

2방향 자계인가형 싱글 시트 테스터

김홍정¹⁾, 고창섭¹⁾, 홍선기²⁾, 신판석³⁾, Koji Fujiwara⁴⁾

충북대학교 전기공학과¹⁾, 호서대학교 정보제어공학과²⁾, 홍익대학교 전기공학과³⁾, 오카야마대학교 전기공학과(일본)⁴⁾

Double-excitation Type Single Sheet Tester

Hongjung Kim¹⁾, Changseop Koh¹⁾, Sungi Hong²⁾, Pansuk Sin³⁾, Koji Fujiwara⁴⁾

Chungbuk National University¹⁾, Hoseo University²⁾, Hongik University³⁾, Okayama University(japan)⁴⁾

Abstract - 이 논문에서는 전기강판의 자계 특성을 측정하기 위하여 이방향 자계인가형 싱글 시트 테스터가 개발되어졌다. 이 개발된 시스템은 자속밀도와 자계세기를 B-coil과 H-coil로 측정할 수 있다. B-coil은 rolling direction과 transverse direction에 대하여 각각1-turn 감겨져 있으며 H-coil은 200-turn 각각 감겨져있다. 실험을 통하여 이 시스템은 방향성 전기 강판의 경우 rolling direction에 대하여 1.8 [T]까지 측정되어질 수 있다.

절히 반영한 전기기기의 특성해석과 설계에 관해서는 거의 연구가 이루어지지 않고 있는 실정이다. 그 결과 국내에는 전기강판의 자기적인 특성의 측정에 관한 표준마저도 제정되어 있지 않은 실정이다.

본 논문에서는 각종 전기기기에 필수적으로 이용되는 전기강판의 자기적 특성을 측정하기 위하여 2방향 자계인가가 가능한 Single sheet tester를 개발하여 전기강판의 자기적 특성을 측정하고, 그 결과를 검증하였다.

1. 서 론

최근 생활수준의 향상으로 산업체는 물론이고 일반 가정에서도 전기기기의 사용이 급격하게 증가하고 있으며 이에 따라 전력에너지의 소모가 급증하고 있다. 조사된 바에 의하면 우리나라를 비롯한 OECD국가들에서 전체 전력의 50%이상(일본의 경우 53%)이 전동기를 비롯한 전기기기에서 소비되고 있으며, 그중 전기기기의 손실로 10-15%(일본의 경우 전기기기의 평균 효율은 90%인 것으로 보고 되고 있음)가 낭비되고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 생활수준이 많이 향상된 지금 전력 사용의 효율을 높이고 환경을 보호하기 위해서는 절략의 미덕을 강조하던 통상의 방법 외에 전기기기의 효율 향상을 통한 적극적인 에너지 전략에 관한 연구가 필요하다.

전기기기의 효율은 전기기기의 설계기술과 생산기술 뿐만 아니라 전기기기를 구성하는 주요 부품인 전기강판(electrical steel sheet)의 자기적 특성과 손실특성에 의하여 많이 좌우된다. 특히 무조건 적으로 값비싼 전기강판을 이용하는 것보다는 전기강판의 특성을 정확히 측정하고 이를 설계에 적극 활용함으로써 전기기기의 효율을 향상시키는 것이 무엇보다도 중요하다고 하겠다. 이런 관점에서 보면 전기기기의 고효율 설계를 위해서는 CAE 프로그램을 이용한 전기기기의 특성해석 기술, 형상 최적설계 기술 및 생산기술의 개발과 더불어 전기강판과 영구자석 등 전기기기를 구성하는 필수 재료들에 대한 특성을 정밀하게 측정할 수 있는 기술을 개발하고, 측정결과를 적절히 모델링하여 설계과정에 이를 반영할 수 있도록 해야 한다.

전기강판의 자기적 특성은 Epstein 장치 또는 single sheet tester를 이용하여 측정되는데, 교번자계 특성의 경우 세계 표준과 일본 표준은 Single sheet tester를 이용하여 규정되었다. 특히 최근에는 일본과 독일을 중심으로 전기강판의 회전자계 특성의 측정에 대한 연구가 심도 있게 진행되고 있으며, 또한 측정결과를 유효요소법을 이용한 특성해석에 활용하기 위하여 측정결과와 모델링에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다. 그러나 국내에서는 유효요소법과 같은 수치해석 기법을 이용한 전기기기의 설계 및 특성해석, 그리고 형상 최적설계를 통한 전기기기의 효율 향상 등에 관해서는 많은 연구가 이루어져 이미 세계적인 수준에 도달하였다고 인정되나, 전기강판의 자기적 특성의 측정, 그리고 측정 결과를 적

2. 2방향 자계인가형 Single Sheet Tester

2.1 측정시스템

그림 1에 2방향 여자형 Single Sheet Tester 시스템을 나타내었다. 컴퓨터에서 발생된 x-방향 및 y-방향의 여자전압의 파형은 Low Pass Filter (NF P-82)를 이용하여 고주파 성분을 제거한 후, 전력증폭기(Power Amplifier, NF4520, 2kVA)에 연결된다. 증폭된 전압은 직류성분을 제거하기 위하여 Matching Transformer를 거치고 각각 x-방향 및 y-방향 여자 권선에 연결된다. H-coil 및 B-coil에서 측정된 유기전압은 Noise Amplifier (NF P-62A)를 이용하여 증폭된 후, 컴퓨터로 들어오게 된다. 이때 측정시스템과 컴퓨터 간의 통신은 모두 NI사의 DAQ Board (PCI 6110)를 사용하여 이루어졌다.

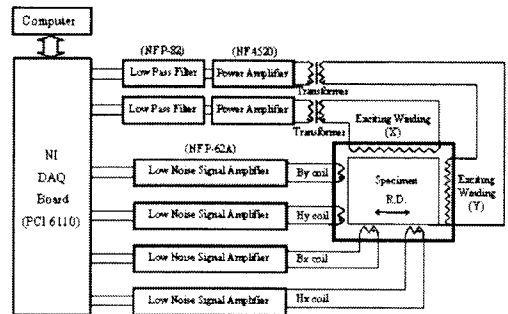


그림 1. 2방향 여자형 Single Sheet Tester 시스템

그림 2-a)에 나타난 B-coil은 80x80 mm²인 시료의 중앙 부분에 20mm의 간격으로 $\phi 0.5$ 인 구멍을 내고 x 및 y 방향에 대하여 직경 30 μ m인 절연코일을 이용하여 각각 1 turn인 B-coil을 설치하였다. B-coil에 유기되는 전압으로부터 자속밀도의 크기는 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$B_r(t) = \frac{1}{S_B} \int e_r(t) dt \quad (1)$$

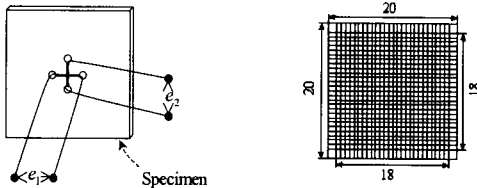
여기서, S_B 는 B-coil이 형성하는 단면의 단면적이고,

$e(t)$ 는 B-coil에 유기되는 전압, 그리고 점자 I는 x 또는 y를 나타낸다.

그림 2-b)에 나타난 H-coil은 균등한 자계 내에 얇은 전기강판이 위치하는 경우, 전기강판과 공기영역의 경계에서 H의 접선 성분이 연속이고 법선성분은 존재하지 않는 것으로 가정할 수 있기 때문에 시료(전기강판)에 밀착하여 H를 측정함으로써 시료 내의 H를 측정할 수 있다. 이를 위하여 본 논문에서는 두께 1mm의 Glass-Epoxy에 0.03mm의 권선을 이용하여 H-coil을 제작하였다. 제작된 권선은 우선 x-방향의 자계의 세기를 측정하기 위하여 Glass-Epoxy에 밀착하여 1층으로 200턴을 감고, 그 위에 y-방향의 자계의 세기를 측정하기 위하여 역시 1층으로 200턴을 감았다. 자계의 세기는 H-coil에 유기되는 전압으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$H_i(t) = \frac{1}{\mu_0(\text{Area} \cdot \text{Turn})_i} \int e_i(t) dt \quad (2)$$

여기서, 점자 I는 x 또는 y를 나타낸다.



(a) 시료 / B-coil (b) H-coil
그림 2. B-coil, H-coil

H-coil과 B-coil의 유기전압 신호가 들어오면, 식 (1)과 식 (2)을 이용하여 각각 자속밀도와 자계의 세기를 계산하고, 이로부터 히스테리시스 곡선을 그린다. 이때 얻고자하는 자속밀도의 파형을 다음과 같이 표현하면

$$B_y(t) = B_m \cos(\omega t) \quad [T] \quad (3)$$

여기서, θ 는 인가자계의 방향이 x축과 이루는 각도이다. 이로부터 x-방향 및 y-방향의 얻고자 하는 자속밀도 파형은 각각

$$B_x(t) = B_m \cos \theta \cos(\omega t) \quad [T] \quad (4-1)$$

$$B_y(t) = B_m \sin \theta \cos(\omega t) \quad [T] \quad (4-2)$$

이 되고, 이에 해당하는 유기전압의 파형은 각각 다음과 같이 된다.

$$e_x(t) = (\text{Area} \cdot \text{Turn})_x \omega B_m \cos \theta \sin(\omega t) \quad [V] \quad (5-1)$$

$$e_y(t) = (\text{Area} \cdot \text{Turn})_y \omega B_m \sin \theta \sin(\omega t) \quad [V] \quad (5-2)$$

따라서 측정과정에서 자속밀도가 식 (3)와 같이 주어지는 정현파가 되도록 하기 위하여 x, y 방향의 유기전압이 각각 식 (5-1)과 (5-2)가 되도록 x-방향 및 y-방향의 여자전압의 파형을 조절하였다.

시료의 B-H곡선은 위에서 측정된 히스테리시스 곡선으로부터, 각각의 히스테리시스 곡선에서 자계의 세기와 자속밀도가 최대인 점 (H_{max}, B_{max})인 점들을 연결하여 구하였다. 또한, 시료에서 발생하는 철손은 다음과 같이 계산된다.

$$P = \frac{1}{\rho T} \int_T \left(H_x \frac{dB_x}{dt} + H_y \frac{dB_y}{dt} \right) dt \quad [W/Kg] \quad (6)$$

여기서, ρ 는 시료의 밀도이고 T 는 주기이다.

3. 측정결과 및 검증

개발된 2방향 여자형 Single Sheet Tester를 이용하여 등방성 및 이방성 전기강판의 자기적인 특성을 측정하고, 그 결과를 일본 Okayama 대학의 3D Lab에서 측정된 결과와 비교함으로써 측정의 타당성을 검증하였다. 측정에 사용된 시료는 등방성 전기강판(Non-oriented electrical steel sheet) 2종(시료 A: 0.25t, 시료 B: 0.35t)과 이방성 전기강판(Grain-oriented electrical steel sheet, 시료 C: 0.35t) 1종으로 하였다. 측정 주파수는 모두 50Hz로 하였다.

일반적으로 전기강판 내의 자계의 세기(H)와 자속밀도(B)의 관계를 보면, 그림 3와 같이 두개의 방향이 서로 일치하지 않는 현상이 발생하고, 이러한 현상은 무방향성 전기강판보다는 방향성 전기강판에서 더욱 심하게 나타난다. 이것은 자속밀도와 자계의 세기의 관계를 다음과 같이 나타낼 때

$$\vec{B} = \begin{bmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} \end{bmatrix} \vec{H} \quad (7)$$

투자율 텐서의 비대각선(off-diagonal) 성분이 영이 아니기 때문에 생겨나는 현상이다. 따라서 본 논문에서는 측정된 \vec{B} 와 \vec{H} 로부터 히스테리시스 곡선을 그리기 위하여 $|\vec{B}|$ 와 $|\vec{H}| \cos \theta_{HB}$ 을 계산하고, 이로부터 히스테리시스 곡선을 그렸다.

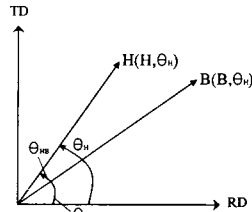


그림 3. B와 H의 관계

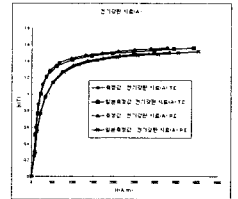
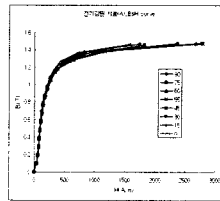
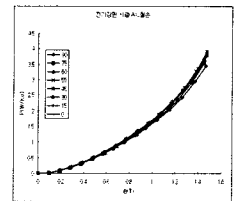


그림 4. 전기강판 시료(A)

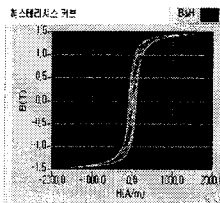
그림 4은 등방성 전기강판 시료 A에 대하여, 전기강판의 Rolling Direction과 transverse direction으로 자계가 인가될 때, 본 연구에서 측정된 B-H곡선을 일본에서 측정된 결과와 비교하고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 B-H곡선의 결과가 잘 일치하고 있으며, 이로부터 본 논문에서 개발된 측정시스템이 타당함을 알 수 있다.



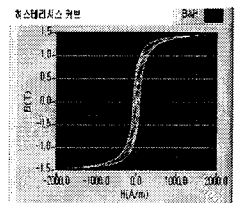
(a) B-H curve



(b) 철손



(c) T.D



(d) R.D.

그림 5. 전기강판 시료(A)의 B-H curve / 철손

한편 그림 5-a) 및 그림 5-b)는 시료 A에 대하여 인가 자계의 방향에 따른 B-H곡선과 철손곡선의 변화를 나타

내고 있으며, 등방성 시료임에도 불구하고 자계의 인가 방향에 따라 그 특성이 조금씩 변함을 알 수 있다. 그림 5-c) 및 그림 5-d)은 시료 A에 대하여 Rolling direction과 Transverse direction으로 자계를 인가하였을 때, 주파수 50Hz에서 최대 인가 자계에 따른 히스테리시스 곡선을 비교하고 있으며, 그림에서 히스테리시스 곡선으로 둘러싸인 부분의 면적이 와전류 손실을 포함하는 철손이다.

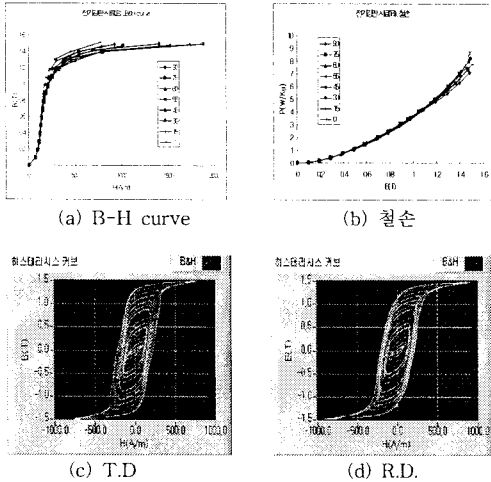


그림 6. 전기강판 시료(B)의 B-H curve / 철손

그림 6는 등방성 전기강판 시료 B에 대한 측정결과, 즉 인가자계의 방향에 따른 B-H곡선의 변화, 철손곡선의 변화, 그리고 Rolling direction과 Transverse direction에 대한 히스테리시스 곡선을 나타낸다. 시료 A에 대한 측정 결과와 비교하면 자속밀도의 변화가 동일한 조건에서 시료 B가 철손이 더 큼을 알 수 있다. 이는 두 시료의 히스테리시스 곡선을 비교함으로써 더욱 자명해진다. 특히, 시료 A의 경우와는 달리 시료 B의 경우에는, 자계 인가 방향에 따라(Rolling direction과 Transverse direction에 대하여) 히스테리시스 곡선의 모양이 많이 달라지는데 이는 시료자체의 특성으로 전기강판의 제조공정과 관련이 있는 것으로 생각된다. 이러한 측정 결과를 바탕으로 시료 A와 시료 B를 비교하면, 시료 A의 경우가 자계의 인가방향에 무관한 등방성 특성을 갖고 있음을 알 수 있다.

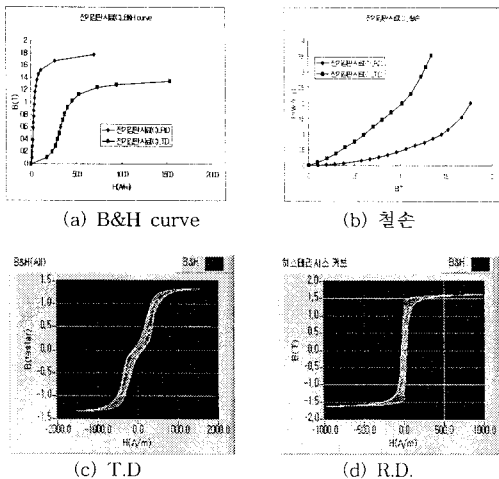


그림 7. 전기강판 시료(B)의 B-H curve / 철손

그림 7는 이방성 전기강판인 시료 C에 대한 측정결과

를 나타낸다. 그림 7-a)에서 보듯이 포화자속밀도는 Rolling direction으로 자계가 인가되는 경우에는 $B_s \approx 1.8 T$ 정도로 매우 높으나, Transverse direction으로 자계가 인가되는 경우에는 1.4T 못 미침을 알 수 있다. 또한 그림 7-b)에서 보듯이 자계의 인가방향에 따라 철손도 많이 달라짐을 알 수 있다. 이로부터, 이방성 전기강판을 이용한 전기기기의 특성을 정확하게 해석하고, 손실을 계산하기 위해서는 자계의 인가방향에 따른 투자율의 변화를 반드시 고려해야 함을 알 수 있다. 그림 7-c) 및 그림 7-d)는 자계 인가방향에 따른 히스테리시스 곡선을 측정된 것으로, 자계의 인가방향에 따라 그 모양이 많이 달라짐을 알 수 있다. 특히, Transverse direction으로 자계가 인가되는 경우 자속밀도의 크기가 작은 영역에서 특이한 모양을 나타내는데 이것도 시료자체의 특성인 것으로 파악된다

4. 결 론

본 논문에서는 전기기기에 널리 이용되는 전기강판의 특성을 측정하기 위하여 2방향 여자형 Single Sheet Tester 시스템을 개발하였다. 개발된 측정장치는 균등자계 인가영역(B-coil 및 H-coil 설치영역)이 $20 \times 20 mm^2$ 로 자구(magnetic domain)의 크기가 상대적으로 매우 큰 Highly-grain-oriented 전기강판의 경우를 제외하면 무방향성 전기강판(Non-oriented electrical steel sheet)과 방향성 전기강판(Grain-oriented electrical steel sheet)의 특성을 측정할 수 있다. 본 논문에서 개발된 측정장치를 이용한 측정결과는 동일한 시료를 타 기관에서 측정된 결과와 비교함으로써 그 타당성을 입증하였고, 따라서 향후 다양한 시료의 특성을 측정할 수 있을 것으로 기대된다. 본 논문에서는 전기강판에 교번자계가 인가되는 경우의 자기적인 특성과 손실만을 측정하였으나, 향후에는 전기강판에 회전자계가 인가되는 경우의 특성 및 손실, 그리고 회전자계와 교번자계가 복합적으로 동시에 인가되는 경우의 특성을 측정하는 것이 향후의 연구주제가 될 수 있을 것이다. 또한, 측정된 전기강판의 특성이 전기기기의 설계 및 특성해석에 반영되기 위해서는 측정된 결과를 유한요소법 등을 이용한 전기기기의 특성해석 과정에 반영될 수 있어야 하나, 이것은 통상의 유한요소법에 쉽게 적용될 수 있도록, 측정결과와 적절한 모델링 기법도 연구되어야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 에너지관리공단, 전기수요관리, 1994
- [2] H.E.Jordan, Energy-efficient electric motors and their application, Plenum Press, 1994
- [3] A.Ikariga, M.Enokizono, H.Shimoji and K.shuto, "Core material design of rotating machines with a new topology," ICEMS2004, October 31 - November 3, 2004, OB-1
- [4] Method of measurement of the magnetic properties of magnetic steel sheet and strip by means of a single sheet tester, JIS C 2556, 1996
- [5] M.Enokizono and N.Soda, "Finite element analysis of transformer model core with measured reluctivity tensor," IEEE Trans. on Magnetics, Vol.33, No.5, pp.410-4112, September 1997
- [6] K.Fujiwara, T.Adachi, and N.Takahashi, "A proposal of finite-element analysis considering two-dimensional magnetic properties," IEEE Trans. on Magnetics, Vol.38, No.2, pp.889-892, March 2002
- [7] K.Fujiwara, and N.Takahashi, Private communications