

◆특집◆ 진동 제어 및 응용 기술

정밀기계 시스템의 진동제어 기술 현황

최승복\*, 한영민\*, 성금길\*

Vibration Control Technologies for Precision Machinery Systems

Seung-Bok Choi\*, Young-Min Han\* and Kum-Gil Sung\*

**Key Words** : Precision Machinery (정밀기계), Vibration Control (진동제어), Passive Control (수동 제어), Active Control (능동 제어), Semi-active Control (반능동 제어)

1. 서론

정밀도가 높고 오차의 범위가 극히 작은 기계를 총칭하여 정밀기계라고 한다. 여기에는 모양의 대소에 관계없이 대포와 같은 큰 것이라도 정밀도가 높은 것은 정밀기계에 포함되지만, 아날로그 시계와 같이 크기는 작아도 정밀도가 낮은 것은 정밀기계라고 할 수 없다. 이러한 정밀기계 시스템에 발생하는 다양한 진동은 정밀기계를 포함한 전체 시스템에 있어 성능저하뿐만 아니라 여러 가지 바람직하지 못한 상황을 발생시키게 된다. 예를 들어 계속되는 진동에 의하여 정밀기계 시스템 내의 특정 부품 등에서의 균열이 발생할 수 있으며, 비행기, 자동차 및 각종 기계장치에 사용되고 있는 전자부품들은 진동 또는 충격에 의하여 쉽게 파손될 수 있다.

정밀기계 시스템의 종류에는 로봇시스템, 정보저장기기, 공작기계, 반도체 장비, 전자현미경, 광학장비, 정밀 수술 장비 3 차원 측정기 등이 있다. Table 1 에 정밀기계의 진동허용기준 및 진동특성을 나타내었으며, Table 2 에 정밀 진동 허용치 분류를

나타내었다.<sup>1,2</sup>

주어진 진동에 대하여 시스템이 얼마나 잘 견딜 수 있는지, 즉 장치의 취약도(fragility level)는 국가기관과 국제표준화기구(ISO)에 의해 규정되어 있다. 군용으로 생산된 거의 모든 장치는 군사적 설계규격(MIL specs)을 충족시켜야 한다. 또한, 정부나 국제기구 외에도 특정 정밀기계 시스템에 대해서는 요구되는 진동 성능기준을 제조업체가 정하고 있다.

하지만 최근 정밀기계 산업이 점점 고도화 정밀화 됨에 따라 진동이 정밀기계 시스템의 성능과 안전성에 미치는 영향도 커지고 있다. 따라서 더욱 엄격해진 각종 진동 규격들을 맞추기 위해 시스템의 설계 최적화뿐만 아니라 에너지의 가감을 통해 시스템의 동적 응답을 직접 조정하는 여러가지 방법의 진동제어(vibration control)가 매우 효과적인 방법으로 이용되고 있다. 따라서 본 글에서는 최근 정밀기계 시스템에 적용되고 있는 진동제어 기술의 동향에 대해 기술하고자 한다. 이를 위해 먼저 각종 정밀기계 시스템에서 발생하는 동적 특성을 알아본 후, 여기에 적용될 수 있는 진동제어 기법을 수동, 반능동, 능동으로 구분하여 기술하고자 한다.

2. 정밀기계 시스템의 동적특성

2.1 로봇시스템

\* 인하대학교 기계공학부  
Tel. 032-860-7319, Fax. 032-868-1716  
E-mail : seungbok@inha.ac.kr  
지능재료(압전재료, 형상기억합금, ER 유체, MR 유체 등)를 이용하여 다양한 기계시스템의 진동제어, 정밀제어 등에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

Table 1 Vibration criteria and characteristics of precision machinery systems

ITEM	Descript	정도 및 분해능	진동장애특성	진도허용기준	비 고
TEM(투과형 현미경)		0.14nm 분해능 격자상	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 분해능의 저하</li> <li>- 상의 에지부의 불명확 및 교환</li> <li>- 장치의 유지, 보수비 증가</li> </ul>	0.1 ~ 1 um 0.2 gal 이하	음파에 기인하는 진동을 피하기 위해 음압이 70dB 이하 환경 필요
SEM(주사형 현미경)		1~5nm 분해능 2차 전자상			
3차원 측정기		수 nm-um 범위까지	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 측정 Data의 편차 상승</li> <li>- 측정 정도의 저하</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 10 Hz 이하진동 : 2ump-p 이하</li> <li>- 10Hz 이상진동 : 0.4 gal dlkg</li> </ul>	일본 3차원 측정기 회사들의 단체인 CMMA규정
반도체 전자 beam 노광장치 (aligner 및 stepper)		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1M DRAM : 선폭 1.2um</li> <li>- 4M DRAM : 선폭 sub-micro</li> <li>- Pattern 오차는 10um (4M기준)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 선 폭의 불확실 및 절단</li> <li>- 이미지의 불확실</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 대체적으로 범위 : 1~0.1um</li> <li>- 가속도 : 1~0.1gal</li> </ul>	Sub-micro 정도의 진동측정은 전문적인 측정인력 및 system이 필요.
실리콘 단결정성장 System			<ul style="list-style-type: none"> <li>- 불완전한 단결정 형성</li> <li>- Ingot에 crack 발생</li> </ul>	일반적으로 미진동 허용 수준은 범위 1~0.1um, 가속도 1~0.1gal로 예상	
표면 조도 시험기		1nm 이하	소형경량 접촉 Probe 진동에 민감 측정 정도		
광 Disk판 가공		수 nm 이하	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 인접 Line 사이 정도 저하</li> <li>- Disc 상하방향 Data 불확실</li> </ul>		
홀로그램 제작		수 nm 이하	상의 불선명		
초정밀 가공 부품 생산 System		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 통상정밀가공 오차 ±500nm</li> <li>- 초정밀 격자의 형상 오차 5~50nm</li> <li>- 비 구명 대형광학부품 CNC 가공 500nm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 가공 정도의 저하</li> <li>- 최대가공성능 발휘 불가</li> </ul>		

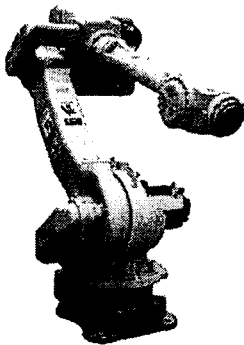


Fig. 1 Industrial robot

우주 혹은 원자력 산업과 같은 특수환경 및 생산 자동화와 관련하여 산업용 로봇의 수요가 지속적으로 증가하고 있으며, 이러한 산업용 로봇의 성능을 향상시키기 위하여 진동 및 소음의 저감은 반드시 해결하여야 할 중요한 문제로 대두되고 있다. 일반적으로 Fig. 1 과 같은 산업용 로봇에서 발생하는 진동 및 소음의 주요 원인은 내부 동력 전달계

를 구성하는 기어, 축, 베어링 등의 형상, 관성, 강성, 감쇠, 마찰, 가공공차, 조립공차 등 다양하다. 특히, 동력전달계 시스템에서 가장 문제 시 되는 진동은 각 부품의 강성 및 감쇠변화, 부품의 가공 오차, 조립오차 등에 의해 발생한 각 부품의 진동이 축과 베어링을 지나 하우징을 통해 전체 시스템에 전달되는 진동이다. 그러나, 지금까지 대부분의 연구는 부품을 모델링하고 강성 및 감쇠 등을 고려한 운동방정식을 유도하여, 진동 평가에 따른 강성, 감쇠 및 구조변경을 제시하는 연구에 국한되어 있다.<sup>3-5</sup> 그러나 산업용 로봇에서 발생하는 진동을 정확하게 평가하기 위해서는 각 부품뿐만 아니라 모터, 회전축의 어긋남에 의하여 발생하는 진동, 각종 브라켓의 공진, 축, 베어링, 하우징에 의한 다양한 영향 등을 고려하여야 한다.

## 2.2 정보저장기기

최초의 HDD(hard disk drive)는 1956 년 IBM 이 소개한 RAMAC 으로 자료의 기록밀도가 2KB/in<sup>2</sup>에

Table 2 Classification of precision vibration

Class	Descript	Facility equipment or use	Vibration criteria	
			4-8 Hz RMS Acc.	8-80 Hz RMS Vel
일반적인 진동환경	일반 작업장		4gal(변위 16 um)	800 um/s
	사무실		2gal(변위 8 um)	400 um/s
	거주지 및 computer system		1gal(변위 4 um)	200 um/s
	100배 정도 현미경, 로봇트 수술실, operators room, 일반 연구실, 기타		0.5gal(변위 2 um)	100 um/s
정밀진동 Class : A	400배 정도 현미경, 측정실 optical or other balance optical comparators 전자장비, 생산설비 등. * 검사, probe test, 생산지원설비 및 장치		0.25gal(변위 1 um)	50 um/s
정밀진동 Class : B	400배 이상 현미경, 정밀, 안과, 신경계 수술실, 방진설비를 갖춘 광학장비, 반도체 생산 설비 등. * 검사, probe test, 생산지원설비 및 장치		0.25gal(변위 0.5 um)	25 um/s
정밀진동 Class : C	30000배까지 전자현미경 magnetic resonance imagers, 반도체 생산설비 * Aliger stepper 등 1um 선폴 노광장치 : 1M DRAM 정도		0.06gal(변위 0.25 um)	12 um/s
정밀진동 Class : D	30000배까지 전자현미경 mass spectrometer 세포이식 장치, 반도체 생산설비 * Aliner stepper 등 1/2 um 선폴 노광장치 : 4M DRAM 정도		0.03gal(변위 0.12 um)	6 um/s
정밀진동 Class : F	Unisolated laser and optical research system * aligner stepper 등 1/4um 선폴 노광장치 : 64M DRAM 정도		0.015gal(변위 0.06 um)	3 um/s

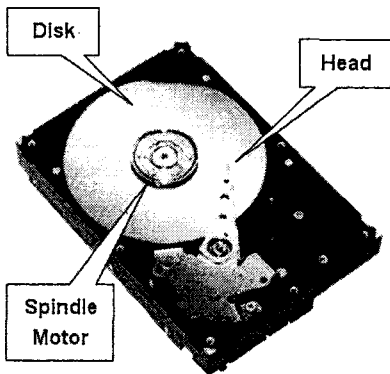


Fig. 2 Structure of HDD system

불과하였으나, 현재의 3.5inch HDD 의 경우 1250KB/mm<sup>2</sup> 이상의 밀도가 가능하다. 최근의 Blu-ray Disc 의 경우에는 2554KB/mm<sup>2</sup> 이상의 밀도가 가능하다. 이러한 고밀도 정보저장기기의 개발을 위해서는 스피들 모터, 디스크를 포함하는 스피들

시스템, 헤드 등의 진동 분석과 획기적인 진동 저감이 요구되는데, 이는 스피들 시스템의 진동이 디스크 상에서 헤드가 디스크 트랙위의 자료를 읽고 쓸 때 발생하는 오작동인 트랙비정렬(track misregistration)의 직접적인 원인이 되기 때문이다. 고밀도 정보저장기에서 자료를 읽고 쓰는 구조는 Fig. 2 에서와 같이 디스크의 트랙 위에 쓰여진 자료를 헤드가 읽는 형식으로 이루어진다. 이 때 가장 이상적인 경우는 Fig. 3 의 굵은 선으로 그려진 원과 같이 디스크의 회전 궤적이 정확히 진원을 이루는 경우라 하겠다. 하지만 실제의 경우 디스크의 회전은 스피들 모터의 진동 등의 원인에 의해 점선과 같이 왜곡된 모습을 그리게 되는데 이 때 발생하는 트랙과 헤드 사이의 위치의 차이를 런아웃(runout)이라 한다. 런아웃은 각 회전 때마다 반복되는 성분인 RRO(repeatable runout)와 반복되지 않는 성분인 NRRO(non-repeatable runout)으로 나뉘며, 따라서 TIR(total indicated runout)은 다음과 같이 표현된다.

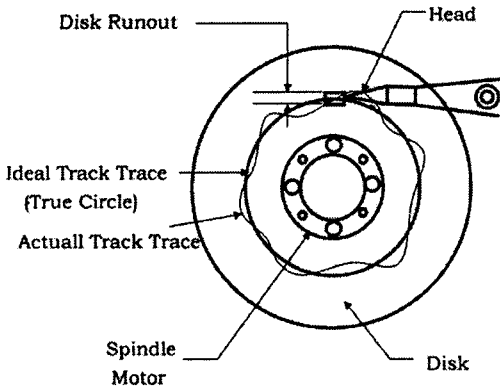


Fig. 3 Runout of information storage drive

$$TIR(t) = RRO(t) + NRRO(t)$$

이 중 RRO 는 서보 제어 시스템에 의해 어느 정도 보상할 수 있으나 NRRO 는 보상할 수 있는 방법이 없어 NRRO 가 어느 정도 이상으로 커지면, 헤드 가 트랙을 정상적으로 읽지 못하는 트랙비정렬이 발생하게 된다. 따라서, NRRO 는 디스크의 트랙 간의 간격을 제한하는 중요한 요소가 되면, 고밀도 정보저장기기 업계에서는 NRRO 를 트랙 간격의 약 5% 이내로 규제하고 있다. 최근 HDD 에 장착되는 3.5inch 디스크의 경우 약 25,000TPI(track per inch) 정도의 기록밀도를 가지고 있는데, 이 경우 트랙과 트랙 사이의 간격은 약 1 $\mu$ m 정도가 되고 NRRO 는 0.05  $\mu$ m 이하로 규제되고 있다. 일반적으로 NRRO 가 30% 감소되면, 트랙 간격도 30% 줄일 수 있어, 결과적으로 기록밀도와 저장용량을 43% 증가시킬 수 있다. 이와 같이 고밀도 저장장치의 스펀들 및 헤드에서 발생하는 진동의 측정, 해석, 저감 문제는 대용량화 되어가는 저장장치에 있어서 그 중요성이 증대되고 있다.<sup>6-8</sup> 또한 CD-ROM 을 비롯한 각종 광 관련 정보저장기기에서도 진동문제 해결이 시급한 과제로 대두되고 있다.

### 2.3 공작기계

공작기계는 산업발달과 더불어 첨단제품의 출현과 병행하여 꾸준히 성장하고 있는 기계공업에 있어서 핵심적인 기반기술이다. 공작기계에는 선반, 밀링, 연삭기를 비롯하여 CNC 공작기계 등 다양한 종류가 있으며, 모든 공작기계는 구동계,

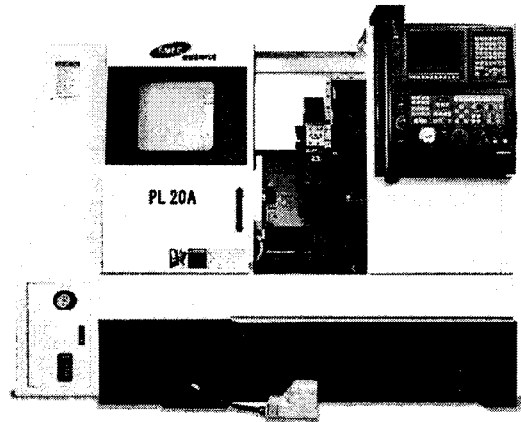


Fig. 4 Precision CNC Machine tools

이송계, 측정계, 공구계, 제어계 등으로 구성되어 있다. 일반적인 공작기계의 진동은 공구계의 회전체 부분에서 발생하며, 이러한 회전체의 비정상적인 진동 발생시 진동을 제어하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다.<sup>9-11</sup> 이러한 연구 중 수동 및 능동 제어기법을 이용하여 임계속도를 조절하거나, 시스템의 감쇠를 더하거나 또는 불평형 질량을 줄이는 방법 등이 일반적으로 사용된다. 수동 진동 제어는 설계단계에서 시스템의 임계속도를 예측하여 시스템의 동적계수(강성 및 감쇠)를 선정하거나 동흡진기를 추가함으로써 과도한 진동을 억제하는 방법인 반면, 능동 진동제어는 작동기, 센서, 제어기 등을 활용하여 진동 발생 시 능동적인 제어력을 발생시켜 시스템을 안정시키는 방법이다.

최근의 공작기계에 적용된 능동 진동제어기법은 주로 Fig. 4 와 같은 CNC 공작기계에 적용되고 있으며, 이는 진동이 주로 발생하는 회전체 부분에 자기베어링, 전자석 작동기 등을 채용하여 회전계의 진동을 억제하는 기법이다. 이러한 능동 작동기를 적용하여 고성능 CNC 공작기계를 개발하기 위해서는 주 기계요소, 서보 모터를 포함한 작동기 및 제어기법 등의 모든 분야에서 기술 향상을 동시에 요구한다. 일반적으로 CNC 공작기계의 서보부는 가공을 위한 기계부와 각 축 및 공구 그리고 공작물의 움직임을 제공하는 AC 모터, AC 모터 속도 제어용 서보팩, 그리고 서보팩을 통해 각 부분의 위치를 제어하고 그 외 전반적인 작업 수행과 사용자와의 인터페이스를 제공하는 NC 컨

트롤러로 구성된다. NC 컨트롤러에 사용되는 제어 알고리즘은 가공제품의 품질에 직접적인 영향을 주는 부분으로 실제가공에 쓰이는 여러 가지 파라미터를 결정하고 처리하게 된다. 최근에는 다양한 현대 제어기법, 마찰력 보상, 외란 보상, 학습기법 등을 NC 컨트롤러에 적용하여 고성능 CNC 공작 기계용 NC 컨트롤러가 개발되고 있는 추세이다.

## 2.4 반도체 장비

Fig. 5 와 같은 반도체 제조 및 검사장비 중에 정밀도가 요구되는 장비인 경우는 진동에 대한 해석과 분석 기술이 절대적으로 필요하다. 특히, 최근에는 반도체 산업은 집적도 증가를 위한 선풍의 미세화와 실리콘 웨이퍼의 대구경화에 의하여 12 인치(300mm) 웨이퍼를 이용한 공정에 빠르게 대처하기 위하여, 반도체 제조 및 검사장비를 개발하는 경우 진동에 대한 기술이 더욱 필요한 핵심기술로 대두되고 있다.<sup>12,13</sup>

반도체 제조를 위한 다양한 장비 중 실리콘 웨이퍼 폴리싱 장치의 경우 회전하는 테이블과 패드 및 회전하는 헤드 디스크로 구성되며, 이러한 폴리싱 가공에 있어서 웨이퍼의 표면 평탄도는 조도 연마 패드와 웨이퍼의 상대 속도와 압력분포, 슬러리의 유량 및 종류 등의 기계 및 화학적인 조건들에 영향을 받게 된다. 기계적인 조건에서 보았을 때, 웨이퍼 표면에서의 압력분포 균일성이 매우 중요하며, 동적인 특성으로는 회전 및 헤드 이송에 따른 진동이 영향을 줄 수 있다. 특히, 시스템의 고유진동 특성이나 구동부 및 주변장치에서의 가진 등에 의하여 과도한 진동이 발생할 경우, 표면 품질에도 영향을 줄 수 있어 장비개발을 위해서는 이러한 진동에 대한 영향을 검토할 필요가 있다.

반도체 검사를 위한 정밀검사장치는 일반적인 광학 검사장비 혹은 현미경과 구조는 유사하며, 장비에 고배율 렌즈를 적용하여 비접촉 3 차원으로 검사하는 장비가 가장 많이 사용되고 있다. 이러한 정밀장치를 정상운용하기 위한 가장 필수조건은 검사의 반복성이며, 이를 위하여 장비가 설치된 공장의 방진대책을 포함한 다양한 외부진동에 대한 대책이 필수적으로 요구된다. 따라서, 정밀검사장비의 특성상 외부진동에 대한 계측결과의 반복성 영향에 대한 규제가 엄격하며, 정상적인 검사를 위해서는 장비의 목적에 따라 다르나 일반적으로 여러 톱 10nm 이하의 범위를 만족하도록 제작 및

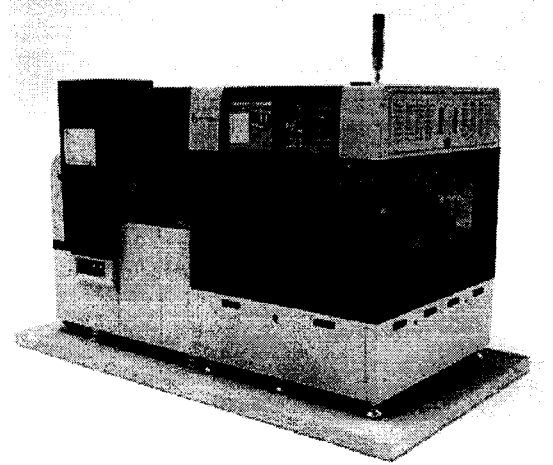


Fig. 5 Semiconductor equipment

설치된다. 또한 진동 허용 규제치의 경우 설치되는 장비의 주파수 대역의 동적 특성을 충분히 고려하여 장비의 정상운영 관점에서 통상인 규제치를 설정하고 관리되어야 한다.

## 3. 수동 진동제어

진동하는 모든 물체는 내부의 응력, 마찰, 크랙 발생, 소성 변형 등으로 인해 에너지를 소산시킨다. 즉, 에너지 소산 용량이 클수록 진동 변위는 작아진다. 그러나 대부분의 시스템은 임계 감쇠의 1% 정도의 매우 작은 감쇠 특성을 가지므로 작은 외부하중에도 진동 변위는 커질 수 있다. 그러므로, 에너지 소산 용량을 키우기 위하여 감쇠 및 탄성을 증가시키기 위한 장치를 시스템에 부착하게 되는데, 이를 댐퍼라 한다. 이러한 방식은 다양한 외란에 대하여 시스템에서 발생하는 진동응답을 줄여주기 위하여 댐퍼의 에너지 소산기능에 의하여 시스템의 진동에너지를 흡수, 소산시킴으로써 시스템의 진동을 줄여주는 수동방식이 가장 일반적이다.

유체의 점성마찰에 의한 진동에너지 흡수원리의 점성유체댐퍼, 금속의 소성변형에 의한 에너지 흡수원리의 금속댐퍼(metallic damper), 고체마찰을 이용한 마찰댐퍼(friction damper), 또는 고무와 실리콘 등의 점탄성 재료의 변형에 따른 에너지 흡수성질을 이용한 점탄성댐퍼(viscoelastic damper), 주시스템의 진동에너지를 주시스템의 고유진동수

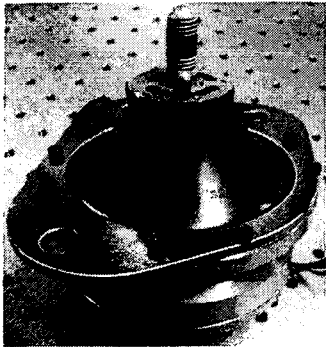


Fig. 6 Passive engine mount

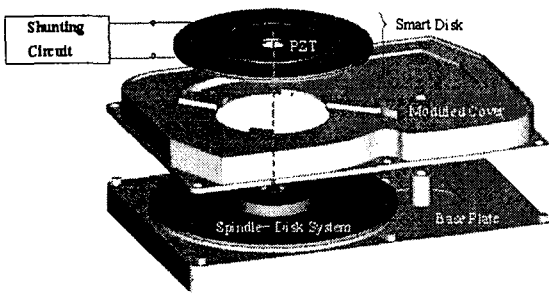


Fig. 7 HDD using piezoelectric shunt

에 동조된 질량체(moving mass)의 운동에너지의 변환원리에 의한 동조질량댐퍼(tuned mass damper) 또는 동조액체댐퍼(tuned liquid damper)등 다양한 에너지흡수 및 소산원리에 따른 수동방식의 댐퍼가 사용되고 있다.

이러한 수동 진동제어의 대표적인 예는 Fig. 6 과 같이 자동차 엔진의 진동을 차체와 절연시키기 위하여 고무를 이용한 엔진마운트, Fig. 7 과 같이 압전센트를 이용한 HDD 등이 있다. 이 중 압전센트를 이용한 HDD는 지능재료(smart material) 중 하나인 압전재료(piezoelectric material)를 이용하여 진동절연을 수행 하는 것이다. 압전재료는 시스템의 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환 및 소산시킬 수 있는 능력을 가지고 있다. 즉, 개회로 상태에서의 압전재료는 외부로부터 전달되는 기계적 에너지를 전극표면에 전기적 에너지 형태로 저장한다. 그리고 축적된 전기에너지 중 일부가 압전재료의 양단에 연결된 션트회로를 거쳐 저항을 통하여 열에너지로 소산되게 된다. 이를 이용한 압전션트 댐핑(shunt damping)은 기존의 댐핑기구에 비하여 댐핑특성 조절이 용이하므로 HDD의 구조변경

에 능동적으로 대처가능하며, 능동진동 제어에 비하여 에너지 소모가 적으므로 휴대용 HDD와 CD-ROM의 진동절연에 매우 유용한 장점이 있다.<sup>15-17</sup>

#### 4. 능동 진동제어

수동방식은 시스템의 진동을 줄여주는 안정된 성능을 기대할 수 있으나, 시스템에 작용하는 동하중 및 시스템의 진동특성에 따라서 효과적으로 댐퍼의 특성이 조절될 수 없으므로, 다양한 동하중의 특성에 따른 댐퍼로서의 대응력에 한계를 지니고 있다. 반면에, 능동제어는 시스템의 진동 응답에 따라 외부에서 작동기에 의해 능동적으로 제어력을 공급하여 시스템의 진동을 제어하는 방법으로 시스템 자체가 예측하기 힘든 진동성분에 대하여 지능적으로 대처하기 때문에 수동제어보다 큰 효과를 얻을 수 있으며, 최근에 이러한 능동제어에 관한 연구와 개발이 활발이 이루어져 실제 시스템에 적용되는 사례가 증가하고 있다. 이는 시스템에 작용하는 동하중에 따른 시스템의 진동 응답을 효과적으로 제어하기 위하여, 센서를 이용하여 시스템의 진동을 상시 측정하고, 측정된 진동오차를 줄일 수 있도록 제어기를 통하여 제어출력을 계산하고, 작동기를 통하여 외부에너지를 시스템에 적극적으로 작용시키는 능동방식이 도입되었다.

능동방식은 시스템의 진동을 제어하기 위한 완전한 제어시스템으로 구성되며, 센서, 제어기 및 작동기 등의 제어요소를 필요로 한다. 이러한 방식은 시스템에 작용하는 동하중에 따라서 효과적으로 진동제어가 가능한 반면, 제어시스템의 안정성 및 경제성 측면에서 문제점을 가지고 있다. 능동제어 시스템은 작동기의 외부에너지를 활용하기 때문에 장비 및 에너지의 비용이 높아진다. 또한, 오랜기간 동안 장치의 성능을 유지하기 위하여 신뢰성을 확보하기 위한 유지가 필수적이다.

이러한 능동 진동제어는 모터, 서보밸브, 압전재료, 형상기억합금등의 작동기 및 다양한 알고리즘을 적용한 방식이며, 대표적인 예는 서보모터 제어 시스템, 서보유압 제어 시스템 등이 있으며, 최근에는 정밀기계 시스템의 진동제어를 위하여 Fig. 8 과 같이 압전재료를 이용한 능동 마운트 시스템 등이 개발되고 있다.

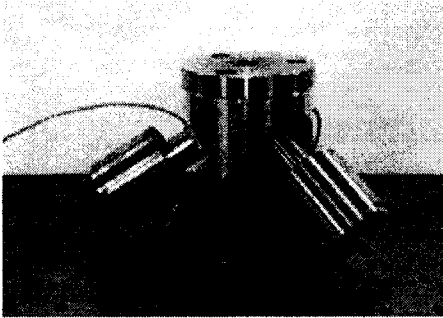


Fig. 8 3-axes active mount system using piezoelectric

압전재료를 이용한 능동마운트 시스템은 기존의 능동형 마운트가 1 축만 고려함으로 인해서 다양한 방향으로 들어오는 외란을 제어하는데 한계를 가지고 있는 것을 개선하기 위한 것이다. 그림과 같이 3 축 능동 마운트는 정하중의 지지와 비공진 주파수 영역에서의 진동 절연효과를 얻기 위한 탄성 고무 재료와 3 축 방향의 외란을 제어할 수 있는 관성형 압전 작동기 그리고 이 두 요소를 결합하는 조인트로 구성되어 있다. 3 축 능동 마운트 시스템은 기존 능동형 마운트에 비해 빠른 응답성, 간결한 디자인, 낮은 소비전력 등의 장점을 가지고 있다.<sup>18</sup> 이러한 3 축 능동 마운트 시스템은 공작기계, 반도체장비 등 진동원인이 복잡하며, 여러 축의 진동을 제어하는데 매우 유용하게 적용될 수 있다.

형상기억합금을 이용한 정보저장기기 서스펜션은 기존의 HDD 에서 발생하는 서스펜션과 스펀들 시스템 간의 충돌 및 마찰 현상 등의 스펀들-디스크 시스템의 원치 않는 진동 모드들을 제거하여, 슬라이더의 부상 상태를 안정하게 하고 헤드의 오프-트랙(off-track)을 방지하여 드라이브의 서보 성능을 향상시키기 위한 연구도 진행되고 있다.<sup>19</sup> 형상기억합금 작동기를 이용한 서스펜션은 자체의 L/UL(load/unload) 기능으로 디스크 저장면적의 손실을 방지할 수 있는 장점이 있다. 또한, 드라이브의 구동 및 정지 시, 형상기억합금 작동기에 인가되는 제어 전류에 의하여 슬라이더의 위치를 제어함으로써 드라이브의 전 구동 영역에서 비접촉 시동 및 정지 모드 드라이브를 구성할 수 있는 추가적인 장점이 있다.

능동 진동제어에서 제어 대상의 동특성과 연계된 제어기의 설계가 매우 중요하다. 특히 시스템의

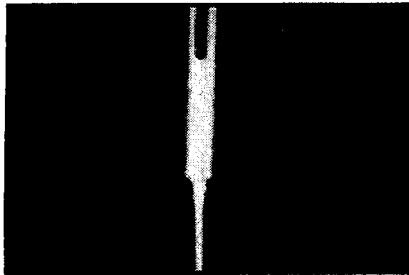
반응시간은 작동기, 센서, 앰프(드라이브) 등과 연계되어 있기 때문에 제어조직의 단순성과 용이성을 반드시 고려해야 하고 외부에서 들어오는 외란이나 충격에 강건한 제어알고리즘 구축도 반드시 고려해야 한다. 현재 능동 진동제어에 많이 사용되고 있는 제어 알고리즘으로는 on-off 제어기, PID 제어기, fuzzy 제어기, adaptive 제어기 등이 있다.

## 5. 반능동 진동제어

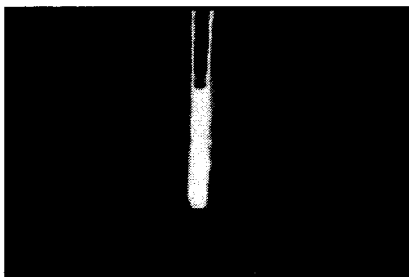
반능동(semi-active) 진동제어 시스템은 장치의 강성이나 감쇠를 시스템의 진동에 맞추어 변화시키는 방법으로 외부에너지는 장치의 상태변화에만 사용되고 시스템의 에너지 흡수자체는 수동 진동제어와 같은 메커니즘으로 행해진다. 이러한 방식에 의한 시스템의 진동제어는 기존 수동방식의 다양한 동하중에 대한 대응력 부족의 성능적 한계와 능동 방식의 외부에너지 소비문제를 해결하기 위한 방식으로서, 최근 들어 세계적으로 활발한 연구가 이루어지고 있다.

이러한 반능동 진동제어의 대표적인 예는 ER 유체 및 MR 유체를 적용한 장치를 작동기로 사용한 시스템이다. ER 유체는 1947 년 미국의 윈슬로(Winslow)가 광물성 오일과 미세한 고체 입자를 혼합하여 만든 유체이며, 부하되는 전기장에 의하여 항복응력과 가점성이 변화되고 그 반응은 매우 빠르고 전기장 부하에 대하여 가역적인 반응을 나타내며, 부하되는 전기장의 크기에 따라 연속적이고 국부적으로 제어할 수 있는 특징을 나타내는 유체이다. Fig. 9(a)는 전기장을 부하하지 않은 경우 액체 상태를 보여주고 있고, Fig. 9(b)는 전기장을 부하한 경우 고체 상태로 변화된 ER 유체를 보여주고 있다. 이러한 특징은 전기장만을 유체에 부하하면 부가적인 장치 없이 응용장치 설계에 단순화를 가져올 수 있다. 또한 상변화에 요구되는 전기장은 높지만, 전류는 매우 낮으므로 소비 전력이 낮은 장점을 갖고 있다. MR 유체는 ER 유체와 유사한 유체이나, 전기장 대신 자기장을 제어하는 것에 의하여 상변화가 가능한 유체이다.

최근에 개발되고 있는 반능동 진동제어의 대표적인 예는 Fig. 10 과 같이 자동차 주행 시 타이어와 차체사이의 진동을 절연하기 위한 속업소버에 ER 유체를 적용한 ER 속 업소버, Fig. 11



(a) without electric field



(b) with electric field

Fig. 9 Characteristics of ER fluid

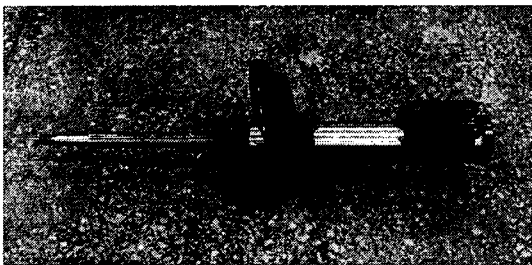


Fig. 10 ER shock absorber

과 같이 원격 수술 등에 사용될 수 있는 의료용 ER 햅틱장치 등이 있다. ER 속 업소버는 차량의 승차감 및 조정 안정성에 가장 중요한 현가장치에 사용되는 가장 중요한 부품이다. 일반적인 수동형 속 업소버는 가격이 저렴하고 구조가 단순하다. 그러나 노면의 외란에 대하여 절연범위가 제한되어 있다. 따라서 속 업소버에 능동적인 제어개념을 갖는 능동 혹은 반능동 속 업소버의 개발이 이루어지고 있다. 하지만 능동 속 업소버는 외부 동력원을 이용하여 필요로 하는 제어력을 속 업소버에 입력하는 것으로 제어 성능은 뛰어나지만 외부의 큰 동력원을 필요로 하므로, 에너지

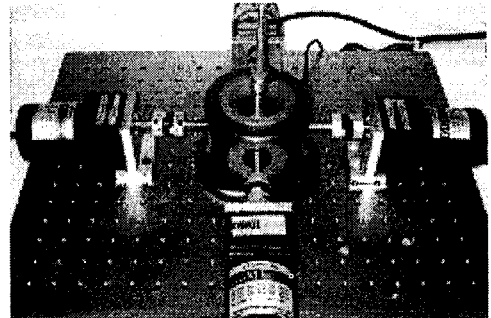


Fig. 11 Medical ER haptic system

소비가 크고, 장치가 복잡하며 성능에 비하여 가격이 고가이다. 최근에 연구 및 상용화가 되고 있는 ER 속 업소버는 노면의 진동으로 움직이는 피스톤에 의해 ER 유체가 원형 duct 를 통해 이동을 하게 되고, 이곳에 전기장을 인가해줌으로써 댐핑력을 제어할 수 있게 된다. ER 유체는 전기장 강도를 조절함에 따라서 빠르고 연속적인 항복응력을 발생시킬 수 있으므로 기존의 댐퍼에 비해 뛰어난 성능을 발휘할 수 있는 것이다.<sup>20-22</sup> 최근에는 ER 속 업소버와 기본적으로 같은 구조를 가지며 차체와 운전석 사이의 진동절연에 적합한 감쇠력을 제어할 수 있어, 승차감을 향상시키는데 중요한 역할을 하는 ER 시트댐퍼 연구도 활발히 진행되고 있다.<sup>23,24</sup>

현재 서보 모터로 구동되는 의료용 햅틱장치의 작은 진동문제(chattering 등)를 해결하기 위해 ER 유체를 이용한 반능동 햅틱 시스템에 대한 연구가 시도되고 있다. 이 시스템은 간단한 구조로 3 자유도 회전운동과 능동 및 반능동 힘반향을 구현할 수 있다. 즉, 뼈와 같은 단단한 장기에서 수동적으로 발생하는 힘과 스스로 맥동하는 심장과 같은 장기에서 발생하는 능동적인 힘을 표현할 수 있다. 그리고 백래쉬(backlash)가 없고 작은 마찰과 중량으로 인해 장기와 비접촉하는 상황을 정확하게 표현함으로써 정밀기계의 하나인 의료용 햅틱 장치의 다양한 요구조건에 부합할 수 있다. 또한, ER 유체의 유변학적 특성은 인체 장기의 점탄성적인 촉감을 구현하는데 있어 매우 유리하다. 따라서 의료용 장비에 ER 유체의 적용은 기존에 불가능했던 인체장기의 매끈한 표면 형상과 그 점탄성적인 질감을 표현함에 있어 최적이라 할 수



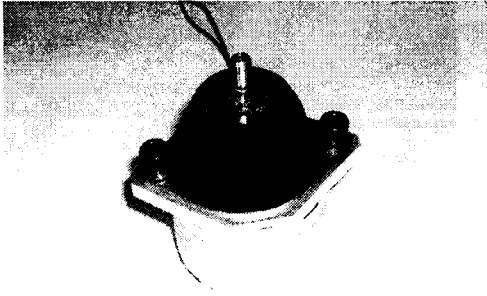


Fig. 12 Hybrid mount using rubber and MR fluid

있다.<sup>25,26</sup> 한편 최근에 연구되고 있는 복합(hybrid) 진동제어 시스템은 수동 진동제어 방식과 능동(혹은 반능동) 진동제어 방식을 병행한 것이다. 수동 방식을 기본으로 별도의 진동제어 방식을 결합함으로써, 수동방식의 문제점을 해결하고 다른 방식을 추가적으로 상호 결합한 형태로서, 비교적 적은 외부에너지를 사용하여 시스템에서 발생하는 진동 응답을 효과적으로 제어할 수 있는 방법으로 알려져 있다. 복합 진동제어가 적용된 실례는 자동차 엔진마운트 중 고무에 유체가 봉입된 타입이다. 엔진의 구동에 의해 발생하는 진동과 소음은 가진 진폭이 큰 저주파수 영역과 가진 진폭이 작은 고주파수 영역으로 구분할 수 있다. 고주파수 영역의 가진과 비교하여 상대적으로 가진 진폭이 큰 30Hz 이하의 저주파수 영역의 가진은 차체로 전달되는 충격력이 크기 때문에 승차감에 큰 영향을 준다. 그러므로 승차감 향상을 위하여 저주파수 영역의 진동은 우선적으로 절연되어야 한다. 또한 높은 엔진의 회전속도에 의해 발생하는 30Hz 이상의 고주파수 영역의 가진은 진폭과 충격력이 작아 주로 소음문제를 유발시킨다. 이와 같이 엔진마운트의 성능요구조건은 가진 주파수에 따라 변하게 된다. 저주파수 영역에서는 엔진의 가진 변위와 충격력이 크고 엔진과 엔진마운트로 구성되는 시스템의 공진이 존재한다. 따라서, 엔진의 급격한 움직임을 제한하기 위하여 큰 강성이 필요하고 차체로 전달되는 충격력을 줄이기 위하여 큰 감쇠력이 필요하다. 반면에 가진 변위와 충격력이 작은 고주파 영역에서는 보다 작은 강성과 감쇠력이 필요하다. 고무 엔진마운트는 고주파 영역의 진동 절연에는 효

과적이거나, 강성과 감쇠력이 거의 일정하기 때문에 저주파수 영역에서의 성능요구조건을 만족하지 못한다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 유체 봉입형 기존 점성 엔진마운트가 개발 및 적용되었다. 최근에는 유체 대신에 ER 유체 혹은 MR 유체를 적용한 마운트(Fig. 12) 및 압전재료를 적용한 마운트가 개발되고 있으며, 이는 복합형 진동제어 기법을 적용한 최근의 실례이다.<sup>27-29</sup> 이러한 복합 마운트 시스템은 로봇, 반도체장비, 정밀 공작기계 등의 동특성과 연계하여 최적설계가 가능하기 때문에 진동제어 성능 면에서 최적의 효과가 기대된다.

## 6. 맺음말

본 글에서는 정밀기계 시스템의 정의 및 종류에 대하여 살펴보고, 이러한 정밀기계 시스템을 대표하는 로봇시스템, 정보저장기기, 공작기계 및 반도체장비의 동특동성에 대하여 고찰하였다. 또한 정밀기계 시스템에 적용되고 있는 수동, 능동, 반능동 및 복합 진동제어에 대하여 살펴보고, 이를 시스템에 적용한 다양한 사례를 고찰하였다. 기존의 진동제어 연구는 주로 강성 혹은 댐퍼의 변경에 의하여 제품의 특성에 따라 설계를 변경하거나, 시스템의 구조 및 설계를 변경하여 공진을 회피하는 기술이 주를 이루었다. 그러나 최근의 정밀기계 시스템은 이러한 한계를 넘는 상당한 수준의 정밀도를 요구하고 있으므로, 능동, 반능동, 복합 진동제어 기법을 시스템에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 기법은 작동기 및 제어알고리즘의 개발이 선행되어야 할 뿐만 아니라, 기본적인 기계장치의 안정성이 필수적이므로 이러한 특성을 고려하여 시스템에 적합한 진동제어 기법을 선택하고, 요구하는 성능에 적합하도록 장비를 운용하는 것이 중요하다. 향후 산업의 발달과 더불어 보다 진보된 능동, 반능동, 복합 진동제어 기술이 개발되고, 따라서 이러한 진동제어 기술을 적용한 정밀기계 시스템의 보다 많은 실용화가 예상되고 있다.

## 참고문헌

1. Lee, H. K. and Lee, G. S., "Control Techniques Micro-Vibration for Sensitive Mechanical

- Equipment," Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, Vol.1998, No.1, pp.175-181, 1991.
2. Ungar, E. E., Sturz, D. H. and Amick, C. H., "Vibration Control Design of High Technology Facilities," Sound and Vibration, Vol.24, No.7, pp. 20-27, 1990.
  3. Özgüven, H. N. and Houser, D. R., "Mathematical Models Used in Gear Dynamics-A Review," Journal of Sound and Vibration, Vol. 121, No. 3, pp. 383-411, 1988.
  4. Park, C. I. and Lee, J. M., "A Study on the Vibration Characteristics of Helical Gears with Tooth Errors," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers (A), Vol.20, No.5, pp.1534-1542, 1996.
  5. Park, C. I. and Lee, J. M., "Vibration Transmission Characteristics of Helical Gear System with Lead Error," ASME International Mechanical Engineering Congress, pp.109-116, 1996.
  6. Jang, G. H., Kim, D. K. and Oh, J. E., "New Frequency Domain Method of Nonrepeatable Runout Measurement in a Hard Disk Drive Spindle Motor," IEEE Trans. Magn., Vol. 35, No. 2, pp. 833-838, 1999.
  7. Park, K. S., Chun, J. I., Lee, Y. H., Park, N. C., Yang, H. S. and Park, Y. P., "Improvement of Loading/Unloading Performance Using Control Input Position and Considering Disk Vibration Characteristics," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, No. 2, pp. 819-824, 2005.
  8. Lim, S. C., Park, Y. P., Park, N. C. and Choi, S. B., "Design of HDD Load/Unload Suspension Using Shape Memory Alloy," Transactions of the Society of Information Storage Systems, Vol. 2, No.1, pp.71-78, 2005.
  9. Kim, J. S., Park, J. K. and Lim, E. Y., "Stability of the active vibration control system for the magnetic bearing-main spindle of a machine tool," Proceedings of the KSME Spring Annual Meeting A, pp.200-205, 1999.
  10. Yoon, M. C., Cho, H. D., Kim, S. K. and Cho, H. G., "A Study on the Modeling and Analysis of Chatter in Turning Operation," Trans. of the KSMTE, Vol.10, No. 4, pp. 76-83, 2001.
  11. Chung, E. S. and Hwang, J., "A Study on the Evaluation of Stability for Chatter Vibration by Micro Positioning Control in Turning Process," Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol.13, No.5, pp.49-54, 2004.
  12. Fukuroda, A., Nakamura, K. and Arimoto, Y., "In situ CMP Monitoring Technique for Multi-layer Interconnection," IEDM95, pp.469-472, 1995.
  13. Kim, S. Y., "Understanding parameters for Chemical Mechanical Polishing Process," Journal of KIEEME, Vol. 12, No. 10, pp. 9-18, 1995.
  14. Rim, K. W., Lee, E. K. and Cho, J. K., "Vibration Analysis of Spin Etcher," Journal of the Korean Society of Semiconductor Equipment Technology, Vol.2, No.2, pp.15-19, 2003.
  15. Lim, S. C. and Choi, S. B., "Vibration Control of an HDD Disk-Spindle System Utilizing Piezoelectric Bimorph Shunt Damping : I. Dynamic Analysis and Modeling of Shunted Drive," Smart Materials and Structures, Vol.16, No.3, pp.891-900, 2007.
  16. Lim, S. C. and Choi, S. B., "Vibration Control of an HDD Disk-Spindle System Utilizing Piezoelectric Bimorph Shunt Damping : II. Optimal Design and Shunt Damping Implementation," Smart Materials and Structures, Vol. 16, No. 3, pp. 901-908, 2007.
  17. Choi, S. B., Kim, H. S. and Park, J. S., "Multi-Mode Vibration Reduction of a CD-ROM Drive Base Using a Piezoelectric Shunt Circuit," Journal of Sound and Vibration, Vol. 300, No. 1-2, pp. 160-175, 2007.
  18. Kim, J. W. and Choi, S. B., "Design of 3 Axis Active Mount System Using Piezoelectric Actuators," Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp.283-286, 2004.
  19. Lim, S. C., Park, J. S., Choi, S. B. and Park, Y. P., "Non-Contact Start/Stop Motion Control of HDD Suspension Using Shape Memory Alloy Actuators," Smart Materials & Structures, Vol. 10, No. 5, pp. 1069-1077, 2001.
  20. Han, S. S. and Choi, S. B., "Control Performance of an Electrorheological Suspension System Considering Actuator Time Constant," International Journal of Vehicle Design, Vol. 29, No. 3, pp. 226-242, 2002.
  21. Kim, J. W., Cho, Y. H., Choi, H. J., Lee, H. G. and Choi, S. B., "Electrorheological Semi-Active

- Damper : Polyaniline Based ER System,” Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 13, No. 7/8, pp. 509-513, 2002.
22. Sung, K. G., Han, Y. M., Cho, J. W. and Choi, S. B., “Vibration Control of Vehicle ER Suspension System Using Fuzzy Moving Sliding Mode Controller,” Journal of Sound and Vibration, Vol. 311, No. 3-5, pp. 1004-1019, 2008.
  23. Choi, S. B., Choi, J. H., Lee, Y. S. and Han, M. S., “Vibration Control of an ER Seat Suspension for a Commercial Vehicle,” ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 125, No. 1, pp. 60-68, 2003.
  24. Han, Y. M., Jung, J. Y., Choi, S. B., Choi, Y. T. and Wereley, N. M., “Ride Quality Investigation of an Electrorheological Seat Suspension to Minimize Human-Body Vibrations,” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers : Part D - Journal of Automobile Engineering, Vol. 220, No. 2, pp.139-150, 2006.
  25. Han, Y. M. and Choi, S. B., “Force-Feedback Control of a Spherical Haptic Device Featuring an Electrorheological Fluid,” Smart Materials and Structures, Vol. 15, No. 5, pp. 1438-1446, 2006.
  26. Han, Y. M., Kang, P. S., Sung, K. G. and Choi, S. B., “Force Feedback Control of a Haptic Master Using an Electrorheological Fluid,” Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 18, No. 12, pp.1149-1154, 2007.
  27. Hong, S. R. and Choi, S. B., “Vibration Control of a Structural System Using Magneto-rheological Fluid Mount,” Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 16, No. 11-12, pp. 931-936, 2005.
  28. Hong, S. R., Choi, S. B. and Lee, D. Y., “Comparison of Vibration Control Performance between Flow and Squeeze Mode ER Mounts: Experimental Work,” Journal of Sound and Vibration, Vol. 291, No. 3-5, pp. 740-748, 2006.
  29. Yook, J. Y., Choi, S. B., Sung, K. G. and Moon, S. J., “Design of Hybrid Mount Using Rubber Element and Piezoelectric Actuator with Application to Vibration Control,” Transaction of the Korea Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.17, No.5, pp.391-397, 2007.