

◆특집◆ 스마트 재료의 응용

스마트 재료를 이용한 정보저장기기

최승복*, 임수철**

Information Storage Devices Using Smart Materials

Seung-Bok Choi*, Soo-Cheol Lim**

Key Words : Smart Materials and Structures(스마트 재료 및 구조물), Information Storage Devices(정보저장기기), Hard Disk Drive(하드 디스크 드라이브), Optical Disk Drive(광 디스크 드라이브),

1. 서론

21 세기 산업은 정보통신, 신소재, 우주 및 항공 산업, 생명공학 등에서 큰 기술적 발전을 이룰 것으로 기대되며 우리나라 또한 이들 산업을 국가 경쟁력을 제고하는데 필수적인 산업으로 선정하여 이에 대한 관심이 고조되고 있다. 이들 분야는 과거에는 독립적인 하나의 연구분야로서 존재하였으나, 현재는 서로의 기술이 점목 되면서 상호보완적인 관계를 통하여 기술발전의 극대화를 꾀하고 있으며, 이 같은 현상은 점점 더 가속화될 것이다. 기계분야에서도 이와 같은 현상이 두드러지며, 반도체의 회로선 공정기술을 이용한 MEMS (microelectro mechanical system), 전기 및 전자기술을 이용한 메카트로닉스 등이 이 분야에 속하는 대표적 기술이라 할 수 있다. 또한 신소재들의 출현과 더불어 컴퓨터 및 각종 설계 프로그램의 발달로 인하여 기계산업은 과거 전통적인 제조 산업에서 벗어나 앞으로의 현대 산업 발전에 계속적으로 공헌할 첨단 산업으로 변화해 갈 것이다. 이와 같은 타 산업분야와의 연계를 통하여 얻을 수 있

는 여러 가지 이득 중 대표적인 것이 각종 구조물 및 시스템의 경량화, 소형화, 성능의 극대화 등을 들 수 있다. 그러나 구조물이 경량화, 소형화됨에 따라 내부의 하중 조건 변화 혹은 외부의 환경 조건 변화 등에 매우 민감하며, 구조물과 연계된 시스템의 사용 조건에 따라서 갑작스런 파괴를 초래할 수 있다. 이러한 단점을 혁신적으로 개선하고자 미국을 비롯한 선진국에서는 최첨단 기술의 하나로 스마트 재료 및 구조물(smart materials and structures; SMS)에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. SMS 시스템은 기존의 재료 및 구조물이 보유하고 있는 근육계(muscle system)에 감지하고 생각할 수 있는 신경계(nerve system) 및 두뇌계(brain system)를 제공하여 형성하게 되며, 결국 시스템 자체가 센싱, 액츄에이팅, 제어, 학습, 계산 등의 능력을 보유하게 됨으로써 성능의 극대화, 유지비용의 최소화, 그리고 적응 능력을 갖도록 하게 한다[1]. 스마트 재료는 크게 구조물 혹은 시스템과 연계되어 작동기 및 센서로써 사용된다. 작동기로서의 역할은 전기장 또는 자기장, 온도, 등에 반응하여 구조물의 형상, 강성, 공진주파수, 댐핑, 마찰 등의 기계적 특성을 변화시켜 외부환경 변화로부터 구조물과 시스템이 적응할 수 있는 능력을 제공하는 것이다. 또한 센서로서의 역할은 구조물의 외부 혹은 내부에 부착 및 삽입되어 구조물의 여러 가지 상태변수를 피드백 함으로써 구조물의 피해감소, 진동 감쇠 등 일련의 지능 제어과정들에

* 인하대학교 기계공학과
Tel. 032-860-7319, Fax. 032-868-1716
Email seunghok@inha.ac.kr
스마트 재료를 이용한 구조물 및 정밀 시스템 제어에 관심을 두고 연구하고 있다.
** 인하대학교 기계공학과 대학원

필요한 정확한 정보를 제공하게 된다. 현재 일반적으로 연구되고 있는 스마트 재료로서는 전기유변(electrorheological; ER)유체와 자기유변(magneto rheological; MR)유체, 형상기억합금(shape memory ally; SMA), 압전재료(piezoelectric material), 자성재료(magnetostrictive material), 광섬유(optical fiber) 그리고 전기작동폴리머(electroactive polymer; EAP) 등이 있다[2].

ER 유체와 MR 유체는 각각 전기장과 자기장에 반응하여 유동학적 성질(점성, 가소성, 탄성)의 가역변화를 나타낸다. 이러한 유체들은 용질로서 마이크로미터 크기의 입자들과 용매로서 특정한 오일로 구성되며 부하되는 전기장과 자기장에 반응하여 유체의 가점성을 현저히 증가시킨다. 이 유체들은 에너지 발생 및 저장 없이 작동되므로 각종 절연 시스템 설계의 단순화와 제어의 용이성을 피할 수 있다. SMA 는 스마트 재료 중 실용화가 많이 이루어진 재료의 하나이다. SMA 가 타 금속에 비하여 가공성이 현저히 떨어짐에도 불구하고 현재 지름 0.038mm 의 Ni-Ti 계 와이어가 몇몇 기업에서 생산되고 있으며, 50 μm 이하의 매우 얇은 판재형태도 연구실 차원에서 만들어지고 있다. SMA 는 마르텐사이트 상변화에 의하여 자기형상을 기억하여 다시 되돌아 가려는 특성을 나타낸다. SMA 는 상변화온도 이상의 열을 가하면 최대 8%의 변형이 발생하며 일반적으로 5% 변형 안에서 작동기로 주로 사용된다. 상변화 온도는 합금의 구성에 따라 달라지게 되며, 높은 전기적 저항을 갖는 형상기억합금에 전류를 가함으로써 상변화에 필요한 열을 발생시킬 수 있게 된다. SMA 작동기는 큰 모멘트와 변위를 제어할 수 있으며, 소음이 적고 구동부가 간단하여 작동기 자체의 무게를 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 작동기 자체의 상변화에 의해 구동되므로 마찰이나 이에 수반되는 윤활, 실링 등에 대한 문제가 없다. 따라서 재래의 구동 방식으로는 극히 좁은 공간에서의 사용이 불가능하고, 경량화하기 어려운 유연구조물의 유해한 진동 제어, 바이오 공학, 우주항공분야에 매우 적합하다고 할 수 있다.

압전재료는 부하되는 전압에 반응하여 기계적 힘을 발생시키거나 혹은 부하되는 압력으로부터 전압을 발생시킨다. 전압에 의한 압전재료의 힘 발생은 재료 내부의 전기적 쌍극자(dipole)들이 전장과 나란한 방향으로 정렬 되어 결정 구조가 변

하기 때문이며, 압전 세라믹의 경우 적층된 구조에서 최대 200~300 μm 의 변형이 가능하다. 압전 재료는 작은 변형을 발생시키지만 어떤 구조물에 구속되게 되면 빠른 응답속도를 갖고 부하되는 전압에 비례하여 큰 힘을 발생시키게 된다. 압전 작동기는 이미 많은 산업 분야에 적용되고 있다. 고주파를 이용한 세척기, 미소위치 이동을 위한 선형 모터 및 고주파 모터(ultrasonic motor), 잉크젯 프린터, 수중음파 탐지용 소나(sonar) 등이 그 예이다. 압전재료는 또한 스마트 재료 시스템에서 센서로서의 폭 넓은 용도를 제공해 준다. 압전 세라믹의 취성으로 인해, PVDF(polyvinylidene fluoride)같은 압전 폴리머가 센싱하는데 주로 사용된다. PVDF 는 매우 얇은(100~200 μm 두께) 필름 형태로 만들어져서 여러가지 형태의 표면에 붙여질 수 있으며 주로 유연 로봇 응용장치의 용도로 사용될 수 있다. 자성재료는 압전재료와 유사하나 전기장 대신 자기장에 반응하는 재료로서 1840년 Joule 에 의해 니켈에서 최초로 발견되었다. 자성체 내부의 자기영역들이 자기장 안에 위치하였을 때 자기장과 정렬될 때까지 회전하게 되어 재료의 팽창을 발생시키게 된다. 지구상에서 희귀한 요소인 테르븀(terbium)을 포함한 터페놀-디(Terfenol-D)는 자기장과의 정렬작용에 의해 1,400 μm 이상의 팽창이 가능하다. 따라서 저주파수-고출력 수중음파 탐지 변환기, 큰 힘을 내는 선형모터 및 높은 토크와 낮은 회전 속도를 갖는 모터, 그리고 유압 작동기 등에 사용될 수 있다. 터페놀-디는 현재 능동 진동 감쇠시스템의 사용을 위해 활발히 연구되고 있다.

1979년 NASA Langley 연구센터에서는 유연 구조물의 상태 감지기능을 부여하기 위하여 광섬유를 최초로 사용하였다. 이런 초기 연구에 광섬유는 저온도 복합재료의 변형률을 측정하는데 사용되었다. 이후 항공기를 비롯하여 토목 구조물과 같은 대형 구조물에 사용되어 온 비파괴 검사 방법을 대신하여, 사용중인 구조물의 안전 진단, 피해 검색 및 평가 그리고 복합적인 보수 감독의 용도로써 매우 유용하다. 특히 매우 넓은 영역에서 집적된 감지 가능성을 갖고 있으며, 유해한 환경에 대한 저항성과 전기적 혹은 자기적 외란에 강건한 특성은 광섬유 센서의 여러 가지 장점들 중의 하나이다. EAP 는 전기장에 의해 작동되는 것과 이온에 의해 작동되는 것으로 대별되며 전기장

에 의한 것은 압전, 전왜, 강유전성의 재료로 나눌 수 있다. 이온화에 의한 것은 전기장이 가해졌을 때 폴리머 내부에 이온의 편류가 발생하여 변형이 발생하는 것으로 폴리머 젤과 이온 박막이 있다. EAP 는 그 동안 종류가 적고 제한된 가진 능력 때문에 다른 스마트 재료에 비하여 상대적으로 적은 관심을 받아왔다. 그러나, 최근 들어 큰 변위를 낼 수 있는 EAP 가 개발되면서 관심을 끌게 되었는데, 이는 탄력이나 손상에 대하여 유연성을 가지고 있어 생물의 근육과 유사한 작동성을 갖고 있기 때문이다. EAP 의 응용 예로서는 최근에 먼지떨이 와이퍼(dust wiper), 소형 로봇 팔, 그리퍼 등이 있으며 MEMS 기술과 연계되어 초소형 곤충과 같은 운동체를 만드는 연구는 미래의 유망한 기술로서 관심을 불러일으키고 있다[3].

본 글에서는 스마트 재료의 여러 응용 분야 중 정보통신 기술과 연계되어 활발히 진행되고 있는 정보저장기기(information storage devices) 개발에 대하여 국내외 연구 동향을 소개하고자 한다.

2. HDD 응용

HDD(hard disk drive)는 주요 관련 기술의 발달과 더불어 데이터 저장밀도의 고밀도화 추세에 따라 경이적인 발전을 거듭해 오고 있으며, 최근 들어 저장밀도는 매년 100%의 증가를 보이고 있다. 이에 따라 저장밀도의 한계로 평가되어 오던 40 Gb/in² 을 넘어서고 있으며 몇 년 안에 100 Gb/in² 의 HDD 가 출시될 것으로 예상된다. HDD 관련 기술은 기계, 전기, 재료 등 여러 분야가 유기적으로 연관되어 있으나 다음과 같이 몇 가지로 요약할 수 있다.

- Dynamic Analysis of HAS and Disk
 - Suspension analysis
 - L/UL mechanism
 - Vibration and TMR of disk
- Servo Design
 - Precision position control
 - Dual state actuator control
- Slider and Microtribology
 - Head/disk interface
 - Contamination problem
- Aerodynamic and Heat Transfer
 - Spindle with fluid bearing

· ABS design

• Disk Media and Signal Processing

이러한 연구 분야 주에서 스마트 재료의 응용이 활발하게 연구되고 있는 기술은 이중구동 작동기(dual-stage actuator)와 L/UL(load/unload) 관련 기술이다. 이중구동 작동기의 동작은 1 차 구동기(VCM)가 주로 트랙 탐색(track seeking) 제어를 담당하고 2 차 구동기(마이크로 구동기)는 주로 트랙 추종(track following)제어를 담당하게 하여 전체 서보 시스템의 대역폭을 증가시켜 정밀한 트랙 추종 제어를 이루고자 하는 것이다. 예를 들어 2002 년경에 트랙 밀도가 약 100,000TPI 로 예상되며, 이때 TMR(track misregistration)은 약 0.03 μm 로서 헤드 트랙 센터로부터 0.03 μm 범위 내에 위치시켜야 하는 요구 조건이 부과된다. 2 차 구동기는 구동 위치에 따라 서스펜션 구동형, 슬라이더 구동형, 헤드 구동형이 있으며, 구동력에 따라 압전형(piezoelectric), 정전기형(electrostatic), 전자기형(electromagnetic)으로 나눌 수 있다. 이중구동 작동기에 대한 연구는 1990 년대 초부터 진행되어 왔으며, 특히 압전재료를 이용한 마이크로 작동기는 상용화에 가장 용이한 방식으로 인식되어, 다양한 형태의 압전형 2 차 구동기가 제시되어 왔다. Fig. 1 은 1991 년 일본 Hitachi 사가 발표한 서스펜션으로서 적층(stack) 형태의 압전세라믹을 사용하였다. 1990 년 대 말에 이르러서는 Hutchinson (Fig. 2)사, Fujitsu (Fig. 3)사, IBM(Fig. 4)사 등이 경쟁적으로 이중 구동 방식의 서스펜션을 발표하였으며 이미 상용화 단계에 이른 상태이다. 국내에서는 1990 년 중반 이후부터 본격적으로 연구가 수행되어 여러 사례가 발표되었다. Fig. 5 는 기존의 로드 빔을 채널 구조로 설계하여 횡 방향의 공진 주파수를 최대한 높임으로써 이중구동 작동기가 2kHz 이상의

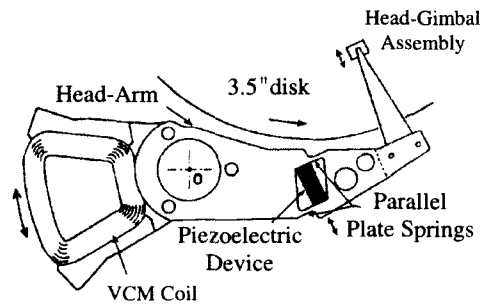


Fig. 1 Multilayer PZT-driven dual-actuator (Hitachi, 1991)

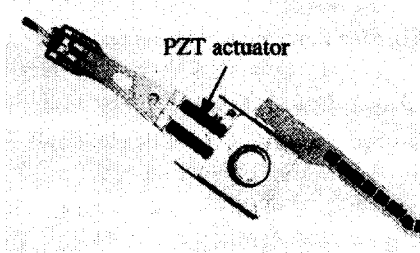


Fig. 2 Suspension with PZT actuators (Hutchinson, 1998)

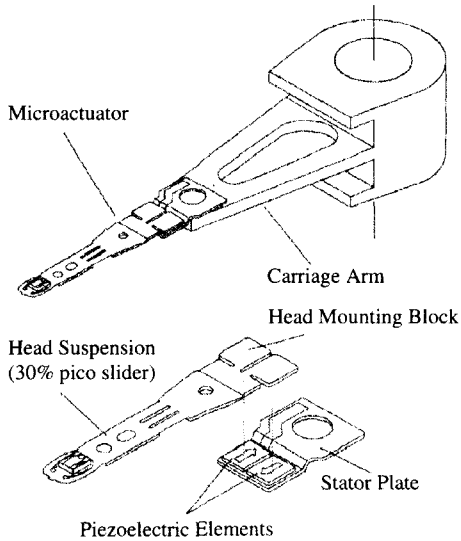


Fig. 3 Dual-stage actuator using shear mode PZT (Fujitsu, 1998)

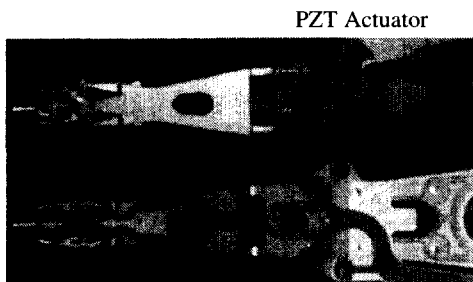


Fig. 4 Piezo-based milliactuator (IBM, 2001)

대역폭을 가지도록 하였다[4]. 이러한 2 차 구동기는 모두 서스펜션 구동형으로서 제작이 용이하고 기존의 슬라이더와 헤드를 그대로 사용할 수 있으나, 서스펜션에서 발생하는 진동을 제어할 수 없

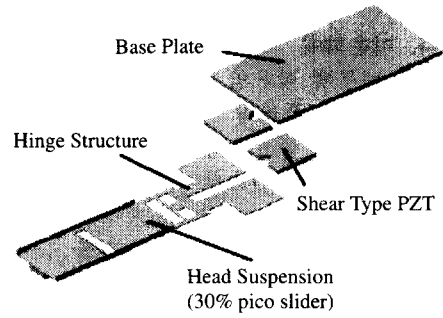


Fig. 5 Shear Mode Piezoelectric milliactuator

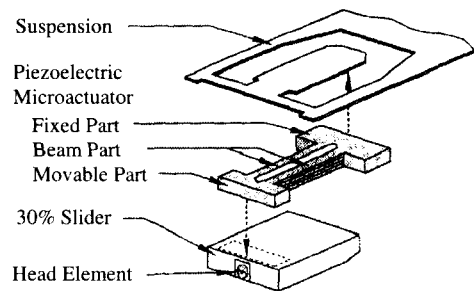


Fig. 6 Piezoelectric piggyback microactuator (TDK, 1999)

으므로 서스펜션의 공진 주파수에 의해 2 차 구동기의 서보 대역폭이 제한을 받게 된다. 이와 반대로 슬라이더 구동형 작동기(Fig. 6)는 작동기에 의해 서스펜션에 가해지는 가진을 최대한 억제할 수 있고 VCM 과 동적 커플링이 거의 없으며 구동 주파수 대역이 가장 높아 이상적인 이중 구동 방식이라 할 수 있다. 그러나 헤드와의 전기적, 자기적 간섭 문제, 슬라이더의 부상 특성 변화, 디스크와의 충격에 대한 취약성, 제조 공정상의 여러 난점 등 해결되어야 할 문제점들을 내포하고 있다. 향후 이중구동 작동기는 일단 제조가 간단한 서스펜션 구동형이 먼저 실용화가 될 것으로 기대되며, 트랙 밀도가 증가함에 따라 슬라이더 구동형, 헤드 구동형으로 추세가 옮겨갈 것으로 예상된다.

HDD 의 저장밀도 증가에 의한 트랙 제어와 더불어 하나의 큰 이슈가 되고 있는 것이 HDI (head/disk interface)이다. HDD 의 기록 밀도를 증가시키기 위해서는 디스크 표면의 조도를 향상시켜 슬라이더의 부상 높이를 최대한 낮추어야 한다. 현재 슬라이더의 부상 높이는 25nm 이하로 디스크

표면의 최대 거칠기 높이와 거의 같은 수준까지 도달하였다. 이에 따라 드라이브 내에 존재하는 오염입자들에 의한 HDI의 불안정한 요소 발생과 기존 CSS(contact start/stop) 형태를 취하는 드라이브에서 슬라이더와 디스크의 마찰 및 흡착에 의한 문제가 드라이브의 신뢰성 및 내구성을 향상시키는데 해결되어야 할 시급한 문제가 되어 왔다. 최근 들어 랜딩 존(landing zone)의 형상을 임의로 조절하여 슬라이더와 디스크의 흡착 문제의 해결 방안으로 제시된 것이 laser texturing 기술이며, 나아가 슬라이더와 디스크의 접촉을 원천적으로 방지하여 Non-CSS(non-contact start/stop)의 드라이브를 구현하고자 하는 것이 L/UL 기술이다. L/UL에 대한 연구는 1980년대 말부터 시작되었듯이 슬라이더와 디스크간의 마찰을 억제하여 오염물질 발생을 최소화하고 흡착현상을 방지할 수 있는 기술로

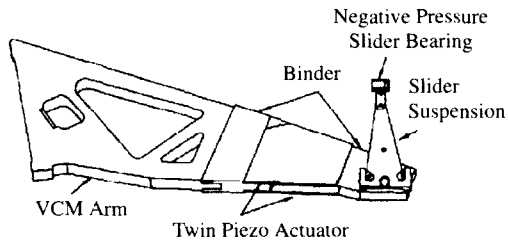


Fig. 7 Self-loading flying head slider (NEC, 1989)

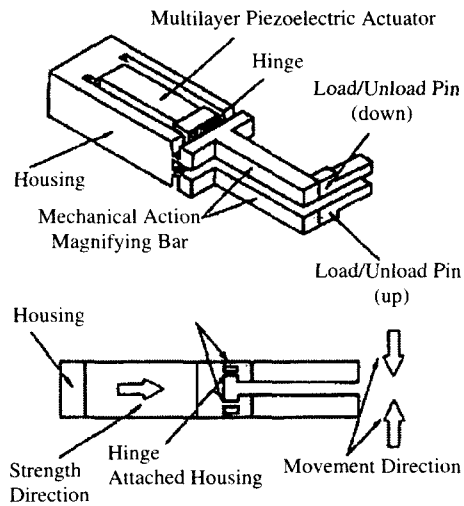


Fig. 8 L/UL mechanism using multilayer PZT (NEC, 1991)

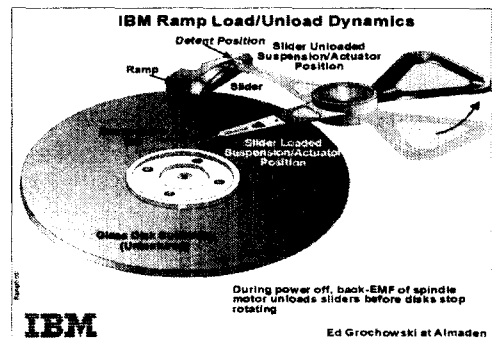


Fig. 9 Ramp L/UL mechanism

써 인식되어 왔다. 1989년 Tagawa 등[5]은 한 쌍의 압전 세라믹을 이용한 self-loading 슬라이더를 제안하고 8 인치 드라이브에 적용하여 실험을 수행하였다. Fig. 7 과 같이 VCM 과 서스펜션을 압전 세라믹으로 연결하고, 드라이브 구동 시 압전 세라믹에 의해서 슬라이더는 초기 위치에서 디스크 표면 위의 특정한 위치까지 이동하고, 이후 공기 흐름에 의해 부압(negative) 슬라이더에 발생하는 부압에 의하여 설계된 부상 높이를 가지도록 이동된다. 또한 1991년 Kajitani 등[7]은 다층 압전 세라믹을 이용하여 Tagawa 와 같은 개념의 L/UL 메커니즘을 제안하였다(Fig. 8). 3-1/2 인치 드라이브에 적용하기 위해서 전체 시스템의 크기를 줄일 필요가 있으므로 변위 확대 기구를 사용하여 큰 변위가 발생하도록 하였다. 이러한 초기의 L/UL 메커니즘은 압전재료를 사용함으로써 작동부가 간단하여 L/UL 구현이 용이하였으나, 높은 제어 전압의 지속적 인가, L/UL 충분한 변위 발생을 위한 변위 확대구조를 필요로 한다는 단점이 있어 지속적 연구가 이루어지지 못하였다. 또 하나의 L/UL의 후보로서 연구된 것이 ramp 기구를 이용한 방식이다. Fig. 9 는 ramp L/UL 의 기본 개념을 나타낸 것으로서 1990년 대 초부터 Berkeley Univ.와 IBM 사를 중심으로 꾸준히 연구되어 왔다. Ramp L/UL 메커니즘에 대해서는 이미 많은 연구가 축적되어 있다고 할 수 있으며 현재 일부 드라이브에 적용되고 있다. 국내에서도 ramp L/UL 에 대한 연구를 진행하여 왔으나 독자적인 L/UL 에 대한 기술 획득이 쉽지 않은 실정이다. 이러한 관점에서 SMA 작동기를 이용한 새로운 형태의 L/UL 메커니즘이 제안되었다[5]. 드라이브 구동 및 정지시, SMA 작동기는 인가되는 제어 전류에 의해 슬라이더의 위치를

제어함으로써 Non-CSS 드라이브를 실현한다. Fig. 10 은 SMA 작동기가 기존의 서스펜션에 장착되어 있는 구성도와 L/UL 실험을 위해 실제 드라이브에 장착된 사진이다. 제어 전류가 인가되면 SMA 는 마르텐사이트상에서 오스테나이트상 조직으로 변태되면서 회복력을 발생하고 로드 빔의 클램프 부

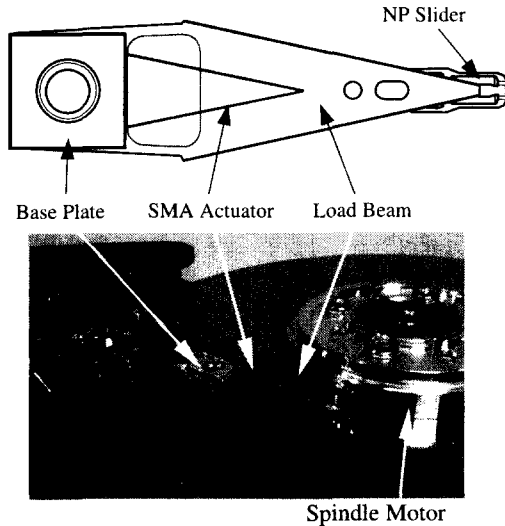


Fig. 10 L/UL suspension using SMA actuator

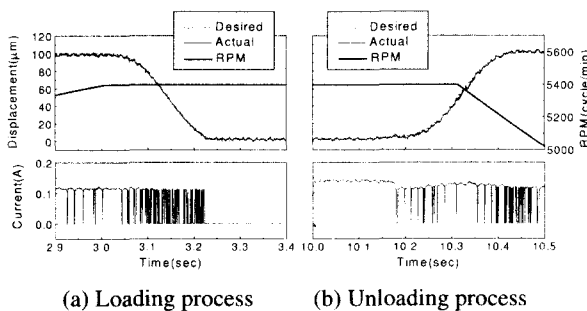


Fig. 11 Control responses for the desired L/UL profiles

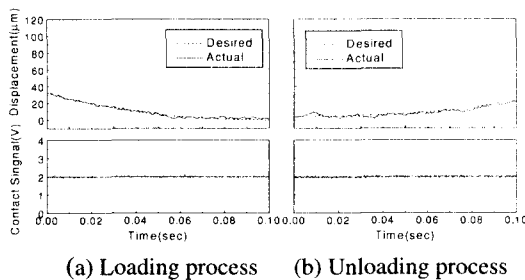


Fig. 12 Control responses and contact signals near the disk surface for the desired L/UL profiles

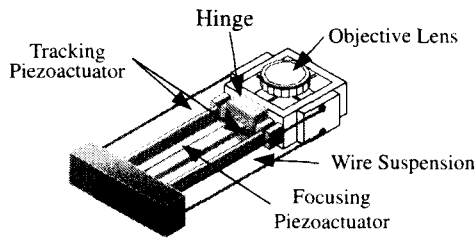
분에 모멘트를 가하여 슬라이더를 디스크 표면과 수직방향으로 운동시킨다. 이미 정해진 슬라이더의 초기 위치와 슬라이더의 L/UL profile 추종은 인가 전류를 제어함으로써 원활히 수행된다. 제어를 위한 시스템 모델링은 2 차 시스템으로 표현된 서스펜션과 1 차 시스템의 SMA 작동기 모델로부터 3 차의 전체 시스템을 구성할 수 있다[7]. SMA 작동기는 외부 온도에 민감하므로 디스크 회전 시 발생하는 공기 유동이나 사용시간에 따른 드라이브 내의 온도변화는 제어 시 외란이나 혹은 불확실성으로 작용하며, 이를 고려한 제어를 설계해야 한다. 또한 L/UL 시 슬라이더와 디스크의 충돌 유무는 전기저항회로(electrical resistance circuit)에 의해 검출된다. AE 센서를 이용할 경우에는 센서 신호가 슬라이더/디스크 충돌신호뿐만 아니라 슬라이더의 ringing 주파수 성분이나, 딴플 점(dimple point)과 로드 빔 사이에서 발생하는 마찰에 의한 신호 성분, 혹은 피봇 베어링에서 검출되는 신호등을 포함하고 있으므로 AE 센서 신호에 대한 부수적인 신호처리가 필요하다. 그러나 전기저항회로에서 검출되는 신호는 슬라이더/디스크 충돌 시 발생하는 전압 차이를 측정하므로 효과적으로 슬라이더/디스크 충돌여부를 확인할 수 있다. Fig. 11 은 요구 L/UL 형상에 대한 슬라이더의 위치 추적 제어 실험결과를 나타낸 것이다[7]. 디스크 표면으로부터 슬라이더의 최대 부상 높이는 스핀들 회전에 의한 디스크의 진동과 공기 흐름과 같은 외란에 의한 슬라이더와 디스크의 충돌을 방지할 수 있도록 100 µm 로 설정된다. 또한 드라이브 구동 시, 디스크의 회전 속도가 5,400rpm 에 도달하면서 슬라이더의 loading 과정이 완료되며, 드라이브 정지 시 unloading 과정에 의해 슬라이더가 충분한 높이를 가질 때 디스크의 회전이 감소함을 알 수 있다. Fig. 12 는 디스크 근처에서 슬라이더의 위치추적 제어와 이때의 슬라이더/디스크 충돌 신호를 나타낸 것이다. 결과로부터 알 수 있듯이 슬라이더와 디스크 간의 충돌신호가 검출되지 않았다. 따라서 SMA 작동기와 연계된 서스펜션이 기존의 드라이브에 적용되어 Non-CSS 드라이브를 구현함을 알 수 있다

3. ODD 응용

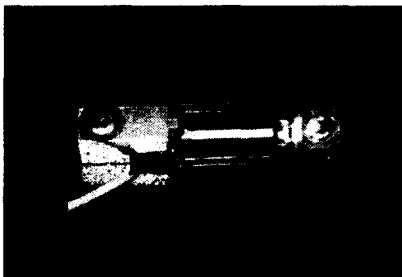
ODD(optical disk drive)는 대표적인 광 저장장

치로 음성, 영상 및 데이터 정보 등 소위 멀티미디어 정보들을 저장(기록)하거나 재생(검색)하는데 있어서 광 레이저 기술을 이용하는 장치이다. ODD 저장매체는 용량과 특성, 기능, 시장 출시 시기에 따라 크게 CD 계열(1 세대), DVD 계열(2 세대), HD DVD(3 세대)계열로 나눌 수 있다. CD 는 이미 시장 성숙단계에 이르렀으며 DVD 계열은 지난 1996 년 시장에 첫 출시되었으나 표준화 및 지원 소프트웨어의 지연으로 인하여 시장형성이 예상보다 늦어지고 있다. 또한 HD DVD 는 아직 시제품 정도만 출시되어 있는 상황이다[8]. ODD 관련 기술은 데이터의 저장 및 재생 등에서 HDD 와 구별되나 대부분의 기술이 매우 유사한 특징을 가진다 특히, 미국의 TeraStor 가 1999 년 NAB'99 (National Association of Broadcasters)에서 발표한 근접장 기록방식(NFR; near-field recording) 기술은 HDD 의 ABS 를 이용하여 기존 광 디스크 헤드보다 훨씬 가까운 범위(약 150nm)에서 정보의 재생 및 기록을 수행된다. 또한 기존의 DC 모터와 자기 코일에 의한 트랙 제어를 HDD 와 같이 VCM 의 이용도 고려되고 있다.

ODD 에 대한 스마트 재료의 응용 연구 목적은 미디어의 고밀도, 고배속화에 적합한 높은 대역폭을 가지는 서보를 설계하는 것이 주요 목적이라



(a) schematic diagram

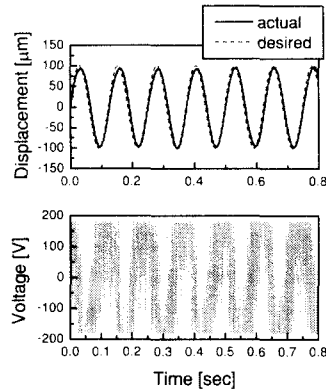


(b) photograph

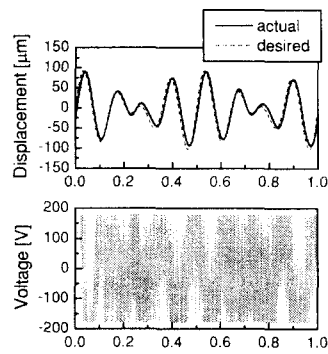
Fig. 13 Piezoactuator-driven optical pick-up

할 수 있으며, 이와 더불어 구조를 단순화시켜 소형화, 경량화가 가능한 드라이브를 제공하는 것이라 할 수 있다. 국내에서는 1997 년 연세 대학교에 정보저장기기센터(ERC)가 설립되면서 이에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며 특히, 압전 재료를 이용한 트랙 및 포커싱 제어용 작동기에 집중되어 왔다. 이것은 압전 재료의 빠른 응답속도, 미소변위 발생 등의 장점 때문이라 할 수 있다.

Fig. 13 은 Choi 등[9]이 제안한 압전 세라믹을 이용한 광 픽업 장치의 구성도이다. 광 픽업 장치의 포커싱과 트랙킹 추적 제어를 위하여 각 방향으로 독립적으로 변위를 발생시킬 수 있도록 압전 작동기를 장착하였다. 포커싱용 압전 작동기는 렌즈의 tilting 현상 없이 $\pm 100\mu\text{m}$ 의 변위를 발생시킬 수 있도록 하였으며 이것은 4 개의 와이어 서스펜션, 힌지 연결구, 그리고 바이모프(bimorph) 압전 세라믹에 의해서 구현된다. Fig. 14 는 실제 측



(a) $100\sin(2\times\pi\times 8\times\text{time}) [\mu\text{m}]$



(b) $50\sin(2\times\pi\times 2\times\text{time})+50\sin(2\times\pi\times 5\times\text{time}) [\mu\text{m}]$

Fig. 14 Measured responses

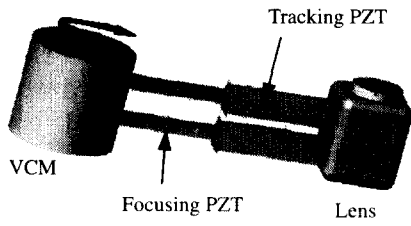


Fig. 15 2 axis PZT actuator (CSID, 2001)

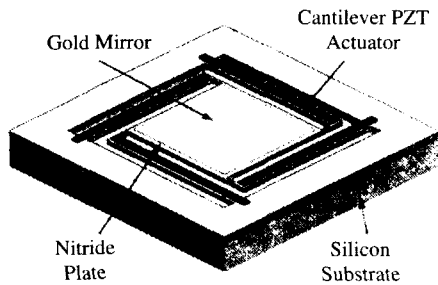


Fig. 16 PZT actuated micro-mirror (LG, 2000)

정된 오디오용 CD 의 요구 궤적을 참고로 하여 단일 주파수와 복합 주파수 정현파의 요구 궤적 제어 실험 결과로써, 압전 작동기로 구동되는 광 픽업 장치의 실제 적용 가능성을 입증하였다. 이후 와이어 서스펜션을 제거하고 한쌍의 압전세라믹을 병렬로 연결하여 광 픽업의 틸팅 현상을 방지하거나, 2 개 압전 재료를 직렬로 수직되게 연결하여 트래킹과 포커싱 제어를 동시에 수행하도록 하는 등 여러 형태의 광 픽업이 제안되었다(Fig. 15). 이러한 연구들은 최근 들어 고밀도 ODD 의 개발이 본격화되면서 근접장 기록방식 기술로 연계되었다. Fig. 16 은 2000 년 LG 전자에서 발표한 PZT 구동 마이크로미러의 구조이다. Gold 미러는 실리콘 질화막 상에 형성된 PZT 에 의하여 수직 방향으로 변위가 발생된다. 이때 광 디스크 면에 대해 45 °C 를 이루는 서브 마운트에 장착되어 광 원으로부터 입사되는 레이저 빔을 픽업 장치의 집속 광학계로 반사하여 주며, 레이저 빔의 광축을 평행하게 변경시킬 수 있게 되어 고밀도 광 정보 저장장치의 데이터 트랙을 추적하게 된다. 이와 같이 광 픽업이나 초점의 트랙 제어와는 달리 기존의 피딩 모터를 개선하고자 하는 연구도 진행되었는데, 압전 세라믹을 이용한 선형모터가 그것이

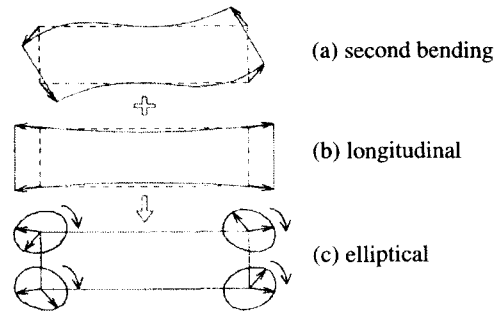


Fig. 17 Vibration modes of the PZT for linear motor

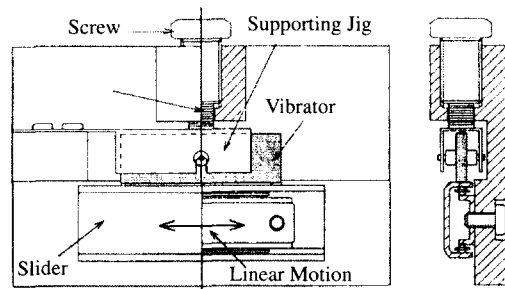


Fig. 18 Piezoelectric linear motor

다. Fig. 17 은 선형운동을 발생시키기 위한 압전재료의 진동 형태를 나타내 것이다. 압전재료의 2nd 벤딩 모드와 1st 길이방향 모드의 결합으로부터 압전재료의 경계면은 타원운동을 하게 되며, 이를 이용하여 선형운동을 얻는다. 일반적으로 압전재료를 이용한 모터의 경우 20kHz 이상의 초음파 영역에서 작동하므로 소음이 없고 미세 위치 제어에 효과적으로 사용될 수 있다. Fig. 18 은 Yabuki 등[10]이 제안한 CD-ROM 용 선형모터이다. Vibrator 로서 압전 재료가 사용되었으며 슬라이더를 좌우로 선형 이동시킴으로써 결국 광 픽업을 트래킹 방향으로 이동 시킨다. 실험 결과 20g 의 부가 질량과 50.5kHz 의 작동 주파수에서, 70V 의 인가전압 시 최대 180mm/s 의 선형 속도를 얻었으며, 0.7 μm 의 분해능을 나타내었다.

ODD 에서 강인한 서보 설계는 드라이브 자체의 기계적, 동적 안정성을 기반으로 하며, 서보 설계 측면에서 다룰 수 없는 부분은 기존 시스템의 구조를 변경하거나 새로운 장치를 부착하여 성능을 개선하고자 하는 것이다. 피딩 시스템에서 발생하는 진동의 원인은 스펀들 자체의 진동뿐만 아

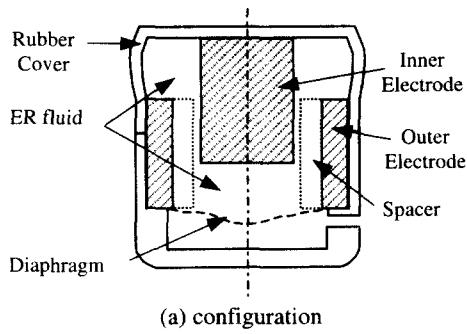


Fig. 19 ER CD-ROM mounts

나라 폴리카보네이트 재질의 디스크 성형과정과 사용자에 의한 변형, 질량의 불균형 등에 의해 디스크 회전 시 발생하는 진동 요소가 있으며, 점탄성 재료를 이용한 고무 마운트의 설계 개선과 자동 불균형장치(*automatic ball balancer*) 등의 부가장치를 부착하는 방법을 통하여 진동 감쇠를 얻는다. 고무 마운트의 가장 큰 역할은 디스크 회전 시 발생하는 진동이 드라이브와 컴퓨터 본체로 전달되는 것을 방지함과 동시에 외부에서 들어오는 진동이 광 픽업으로 전달되는 것을 방지하는 것이다. 현재까지는 고무 방진부 내부에 코어를 삽입하거나 고무의 재질을 변경하여 원하는 주파수 대역에서의 감쇠 능력을 향상시키는 연구가 진행되어 왔다. 그러나 드라이브의 넓은 작동 영역에 비하여 설계자가 원하는 특정 주파수 대역에서만 성능을 보장할 수 있으며 댐핑력이 작고 일정하던 단점이 있다. 이와 같은 기존의 고무 마운트는 제작 가격이 상대적으로 낮고 제작이 용이하다는 장점이 있지만 스펙들의 광범위한 작동 속도, 빠른 액세스 시간, 디스크의 회전 속도 증가 등의 현 추세에 능동적으로 대처하는 데는 한계가 있다.

스마트 재료 중 ER 유체는 빠른 반응 속도, 댐핑력의 제어 가능성 등의 특징으로 인하여 진동 감쇠 기구로서 많은 연구가 진행되어 왔으며, 이

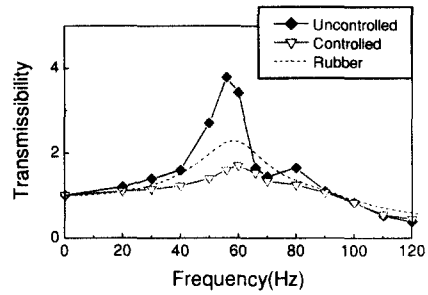


Fig. 20 Transmissibility response of the feeding system

를 피딩 시스템의 마운트에 적용한 것이 ER CD-ROM 마운트이다[11]. Fig. 19는 ER CD-ROM 마운트의 기본 구성도와 제작된 단품을 나타낸 것이다. 마운트는 실제 드라이브에 장착되도록 크기가 제한되고, ER 유체에 대한 Bingham 특성실험을 통해 얻은 전기장에 따른 항복응력 값과 원하는 피딩 시스템의 공진 주파수 등을 고려하여 고무 커버, 내/외측 전극 등을 설계한다. 각각의 마운트 단품은 피딩 시스템의 고무 마운트를 대신하여 장착되며, Fig. 20은 ER CD-ROM 마운트를 이용한 피딩 시스템의 변위 전달률 특성 실험 결과로서 공진 주파수 영역을 포함하는 넓은 드라이브의 작동 주파수 영역에서 기존의 고무 마운트보다 우수한 전달률 특성을 보이는 것을 알 수 있다. 한편, 피딩 시스템의 진동 양상은 실제 드라이브에 있어서 데크 메커니즘을 구성하는 부품들의 진동 특성에 의해 많은 영향을 받는다. 특히 메인 베이스가 공진을 일으킬 경우 광 픽업에 의한 기록 및 재생과정에 치명적인 결함을 유발시킬 수 있다. 현재까지는 방진부 설계에 대한 방향제시 차원에서 메인 베이스에 대한 진동 특성 연구가 진행되었으며 메인 베이스 자체의 진동 감쇠에 대한 연구는 미미한 상태이다. 이런 차원에서 압전 재료를 이용한 수동감쇠를 통하여 메인 베이스의 진동을 감쇠하고자 하는 연구가 진행 중이다[12]. 수동감쇠의 효율성은 손실계수(*loss factor*)의 최대치와 그 값이 유지되는 주파수 영역의 폭에 의하여 결정되며, 높은 손실계수가 넓은 주파수영역에 걸쳐 유지되는 감쇠재를 일반적으로 좋은 감쇠재라 한다. 점탄성 재료는 기계진동의 수동감쇠 재료로서 널리 알려져 있으나 위의 두 가지 조건이 서로 상반되는 성질을 가지고 있기 때문에 이를 극복하기 위한 수동 감쇠재로서 압전재료가 도입되었다. 개회

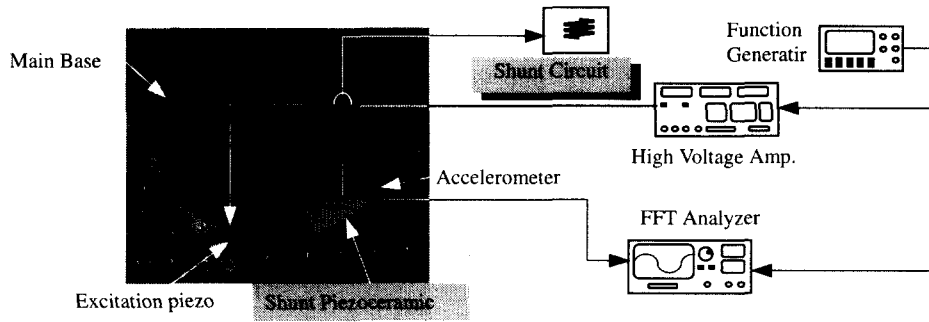


Fig. 21 Vibration reduction using piezoelectric shunt

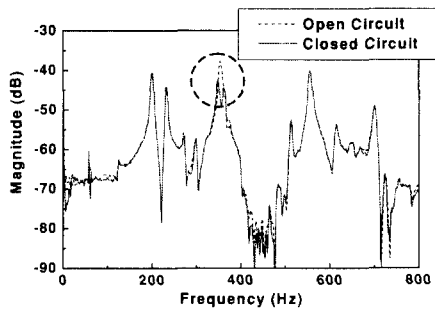


Fig. 22 Frequency response

로 상태에서의 압전 재료는 외부로부터 전달되는 압력으로 인한 기계적 에너지를 전극표면에 전기적 에너지로 형태로 저장한다. 이때 전극에 저항을 연결하면 축적된 전기에너지 중 일부가 압전재료의 양단에 연결된 선트회로를 거쳐 저항을 통하여 열에너지로 소산된다. Fig. 21 에서 보는 바와 같이 가진용 압전세라믹을 메인 베이스에 전달되는 진동 발생원으로 사용하고, 이때 선트회로와 연결된 압전재료의 전극에 저항을 연결하면 메인 베이스의 진동 에너지는 선트회로를 거쳐 저항을 통해 소산된다. 수동 감쇠용 압전재료는 모달 해석을 통해 원하는 특성과 부착 위치가 결정된다. Fig. 22 에서는 CD-ROM 메인 베이스의 진동이 압전 수동 감쇠 방법에 의해 특정 모드에서 감소하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 글에서는 스마트 재료를 이용한 정보저장기기 연구 분야를 HDD 와 ODD 로 나누어 살펴 보았다. 최근 들어 각종 정보저장기기가 소형화,

고밀도, 고속도화 됨에 따라 스마트 재료와 연계된 정보저장기기의 설계 및 제어에 대한 관심과 투자가 증가하고 있다. 국내에서는 스마트 재료 관련 기술 습득이 선진국 보다 한 단계 늦게 시작 되었음에도 불구하고 많은 관련 연구자들의 끊임 없는 노력으로 인하여 이제는 세계적으로 경쟁력 있는 기술로 자리를 잡아가고 있다. 따라서 국내 정보저장기기 산업 또한 빠른 속도로 성장하리라 기대된다. 21 세기 정보산업 사회에서 정보저장기기 기술이 국가 경쟁력 제고에 있어 상당한 비중을 차지할 것은 자명한 일이며, 스마트 재료의 응용은 이러한 추세에 충분히 부합할 수 있는 가장 핵심적인 요소기술중의 하나라고 할 수 있다. 비록 현재까지는 기술적인 불확실성, 기존 저장장치와의 인터페이스 기술 부족 등으로 아직 시장진입이 본격적으로 이루어지지 않고 있지만, 조만간 스마트 재료와 연계된 HDDS (holographic digital data storage), NFR (near-field recording), SPM (scanning probe microscopy) 등의 출현으로 새로운 정보저장기기의 탄생을 예상된다. 이를 성공적으로 달성하기 위해서는 스마트 재료에 대한 기초적이며 전반적인 연구가 필요하고 이와 연계된 정보저장기기의 학문 발전과 기술 인력의 양성, 그리고 정부차원에서의 체계적인 연구투자가 필수적이라 할 수 있다.

참고문헌

1. Gandhi, M. V. and Thompson, B. S., "Smart Materials and Structures," Chapman & Hall, 1992.
2. 최승복, 최영태, "지능재료 시스템과 구조물을 이용한 국가 기간 시설의 첨단화," 한국소음진

- 동공학회지, 제 6 권, 제 1 호, pp. 4-10, 1996.
3. Yoseph, B-C., "Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles-Reality, Potential, and Challenges," SPIE Press, 2001. .
 4. 홍어진, 윤준현, 박노철, 양현석, 박영필, "이중 구동 시스템을 위한 압전 밀리액츄에이터의 제어기 설계," 한국 소음진동공학회 추계학술대회, pp. 46-51, 2001.
 5. Tagawa, N. and Hashimoto, M., "Self-Loading Slider Dynamics for Noncontact Start Stop Operation with Negative Pressure Air-Lubricated Slider Bearing in Magnetic Disk Storage," ASME Journal of Tribology, Vol. 111, pp. 698-702, 1989.
 6. Kajitani, H., Hashimoto, M. and Tagawa, N., "Dynamic Loading Criteria for 3-1/2 inch Inline HDD Using Multilayer Piezoelectric Load/Unload Mechanism," IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 27, No. 6, pp. 5079-5081, 1991.
 7. 임수철, 박종성, 최승복, 박영필, "SMA 작동기를 이용한 HDD 의 비접촉 시동/정지 기구의 실험적 성능 고찰," 한국 소음진동공학회 춘계학술대회, pp. 1122-1129, 2001.
 8. 정선중, "프린터/광저장장치 기술/시장 보고서," 한국전자통신연구원, 2000.
 9. Choi, S. B., Kim, H. K., Lim, S. C. and Park, Y. P., "Position Tracking Control of an Optical Pick-Up Device Using Piezoceramic Actuator," Mechatronics, Vol. 11, pp. 691-705, 2001.
 10. Yabuki, A., Aoyagi, M., Tomikawa, Y. and Takano, T., "Piezoelectric Linear Motors for Driving Head Element of CD-ROM," Journal of Japanese Applied Physics, Vol. 33, Part I, No. 9B, pp. 5365-5369, 1994.
 11. Lim, S. C., Park, J. S., Choi, S. B. and Park, Y. P. "Vibration Control of a CD-ROM Feeding System Using Electro-rheological Mounts," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2001.(in press)
 12. 박종성, 임수철, 최승복, 김재환, 박영필, "압전 셉트회로를 이용한 광 디스크 드라이브의 진동 저감," 한국 소음진동공학회 추계학술대회, pp. 972-976, 2001.