

비정질합금 자기센서

노태환

안동대학교 공과대학 금속공학과
경북 안동시 송천동 388 번지

(1997년 8월 20일 받음)

I. 서 론

컴퓨터를 포함하는 정보통신기기를 비롯하여 TV, VTR, 세탁기 등의 가전기기, 자동차와 항공기 등의 수송기기, 생물 환경 계측기기, 안전 보안기기 등 이루어 헤아릴 수 없는 각종 전자, 기계장비에 광 적외선 센서, 자계 자속 센서, 위치 변위 센서, 역학량 센서, 온도 센서, 응력 센서 등 다양한 센서가 사용되어 기기의 정밀성, 자동화, 신뢰성 및 안정성 등을 획기적으로 향상시키고 있으며, 그 외에 공장생산 현장의 능률 제고와 정밀도의 향상, 안전 쾌적성의 확보, 정보교환 및 전달의 고도화, 일상생활의 고도 시스템화, 사회복지의 구현 등에도 큰 기여를 하고 있다. 그런데 이러한 흐름은 앞으로도 계속되어 전자공학을 필두로 하여, 전력공학, 메카트로닉스 분야와 의공학, 공업계측공학 등의 발전을 기초로 하여 산업 및 사회시설의 자동화, 무인화 및 정보화가 빠르게 진전됨에 따라 다양한 센서에 대한 수요가 크게 늘 것으로 예측되고 있다.

현재 상기 언급된 모든 기기 분야는 시스템의 고도화, 지능화가 중요한 기술목표가 되고 있다. 이와 같은 지능화 계측 제어 시스템은, 센서(정보검출)-마이크로 컴퓨터(정보의 처리, 명령)-액츄에이터(명령에 의한 구동 제어)-피제어대상 으로의 순환계통으로 구성되어 있으며, 그 실현의 핵심기술이 고성능 센서의 개발이다. 즉 계측 제어기술의 고도화 및 지능화가 이 분야의 중심적 기술 테마이며 이를 실현하기 위해서는 시스템이 환경의 변화에 대응하여 생물기능적으로 동작할 필요가 있는바 이러한 시스템의 감각기능을 맡는 것이 센서이므로 이의 중요성을 깊이 인식하는 것은 당연하다 하겠다.

지금 사용중에 있거나 개발중인 센서로는 자성체 센서를 비롯하여 반도체, 유전체 센서 등 그 종류가 많이 있으나 이들을 공업용 로봇 및 자동차, 모터, 동작기

계 등의 광범위한 전기 기계 분야에서 널리 사용하기 위해서는 대략 다음과 같은 조건을 만족시킬 필요가 있는 것으로 알려져 있다 [1].

- ① 가능한 비접촉 방식으로 정보를 검출할 수 있을 것.
- ② 고감도일 것(예를 들어 최소한 0.1 μG 의 자계, 0.1 μA 의 전류, 0.1 μm 의 변위, 0.1 mg의 하중의 검출 등이 가능할 것).
- ③ 고속응답성(DC~50 kHz)이 우수할 것.
- ④ 고신뢰성이 확보될 것. -50~150 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도변화, 기계적 진동, 전자기적 교란, 습도변화 등의 외적 환경으로부터 목적하는 정보만 안정하게 검출하는 능력을 보유할 것
- ⑤ 높은 온도안정성(0.05 % FS / $^{\circ}\text{C}$ 이하의 변동률)을 가지고, 최고 사용온도가 최소한 150~180 $^{\circ}\text{C}$ 정도 될 것.
- ⑥ 높은 내충격성과 내식성을 가질 것.
- ⑦ 소형경량으로 휴대 가능하며, 이를 위해 작은 센서부(직경 1 mm 이하)를 가질 것.
- ⑧ 성능/가격 비가 클 것.

현재 이러한 조건에 대하여 퍼멀로이, 페라이트, 초전도체, 자기저항물질 등을 포함하는 자성체와 반도체, 유전체 및 기타 물질중에서 많은 소재의 대응 가능성이 검토될 수 있으나, 상술한 조건들을 모두 만족하는 것으로서 비정질 자성체가 최적인 것으로 평가되고 있다. 대략적으로 보아 반도체 센서는 온도안정성과 사용온도의 면에서(예를 들어 홀소자의 경우 70 $^{\circ}\text{C}$ 이상에서는 사용불가) 크게 불리하고, 결정질 자성체는 응답성의 면에서 문제가 크며 페라이트는 응답성은 양호하나 온도안정성이 대단히 불충분하다. 유전체도 반도체와 마찬가지로 재료적 견고성에서 문제가 있다.

Table I은 비정질합금의 센서소재로서의 상대적 기능성을 페라이트를 비롯하여 퍼멀로이, 초전도 재료와 대략적으로 평가 비교해 보인 것이다.

Table I. Evaluation of several magnetic materials for sensor construction.

| materials | amorphous alloy | supermalloy | ferrite | superconductor |
|--|-----------------|-------------|---------|----------------|
| sensitivity | ○ | ○ | × | ⊕ |
| response | ○ | × | ○ | ○ |
| max. operating temperature, robustness | ○ | ○ | × | × |
| compactness, miniaturization | ○ | △ | ○ | × |
| reliability | ⊕ | △ | △ | × |

⊕ very good, ○ good, △ medium, × no good

II. 센서용 비정질합금의 특성

고성능 센서소재 재료로서 그 중요성이 확립되어 가고 있는 비정질 자성합금(리본, 와이어, 박막, 분말 등)은 다음과 같은 소재 특성을 가진다 [2].

- ① 비정질합금은 근본적으로 결정이방성이 없어서 회전 자화율이 높아 대단히 미약하고 변화 속도도 빠른 자계도 용이하게 검출하는 고감도 자기센서 소재가 될 수 있다. 또 전기저항율이 120~160 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 로 높아 퍼머로이 및 규소강의 3~4 배에 이르며, 또 비정질합금 리본의 경우 두께가 아주 얇고 와이어는 가늘어 와전류손실이 대단히 작으므로 자심을 수 MHz대의 고주파까지 여자시킬 수 있어 고속응답성이 있는 센서의 구성이 가능하다.
- ② 코발트계 영자기변형재료는 회전자화율이 대단히 크고 외부응력에 민감치 않으며 내식성이 좋다. 그리고 전기저항이 크고 큐리온도가 높아 외부환경에 의한 교란이 대단히 적다.
- ③ 고자기변형 조성 합금은 포화자기변형 상수가 30~40 $\times 10^{-6}$ 으로 크고 자기이방성차수 K 가 작으며 포화 자속밀도가 1.5~1.6 T 로 높기 때문에 자기변형효과 및 자기변형의 역효과가 현저하여 ($\lambda_s B_s / K$ 가 Ni 및 TbFe 등 결정질 고자기변형 합금의 100 배 이상) 민감한 응력센서의 소재가 된다. 또 자기변형과(초음파)의 발생효율이 현저히 높고 거기다 결정입계에 의한 전달 감쇄가 없기 때문에 적절한 바이어스 자장을 가하면 1 m 정도라면 감쇄없이 자기변형과를 전환 수 있다. 단 이 합금의 내식성 및 기계적 신뢰성을 확보하기 위해서는 Cr 등의 첨가가 필요하다.
- ④ 고자기변형 비정질합금 와이어는 급냉 상태에서 대바 크하우젠 효과와 마테우치 효과를 나타내어, 미소교류

자계(0.1 Oe 이상)에 대하여 0.01 Hz~50 kHz 정도의 범위에서 동작주파수에 관계없이 날카로운 펄스 전압을 유기한다.

- ⑤ 피아노선 이상의 인장강도를 가지는 강인 탄성체이므로, 예를 들어 비정질합금 와이어의 경우 자기적 성질의 큰 손상 없이 마이크로 검출코일을 직접 와이어상에 감을 수 있으며 센서자심을 보호하는 별도의 장치가 불필요하다.
- ⑥ 비정질합금 와이어의 경우 길이 방향으로 자기적 층상 구조를 이루어 독특한 기능을 발휘한다. 즉, 길이방향 및 원주방향으로 대단히 균일하며 반경방향으로 다른 자기구조를 가져 중심내부와 표면외각부에서 서로 상이한 자기효과를 가진다.

본고에서는 이상과 같은 특성을 가지는 비정질합금의 종류, 센서 원리 그리고 구체적 응용 등에 대하여 개관한다.

III. 센서용 비정질 합금의 종류

센서용으로 사용되는 비정질합금은 크게 와이어, 리본, 박막 및 비정질합금 피막이 형성된 복합재 등 다양한 형상으로 제조된다. 나아가 리본은 압연 또는 엠틈에 의해 수 마이크로 두께까지 박편화가 가능하며, 와이어는 냉간 신선에 의해 직경을 10 마이크로 정도까지 가늘게 만들어 각각 고주파에서 동작하는 센서 자심을 구성할 수 있다. 현재 비정질합금에 의한 센서는 이들의 다양한 형상효과를 살려 여러 종류가 제작되고 있다. Table II는 센서용 비정질합금의 형상, 가공 및 센서응용 분야 등을 정리한 것이며, 이들은 향후 MHz 의 고주파 동작이 가능한 마이크로화 집적화된 센서로 진전되어 나갈 것으로 예상된다.

Table II. Amorphous alloys for sensor use.

| shape | dimension | fabrication | applications | compositions |
|-----------|--|---------------------------------------|---|-------------------|
| ribbon | 15~30 μm t 0.1~200 μm w | melt spinning (single roll technique) | magnetic head cartridge torque sensor data tablet magnetic-field sensor current sensor | CoFeMSiB FeSiB |
| wire | 90~160 μm ϕ | in-rotating water melt quenching | magnetic-field sensor current sensor security sensor rotation sensor displacement sensor | CoFeMSiB |
| thin film | 500~4000 Å t | sputtering | pressure sensor magnetic head | FeB CoFeMSiB |
| composite | 10~30 μm t | laser-quenching | torque sensor | FeBSi |

비정질합금의 조성은 리본, 와이어에서는 영자기변형의 코발트계 CoFeMSiB (M = Ni, Nb, Mn 등) 합금이 널리 사용되고 있고 고자기변형 재료로는 철계의 FeSiB 합금이 데이터 타블렛용 센서 소자, 압력 센서 등으로 실용화되었다.

IV. 센서특성과 관련된 자기효과

비정질합금이 센서소자로서 우수한 특성을 발휘하는데에는 그 기초가 되는 여러가지 중요한 자기효과가 존재한다. 여기서는 그의 대표적 자기효과와 기초 이론과 비정질 자성체 센서와의 관련성을 정리해 본다.

1. 자기변형효과

강자성체는 본질적으로 자화의 방향으로 변형되어 있으며, 외부자계를 인가하여 자화방향을 회전시키면 그 물질은 자계의 방향으로 다시 외부 치수가 변화한다. 이와 같이 자계로 인하여 자성체의 외형이 변화하는 현상이 자기변형효과(magnetostrictive effect)이다.

따라서 가늘고 긴 시료의 한 쪽 끝에 코일을 감고 펄스 전류를 인가하면 자기변형효과가 나타나 시료의 길이방향으로 자기변형효과가 발생하여 전과된다. 비정질합금을 등방적 자기변형재료로 가정하고 자계의 변화 ΔH 를 주어 자화 벡터 M 을 회전시킬 때 나타나는 시료의 변형의 변화량은 다음의 식으로 주어진다 [3].

$$\Delta(\delta l/l) = (3\lambda_s M_s/2 K_u) \sin^2 \theta \cos \theta \Delta H \quad (1)$$

여기서 λ_s 는 포화자기변형상수이고 M_s 는 포화자화, K_u 는 일축자기이방성상수, θ 는 자계와 자화가 이루는 각도이다. 이 식에서 보듯이 자화상태가 바뀌면서 나타나는 자기변형의 변화는 λ_s 만으로 정해지는 것이 아니고 대략 $\lambda_s M_s/K_u$ 의 크기로 주어진다.

2. 자기변형의 역효과

자성체의 자화상태가 바뀌면 변형이 일어나는 자기변형효과와는 반대로, 자성체에 응력(σ) 또는 변형을 가하면 자화가 변화하는데 이러한 현상을 자기변형의 역효과(inverse magnetostrictive effect)라고 한다. 응력의 변화 $\Delta \sigma$ 에 대한 자화의 변화 ΔM 은 자화 회전의 경우 다음 식으로 주어진다 [4].

$$\Delta M = (3\lambda_s M_s/2 K_u) \sin^2 \theta \cos \theta \Delta \sigma \quad (2)$$

따라서 이 원리를 이용하면 외부에서 가해지는 힘 또는 변형의 크기를 자화의 함수로써 검출할 수 있으며, 이에 사용될 소재로는 고자기변형의 강인성 비정질합금이 적절할 것으로 평가되고 있다.

3. 자기변형과 발생 효과

가늘고 긴 고투자율 재료의 한 쪽 끝에 자계변화 dH/dt 를 인가하면 (1)식에서 $d(\delta l/l)/dt$ 에 의한 탄성파가 발생한다. 이 탄성변형은 시료의 길이 방향으로 전파해 가며 응력변화 $d\sigma/dt = E d(\delta l/l)/dt$ 를 발생시키고, 식 (2)에 의해 임의의 장소에서 자화변화 dM/dt 가 유도된다. 따라서 (1) (2)식에 의해

$$dM/dt = E\alpha(3\lambda_s M_s/2 K_u)^2 \sin^4 \cos^2 \theta dH/dt \quad (3)$$

로 되어 회전자화에 의한 등방성 자기변형재료의 자기변형과 전파의 관계식이 얻어진다. 한편 이 식의 α 는 자기변형과 강도의 감쇄율을 가리킨다. 여기서 비정질합금과 같은 결정자기이방성이 없는 재료에서는 K_u 는 잔류응력(σ_r)이 존재할 경우 $K_u = (3/2)\lambda_s \sigma_r$ 로 주어진다.

자기변형과 전파속도(v_e)는 영률(E)과 $v_e = \sqrt{E/\rho}$ 의 관계를 가지므로, 자화상태에 의해 영률이 변화하는 ΔE 효과에 의해 자기변형과의 전파경로를 따라 자계를 인가하면 이의 전달속도(4~5 km/s)를 가변시킬 수 있다. (ρ : 밀도)

4. 대마크하우젠 효과

고투자율 자성체에 대단히 큰 잔류응력이 있는지 와이어 모양으로 만들어 형상효과가 생겨서 꽤 큰 일축이방성(K_u)이 형성되면, 자벽에너지밀도는 $\sqrt{AK_u}$ (A 는 교환상수)에 비례하므로 이 또한 커지게 된다. 그렇게 되면 반전자구(reverse domain) 형성을 위한 임계자계 H^* 가 자벽이동을 위한 한계자계 H_0 보다 커져서 $M-H$ 자기이력곡선은 재진입곡선(re-entrant loop) 형상이 된다. 이러한 자화반전의 경우에는 자벽이 없는 단자구 상태가 에너지적으로 안정하므로 $+M_s$ 및 $-M_s$ 의 포화자화상태가 가장 안정한 소위 쌍안정(bistable) 자기 특성을 보인다. 이런 경우 한 방향의 포화자화로부터 반대 방향으로의 포화자화까지의 자화반전은 큰 마크하우젠 점프의 형

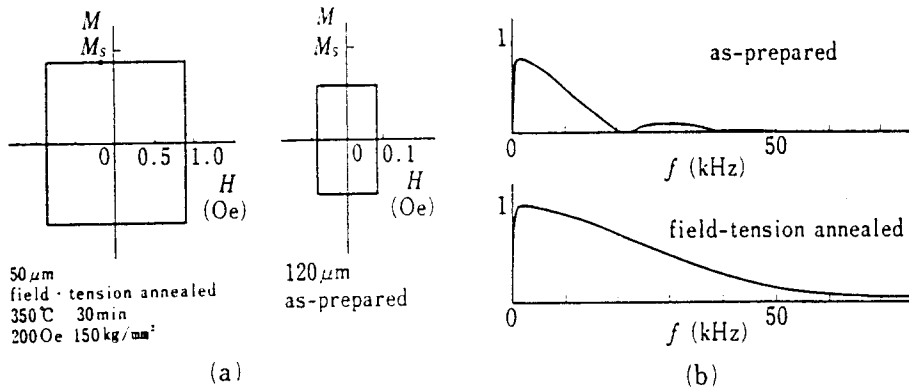


Fig. 1. Large Barkhausen effect of magnetostrictive amorphous alloy wires ;
 (a) M-H hysteresis loops, (b) frequency spectra of pulses.

태로 일어나는데, 시료의 길이방향으로 180° 자벽이 순식간에 이동하여 이루어진다. 바로 이것이 대바크하우젠 효과(large Barkhausen effect)이다 (Fig. 1) [5, 6].

외부인가장계가 반전자구 형성을 위한 임계장계보다 클 경우, 시료 길이 방향에서의 자벽이동속도(v_w)는 다음과 같이 주어진다.

$$v_w = (2 M_s / \beta) (H^* - H_0) \quad (4)$$

여기서 β 는 자벽계동계수로 스핀완화계동계수와 와전류계동계수의 합인데, 비정질합금 와이어의 v_w 는 대략 100 m/s ~ 1 km/s 정도이다.

시료의 자속변화속도 $d\phi/dt$ 는 포화자속밀도를 B_s , 자벽이동경로의 단면적을 S 라 할 때

$$d\phi/dt = 2 B_s S v_w = (4 M_s B_s S / \beta) (H^* - H_0) \quad (5)$$

로 되어 진동장계의 주파수에 의존하지 않는다. 따라서 아주 낮은 주파수에서도 재료 고유의 자기 물성치로 결정되는 자속변화속도(이는 전압으로 측정됨)를 나타낸다. 통상 대바크하우젠 효과를 보이지 않는 재료의 경우에는 진동장계의 주파수에 비례하는 전압치를 얻는다.

상당한 크기의 자기변형값을 가지는 철계 비정질합금 와이어에 검출코일을 감고 길이방향으로 0.1 Oe 이상의 교류자장을 인가하면 여자주파수에 관계 없이 (대략 0.01 Hz ~ 50 kHz의 범위에서 변화) 날카로운 교류 펄스전압을 유기하는 이런 대단히 민감한 대바크하우젠 효과를 이용하여 도난방지 센서를 만든다.

5. 자기인덕턴스효과와 자기임피던스효과

원형 단면을 가진 와이어 형상의 자성체에 시간적으로 변화하는 전류 즉 교류전류를 통전하면 자성체의 양 끝에는 다음 식으로 주어지는 전압 e 가 생긴다.

$$e = R_{wi} I_{wi} + d\phi/dt \quad (6)$$

여기서 I_{wi} 는 와이어에 흘린 전류, R_{wi} 는 시료의 전기 저항이며, 따라서 우변의 제 1 항은 저항 전압이다. 한편 제 2 항은 통전 전류에 의해 전선의 주위에 생기는 환상장계(원주장계) H_θ 로 부터 얻어지는 환상형 자속 ϕ 의 시간변화에 의해 생긴 유도전압(e_L)이다. 시료가 자기적으로 균질한 경우 이 e_L 의 크기는 원주방향의 미분투자율 μ_θ 에 비례하며 이에 따라 당연히 시료의 내부 인덕턴스(internal inductance)에도 비례한다.

일반적인 자성체의 경우, 비록 고투자율 특성을 가진다고 해도 저항전압이 맥스웰방정식으로 주어지는 유도전압보다 그 크기가 훨씬 크다. 그러나 최근 인장력을 가하면서 열처리한 영자기변형의 신선가공된 비정질합금 와이어에 MHz 대의 주파수를 가진 교류전류를 통전시키면 유도전압의 크기가 저항전압과 유사하게 되는 현상이 발견되었다. 더우기 이 유도전압 e_L 은 시료의 길이 방향으로 수 Oe 정도의 자장만 걸어주어도 수십 %의 큰 변화율로 감소한다. 이와 같이 고주파 교류의 통전시 시료 양 단간에 걸리는 전압이 자계에 의해 민감하게 변화하는 현상을 자기임피던스 효과(magneto-impedance effect) [7, 8]라고 하며, 자계변화에 따른 내부 인덕턴스의 변화를 자기인덕턴스 효과(magneto-inductance effect, MI

effect) [9, 10]라고 한다. 이 때 전압의 자계에 의한 감소에는 와이어의 포피효과가 외부인가자장에 의해 변화하여 전기저항이 감소하는 효과가 관여된다.

작은 음의 자기변형값을 가지는 비정질합금 와이어 (CoFeSiB, $\lambda_s \sim -10^{-7}$)의 경우, MHz 대 주파수의 작은 교류전류(10 mA 근방)를 흘려 줄 때 10 Oe 정도 크기로 길이방향에 자장을 가해주면 와이어의 임피던스가 수 십 % 정도가 감소하며, 이러한 변화율은 일반적인 자기저항소자의 자기저항비의 변화율의 수 십배 이상에 달한다.

회전 수류중 방사법으로 만들어진 비정질합금 와이어가 작은 음의 자기변형상수 값을 가질 때 현저한 자기임피던스 효과가 나타나는 원인은 이 재료의 자구구조[9]에 있는 것으로 알려지고 있다. 비정질합금 와이어는 수중 초급냉에 의해 제조될 때, 급냉응고 과정에서 와이어 표면부분이 먼저 응고되므로 압축응력이 잔류한다. 따라서 양의 자기변형값을 가지는 와이어의 경우는 자기변형의 역효과에 의해 표면에 수직인 방향으로 자기이방성이 유도되며 그 결과 미로형 자구(maze domain)가 형성된다. 반면 음의 자기변형 특성을 가지는 와이어는 압축응력에 평행하게 자화용이축이 유도되지만 표면부로 자국이 발생하지 않도록 원주방향을 따라 자기이방성이 생겨 결국 원주방향으로 180° 자벽을 가지는 대나무 마디모양의 자구(bamboo domain)가 형성된다. 중심내부는 서빙되어 비교적 자기적으로 연결이어서 형상효과에 의해 길이방향으로 자화용이방향이 되어 있다(Fig. 2). 이와 같이 음의 자기변형을 가지는 와이어는 원주방향으로 높은

투자율이 실현되며, 그 크기는 이방성에너지 K_u 의 크기에 반비례한다. 따라서 K_u 가 작고 약간 음의 자기변형 특성을 가진 코발트계 비정질합금 와이어에서 아주 큰 원주투자율 μ_θ 가 얻어지고 이에 따라 결국 큰 유도전압이 발생한다. μ_θ 는 와이어에 장력을 가하면서 어닐링을 하면 이러한 효과를 더욱 증가시킬 수가 있다.

MI 효과를 이용한 자기 센서 소자는 종래의 고감도 자계 센서인 플럭스게이트 센서의 헤드와 비교하여 다음과 같은 특징을 가지는 것으로 보고된 바 있다.

- ① 가늘고 긴 자심에 여자용 코일 및 검출용 코일을 부착시킨 플럭스게이트 센서 헤드에서는 코일 전류에 의해 자심의 길이 방향으로 자화되므로 자심 양단의 자극에 의해 반자계가 발생한다. 자계검출의 감도를 높이기 위해서는 이러한 반자계가 작아지도록 자심의 크기를 수 cm 정도로 길게 설정할 필요가 있다. 이에 비하여 MI 소자에서는 코일을 사용할 필요가 없고 자성선에 직접 교류전류를 통전하여 생긴 원주자계에 의해 여자되므로 반자계가 발생하지 않아서 자성선의 크기를 1 mm 정도까지 짧게 할 수가 있다.
- ② 코일을 사용하지 않으므로 코일의 부유용량이 존재하지 않아 안정한 고주파 여자가 가능하며 이에 따라 MI 소자로 고속응답성의 자계 센서를 구성할 수 있다.
- ③ 코일을 사용하지 않는 간단한 구조이므로 소자의 신뢰성이 높고 자기 센서가 모듈화되기 쉬워 생산성을 높이기 용이하다.

6. 마테우치 효과

자성체 와이어의 원주 자속 ϕ_θ 의 시간변화 $d\phi_\theta/dt$ 에 의해, 시료 양끝 사이에 펄스상의 전압(마테우치 전압 e_M)이 유기되는 현상을 마테우치 효과(Matteucci effect) [11, 12]라고 하며, 이 e_M 의 크기는 다음 식으로 주어진다.

$$e_M = -\frac{d\phi_\theta}{dt} = -\mu_\theta S_\theta \frac{dH_\theta}{dt}$$

$$\propto -\frac{M_s^2 S_\theta}{K_\theta} \frac{dH_\theta}{dt} \quad (7)$$

여기서 μ_θ 는 원주방향의 투자율, S_θ 는 원주 자로의 단면적, K_θ 는 원주방향의 자기이방성, M_s 는 포화자화 그리고 H_θ 는 원주방향으로 가해지는 자계이다. $M_s^2 S_\theta / K_\theta$ 의 값이 현저히 큰 재료로는 CoFeSiB계 비정질합

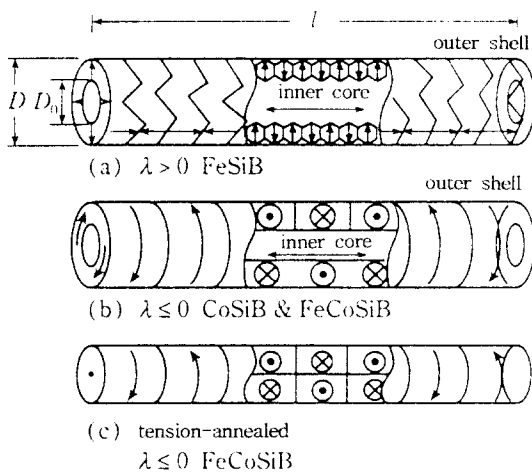


Fig. 2. Magnetic domain model for amorphous alloy wires.

금이 있는데 이 합금의 급냉 와이어를 장력하에서 열처리 하면 S_0/K_0 의 값이 증가하며, 이에 따라 유기전압의 크기가 증가한다.

V. 비정질 자성합금 센서의 분류

비정질합금의 센서 응용에 대한 연구 개발은 1980년대 부터 본격화되어 지금까지 이어져 오고 있는데, 초기에는 주로 리본형 합금의 고투자율 특성을 이용한 자기헤드 센서와 자계 센서 그리고 고자기변형 특성과 응력자기효과를 이용한 센서의 개발에 많은 노력이 있어 왔다. 그 이후 새로이 개발된 와이어 형상의 합금에서 대바크하우젠 효과, 자기임피던스 효과 등의 현상이 밝혀지면서 그 응용 연구가 대단히 활발하게 되었다 [13, 14].

비정질 자성체는 센서 소재로서 크게 두가지로 나뉘는데, 하나는 CoFeSiB 합금으로 대표되는 영자기변형 재료로서 전자기적 특성이 안정하고 내식성 및 내마모성이 우수한 고투자율재료이다. 이 재료는 먼저 오디오용 자기헤드 센서에서부터 시작하여 자계 센서, 전류 센서, 변위 센서 등의 기본 센서, 그리고 로터리 엔코더, 데이터 타블렛 등의 복잡한 응용 센서로 이용되고 있다. 다른 하나는 고자기변형재료로서 FeSiB 합금이 대표적인데, 결정질 자성체에서는 얻어지지 않는 대단히 민감한 자기변형 효과 및 역자기변형 효과를 나타내므로 토크 센서, 데이터 타블렛 등 여러 가지 센서로 실용화되었다.

| | | |
|-----------------------------|--|--|
| zero-magnetostrictive alloy | magnetic head sensor | |
| | data tablet (Matteucci effect) | |
| | magnetic cartridge | |
| | magnetic-field sensor | magnetometer current sensor direction sensor displacement sensor rotary encoder vibration sensor blood-vessel pulsation sensor card reader motor-flux sensor eddy-current sensor proximity sensor security sensor |
| high-magnetostrictive alloy | stress-magnetic effect | torque sensor pressure sensor shock sensor |
| | magnetoelastic wave propagation effect | data tablet frost sensor distance sensor touch sensor |
| | large Barkhausen effect | security sensor rotation speed sensor distance sensor |
| | Matteucci effect | digitizer |

Table III. Magnetic sensors using amorphous magnetic alloys.

Table III은 현재까지 실용화되었거나 실용화 연구가 진행되고 있는 각종 비정질 합금의 센서를 특성 및 주요 자기효과별로 분류해 본 것이다.

VI. 비정질합금 이용 센서 [13, 14, 15]

비정질합금을 사용한 기본 센서와 이를 이용한 응용 센서 및 응용분야에 대해서 Table III에 대략적으로 나타내었다.

영자기변형의 코발트계 비정질 자심 ($\lambda_s \sim 0$)으로 만든 자계 센서 ($10^{-7} \sim 10^2$ Oe, DC~20 kHz)는 비접촉 센서의 기본이다. 이러한 기본센서로 부터 마그네티 미터, 지자기이용 방위센서, 도선전류의 원주자계 검출방식의 전류 센서, 유도전동기의 2차 전류 센서, 브러쉬리스 모터의 자석 로터의 자속 센서, 미소자석의 변위 센서 등으로 발전해 나간다. 자석 변위 센서는 각종의 역학량 센서로 진전되지만 특히 생체용 센서로서 심기도 (mechanocardiogram) 센서 즉 박동, 심음 (심장판막 진동), 맥파 (동맥, 정맥의 진동) 등의 측정에 이용되며, 이미 대동맥 맥파속도장치에 응용되고 있다. 또 최근에는 생체표면에 미소자석을 붙여 생체 표면근방의 공간에 고정시킨 고감도 비정질 와이어 자계센서로 생체표면의 변위를 $0.1 \mu m$ 의 분해능으로 검출하는 비접촉방식의 센서가 개발되었다.

철계 고자기변형재료 (FeSiB 계, $\lambda_s \sim 30 \times 10^{-6}$)는 응력-자기효과 (자기변형의 역효과)에 의한 응력 센서, 자기변형 효과의 초음파전달효과를 응용한 데이터 타블렛과 서리 센서 등에 이용되고 있다. 또 고자기변형 비정질 합금 와이어의 대바크하우젠 효과와 마테우치 효과를 이용하여 위젯드 와이어에 비해 펄스 발생감도가 100 배 이상되는 성능을 얻을 수 있으며, 이를 회전수 센서 및 도난 방지 센서로 응용하여 실용화하고 있다.

본 절에서는 이와 같은 다양한 비정질합금의 센서분야 응용중에서 대표적인 몇 가지에 대해 약술한다.

1. 자계 센서

자계 센서는 자기변형이 없는 코발트계 비정질합금의 고투자율 특성을 이용하는 가장 기본적인 센서이다. 작은 영자기변형 비정질 리본합금 자심과 신호증폭기와의 조합에 의해 자기발전형의 휴대용 자계 센서가 제작 가능하며, 지자기 크기 정도의 자계 검출과 전류 검출용으로 사용된다. 또 0.1 mm 정도의 직경을 가지는 비정질 와이어로 만든 2 자심 멀티바이브레이터형 자계센서에서는 약

± 120 Oe의 범위까지 선형성이 좋은 자계검출 특성이 얻어진다고 보고된 바 있다.

2. 전류 센서

고투자율 비정질합금을 비선형 인덕턴스 소자로 사용하여 ± 20 mA의 범위에서 선형성이 좋은 직류전류를 검출할 수 있는 미소전류 센서를 만들 수 있음은 진작부터 보고된 바 있다.

그런데 산업용 로봇이나 자동화 기계를 정밀하게 제어하기 위해서는 고전류 센서가 필요하다. 이에 자기멀티바이브레이터 타입으로 소형 비정질합금 코어를 사용하여 ± 700 A의 대전류를 검출할 수 있는 기술이 개발되었다.

3. 회전각 센서 및 로터리 엔코더

다극착자시킨 링 마그네트의 둘레에 원형상으로 다수의 영자기변형 비정질합금 자심을 방사상으로 대향 배치시키고 이들 자심쌍을 모두 직렬 접속시키면 회전각센서가 되며, 이 방식에 의하면 거의 0.002°의 해상도로 미소회전각을 검출할 수 있는 것으로 알려지고 있다.

로터리 엔코더 또는 회전위치 센서는 서보 모터, 스텝핑 모터 등 여러가지 모터의 정확한 제어를 위해 필요하다. 이 로터리 엔코더에는 종래의 자기저항 타입과 비정질합금 코어를 이용하는 타입이 있다. 그런데 자기저항소자 타입은 다극 자석과 자기저항소자 사이의 간격이 극히 작은 범위로 제한되나(약 10 μm), 비정질 코어 타입은 감도가 커서 상당히 넓은 간격(약 1 mm)이 허용되어 기기의 보다 높은 안전성이 확보가능하다고 할 수 있다. 최근 이 비정질 합금 코어를 이용하여 만든 10⁶ 펄스의 로터리 엔코더가 보고된 바 있다.

4. 토크 센서

회전기계를 사용하는 곳에서 토크를 정확하게 검출하는 것은 대단히 중요하나, 아직 만족할 만한 센서가 개발되어 있지 않다. 지금까지의 토크 센서는 두 가지 방식으로 대별되는데 하나는 비틀림 각도를 측정하는 방식이고 다른 하나는 자기변형방식이다.

대략 자동차 엔진 샤프트의 비틀림 각도 검출센서의 분해능이 0.05° 정도 필요한데 대해, 위의 고정밀도의 회전각 센서 한 쌍을 샤프트에 고정시키면 스틸 샤프트의 비틀림 각도를 0.01°의 분해능으로 검출할 수 있다.

자기변형 방식의 토크 센서는 소형이어서 좋기는 하나

토크 센서가 샤프트의 자성에 상당한 영향을 받는다는 단점이 있다.

5. 데이터 타블렛

데이터 타블렛(data tablet) 또는 디지털타이저(digitizer)는 손으로 쓴 문자나 그림을 컴퓨터에 입력하는 장치이며, 향후 널리 보급될 것으로 기대되는 Pen-PC의 중요한 기술분야가 되고 있다. 이 기기는 현재 여러 타입이 만들어지고 있는데 필압(필기시 펜에 의해 보드로 가해지는 압력)저항변화형, 정전용량변화형, 전자유도형 등으로 대별된다. 지금 펜으로 입력하는 컴퓨터용 타블렛 중 자성체를 응용하는 것으로 비정질합금 와이어 매트릭스를 사용한 것이 있다.

비정질합금 매트릭스를 디지털타이저에 응용하는 기술은 마테우치 효과에 그 원리를 두는 바, 자성와이어에 대해 수직방향으로 교류자계를 인가하면 와이어의 원주방향으로 자계의 1 주기 사이에 2회의 자화반전이 생기고 이에 따라 인가자계의 2 배의 주파수를 가진 전압이 발생한다. 만일 전자 펜을 와이어로부터 직각방향으로 멀어지게 하면 수 mm의 이동만으로도 자계가 급속하게 감소해 버린다. 따라서 비정질 영자기변형 와이어를 수 mm의 등간격으로 수 십 가닥씩 X, Y 방향으로 매트릭스상으로 배치하여 놓고 매트릭스의 한 점에 펜을 갖다대면 접촉지점 주위의 와이어들에서 발생하는 전압을 상호비교하는 방식에 의해 펜의 위치를 약 0.1 mm의 분해능으로 정확하게 결정할 수 있다고 보고되고 있다 [16, 17].

이 방식 이외에 자기변형 특성을 가진 비정질합금 리본의 자기변형과의 전과 강도를 자석으로 제어하는 방식으로 디지털타이저를 구성하는 기술이 개발된 바 있다 [18].

6. 생체표면 미소변위 센서

생체표면의 미소변위(0.1~500 μm 정도) 및 진동과 같은 역학적 신호를 간단하게 검출하는 것이 현재 아주 중요한 기술적 과제의 하나가 되고 있는데 이에 비정질합금 센서가 대단히 유용하게 이용되고 있다 [19]. 즉, 생체표면에 미소자석을 부착하고 그 주위에 고감도 비정질합금 자계 센서헤드를 두므로써 생체의 미소 진동이나 변위를 검출하는 바, 이 자석변위 센서를 맥파 센서에 적용하면 극히 정확한 맥파파형이 쉽게 측정되므로 이를 이용하여 동맥경화증 등의 진단에 사용하고 있다.

또 최근에는 이 원리를 응용하여, 자석변위 센서 헤드를 안경테에 부착시켜 눈꺼풀의 움직임을 정밀하게 체크

하므로써 자동차 운전중의 졸음의 검출에 유효하게 사용하는 기술도 개발되고 있다.

7. 도난방지 센서

대바크하우젠 효과를 가지는 자기변형특성을 가지는 쌍안정 비정질합금 와이어 센서는 펄스 발생 소자이면서 현저한 고조파 발생소자이다. 이에 쌍안정 소자를 판매용 물품에 부착시켜 두면 0.1 Oe 정도의 미약한 교류자계에 대해서도 고조파성분이 큰 날카로운 펄스를 유기한다. 이 고조파 전압의 비접촉식 검출에 의해 상품의 도난을 경보하게 되며, 현재 대형상점 및 서점 등에서 많이 사용되고 있다.

Ⅷ. 결 언

지금까지 비정질합금의 센서 이용에 관한 기본 이론과 실제 응용에 대하여 간단하게 기술하였다. 향후 각종 산업 및 생활기기의 자동화, 지능화를 실현하기 위한 핵심 기술로 생각되는 센서기술 분야에서 비정질합금은 다방면에서 필수적 소재로 사용될 것이 기대되고 있으며, 이에 더 많은 기초 및 응용 연구가 전개될 것이 요구된다. 특히 비정질합금의 소재기술 측면에서 볼 때, 앞으로 와이어의 가공에 의한 고주파영역에서의 응용센서 개발과 함께 박막센서 재료의 제조 및 가공기술 그리고 다른 기능소자와의 복합화와 집적화 기술의 발전 등이 진요할 것으로 믿어진다.

참 고 문 헌

[1] 毛利佳年雄, 센サ技術, 7, 103(1987).
 [2] 毛利佳年雄, 機械の研究, 44, 145(1992).
 [3] 近角聰信, 強磁性の物理, 裳華房, 東京, 307(1965).
 [4] 近角聰信, 強磁性の物理, 裳華房, 東京, 309(1965).

[5] K. Mohri, F. B. Humphrey, J. Yamasaki and F. Kinoshita, IEEE Trans. Magn., MAG-21, 2017 (1985).
 [6] R. Malmhall, K. Mohri, F. B. Humphrey, T. Manabe, H. Kawamura and I. Ogasawara, IEEE Trans. Magn., MAG-23, 3242(1987).
 [7] 武士田, 野田, 毛利, 内山, パニナ, 日本應用磁氣學會誌, 18, 123(1994).
 [8] 野田, 武士田, 吉田, パニナ, 毛利, 電氣學會マグネティクス研究會資料, MAG-93-219, 39(1993).
 [9] K. Mohri, K. Kawashima, T. Kohzawa, H. Yoshida and L. V. Panina, IEEE Trans. Magn., MAG-28, 3150(1992).
 [10] K. Kawashima, T. Kohzawa, H. Yoshida, K. Mohri and L. V. Panina, IEEE Trans. Magn., MAG-29, 3168(1993).
 [11] C. H. Matteucci, Ann. Chim. Phys., 53, 385 (1858).
 [12] K. Mohri, F. B. Humphrey, K. Kawashima, K. Kimura, and M. Mizutani, IEEE Trans. Magn., MAG-26, 1789(1990).
 [13] 小笠原 勇, センサ技術, 7, 116(1987).
 [14] K. Mohri, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Materials Research Society, 232, 331(1991).
 [15] 毛利佳年雄, 日本應用磁氣學會誌, 16, 5(1992).
 [16] 加納, 川島, 毛利, 電氣學會マグネティクス研究會資料, MAG-91-158, 33(1991).
 [17] K. Kimura, M. Kanoh, K. Kawashima, K. Mohri, M. Takagi and L. V. Panina, IEEE Trans. Magn., MAG-27, 4861(1991).
 [18] T. Meydan and M. S. M. Elshebani, IEEE Trans. Magn., MAG-27, 5250(1991).
 [19] K. Mohri and K. Shimizu, Tech. Digest of 7th Sensor Symposium, 95(1988).