

자기저항 효과 및 센서 응용

Magnetoresistance Effect and Sensor Applications

김동영

Dong Young Kim

1. 서론

자기저항(magnetoresistance, MR)은 강자성체에 외부 자기장이 인가되었을 때 저항이 변화하는 현상을 말한다. 이러한 자기저항 변화는 일반적으로 자기저항비(MR ratio)로 표현한다.

$$MR(\%) = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\min}} \times 100 \quad (1)$$

여기에서 R_{\max} 및 R_{\min} 은 자기장에 따른 최대 및 최소의 저항값을 의미한다.

자기저항 재료는 나노미터(nm) 수준의 얇은 박막으로 제작이 가능하다. 따라서 하드디스크에서는 기존에 사용되던 코일형 헤드센서를 자기저항 센서로 대체함으로써, 고밀도/고용량의 하드디스크를 가능하게 하였다. 자기저항 기술의 발전에 힘입어 최근 수년간 하드디스크의 집적도를 ~ 100 Gbit/in²까지 높일 수 있었으며, 이러한 기술 발전에 대한 공로로 거대자기저항(giant magnetoresistance, GMR)효과를 처음으로 발견한 프랑스의 알베르 페르와 독일의 피터 그린베르크는 2007년도 노벨 물리학상을 공동 수상하게 되었다[1,2]. 또한 (tunneling magnetoresistance, TMR)재료는 차세대 반도체 메모리를 대체할 MRAM(magnetic random access memory)의 개발에 이용되고 있다.

자기저항재료는 자기장의 세기에 따른 저항변화

를 이용하여 자기장의 세기를 측정하는 자기장 센서로 활용되고 있다. 또한 나노 크기에서도 그 특성을 유지하므로 나노미터(\sim nm) 크기의 자기장 센서의 제작이 가능하여 의료용에서는 마이크로 크기의 병원균 검출을 위한 연구에 적용되고 있으며, 자자기센서, 방향센서, 위치센서 등 다방면으로 활용되고 있다. 이러한 자기저항 센서는 비파괴검사에서도 응용되고 있다[3].

따라서 본 해설서에서는 AMR, GMR 및 TMR 등 자기저항 재료 각각의 특성을 비교 분석하고, 이들 재료를 이용한 자기장 센서의 개발 현황을 소개한다. 마지막으로 자기저항 센서의 비파괴검사용 와전류탐상장치에의 응용을 소개한다.

2. 자기저항 재료

단일 박막형 강자성체의 자기저항 변화는 전류의 방향과 외부 자기장에 따른 자구의 방향 사이의 각도에 의존한다. 이러한 자기저항 효과를 비등방성 자기저항(anisotropic magnetoresistance, AMR)이라 부른다. 이러한 AMR재료인 NiFeCo 합금의 자기저항비는 약 2~6%의 값을 보인다. 한편 두 강자성 박막 사이에 금속막을 삽입한 재료의 자기저항은 두 강자성 박막의 자구방향에 의존하며, 자기저항비는 약 20~50%로 AMR에 비하여 월등히 향상된 값을 보인다. 따라서 이러한 새로운 구조의 재료에

서 보이는 자기저항 특성을 거대자기저항 (giant magnetoresistance) 효과라고 한다. 또한 두 강자성 박막 사이에 금속막 대신 절연체를 삽입한 경우 전류는 절연층을 투과(tunneling)하면서 자기저항 변화를 유발시키므로 이러한 현상을 터널링 자기저항 (tunneling magnetoresistance, TMR) 효과라 부른다. 최근에 개발된 TMR 재료는 절연층으로 MgO를 사용하여 자기저항비를 상온에서 약 200% 이상까지 향상시켰다[4,5].

2.1. 이방성 자기저항(AMR) 재료

이방성 자기저항은 1857년 William Thomson에 의하여 강자성체에서 발견되었다[6]. 이방성이라는 말은 기존에 알고 있던 금속재료에서 고자장하에서 보이던 등방적인 자기저항 특성과는 다르게 전류 (I)의 방향과 자구의 방향 사이각에 따라서 저항이 변화되는 비등방 특성을 보이는데서 유래한다. 이러한 AMR 특성은 자기장에 의하여 왜곡된 궤도 전자들의 산란에(s-d산란) 기인하며, 전류와 자구의 방향에 따른 저항 변화는 다음과 같이 표현된다.

$$V = R_{\perp} I + (R_{\parallel} - R_{\perp}) m(I \cdot m) \quad (2)$$

여기에서 R_{\perp} 및 R_{\parallel} 은 자구와 전류의 방향이 수직 및 수평일 때의 저항값이며, m 은 자구의 벡터를 나타낸다.

식 (2)에서 자기저항의 변화는 전류와 평행한 방향 및 수직 방향에서도 측정이 가능하다. 이때 전류와 평행한 방향의 저항변화를 일반적으로 AMR 효과라고 하며, 전류에 수직인 방향의 저항변화를 평면홀 저항(planer hall resistance, PHR) 효과라 한다. 이들 두 가지 효과는 AMR 특성인 s-d산란에 기인하지만 그 특성이 서로 다르다.

2.1.1. 이방성 자기저항 (AMR) 효과

AMR 효과에 의한 자기저항 변화는 식 (2)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$R_{AMR} = R_{\perp} + \Delta R \cos^2 \theta \quad (3)$$

여기에서 $\Delta R = R_{\parallel} - R_{\perp}$ 이다.

AMR 효과에 의한 자기저항은 R_{\perp} 의 offset 저항

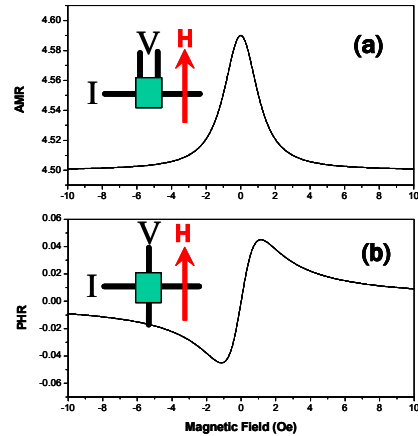


Fig. 1 MR profiles with applied magnetic field in exchange biased sample (a) AMR and (b) PHR effect

값을 가지며, 전류와 자구의 사이각 θ 에 따라 $\cos^2 \theta$ 형태로 변한다. 강자성체의 용이축으로 전류를 인가하고, 용이축에 수직으로 자기장을 인가한 경우 자기장에 따른 자기저항비는 Fig. 1(a)와 같다. 즉 자기저항 변화는 $H = 0$ 을 기준으로 대칭형태로 나타난다.

2.1.2. 평면홀 저항 (PHR) 효과

식 (2)로부터 PHR 효과에 의한 자기저항 변화는 다음과 같이 표현된다.

$$R_{PHR} = \Delta R \sin \theta \cos \theta \quad (4)$$

PHR 효과에 의한 자기저항은 offset 저항값이 0이며, 전류와 자구의 사이각 θ 에 따라 $\sin \theta \cos \theta$ 형태로 변한다. 강자성체의 용이축으로 전류를 인가하고, 용이축에 수직으로 자기장을 인가한 경우 자기장에 따른 PHR은 Fig. 1(b)와 같다. 즉 자기저항 변화는 $H = 0$ 근처에서 선형특성을 보이며, 이러한 선형특성은 자기장 센서에 응용된다.

2.1.3. 교환결합력을 갖는 재료의 평면홀 효과

이방성 자기저항 특성이 우수한 CoNiFe 합금들은 일축이방성(uniaxial anisotropy) 특성을 보인다. 즉 자화는 용이축을 따라서 0° 와 180° 의 각도를 갖는 것이 안정한 상태가 된다. 이러한 강자성체 시편에 한 주기의 고자장을 인가할 경우 자구는 0° -

180°-360°로 회전한다. 이 경우 전류의 방향과 자화 방향의 사이각에 의존하는 AMR효과는 커다란 자기이력 특성을 보이게 된다. 그러나 일축이방성(unidirectional anisotropy)을 갖는 강자성/반강자성 재료를 사용할 경우 자화 용이축은 한 방향을 가지게 되므로 한 주기의 고자장을 인가할 경우 자구는 0°-180°-0°로 회전하므로 AMR의 자기이력특성이 없어진다.

Fig. 2는 단일층 강자성체 및 교환결합력을 갖는 강자성/반강자성(F/AF) 재료의 PHR특성을 보인다. 즉 단일층 강자성체에서는 자기이력특성이 확연히 나타나고 있으나, 교환 결합력을 갖는 F/AF 이중층에서는 자기이력특성이 사라진다. 따라서 PHR을 이용한 자기장 센서의 제작시 교환결합력을 갖는 재료를 사용할 경우 자기이력에 따른 신호특성의 반전효과를 제거할 수 있다.

PHR효과는 선형성이 우수하여 자기장 센서 개발에 용이한 장점을 갖고 있으나, 자기저항비가 작아 (약 MR ratio~2-6%) 출력신호가 작다. 따라서 출력특성 향상을 위하여 자기저항비가 높은 신소재의 개발이 요구된다.

2.2. 거대 자기저항(GMR) 및 터널링 자기저항(TMR) 재료

거대 자기저항(GMR) 재료 및 터널링 자기저항(TMR) 재료의 자기저항특성은 두 강자성층 사이에서 자구를 형성하는 전자들의 스핀 산란에 의존하

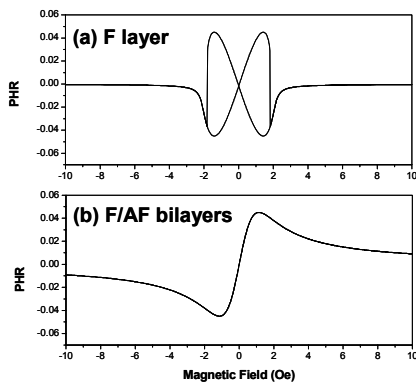


Fig. 2 PHR profile with applied magnetic field in (a) single ferromagnetic layer and (b) exchange biased ferromagnetic/ antiferromagnetic (F/AF) bilayers

는 것으로 알려져 있다. 스핀의존성 산란은 강자성체의 분극율의 함수로 표현되며, 분극율이 100%인 반금속을 TMR재료로 사용할 경우 이론적으로는 자기저항비를 무한히 향상시킬 수 있다. 따라서 최근에는 이러한 반금속을 이용한 TMR재료 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

GMR 및 TMR재료에 대하여 실험적으로 얻어진 자기저항 변화는 두 강자성체 자구들의 사이각 (ϕ)에 의존하며, 다음과 같이 표현된다.

$$R_{GMR} = R_P + \Delta R/2(1 - \cos\phi) \tag{4}$$

여기에서 저항변화 $\Delta R = R_P - R_{AP}$ 이고, R_P 및 R_{AP} 는 두 강자성층이 평행하게 정렬된 경우와 반평행으로 정렬된 경우의 저항값을 의미한다. 즉 두 강자성층의 자구가 평행하게 정렬된 경우 저항이 작아지며, 반평행으로 정렬된 경우 전자스핀의 산란에 의하여 저항이 증가함을 나타낸다.

Fig. 3은 GMR 및 TMR재료의 기본 층상구조를 보이고 있으며, 스핀 밸브형 구조를 갖는 GMR/TMR 재료의 외부자기장에 따른 자기저항 특성을 보인다.

상용화 제품에서는 스핀 밸브형 GMR 및 TMR 구조가 사용하고 있다. 이때 스핀밸브형 구조

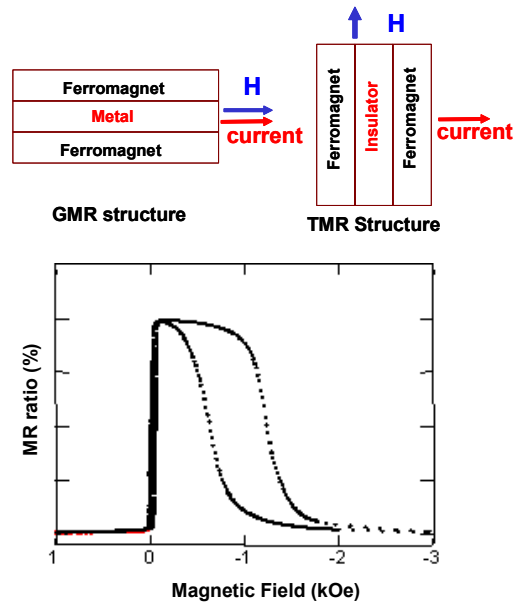


Fig. 3 GMR/TMR structure and the MR profile with applied magnetic field in spin-valve GMR/TMR structure

는 두 강자성층 중 하나의 강자성층을 교환 결합특성을 갖는 구조로 제작하여 고정층으로 활용한다. 그러한 경우 교환 결합을 갖지 않는 강자성층은 외부 인가 자기장에 따라 자유롭게 반응하는 자유층 역할을 한다. 따라서 외부인자기장에 따른 자유층의 자구변화가 자기저항의 변화에 기여하고 이때 자기저항의 변화는 전류의 양을 밸브 형태로 조절하는 기능을 한다. 즉 전류의 흐름은 스핀의 방향과 관련되므로 스핀 밸브형 GMR/TMR구조라 부른다. 이러한 구조를 사용하여 하드디스크의 헤드 센서로 사용한다. 즉 하드디스크의 입력정보 "0" 또는 "1"은 미디어를 형성하는 자성재료의 자화방향으로 저장되어 있으므로 스핀 밸브형 GMR/TMR재료의 자유층 회전을 이용하여 하드디스크의 정보를 읽어내는 역할을 한다.

현재까지 하드디스크 헤드 센서로는 면적저항이 작은 스핀 밸브형 GMR재료를 사용하여 정보 저장용량을 약 100 Gbit/in²까지 향상시켰다. 한편 TMR 재료는 GMR 보다 자기저항비가 커 월등히 우수한 출력 특성을 보일 수 있으나, 면적저항이 크다는 단점이 있다. 따라서 최근에는 TMR재료를 하드디스크 헤드센서에 적용하기 위하여 면적저항이 작은 TMR 재료 개발에 대한 연구가 진행 중이다.

이들 자기저항 재료들은 자기장 센서로도 활용되고 있다. 자기장 센서로 사용할 경우 자기장의 세기에 따른 저항 변화가 선형적인 특성을 보여야 한다. 이러한 선형특성은 Fig. 1에서 보인 AMR이나 PHR재료가 Fig. 3에서 보인 GMR/TMR 재료보다 우수하다. 한편 GMR은 금속막에 의한 막간(inter-layer) 결합력 특성을 보이며, TMR은 절연체의 표면 거칠기에 의하여 유도된 Orange peel 결합력 특성을 보인다. 이들 결합력 특성은 자유층의 자기 이력 곡선을 한쪽 방향으로 치우치게 하여 저자장 측정을 방해한다. 따라서 GMR/TMR 재료는 자기저항비 특성은 우수하나 자기장 센서에서 요구하는 선형성이나 저자장 신호 특성 저하로 인하여 고분해능 자기장 센서로 활용하기는 어렵다.

3. 자기저항을 이용한 자기장 센서

3.1. 휘스톤 브리지형 AMR 센서

미국의 Honeywell사는 AMR재료(자기저항비가 약 2%인 NiFe)를 사용하여 처음으로 자기장 센서

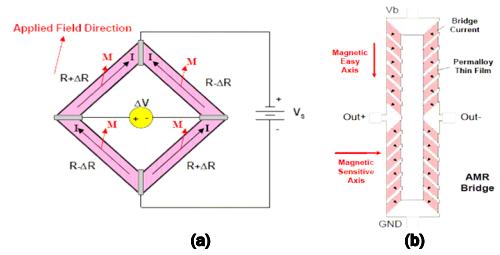


Fig. 4 Wheatstone Bridge type AMR sensor for magnetic field measurement

를 개발하였다[7]. AMR효과는 앞에서 설명하였듯이 offset 저항이 매우 크다. 이러한 offset 저항에 의한 offset출력특성을 보완하기 위하여 Honeywell사는 Fig. 4에 보인 것과 같이 AMR재료를 이용한 휘스톤 브리지형(wheatstone bridge type) 자기장 센서를 개발하였다.

휘스톤 브리지형 자기장 센서는 전류와 자구 방향의 사이각에 의존하는 AMR 특성을 고려하여, 자구의 용이축을 45°로 정렬하면 출력특성이 PHR 효과와 같이 $H = 0$ 을 기준으로 선형성이 우수한 자기저항 특성을 보인다. Fig. 4(a)에서 전류는 자구의 방향과 45°로 흐르게 하면 브리지 각각의 저항 변화는 $R = R_0 - \Delta R$ 과 $R = R_0 + \Delta R$ 이 된다. 이 경우 휘스톤 브리지의 양단간 전압(ΔV)은 다음과 같다.

$$\Delta V = \frac{\Delta R}{R_0} V_s \quad (5)$$

여기에서 V_s 는 휘스톤 브리지 양단간 입력 전압이다. 따라서 AMR재료를 이용한 휘스톤 브리지형 자기장 센서의 출력 전압은 AMR재료의 자기저항비와 입력전압에 비례하게 된다.

Fig. 4(b)와 같이 2%의 자기저항비를 갖는 NiFe를 사용하고, 입력전압을 1.0 V 인가할 경우 최대 출력 전압(ΔV)은 10 mV를 얻게 되고, 5.0 V를 인가할 경우 최대 출력 전압은 50 mV를 얻게 된다. Fig. 5는 휘스톤 브리지형 AMR 센서에 입력 전압을 5.0 V 인가한 경우 자기장의 세기에 따른 출력 전압 특성을 보인다.

이러한 자기장 센서의 민감도는 자기이방성 자기장(H_k)에 반비례한다. Fig. 5의 경우 H_k 가 약 10 Oe이며, 이 경우 자기장 센서의 민감도는 5 mV/Oe의 값을 얻는다. AMR센서의 노이즈 수준은 $\sim \mu\text{OeHz}^{1/2}$ 로 노이즈 대 신호비(S/N ratio)는

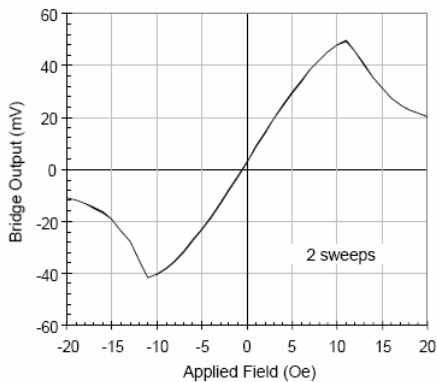


Fig. 5 Output voltage of Wheatstone Bridge type AMR sensor with magnetic field

약 5000 수준이 된다. 따라서 한국에서의 지구자기장(약 0.5 Oe) 휘스톤 브리지형 AMR센서를 사용하여 측정할 경우 2.5 mV의 높은 출력 전압을 얻을 수 있다.

Honeywell사의 휘스톤브리지형 AMR센서는 일축이방성을 갖는 NiFe재료를 사용하고 있으며, 이 경우 Fig. 2(a)에서 보았듯이 자기저항의 이력특성이 매우 커진다. 이를 보완하기 위해서는 강자성체에 고자장을 인가하여 자구들을 포화시키는 것이 필요하다. Honeywell사의 경우 이를 위하여 자기장 센서의 구동 초기에 약 80 Oe의 자기장을 인가한 후 사용하고 있다. 이 경우 센서의 초기 전력 소모량이 증가하게 될 뿐만 아니라 고자장 인가용 부가 회로가 필요하게 된다. 이러한 단점은 Fig. 2(b)에서 보인 것과 같이 교환 결합력을 갖는 재료를 사용할 경우 해결될 수 있다.

3.2. GMR 센서

미국의 NVE사는 Fig. 6에서 보인 바와 같이 강자성/금속을 교대로 적층한 다층박막형 GMR 재료를 사용한 GMR 센서를 개발하였다[8]. GMR센서 역시 offset 출력 특성을 보완하기 위하여 휘스톤 브리지형 자기장 센서를 제작하였다. AMR센서와는 달리 휘스톤 브리지의 4개 저항 중 2개의 저항으로 GMR재료를 사용하였다. 이는 GMR의 자기저항 변화가 AMR과는 다르게 자구들의 사이각에 따른 변화이므로 4개의 저항을 모두 쓸 경우 출력특성을 얻을 수 없기 때문이다. 이러한 GMR센서는 자기저항비(약 12~16%)가 우수하여 AMR에 비하여

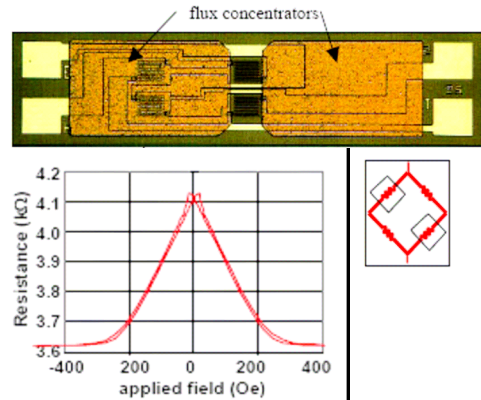


Fig. 6 Microscope picture of NVE GMR sensor and GMR profile with magnetic field

출력 특성이 우수하다.

자기저항 변화가 Fig. 6와 같은 다층박막형 GMR 재료를 자기장 센서로 사용할 경우 선형특성을 확보하기 위하여 GMR재료에 자기장을 인가하여야 하며, 이 역할을 NiFe 박막으로 제작한 flux concentrator가 담당하고 있다.

3.3. 자기저항 센서의 특징

자기저항 센서는 자기장의 세기에 따른 저항 변화를 측정하는 기술로 기존의 코일센서보다 여러 가지 장점을 가지고 있다. 자기저항 센서의 장점은 다음과 같다.

- 1) 선형성이 우수하다. AMR센서의 경우 전류의 방향과 자구의 방향을 45°로 정렬할 경우 자기장에 따른 저항의 변화는 $H_k/2 < H < H_k/2$ 의 범위에서 선형성이 우수한 센서의 제작이 가능하다.
- 2) 센서의 소형화가 가능하다. 자기저항 재료의 두께는 나노미터(nm)의 박막층을 사용하고 있으며, 이때 자기저항 특성은 마이크로미터 크기의 재료에서도 유지되며, 마이크로미터 크기의 자기장 센서의 제작이 가능하다. 즉 코일 센서를 사용하는 플럭스 게이트(flux-gate) 보다 소형의 자기장 센서가 가능하다.
- 3) 소비전력이 작다. 자기장 측정용 AMR/GMR 센서의 소비전력은 10 mW 수준으로 100 mW 정도를 소모하는 플럭스 게이트나 1 W 이상을 소모하는 스쿼드 (SQUID) 보다 소모 전력이 월등히 작다.

- 4) 광대역의 주파수 범위에서 사용이 가능하다. 자기 저항은 직류 및 교류 자기장에 선형적으로 반응하므로 직류 및 교류 자기장 측정이 가능하다. 이때 교류 투자율은 강자성 공명(ferromagnetic resonance, FMR) 주파수 범위까지 일정한 값을 유지하므로 교류 자기장은 FMR주파수까지 측정이 가능하다. NiFe의 경우 FMR주파수가 약 800 MHz이고, 교환 결합력을 갖는 재료의 경우 FMR주파수가 GHz 이상을 보이고 있다. 따라서 자기저항 센서는 DC~GHz범위의 광대역 자기장 측정이 가능하다.
- 5) 고분해능을 갖는 센서 제작이 가능하다. 자기저항 재료는 자구의 회전을 이용하므로 자구의 이동에 기인하는 바크하우젠 노이즈가 작다. 따라서 저자장을 측정하는 분해능을 향상시킬 수 있다. Fig. 7에서 보인 것과 같이 AMR센서의 경우 플럭스게이트의 분해능을 상회하고 있다. GMR센서의 경우 출력 특성은 우수하지만 분해능이 떨어지고 있음을 보인다. 또한 자기장 측정 범위는 교환결합력 조절을 통하여 변경이 가능하며, 수 Oe에서 수 kOe 측정용 자기장 센서의 개발이 가능하다.
- 6) 센서의 가격이 싸다. 자기저항 센서는 소형화가 가능하므로 센서의 가격을 낮출 수 있다. 따라서 현재 상용화된 AMR/GMR 센서의 가격은 플럭스게이트에 비하여 10배 이상 저렴한 가격으로 판매되고 있다.

이렇듯 자기저항 센서는 저전력화 및 소형화가 가능하므로 다양한 분야에 응용되고 있다. 저자장 측정용 자기장 센서는 마이크로 비드 측정용 바이오 센서, 단말기용 나침반, 수중 탐사용 어레이 센서, 의료용 심박동 측정기 및 비파괴검사용 등에 응용되고 있다.

4. 비파괴검사 응용

비파괴검사에서 사용중인 와전류 탐상장치는 와전류를 발생시키는 여기 코일(excitation coil)과 결합으로부터 발생하는 신호를 검출하는 센서 코일(sensing coil)로 구성된다. 이때 와전류의 침투깊이(skin depth, δ)는 다음과 같이 표현된다.

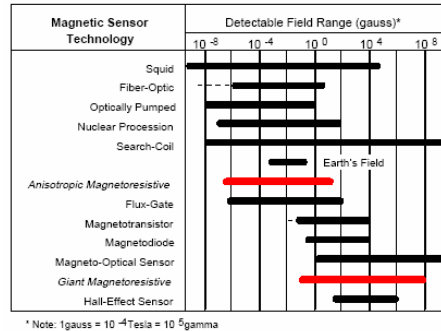


Fig. 7 Magnetic sensor technology field ranges

$$\delta = 50 \sqrt{\rho / (f \mu_r)} \tag{6}$$

여기서 ρ 는 시험 재료의 비저항($\mu\Omega\text{-cm}$)이고, f 는 여기 주파수(Hz)이며, μ_r 은 상대투자율이다.

식 (6)으로부터 와전류의 침투 깊이는 여기주파수뿐만 아니라 재료의 투자율에 반비례한다. 즉 주파수가 높을수록 침투 깊이가 작고 주파수가 낮을수록 침투 깊이가 깊어진다.

한편 와전류 탐상장치의 탐측자는 코일센서를 사용하고 있으며, 출력특성은 다음과 같다[10].

$$V_{signal} \propto \alpha A f H \tag{7}$$

여기서 α 는 비례상수로 코일의 감긴 수에 비례한다. A 는 센서코일의 단면적, H 는 자기장의 세기 그리고 f 는 주파수를 나타낸다.

식 (7)에서 나타낸 바와 같이 센서 코일의 출력 신호는 코일의 단면적 및 주파수에 의존한다. 코일의 면적은 센서 코일의 크기를 결정지으며, 주파수는 침투 깊이와 관계한다. 따라서 두꺼운 금속 또는 상대투자율이 큰 자성재료를 와전류 탐상법으로 결함을 검출할 경우 저주파수를 쓰는 것이 필요하다. 이 경우 코일센서의 출력특성을 향상시키기 위해서는 단면적을 증가시켜야 하며, 센서의 크기가 커져야하는 단점이 있다. 또한 초고주파수에서 사용할 경우 코일의 공명특성으로 인하여 출력특성이 저하되는 단점이 있어 와전류 탐상장치는 일반적으로 1 kHz~3 MHz의 IF(intermediate frequency) 대역 주파수 범위에서 수 mm두께를 갖는 시편의 결함 검출에 이용되고 있다.

현재 사용하고 있는 와전류 탐상장치의 단점인 저주파수 특성과 초고주파수 특성을 보완할 수 있

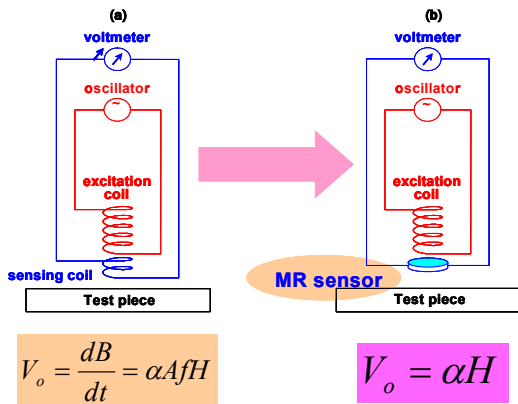


Fig. 8 Eddy current technique for nondestructive testing using (a) coil sensor and (b) MR sensor

는 센서가 Fig. 8에서 보인 것과 같이 자기저항 센서(MR sensor)를 사용한 와전류 탐상장치이다. 즉 자기저항 센서의 출력 특성은 DC에서 GHz까지 광대역의 주파수영역에서 사용이 가능하므로 ~cm 두께의 시험시편에서 ~µm 두께를 갖는 시편에 대한 결함 검출이 가능한 장점을 가지고 있다. 또한 자기저항 센서는 마이크로 사이즈로 가공이 가능하므로 마이크로 크기의 결함 검출이 가능하며, 이 경우 결함의 형상에 대한 분해능을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다.

5. 결론

최근에 하드디스크의 헤드 및 MRAM의 개발을 위하여 활발히 연구가 진행 중인 자기저항 재료는 TMR의 경우 자기저항비를 약 400%까지 향상시켰으며, 이들 재료는 마이크로 사이즈로의 가공이 가능하여 응용 범위가 넓다. 자기장 센서뿐만 아니라 비파괴검사에 응용되고 있다. 특히 와전류탐상장치에 적용하여 ~cm 두께의 시험시편에서 ~µm 두께를 갖는 시편에 대한 결함 검출, 마이크로 크기의 결함 검출 및 결함의 분해능을 향상 등에 대한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 그러나 국내에서는 아직까지 자기저항 센서를 비파괴 검사에 적용하기위한 연구가 미진하다. 따라서 본 소개서의 내용인 자기저항 특성이 국내 비파괴 검사에 대한 연구 개발에 조금이나마 도움이 될 수 있기를 바란다.

참고문헌

- [1] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen and F. Petroll, "Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices," Phys. Rev. Lett., Vol. 61 p. 2472, (1988)
- [2] G. Binasch, P. Grunberg, F. Saurenbach and W. Zinn, "Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structure with antiferromagnetic interlayer exchange," Phys. Rev. B, Vol. 39 p. 2489, (1989)
- [3] A. Jander, C. Smith and R. Schneider, "Magnetoresistive sensors for nondestructive evaluation," 10th SPIE International Symposium, Conference 5770
- [4] S. S. Parkin, C. Kaiser, A. Panchula, P. M. Rice, B. Hughes, M. Samant and S. H. Yang, "Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers," Nature Mat., Vol. 3 pp. 862-867, (2004)
- [5] S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, Y. Suzuki, and K. Ando, "Giant room temperature magnetoresistance in single crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel barriers," Nature Mat., Vol. 3 pp. 868-871, (2004)
- [6] W. Thomson, "On the electrodynamic qualities of metals: effects of magnetization on the electric conductivity of nical and iron," Proc. Roy. Soc. London, Vol. 8, pp. 547-550, (1857)
- [7] WWW. ssec. honeywell. com
- [8] WWW. NVE. com
- [9] WWW.sensormag.com/articles/1298/mag1298/main.shtml
- [10] C. Cavoit, "Closed loop applied to magnetic measurements in the range of 0.1 - 50 MHz," Rev. Sci. Instrum., Vol. 77, pp. 064703(1-7), (2006)