

Ni₅₃-Fe₄₇ 자성박막의 신형전류자기 기전력효과

정 한 · 손희영 · 김미양 · 장현숙 · 이장로

숙명여자대학교 물리학과

서울 140-742

이용호

전북대학교 물리학과

전주 560-756

(1994년 6월 26일 받음, 1994년 9월 13일 최종수정본 받음)

진공증착방법으로 제작한 Ni₅₃-Fe₄₇ 박막에 관한 신형전류자기 기전력효과와, 전류와 자장 방향이 만드는 각 θ 의존성이, 자기저항효과와 $\cos 2\theta$, Hall 1 효과의 경우 $\sin \theta$ 에 대하여 $\sin 2\theta$ 로 관측되고, 이 효과의 자장에 의존하는 전압변화율이 자기저항효과와 비교할 때 차수가 다르게 큰 것이 조사된다. 이 효과가 2 Carrier형 모델로 이해할 수 있음을 이론적으로 확인된다.

I. 서 론

전류자기효과의 종류에 Hall 효과와 자기저항효과(MR)가 있는 것은 잘 알려져 있다, 자기저항효과는 종래의 인덕티브 헤드에서 자기저항 헤드로의 응용가능성이 실용화 됨으로써 근래 많은 연구가 이루어지고 있다. [1, 2] 보다 커다란 자기저항비를 갖는 재료로서 금속 인공격자의 제작 및 연구가 각광을 받고 있으나 자기저항효과 그 자체의 기구에는 아직 충분한 연구가 되어 있지 않고 현상론에 의존해 있는 것이 현재의 상황이다.

여기에서 소개하는 제 3의 전류자기효과 즉 신형전류자기 기전력효과는 자장과 전류가 만드는 평면내에서 전류의 방향과 직각방향으로의 전압이 자장의 크기 및 방향에 의존하는 현상으로 자기저항효과와 매우 유사한 효과이다. 이 효과는 이전부터 현상적으로는 확인되어 있지만 평면 Hall 효과의 일종으로 알려져 있을뿐 그 기구에 대해서는 보고되지 않고 있다.

얼마전 Yokohama 대학의 K. Kakuno 등은 스트립 형태의 Ni₉₀-Fe₁₀ 합금박막에 관하여 신형전류자기 기전력효과와 크기와 자장 방향의존성을 측정하고, 이와 유사한 자기저항 효과에서는 전압이, 전류에 대한 자장 방향이 만드는 각 θ 에 대하여 $\cos \theta$ 로 변화하고 Hall 효과에서는 $\sin \theta$ 에 따라 변화하지만, 신형전류자기 기전력효과에서는 전압의 자장방향 의존성이 $\sin 2\theta$ 이고 이 효과

의 자장에 의존하는 전압 변화의 변화율이 종래의 자기저항효과에 비해 차수가 다르게 큰 것을 보고하였다.[3] 따라서 신형전류자기 기전력효과에서는 전류와 수직인 방향으로의 전압강하가 일어나지 않으므로 이론적으로는 출력전압의 변화율을 무한히 크게 하는 것이 가능하고 열대책을 필요로 하지 않는 고효율 박막 자기 헤드 등으로 응용이 생각되고 있다.

본 연구에서는 열저항 진공 증착 방법으로 Ni₅₃-Fe₄₇ 박막을 Strip 형태로 제작하고 신형전류자기 기전력의 크기와 이것의 전류의 크기, 시료폭 및 두께 의존성과 자장 방향 의존성을 측정하고 종래의 자기저항 효과와 비교해 본다.

II. 실험방법

시료는 자성합금 Ni₅₃-Fe₄₇을 유리를 기판으로 하여 열저항가열식 진공 증착방법으로 제작한 두께 1000 Å 정도의 Ni₅₃-Fe₄₇ 박막으로 Fig. 1에 그 모양을 나타내었다. 신형전류자기 기전력효과는 길이 방향으로 단자 1과 단자 2 사이에 전류가 흐르고 있는 면내에 직류자장을 가하고 시료를 자장내에서 회전시켜 즉 전류의 방향과 자장 방향이 만드는 각 θ 를 변화시켰을 때 횡방향의 단자 3과 4 사이의 전압 강하 V_t 를 측정하게 된다. 전압 V_t 의 관측 방향이 자기저항 효과와 Hall 효과의 경우와 전혀 다를 수 있다. 종래의 자기저항 효과의 전압강하 V_L 는 단자 3과 5 사이에서 동시에 측정한다. 이때 자장변화에 따른 V_t 와 V_L 측정은 자체 제작한 Wheat-Stone's Bridge를

* 본 연구는 교육부 3차 5개년 기초과학 특성화 연구비(BSRI 93-213)의 지원을 받아 행한 연구의 일부임

사용하였고 X-Y 기록계에 자동으로 기록된다.

또 신형전류자기 기전력효과의 시료형상 의존성을 조사하기 위하여, 시료에 흐르는 전류, 전류가 흐르는 부분의 폭, 시료의 두께를 변화시켜 가면서 신형전류자기 기전력효과를 측정한다.

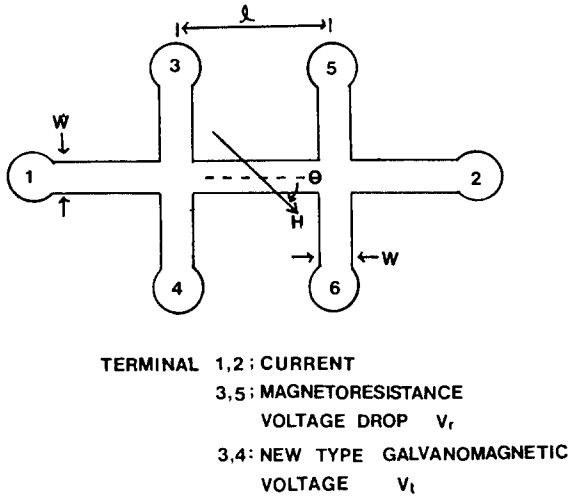


Fig. 1. Illustration of specimen.

III. 실험결과

1. 신형전류자기 기전력효과의 각도 의존성

Fig. 2는 폭 1 mm, 길이 l 이 4 mm이며 두께가 1000 Å 인 Ni₅₃-Fe₄₇ 증착박막의 전류와 자장방향이 만드는 각 θ 의 함수로서 자기 저항 효과의 전압 V_r 을 나타낸다. 이 경우 시료를 포화시키는데 충분한 100 Oe 정도의 자장을 가하고 전류는 9 mA를 흘려 주었다. V_r 의 각도 θ 의존성은 $V_r = V_0 + \Delta V_0 \cos 2\theta$ 로 관측되었고 V_0 와 ΔV_0 는 각각 9.33 mV와 0.7 mV로 $\Delta V_0/V_0 = 0.75\%$ 이다. 자기 저항 효과를 측정할 때와 동일한 조건에서 동일한 시료에 대하여 θ 함수로 신형자기 기전력효과의 전압 V_t 를 그린 것이 Fig. 3이다. 이때 V_t 의 θ 의존성은 $V_t = V_1 + \Delta V_1 \sin 2\theta$ 로 측정되어 자기저항효과와 비교하여 다르다. 여기에서 V_1 과 ΔV_1 는 각각 17 μ V, 135 μ V로서 $\Delta V_1/V_1 = 794\%$ 가 되어 자기저항의 경우 $\Delta V_0/V_0$ 값에 비하여 아주 크다. 전압강하 V_r 이 측정된 거리와 V_t 가 측정된 거리 폭이 같은 거리 만큼 떨어진 두 단자에서 측정되었다고 V_r 의 전압 변화율 $\Delta V_0/V_0$ 는 동일할 것이다. 즉 전압 변화율 $\Delta V_0/V_0$ 와 $\Delta V_1/V_1$ 은 다르더라도 단위길이당 변화 ΔV_1 과 ΔV_0 는 다르지 않음을 알 수 있다.

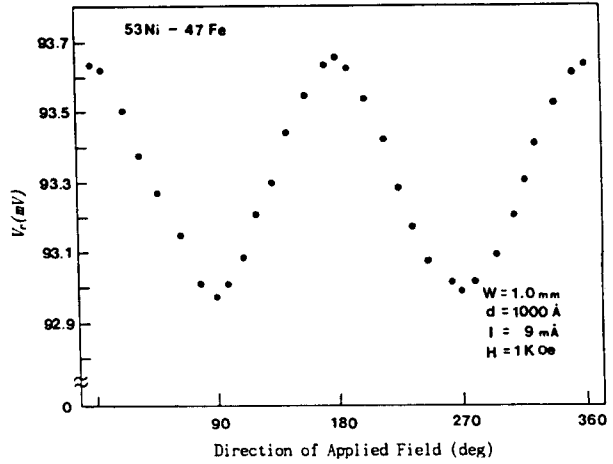


Fig. 2. Magnetoresistance voltage drop V_r .

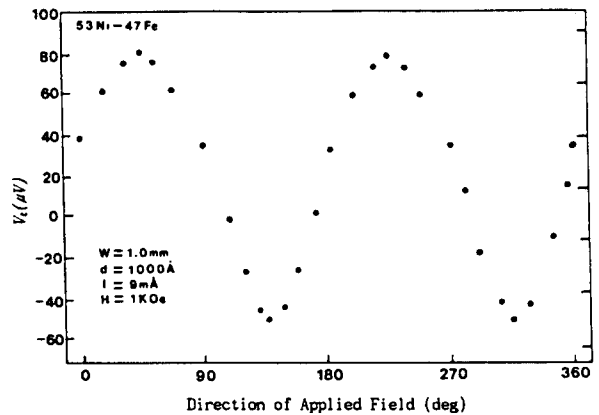


Fig. 3. New type galvanomagnetic voltage V_t .

2. 신형전류자기 기전력효과의 형상 의존성

Fig. 4는 폭 1 mm, 길이 l 이 4 mm이며 두께가 1000 Å 인 Ni₅₃-Fe₄₇ 박막 시료에 관하여 동일한 시료에서 시료전류만을 바꾸어 줬을 때 신형전류자기 기전력효과의 전압 변화 V_t 를 나타낸 것이다. Fig. 5는 폭 W 와 ΔV_t 의 관계를 나타내는 것으로 전류를 9 mA로 일정하게 유지할 때와 전류밀도를 $7.0 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ 로 일정하게 유지할 때의 2가지 경우로 측정하였다. 또 박막의 두께 d 와 전압변화 ΔV_t 와의 관계를 나타낸 것이 Fig. 6으로서 이상의 결과들로부터 ΔV_t 는 전류밀도 J 와 시료폭 W 에 비례함을 알 수 있고 비례상수를 ρ_t 라 할때 $\Delta V_t = \rho_t J W$ 와 같이 쓸 수 있다. ρ_t 는 비저항의 차원을 가지는 것을 알 수 있고 시료의 형상에 의존하지 않는 신형전류자기 기전력효과의 크기의 척도를 나타내는 값이 된다. Fig. 7은 ρ_t 의 자장의 세기 의존성을 측정한 것으로 100 Oe 정도까지는 점점 증가하다가 그것을 넘어서면 충분히 포화 것을 알 수 있다.

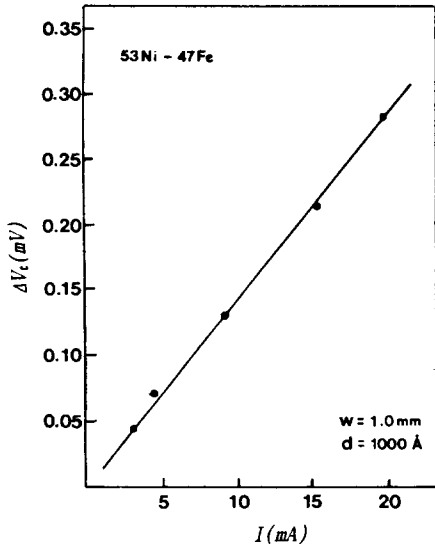


Fig. 4. Current dependence of ΔV_t .

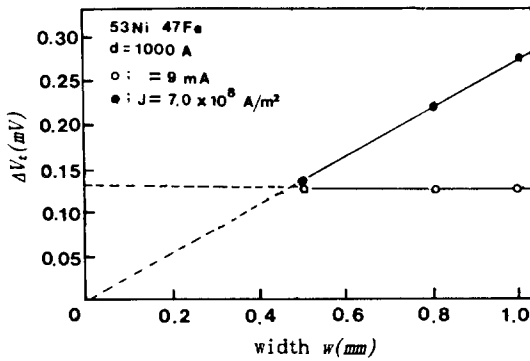


Fig. 5. Width dependence of ΔV_t .

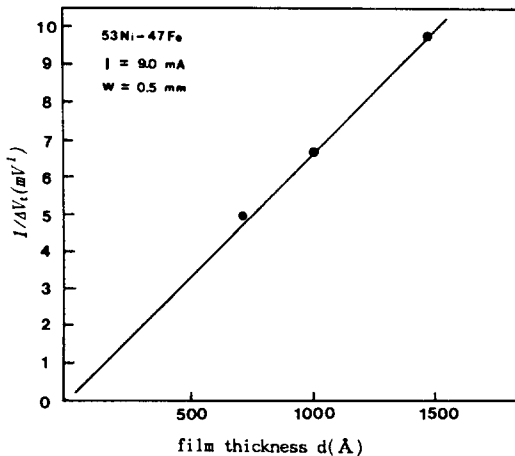


Fig. 6. Thickness dependence of ΔV_t .

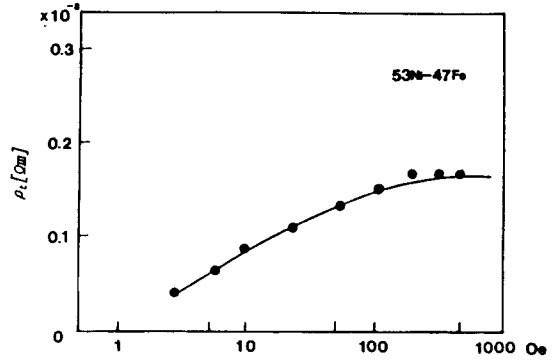


Fig. 7. Applied field dependence of ρ_t .

IV. 고찰

전류자기 기전력효과를 설명하기 위하여 Fig. 8과 같은 자성박막 시료를 생각한다. X 방향으로 전류밀도 J 의 전류가 흐르고 있고 자속밀도 $B(B_x, B_y, B_z)$ 의 자장이 XY 평면내에 있을때 carrier의 충돌에 의한 완화시간을 τ 라 할때 Carrier들의 정상상태(Steady State)의 유동속도에 관한 방정식은 2 carrier형 모델[4]에 의하면

$$v_1 = \mu_1(E + v_1 \times B)$$

$$v_2 = \mu_2(E + v_2 \times B)$$

로 표시할 수 있고, 여기에서 v, μ, E, B 는 각각 시료의 정상상태의 유동속도, 이동도(Mobility), 전장 및 자장이고 하첨자는 2 종류의 Carrier를 구별하기 위한 것이다. 그러면,

$$v_{kx} = \mu_k \frac{(1 + \mu_k^2 B_x^2)E_k + \mu_k^2 B_x B_y E_y - \mu_k B_y E_z}{1 + \mu_k^2 B^2} \quad (1)$$

$$v_{ky} = \mu_k \frac{\mu_k^2 B_x B_y E_x + (1 + \mu_k^2 B_y^2)E_y + \mu_k B_x E_z}{1 + \mu_k^2 B^2} \quad (2)$$

$$v_{kz} = \mu_k \frac{E_z + \mu_k (B_y E_x - B_x E_y)}{1 + \mu_k^2 B^2} \quad (3)$$

로 쓸 수 있고, $B^2 = B_x^2 + B_y^2$ 이고 $k = 1, 2$ 이다. 이 방정식과 관계식 $J = n_1 q_1 v_1 + n_2 q_2 v_2$ 을 써서 총 전류밀도 J 를 계산할 수 있다. n 과 q 는 Carrier 밀도와 전하

이다. 전류가 X 방향으로만 흐른다고 하면 $J_x = j$, $J_y = 0$, $J_z = 0$ 이므로 X, Y, Z 방향의 전장을 구하면

$$E_x = \frac{j[2(\sigma_1 + \sigma_2)^2 + (\sigma_1 \mu_2 + \sigma_2 \mu_1)^2 B^2] + \sigma_1 \sigma_2 (\mu_1 - \mu_2)^2 B^2 (1 - \cos 2\theta)}{2(\sigma_1 + \sigma_2)[(\sigma_1 + \sigma_2)^2 + (\sigma_1 \mu_2 + \sigma_2 \mu_1)^2 B^2]} \quad (4)$$

$$E_y = \frac{j \sigma_1 \sigma_2 (\mu_1 - \mu_2)^2 B^2 \sin 2\theta}{2(\sigma_1 + \sigma_2)[(\sigma_1 + \sigma_2)^2 + (\sigma_1 \mu_2 + \sigma_2 \mu_1)^2 B^2]} \quad (5)$$

$$E_z = \frac{j[\sigma_1 \mu_1 (1 + \mu_2^2 B^2) + \sigma_2 \mu_2 (1 + \mu_1^2 B^2)] B \sin \theta}{(\sigma_1 + \sigma_2)^2 + (\sigma_1 \mu_2 + \sigma_2 \mu_1)^2 B^2} \quad (6)$$

이 된다. 여기에서 $\sigma = n q \mu$ 이고 $\mu = q \tau / m^*$ 이며 m^* 는 Carrier의 유효질량(Effective Mass)이다.

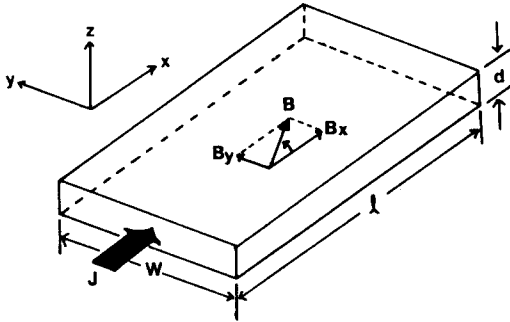


Fig. 8. The arrangement of specimen for measurement of E.

따라서 대응하는 전장과 전류밀도 사이의 관계를 나타내는 위의 결과에 의하여 X 방향(자기저항효과), Y 방향(신형전류자기 기전력효과), Z 방향(Hall 효과)의 각도 의존성이 각각 $\cos 2\theta$, $\sin 2\theta$, $\sin \theta$ 라고 하는 현상을 확인할 수 있게 한다.

실험적으로 측정한 V_L 가 상수항을 갖는 반면 이론적으로 유도한 V_L 가 상수항을 갖지않는 것은 V_L 를 측정할때 전류 I 방향과 정확하게 수직인 Y 방향으로 측정해야 함에도 불구하고 시료의 기하학적 정밀도의 부족에서 오는 것으로 이해할 수 있다.

식 (4)과 식 (5)에서 알 수 있듯이 자기저항 효과 및 신형전류자기 기전력효과의 각도 의존성분이 각각 동일

한 형태의 $(\mu_1 - \mu_2)^2$ 항에 비례한다. 만약 μ_1 과 μ_2 가 같으면 즉 carrier의 이동도 분포가 없다면, $\cos 2\theta$ 와 $\sin 2\theta$ 항은 없어지게 되고 자기저항효과와 신형전류자기 기전력효과는 나타나지 않게 된다. 바로 이점이 단일 carrier형 모델이 자기저항 효과를 정확히 기술하는데 부적합한 이유이다. 따라서 자기저항효과와 신형전류자기 기전력효과는 2 Carrier형 모델에 근거한 동일한 기원에 의해 나타나는 효과임을 암시하고 있다. 일반적으로 Hall 효과는 Carrier의 이동도 분포의 유무와 무관하고 Lorentz 힘만으로 설명이 가능하지만 자기저항 효과 및 신형전류자기 기전력효과에서는 이동도 분포를 가진다고 하는 것이 본질적으로 중요하다고 생각된다.

V. 결 론

열저항 가열식 진공증착방법으로 제작한 Ni₅₃-Fe₄₇ 박막에 관하여

(1) 신형전류자기 기전력효과의 경우, 전류와 자장 방향이 만드는 각 θ 의존성이 자기저항 효과의 $\cos 2\theta$, Hall 효과의 경우 $\sin \theta$ 인 반면에, $\sin 2\theta$ 로 관측 되었다.

(2) 신형전류자기 기전력효과는 일정한 전류밀도와 정자장(Static Magnetic Field)의 조건에서는 시료 두께에 반비례한다.

(3) 신형전류자기 기전력효과는 자장의 세기에 의존하는 전압 변화율이 자기저항효과의 경우에 비교하여 차수가 다르게 크다.

(4) 신형전류자기 기전력효과는 종래의 자기저항 효과와 더불어 2-Carrier 형 모델에 기초하여 잘 설명 될 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

[1] B. Dieny, V. S. Speriosu and S. S. P. Parkin, phys. Rev., **B43**, 1297(1991).
 [2] A. Chaiken, P. Lubitz, G. A. Prinz and M. Harford, Appl. phys. Lett., **59(2)**, 8(1991).
 [3] K. Kakuno, Jap. J. Appl. phys., **30(11A)**, 2761 (1991).
 [4] C. Kittel, Quantum Theory of Solids, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1967, p. 241, 242.

Galvanomagnetic electromotive force effect of Magnetic Ni₅₃ - Fe₄₇ Thin Films

Han Jung, Hee-Young Son, Mee-Yang Kim, Hyun-Suk Jang, and Jang-Roh Rhee

Department of physics, Sookmyung Women's University

Seoul 140-742

Yong-Ho Lee

Department of physics, Jeonbuk National University

JeonJu 560-756

(Received 26 June 1994, in final form 13 September 1994)

A new Galvanomagnetic electromotive force effect of Ni₅₃ - Fe₄₇ thin films is studied. The dependence of this effect on θ , angle between the current and the magnetic field, is found to be the form of $\sin 2\theta$, in contrast with that of the magnetoresistance effect $\cos 2\theta$ and that of the Hall effect $\sin \theta$. Property of this effect is that the rate of the voltage variation depending on the magnetic field is extremely large as compared with the magnetiresistance effect. It is theoretically confirmed that this effect is well understood on the basis of the two carrier types model.