

# 자속밀도 파형제어에 의한 토로이달 벌크 전기강의 자기특성 측정

論 文
56-5-8

## Experimental Measurement of Magnetic Properties of a Toroidal-type Bulk Electrical Steel using B-waveform Control

陰泳煥\* · 高彰燮<sup>†</sup> · 洪瑄基\*\* · 申判錫\*\*\*  
 (Young Hwan Eum · Chang Seop Koh · Sun-Ki Hong · Pan Seok Shin)

**Abstract** - Magnetic properties of electrical steel are, in general, measured by using Epstein frame or single sheet tester (SST). These methods, however, require very strict regulation of a specimen in its size and shape, thus, can not be easily applied to various types of specimen. On the other hand, a ring-test method, which measures only the isotropic properties, can be easily applied to most cases because it requires a toroidal-type specimen of arbitrary size. This method, especially, is considered as an unique available method for a bulk-type specimen. In this paper, a ring-test method is developed, and applied to the measurement of magnetic properties of a bulk-type electrical steel with a toroidal-type specimen. In the measurement, the magnetic properties and iron losses are measured and compared with each other at the both sinusoidal magnetic flux density and sinusoidal magnetic field intensity conditions under 0.2Hz and 60Hz alternating magnetic fields excitation. Through experimental measurements, a sinusoidal magnetic flux density condition is proven appropriate for the measurement of magnetic properties, including iron loss characteristics, of electrical steels.

**Key Words** : Ring Test, Iron Loss, BH Curve, Electrical Steel, Ring-type Bulk Steel, IEC 404-2

### 1. 서 론

전기강(Electrical steel)은 변압기, 전동기, 그리고 발전기를 비롯한 거의 모든 전기기기를 구성하는 가장 기본적인 부분이다. 따라서 전기강을 이용하여 제작된 전기기기의 특성은 동일하게 설계된 경우에도 전기강의 특성에 따라 크게 달라진다. 이러한 관점에서 볼 때 전기강의 정확한 특성 측정기술은 우수한 품질의 전기강을 생산하기 위해서는 물론 그 측정결과를 전기기기의 설계과정에 적용함으로써 고효율, 고성능의 우수한 전기기기 개발을 위한 핵심기술이라 할 수 있다 [1].

일반적으로 전기강판의 자기특성은 엡스타인 장치(Epstein frame) 또는 SST(Single Sheet Tester)를 이용하여 측정된다 [2]. 그러나 엡스타인 장치와 SST에서는 규격화된 판형(Strip sheet)의 시료가 요구되나, 실제적인 제품의 개발 내지는 제품의 특성 측정에 있어서는 그 크기 및 규격을 준수하는 것이 어려워 특성측정이 어려운 경우가 많으며, 이러한 경우에는 전기강의 특성 측정을 위하여 토로이달 링 측정법(Ring test)이 사용된다. 이 측정법은 시료의 크기 등에 제한이 적기 때문에 그 활용도가 매우 높으며 특히 벌크 형

태의 시료에 대해서는 거의 유일한 측정법이라 할 수 있다 [2].

본 논문에서는 벌크 전기강의 자기이력곡선(Hysteresis loop)과 철손 특성을 측정하기 위하여 토로이달 링 형태의 시료를 이용한 자기특성 측정 시스템을 개발하였다. 자기특성 측정에서 와전류에 의한 영향을 최소화하기 위해 0.2Hz의 교번자계 특성을 측정하였으며, 와전류에 의한 영향을 비교하기 위하여 60Hz의 정현파 자계세기 조건에서의 측정을 병행하였다. 또한, 교번여자에서의 정현파 자속밀도 조건과 정현파 자계세기 조건에서의 특성을 비교함으로써 정확한 철손을 측정하기 위해서는 정현파 자속밀도 조건에서 측정이 이루어져야 함을 보여, 이로부터 교번자계 하에서의 자기특성 측정에 관한 기준을 제시하였고 자기특성 및 철손의 측정방법에 대하여 고찰하였다.

### 2. 이론적 배경 및 측정법

#### 2.1 자속밀도(B)의 측정

자속밀도는 통상 B-coil을 이용하여 측정할 수 있다. 전기강에 자계가 인가되면 그 내부에 자화(磁化, Magnetization)가 일어나고, 이때 B-coil을 쇄교하는 자속 량의 변화에 의하여 B-coil의 양단에는 다음과 같은 전압이 유기된다.

$$e = \oint_{coil} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{d\lambda}{dt} = NA \frac{dB}{dt} \quad [V] \quad (1)$$

여기서,  $\vec{E}$ 는 유기되는 전계의 세기,  $\lambda$ 는 전체 쇄교자속

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 忠北大 電氣電子컴퓨터 工學部 教授  
 E-mail : kohcs@chungbuk.ac.kr

\* 學生會員 : 忠北大 電氣工學科 碩士課程

\*\* 正會員 : 湖西大 電氣情報通信工學部 副教授

\*\*\* 正會員 : 弘益大 電氣電子컴퓨터 工學部 教授

接受日字 : 2007年 1月 11日

最終完了 : 2007年 2月 21日

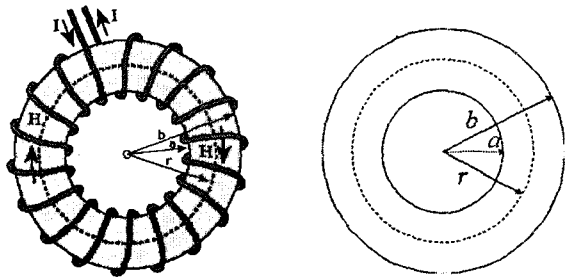


그림 1 토로이달 코어에서의 여자전류와 자계세기  
Fig. 1 Exciting current and magnetic field intensity in toroidal core

을 나타내며,  $N$ 과  $A$ 는 각각  $B$ -coil의 권선수와 면적을 나타낸다. 이때  $B$ -coil 내부의 자속밀도는 평균적으로 다음과 같이 계산된다 [3].

$$B(t) = \frac{1}{NA} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad [T] \quad (2)$$

### 2.2 자계세기(H)의 측정

자계의 세기는 여자전류법(Exciting current method)을 사용하여 측정하였다. 자기폐회로에서 자계의 세기와 여자전류의 관계는 암페어의 주회법칙을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = Ni \quad [A] \quad (3)$$

토로이달 시료에 대하여 위의 식을 적용하면, 자계의 세기와 인가전류의 관계는 다음과 같이 구해진다.

$$H(t) = \frac{N}{l} i(t) = \frac{N}{2\pi r} i(t) \quad [A/m] \quad (4)$$

여기서  $l$ 은 유효자속의 길이,  $r$ 은 토로이달 시료의 유효반경으로 그림 1에서의  $r$ 과 같다 [3].

### 2.3 철손의 계산

일반적으로 철손(iron loss)은 자기이력손실(hysteresis loss)과 와전류손실(eddy current loss)의 합으로 표현되며 이때의 각 손실은 다음 식으로 근사되어 왔다 [3].

$$P_i = P_h + P_e = k_h B^n \omega_s + k_e B^2 \omega_s^2 \quad [W/m^3] \quad (5)$$

여기서,  $P_i$ 는 철손,  $P_h$ 는 자기이력손실,  $P_e$ 는 와전류손실을 각각 나타내고, 상수  $k_h$ ,  $k_e$  그리고 지수  $n$ 은 일반적으로 자속밀도  $B$ 가 완전한 정현파일 경우에 대하여 산정되는 계수이고, 전기기기의 내부에서와 같이 자속밀도의 파형이 왜곡되는 경우에는 적절히 보정해야 하므로 식 (5)에 의하여 계산되는 손실은 실제의 손실과 정확히 일치하지는

않는다.

전기장판에서 발생하는 철손은 전기장판 내에서의 자속밀도( $B$ ) 및 자계의 세기( $H$ )의 시간적인 변화에 의해 발생하며,  $B$ 와  $H$ 의 시간적인 변화가 주어지면 Poynting의 정리로부터 다음과 같이 계산 된다 [4].

$$P_i = \frac{1}{\rho T} \int_T \vec{H} \cdot \frac{d\vec{B}}{dt} dt \quad [W/kg] \quad (6)$$

여기서  $\rho$ 는 철의 무게 밀도,  $T$ 는 자속밀도파형의 주기이다. 따라서 전기장판에서 발생하는 국부적인 철손을 측정하기 위해서는 전기장판 내에서의 자속밀도와 자계의 세기를 측정할 수 있어야 한다. 또한 식 (6)은 비단  $B$ 와  $H$ 가 측정된 경우만이 아니라 유한요소법 등을 이용하는 경우에도  $B$ 와  $H$ 가 정확히 계산되면 이로부터 철손을 계산할 수 있음을 보여준다. 그러나 유한요소법을 이용하여  $B$ 와  $H$ 를 계산하는 과정에서, 대부분의 경우에는, 시료의 히스테리시스 현상과 와전류 현상을 무시하여 해석하기 때문에 정확한  $B$ 와  $H$ 의 계산이 어렵고, 따라서 식 (6)을 적용하여 철손을 계산하더라도 그 결과는 실제의 철손과 달라진다. 결과적으로 전기장판에서 발생하는 철손을 정확히 측정하는 것은 전기장판 내의 자속밀도( $B$ )와 자계의 세기( $H$ )를 정확히 측정하는 일로 귀착된다. 식 (6)으로 주어지는 철손은 교번자계에 의한 손실과 회전자계에 의한 손실로 나뉘고 이들은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$P_i = P_a + P_r \quad (7)$$

$$P_a = \frac{1}{\rho T} \int_T |\vec{H}| \frac{d|\vec{B}|}{dt} \cos \alpha dt \quad (8)$$

$$P_r = \frac{1}{\rho T} \int_T \frac{d\theta}{dt} (\vec{H} \times \vec{B})_z dt \quad (9)$$

여기서  $\alpha$ 는  $B$ 와  $H$  사이의 위상차를 나타내는 각도이며,  $\theta$ 는  $B$ 의 위상각이다. 본 논문에서 측정된 토로이달 시료의 경우에는 순수하게 교번자계만이 인가되므로, 식 (6)에 의하여 측정된 손실은 식 (8)로 표현되는 교번자계에 의한 손실이다 [4,5]. 이때 와전류에 의한 손실은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_e &= \frac{1}{\delta w} \int r^2 dV \\ &= \frac{1}{\delta w} \int_{-\delta/2}^{\delta/2} r \left( \frac{x}{r} \frac{dB}{dt} \right)^2 u x dx \\ &= \frac{\delta^2}{12r} \left( \frac{dB}{dt} \right)^2 \quad [W/m^3] \end{aligned} \quad (10)$$

여기서  $\delta$ 와  $w$ 는 각각 도체단면의 단축길기와 장축길이,  $r$ 은 도체의 저항률,  $J$ 는 전류 밀도를 나타낸다 [3]. 따라서 전기장 내부에서 발생하는 철손을 정확히 계산하기 위해서는 식 (6)을 사용하여야 하며, 이때 와전류 손실을 독립적으로 계산하기 위해서는 식 (10)을 이용하여야 한다. 그림 2는 전기장의 단면에서 발생하는 와전류의 예를 나타낸 것

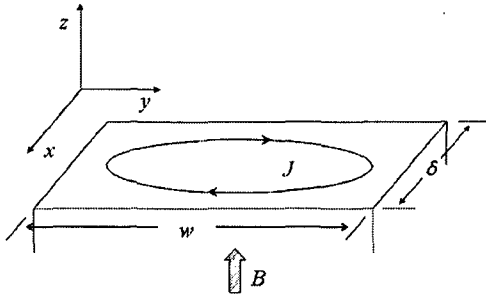


그림 2 도체 단면에서의 와전류  
Fig. 2 Eddy current in conductor section

으로 식 (10)에 나타난  $\delta$  와  $w$  을 나타낸다.

### 2.4 초기자화곡선(BH curve)의 측정

자속밀도( $B$ )와 자계세기( $H$ )의 관계는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad (11)$$

여기서  $\mu_r$  과  $\mu_0$  는 각각 매질에서의 비투자율과 공기 중에서의 투자율을 나타낸다.

정확한 의미에서의 초기자화곡선을 측정하기 위해서는 시료 내에 발생하는 와전류에 의한 영향을 완전히 배제할 수 있어야 하기 때문에, 직류 전류로 여자한 상태에서  $B$  와  $H$  를 측정 하여야 한다. 그러나 이 경우 시료의 초기상태가 문제되며 (즉, 시료가 갖고 있는 잔류자속밀도가 문제되며), 동시에 자속밀도와 자계의 세기를 측정하는 것이 매우 어렵기 때문에, 통상은  $B$  와  $H$  를 측정할 수 있는 가능한 낮은 주파수를 갖는 교류전류로 여자하여 측정하게 된다. 그러나 이 경우, 비록 매우 낮은 주파수라 하더라도 시료 내에는 자속밀도의 변화로 인하여 와전류가 흐르게 되고, 따라서 측정된 결과는 엄밀한 의미의 초기자화곡선과는 차이를 보이게 된다.

이러한 관점에서 볼 때, 시료 내에 발생하는 와전류는 여자전류의 주파수에 비례하기 때문에 정확한 측정을 위해서는 여자전류의 주파수를 가능한 낮게 하는 것이 좋다. 그러나 자속밀도 측정의 근간이 되는  $B$ -coil의 유기전압의 크기가 식 (1)과 같이 여자전류의 주파수에 비례하기 때문에, 여자전류의 주파수가 너무 낮아지면 측정 시간이 많이 걸리고 또한 유기기전력의 측정과정에서 신호 대 잡음의 비가 나빠지게 되어 측정이 어려워진다. 따라서 원만한 측정을 위해서는 주파수를 적절히 조절할 필요가 있다.

그림 3은 일반적인 전기장에서 측정되는 자기이력곡선(Hysteresis loop)을 나타내는 것으로, (a)와 (b)는 각각 50Hz와 0.01Hz에서 측정된 결과를 나타낸다. 그림 (b)에서와 같이 여자전류의 주파수가 충분히 낮은 경우에는 와전류의 영향이 무시되기 때문에 자속밀도  $B$  의 최대값은 자계의 세기  $H$  가 최대인 순간에 발생하며, 따라서 자기이력곡선 상에서  $B$  와  $H$  가 최대인 점 ( $H_m, B_m$ )은 자속밀도

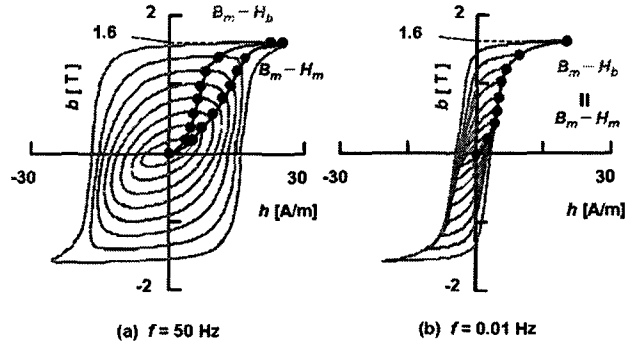


그림 3 여자주파수에 따른 자기이력곡선 비교  
Fig. 3 Comparison of hysteresis loops by exciting frequency

$B$  가 최대인 순간의 자계의 세기의 값을  $H_b$  라 할 때 ( $H_b, B_m$ )과 일치하게 된다. 따라서 여자전류의 주파수가 충분히 낮은 경우 시료의 초기자화곡선은 각각의 자기이력곡선으로부터 ( $H_m, B_m$ )을 찾아 연결함으로써 측정된다 [6]. 이 방법은 최근까지 일반적으로 사용되어온 방법으로, 측정된 결과가 여자 전류의 주파수에 매우 민감한 특성을 갖는다. 따라서 신뢰할 수 있는 측정을 위해서는 매우 낮은 주파수로 여자하는 것이 필요하나 이는 앞에서 설명한 바와 같이 매우 어려운 일이다.

한편 그림 3(a)은 여자전류의 주파수를 50Hz로 하여 측정된 자기이력곡선을 나타낸 것으로, 그림 3(b)과 비교하면 와전류의 영향으로 보자력은 물론 자기이력곡선의 전체적인 모양이 많이 달라졌음을 알 수 있다. 그런데 각각의 자기이력곡선에서 자속밀도가 최대가 되는 순간에 주목하면, 이 순간에는 자속밀도의 시간에 대한 변화율이 영이 되기 때문에, 즉,  $dB/dt=0$ 이기 때문에 와전류의 영향이 순간적으로 무시될 수 있다. 이점에 착안하여 각각의 자기이력곡선에서 자속밀도가 최대가 되는 점 즉, ( $H_b, B_m$ )을 연결하면 그림 3(b)의 초기자화곡선과 매우 유사한 곡선을 얻게 된다. 그러나 엄밀한 의미에서, 특히 시료가 심하게 포화될수록, 시료 내에서 각 부분별로 자속밀도가 최대가 되는 시간이 달라진다[7]. 따라서 자속밀도가 최대가 되는 순간에 자속밀도의 시간에 대한 변화율이 과연 영인가하는 문제점이 발생한다. 그러므로 이 방법을 적용하는 경우에도 여자 전류의 주파수는 가능한 낮게 유지하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 이러한 이유로 본 논문에서는 여자전류의 주파수를 0.2Hz로 하였다.

## 3. 토로이달 벌크 전기장의 자기특성 측정

### 3.1 측정 시스템

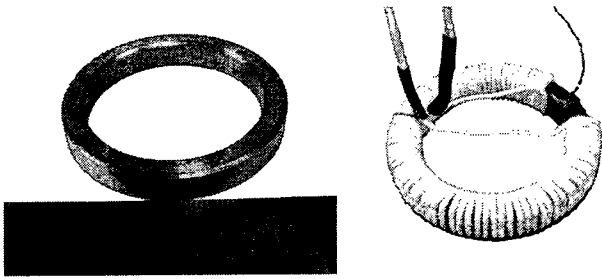
본 논문에서는 토로이달 벌크 전기장의 자기특성 및 철손 측정 시스템을 개발하였다. 토로이달 링 전기장의 자기특성 측정 시스템은 LabVIEW를 이용하여 개발된 프로그램으로 PC를 통해 제어되기 때문에 다음과 같은 장점을 갖는다.

- (1) 측정에 관여하는 모든 값들은 컴퓨터를 통해 제어되므로 자동화된 측정시스템의 구현이 가능하다.

(2) 측정치에 대한 모든 데이터는 파일로 저장 되므로 측정 데이터의 처리 및 분석이 용이하다.

(3) 정현파뿐만 아니라 임의에 자속밀도조건에 대해서도 측정이 가능하다.

또한, 시료의 규격이 비교적 자유로우므로 개발된 측정시스템은 엡스타인 장치나 SST에 비해 활용도가 매우 높을 것으로 예상 된다 [2].



(a) 측정용 시료 (b) 권선 후의 시료

그림 4 토로이달 벌크 전기강  
Fig. 4 Specimen of toroidal bulk shape

### 3.1.1 시료의 규격

측정에 사용한 시료는 그림 4의 (a)에 나타난 것처럼 두께 7mm의 강판을 내경 4mm, 외경 5mm로 절삭가공 하였고, 그림 4의 (b)에서와 같이 여자용 1차 권선과 측정용 2차 권선을 하였다. 또한 여자전류의 주파수가 낮은 경우 발열에 의한 오차를 최소화하기 위하여 냉각장치를 설치하였다. 여자권선은 직경 0.9mm의 단선으로 80turn을 감았으며, 측정권선은 직경 0.1mm의 단선으로 35turn 기준으로 주파수에 따라 가감하였다. 통상 측정권선은 여자권선과 비슷하거나 많이 감는 것으로 알려져 있으나, 측정권선의 권선수가 증가하면 권선자체의 임피던스 증가로 인해 노이즈에 취약한 단점을 가지므로 본 논문에서는 신호증폭용 앰프(Signal amplifier)를 사용하고 측정권선의 권선수를 최소로 하였다.

### 3.1.2 측정 시스템의 구성

그림 5는 본 논문에서 개발된 토로이달 벌크 전기강의 자기특성 측정 시스템을 나타내었다. 측정 시스템은 신호처리용 컴퓨터와 아날로그 신호의 발생 및 수집을 위한 DAQ보드, 여자용 전력증폭기(Power amplifier), 여자 전류측정용 직렬저항 및 원형의 시료에 감겨진 여자권선 그리고 측정권선(B-coil)으로 구성된다.

컴퓨터에서 발생된 여자전압의 파형은 계단형의 이산파형이므로 저주파 통과 필터를 통과한 후, 전력증폭기에 연결된다. 증폭된 전압은 여자권선에 연결되어 시료를 여자시킨다. 직렬저항 및 측정권선에서 측정된 전압은 채널 독립형 증폭기(Isolation amplifier)를 이용하여 증폭된 후, 컴퓨터로 들어오게 된다. 이때 측정시스템과 컴퓨터 간의 통신은 모두 DAQ 보드를 사용하여 이루어진다. 직렬저항의 양단에 걸리는 전압과 측정권선의 유기전압이 측정되면, 이들로부터 각

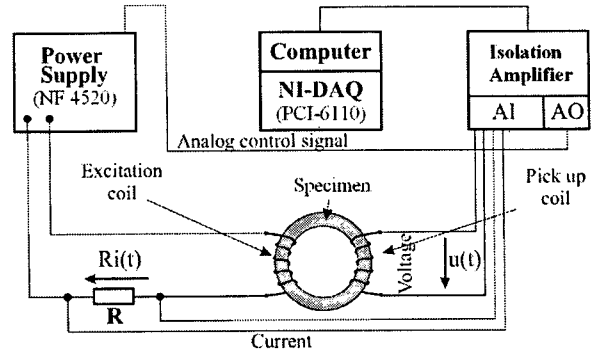


그림 5 토로이달 전기강의 자기특성 측정 시스템  
Fig. 5 Diagram of measurement system

각 자계의 세기( $H$ )와 자속밀도( $B$ )를 계산하고 자기이력곡선을 구한다. 측정과 관련된 모든 연산은 LabVIEW로 개발된 프로그램을 이용하여 이루어진다.

### 3.1.3 자속밀도 파형의 제어

일반적으로 측정하고자 하는 시료의 자기적인 특성이 비선형이기 때문에, 정현파 여자전류를 인가하면 그림 6의 (a)에서처럼 비 정현파의 자속밀도( $B$ )를 얻게 된다. 그러나 일반적으로 전기강판의 특성들은 정현파 자속밀도의 조건 하에서 측정되며, 국제표준(IEC 404-2)에서도 정현파 자속밀도 조건을 규정하고 있다 [8]. 자속밀도의 파형을 정현파로 유지하기 위해서는 정현파 자속밀도가 얻어지도록 여자전압의 파형을 조절해야 하고 이 과정을 자속밀도의 파형제어( $B$ -waveform control)라고 한다.

다음과 같이 주어지는 정현파 자속밀도를 얻고자 하는 경우,

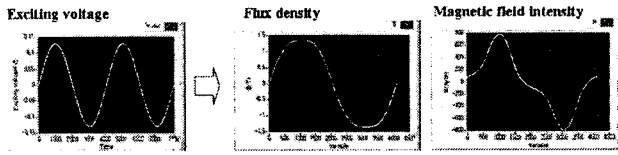
$$B(t) = B_m \sin(\omega t) \text{ [T]} \quad (10)$$

$B$ -coil에서 측정되는 유기전압은 다음과 같은 파형을 가져야 하며,

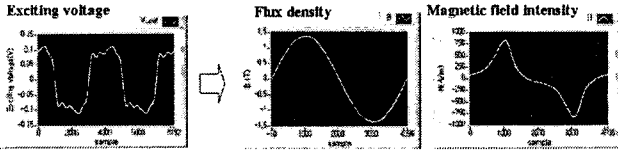
$$e_T(t) = NA\omega B_m \cos(\omega t) \text{ [V]} \quad (11)$$

여기서,  $N$ 과  $A$ 는 각각  $B$ -coil의 권회수와 면적이다. 따라서 정현파의 자속밀도가 측정되기 위해서는,  $B$ -coil의 유기기전력이 식 (11)과 같이 측정되어야 하고, 이를 위해 본 논문에서는 Digital feedback method을 사용하였으며, 그 방법은 다음과 같이 요약된다.

- (1) 컴퓨터에서 발생된 초기 여자전압 ( $v_c^{(1)}$ )을 DAQ보드를 통하여 여자권선에 인가하고,
- (2)  $B$ -coil에 유기되는 출력전압  $v_b$ 를 측정한다.
- (3) 여자전압과 유기전압을 FFT하여 각각의 기본파 성분  $v_{c1}$ 과  $v_{b1}$ 을 구한다.
- (4) 자속밀도 제어 과정의  $(i+1)$ 번째 단계에서 입력전압의 파형  $v_c^{(i+1)}$ 은 다음 식에 의해 결정된다.



(a) 정현파 여자전압 인가



(b) 정현파 자속밀도 제어

그림 6 자속밀도의 파형제어 전, 후의 여자전압 파형 비교  
 Fig. 6 Comparison of the exciting voltages before and after waveform control

$$v_c^{(i+1)} = v_c^{(i)} - K \frac{v_{cb}^{(i)}}{v_{bl}^{(i)}} (v_b^{(i)} - e_T^{(i)}) \quad (12)$$

여기서  $K$ 는 feedback coefficient이고,  $e_T$ 는 식 (11)에서 정의되는 유효기전력이다 [9]. 그림 6은 자속밀도 파형제어 전과 후의 자속밀도, 자계의 세기 및 여자전압의 파형을 비교한 것이다.

### 3.2 측정결과

자기특성의 측정은 정현파 자계세기 조건 ( $\sin H$  조건)과 정현파 자속밀도 조건 ( $\sin B$  조건)에서 측정하고 그 결과를 기준으로 강판의 특성을 비교하였다. 실험에서 여자전류의 주파수는 0.2Hz를 유지하였으며, 측정범위는 JIS 규정을 참고하여 자계의 세기를 5000[A/m]까지로 제한하였다 [10]. 또한, 시료 내에서 발생하는 와전류 손실을 비교하기 위하여 여자전류의 주파수가 60Hz인 경우에도 측정하였다.

그림 7과 8은 각각  $\sin H$ 와  $\sin B$  조건에서 측정된 자속 밀도, 자계의 세기, 그리고 자기이력곡선의 파형을 나타낸다. 이로부터 자속밀도의 파형을 정현파로 유지하기 위해서는 인가자계에 고조파 성분이 인가되어야 함을 확인 할 수 있다.

그림 9는  $\sin H$ 와  $\sin B$  조건에서 측정된 초기자화곡선을 비교한 것이다. 측정된 결과를 보면 두 조건에서 측정된 초기자화곡선이 거의 일치함을 알 수 있으며, 이를 통해 측정과정에서 자속밀도의 파형과 초기자화곡선은 큰 연관성이 없음을 확인할 수 있다. 한편 그림 10은  $\sin H$ 와  $\sin B$  조건에서 측정된 자기이력곡선을 비교한 것으로,  $\sin H$ 조건에서 측정된 자기이력곡선의 보자력( $H_c$ )이  $\sin B$  조건에서 측정된 것보다 다소 증가함을 알 수 있다. 이것은  $\sin H$  조건에서 측정하는 경우 자속밀도의 파형이 그림 7에서와 같이 비정현파가 되고, 이는 자속밀도의 파형에 많은 고조파 성분이 포함된 것이고 이들 고조파 성분의 시간변화에 기인하는 와전류가 생겨난 때문으로 해석된다.

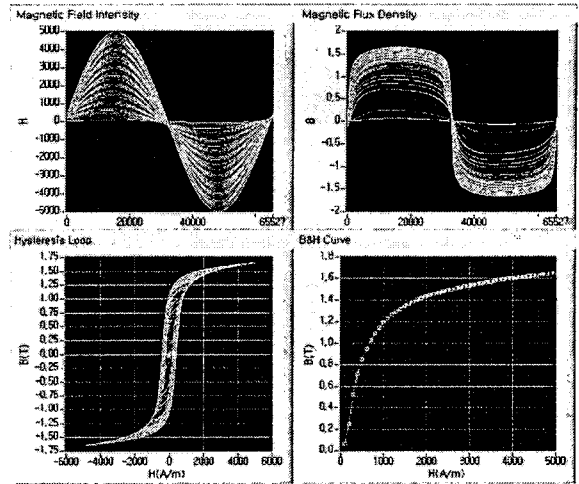


그림 7 정현파 자계세기( $\sin H$ ) 조건에서의 특성  
 (여자전류 주파수: 0.2Hz)  
 Fig. 7 Magnetic properties of sinusoidal magnetic field condition (frequency of exciting current: 0.2Hz)

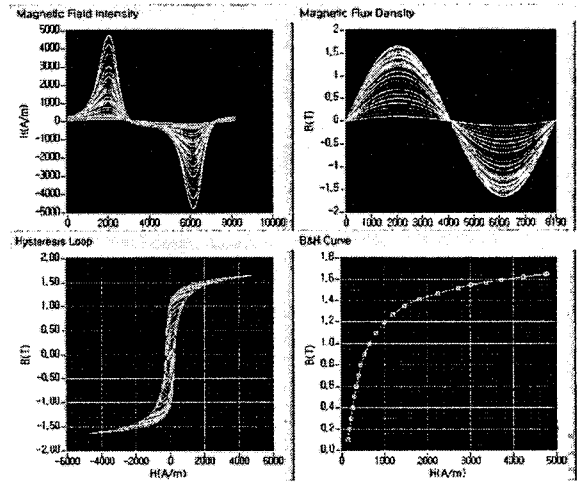


그림 8 정현파 자속밀도( $\sin B$ ) 조건에서의 특성  
 (여자전류 주파수: 0.2Hz)  
 Fig. 8 Magnetic properties of sinusoidal magnetic flux condition (frequency of exciting current: 0.2Hz)

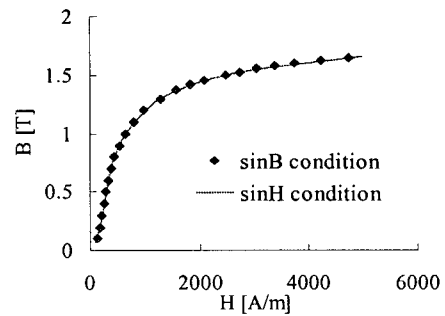


그림 9  $\sin H$ ,  $\sin B$  조건에서 초기자화곡선의 비교  
 ( $B=1.5[T]$ ,  $f=0.2Hz$ )  
 Fig. 9 Comparison of BH curve according to exciting condition

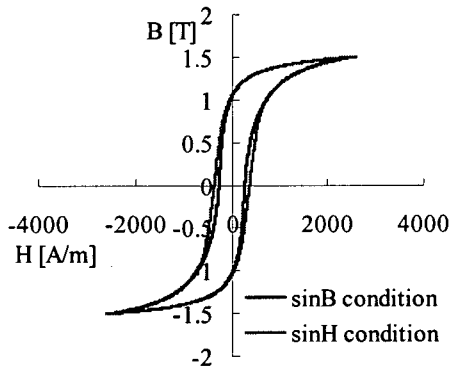


그림 10 sinH, sinB 조건에서 자기이력곡선의 비교  
( $B=1.5[T]$ ,  $f=0.2Hz$ )

Fig. 10 Comparison of hysteresis loop according to exciting condition ( $B=1.5[T]$ ,  $f=0.2Hz$ )

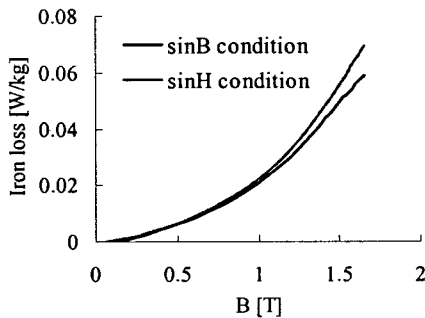


그림 11 sinH, sinB 조건에서 철손의 비교

Fig. 11 Comparison of iron loss according to exciting condition

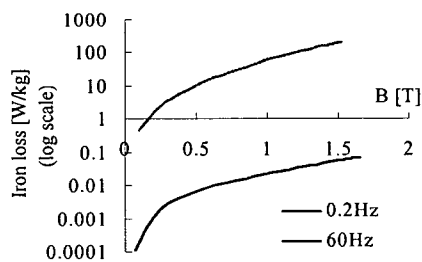
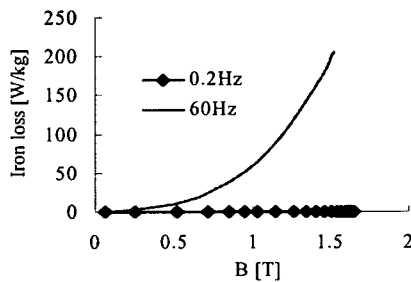


그림 12 여자 주파수에 따른 철손의 비교

Fig. 12 Comparison of iron loss according to exciting frequency

그림 11은 두 조건하에서 측정된 철손을 비교한 것으로, sinH 조건에서 측정된 철손이 sinB 조건에서 측정된 철손보다 큼을 알 수 있다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 sinH 조건의 경우 자속밀도에는 많은 고조파 성분이 포함되어 있으며 이들이 만들어 내는 와전류 손실이 자기이력손실에 더해졌기 때문이다. 따라서 동일한 자계의 세기에서 고조파 성분의 자속밀도 성분에 의하여 발생하는 와전류 손실은 그림 11에 나타난 두 가지 철손의 차이이고, 이것은 그림 10의 자기이력곡선의 면적의 차이와 동일한 것이다.

그림 12는 여자전류의 주파수가 각각 0.2Hz와 60Hz일 때의 자기이력곡선의 한 주기 당 철손을 비교한 것으로, 여자전류의 주파수가 증가함에 따라 철손이 매우 급격하게 증가함을 알 수 있다. 이는 전적으로 와전류 손실의 영향에 기인하는 것으로 여자전류의 주파수가 증가함에 따라 와전류 손실이 매우 급격하게 증가함을 의미한다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 전기기기에 널리 이용되는 전기강의 특성 측정을 위하여 토로이달 링 전기강의 자기특성측정 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 엠스타인 장치 또는 SST와는 달리 시료의 모양과 크기가 비교적 자유롭고, 벌크 형태의 시료에 대해서도 적용이 가능하기 때문에 그 활용도가 매우 높을 것으로 판단된다. 자기이력곡선과 초기자화곡선의 측정과정에서는 여자전류의 주파수가 너무 낮거나 또는 높음으로써 발생하는 잡음문제와 와전류의 영향을 동시에 해결할 수 있도록 0.2Hz와 같이 비교적 측정이 용이한 주파수에서 와전류의 영향을 제거할 수 있는 방법을 제안하였다. 또한 시료내의 자속밀도의 파형을 제어함으로써 정현파 자속밀도와 정현파 자계의 세기, 두 조건에서 특성을 측정하고 비교하였다. 그 결과 초기자화곡선은 자속밀도의 파형에 큰 영향을 받지 않으나, 자기이력곡선과 철손 특성은 자속밀도에 포함된 고조파성분에서 발생하는 와전류의 영향으로 크게 달라짐을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 논문은 2006년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

#### 참 고 문 헌

- [1] H. E. Jordan, "Energy-efficient electric motors and their application", Plenum Press, 1994.
- [2] P. Beckley, Electrical Steels for rotating machine. IEE Power and Energy Series 37, May 6, 2002.
- [3] Gordon R. Slemon, Electrical machine and drives. Addison-Wesley publishing company, Inc., pp. 2-31, 1992.
- [4] K. Atallah and D. Howe, "Calculation of the rotational power loss in electrical steel laminations from measured H and B," IEEE Trans. on Magn., vol. 29, no. 6, pp. 3547-3549, Nov. 1993.

- [5] K. Fujiwara, T. Adachi, and N. Takahashi, "A proposal of finite-element analysis considering two-dimensional magnetic properties," IEEE Trans. on Magn., vol. 38, no. 2, pp. 889-892, Mar. 2002.
- [6] K. Fujiwara, M.Nakano, and Y. Ishihara, "Standard test methods for measurment of magnetic properties of power magnetic materials," IEEJ Trans. on Magn., vol. 28, no. 5, 2004.
- [7] C.S.Koh, H.S.Yoon, K.W.Nam and H.S.Hong, "Magnetic pole shape optimization of permanent magnet motor for reduction of cogging torque," IEEE Trans. on Magn., Vol. 33(2), pp.1822-1827, Mar. 1997.
- [8] Method of measurement of magnetic, electrical and physical properties of magnetic sheet and strip, Int. Std. IEC 404-2, 1996.
- [9] K. Matsubara, N. Takahashi, K. Fujiwara and T. Nakata, "Acceleration technique of waveform control for single sheet tester," IEEE Trans. on Magn., vol. 31, no. 6, pp. 3400-3402, Nov. 1995.
- [10] Test method for magnetic steel sheet and strip, Jp. Std. JIS C 2550, 1986.



**홍 선 기 (洪瑄基)**

1965년 1월 24일생. 1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1993년~1995년 렉스 산전(주) 선임 연구원. 1995년~현재 호서대 전기정보통신공학부 교수.  
 Tel : 041-540-5674  
 Fax : 041-540-5693  
 E-mail : skhong@office.hoseo.ac.kr



**신 관 석 (申判錫)**

1977년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 Rensselaer Polytechnic 대학원 전력공학과 졸업(석사), 1989년 동대학원 전력공학과 졸업(공학), 1980년~1993년 KERI 연구원. 1993년~현재 홍익대 전기공학과 교수.  
 Tel : 041-860-2593  
 Fax : 041-863-7605  
 E-mail : psshin@hongik.ac.kr

저 자 소 개



**음 영 환 (陰泳煥)**

1981년 2월 14일생. 2006년 충북대학교 전기공학과 졸업. 2006년~현재 동대학원 전기공학전공 석사과정.  
 Tel : 043-274-2426  
 Fax : 043-274-2426  
 E-mail : yh3701@chungbuk.ac.kr



**고 창 섭 (高彰燮)**

1986년 서울대학교 전기공학과 졸업(학사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1993~1994년 미국 Florida International University 전기 및 컴퓨터 공학과 객원 연구원. 1994~1996년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원. 2003년 2월~2004년 1월 미국 Texas A&M University, 전기 컴퓨터공학과 객원 교수, 1996~현재 충북대학교 전기전자컴퓨터 공학부 교수.  
 Tel : 043-261-2426  
 Fax : 043-274-2426  
 E-mail : Kohcs@chungbuk.ac.kr