

교류 섭동 자기장의 제 2차 고조파를 이용한 포화자기변형 측정

차상윤* · 김재관

POSCO 기술연구소 전기강판연구그룹, 경북 포항시 남구 괴동동 1번지 790-785

유권상

한국표준과학연구원 전자기표준부, 대전유성우체국사서함 102호 304-600

조영래

부산대학교 재료공학부 금속공학과, 부산시 금정구 장전동 30번지 609-735

(2005년 3월 2일 받음, 2005년 3월 18일 최종수정본 받음)

변압기 철심으로 널리 사용되고 있는 3.2 %Si-Fe 방향성전기강판에서 인장응력을 인가하면서 자기이력과정 동안 교류 섭동 자기장의 2차 고조파 파형을 관측하였다. 관측된 파형을 인가 자기장에 의한 자구 재배열과정에서 일어나는 비선형, 비대칭 자기유도에 의해 분석하였다. 인장응력 하에서 구한 2차 고조파 파형은 자구 생성 및 소멸 자기장에서 피크를 갖는데, 인장응력의 크기에 따라 피크간격은 선형적으로 감소하며, 그 기울기를 이용하여 포화자기변형을 측정할 수 있는 방법을 제시한다.

주제어 : 2차 고조파, 3.2 %Si-Fe 방향성전기강판, 인장응력, 고조파 파형, 비대칭 자화

I. 서 론

자기변형은 강자성체가 외부자기장에 의해 자화될 때, 자성체의 크기가 변화는 현상으로 자기이력, 자기 이방성과 함께 강자성체의 근본적인 특성인 자기탄성효과에 기인한다. 자성체의 길이를 l , 자기변형에 의한 길이변화를 Δl 이라고 하면 자기변형 λ 는 $\Delta l/l$ 로 주어진다[1]. 자기변형은 통상적으로 10^{-5} ~ 10^{-6} 으로써 일반 금속의 열팽창계수와 대체로 비슷하므로 자기변형을 측정할 때는 온도에 의한 길이변화가 혼입되지 않도록 주의해야 한다.

자기변형을 측정하기 위해서는 거리측정용 센서시스템, 시편자화용 자기장 인가장치 및 제어시스템이 필요하며, 이를 측정하는 방법에는 X-선 회절장치를 이용하는 방법[2], 시편의 미소변위를 직접 또는 간접적으로 측정하는 방법 등이 있다. 길이를 직접 측정하는 방법으로 광학적인 방법[3]을 이용하면 가장 정밀정확(10^{-9} m)하게 측정할 수 있으나 측정장치가 복잡하다는 단점이 있다. 따라서 비교적 미소 길이변화를 간편하게 측정할 수 있는 위치변환기 LVDT(linear variable differential transformer)법[4], 스트레인 게이지법[5], 전기 용량법[6], 미소각 자화 회전법[7] 등을 사용하는 경우가 많다.

그러나 LVDT는 차지하는 공간이 커서 기존의 전자석을 이용하기 어렵고, 스트레인 게이지법은 게이지 계수가 온도에

따라 변하고, 측정시편에 게이지를 접착제로 붙여서 측정하므로 오차가 발생할 수 있다. 전기용량법은 형태효과의 영향을 받을 수 있고, 미소각 자화 회전법은 비정질 리본에 한정되어 사용된다는 단점이 있다.

2차 고조파는 인가 자기장의 수직방향으로 자화용이축을 가진 비정질 재료에서 이방성 자기장을 측정하는데 사용되었고[8], 나선형의 이방성을 갖는 pinning 면에서 자벽의 동적 상호작용을 조사하는데 사용되었다[9]. 3.2 %Si-Fe 방향성전기강판에서 2차 고조파 파형의 피크 간격은 자구 생성 및 소멸 자기장과 관계가 있음이 밝혀졌다[10].

본 연구는 압연방향을 폭으로 하고, 압연방향의 수직방향을 길이로 갖는 3 %Si-Fe 방향성전기강판에서 인장응력에 따른 2차 고조파의 파형을 측정하고, 피크 간격 사이의 자기장을 이용하여 포화자기변형을 측정할 수 있는 방법을 제시한다.

II. 고조파의 파형

포화된 상태에서 자기장을 감소시켜 역자구(reverse domain)를 생성시키기 위해 필요한 자기장은 자기소거장(demagnetizing field)과 국부 이방성 자기장의 합으로 주어진다[11]. 자기장을 자성체에 인가하면 결정입계(grain boundary), 전위(dislocation), 개재물(inclusion)과 같은 불순물은 국부적으로 이방성 자기장을 감소시켜 역자구를 생성시킨다[12]. 자화곡선에 정현파의 섭동 자기장을 인가하며 측정된 2차 고조파는 자화를 자기장

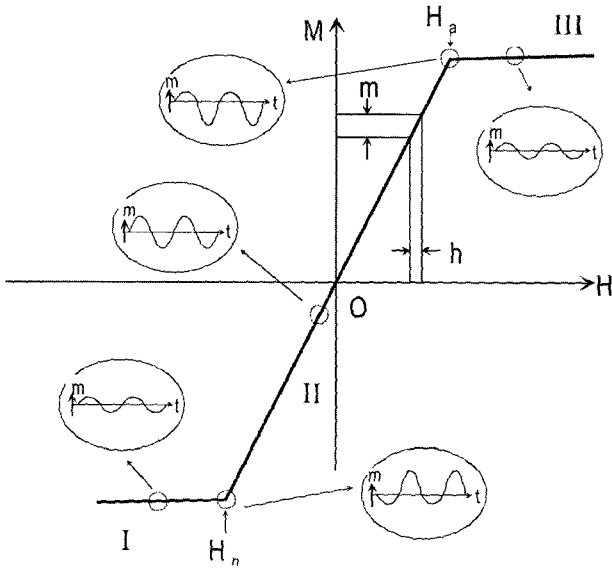


Fig. 1. Idealized magnetization curve (Inset; symmetric and asymmetric magnetic induction induced by a small field in each region).

으로 2차 도함수를 취한 것과 같고, 자기이력곡선의 두 무릎(knee)에서 2차 고조파 피크의 생성은 이방성 자기장에 의해 자구가 생성되고, 소멸됨을 의미한다[13, 14].

미세자구변화를 자기이력곡선의 거시적 특성과 관련짓는 것은 쉽지 않으나, 자기이력곡선을 단순화시켜 2차 고조파와 자기이력곡선을 관련지어 보고자 한다. 이상화된 자기유도 곡선이 Fig. 1에 주어졌다. 일반적으로 영역 I에서는 단자구와 같이 자화는 인가자기장 방향으로 정렬되어 있다가, 자기장이 감소하여 3 상한의 무릎에 도달하면 자벽이 생성된 후, II 영역에서는 자벽이동이 일어나고, 1 상한의 무릎에 도달하면 자벽이 사라지고 III 영역에서는 영역 I과 반대방향의 자구가 정렬하게 된다[15].

정자기장 H_0 에 교류 섭동자기장 $h(t)$ 가 중첩된 자기장 H

$$H = H_0 + h = H_0 + h_0 \sin \omega t \quad (1)$$

를 시편에 인가하면, 섭동자기장은 주자화곡선(major loop)을 따라 부자화곡선(minor loop)을 유기한다. 부자화곡선의 자화 과정이 주자화곡선의 자화과정과 같음을 증명하기는 어렵지만, 비선형 자화는 H_0 의 중심 자기장에 대해 섭동자기장에 의해 반복되고, 현상학적으로 h 의 멱급수에 의해 표현된다[16].

$$M = M_0 + \chi_1 h + \chi_2 h^2 + \chi_3 h^3 + \dots \quad (2)$$

여기서 M_0 는 자발자화(spontaneous magnetization)이고, χ_1 은 선형 자화율, χ_2, χ_3, \dots 은 비선형 고차 자화율이다.

식 (2)에서 첫 번째 항은 주자화곡선의 특성을, 두 번째 이하 항은 부자화곡선 특성을 나타내며, 부자화곡선의 자화는

각 영역에서 다르다. Fig. 1의 타원형 삽화(inset)에서 보이고 있는 바와 같이 주자화곡선의 I, II 및 III 영역에서는 대칭이며 기수 멱급수(odd power series)로 표현할 수 있고, 무릎 부근에서는 비대칭이며 우수 멱급수(even power series)로 표현할 수 있다[8]. H_0 가 자구 생성 자기장 H_n 나 소멸 자기장 H_d 와 같으면 자기유도는 I과 II, II와 III 영역의 기울기에 의해 영향을 받는다. 따라서 유도전압의 2차 고조파 피크는 자구 생성 자기장과 소멸 자기장을 반영한다.

탐지코일에 유기되는 전압 $E(H_0, h_0)$ 은 자화에 비례하는 자속의 시간 도함수에 의해 다음 식으로 주어진다[16].

$$E(H_0, h_0) \propto dM/dt = E_1 \cos \omega t + E_2 \sin 2\omega t + E_3 \cos 3\omega t + \dots \quad (3)$$

여기서

$$E_1 = A\omega(\chi_1 h_0 + (3/4)\chi_2 h_0^3 + \dots), \quad (4)$$

$$E_2 = A\omega(\chi_2 h_0^2 + \chi_4 h_0^4 + \dots), \quad (5)$$

$$E_3 = -A\omega((3/4)\chi_3 h_0^3 + (15/16)\chi_5 h_0^5 + \dots), \quad (6)$$

이다. 여기서 A는 탐지코일의 geometry와 관련된 상수이다. 기수 고조파의 계수 E_1, E_3, \dots 은 기수 멱급수에서 유도되며 부자화곡선의 선형 자화를 반영하고, 우수 고조파의 계수 E_2, \dots 은 우수 멱급수에서 유도되며 부자화곡선의 비선형 자화를 반영한다. 주자화곡선의 기울기 변화는 자구의 생성, 천이, 소멸 등에 기인한다[17].

III. 장치구성

고조파 측정용 전기강판 시험편은 압연방향을 폭으로 하고, 압연방향의 수직방향을 길이로 갖는 시편을 준비하였다. 시편의 크기는 길이 120 mm, 폭 15 mm, 두께 0.3 mm인 박판형이다. 고조파를 측정하기 위한 개략도가 Fig. 2에 주어졌다. 코일은 탐지코일, 직류 및 교류 자기장 인가용 코일로 구성되었다. 직류는 I/O acquisition board(National Instrument PCI-MIO-16XE-10, 16-bit resolution)에서 발생한 파형을 전력증폭기(Tecron 7562)로 전력을 증폭하여 인가하였고, 교류 자기장은 파형발생기(hp 3325B)로 인가하였다. 2차 고조파는 탐지코일에 유도되는 전압을 측정하는 것으로 섭동 자기장을 참조신호(reference signal)로 하여 락-인 증폭기를 이용하였다. 시편은 최대 자기장이 1.5 kA/m이고, 주파수가 0.05 Hz인 삼각파형을 인가한 후, 1 kHz, 80 A/m의 정형파를 섭동 자기장으로 인가하였다. 센트로 읽은 자기장과 락-인 증폭기로 읽은 고조파 파형은 I/O acquisition board의 입력측을 통하여 측정하였으며 컴퓨터에서 데이터를 처리하게 하였다. 인장응력은 시편의 길이방향으로 인가하였다.

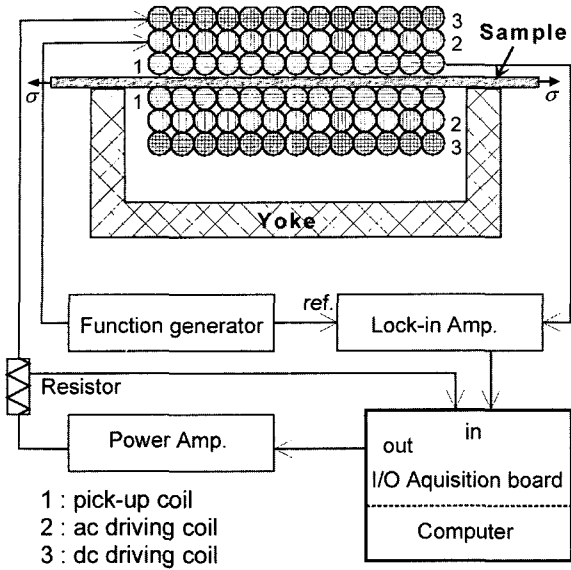


Fig. 2. Block diagram for the measurement of the second-order higher harmonics profiles at silicon steel.

IV. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 인장응력에 따른 자기이력곡선과 2차 고조파의 파형을 보이고 있다. 자기이력곡선은 굴곡점(inflection point)를 갖는 wasp-waisted 형태를 가지며, 인장응력이 커질수록 굴곡점 사이의 간격이 좁아진다. 2차 고조파의 피크는 2절에서 언급한 바와 같이 무릎 근처에서 나타나며, 이는 180° 자구의 생성과 소멸에 의한 것이다. 그리고 인장응력이 커지면 피크 사이의 간격이 감소함을 알 수 있다.

응력 하에서 이방성 상수는 다음과 같이 기술된다[18].

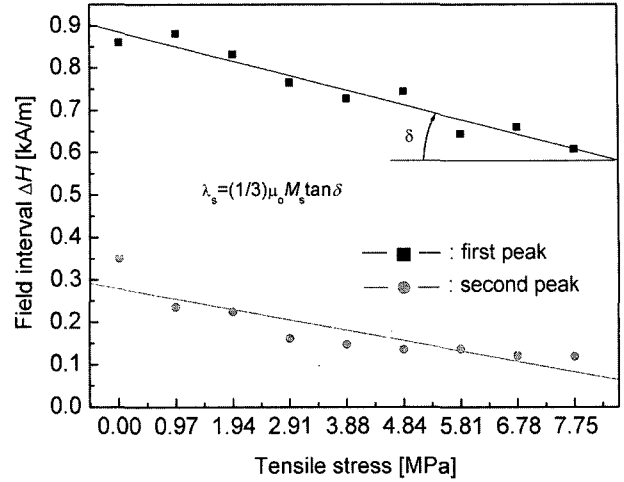


Fig. 4. The field interval with tensile stress.

$$K = K_c(\phi) + K_\sigma \tag{7}$$

여기서 $K_c(\phi)$ 는 결정 이방성 상수이고, $K_\sigma = (3/2)\lambda_{s\sigma}$ 는 응력 유도 이방성 상수이다. 지구 생성 자기장은 이방성 상수의 함수로써 주어진다[19].

$$H_n = NM_s - 2K/(\mu_0 M_s) = NM_s - 2(\mu_0 M_s)(K_c(\phi) + (3/2)\lambda_s \sigma) \tag{8}$$

여기서 N , M_s 는 반자장 계수와 포화자화이다. 본 측정에서는 자료가 닫혀있으므로 반자장 계수 N 은 0이다. 따라서 식 (8)에서 $\lambda_s = (1/3)(\mu_0 M_s)\tan\delta (= \Delta H/\Delta\sigma)$ 이다.

Fig. 4는 인장 응력에 대한 2차 고조파의 피크 간격이 감소함을 보여주고 있다. Fig. 4에서 기울기 $\Delta H/\Delta\sigma$ 을 구하고 식 $\lambda_s = (1/3)(\mu_0 M_s)\tan\delta$ 을 이용하여 포화 자기변형을 구하면

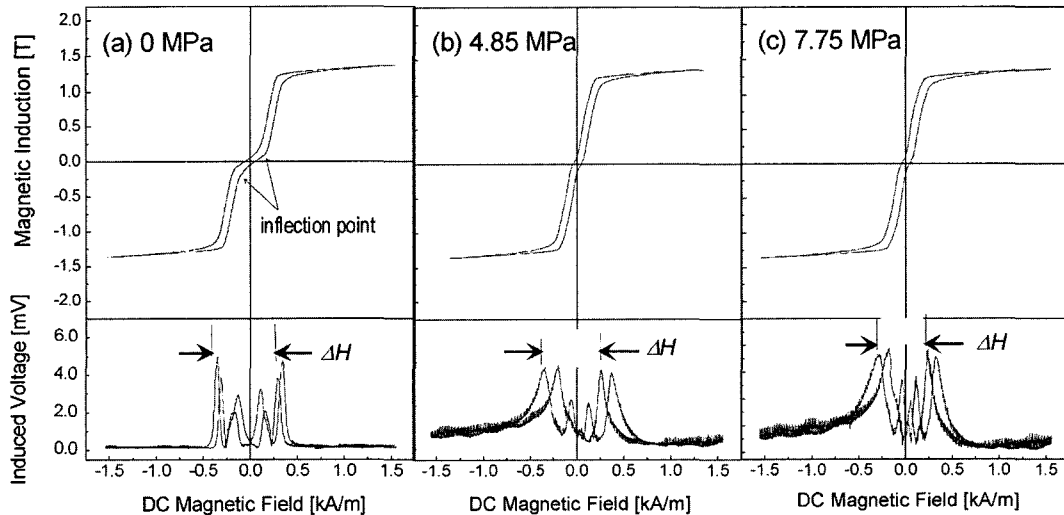


Fig. 3. The change of hysteresis loops and the second-order higher harmonics with tensile stress.

24.1×10^{-6} 이고, 이 값은 J. W. Shilling이 구한 23.7×10^{-6} 과 잘 일치한다[20].

V. 결 론

2차 고조파 파형을 자기 이방성을 반영한 자구 생성 및 소멸 자기장으로 해석하였다. 인장응력이 증가함에 따라 자기 이방성이 감소함으로 2차 고조파 피크 사이의 간격은 좁아졌다. 인장 응력에 대한 2차 고조파 피크 간격에서 구한 기술기에서 3.2 %Si-Fe 방향성전기강판의 포화 자기변형을 계산하였으며, 그 값은 24.1×10^{-6} 이었다. 이 방법을 이용하면 보다 간편하게 방향성 전기강판의 포화자기변형을 측정할 수 있다.

참고문헌

- [1] R. Boll, K. J. Overshott, Magnetic Sensors, VCH, Weinheim (1989), pp. 36-38.
- [2] Etienne du Tremolet de Lacheisserie, Magnetostriction, CRC Press, Boca Raton (1993), pp. 330.
- [3] S. Breen, B. E. Paton, B. L. Blackford, and M. H. Jercho, Appl. Opt., **29**, 16(1990).
- [4] R. Boll and K. J. Overshott, Magnetic Sensors, VCH, Weinheim (1989), pp. 269-278.
- [5] C. G. Kim, H. C. Kim, and K. Haga, J. Phys. D: Appl. Phys., **23**, 1436(1990).
- [6] K. Kadowaki, JMMM, **79**, 358(1989).
- [7] K. Narita, J. Yamasaki, and H. Fukunaga, IEEE Trans. Mag., **16**, 435(1980).
- [8] A. Garcia-Arribas, J. M. Barandiaran, and G. Herzer, J. Appl. Phys., **71**, 3047(1992).
- [9] P. Sanchez, E. Lopez, M. C. Sanchez, and C. Aroca, IEEE Trans. Mag., **26**, 1139(1990).
- [10] C. G. Kim, H. C. Kim, D. Y. Kim, K. H. Lee, and D. G. Hwang, Phys. Stat. Sol (a), **151**, 397(1995).
- [11] H. Kronmuller, K. D. Durst, and M. Sagawa, JMMM, **74**, 291(1988).
- [12] D. G. Hwang, C. G. Kim, K. H. Lee, and H. C. Kim, JMMM, **125**, 129(1993).
- [13] J. M. Barandiaran, M. Vazquez, J. Gonzalez, and G. Rivero, IEEE Trans. Magn., **25**, 3330(1989).
- [14] H. C. Kim, D. Y. Kim, and C. G. Kim, J. Mater. Sci., **29**, 4431(1992).
- [15] C. W. Chen, Magnetism and metallurgy of soft magnetic materials, North-Holland Publ. Co. (1977), pp. 123.
- [16] H. Negishi, H. Takahashi, and M. Inoue, JMMM, **68**, 271(1987).
- [17] 황도근, 김호철, 응용물리, **5**(3), 280(1992).
- [18] B. K. Middleton, IEEE Trans. Magn., **10**, 931(1974).
- [19] A. Aharoni, Revs. Modern Phys., **34**, 227(1962).
- [20] J. W. Shilling and G. L. Houze, JR., IEEE Trans. Magn., **10**, 195(1974).

Measurement of Saturation Magnetostriction by the Second-order Higher Harmonics of ac Perturbing Magnetic Field

S. Y. Cha* and J. K. Kim

POSCO Technical Research Laboratories, P.O.Box 36, Pohang-city, 790-785, Korea

K. S. Ryu

School of Materials Science and Engineering, Pusan National University, 30 Jangjeon-dong, Geumjeong-gu, Pusan 609-735, Korea

Y. R. Cho

Korea Res. Ins. Stand. Sci., Yuseong P.O.Box 102, Daejeon 305-600, Korea

(Received 2 March 2005, in final form 18 March 2005)

The profiles of the second-order higher harmonics during B-H hysteresis loop have been measured as functions of the tensile stress in grain-oriented 3.2 % Si steels. The observed harmonics profiles have been analyzed in terms of the nonlinear, asymmetric magnetization which reflects the domain reorientation under the field. The field interval of the second-order higher harmonics is related to the nucleation and annihilation fields and a measurement method for the magnetostriction is proposed using the harmonics profiles under tensile stress.

Key words : second-order higher harmonics, grain-oriented 3.2 % Si steels, tensile stress, harmonics profile, asymmetric magnetization