≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society, Volume 22, Number 1, February 2012 http://dx.doi.org/10.4283/JKMS.2012.22.1.023

정현파 자속밀도 제어와 디지털 궤환을 이용한 AC 손실 측정방법

장평우*

청주대학교 이공대학, 충북 청주시 상당구 내덕동 36, 360-764

(2012년 2월 10일 받음, 2012년 2월 16일 최종수정본 받음, 2012년 2월 16일 게재확정)

정현파 자속밀도 조건에서 연자성 재료의 교류자기손실을 측정하기 위한 새로운 방법을 제시하였다. 본 방법은 입력전압파형을 결정짓기 위해 통상 이용하는 $H_i(B_i)$곡선대신 $V_{in}(B)$곡선을 이용함으로서 자기장, 자속밀도 그리고 입력전압간의 위상차를 고려할 필요가 없이 직접 입력전압파형을 얻을 수 있어 프로그램이 간편하게 되는 장점을 가지고 있었다. 개발된 측정방법의 유효성을 1 kHz, 10 kHz 주파수에서 페라이트 코어로 확인할 수 있었다.

주제어 : 연자성코어, 교류 손실, 디지털 궤환, V-B 곡선, 정현파자속제어

I. 서 론

연자성재료는 인덕터, 모터, 변압기 등 전기전자분야를 중심으로 널리 사용되고 있다. 이러한 연자성재료가 가져야 할 특성으로는 높은 투자율, 높은 포화자속밀도, 낮은 보자력 그리고 낮은 손실, 우수한 기계가공성, 우수한 직류중첩특성, 낮은 생산비용 등이 있으며 이런 특성을 모두 만족하는 재료는 그리 많지 않으며, 몇 가지 특성이 중점적으로 취급되고 있다. 철손은 이 중 가장 중요한 특성으로 자속이 정현파가 되는 조건하에서 측정해야 하며 자속이 완전한 정현파일 경우 유기전압과 자속전압의 파형률(form factor)은 1.11072로 표준측정법은 파형률의 오차 ± 1%가 추천된다[1].

정현파 자속을 얻기 위해 전자적으로 조정된 전원장치를 사용하거나 부궤환전원장치를 사용해야 하나 연자성재료가 탈자상태부터 포화근방까지 자화되는 동안 전원장치가 안정적으로 유지되기 어려워 구성회로가 복잡하게 되는 단점이 있었다. 그러나 근래에 컴퓨터와 디지털기술이 발전하면서 측정기기는 디지털 마이크로프로세서를 내장하고 있으며 더욱이 프로그램언어의 발전은 컴퓨터를 기초로 한 시스템의 사용을 매우 편하고 친숙하게 만들었다.

연자성재료의 *B-H* 특성은 매우 비선형적이어서 입력신호만으로 연자성재료의 거동을 예측하기 매우 어렵다. 따라서 원하고자 하는 파형, 예를 들어 정현파자속을 얻기 위해서 전류파형을 반복하여 수정하는 방법이 사용되고 있다. 대표적인 방법으로는 자화곡선을 매개변수화 시켜 $H_i(B_i)$ 곡선을 얻은 후 정현파자속을 얻기 위한 전류파형을 이 곡선에 사상(mapping)하여 얻고 회로의 임피던스로부터 입력전압을 얻는 과정을 반복한다[2]. 회로의 정확한 임피던스를 알면 입력전압파형을 정확히 결정할 수 있으나 자성재료가 매우 비선형적일뿐 아니라 일반적으로 전류증폭기대신 전압증폭기를 흔히 사용하므로 자성코어가 포함된 회로의 임피던스를 알아야 하나 이를 정확히 알 수 없어 수렴과정이 길어지는 단점이 있다. 또 다른 방법으로 자속밀도파형을 FFT(Fast Fourier Transform)하여 기본파를 제외한 고조파성분과 같은 진폭을 가지고 위상이 180° 차이나는 파형을 입력전압에 더해 주는 것이다[3]. 이 방법은 자속밀도가 이미 정현파에 근접했을 때 유효할 뿐 아니라 전류파형과 자속밀도파형간의 위상제어 문제 그리고 전류파형을 전압파형으로 전환시킬 때 임피던스를 알아야 하는 문제는 여전히 남아 있다. Zurek 등은 매 반복과정마다 얻은 자속밀도파형을 기준파형과 비교하여 그 차이를 궤환시킬 때 전류파형, 자속파형 그리고 출력전압파형을 FFT시키고 형상이득율과 위상이득율을 계상하여 출력전압파형을 얻는 알고리즘을 제시하였다[4]. 그러나 이 방법도 이득율을 잘 조정해야하고 또 전류, 자속밀도 그리고 출력파형간의 위상차를 정확히 조절해야 하며 더구나 반복횟수가 증가되는 어려움이 있었다. 유기전압이 정현파가 되면 자연히 자속밀도도 정현파가 되므로 이 방법을 사용한 것도 있다. 그러나 이 역시 기준파형, 유기전압, 입력전압간의 위상차를 조절해야 하는 어려움은 여전히 남아 있다[5, 6].

본 논문에서는 유기전압, 기준파형, 입력전압 간의 위상차을 고려하지 않고 또 형상이득율, 위상이득율 등을 전혀 고려하지 않아도 정현파 자속밀도를 빠르게 얻는 방법을 소개하고, 연자기 특성이 매우 우수한 페라이트코어에 적용시켜 그 유효성을 확인하고자 하였다.

II. 실험방법 및 디지털궤환 알고리즘

Fig. 1은 본 측정에 사용한 장치의 대략적인 구성도이다.

*Tel: (043) 229-8553, E-mail: pwjang@cju.ac.kr

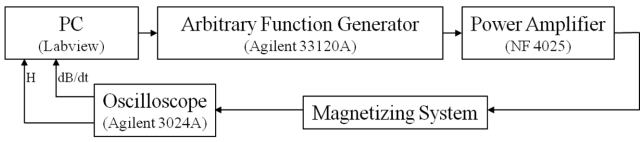

Fig. 1. Block diagram of iron loss measurement system.

모든 측정장치의 콘트롤과 데이터처리에 National Instrument 사의 Labview를 사용하였으며, 전류파형과 유기전압을 수집할 때 측정 주파수에 관계없이 12 bit 오실로스코프로 한 파형 당 2000개의 데이터를 수집하였고, 임의파형발생기 역시 한 파형 당 2000개의 데이터를 출력하도록 하였다. 전류파형은 무유도 저항의 양단에 걸리는 전압으로 환산하였다. 최초로 측정할 때 정현파 입력전압을 인가하였으며, 수집된 전류파형(I)과 유기전압($d\phi/dt$) 데이터는 디지털 저역필터(LPF, Low Pass Filter)를 거친 후 수치적분모듈에서 자속밀도파형으로 변환되고, 이전 스텝의 입력전압파형과 자속밀도파형은 정현파자속밀도를 구하기 위한 궤환모듈로 입력되어 다음 스텝의 입력전압파형 V_{in}^{i}을 결정한다.

입력파형을 결정하기 위한 궤환모듈의 알고리즘은 Fig. 2에, 그리고 알고리즘을 형상화시킨 것을 Fig. 3에 나타내었다. 이전 스텝의 입력전압파형 V_{in}^{i-1}과 자속밀도파형 B를 규격화시

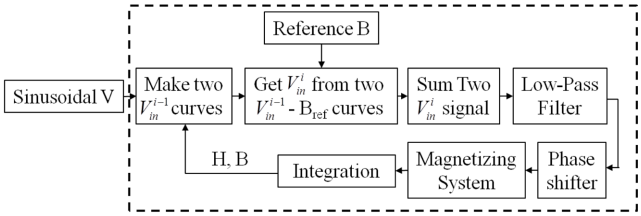

Fig. 2. Block diagram of digital feedback system.

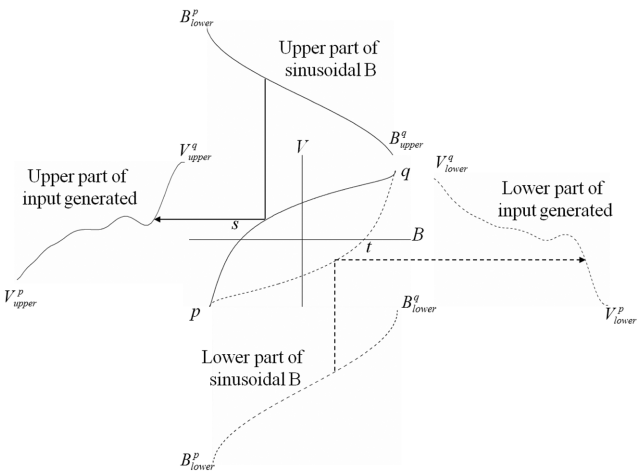

Fig. 3. graphical presentation of main process of digital feedback system.

킨 뒤 자화이력곡선을 왼쪽 곡선과 오른쪽 곡선으로 나눈 후 두 곡선을 다항식 $V_{in}^{i-1}(B_{i-1})$으로 각각 표현한다. 이렇게 구한 다항식에 정현파자속파형을 사상시켜 다음 스텝의 입력전압파형을 구한다. 이렇게 구한 입력전압파형을 디지털 LPF를 통과시킨다. 디지털 LPF를 통과시킬 때 위상이동이 일어나므로 이를 보상시키기 위한 위상보정모듈을 거친 후 최종입력파형 V_{in}^{i}을 결정한다.

위의 알고리즘을 확인하기 위해 외경 35 mm, 내경 21 mm, 두께 2.7 mm 토로이드 형상의 페라이트코어로 1 kHz, 10 kHz 주파수에서 측정하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4는 1 kHz 주파수에서 입력전압파형과 전류파형을 나타낸 것으로 입력전압파형을 정현파로 주어도 전압증폭기를 사용할 경우 코어의 비선형 인덕턴스 때문에 입력전압파형과 전류파형사이에는 위상차가 발생하고 또 전류파형의 왜곡이

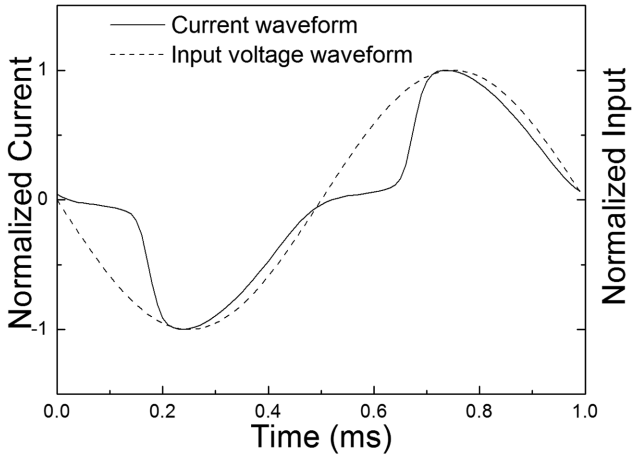

Fig. 4. Shape of current and input voltage waveform without feedback iteration.

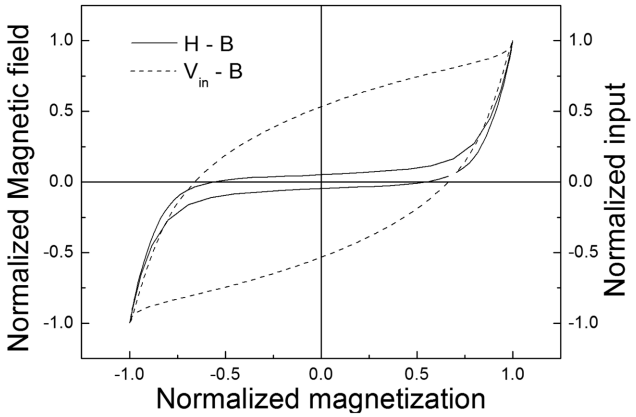

Fig. 5. Comparison between H-B and V_{in}-B curves.

일어나게 된다. Fig. 4는 입력전압파형과 전류파형의 위상을 고려하지 않은 것이다.

Fig. 5는 입력전압파형이 정현파일 때 전류파형 대 자속밀도파형 곡선(*H-B* 곡선), 입력전압파형 대 자속밀도파형 곡선(V_{in}-*B* 곡선)을 나타낸 것으로 두 곡선에서 큰 차이가 있음을 확인할 수 있다. *H-B* 곡선에서 원점근처에서 자속밀도가 급격히 변화하므로 궤환모듈에서 *H-B* 곡선을 이용할 경우 반복횟수가 길어지게 된다. 반면 V_{in}-*B* 곡선은 원점근처에서 급격한 변화는 없다.

Fig. 6과 7은 각각 반복횟수에 따른 자속밀도파형과 입력전압파형의 변화를 나타낸 것으로 반복횟수가 0일 경우 자속밀도파형은 사각파형에 가깝게 된다. 반복횟수가 늘어나면 파형은 점차 정현파에 가까워지며 10회 반복하면 완전한 정현파가 된다. 입력파형 역시 반복횟수가 늘어남에 따라 점차 변화하여 10회 이상 반복해도 입력전압파형의 변화가 없었다.

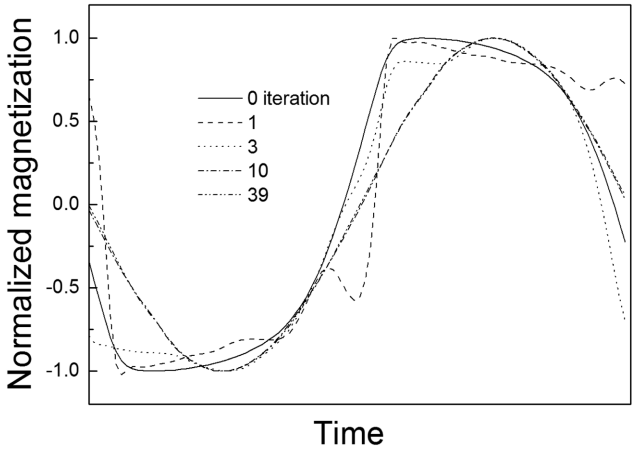

Fig. 6. Variation of flux waveform with increasing number of iteration. After 10 iteration the waveform became sinusoidal.

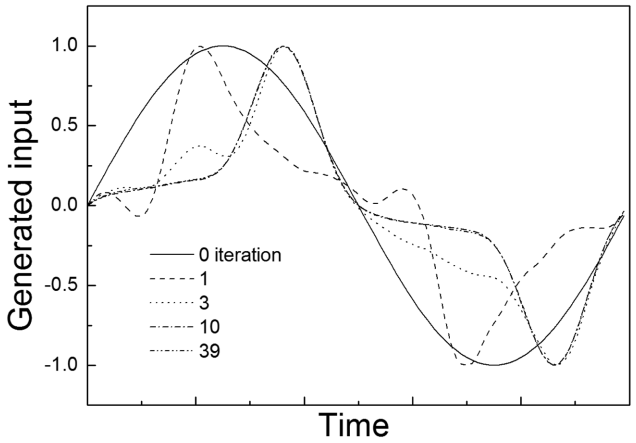

Fig. 7. Variation of input voltage waveform with increasing number of iteration. After 10 iteration the waveform was not changed.

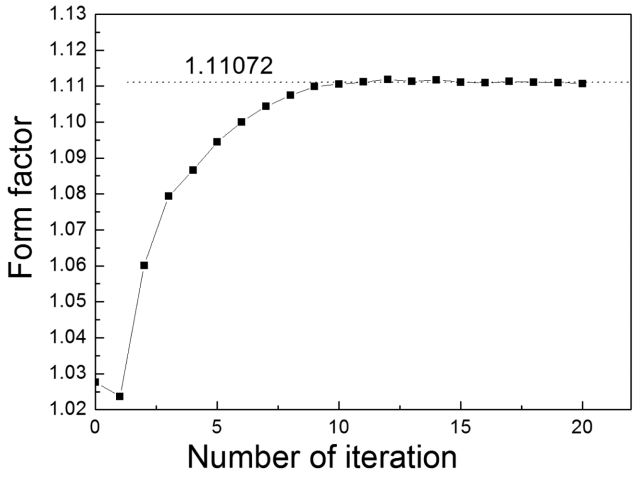

Fig. 8. Variation of form factor of flux waveform with increasing number of iteration.

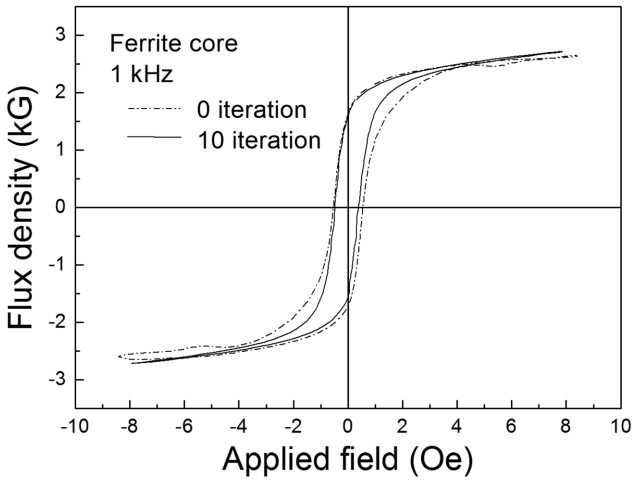

Fig. 9. *B-H* loops of before and after feedback.

Fig. 8은 반복횟수에 따른 자속밀도파형의 파형률변화를 나타낸 것으로 초기에 파형률은 급격히 증가하다 반복횟수가 증가하면 점차 $\sqrt{2}\,\pi/4$에 접근하고 10회 이상 반복하면 거의 변화하지 않았다.

자속밀도파형이 정현파로 변화되면서 *B-H*곡선의 형상이 변화하였다. Fig. 9에 디지털 궤환모듈을 0회, 그리고 10회 거친 후의 *B-H*곡선을 나타내었다. Fig. 9에서 자속밀도파형이 정현파로 되면 높은 자속밀도에서 곡선의 왜곡이 없어지고 *B-H* 곡선의 면적이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

정현파 자속밀도 조건에서 연자성 재료의 교류자기손실을 측정할 때 정현파 자속밀도파형을 얻기 위해 $H_i(B_i)$곡선대신 $V_{in}(B)$곡선을 이용함으로서 자기장, 자속밀도 그리고 입력전압

간의 위상차를 고려할 필요가 없이 직접 입력전압파형을 얻을 수 있었다. 개발된 측정방법의 유효성을 ferrite 코어의 철손을 1 kHz, 10 kHz의 주파수에서 측정하여 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2010학년도에 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음.

참고문헌

[1] 한국산업규격, 교류자기특성시험방법, KS C 2118 (1996).
[2] G. Bertotti, E. Ferrara, F. Fiorillo, and M. Pasquale, J. Appl. Phys. **73**, 5375 (1993).
[3] Yanbin Zhang, Yi Long, Qingchang Qu, Rongchang Ye, and Yong Chang, J. Magn. Magn. Mater. **312**, 443 (2007).
[4] Stan Zurek, Philip Marketos, Turgut Meydan, and Anthony J. Moses, IEEE Trans. Magn. **41**, 4242 (2005).
[5] 음영환, 고창섭, 홍선기, 신판석, 전기학회논문지 **56**, 869 (2007).
[6] Kazunori Matsubra, Norio Takahashi, Koji Fujiwara, Takahoshi Nakata, Masanori Nakano, and Hitoshi Aoki, IEEE Trans. Magn. **31**, 3400 (1995).

Method of AC Loss Under a Condition of Sinusoidal Flux Density Using Digital Feedback

Pyungwoo Jang*
College of Science and Engineering, Cheongju University, Cheongju 360-764, Korea

(Received 10 February 2012, Received in final form 16 February 2012, Accepted 16 February 2012)

New digital feedback algorithm was developed to measure iron loss of soft magnetic materials under a condition of sinusoidal flux waveform. $V_{in}(B)$ curve was used instead of $H(B)$ curve to decide next input waveform in the feedback module so that adjusting phases of current waveform, flux waveform, and input waveform could be removed. The effectiveness of the developed algorithm was verified when iron loss of ferrite cores was measured under frequencies of 1 and 10 kHz.

Keywords : soft magnetic cores, AC loss, digital feedback, V-B curves, sinusoidal flux density