

Core Loss Measurement of dc-Biased Soft Magnetic Composite Cores

Pyungwoo Jang*

College of Science and Engineering, Cheongju University, Cheongju 28503, Korea

(Received 1 December 2017, Received in final form 28 December 2017, Accepted 30 December 2017)

Core losses of dc-biased Fe-Si-Al and Fe-Ni cores were measured. Changes of shapes and amplitude of ac loops, and permeability were attributed from the incremental permeability derived from dc loops. Core loss decreased with increasing dc field and then increased abruptly regardless of frequency in the cores with high permeability. It seemed that the decrease of the core loss with increasing dc field was attributed from decrease of dc hysteresis loss. Increase of the loss was seemed to be attributed from increase of amplitude of ac field which was also due to decrease of incremental permeability.

Keywords : soft magnetic composite core, ac loss, dc biasing, incremental permeability

직류자장이 중첩된 분말코어의 철손측정

장평우*

청주대학교 이공대학, 충북 청주시 상당구 대성로 298, 28503

(2017년 12월 1일 받음, 2017년 12월 28일 최종수정본 받음, 2017년 12월 30일 게재확정)

직류자장이 중첩된 Fe-Si-Al, Ni-Fe 분말코어의 코어손실을 측정하였다. 교류자화곡선의 형상, 교류자장 진폭 및 투자율 변화는 직류이력곡선의 형상과 증분 투자율 변화에 기인하였다. 투자율이 높은 코어에서 직류자장이 증가하면 주파수에 관계없이 최소값을 나타낸 후 급격히 증가하였다. 코어손실이 감소하는 것은 직류자장이 증가함에 따른 이력손실의 감소에 기인하며, 코어손실이 증가하는 것은 과도한 투자율의 감소로 인한 교류자장의 진폭의 증가에 기인하는 것으로 판단되었다.

주제어 : 연자성 분말 코어, 교류 손실, 직류자장 중첩, 투자율

I. 서 론

인덕터, 전동기 등에서 이용되는 연자성 코어는 직류자장이 중첩된 상태로 사용되는 경우가 많으며 Fe-Si 전기강판에서 직류자장이 중첩될수록 코어 손실은 증가하는 것이 오래 전에 보고되었다[1]. Fe-Si 강판보다 높은 주파수에서 사용되는 페라이트 코어의 경우도 직류자장이 증가하면 코어 손실이 증가하지만 종류에 따라 그리고 주파수, 교류 자장과 직류자장과의 비율 등에 따라 코어손실이 감소한다는 것도 보고되어 있다[2-5].

한편 화석에너지의 고갈과 지구온난화로 인한 이상 기상현상 등으로 태양광, 풍력 등 신재생에너지분야와 친환경 전기

자동차가 근래 본격적으로 연구되고 있으며 대규모 상업화를 앞두고 있다. 전력변환용으로 태양광 시스템의 power conditioning system이나 전기 자동차에 사용되는 파워 인덕터는 특정 면에서는 대전류를 감당할 수 있어야 할 뿐만 아니라, 높은 온도에서의 온도 안정성, 우수한 방열특성, 낮은 코어손실, 그리고 높은 가격 경쟁력도 확보하고 있어야 한다. 이 때문에 지금까지 사용되어 왔던 페라이트가 연자성 분말 코어로 대체되고 있으며 동작 주파수가 증가할수록 그 경향은 더 두드러질 것이다[6, 7].

코어 손실은 파워 인덕터에 필요한 특성 중 가장 중요한 것으로 파워 인덕터가 직류가 중첩된 상태에서 동작되고 있음에도 불구하고 설계자들은 지금까지 직류가 없는 상태에서 측정된 값으로 회로를 설계하고 있다. 본 연구에서 처음으로 직류자장이 중첩된 상태에서 Fe-Si-Al, Ni-Fe 분말코어의 코어 손실을 측정하였으며 그 변화거동의 해석을 시도하였다.

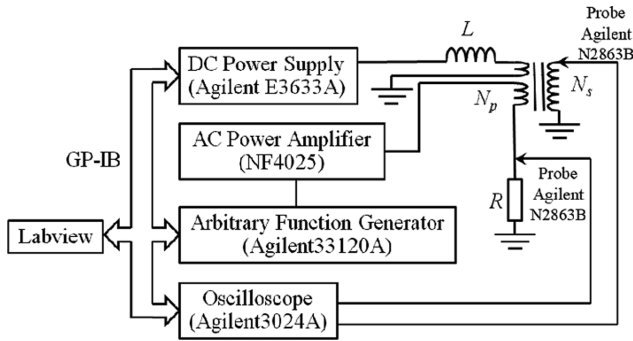


Fig. 1. Schematic diagram of core loss measurement system.

II. 실험 방법

실험에 사용한 코어는 (주)창성의 연자성 분말코어로 조성은 Ni-Fe(CH160, CH060), Fe-Si-Al(CS125)이고 내경과 외경이 각각 14.8, 26.8 mm이고 높이는 10.8 mm이다. 코어손실은 1 kG 정현파와 자속밀도 조건에서 각각 10, 20, 50 kHz에서 구했으며 Fig. 1에 측정에 사용한 장치의 모식도를 나타내었다. 전압증폭기를 제외한 모든 측정장치는 컴퓨터와 GP-IB로 연결하였으며, 이들 장치간의 통신, 데이터 수집 및 분석에 National Instrument사의 Labview를 이용하였다. 측정 데이터를 주파수에 관계없이 12 bit 오실로스코프(Agilent 3024A)로 한 파형 당 2000개씩 수집하였으며, 임의파형발생기(Agilent 33120A)도 한 파형 당 2000개의 데이터를 출력하도록 하였다. 전류파형은 인덕턴스가 작은 5 Ω 박막저항 5개를 병렬로 연결하여 양단에 걸리는 전압으로 측정하였다.

정현파와 자속을 얻기 위한 과정은 다음과 같다. 처음 정현파 입력전압을 인가하여 수집된 전류파형(i)과 유도전압($d\phi/dt$) 데이터는 디지털 LPF(Low Pass Filter)와 증폭기의 위상변화를 교정하기 위한 digital phase shifter 거친 후 수치적분 모듈에서 자속밀도파형으로 변환한다. 이전 스텝의 입력전압파형과 자속밀도파형은 정현파자속밀도를 구하기 위한 케환모듈로 입력되어 다음 스텝의 입력전압파형 V_{in} 을 결정하도록 하였다[8].

이렇게 측정된 전류와 유도전압을 다음 식으로 적분하여 코어손실을 측정하였으며, 여기서 f , V , T 는 각각 주파수, 코어부피 그리고 전류와 유도전압의 주기이다.

$$P = \int_0^T \int_0^V i(t)u(t)dt \quad (1)$$

1차 측에 교류가 인가될 때 직류자장(최대 자장 71 Oe)을 중첩시키기 위한 권선수 120인 코일에 큰 전압이 유도되므로 이를 차단하기 위해 직류전원장치에 직렬로 인덕턴스가 56 mH인 인덕터를 연결하였고 유도된 전압은 무시할 수 있을

정도였다. 코어의 직류자화곡선은 1, 2차 권선을 하여 최대 400 Oe까지 인가하여 얻었다.

III. 실험결과 및 고찰

직류자장이 중첩된 상태에서 교류에 의한 자화는 직류 자기력곡선상의 한 점에서 이루어진다. Fig. 2는 직류자기력곡선을 나타낸 것으로 분말 연자성코어는 절연체 또는 기공에 의한 강한 반자장으로 이력현상이 거의 나타나지 않는다. 400 Oe에서 CH160, CS125, CH060 코어의 자속밀도는 각각 14.7, 8.3, 12 kG이며 초기 투자율은 각각 160, 125, 60 정도였다.

직류자장이 중첩된 상태에서의 투자율은 직류자기력곡선에서 얻은 미소증분투자율에서 구할 수 있고 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 직류자장이 작을 경우 CS125의 초기 투자율이 높지만 Fig. 2에서와 같이 CS125의 포화자화가 작으므로

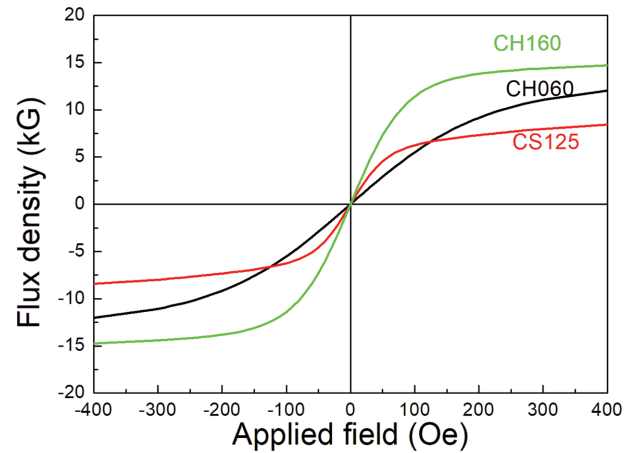


Fig. 2. (Color online) DC hysteresis loops of the cores.

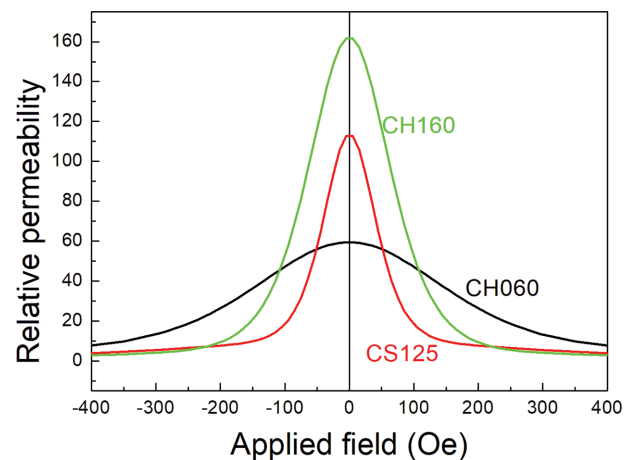


Fig. 3. (Color online) Variation of incremental permeability of the dc-biased cores.

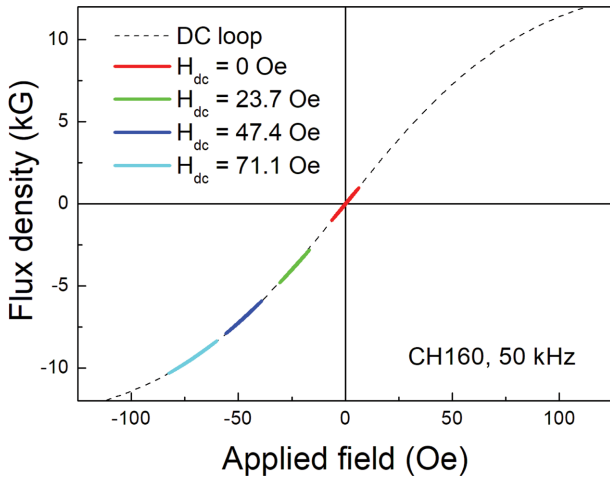


Fig. 4. (Color online) ac loops are superimposed on the dc loops at (H_{dc} , $B(H_{dc})$).

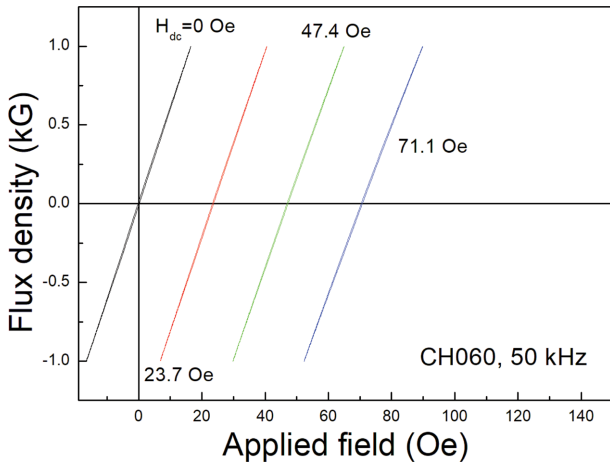


Fig. 5. (Color online) ac loops of dc-biased CH060 core.

큰 직류자장이 중첩될 경우 투자율이 급격히 작아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 CH160 코어에서 직류자장이 중첩되었을 때 50 kHz 교류 이력곡선의 위치와 형태를 나타낸 것으로 Fig. 2의 직류이력곡선의 위치(H_{dc} , $B(H_{dc})$)에 교류 자화곡선을 위치시키면 완전히 중첩된다. 이력현상이 크거나 주파수가 낮은 경우 직류이력곡선과 일치하지 않지만 본 실험의 경우 주파수가 높고 이력현상이 작으므로 교류이력곡선은 직류이력곡선과 중첩된다.

Fig. 5와 Fig. 6은 직류자장이 중첩되었을 때 각각 CH060 코어와 CS125 코어의 교류이력곡선의 변화를 나타낸 것으로 Fig. 5는 양(positive)의 직류자장이, Fig. 6은 음(negative)의 직류자장이 중첩되었다. CH060 코어는 초기 투자율은 낮지만 직류자장이 중첩되더라도 투자율이 크게 감소하지 않으므로 이력곡선이 직선에서 크게 벗어나지 않는다. 그러나

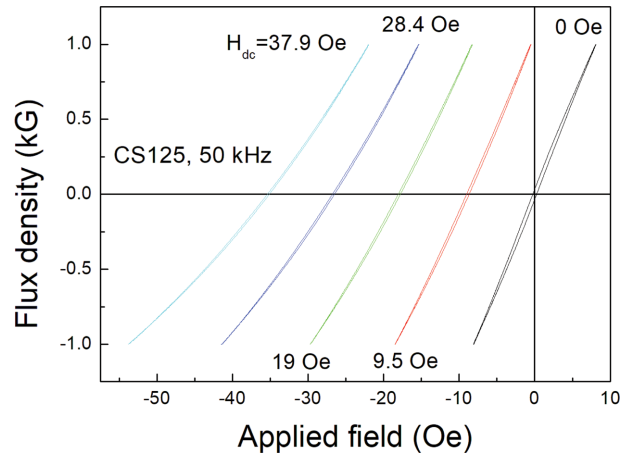


Fig. 6. (Color online) ac loops of dc-biased CS125 core.

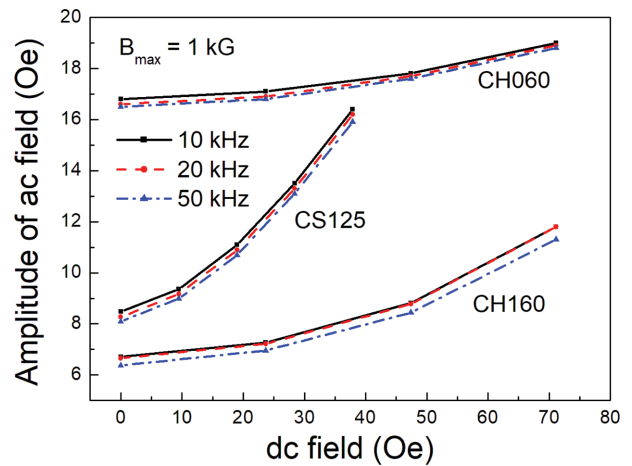


Fig. 7. (Color online) Variation of amplitude of ac field with dc-bias field and frequency ($B_{max} = 1$ kG).

CS125 코어의 경우 초기 투자율은 높지만 직류자장이 중첩되면 투자율이 크게 저하되므로 교류 이력곡선이 직선에서 상당히 벗어난다.

Fig. 7은 직류자장이 중첩되었을 때 자속밀도 1 kG를 얻기 위한 교류 자장의 크기변화를 나타낸 것이다. 모든 코어에서 주파수가 증가할수록 교류자장의 크기는 약간 감소하였으며 직류자장이 증가하더라도 투자율 감소가 심하지 않은 CH060, CH160 코어의 경우 교류 자장의 진폭이 약간 증가한다. 그러나 직류자장이 중첩되었을 경우 투자율 감소폭이 큰 CS125 코어의 경우 교류 자장의 진폭이 급격히 증가하여 40 Oe 이상의 직류자장이 중첩되면 투자율이 너무 작아져 증폭기의 출력범위를 초과하였다. 주파수가 증가할수록 교류 자장의 크기가 약간씩 감소하는 것은 주파수가 증가할수록 투자율이 증가하기 때문으로 실험에 사용한 CH060 코어의 경우 560 kHz 부근에서 공명이 일어난다.

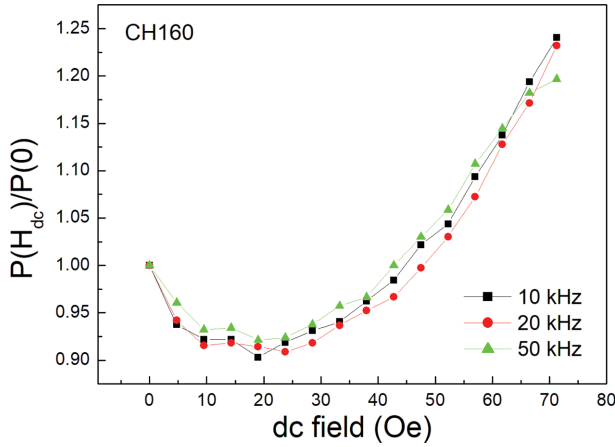


Fig. 8. (Color online) Core loss of dc-biased CH160 core measured at 10, 20 and 50 kHz.

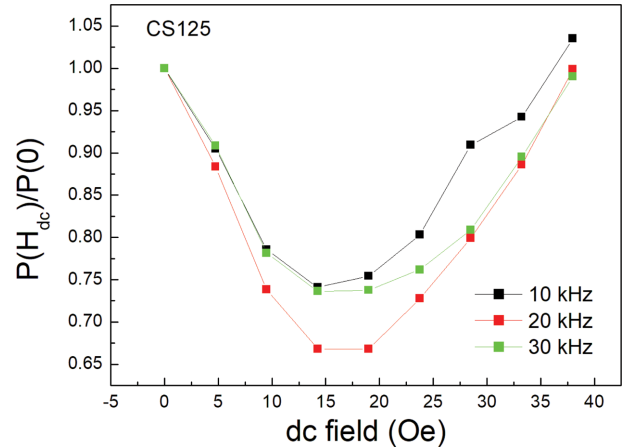


Fig. 10. (Color online) Core loss of dc-biased CS125 core measured at 10, 20 and 50 kHz.

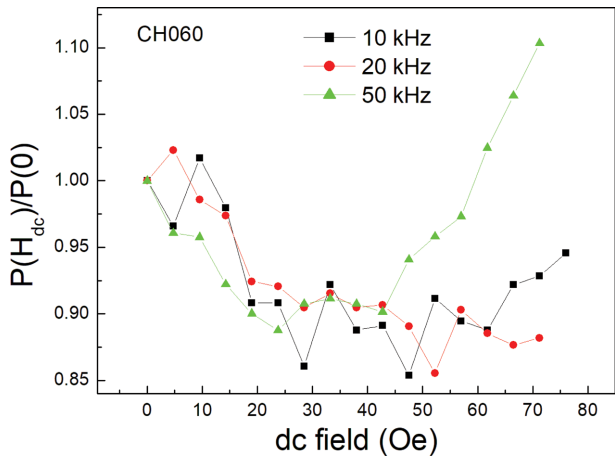


Fig. 9. (Color online) Core loss of dc-biased CH060 core measured at 10, 20 and 50 kHz.

Fig. 8, 9, 10은 각각 직류자장의 크기에 따른 CH160, CH060, CS125 코어 손실의 변화를 나타낸 것으로 직류가 중첩되지 않았을 경우의 코어 손실과 비교하였다. 직류가 중첩되지 않았을 경우 CH160 코어의 10, 20, 50 kHz에서의 코어손실은 각각 32, 75.8, 292.7 mW/cm³, CH060 코어는 각각 29.4, 56.7, 231.2 mW/cm³, CS125 코어는 각각 45.2, 84.1, 273.5 mW/cm³이었다. CH160 코어의 경우 주파수에 관계없이 직류자장이 인가되면 코어 손실은 감소하며 약 20 Oe에서 최소값을 나타낸 후 급격히 증가한다. CH060 코어의 경우 직류자장이 증가하면 감소하지만 50 kHz의 경우 감소하다가 다시 급격히 증가한다. CS125 코어의 경우 15~20 Oe에서 최소값이 나타내고 다시 증가한다.

이와 같은 현상은 저주파에서 사용되는 Fe-Si 판재에서 일어나지 않고 고주파에서 사용되는 페라이트에서 보고된다[3-5]. 최소값은 와전류 손실이 이력손실보다 더 클 경우 나타나

며 주파수, 교류 자속밀도 그리고 코어 재료에 좌우되는 직류와 교류 자속밀도 비($= B_{dc}/B_{ac}$)에서 나타난다고 설명되고 있다[3]. 그러나 분말코어의 경우 페라이트와는 달리 와전류 손실보다 이력손실이 더 크다[9, 10]. 그리고 본 실험에서 정현파의 자속밀도 조건에서 측정하여 와전류 손실은 일정하므로 이력손실의 감소에 의해 코어손실의 감소가 생기는 것으로 판단된다. 그러나 최소값 이후 손실이 증가하는 것은 교류자장의 진폭 증가에 기인하는 것으로 생각된다. 직류자장이 중첩되면 Fig. 3과 같이 증분 투자율이 감소하므로 Fig. 7과 같이 교류자장의 진폭이 증가한다. 교류 진폭이 증가하면 식 (1)에 의해 손실이 증가한다.

IV. 결 론

직류가 중첩된 Fe-Si-Al, Ni-Fe 분말코어의 코어손실을 정현파 자속밀도 1 kG의 조건에서 주파수 10~50 kHz, 직류자장을 71 Oe까지 변화시키면서 상온에서 측정하였다. 교류자장 곡선의 형상, 교류자장의 진폭 및 투자율 변화는 직류이력 곡선의 증분 투자율 변화에 기인하였다. 투자율이 높은 코어에서 직류자장이 증가하면 주파수에 관계없이 최소값을 나타낸 후 급격히 증가하였다. 코어손실이 감소하는 것은 직류자장이 증가함에 따른 이력손실의 감소에 기인하며, 코어손실이 증가하는 것은 과도한 투자율 감소로 인한 교류자장 증가에 기인하는 것으로 판단되었다.

감사의 글

이 논문은 2016학년도 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음.

References

- [1] R. M. Bozorth, Ferromagnetism, Wiley-IEEE Press Reprint, Piscataway, NJ, USA (1993).
- [2] Ansgar Brockmeyer, Proc. IEEE-APEC **1**, 454 (1996).
- [3] W. K. Mo, D. K. W. Cheng, and Y. S. Lee, IEEE Trans. Ind. Electron. **44**, 788 (1997).
- [4] C. A. Baguley, B. Carsten, and U. K. Madawala, IEEE Trans. Magn. **44**, 246 (2008).
- [5] C. A. Baguley, U. K. Madawala, and B. Carsten, IEEE Trans. Magn. **48**, 1844 (2012).
- [6] K. Jun, B. D. Min, J. P. Lee, T. J. Kim, H. Cha, D. W. Yoo, and H. J. Kim, The 2010 International Power Electronics Conference, 2354 (2010).
- [7] B. G. You, J. S. Kim, B. K. Lee, G. B. Choi, and D. W. You, Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC'09), 730 (2009).
- [8] P. Jang, J. Korean Magn. Soc. **22**, 23 (2012).
- [9] P. Jang, B. Lee, and G. Choi, Phys. Status. Solid A **204**, 4108 (2007).
- [10] P. Jang, B. Lee, and G. Choi, J. Appl. Phys. **103**, 7431 (2008).