

자기임피던스 효과를 이용한 자기센서



김영학
(부경대 전기·제어계측공학부 부교수)



신관호
(경성대 멀티미디어대학 정보과학부)

1. 서론

연자성체에 고주파 전류를 통전시키면, 자성체의 표피효과(Skin effect)에 의해 임피던스가 변화하게 된다. 따라서 고주파의 장전류를 통전시키면서 자성체의 양단에서 전압의 크기를 측정하면 외부에서 인가되는 자계에 따라 변화하게 되는데, 이 때의 전압을 자계로 환산함으로써 자계의 검출이 가능하다. 이러한 현상을 이용하여 자계를 검출하는 소자를 자기임피던스 센서(Magneto-Impedance sensor)라고 한다. 강자성체에 고주파전류를 통전시킬 때의 임피던스가 외부자계에 의존한다는 것은 약 60년 전부터 알려진 현상이다[1]. 이 현상을 이용하여 1980년대에는 임피던스 제어회로의 개발[2-3], 발열시스템이나 비접촉전류 센서를 목적으로 한 자성이중관의 개발[4-6], 그리고 평행판소자의 개발[7] 등의 공학적 응용연구가 수행되었다. 특히 1980년대 후반, Shimada를 중심으로 한 일본의 동북대학(Tohoku University)의 연구그룹은 이 현상을 자계센서의 원리로 이용할 수 있다는 것을 명확히 하였다[8,9]. 이들은 연자성체에 있어서 외부자계의 인가에 의한 고주파에서의 저항변화가 약 400%/Oe에 도달할 것이라는 것을 이론적으로 설명하였고, Co계 아몰퍼스 재료로 제작된 리본, 와이어, 박막에 대하여 실험을 실시한 결과 자계에 대한 고감도특성을 나타낸다는 것을 판명하였으며, 이중에

서 특히 와이어의 경우, 수십MHz의 구동주파수에서 약 130%/Oe의 고주파저항의 변화가 얻어지는 것을 명백하게 하였다. 1992년 일본의 나고야대학(Nagoya University)의 Mohri는 이 현상을 자기임피던스 효과(Magneto-Impedance effect)라는 명칭을 붙이고 고감도의 자계센서의 개발에 응용하면서[10] 전세계적으로 연구가 확산되었다. 이처럼 자기임피던스 효과를 이용한 자계센서의 연구는 비교적 짧은 역사를 가짐에도 불구하고 현재에는 차세대의 고감도 자계센서로서 각광을 받으며 세계적으로 폭 넓게 연구가 수행되고 있다. 미국과 유럽, 그리고 일본에서 이루어진 연구들을 종합하여 정리하면, 유럽과 미국에서는 몇몇의 응용에 대한 고찰[11-13]을 제외하고는 주로 물리적인 현상에 주안점을 두어 연구를 수행하고 있는 반면에[14-28], 이 센서의 활용을 제안한 일본에서는 주로 응용적인 면에 치중하여 연구를 수행하고 있다[29-41]고 보여진다. 다른 자기센서들에 비하여 극히 짧은 연구역사를 가짐에도 불구하고 자기 임피던스 효과를 이용한 자계센서가 이렇게 활발히 연구되고 있는 것은 이 센서가 여러가지 면에서 우수한 장점을 가지기 때문이다. 표 1은 현재 상온에서 사용되고 있는 주요한 자계센서들과 자기임피던스센서의 특성을 비교한 것이다. 표 1에서 알 수 있듯이 자기 임피던스센서는 비교되고 있는 자계센서 중에서 플럭스게이트 센서와 같이 가장 감도가 높고, 구조가 간단하므로 소형화가

표 1. 각종 자기센서의 성능비교.

자기센서	자화물질	감도	크기(소형화경향)	자화검출장치	소비전력	검출원리
플럭스게이트센서	강자성체 주로 퍼말로이나 아몰퍼스자성체	10^6Oe	코일사용으로 일반 적으로 수mm이상 최근 MEMS기술의 적용으로 소형화 진행중	자기쇄교코일	1-15W	비선형자화에 의한 고조파
홀소자자기센서	반도체 주로 Si, InSb	10^2Oe	반도체프로세스의 적용으로 소형화가 용이하고, 검출회로 일체화가 가능 보통 100 μW 이하	전압측정장치	수 μW	홀효과
자기저항(MR)센서	도체 혹은 강자성체 주로 퍼말로이박막	10^2Oe $0.1\%/ \text{Oe}$	100 μW 이하박막 권선코일이 없어 소형화에 적합	저항측정장치	10 mW	자화에 의한 전기저항 변화 전자의 스핀-궤도 상호작용
거대자기저항 (GMR)센서	강자성체 스핀밸브다층 박막	10^3Oe $1\%/ \text{Oe}$	100 μW 이하 박막 권선·코일이 없어 소형화에 적합	저항측정장치	10 mW	자화에 의한 전기저항 변화 반강자성결합의 자기구조가 전기 전도에 미치는 영향
자기임피던스 (MI) 센서	강자성체 주로 아몰퍼스자성체	10^6Oe $100\%/ \text{Oe}$	100(m이하 박막 권선코일이 없어 소형화에 적합	임피던스측정장치	10mW	자화에 의한 고주파임피던스의 변화

용이하며, 낮은 소비전력의 시스템을 구성할 수 있는 장점을 가지고 있다. 자기센서 중에서 가장 감도가 높은 것은 극저온의 초전도체를 이용하는 SQUID센서이지만, 극저온에서 구동되어야 하고, 시스템의 가격과 운용비 면에서 매우 불리하여 일반적인 용도로 사용하는 데에는 한계가 있다.

본 논문에서는 자기임피던스 효과를 이용한 자기센서의 작동원리와 특성, 자기임피던스 센서용 자성체재료, 그리고 최근의 연구동향 중 하나로 박막을 이용한 자기임피던스 센서에 대하여 설명한다.

2. 현상론적인 고찰

자왜가 극히 작은 조성의 아몰퍼스 자성체와 같이 연자성이 우수한 강자성체로 만들어진 소자의 둘레를 회전하는 방향으로 자화 프로세스를 야기하면서 고주파의 전류가 소자의 길이 방향으로 인가될 때, 소자의 임피던스가 외부에서 인가되는 자계에 대하여 민감하게 변화하는, 소위 자기임피던스 효과가 나타난다. 이러한 현상은 소자의 둘레방향으로 발생하는 자계에 의한 자화프로세스가 용이한 와이어형상[15, 20, 42.]에

대하여 주로 연구되어 왔으나, 리본형상[43, 44]과 박막형상[14, 29-34, 40, 41]에 대해서도 검증되었다.

외부자계에 의한 자성체의 고주파 임피던스의 변화는 우선 외부자계에 의하여 투자율이 변화함을 자성체 내부의 에너지를 Landau-Lifshitz의 운동방정식[45]에 적용시켜 고려한 후, 투자율과 고주파에서의 표피효과와의 관계로부터 임피던스를 도출하여 설명할 수가 있다.

실험에서 $1\text{A}/\text{mm}^2$ 이하의 작은 전류를 인가하므로 Joule 열은 크게 문제될 것이 없지만, 인가전류의 크기, 즉 자성체를 여자시키는 자계의 크기는 자화와 비선형관계를 나타내므로 여기서는 자성체 자화의 선형성이 유지되는 초투자율 영역에 한하여 기술한다. 그리고 자성체에 이상적인 일축이방성이 형성되어 있는 경우에는 바이어스 자화율[46]이론으로부터 투자율을 간단하게 계산할 수가 있다. 이 운동방정식을 선형화 및 단순화하기 위하여 이방성자계는 포화자화에 대하여 충분히 작을 것, 시료는 박막이나 리본과 같이 충분히 얇아서 반자계는 시료의 두께방향으로만 존재할 것, 감쇄계수가 충분히 작은 값일 것($a^2 \ll 1$), 자화관란축으로 여자할 것, 여자자계는 이방성자계에 비하여 충분히 작을 것 등과 같은 가정을 하고

있다. 자화의 운동을 표현하는 Landau-Lifshitz 방정식은,

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma(\vec{M} \times \vec{H}) - \frac{\lambda}{M_s} \{\vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{H})\} \quad (1)$$

이다. 여기서, 제동정수(Damping constant) ($\lambda = a \gamma M_s$ 이며, 이 때 a 는 길버트제동정수(Damping constant in Gilbert form)이고, γ 는 자이로자기정수(gyromagnetic Constant)로서,

$$\gamma = \frac{ge}{2m_e c} \quad (2)$$

와 같이 나타낼 수가 있다. 여기서, g 는 Lande spectroscopic splitting factor, e 는 전자의 전하량, m_e 는 전자의 질량, c 는 광속이다.

미소자계 h 를 인가할 때 응답하는 자화의 교류성분 $m = x h$ 이다. 여기서 자화율 x 는 텐서량이 되지만, 투자율을 여자자계 방향의 자속변화만으로 고려하면, 자화율은 여자자계 방향의 자화율만으로 고려할 수 있다.

여기서 자성체의 에너지 E 는 자기이방성에너지 E_k 계만 에너지 E_H , 정자계에너지 E_N , 자기탄성에너지 E_s 의 합으로 나타낸다.

$$E = E_k + E_H + E_N + E_s \quad (3)$$

시료의 자화 M 은 에너지 E 가 최소가 되는 방향을 향하면서 안정하게 된다. M 의 운동을 식(1)을 이용하여 풀면 다음과 같이 투자율을 구할 수 있고,

$$\begin{aligned} \mu &= \mu' - \mu'' \\ \mu' &= \frac{4\pi M \omega_o^2 (\omega_o^2 - \omega^2) \cos^2 \theta}{H_{eff} (\omega_o^2 - \omega^2)^2 + (4\pi \lambda \omega)^2} \\ \mu'' &= \frac{4\pi M \omega_o^2 4\pi \lambda \omega \cos^2 \theta}{H_{eff} (\omega_o^2 - \omega^2)^2 + (4\pi \lambda \omega)^2} \\ \omega_o &= 4\pi \gamma^2 M H_k \{ \cos 2(\theta) + \frac{H}{H_k} \sin \theta \} \end{aligned} \quad (4)$$

와 같이 된다. 식(4)에 의해 강자성공명에 대한 투자율을 구할 수 있고, 시료의 자기이방성 분산을 고려하는 경우에는,

$$\mu_d = \iint \mu F(H_k) G(\beta) dH_k d\beta \quad (5)$$

로 투자율을 표현할 수 있다. 여기서, $F(H_k)$ 는 자기이방성의

강도분산을 나타내는 함수이며, $G(\beta)$ 는 각도분산을 나타내는 함수이다. 또한 와전류손실이 있는 경우에는,

$$\mu_e = \frac{\sinh \theta + \sin \theta}{\theta (\cosh \theta + \cos \theta)} \mu_d \quad (6)$$

과 같이 투자율을 나타낼 수가 있다. 이상의 고찰로부터 외부자계가 인가되면 자성체의 투자율이 변화됨을 알 수 있다. 투자율의 변화로부터 임피던스의 변화는 고전적인 전자기학적인 관점으로부터 쉽게 유도할 수 있다. 변위전류를 무시하면 맥스웰 방정식은,

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} &= \vec{J} \end{aligned} \quad (7)$$

이다. 식(7)으로부터 전압과 전류를 구하면 임피던스 Z 를 계산할 수가 있다.

$$\begin{aligned} Z &= \frac{V}{I} = \frac{k \rho l}{2\omega} \coth\left(\frac{kt}{2}\right) \\ k &= \frac{1+j}{\delta} \\ \delta &= \sqrt{\frac{2\rho}{\omega \mu}} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, δ 를 표피두께(Skin depth)라고 하고, ρ 는 자성체의 전기저항율이다. 식(8)로부터 소자의 투자율이 변화하면 표피두께가 변화하고 따라서 임피던스가 변화함을 알 수가 있다.

일반적으로, 연자성이 우수한 아몰퍼스 자성체인 경우, 투자율은 수Oe의 외부자계에 의해서 수천%이상의 변화를 나타낼 수 있기 때문에 임피던스도 수백%의 변화율을 나타낼 수가 있다.

3. 자기임피던스센서용 재료

현상론적인 고찰로서 명확히 알 수 있듯이 외부자계에 대한 임피던스의 민감한 변화를 나타내게 하기 위해서는 외부자계에 대하여 투자율이 민감하게 변화하는, 즉 연자성이 우수한 재료가 유리하다. 아몰퍼스 자성체는, 특히 자왜가 극히 작은 조성의 아몰퍼스 자성체는 자벽의 움직임을 방해하는 결정입계가 존재하지 않으며, 연자성 저하의 원인이 되는 결정자기이방성이 존재하지 않으므로 이상적인 연자성체라고 할 수 있으며, 비선형성이 극히 작은 우수한 센서용 재료라고 할 수 있다.

표 2. 일반적인 연자성 박막재료의 자기적 특성.

Composition	ρ ($\mu\Omega$ cm)	B_s (kG)	H_c (Oe)	μ_r /Frequency
Fe-Ni(Permalloy)	25	10	0.2	3000/1MHz
Fe-Si-Al(Sendust)	90	11	0.2	2000/5MHz
Co-Nb-Zr	120	10	0.2	3000/10MHz
Fe-Hf-C(Nanomax)	68	17	0.1	4300/10MHz
Fe-Cu-Nb-Si-B	110	13.5	0.08	16000/10MHz
Co-Fe-Si-B	134	8	0.006	100000/1kHz
Co-Fe-Ni-Si-B	-	5.4	0.002	120000/1kHz
Fe-Si-N	85	18	0.8	3500/10MHz

다. 그리고 자장중 열처리 등을 통하여 쉽게 자기이방성을 제어하여 센서의 특성을 제어할 수가 있다. 또한 아몰퍼스 금속으로서 우수한 기계적인 특성[47, 48]과 화학적인 특성[48]을 가지고 있으므로 센서를 구성하는 재료로서 적합하다고 볼 수 있다. 일반적으로 아몰퍼스 자성체는 제작 직후 재료에 포함되는 스트레스나 이방성의 분산으로 인하여 최적의 연자성이 얻어 지지 않는 경우가 많다. 아몰퍼스 자성체의 우수한 연자성 특성을 발휘시키기 위한 방법으로, 자왜가 거의 나타나지 않는 조성을 선택하는 방법[49, 50]과 정자계 중에서의 열처리를 통하여 연자성을 개선하고 자기이방성을 유도하는 방법[51] 등이 사용될 수 있다. 진공이나 불활성 가스분위기 중에서 열처리를 실시하는 것이 일반적인 방법이나, Joule 발열을 이용하여 열처리를 실시할 수도 있다[52, 53]. 자기임피던스 센서의 경우, 센서의 감도는 자성체의 연자성에 의해 민감하게 변화하게 되므로 열처리를 통한 연자성의 개선은 중요한 과제라고 볼 수 있다. 이러한 상황에 의해 열처리에 의한 자기임피던스 효과의 개선이나 변화 등이 몇몇 연구자들에 의해서 조사되었다[43, 54, 55].

자기임피던스 센서에서는 자성체의 연자성이 우수하여 외부 자계에 의한 민감한 투자율의 변화를 나타낸다면 식(8)에 의해 표피두께와 임피던스가 민감하게 변화하게 되므로, 임피던스의 변화율을 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$\frac{\Delta Z}{Z} \propto \sqrt{\rho\mu} \quad (9)$$

따라서, 아몰퍼스 자성체가 아니더라도 우수한 연자성을 가지고 있다고 한다면 자기임피던스 센서를 구성하는 재료로서 사용될 수가 있다. M. Carara 등은 철심재료로 널리 사용되는 FeSi_{33%}의 자기임피던스 효과를 조사하여, 외부자계에 의해 약 350%의 임피던스 변화를 관찰하였다[56]. M. Knobel 등은 아몰퍼스 자성체의 미결정화가 따르는 자기임피던스 효과

에 미치는 영향에 대하여 조사하였다[57]. M. Vazquez 등은 퍼말로이 와이어의 자기임피던스 효과를 측정하고 퍼말로이가 자기임피던스 센서를 구성하는 재료로서 유용함을 입증하였다[58]. 연자성이 우수한 퍼말로이 등의 금속자성체의 응용은, 박막으로 소자가 구성되었을 때, 전기저항이 아몰퍼스에 비하여 낮으므로 비교적 얇은 두께로도 표피효과를 얻을 수 있어, 박막을 얇게 하여도 자기임피던스 효과가 충분히 나타난다는 장점이 있어 향후의 활발한 연구가 기대된다. 표 2는 자기임피던스 센서의 구성에 사용이 가능한 박막자성 재료들과 그의 특성을 나타낸 것이다.

4. 아몰퍼스 박막자성체를 이용한 마이크로 자기임피던스 센서

현재까지 자기임피던스 센서는 와이어, 리본 등의 벌크재료를 이용하여 구성된 것과 박막패턴을 이용하여 구성된 것이 연구되어 왔다. 센서를 박막화하면 다음과 같은 이점이 생긴다.

- A. 리소그래피를 이용한 패턴닝으로 자유로운 형상으로 센서를 구성할 수가 있다.
- B. 동일한 특성의 센서를 용이하게 제작할 수가 있다. 즉, 재현성이 좋아진다.
- C. 소자를 소형화할 수 있다.
- D. 구동회로와 함께 집적화가 가능해 진다.
- E. 대량생산에 적합하다.

자기센서는 센서소자 이외에도 제어부나 신호처리부 등의 주변회로에 의해 구성된다. 최근에는 센서를 반도체회로로 구성된 주변회로와 함께 원집화하려는 연구도 진행되고 있다.

자기임피던스 센서에 대한 박막화 연구의 한 예로서 일본동북대학의 연구그룹의 연구결과를 소개한다. 센서용 박막으로는 아몰퍼스의 CoZrNb박막을 선택하였고, 스파터링으로 성막한 후, 진공 자장 중 열처리를 통하여 연자성의 개선과 함께 이방성을 제어하였다. 열처리 후, 박막의 자기적인 특성을 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 알 수 있듯이, 보자력은 약 0.1Oe, 이방성자계는 약 6Oe로 양호한 연자성이 얻어졌다. 그림 2는 제작된 박막의 투자율의 외부자계 의존성을 나타낸 것이다. 그림 1에서 보여준 이방성자계 부근에서 투자율이 최대가 됨을 알 수 있고, 수 Oe정도의 작은 자계의 인가로 투자율이 민감하게 변하고 있다. 그림 3은 두께 5μm의 박막을 폭 100μm, 길이 5mm로 미소가공한 박막패턴 소자에 대한 임피던스의 외부자계의존성을 나타내고 있다. 이 패턴은 현재 브리지타입으로 되어 그림 4와 같이 주변회로와 일체화된 센서로 제작되었다. 이 센서는 현재 고급 텔레비전의 외란자계 보상용으로 연구되고 있다.

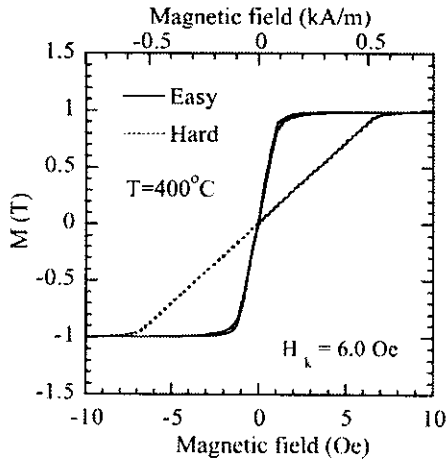


그림 1. CoZrNb 박막의 열처리 후 자기적 특성.

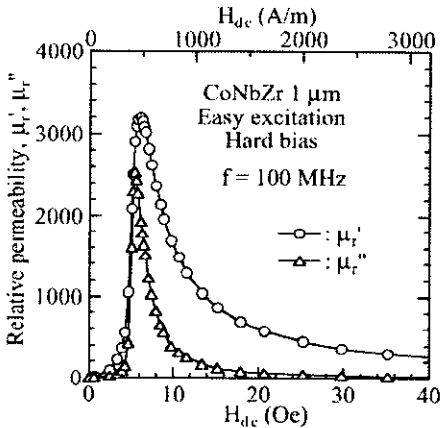


그림 2. CoZrNb 박막의 투자율의 외부자계의존성.

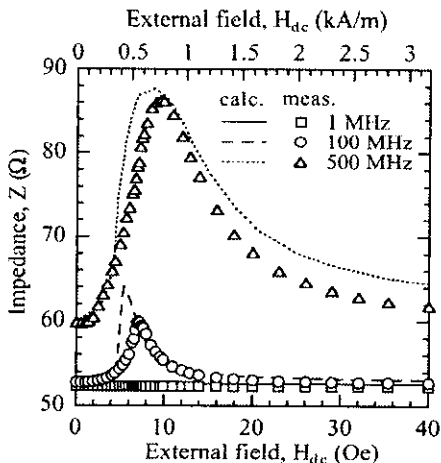


그림 3. 박막의 투자율의 외부자계의존성.

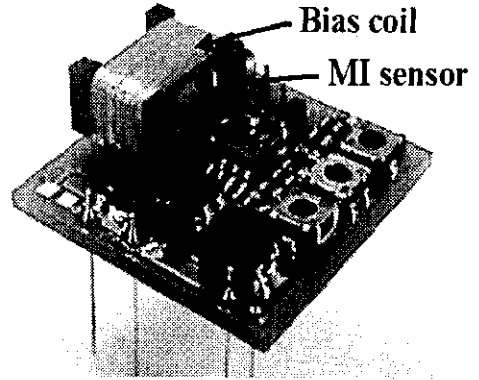


그림 4. 주변회로와 일체화된 박막센서.

5. 자기임피던스센서의 응용

자기센서는 하드디스크 등의 자기기록매체의 정보를 재생하는 용도나 일반적인 자계의 측정 이외에도 전선의 전류에 의해 발생하는 자계를 측정하여 전류치로 환산하는 전류센서, 자기센서와 영구자석의 상대적 위치변화를 감지하는 무접점 스위치, 영구자석의 회전각이나 슬라이딩 거리를 측정하는 포텐션미터, 모터의 회전속도제어에 이용되는 자기식 엔코더, 자동판매키에서 지폐를 감지하는 자기패턴 검출기 등에 널리 사용되고 있다. 고감도의 자기센서에 대한 수요는 많은 공학 분야에 있어서 급속히 증가하고 있다. 그 대표적인 수요를 나열하면 표 3과 같다. 그림 5는 2000년 4월에 상품화되고 일본의 Canon전자주식회사에서 개발한 자기인쇄 매체의 자기패턴 인식용 자기임피던스 센서를 나타낸 것이다. 종래의 MR센서보다 10배 정도 감도의 향상이 달성되었고, 온도특성이 우수하여 안정된 동작이 보장되고 있다.

일본의 철강회사로서 유명한 AICHI제강 주식회사는 일본 과학기술 진흥사업단으로부터 지원을 받아 수행한 자기임피던

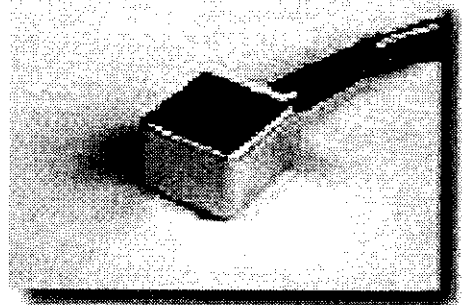


그림 5. Canon에서 개발한 자기임피던스센서.

표 3. 자기임피던스센서의 응용분야.

응용분야	사용센서
컴퓨터 및 정보기기분야	하드디스크나 플로피디스크 등의 정보저장매체의 재생용헤드와 드라이브모터용 회전각도센서, 고성능 CRT용 외란자계측정용 센서 등
전력전자 및 전기기기분야	인버터구동용 전류센서, 전력계통제어용 전류센서, 유도모터의 2차전류센서, 영상전류센서, 변압기의 누설전류센서, 컨버터의 역률개선용 전류센서 등 ITS용 자동차 감지용 자계센서, 내비게이션용 자계센서(방위센서, 차량속도센서), ABS용
자동차 및메카닉스분야	타이어회전센서, 가속도센서, 차고(車高)센서, 토오크센서, 로보트용 가속도센서, 자기식 로타리엔코더 등
비파괴검사 및 철강검사용	철판의 편홀 및 불순물 검사용 센서시스템, 구조강의 균열센서, 구조강의 점성변형 측정시스템, 와이어로프평가시스템 등
의용생체계측분야	심장신호검출용센서, 뇌종양위치판정센서, 안구피로센서, 맥박검출센서, 뇌자계센서, 심장자계센서 등
공업계측분야	변위센서, 진동센서, 압력센서, 거리센서, 온도센서, CAD테이블렛 등
환경 및 안전분야	휴대용 지자계센서, 지자계변화 모니터(지진예보, 분화예보)용 센서, 보안용 센서, 지폐판별용센서, 환경전자파 감시용 센서, 암석자기센서, 선박센서 등
자동화분야	자기카드리더, 자동판매기용 지폐센서, 자기식 바코드 리더, 자기식 테이블렛, GPS용 방위센서 등

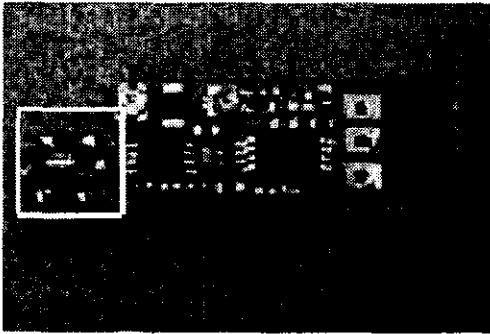


그림 6. 아이치마이크로인텔리전트사에서 개발한 센서시스템.

스 센서의 연구결과를 토대로 현재 월생산량 만개의 파이렛 라인용 정비하고 있다. 이 결과 기존의 자기센서(MR센서 등)에 비해 가격 면에서도 뒤지지 않는 생산능력을 가지게 되었고, 5년 후에는 약 30억엔 이상의 매출을 목표로 하여 2000년 12월 아이치 마이크로 인텔리전트 주식회사를 설립하였다. 이 회사는 자기임피던스 센서의 응용제품 개발을 목적으로 하고 있다. 그림 6은 이 회사에서 개발한 센서시스템을 나타낸 것이다.

6. 결 론

자기임피던스센서의 연구현황, 구동원리에 대한 현상론적인 고찰, 센서용 재료에 대한 개관, 박막화, 그리고 최근의 응용 동향 등을 서술하였다. 이 센서는 제안된 지가 약 10년밖에 되지 않았으나, 이미 실용화를 눈앞에 두고 있을 만큼 급속하게 연구개발이 진전되었다. 그 이유는 센서의 구동원리나 구조가 비교적 간단하다는 것과 특히 자계선서로서 극히 우수한 특성들을 가지기 때문이라고 볼 수 있다. 앞으로 이 센서에 대한 연구는 이 센서를 이용하는 응용연구와 박막화와 일체화에 대한 연구, 그리고 다른 정보처리 디바이스와의 결합으로 새로운 원리의 고기능성 디바이스를 창출하는 연구가 이루어질 것으로 예상되어 진다.

참 고 문 헌

- [1] E. P. Harrison, G. L. Turney, H. Rowe, and H. Gollop : Proc. Roy. Soc., 157, 172(1937).
- [2] 今津信吾, 強磁性体の表皮効果によるインビダンス制御回路, 特願(일본특허) 昭36-41615.
- [3] 津屋昇, 荒井賢一, インダクタンスを含む電子装置.

特願(일본특허) 昭52-66609.

- [4] D. F. Othmer, J. Pipeline, 1, 113(1981).
- [5] 沼澤茂, 村上孝一, 北条博行 : 日本応用磁気學會誌, 9, 263(1985).
- [6] M. Yamaguchi, A. Hayasaka, K. Horizaki, K. Murakami, H. Hojo : IEEE Trans. Magn., 23, 2206(1987).
- [7] M. Yamaguchi, H. Matsuki, K. I. Arai, and K. Murakami : IEEE Trans. Magn., 25, 3824 (1989).
- [8] 加茂芳, 島田寛, 第13回日本応用磁気学会學術講演会概要集, 23aD-6(1989).
- [9] 加茂芳, 島田寛, 日本電気学会マグネテックス研究会資料, MAG-90-111, .35, (1990).
- [10] K. Mohri, T. Kohzawa, K. Kawashma, H. Yoshida and L. V. Panina : IEEE Trans. Magn., 28, 3150(1992).
- [11] R. Valenzuela, J. J. Freijo, A. Salcedo, M. Vazquez, and A. Hernando : J. Appl. Phys., 81(8), 4301(1997).
- [12] M. Vazquez, M. Knobel, M. L. Sanchez, R. Valenzuela, A. P. Zhukov : Sensors and Actuators A, 59, 20(1997).
- [13] M. Vazquez, and A. Hernando : J. Phys., 29, 939(1996).
- [14] R. L. Sommer and C. L. Chien : Appl. Phys. Lett., 67 (22), 3346 (1995).
- [15] R. L. Sommer and C. L. Chien : Appl. Phys. Lett., 67 (22), 857 (1995).
- [16] R. L. Sommer and C. L. Chien : Phys. Review B, 53(10), R5982(1996).
- [17] D. P. Makhnovskiy, A. S. Antonove, A. N. Lagar'kov and L. V. Panina : J. Appl. Phys., 84(10), 5698 (1998).
- [18] N. A. Usov, A. S. Antonov and Lagar'kov : J. Mag. Mag. Mater., 186, 159(1998).
- [19] M. Knobel, M. L. Sartorelli, and J. P. Sinneck-er : Phys. Review B, 55(6), R3362(1997).
- [20] K. V. Rao, F. B. Humphrey, and J. L. Costas-Kramer : J. Appl. Phys., 76(10), 6204(1994).
- [21] R. Valenzuela, M. Knobel, and A. Hernando : J. Appl. Phys., 78(8), 5189(1995).
- [22] J. Pokorny, L. Kraus : Sensors and Actuators A, 59, 65(1997).
- [23] D. X. Chen, J. L. Munoz, A. Hernando, and M. Vazquez : Phys. Review B, 57(17), 10699 (1998).
- [24] A. Yelon, D. Menard, M. Britel, and P. Ciureanu : Appl. Phys. Lett., 69(20), 3084(1996).
- [25] A. Yelon, M. Britel, D. Menard, and P. Ciureanu : Physica A, 241, 439(1997).
- [26] D. Merard, M. Britel, P. Ciureanu, and A. Yelon : J. Appl. Phys., 84(5), 2805(1998).
- [27] F. L. A. Marchado, C. S. Martins, and S. M. Rezende : Phys. Review B, 51(6) 3936(1995).
- [28] R. S. Beach and A. E. Berkowitz : J. Appl. Phys., 76(10), 6209(1994).
- [29] M. Senda, K. Takei, O. Ishii, and Y. Koshimoto : Technical Report of IEICE, MR95-80, 23(1995).
- [30] M. Senda, K. Takei, O. Ishii, and Y. Koshimoto : IEEE Trans. Magn., 31(6), 2709(1995).
- [31] M. Senda, K. Takei, O. Ishii, and Y. Koshimoto : IEEE Trans. Magn., 32(5), 3485(1996).
- [32] M. Senda, and Y. Koshimoto : IEEE Trans. Magn., 33(5), 2709(1997).
- [33] T. Morikawa, Y. Nishibe, H. Yamadera, Y. Nonomura, M. Takeuchi, J. Sakata, and Y. Taga : IEEE Trans. Magn., 32(5), 4965(1996).
- [34] T. Morikawa, Y. Nishibe, H. Yamadera, Y. Nonomura, M. Takeuchi, and Y. Taga : IEEE Trans. Magn., 33(5), 4367(1997).
- [35] L. V. Panina, K. Mohri, T. Uchiyama, and M. Noda : IEEE Trans. Magn., 31(2), 1249(1995).
- [36] T. Uchiyama, K. Mohri, L. V. Panina, and K. Furuno : IEEE Trans. Magn., 31(6), 3184(1995).
- [37] K. Hika, L. V. Panina, and K. Mohri : IEEE Trans. Magn., 32(5), 4594(1996).
- [38] T. Uchiyama, K. Mohri, M. Shinkai, A. Ohshima, H. Honda, T. Kobayashi, T. Wakabaayshi, and J. Yoshida : IEEE Trans. Magn., 33(5), 4266(1997).
- [39] T. Kanno, K. Mohri, Y. Yagi, T. Uchiyama, and L. P. Shen : IEEE Trans. Magn., 33(5), 3358(1997).
- [40] M. Takezawa, H. Kikuchi, K. Ishiyama, M. Yamaguchi, and K. I. Arai : IEEE Trans. Magn., 33(5), 3400(1997).
- [41] M. Takezawa, H. Kikuchi, K. Suezawa, M.

저 자 약 령

Yamaguchi, K. Ishiyama, and K. I. Arai : IEEE Trans. Magn., 34(4), 1321(1998).

- [42] L. V. Panina, K. Mohri, Appl. Phys. Lett., 65, 1189(1994).
- [43] W. Ku, F. Ge, and J. Zhu : J. Appl. Phys., 28(10), 5050(1997).
- [44] M. L. Sartorelli, M. Knobel, and J. Schoenmaker : Appl. Phys. Lett., 71(15), 2208(1997).
- [45] L. D. Landau, and E. M. Lifshitz : Electrodynamics of Continuous Media(2nd Ed.), Pergamon Press, 199 (1984).
- [46] D. O. Smith : J. Appl. Phys., 29, 264(1958).
- [47] M. Hagiwara : Current Topics in Amorphous Materials ed. by Y. Hamakawa, T. Masumoto, K. Shirae, and K. Suzuki, 191(1993).
- [48] 増本健, 深道和明 : アモルファ스合金, アグネ(1981).
- [49] M. Kikuchi, H. Fujimori, Y. Obi, and T. Matsumoto : Jpn. J. Appl. Phys., 13, 1077(1974).
- [50] O. Kumoto, and K. Ohya : J. Appl. Phys., 52, 928(1981).
- [51] F. E. Luborsky, and J. L. Walter : IEEE Trans. Magn., MAG-13, 953(1977).
- [52] T. Jagielinski : IEEE Trans. Magn., MAG-19, 1925(1983).
- [53] A. Houzli, F. Alves, J. C. Perron, and R. Barre : Rev. Sci. Instrum., 66, 4671(1995).
- [54] R. L. Sommer, C. L. Chien, and R. Hasegawa : J. Appl. Phys., 79(8), 6117(1996).
- [55] S. U. Jen, and Y. D. Chao : J. Appl. Phys., 79(8), 6552(1996).
- [56] M. Carara, and R. L. Sommer : J. Appl. Phys., 81(8), 4107(1997).
- [57] M. Knobel, M. L. Sanchez, P. Marin, C. Gomez-Polo, M. Vazquez, and A. Hernando : IEEE Trans. Magn., 31(6), 4009(1995).
- [58] M. Vazquez, J. M. Garcia-Beneytez, and J. P. Sinnecker : J. Appl. Phys., 83(11), 6578 (1998).

성명 : 김 영 학

❖ 학 령

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

❖ 경 령

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

- 전공분야 : 전자공학
- 관심분야 : 정보자기소자 및 자기계측
- e-mail : kimyh@pknu.ac.kr

성명 : 신 광 호

❖ 학 령

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

❖ 경 령

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

- 전공분야 : 전기통신공학
- 관심분야 : 마이크로 디바이스
- e-mail : khshin@star.kyungsung.ac.kr