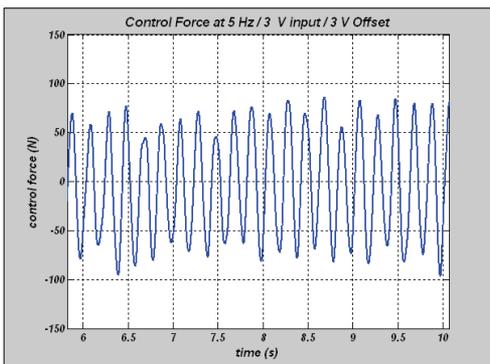


Fig. 13 Control force in the time domain

• 설계된 전자기식 작동기는 입력전압에 비례하여 제어력이 변화하고, 입력 주파수의 변화에는 무관함을 실험을 통해 확인하였으며, 이를 통해 설계가 적절하게 되었음을 증명하였다.

추후 2개 마운트가 1set 또는 4개 마운트가 1set으로 구성되는 마운트 시스템에 대한 연구를 통해 보다 확실한 방진효과를 확인할 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

이 논문의 내용은 중장기산업기술개발사업인 “첨단 정밀가공/생산설비의 다축 통합제진마운트 기술 개발”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) Moon, S. J., Jung, H. J., Shin, Y. H., Jang, D. D., Jeong, J. A. and Moon, Y. J., 2011, Development of a Hybrid Mount System Combined Airspring with Piezostack Actuator for Microvibration, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 56~65.

(7) 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

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

(9) 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.

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