

사각판재형 강재의 자기특성측정

김영학* · 김기찬

부경대학교 전기공학과, 부산시 남구 용당동 산 100번지, 608-739

신광호

경성대학교 전자정보통신학부, 부산시 남구 대연3동 314-79, 608-736

김휘석 · 윤관섭

LIG넥스원(주) Maritime연구센터, 경기도 용인시 기흥구 마북동 148-1, 446-912

양창섭

국방과학연구소, 경남 진해시, 645-600

(2010년 5월 10일 받음, 2010년 6월 1일 최종수정본 받음, 2010년 6월 1일 게재확정)

사각판재형 강재의 마이너 $B-H$ 곡선은 Labview프로그램과 측정 장치를 이용하여 공극 보정과 함께, $B-H$ 곡선의 측정을 바탕으로 3차원 유한요소법으로 구하였다. 측정방법은 1차, 2차 권선이 감긴 고투자율의 페라이트 자심을 철판 위에 두고 폐자로를 구성한 후, 페라이트 자심의 자계와 자속밀도 측정을 바탕으로 하는 것이다. 이 때, 자심과 철판 사이의 미세한 공극의 영향은 최소자승법의 2차 다항식으로 보정하였다. 해석방법은 측정된 기지력과 자속밀도를 해석치와 비교하는 방법을 이용하였다. 이 측정 방법은 고장력 강판의 자기저항이 페라이트 자심의 자기저항보다 커지는 가정 하에서는 이용될 수 있다. 그러나 페라이트 자심의 자속밀도가 포화에 가까워지게 되면 페라이트 자심의 투자율이 감소하게 되므로 높은 자속밀도에서 $B-H$ 루프를 정확하게 측정할 수 없었다. 따라서 본 실험에서는 자계가 약 520 A/m, 자속밀도가 0.15 T의 범위에서 사각판재형 강재의 $B-H$ 곡선을 구할 수 있었다.

주제어 : $B-H$ 곡선, 비투자율, 페라이트자심, Labview

I. 서 론

강재와 같은 자성체는 잔류자화에 의해 자기장이 발생하며 용접과 군사 등의 산업분야에서 잔류자화를 측정하고 제거하며, 이런 과정을 수치해석 프로그램을 이용하여 확인하는 것이 중요하다[1, 3]. 수치해석 프로그램을 이용하여 자성체의 잔류자화에 의해 발생하는 자계를 해석하는 것은 전동기와 발전기와 같은 전기기기에 이용되는 영구자석의 최적화에 필요하며 영구자석의 동작점을 정확하게 해석하기 위하여 전자장 유한요소해석 프로그램에 자성체의 각 동작조건에서 측정된 마이너 $B-H$ 곡선을 적용한다[4]. 영구자석과는 달리 일반적으로 구조용으로 이용되는 강재는 기계적인 특성이 우선되어 사용목적에 따른 다양한 조성의 강재의 자기적인 특성은 거의 알려져 있지 않다.

본 논문은 합정 건조에 이용되는 철판에 대하여 인가자계에 따른 잔류자화상태를 해석하기 위해 사각판재형 강재의 $B-H$ 곡선을 실험과 수치해석적인 방법을 이용하여 구하였다.

실험적인 방법은 반자계가 존재하는 자성체의 자기적인 특성은 일반적으로 고투자율의 자심을 이용하여 폐자로 형태로 한 후, 전체의 자속이 자심의 자기저항에 영향을 받지 않도록 측정하는 것이다. 그러나 자심과 철판 사이에는 아주 미세한 공극이 존재하며 특히, 철판의 면적이 자심의 단면적보다 크면 자속은 외연효과에 의해 철판 전면에 분포하게 되어 정확한 자로길이를 구할 수가 없게 된다. 따라서 이 연구에서는 사각철판과 자심 사이에 일정 공극을 순차적으로 증가시켜 구한 후, 최소자승법으로 공극이 없는 상태의 특성을 근사하였으며 3차원 전자장 해석 프로그램을 이용하여 측정해서 구한 자심의 동작 $B-H$ 곡선을 수치해석 프로그램에 입력한 후, 해석하여 사각철판의 $B-H$ 곡선을 구하였다.

II. 실험방법

Fig. 1은 $B-H$ 곡선을 그리기 위한 Labview 프로그램의 블록 다이어그램과 프론트 패널을 나타낸 것이다. Fig. 1(a)의 블록 다이어그램은 자계발생을 위한 정현파신호를 생성하는 부분과 $B-H$ 곡선을 그리기 위한 부분으로 나누어져 있다. 정

*Tel: (051) 629-6316, E-mail: kimyh@pknu.ac.kr

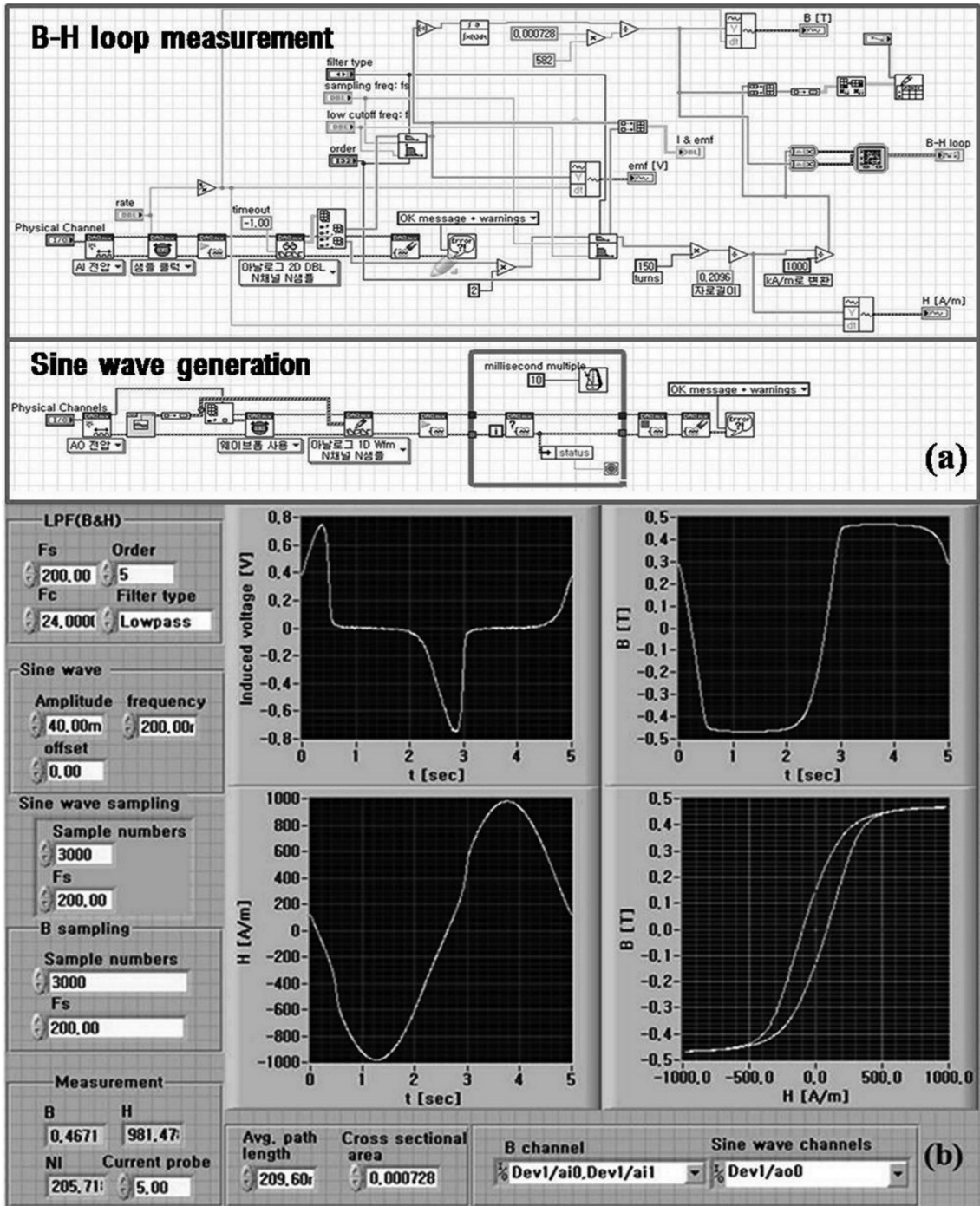


Fig. 1. Block diagram and front panel of Labview program for B-H loop measurement.

현파 신호는 컴퓨터 기반 데이터 수집보드인 DAQ 보드를 통해 자심에 인가하는 파형으로 진폭과 주파수를 입력할 수 있다. B-H 곡선의 지속밀도는 유도전압을 측정하고 적분하여 자속을 구한 다음 단면적으로 나누어 구하며 자계는 전류를 측정하고 권선수를 곱하여 자로길이를 나누어 계산한다. 이런 측정과 연산이 Labview의 블록다이어그램으로 실행된다. Fig.

1(b)의 프론트 패널은 블록 다이어그램의 입력내용과 실행상태, 측정결과를 나타내며 인가자계에 따른 동작 지속밀도와 B-H 곡선 등을 표시하도록 하였다. Fig. 2는 실험에 이용된 페라이트자심과 사각판재형 강재를 나타낸 것으로 Fig. 2(a)는 페라이트 자심의 자기적인 특성 측정을 위해 사용된 것으로 “ㄷ” 자형 고투자율 페라이트 자심 4개를 한 조로 하여

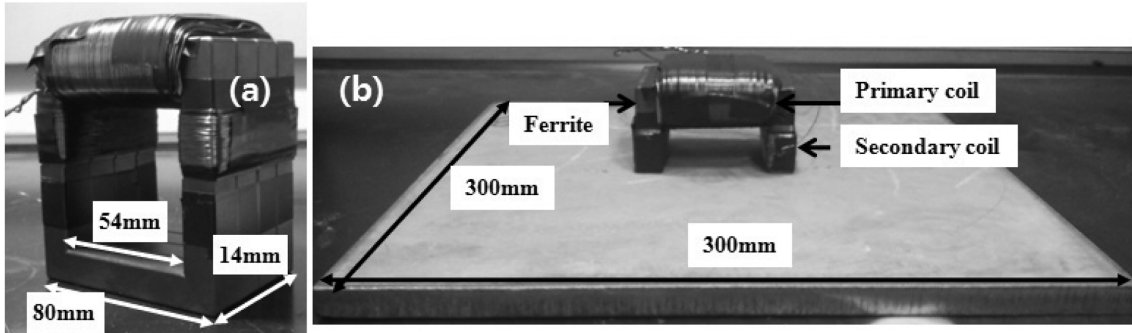


Fig. 2. Ferrite core and high tensile steel used in the experiment.

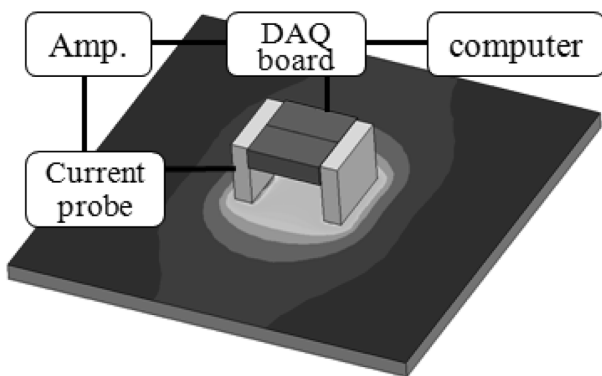


Fig. 3. Experimental setup for *B-H* loop measurement.

두 조를 겹친 것이다. 자심의 평균자로길이는 286 mm, 단면적이 728 mm² 이며 1차측 권선수는 150턴, 2차측은 582턴으로 한 조의 자심에만 권선을 감았다. Fig. 2(b)는 사각판재형 강재의 자기적인 특성을 측정하기 위한 것으로 강판 위에 권선이 감긴 페라이트 자심을 둔 것을 나타낸 것이다. 사각판재형 강재는 합정의 건조에 이용되며 Fe을 주성분으로 한다. 나머지 원소는 Si, Mn, P, S, Cu, Cr, Ni, Mo, Al, Nb, V, Ti을 가지고 두께는 12 mm, 크기는 300 mm × 300 mm 인 사각철판이다. Fig. 3은 Fig. 2(a)와 (b)에서 보여진 시료의 자기이력곡선을 측정하기 위한 실험장치의 구성을 나타낸 것이다. 자심의 1차측 권선에 인가되는 전류와 2차측 권선에 발생하는 전압은 컴퓨터 기반 데이터 수집보드인 DAQ 보드를 통해 Labview 프로그램으로 생성 및 측정되고 1차권선의 전류는 전류 프로브를 이용하여 측정하였다. Fig. 2(a)와 (b)에서와 같이 페라이트 자심과 페라이트 자심, 페라이트자심과 사각판재형 강재가 서로 접촉하고 있어도 미세한 공극을 가진다. 또한 사각판재형 강재의 특성을 측정할 때 페라이트에서 발생한 자속이 외연효과에 의해 사각판재형 강재의 전체에 분포하게 된다. 따라서 사각판재형 강재의 자기적인 특성을 측정할 때 자로길이와 단면적을 정하는 것이 매우 어려워져, 사각철판을 한 개의 자기저항으로 되는 단순 등가 자기

회로는 사용될 수 없게 된다. 따라서 공극이 없는 상태, 즉 반자계의 영향을 받지 않는 비투자율은 10 μm의 폴리에틸렌 필름을 한 장씩 적층시키면서 공극의 크기에 따라 *B-H* 곡선을 측정 한 후, 이 측정치를 최소자승법의 2차 다항식 근사시켜 구하였다. 이 2차 다항식은 일반적으로 미세공극을 가지는 자심의 경우 공극의 크기에 따른 투자율의 변화는 2차함수로 되는 것에 착안하였다. 그리고 사각판재형 강재의 자계와 자속밀도는 3차원 유한요소법 해석 프로그램으로 구한 다음, *B-H* 곡선을 보정하였다. 즉, 유한요소법 프로그램에 Fig. 2(b) 형상을 작성한 후, 페라이트 자심의 재질에는 측정에서 얻어진 공극이 보정된 페라이트 *B-H* 곡선을 입력하고, 사각판재형 강재의 재질특성에는 임의의 투자율을 가지는 철로 설정한다. 다음에 Fig. 2(b)의 측정을 통해서 얻어진 공극이 보정된 기자력을 소스로 설정하여 해석하였다. 해석 후에 페라이트 자심의 자속밀도는 실험을 통해 얻어진 보정된 기자력에 해당하는 자속밀도와 비교되며, 자속밀도의 해석치가 보정된 실험치와 일치할 때까지 사각판재형 강재의 투자율을 변화시켰다. 이 때 구한 비투자율을 사각판재형 강재의 비투자율로 정하고, 사각판재형 강재의 중심에서 *H*와 *B*를 구하였다.

III. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 Fig. 2(a)에 보여진 페라이트 자심에 대해 공극 증가에 따른 비투자율의 측정치와 최소자승법의 2차다항식의 근사값의 변화를 각 자속밀도에서 나타낸 것이다. 공극 0의 측정치는 10 μm의 폴리에틸렌 필름이 없는 상태이며 최소자승법으로 근사치를 구할 때에는 제외하였다. 공극에 따른 투자율의 변화는 각 자속밀도에서 자심의 투자율이 다르기 때문에 경향이 서로 다르며 공극의 0의 측정치는 최소자승법의 2차 다항식에 의한 추정치보다 작다. Table I은 Fig. 4의 실험결과로부터 측정된 페라이트 자심의 *B-H* 곡선을 보정하여 구한 자계와 자속밀도를 나타낸 것이다. Table I에서 구한 자계와 자속밀도의 보정치를 3차원 유한요소법 전자장 해석프

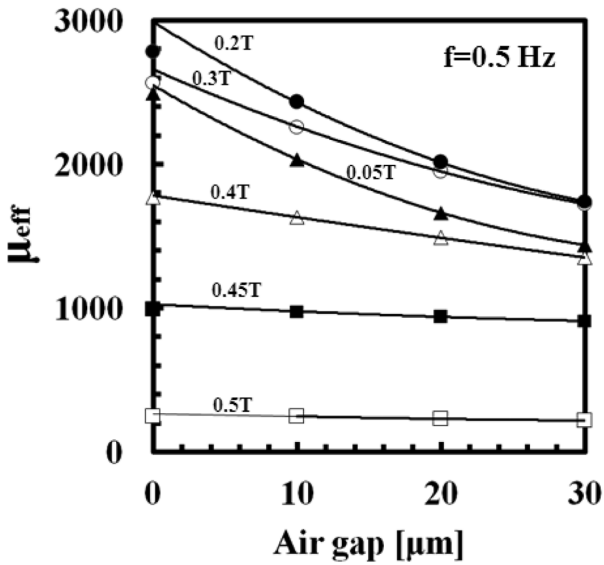


Fig. 4. Dependence of permeability on air gap.

Table I. Compensated H and B of ferrite core.

H (A/m)	3.13	15.5	27.7	52.4	88.7	178	352	1426
B (T) × 10 ⁻²	1.06	5	9.82	19.8	29.7	39.9	45.3	50

로그래의 페라이트 재질특성으로 입력한 후, Fig. 2(b)에 나타난 페라이트 자심과 사각판재형 강재에 대하여 정자장으로 해석하여 사각판재형 강재의 자계와 자속밀도, 투자율을 구하였다. 사각판재형 강재의 자기적인 특성은 사각판재형 강재 위에 페라이트 자심을 두고 페라이트 자심의 B-H 곡선의 변화로부터 추정할 수 있다. Fig. 5는 Fig. 2(a)와 (b)의 상태

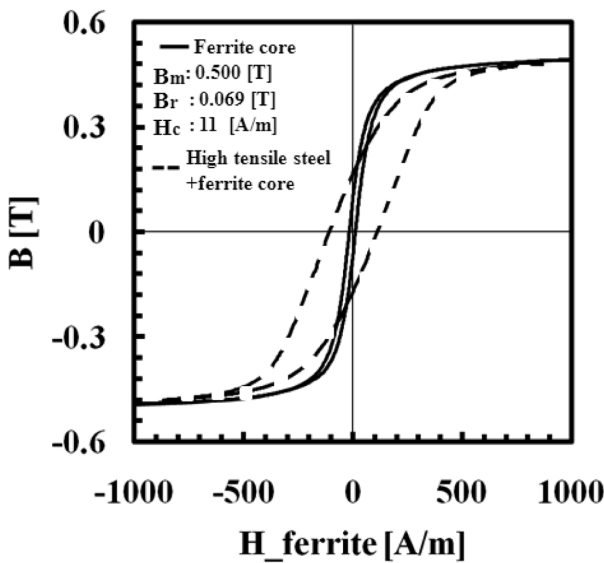


Fig. 5. B-H loop of ferrite core+ferrite and ferrite+rectangular type steel plate.

에서 B-H 곡선을 측정된 것으로 페라이트 자심과 사각판재형 강재의 B-H 곡선은 단지 비교를 위해 페라이트 자심만의 B-H 곡선과 함께 도시한 것이다. 여기서 자계와 자속밀도는 페라이트의 단면적과 자로길로 계산하였기 때문에 실제 사각판재형 강재의 자속밀도와 자계와는 다르다. 이 그림으로부터 사각판재형 강재의 투자율은 페라이트 자심의 투자율보다 매우 작으며 보자력이 매우 큼을 추정할 수 있고 사각판재형 강재에 흐르는 자속은 페라이트의 포화자속밀도에 의해 제한됨을 알 수 있다. 따라서 페라이트의 자속밀도가 포화하지 않는 범위 내에서는 사각판재형 강재의 자기저항이 페라이트의 자기저항보다 매우 커서 사각판재형 강재의 자기적인 특성을 구하기 위해 페라이트 자심을 이용하는 것이 매우 효과적임을 알 수 있다. 이 경우에서도 페라이트 자심의 경우와 같이 페라이트 자심과 사각판재형 강재 사이의 미세공극이 존재한다. 따라서 측정된 B-H 곡선의 보정을 위해 페라이트 자심과 사각판재형 강재 사이의 공극을 증가시켜 측정한다음 최소자승법의 2차 다항식으로 근사하여 기자력, 자속밀도를 구하였다. Fig. 6은 Fig. 2(b)에 대해 각 자속밀도에서 공극이 보정된 기자력에 대한 자속밀도에 대한 곡선을 나타낸 것이다. 여기서 기자력은 페라이트 자심에 인가한 것이며 자속밀도도 페라이트 자심에서 측정된 것이다. Fig. 7은 Fig. 6의 실험결과를 바탕으로 Fig. 2(b)에 나타난 페라이트 자심과 사각판재형 강재에 대해 3차원 유한요소법으로 해석하여 사각판재형 강재의 자계에 따른 자속밀도와 비투자율을 구한 후에 B-H 곡선을 보정한 것이다. 이 때 자계가 증가함에 따라 투자율과 자속밀도는 증가하지만 인가자계 520 A/m 이상의 마이너투프는 이 그림에서 제외하였다. 이것은 페라이트

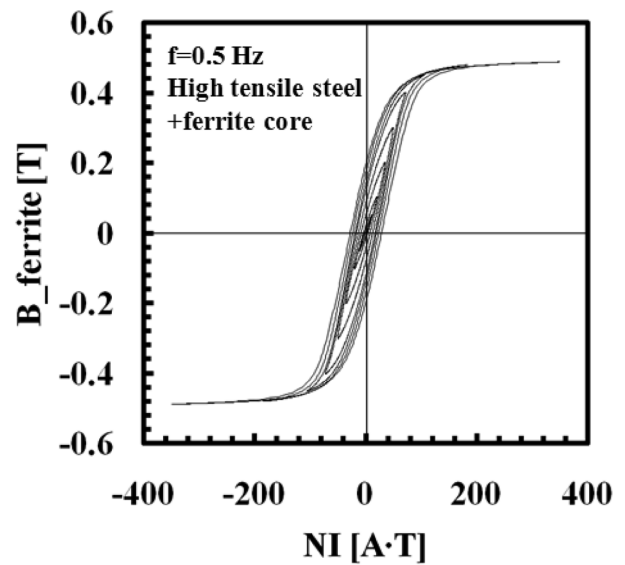


Fig. 6. NI-B_{ferrite} loop.

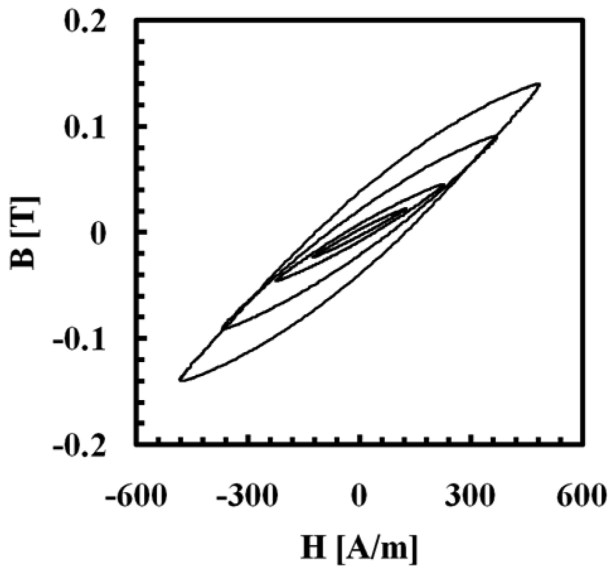


Fig. 7. Minor loops of rectangular type steel plate.

자심의 자속밀도가 포화에 가까워짐에 따라 투자율이 감소하여 페라이트 자심의 자기저항이 점차 증가하게 되고 인가된 기자력에 대한 자속이 페라이트 자심의 자기저항에 크게 영향을 받아 정확한 마이너루프를 구할 수 없기 때문이다. 따라서 본 실험에서는 자계가 약 520 A/m, 자속밀도가 0.15 T의 범위에서 사각판재형 강재의 비투자율이 약 140~230 이하의 마이너루프를 구할 수가 있었다. 더 큰 범위의 자계에 대한 루프에 대해서는 보다 단면적이 넓은 페라이트자심을 이 용함에 의해 구할 수 있으리라 생각된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 사각판재형 강재의 마이너 B-H 곡선을 구

하기 위해 Labview 프로그램과 DAQ보드를 이용하여 B-H 측정 장치를 구성하고 B-H 곡선의 측정을 바탕으로 한 3차원 유한요소법으로 해석하였다. 측정방법은 고투자율의 페라이트 자심에 1차, 2차 권선을 감은 후, 자심을 철판 위에 두고 페라이트 자심의 자계와 자속밀도를 측정하는 것이다. 이때 자심과 철판 사이의 미세한 공극에 대한 보정은 최소자승법의 2차다항식으로 보정하였다. 사각판재형 강재의 자기저항이 페라이트 자심의 자기저항보다 비교적 큰 자계영역에서는 강판의 투자율이 측정되지만 페라이트 자심의 자속밀도가 포화에 가까워지게 되면 페라이트 자심의 투자율이 감소하여 페라이트 자심의 자기저항이 점차 증가하게 되므로 인가된 기자력에 대한 자속이 페라이트 자심의 자기저항에 크게 영향을 받아 정확하게 측정할 수 없었다. 따라서 본 실험에서는 자계가 약 520 A/m, 자속밀도가 0.15 T의 범위에서 사각판재형 강재의 B-H 곡선을 구할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청 지정 국방MEMS특화연구센터의 지원으로 수행되었음(계약번호UD090024FD).

참고문헌

- [1] C. S. Yang and H. J. Chung, Journal of the KIMST **10**, 38 (2002).
- [2] Y. H. Kim, C. S. Yang, and K. H. Shin, Journal of the KIMST **12**, 24 (2009).
- [3] T. M. Baynes, G. J. Russel, and A. Bailey, IEEE Transactions on Magnetism **38**, 1753 (2002).
- [4] OPERA-2D User Guide, Vector Fields Ltd., Oxford, U.K. (2002).

***B-H* Loop Measurement of a High Tensile Steel Plate**

Young-Hak Kim* and Ki-Chan Kim

Dep. of Elec. Eng., Pukyong University, Busan 608-736 Korea

Kwang-Ho Shin

Dep. of Electronics and Information Comm., Eng., Kyungsoong University, Busan 608-737 Korea

Hwiseok Kim and Kwan-Seob Yoon

Maritime R&D Lab., LIGnex1 Co., Ltd., Yongin 446-912 Korea

Chang-Seob Yang

Agency for Defense Development, Jinhae 645-016 Korea

(Received 10 May 2010, Received in final form 1 June 2010, Accepted 1 June 2010)

Minor *B-H* loop measurement for a rectangular high tensile steel was obtained by using Labview. A ferrite cores of high permeance with primary and secondary windings on the steel plate were used to form a closed loop of magnetic flux. To compensate errors due to an extremely small gap between a pair of ferrite core, and between the ferrite core and the rectangular high tensile steel, quadratic function of least square method was used. Also a 3D FEM magnetic analysis tool was used to measure H and B of the steel. *B-H* loop of the high tensile steel plate can be measured up to 520 A/m of a magnetic field and 0.15 T of a magnetic flux density.

Keywords : *B-H* loop, relative permeability, ferrite core, Labview