

자성체를 이용한 마이크로 기계량센서



신 광 호
(경성대 정보과학부 교수)



사 공 건
(동아대 전기전자컴퓨터공학부 교수)



김 영 학
(부경대 전기·제어계측공학부 부교수)

1. 서 론

최근 정보화사회의 실현을 목적으로 하는 많은 시스템들의 개발이 진척되어 감에 따라 고기능성 디바이스의 개발에 대한 요구가 날로 더해가고 있다. 이러한 디바이스 중에서 기계량을 계측하는 마이크로센서는 물리적인 상황을 감지하는 소자로서 시스템의 고급화와 고기능화를 위하여 필수적으로 발전되어야 할 소자이다. 이러한 상황을 대비해 주듯이, 근년 마이크로 기계량센서의 생산과 응용분야가 급속히 증가되고 있다. 표 1와 표 2은 각각 1996년도와 2002년도의 대표적인 마이크로 기계량센서(Pressure sensors, Accelerometers, Gyroscopes)의 생산량 및 응용전망에 대하여 정리한 것이다 [1]. 여기서 알 수 있듯이, 마이크로 기계량센서의 시장은 6년 동안에 약 2배의 성장을 보일 전망이며, 그 응용분야도 정보화의 주체가 되는 IT뿐만 아니라 의료 및 생화학(Medical and Biochemical)분야, 산업자동화(Industry and Automation), 자동차생산(Automotive Product) 등 많은 응용분야로 다양화되어 있어, 그 발전전망이 뚜렷한 분야라고 할 수 있다. 따라서 마이크로 기계량센서에 대한 수요는 계속해서 증가할 것이고, 이 수요에 대처하기 위해서는 현재 사용되고 있는 센서 디바이스의 적합화와 응용의 확대가 필요하며, 고기능성을 가진 새로운 센서의 개발도 매우 중요하다고

볼 수 있다. 표 3은 각종 기계량센서를 검출대상에 따라 정리한 것[2]으로 많은 종류의 센서가 제안되어 있다.

기계량센서를 구성하는 재료로서는 압전체, 반도체, 자성체, 금속재료, 고분자 등의 재료가 사용될 수 있고 발상에 따라서 다양한 재료들을 이용하여 새로운 기능을 나타내는 센서를 구

표 1. 대표적인 마이크로기계량센서의 1996년도 생산량 및 응용.
단위 : million \$

Products	IT	Med. & Bio.	Indust.& Autom.	Automotive Product	Total
Press. sens.	-	100	350	150	600
Acceler.	-	-	90	150	240
Gyro.	100	-	50	-	150

표 2. 대표적인 마이크로기계량센서의 2002년도 생산량 및 응용전망.
단위 : million \$

Products	IT	Med. & Bio.	Indust.& Autom.	Automotive Product	Total
Press. sens.	-	200	600	500	1300
Acceler.	-	-	130	300	430
Gyro.	240	-	60	-	300

성할 수가 있다. 그 중 자성체는, 일반적으로, 다른 재료에 비하여 재료적인 특성이 안정하다는 것 이외에도 온도특성이 우수하고 기계적으로 우수한 특성을 가지며 낮은 가격으로 대량 제작이 가능하다는 장점을 가진다. 특히 연자성이 우수한 아몰퍼스 자성체를 이용하는 경우에는, 아몰퍼스 자체의 구조적인 특성으로, 뛰어난 내환경성과 기계적인 특성을 얻을 수가 있다.

본 논문에서는 현재까지 연구가 활발하게 진행되어 온 자성체를 이용한 기계량센서 분야를 개관하고, 아몰퍼스 자성체를 이용한 기계량검출, 그리고 최근에 제안된 자성체를 이용한 마이크로 스트레인센서에 대하여 설명한다.

2. 기계량센서용 자성재료

자성체의 자기적인 특성과 기계적인 특성 사이에 강한 상호작용이 존재한다는 것은 1842년 Joule에 의해 최초로 발견되었다[3]. 그 후 Vallari에 의해서 Joule의 자왜의 역효과, 즉 기계적인 스트레스의 인가로 자기적인 특성이 변화한다는 것을 발견하였다. 이 효과가 자성체의 자기탄성효과를 이용하는 기계량센서의 기본적인 동작원리이다. 자왜효과는 자성체의 조성에 크게 의존하고, 결정질 합금에서는 결정축의 방향에 따라 서로 다른 값을 나타낸다. 일반적으로 결정질 합금은 다결정으로 존재하는 경우가 많기 때문에, 결보기 자왜는 각 결정축의 자왜값이 평균화되어 나타나게 된다. 이에 대해 아몰퍼

스 재료는 결정이나 결정축을 가지지 않으므로 자왜가 모든 방향에 대해 일정하다. 자왜를 정량적으로 분석하거나 또는 재료의 기본적인 특성으로부터 이론적으로 유도하는 것은 쉽지 않다. 그러나 단자구 상태에 있는 아몰퍼스 자성체를 고려하는 경우, 간단한 자기모멘트의 회전모델로부터 자왜를 예상할 수가 있다[4].

자기탄성효과를 이용한 센서를 구성하는 재료로서 요구되는 특성들을 요약하면 다음과 같다.

- 보자력이 작을 것 (low H_c)
- 포화자화가 클 것 (large M_s)
- 포화자왜가 충분히 클 것 (large λ_s)
- 기계적인 경도와 강도가 클 것
- 자계 혹은 자속에 대한 자왜의 변화가 민감할 것 (large $d\lambda/dH$ or $d\lambda/dB$)

결정질 재료로서 연자성이 우수하다고 알려진 일반적인 재료로는 퍼멀로이(Ni와 Fe의 합금)와 실리콘스틸(FeSi)등이 있다. 이 중 퍼멀로이는 매우 우수한 연자성(조성에 따라 변하지만 $H_c(0.1Oe)$ 을 가지고 있고 포화자왜도 니켈의 함유량에 따라 제어가 가능하지만, 기계적으로 비교적 연약하다는 단점을 가지고 있다. 가장 일반적으로 많이 사용되는 연자성재료인 3%SiFe의 경우, 기계적으로 우수한 특성을 가지고 있고 연자성도 우수하지만 자왜가 충분히 크지 못하다.

표 3. 각종 기계량센서.

검출대상	센서	검출방식
기하학량검출	위치센서	자기식위치센서, 광학식위치센서, 정전용량식위치센서
	스트레인센서	금속스트레인센서, 반도체스트레인센서, 자기탄성스트레인센서, 광학식스트레인센서
	형상센서	광학식형상센서, 접촉식형상센서, 현미경
	회전·각도센서	포텐쇼메터, 회전형캐패시터, 로타리엔코더, 광학식각도센서, 자이로메터
	표면조도센서	접촉식조도계, 광학식조도계, SPM(STM, AFM)
	두께센서	접촉식두께센서, 방사선투과형센서, 적외선투과형센서
운동량검출	속도센서	레이저속도센서, 레이더속도센서, 반도체속도센서
	각속도·회전속도센서	광파이버자이로메터, 기계식자이로메터, 반도체자이로메터
	진동·가속도센서	압전형가속도센서, 스트레인게이지가속도센서, 자기식가속도센서
역학량검출	질량·중량센서	전자(電子)식저울, 전자(電磁)식저울, 전기저항식저울
	힘센서	로드셀, 자기탄성식힘센서, 반도체힘센서
	토오크센서	스트레인게이지식토오크센서, 광학식토오크센서, 전자유도식토오크센서, 자기탄성식토오크센서
	압력센서	반도체압력센서, (정전용량형, 스트레인센서형), 차동변압기식압력센서, 와전류형압력센서, 압전형압력센서
	진공센서	구조형진공센서(다이아프램 등), 열전도형진공센서, 점성형진공센서, 전리형진공센서

아몰퍼스 자성체는 결정이 존재하지 않으므로 등방적인 자왜를 가지고 있고, 특히 철계의 아몰퍼스 자성체의 경우에는 연자성이 우수함에도 불구하고 매우 큰 자왜를 나타낸다. 또한 아몰퍼스 재료는 그 특성의 하나인 우수한 기계적인 경도와 강도를 나타내므로(5), 자기탄성효과를 이용한 센서를 구성하기에 적합한 재료라고 할 수가 있다. 더욱이 아몰퍼스 자성체는 1%이상의 스트레인이 인가되어도 점성변형을 일으키지 않을 만큼 기계적인 특성이 우수하다(결정질 자성체는 일반적으로 0.1%정도의 스트레인으로 점성변형이 시작된다). 최근 극히 큰 자왜를 나타내는 화토틀류 금속초자왜 재료를 이용한 자왜재료는 압전재료를 능가하는 발생력과 스트레인으로 주목받고 있다. 이 재료는 매우 큰 자왜값(~2000ppm)을 나타내므로 액츄에이터를 구성하는 재료로서 적합하지만 일반적으로 경자기특성을 나타내므로, 센서를 구성하는 재료로서 사용되기 위해서는 특별한 구성을 가지도록 하여야 한다.

아몰퍼스 자성체가 가지는 독특한 특성으로서, 철계 아몰퍼스 자성체의 경우, 우수한 연자성과 고자왜를 동시에 가진다는 것이다. 이 재료는 본질적으로 결정자기방성을 가지지 않으며 매크로적인 재료의 균일성을 나타내므로 자벽의 움직임을 방해하는 원인이 되는 결정입계, 보이드, 석출 등이 존재하지 않는다. 따라서 우수한 연자기특성을 나타내는 것이다. 또한, 철계 아몰퍼스 자성체는, 조성에 따라, 큰 자왜(~40×10⁶)를 나타낸다. 즉, 재료에 인가된 작은 자계에 의해 큰 스트레인이 발생함과 동시에 비교적 작은 스트레인에 의해서 자기적인 특성이 민감하게 변화하는, 소위 우수한 자기기계 결합특성을 나타낸다. 이러한 현상은 Arai 등에 의해서 최초로 밝혀졌다. 이들은 FeSiB 아몰퍼스 리본의 자기기계 결합계수가 결정성 재료의 수배에 달하는 0.75라고 하는 큰 값을 가진다는 것을 명확히 하였다(6)[7]. 그 후, Modzelewski 등에

의해 0.96의 자기기계결합계수가 FeSiBC 아몰퍼스 리본에서 얻어졌다(8). 이 재료들은 우수한 자기기계 결합특성을 가지고 있어 고체 액츄에이터, 스트레인(혹은 스트레스)센서, 자계센서 등을 구성하는 재료로서 매우 적합하다고 할 수 있다(9)-(12). 표 4는 철계 아몰퍼스 자성체들의 특성을 정리한 것이다(13). 표 4에서 알 수 있듯이 적절하게 열처리된 철계 아몰퍼스 자성체는 우수한 자기기계 결합특성을 나타내고 있으며, 특히 주 조성이 FeSiB인 경우, 0.9이상의 값을 나타낸다.

3. 자기탄성효과를 이용한 기계량센서

자기탄성효과를 이용하는 토오크센서는 축 자계의 자기적인 특성에 토오크가 미치는 영향을 검출하는 직접방식과 축에 부가적으로 자기탄성막을 코팅하거나 자기탄성재료를 접합하여 토오크의 영향을 검출하는 간접방식이 있다(15). 일반적인 용도로는 비자성체 축에도 적용이 가능한 간접방식이 많이 사용된다. 그림 1은 간접방식 토오크센서의 측정 방법을 나타낸 것이다. 토오크를 측정하고자하는 축에 자기탄성재료로 만들어진 링을 부착하고, 축에 걸리는 토오크가 자기탄성재료에 전달되면, 자기탄성재료의 자기적인 특성이 변화하게 된다. 이 변화를 자계센서로부터 읽어, 검출회로를 통하여 신호가 출력되는 것이다. 그림 2는 MDI사에서 시판하고 있는 간접방식 토오크센서를 나타낸 것이다. 자기탄성 토오크센서를 이용하는 경우에는 축의 회전에 방해를 주지 않는 고감도의 비접촉 검출이 가능하며, 응답속도가 빠를 뿐만 아니라, 무엇보다도 검출신호의 직선성이 우수하다. 또한 축의 온도변화를 보상할 수 있다는 장점도 가지고 있다. 그러나 축의 자기적인 특성에 따라 감도가 변화하므로 자기탄성재료의 주의 깊은 선택과 사용이 요구된다.

표 4. 철계 아몰퍼스자성체들의 특성 ; K_m : 최대 자기기계결합계수, H_{km} : 최대 자기기계결합계수를 나타내는 외부자계, T_a : 열처리온도, t : 열처리시간.

Composition	K_m	H_{km} [Oe]	T_a [°C]	t [min]
Fe ₈₀ P ₁₃ C ₇	0.53	6.2	350	20
Fe ₈₀ B ₂₀	0.64	1.5	375	5.6
Fe ₇₈ Si ₁₀ B ₁₂	0.82	2	375	5
Fe ₈₀ Si ₅ B ₁₅	0.83	1	350	30
Fe ₈₀ Si ₅ B ₁₀	0.55	2.5	300	30
Fe ₇₈ Si ₁₃ B ₉	0.98	0.9	450	15
Fe ₇₈ Si ₁₀ B ₁₂	0.92	0.9	450	30
Fe ₈₁ Si _{13.5} B _{13.5} C ₂	0.96	0.8	389	-
Fe ₇₁ Co ₉ B ₂₀	0.81	270	387	5
Fe ₆₇ Co ₁₈ Si ₇ B ₁₄	0.71	15	375	-

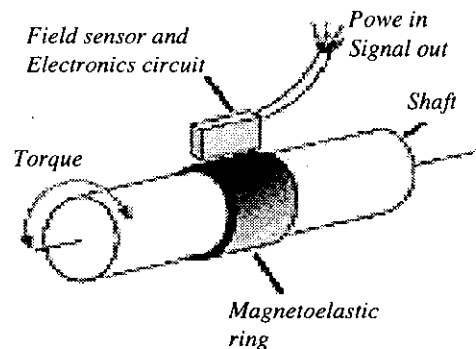


그림 1. 자기탄성 토오크센서의 측정 개념도.

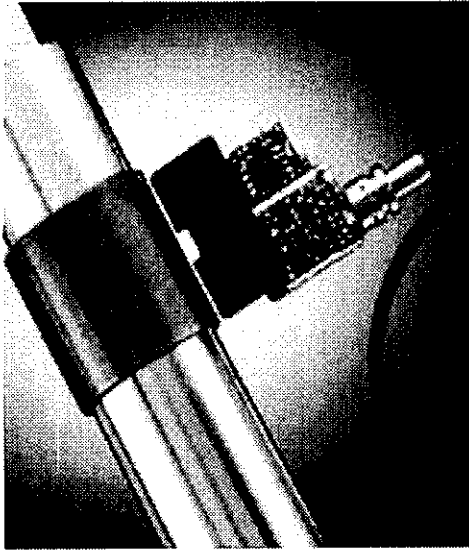


그림 2. MDI사에서 시판하고 있는 토크센서.

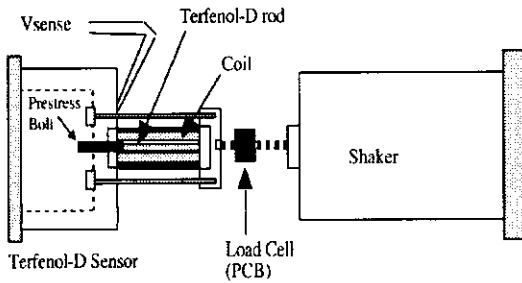


그림 3. 초자왜재료를 이용하여 구성한 힘 센서.

가져왔다.

그림 3은 초자왜를 가지는 재료를 이용하여 구성된 힘 센서를 나타내고 있다[18].

그림 4는 켄터키대학의 연구그룹에서 제안한 FeNiPB 아몰퍼스 리본을 이용하여 액체의 점성을 측정하는 장치의 개략도를 나타낸 것이다[19]. 액체 속에 아몰퍼스 리본을 설치하고 외부로부터 아몰퍼스 리본에 기계적인 공진주파수의 교류자재를 인가하면 소자가 공진함과 동시에 발신하여 이 신호를 수신코일에서 검출할 수 있다. 이 때의 공진주파수는 액체의 점도와 밀도에 의존하므로 무선으로 액체의 점도와 밀도를 측정할 수가 있다.

이들은 그림 4와 같은 원리의 아몰퍼스 자성체를 이용하여 CO₂가스를 검출하는 리모트센서를 제안하고 있다[20]. 아몰퍼스 리본의 표면에 CO₂가스를 흡착시킬 수 있는 폴리머를 도

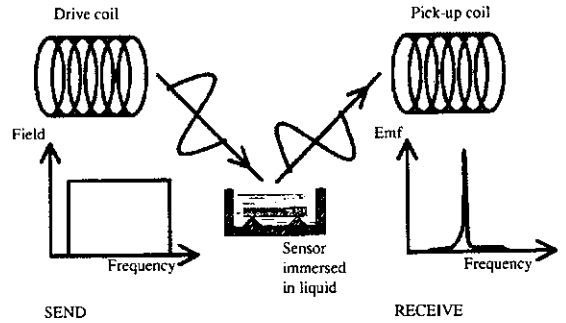


그림 4. 액체점성 측정장치(켄터키대학).

포시키면 폴리머가 가스를 흡착하여 이 때문에 아몰퍼스 리본의 공진주파수가 변화하고 이 변화를 수신코일로부터 검출하는 것이다.

4. 마이크로 자기탄성 스트레인센서

스트레인 센서는 그 자체로서의 사용뿐만 아니라 이를 이용하여 여러 종류의 기계량 센서를 구성할 수 있는 기본센서이다. 자성체를 이용한 스트레인 센서는 앞에서 설명한 아몰퍼스 자성체의 연자성과 고자왜 특성을 이용하는 것으로, 스트레인 인가에 의해 변화하는 투자율이나 보자력과 같은 자성체의 자기적인 특성을 검출하는 것이다.

M. Won-Fogle 등은 철계 아몰퍼스 리본을 이용한 자기탄성 스트레인 센서를 제안하였다[21][22]. 아몰퍼스 리본은 자계 중 열처리를 실시함으로써 폭 방향으로 자기이방성을 유도하고 리본에 장력이 인가될 때 투자율의 변화를 코일을 이용하여 검출하는 것이다. 철계 아몰퍼스 리본이 극히 우수한 자기기계 결합특성을 가지고 있기 때문에, 스트레인 검출에 대한 성능지수, $F = (\partial\mu/\partial\epsilon)/\mu$, 를 평가한 결과 $\sim 2 \times 10^5$ 이라는 매우 높은 값이 얻어 졌다. 그러나 투자율의 변화를 이용하여 스트레인을 검출하는 방식은 측정을 위한 구조가 복잡하고 검출회로에서 노이즈가 많이 발생한다는 단점이 있으므로, 실용상으로 그리 적합하다고 볼 수는 없다. 또한 이들은 아몰퍼스 리본에 대하여 스트레인에 의한 전기저항의 변화를 평가한 결과 그 성능지수, $F = (\partial R/\partial\epsilon)/R$, 가 약 70에 달하는 것을 확인하였다[23]. 이는 자기탄성 스트레인 센서가 전기저항변화로 사용되어도 금속 스트레인센서($F \approx 2$)[24]보다 수십배 높은 감도를 보일 수 있다는 것을 입증한 것이다. Mamin 등은 GMR용 스핀밸브막의 자기저항변화가 스트레인에 의존한다는 점에 착안하여 자외박막을 채용한 스핀밸브를 스트레인 센서로 제안하였다[25]. 그는 제작한 스핀밸브형 자기탄성 스트레인 센서가 현재 사용되고 있는 반도체 스트레인 센서보다 높은 감도($F \approx 150$)를 나타낸다는 것을 밝혔다.

한편 강자성체에 고주파 전류를 통전시킬 때, 임피던스가 외부자계에 의해 민감하게 변화하는 현상을 이용한 자체센서, 소위 MI센서(Magnetoimpedance sensor)가 최근 주목 받고 있다[26]-(30). 이 현상의 발현 메카니즘은 자성재료가 높은 주파수에서 발생하는 표피효과(Skin effect)가 투자율에 의존한다는 것으로 설명할 수 있다[29][30]. 즉 자성재료의 투자율이 외부자계에 의해 변화하고 이에 따라 표피효과가 변화하여 결국 자성체의 임피던스가 변화하는 원리를 이용한 것이다. 만약 자왜를 가지고 있는 자성재료인 경우에는 자체 뿐만 아니라 스트레인의 인가에 의해서도 역자왜 효과를 통하여 투자율이 변화하므로 고주파에서 임피던스가 민감하게 변화할 수 있다.

M. Knobel 등은 자왜값이 정(+)인 철계 아몰퍼스자성체와 자왜값이 극히 작으며 음(-)의 값을 가지는 코발트계 아몰퍼스 자성체로 만들어진 와이어의 자기임피던스 현상에 미치는 스트레스의 효과에 대하여 조사하고[31][32], 자기임피던스 현상에 있어서, 스트레스의 인가로 인해 표피깊이(Skin depth)가 변화하여 임피던스가 변한다는 것을 실험적으로 밝혔다. 또한 그는 자기임피던스 현상에서 나타나는 변화를 정량적으로 분석함으로써 자성체가 가지고 있는 자왜로부터 자성체의 자기기계적 특성이 자기임피던스 현상에 선형적으로 영향을 미친다는 것을 나타내었다[33]. Atkinson 등은 음(-)의 미소한 자왜를 가지는 코발트계 아몰퍼스 자성체에 있어서, 이러한 자기임피던스 현상에 미치는 스트레스의 영향을 현상론적으로 검토하였다[34]. 이러한 연구들은 다른 몇몇 연구자들에 의해서도 수행되었으나[35][36], 주로 자왜가 작은 자성체를 대상으로 자기임피던스 현상에서의 스트레스가 미치는 영향을 조사한 것으로 스트레스에 민감한 변화를 나타내는 현상을 센서로서 이용하고자 한 것은 아니었다.

최근 Shin 등은 연자성특성과 고자왜특성을 동시에 가지는 철계 아몰퍼스 자성체 박막의 투자율이 외부에서 인가된 스트레인에 대하여 민감하게 변화된다는 것을 밝히고[37], 이 박막을 패터민한 마이크로 자기탄성 스트레인센서를 제안하였다[38]-(41). 이 연구에서 제안된 스트레인센서는 박막패턴으로 구현하므로 리본이나 와이어와 같은 벌크재료로 구현된 소자에 비하여 전극처리와 같은 실장기술을 용이하게 적용할 수 있고, 특히 특성의 재현성이 우수하며, 디바이스의 소형화에 적합하여 대량 생산이 가능하다. 또한 이것은 자성박막을 이용하는 고주파 임피던스의 스트레인 의존성을 이용한 새로운 발상의 센서이다.

그림 5은 제작한 마이크로 자기탄성 스트레인센서의 한 예를 보여주고 있다. 이 센서는 FeCoSiB조성을 가지는 철계 아몰퍼스 박막을 스퍼터링으로 실리콘기판 위에 성막하여 포토리소그라피와 이온밀링으로 박막을 패터민한 것이다. 그림 6은 제작한 박막을 열처리하여 소자의 폭 방향으로 자기이방성을

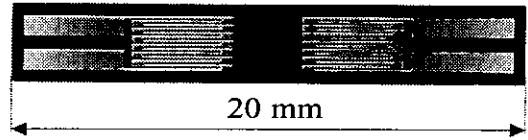


그림 5. FeCoSiB 아몰퍼스 박막을 이용하여 제작한 마이크로 자기탄성 스트레인센서, 7 turns, Length : 3mm, Width : 100 μ m, Thickness : 3 μ m.

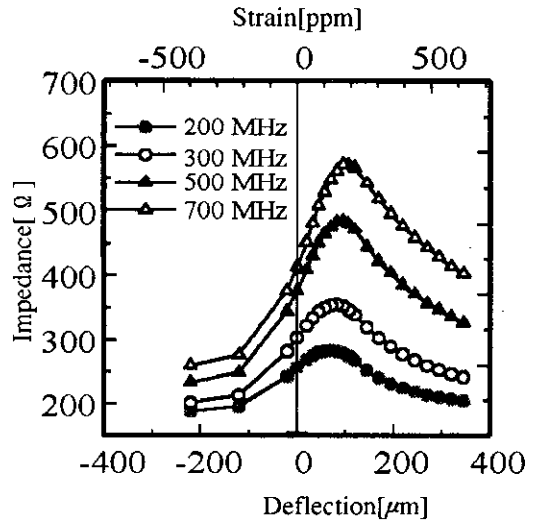


그림 6. 스트레인에 의한 박막패턴의 임피던스 변화.

유도한 시료의 스트레인 인가에 의한 임피던스변화를 나타낸 것이다. 이 때 구동주파수는 200MHz, 300MHz, 500MHz, 700MHz로 하였고, 박막에 대한 스트레인은 박막이판을 외팔보(Cantilever)로 고정하여 마이크로미터를 이용하여 미소변위를 인가하였고, 이 때 임피던스는 네트워크 어널라이저를 이용하여 측정하였다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 500MHz의 구동주파수에서 100ppm의 스트레인 인가에 의해 약 22%의 임피던스가 변화하였다. 그림 7은 단위 스트레인(1ppm)에 대한 임피던스의 변화로부터 정의되는 성능지수를 주파수에 대해 나타낸 것이다. 이 그림에서 박막패턴의 길이 방향으로 자기이방성을 유도한 경우(●)와 박막패턴의 폭 방향으로 자기이방성을 유도한 경우(○)의 결과를 서로 비교하여 도시하였다. 박막패턴의 길이 방향으로 자기이방성이 유도한 경우에는 최고 성능지수가 약 500이었으나, 박막패턴의 폭 방향으로 자기이방성이 유도한 경우에는 약 2600의 성능지수가 얻어졌다. 이 결과로부터 박막패턴의 자기이방성의 제어가 센서 감도를 높이는 데 매우 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있다.

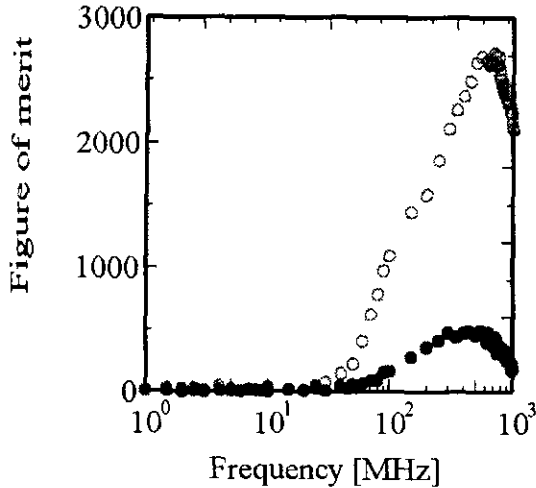


그림 7. 마이크로 자기탄성 스트레인센서의 스트레인 검출에 대한 성능지수: ○ : 자기이방성이 패턴의 폭방향으로 유도된 경우, ● : 자기 이방성이 패턴의 길이방향으로 유도된 경우.

이것은 박막패턴의 자기이방성이 폭 방향으로 유도되었을 때, 박막의 자기기계 결합특성이 가장 우수해 지기 때문이다. 이 결과를 일반적으로 사용되는 금속 스트레인센서의 성능지수 ($F \approx 2$)와 고감도의 스트레인센서로 알려진 반도체 스트레인센서의 성능지수 ($F \approx 200$)와 비교하면 감도가 극히 우수한 스트레인센서가 얻어졌다는 것을 알 수 있다.

5. 결론 및 전망

자기탄성효과를 이용한 기계량센서에 대하여, 센서용 재료에 대한 개관, 종류, 구동원리를 현상론적으로 고찰하였고, 박막패턴으로 제작한 마이크로 센서 등에 대해 서술하였다. 자기기계 결합특성이 우수한 아몰퍼스 자성체를 이용한 센서의 경우, 기존의 기계량 센서에서는 구현할 수 없었던 특성을 나타낸다는 것을 알 수 있었다. 특히, 박막패턴으로 제작된 마이크로 자기탄성 스트레인센서의 경우, 구동원리나 구조가 비교적 간단함에도 불구하고 기존의 센서보다 매우 높은 감도특성을 나타낼 뿐만 아니라, 고주파 구동으로 인하여 응답속도가 빠르고, 아몰퍼스 재료 자체가 가지는 기계적인 특성과 화학적인 내성이 탁월하다는 특징을 가지고 있다. 또한 반도체나 압전체 등의 다른 기능성 재료에 비교하여 온도특성이 우수하다는 장점도 가지고 있어 앞으로의 연구개발에 따라 획기적인 발전을 이룰 수 있는 분야라고 볼 수 있다. 최근 연구의 범위가 넓어지고 있는 MEMS 분야에서 기계량을 검출하는 소자로서 이 센서가 이용될 경우, 간단한 구조와 고감도특성으로 인하여 제작이 용이하며 재현성이 우수하고, 구동회로에 부담

이 적은 센서시스템을 구현할 수 있을 것이다. 앞으로는, 기본적인 마이크로 자기탄성 스트레인센서를 이용하여 가속도센서나 압력센서 등으로 응용하는 연구가 크게 기대된다.

참고 문헌

- [1] Market Analysis for Microsystem, A Nexus Task Force Report, 1998.
- [2] 森村正直, 機械量のセンシング技術, 1986.
- [3] J. P. Joule, Ann. Elect. Magn. Chem., B, (1842) 219.
- [4] M. D. Mermelstein, IEEE Trans. Magn., MAG-22, (1986) 442.
- [5] M. Hagiwara, Current Topics in Amorphous Materials, Elsevier Science Publishers, (1993) 191.
- [6] K. I. Arai, N. Tsuya, M. Yamada, and T. Masumoto, IEEE Trans. Magn., Mag-12, (1976) 936.
- [7] K. I. Arai, and N. Tsuya, J. Appl. Phys., 49 (1978) 1718.
- [8] C. Modzelewski, H. T. Savage, L. T. Kabacoff, and A. E. Clark, IEEE Trans. Magn., Vol. MAG-17, (1981) 2837.
- [9] P. T. Squire, Meas. Sci. Technol., 5 (1994) 67.
- [10] A. Hernando, M. Vazquez, and J. M. Barandiaran, J. Phys., E:Sci. Instrum., 21 (1988) 1129.
- [11] M. D. Mermelstein, IEEE Trans. Magn., 28, (1992) 36.
- [12] M. Wun-Fogle, H. T. Savage, and A. E. Clark, InTech, (1987) 51.
- [13] 申光鎬, 東北大學(日本)博士學位論文, (1999).
- [14] 毛利佳年雄, 機械の研究, 第44卷, 第1, (1992)145.
- [15] W. Gopel, J. Hesse, and J. N. Zemel(ed.), Magnetic Sensors, VCH (1987) 106
- [16] F.V. Hunt, Electroacoustics: The Analysis of Transduction, and its Historical Background, American Institute of Physics for the Acoustical Society of America, 1982.
- [17] The design and construction of magnetostriction transducers, Summary of Technical Report of Division 6, NDRC, Volume 13, 1946.
- [18] F. Calkins, M. Dapino, and A. Flatau, Proceedings of the 24th Midwestern Mechanics Conference, 18 (1995).
- [19] Craig A. Grimes, Dimitris Kouzoudis, and Casey Mungle, REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRU-

MENTS, 71(10) (2000) 3822.

[20] Arthur Cammers-Goodwin, and Craig A. Grimes, J. Environ. Monit., (2000) 556.

[21] M. Won-Fogle, H. T. Savage, and A. E. Clark, InTech, (1987) 51.

[22] M. Won-Fogle, H. T. Savage, and A. E. Clark, Sensors and Actuators, 12 (1987) 323.

[23] J. B. Restorff, M. Won-Fogle, K. B. Hathaway, and A. E. Clark, J. Appl. Phys., 69(8) 4668(1991).

[24] 渡辺理, ひずみゲージとその応用, 日刊工業新聞社, (1977).

[25] K. Mohri, T. Kohzawa, K. Kawashima, H. Yoshida, and L. V. Panina, IEEE Trans. Magn., 28, (1992) 3150.

[26] X. L. Yang, J. X. Yang, G. Chen, G. T. Shen, B. Y. Hu, and K. Y. Jiang, J. Magn. Mater., 175, (1997) 285.

[27] K. V. Rao, F. B. Humphrey, and J. L. Costa-Kramer, J. Appl. Phys., 76, (1994) 6204.

[28] L. V. Panina, K. Mohri, K. Bushida, and Noda, J. Appl. Phys., Vol. 76, (1994) 6198.

[29] J. Velazquez, M. Vasquez, D. X. Chen, and A. Hernando, Phys. Rev., B, Vol. 50, (1994) 16737.

[30] K. H. Shin, M. Inoue, and K. I. Arai, IEEE Trans. Magn., 34(4) 1324(1998).

[31] M. Knobel, M. L. Sanchez, J. Velazquez, and M. Vazquez, J. Phys., Condens. Matter, 7 (1995) L115.

[32] M. Knobel, M. Vazquez, M. L. Sanchez, and A. Hernando, J. Magn. Mater., 169, (1997) 89.

[33] M. Knobel, C. Gomez-Polo, and M. Vazquez, J. Magn. Mater., 160, (1996) 243.

[34] M. Knobel, C. Gomez-Polo, and M. Vazquez, J. Magn. Mater., 160, (1996) 243.

[35] M. Tejedor, B. Hernando, M. L. Sanchez, V. M. Prida, and M. Vazquez, J. Phys. D : Appl. Phys., 31, (1998) 2431.

[36] J. L. Costa-Kramer, and K. V. Rao, IEEE Trans. Magn., 31(2) (1995) 126.

[37] K. H. Shin, M. Inoue, and K. I. Arai, Smart Mater. Struct., 9 (2000) 357.

[38] K. H. Shin, M. Inoue, and K. I. Arai, The Transaction of the Institute of Electrical Engineers of Japan, 120-A(3), (2000) 295.

[39] K. H. Shin, M. Inoue, and K. I. Arai, J. Appl. Phys., 85(8), (1999) 5465.

[40] K. H. Shin, M. Inoue, and K. I. Arai, J. Magn. Soc. Japan, 23(4-2), (1999) 1425.

[41] K. Imamura, K. H. Shin, M. Inoue, and K. I. Arai, J. Magn. Soc. Japan, 24(4-2), (2000) 751.

저 자 약 력

성명 : 신 광 호

❖ 학력

1993년 동아대학교 전기공학과 졸업
 1995년 동아대학교 전기공학과 석사과정수료
 1999년 Tohoku Univ. 수료 (공학박사)

❖ 경력

일본 후생성 연구원
 삼성종합기술원 MEMS Lab. 전문연구원
 현재 경성대학교 정보과학부 전임강사

성명 : 김 영 학

❖ 학력

1979년-1986년 부산수산대학 공학사
 1989년-1991년 일본동북대학 공학석사
 1991년-1993년 일본동북대학 공학박사

❖ 경력

1999년-2000년 일본 동북대학 전기통신연구소 객원연구원
 1995년-현재 부경대학교

성명 : 사 공 건

❖ 학력

1968년 영남대 공대 전기공학과 졸업.
 1973년, 1986년 동 대학원(공학박)

❖ 경력

1983년-1985년 The Penn. State Univ., MRL(Visiting Scientist)
 1993년 일본 동경공업대학(객원연구원),
 1994년 The State Univ. of New Jersey (Visiting Scientist),
 1997년-1998년 Virginia Tech.(Visiting Professor)
 1979년-현재 동아대 공대 전기전자컴퓨터공학부 교수
 1998년-현재 본학회 부산경남울산지부장