

## 회전자화에 의한 무방향성 전기강판의 철손측정

손대락

한남대학교 물리학과, 대전광역시 대덕구 오정동 133번지, 306-791

금 채

충남대학교 물리학과, 대전광역시 유성구 궁동 220번지, 305-764

(2000년 8월 1일 받음, 2000년 8월 16일 최종수정본 받음)

본연구에서는 서로 직교하는 yoke 장치와 4-채널 과도기특장치를 사용하여 회전하는 자기장을 발생시키고, 회전자화에 의한 자기적 손실을 측정할 수 있는 측정시스템을 구성하였다. 개발된 측정장치를 사용하여 무방향성 규소강의 회전자화에 의한 자기적특성을 측정하였으며, 회전자화에 의한 손실의 측정에서 자기유도성분의 측정방향과 자화력성분의 측정방향이 일치하지 않아, 시계방향 및 반시계방향으로 측정한 값이 차이를 나타내었다. 그러나 시계방향 및 반시계방향으로 측정한 회전자화에 의한 손실값의 평균은 일정함을 알 수 있었으며, 이를 이용할 경우 회전자화의 측정오차를 줄일 수 있었다.

### I. 서 론

현대 산업사회에 있어서 전기에너지는 환경오염이 적고 다른 에너지원에 비해 사용이 편리하고, 전기·전자공학의 급진적 발전에 따라 그 사용량은 증가하고 있다. 전기 에너지를 발생시키는데 사용되는 대소형 발전기, 전기 에너지의 전송을 위해서 사용되는 대소형 변압기 및 전기 에너지를 역학적 에너지로 변환시키는데 사용되는 전동기와 전자석등의 코어용 재료로 사용되는 전기강(electrical steel)의 품질을 결정하는 특성은 여러가지가 있으나 중요한 특성중의 하나가 철손(core loss)으로 단위 질량당의 전력손실(W/kg)로 표시한다. 이 값은 교류전력 장치에 사용되는 철심에서 발생하는 열손실의 근원이 되는 것으로 교류전력 장치의 설계뿐만 아니라 효율면에서도 중요한 비중을 차지하고 있다. 종래에는 일차원적 자화과정에서의 손실에 관하여 많은 연구가 되었고, 측정방법이 표준화되어 있다[1]. 그러나 전기강판이 자기이방성을 가지고 있기 때문에 전동기 stator의 yoke 부분이나 변압기의 결합부분에서 회전자기유도가 발생하게 되고 이에 의한 에너지 손실이 발생하게 되며, 전기강을 사용하는 전력장치를 설계 하는데 있어서 회전자기유도에 의한 손실이 중요시 되고 있다[2-4].

특히 컴퓨터의 발달과 더불어 비선형적인 자기특성을 수치해석적인 방법을 도입하여 전력장치의 설계가 가능하고, 전력장치의 설계에서 다양한 조건하에서 교류자기특

성측정의 중요성이 증가되고 있다. 본 연구에서는 회전자기유도하에서의 손실측정이 가능한 측정장치를 개발하였으며, 개발된 장치를 사용하여 무방향성 규소강판에 대하여 회전자기유도하에서의 손실을 측정하고 분석하였다.

### II. 측정이론

전기강판재료로 사용되는 무방향성 규소강판의 경우 자기적으로 등방성을 갖는 것이 이상적이나 실제 생산공정에서 압연방향과 그 직각 방향사이의 자기적 특성이 조금 다르게 되며 이는 거시적인 자기이방성을 갖음을 의미한다. 따라서 자속밀도  $\vec{B}(t)$ 가 회전하는 경우가 발생하며, 자기유도를 회전시키기 위한 비틀림력  $\vec{\tau}(t)$ 는 다음과 같다.

$$\vec{\tau}(t) = \vec{B}(t) \times \vec{H}(t) \quad (1)$$

자기유도  $\vec{B}(t)$ 가 각속도  $\vec{\omega}$ 로 평면에서 회전을 할 경우  $\vec{\omega}$ 의 방향과  $\vec{\tau}$ 의 방향이 평행이 된다. 그리고 회전자기이력손실  $P_r$ 을 단위시간 단위질량당의 손실로 정의하면 다음과 같다.

$$P_r = \frac{1}{DT} \int_0^T [B_x(t)H_y(t) - B_y(t)H_x(t)] \omega(t) dt \quad (2)$$

여기서  $T$ 는 주기이고  $D$ 는 시편의 밀도이다. 한편회전자기유도하에서 2차원상에서  $\vec{B}$ 와  $\vec{H}$ 가 있을때 회전자기유도하에서 단위시간, 단위질량 당의 자기에너지 손실(W/kg)  $P_r$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$P_i = \frac{1}{DT} \int_0^T \left[ H_x(t) \frac{dB_x(t)}{dt} + H_y(t) \frac{dB_y(t)}{dt} \right] dt \quad (4)$$

원형의 회전자화과정에서만  $P_r$ 과  $P_i$ 가 동일하나 그 외의 경우는  $P_r$ 과  $P_i$ 가 동일하지 않다.

회전 자기이력 손실을 측정하기 위해서는 회전자기유도 하에서 x-성분의 자기유도  $B_x$  및 자화력  $H_x$ 와 y-성분의 자기유도  $B_y$ 와 자화력  $H_y$ 를 측정하여야 한다.  $B_x$ 와  $B_y$ 를 측정하기 위해서 시편에 potential probe를 사용하는 방법이 있으나[4], 본 연구에서는 시편에 직경 0.5 mmφ인 구멍을 뚫은 후에 직경이 0.12 mmφ인 에나멜선을 1회 권선하여 Faraday의 전자기유도법칙을 사용 직접 측정하는 방법을 택하였다. 이 경우 시편의 두께가  $t_s$ 이고 코일 사이의 폭이  $w_c$ 일 경우 코일 양단에 유도되는 전압을 적분하면 시편의 자기유도는 다음과 같다.

$$B(t) = -\frac{1}{t_s w_c} \int V_B(t) dt \quad (5)$$

회전자기유도 발생장치가 yoke에 자화코일을 권선하여 자기장을 발생시키기 때문에 자화력  $H$ 의 측정이 솔레노이드에 흐르는 전류로부터의 계산이 불가능하다. 따라서 H-탐지코일을 사용하여야 된다. 이 경우  $H_x$ 와  $H_y$ 를 동시에 측정하여야 되기 때문에 코일포머에 2개의 코일이 서로 직교되게 권선하여야 된다. 이 경우 H-탐지코일에 유도되는 기전력  $V_H$ 를 전자적분기를 사용하여 적분하면 다음과 같다.

$$H(t) = -\frac{1}{\mu_0 N_H A_H} \int V_H(t) dt \quad (6)$$

여기서  $N_H A_H$ 는 H-탐지코일의 면적 권선수(area-turns)이다. 회전자화에 의한 손실의 계산은 식 (2)를 사용할 경우

$$P_r = -\frac{1}{\mu_0 D T^2 t_s w_c} \int_0^T \left[ \frac{1}{N_{Hy} A_{Hy}} (\int V_{Bx}(t) dt) \cdot (\int V_{Hy}(t) dt) - \frac{1}{N_{Hx} A_{Hx}} (\int V_{By}(t) dt) \cdot (\int V_{Hx}(t) dt) \right] dt \quad (8)$$

이 된다

한편 식 (4)를 사용하여 단위질량 당의 자기에너지 손실을 측정할 경우 다음과 같다.

$$P_i = -\frac{t_s w_c}{\mu_0 D T} \int_0^T \left[ \frac{1}{N_{Hx} A_{Hx}} V_{Bx}(t) (\int V_{Hx}(t) dt) + \frac{1}{N_{Hy} A_{Hy}} V_{By}(t) (\int V_{Hy}(t) dt) \right] dt \quad (9)$$

### III. 측정장치 제작

회전자기유도를 발생하기 위해서는 위상이 서로 다른 2개의 자화력  $H(t)$ 를 시편에 가하여 주고 시편의 자기유도  $B(t)$ 가 원하는 파형이 되게 자화력을 조절하는 B-feed back 장치가 필요하게 된다. 시편에 2축의 자화력을 가하기 위한 yoke 장치는 Fig. 1과 같이 구성하였다. yoke의 재질은 두께가 0.5 mm인 무방향성 규소강판(PN-18)을 사용하였으며, 규소강판 160층을 바니쉬 몰딩한 후 wire cutting 방법을 이용하여 절단하므로써 강판사이가 절연이 되게 하였다. 한편 각방향 pole의 자속이 폐곡선을 형성시키기 위하여 yoke를 ㄷ자 형으로 하여 각축의 자속만 통과하고, 축사이의 자기저항을 크게 하기 위하여 yoke와 yoke 사이의 간격을 1 cm로 하였다. 한편 시편의 자속이 yoke방향으로 분포하는 것을 방지하기 위하여 pole과 yoke의 아랫면 사이의 거리가 시편폭의 2배 이상되게 설계하였다. Fig. 2는 본 연구에서 구성한 yoke 장치의 사진이다.

회전자기유도의 측정을 위하여 시편에 미세한 구멍을 뚫어서 B-코일을 권선하는 방법을 선택하였다. 자화력의 측정은 H-탐지코일방법을 사용하였으며, 2차원의 자화력  $H$ 를 측정하기 위하여 크기가 2 cm×2 cm 두께가 1 mm인 epoxy 판에 직경이 0.1 mmφ인 에나멜 동선을 1층 권선하였고 그 위에 첫번째층에 직각이 되게 코일을 권선하였다. H-search 코일의 면적권선수  $NA$  및 직각도의 교정은 독일 연방물리기술청(Physikalisch-Technische Bundesanstalt)의 강자성연구실에서 교정을 하였으며, 그 교정값은  $N_x A_x = 91.5 \pm 0.1 \text{ cm}^2$ ,  $N_y A_y = 98.5 \pm 0.1 \text{ cm}^2$ 이고 두 코일 사이의 각도는  $\alpha = 89.8^\circ \pm 0.1^\circ$ 이었다.

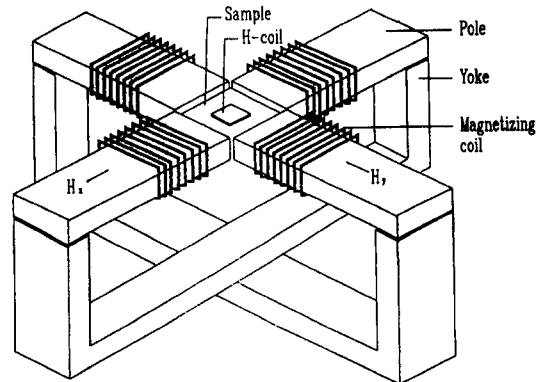


Fig. 1. Schematic diagram of the yoke system for the rotational magnetization.

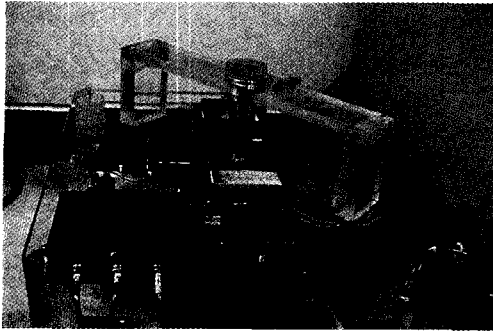


Fig. 2. Photography of the constructed yoke system.

회전자기유도하에서의 자기특성을 분석하기 위해서는 원형 및 타원형의 자기유도를 발생시켜야 한다. 이를 위해서는 2-channel 파형합성기(hp 3245A)를 사용 두정현파의 진폭과 위상을 조절하였다.

이차원에서의 자기유도 및 회전 자화력 측정을 위해서는 자기유도의  $B_x$  및  $B_y$  성분과 자화력의  $H_x$  및  $H_y$  성분을 모두 동시에 측정하여야 한다. 이를 위해서는 4채널 digitizer를 사용하여 일정한 sampling 주파수를 동시에 측정 하여야 되고 4개의 신호를 digitize 한후 컴퓨터로 데이터를 가져와서 계산을 하여야 되기 때문에 4-channel transient recorder가 필요하게 된다. 본 연구에서는 VXI System에 2-채널, 12bit의 transient recorder(hp 1429B)를 2개 사용하여 4-channel로 구성하였다. 이 경우 2개의 장치를 동시에 동기시켜야 되기 때문에 2차코일에 유도되는 기전력을 적분한 후의 신호를 전압비교기를 사용하여 digital 신호를 만들어 transient recorder의 external trigger에 입력하므로써 4-채널을 동시에 동기시켜서 측정할 수 있게 하였다.

측정시스템의 구성은 회전자기유도 발생용 yoke장치와 회전자기유도를 위한 B-feedback 장치, 자기유도 및 자화

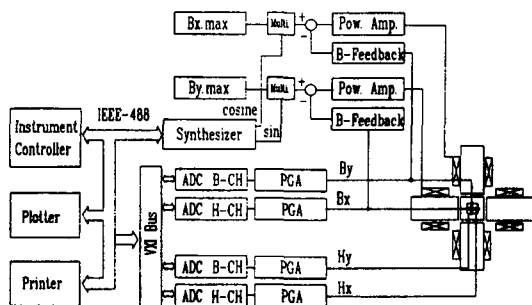


Fig. 3. Block diagram of the rotational hysteresis loss measuring system which was constructed in this work.

력 측정장치 및 4채널 과도기록기를 모두 연결하여 구성하여야 한다. Fig. 3은 본 연구에서 제작한 회전자기력 손실 측정시스템의 구조도이다.

#### IV. 회전자기력손실의 측정 및 해석

회전자기유도를 발생시키는 방법은 시계의 회전방향(CW)과 반시계방향(CCW)이 있다. 원형의 회전자화인 경우 x-축방향에 유도되는 기전력의 파형이  $v_0 \sin \omega t$ 일 때 y-축방향에 유도되는 기전력을 CW 방향일 경우  $v_0 \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$ , CCW방향일 경우  $v_0 \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$ 이 되게 파형 합성장치에 의하여 합성된 두파형을 B-feedback장치를 이용하여 합성된 파형과 동일한 파형이 2차코일에 유도되게 한후 측정하면 된다.

Fig. 4은 무방향성 규소강판 PN-20 시편에 대하여 B-탐지코일과 H-탐지코일의 직각을 조절하기 위하여 H-탐지코일의 각도를 미세조절하면서 각도에 따른 회전자화에 의한 손실  $P_r$ 을 회전방향이 CW와 CCW일때 측정된 결과이다. Fig. 4에서 보면 각도에 따라 CW와 CCW의  $P_r$ 이 서로 반대되게 증감을 하며 평균은 각도에 관계없이 일정함을 알 수 있다. 따라서 회전자화에 의한 손실을 측정할 때 B-코일과 H-탐지코일의 각도를 일치하기 위하여 Fig. 4와 같이 측정하여 CW와 CCW의 방향에서의 손실  $P_r$ 이 일치하게 조절하여 측정을 하거나, 미세조절이 어려운 경우 두 회전방향의 손실의 평균을 취하면 회전자화에 의한 손실을 정밀하게 측정할 수 있음을 보여준다.

Fig. 5는 CW와 CCW의 방향에 대하여 손실이 일치하는 각도에서 최대자기유도  $B_m = 1.40$  T에서 회전자화에 의한 자기력 곡선의 측정결과를 보이고 있다. Fig. 5-a)는  $B_x$ - $B_y$  곡선으로 원형의 회전자화가 되었음을 나타내고

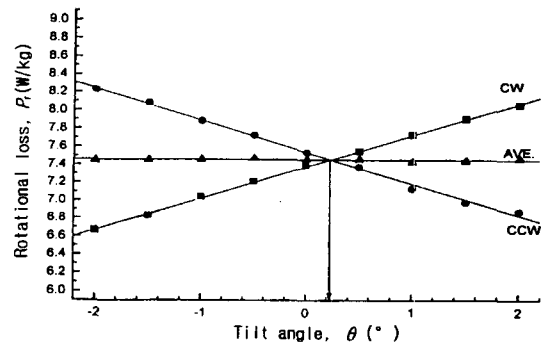


Fig. 4. Rotational energy loss depending on the angle between B-coil and H-search coil for non-oriented silicon steel.

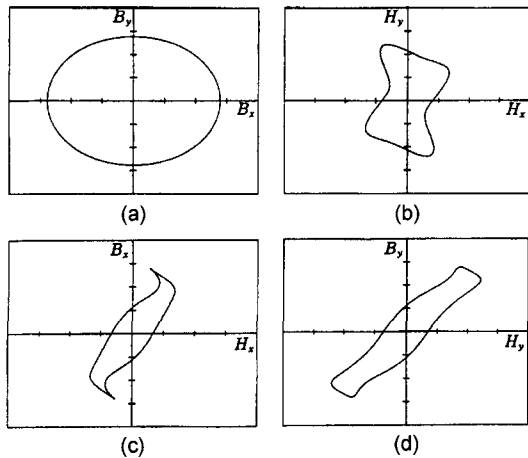


Fig. 5. Rotational hysteresis loss measurement under maximum magnetic induction  $B_{max}$  of 1.4 T at 60 Hz for the non-oriented silicon steel under counter-clockwise direction; a) for  $B_x$ - $B_x$  loop, b) for  $H_x$ - $H_y$  loop, c) for  $B_x$ - $H_x$  loop, and d) for  $B_y$ - $H_y$  loop.

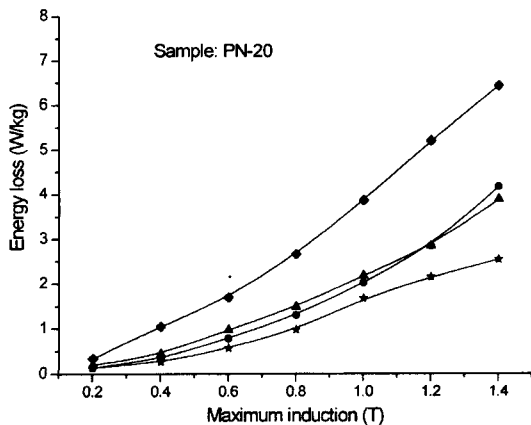


Fig. 6. Rotational hysteresis loss and core loss depends on the maximum magnetic induction  $B_{max}$  at 60 Hz for the non-oriented silicon steel; -★-: x-component of rotational loss, -▲- : y-component of rotational loss, -◆- : total rotational loss, and -●- average of the core losses of two orthogonal directions under 1-dimensional magnetization.

있다. Fig. 5-b)는  $H_x$ - $H_y$ 의 곡선, Fig. 5-c)는 x-축방향의  $B_x$ - $H_x$ 의 자기이력 곡선, 그리고 Fig. 5-d)는 y-축방향의  $B_y$ - $H_y$  자기이력곡선으로 모두 일차원 자화과정에서의 자기이력곡선의 형태와 완전히 다름을 알 수 있다.  $H_x$ - $H_y$  곡선에서 보면 방향에 따라 자화력의 크기가 변하게 되는데 이는 원형의 자화과정을 하기 위한 자화력의 크기가 방향에 따라 다름을 의미하며, 무방향성의 규소강판의 거

시적인 자기이방성에 의한 결과이다.

Fig. 6는 원형의 회전자화과정에서 최대자기유도에 따른 손실을 측정된 결과로 ★는 x성분의 손실이고 ▲는 y성분 측의 손실이다. ◆는 이들을 더한 총 손실을 나타낸 것으로  $P_{rx}$ 와  $P_{ry}$ 의 성분의 증가하는 경향이 최대자기유도에 따라 비선형적으로 변함을 알 수 있다. ●는 일차원 자화과정에서 동일한 최대자기유도 하에서 x-축의 철손  $P_{rx}$ 와 y-축의 철손  $P_{ry}$ 를 평균한 값으로 회전자화에 의한 손실이 같은 최대자기유도하에서 일차원 자화과정에서의 손실보다 많이 크음을 알 수 있다. 따라서 전력장치의 설계에 있어서 회전자화가 발생하는 경우 회전자화에 의한 손실을 전력장치의 설계에 고려하여야 됨을 알 수 있다.

### V. 결 론

유도 전동기나 변압기에서 전기강판의 자기적 이방성에 의하여 회전자화가 발생하며 회전자화에 의한 손실이 교번자화 과정에서의 손실에 비하여 큰 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 전기강판의 회전자화에 의한 손실을 측정하기 위하여 회전자화 yoke장치 및 4채널 과도기록기를 구성하여 측정시스템을 구성하고 무방향성 규소강판에 대하여 손실을 측정하였다. 측정시 B-코일과 H-탐지코일 사이의 각도에 의한 측정오차는 손실을 시계방향 및 반시계방향의 회전자화를 측정하여 평균함으로써 줄일 수 있었다. 또한 회전자화에 의한 손실은 같은 최대자속밀도의 교번 자화과정에서보다 많이 크음을 알 수 있었다. 따라서 전력장치의 설계에 있어서 회전자화에 의한 손실을 전력장치의 설계에 고려하여야 함을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] IEC.404-3 Method of Measurement of Specific Total Losses of Magnetic Sheet and Strips by means of a Single Sheet Tester.
- [2] J. D. Sievert, "Determination of AC Magnetic Power Loss of Electrical Steel : Present Status and Trends," IEEE MAG-20, 1702(1984).
- [3] J. Sievert, "Recent Advances in the One-and Two-dimensional Magnetic Measurement Technique for Electrical Sheet Steel," IEEE MAG-26, 2553(1990).
- [4] J. Sievert, "On Measuring the Magnetic Properties of Electrical Sheet Steel under Rotational Magnetization," JMMM, 112, 50(1992).
- [5] H. Teichmann, "International Standardization of Magnetic Material for Rotating Electrical Machines," IEC Bulletin Vol. XXI No 110, March 1988.

## **Energy Loss Measurement of Non-oriented Electrical Steel Sheets Under Rotational Magnetization**

**D. Son**

*Dept of Physics, Hannam University, Taejon 305-791, Korea*

**Chae Kum**

*Dept. of Physics, Chungnam National University 305-764, Korea*

(Received 1 August 2000, in final form 16 August 2000)

We have constructed a rotational loss measuring system which consists of two yoke system for rotational magnetization and 4-channel transient recording system for  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $B_x$  and  $B_y$  measurements. Using the constructed measuring system, we have measured rotational energy loss for non-oriented electrical steel sheets. Rotational energy loss was depending on the angle between B-search coil and H-search coil, and the direction of rotation (clockwise and counter clockwise). The average of the rotational energy losses under clockwise and counter clockwise was independent of the angle between B-search coil and H-search coil, and we could improve measuring uncertainty using the averaged rotational energy losses.