

## 이방성 전기강판의 인가자계 방향에 따른 자계특성 측정

김홍정, 고창섭, 홍선기<sup>1)</sup>, 신관석<sup>2)</sup>충북대학교 전기공학과, 호서대학교 정보제어공학과<sup>1)</sup>, 홍익대학교 전기공학과<sup>2)</sup>

### Measurement of the magnetic characteristics along arbitrary directions of grain-oriented electrical steel sheets

Hongjung Kim, Chang Seop Koh, Sun Ki Hong<sup>1)</sup>, Pan Seok Shin<sup>2)</sup>Dept. of Electrical Eng. Chungbuk National University, Hoseo University<sup>1)</sup>, Hongik University<sup>2)</sup>

**Abstract** - 이방성 전기강판으로 제작되어진 전기기기의 보다 정확한 수치적인 해석을 위해서는 이방성 전기강판의 인가자계방향에 따른 정확한 자계특성 측정이 필요하다. 이 논문에서는 개발되어진 2방향 자계인가 형 싱글 시트 테스터를 이용하여 이방성 전기강판의 인가자계방향에 따른 자계특성을 측정하였다. 실험을 통하여 방향성 전기강판의 rolling direction과 transverse direction에 대하여 각각 1.8[T] 와 1.3[T]까지 측정할 수 있었다.

### 1. 서 론

일반적으로 이방성 전기강판을 이용한 변압기 특성 해석에서 단지 rolling direction과 transverse direction 방향의 B-H Curve 만을 이용한 특성해석이 행해져 왔다. 이런 기준의 해석 방법은 변압기 코어(transformer core)에서 인가자계 방향에 따른 B-H Curve 그리고 자속밀도(flux density)와 자계의 세기(magnetic field strength)의 vector 간의 방향 차이가 고려되지 않았다. 특히 rolling direction 방향으로 자계가 인가된 경우 실제적으로는 transverse direction의 방향 또한 영향을 끼치게 되고, transverse direction의 방향으로 자계가 인가된 경우 역시 실제적으로는 rolling direction 방향에 영향을 끼치게 되는데 이런 부분들이 고려되지 않았다. 따라서 이와 같은 기준의 방법으로 특성해석을 하는 경우, 변압기 코어의 코너나 Joint 부분 그리고 T-joint부분에서 자속밀도(flux density)가 받아들여 질 수 없을 만큼 높게 해석 되어지는 것을 알 수 있다.[1]

그러므로 이와 같은 문제점을 해결하고 보다 정확한 특성해석을 하기 위해서는 이방성 전기강판의 인가자계방향에 따른 자계 특성을 정확하게 측정해야만 한다.[2] 본 연구에서는 2방향 자계인가 형 Single sheet tester를 이용하여 이방성 전기강판의 인가자계방향에 따른 자계 특성을 측정하였다.

### 2. 이방성 전기강판의 자계 특성

일반적으로 전기강판 내의 자속밀도(B)와 자계세기(H)의 관계를 보면, 그림 1에서 보는 바와 같이 자속밀도와 자계의 세기의 Vector 서로 간에 차이가 나타난다. 특히 이러한 차이는 이방성 전기강판에서 더욱 심하게 나타나게 된다. 일반적으로 투자율 텐서(Permeability tensor)  $\mu$ 는 다음과 같이 표현되어진다.

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} \end{bmatrix}$$

그림 1에 표현된 것과 같은 자속밀도와 자계의 세기의 방향이 일치하지 않는 현상은 투자율 텐서의 비대각선(off-diagonal) 성분이 영이 아니기 때문에 생겨나는 현상이다.

2방향 자계인가 형 Single sheet tester를 이용한 전기강판의 자계특성 측정을 통하여 투자율 텐서는 자속밀도(B)에 대한 자계의 세기(H)와  $\theta_{HB}$ 의 관계로 표현할 수 있다. 이러한 측정값을 전기기기의 특성해석에 반영하여 보다 정확한 특성해석을 수행할 수 있게 된다.[3] 여기서  $\theta_{HB}$ 는 자속밀도(B)와 자계의 세기(H)의 각도  $\theta_B$ 와  $\theta_H$ 의 차이이다.

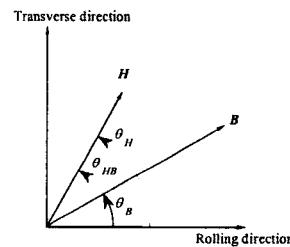


그림 1. 자계의 세기(H)와 자속밀도(B)의 관계

Fig. 1. Relation of flux density and magnetic field intensity

### 3. 측정 시스템

#### 3.1 2방향 자계인가 형 Single sheet tester

이방성 전기 강판에 방향에 따른 자계를 인가하기 위하여 2방향 자계인가 형 Single sheet tester를 이용하여 측정하였다. 그림 2는 2방향 자계인가 형 Single sheet tester의 측정시스템을 나타낸다. 그림 2에 나타난 것과 같이 개발된 2방향 자계인가 형 Single sheet tester는 크게 시료(specimen), 여자권선(exciting coils), 요크, b-coil과 H-coil 그리고 나머지 신호처리부로 구성된다. 컴퓨터에서 발생된 x-방향 및 y-방향의 여자전압의 파형은 고주파 성분을 제거하기 위하여 Low Pass Filter를 통과한 후, 전력증폭기(Power Amplifier, 2kVA)에 연결된다. 증폭된 여자전압은 직류성분을 제거하기 위하여 Matching Transformer를 거치게 되고 이는 각각 x-방향 및 y-방향 여자권선에 연결된다. H-coil 및 B-coil에서 측정된 유기 전압은 Isolation Noise Amplifier를 이용하여 증폭된 후, 컴퓨터로 들어오게 된다. 이때 측정시스템과 컴퓨터 간의 통신은 DAQ Board 를 사용하여 이루어진다.

#### 3.2 자속밀도(B)와 자계세기(H)의 측정

자속밀도(B)와 자계세기(H)는 유기되는 전압을 신호 분석하여 계산되어진다. B-coil과 H-coil로부터 유기되는 전압을 FFT(Fast fourier transform)한 후, 이 FFT 계수 중 측정을 통하여 들어온 Noise를 제거하고 실제 자속밀도(B)와 자계의 세기(H)에 영향을 끼치는 주파수만 선별하여 Inverse FFT를 한다. 마지막으로 식(1), (2) 와 같이 FFT 계수를 이용하여 신호를 적분함으로써 자속밀도(B)와 자계세기(H)를 계산하게 된다.

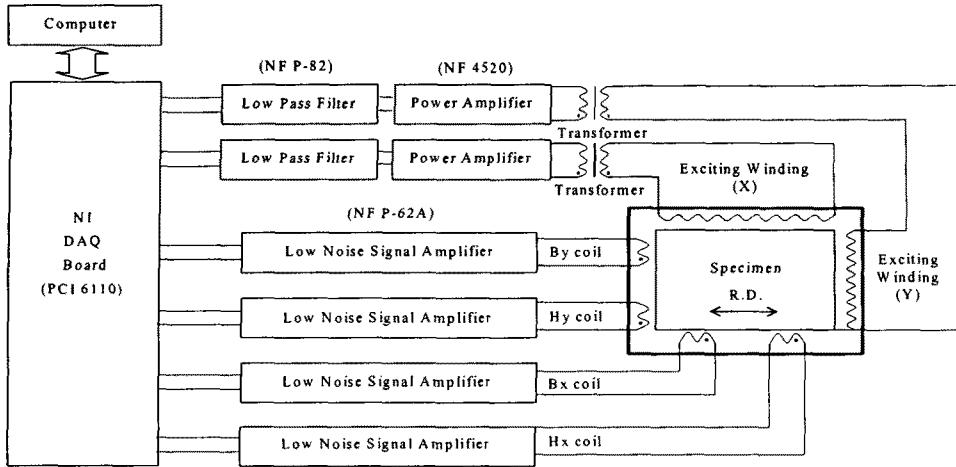


그림 2. 2방향 여자형 Single sheet tester 시스템  
Fig. 2. Double-excitation Type Single sheet tester

$$B[n] = \frac{1}{N^2} \sum_{k=0}^{(N-1)} \frac{1}{a_k} \operatorname{Re}\{X[k]\} \sin(\alpha_k n) + \frac{1}{N^2} \sum_{k=0}^{(N-1)} \frac{1}{a_k} \operatorname{Im}\{X[k]\} \cos(\alpha_k n) \quad (1)$$

$$H[n] = \frac{1}{N^2} \sum_{k=0}^{(N-1)} \frac{1}{a_k} \operatorname{Re}\{X[k]\} \sin(\alpha_k n) + \frac{1}{N^2} \sum_{k=0}^{(N-1)} \frac{1}{a_k} \operatorname{Im}\{X[k]\} \cos(\alpha_k n) \quad (2)$$

여기서,  $\alpha_k = \frac{2\pi k}{n}$  이다.

### 3.3 B Waveform control

Exciting Voltage로 정현파 전압을 인가하면 비 정현파적인 자속밀도(B)를 얻게 된다. 그러나 이방성 전기강판에 방향에 따른 자계인자를 하기 위하여 자속밀도(B)를 정현파로 만들어 주어야 한다. 이때 얻고자 하는 자속밀도의 파형은 다음과 같이 표현한다.

$$B_{\theta_B}(t) = B_m \cos(\omega t) \quad [T] \quad (3)$$

여기서,  $\theta_B$ 는 인가자계의 방향이 rolling direction축과 이루는 각도이다. 이로부터 rolling direction방향 및 transverse direction방향의 얻고자 하는 자속밀도 파형은 각각 다음과 같다.

$$B_{RD}(t) = B_m \cos \theta_B \cos(\omega t) \quad [T] \quad (4-1)$$

$$B_{TD}(t) = B_m \sin \theta_B \cos(\omega t) \quad [T] \quad (4-2)$$

이에 해당하는 유기전압의 파형은 각각 다음과 같다.

$$e_{RD}(t) = (\text{Area} \cdot \text{Turn})_{RD} \omega B_m \cos \theta_B \sin(\omega t) \quad [V] \quad (5-1)$$

$$e_{TD}(t) = (\text{Area} \cdot \text{Turn})_{TD} \omega B_m \sin \theta_B \sin(\omega t) \quad [V] \quad (5-2)$$

따라서 측정과정에서 자속밀도가 식 (3)과 같이 주어지는 정현파가 되도록 하기 위하여 rolling direction방향 및 transverse direction방향의 유기전압이 각각 식 (5-1)과 (5-2)가 되도록 rolling direction방향 및 transverse direction 방향의 여자전압의 파형을 조절하였다.

그림 3은 B Waveform control 전과 후의 여자전압과 자속밀도를 나타내는데 자속밀도가 정현파가 되기 위해서 여자전압에 많은 왜곡이 일어났음을 알 수 있다.

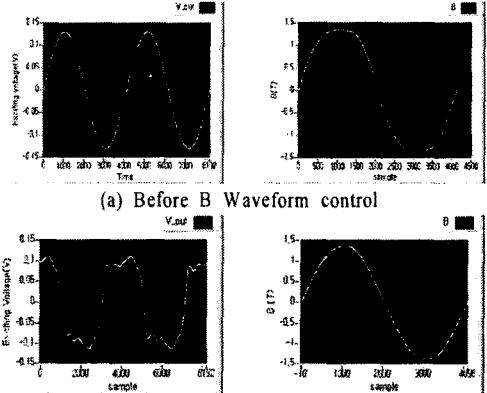


그림 3. 여자전압과 자속밀도  
Fig. 3. Exciting voltage and Flux density

### 4. 측정결과

개발된 2방향 여자형 Single sheet tester를 이용하여 이방성 전기강판의 자기적인 특성으로, rolling direction축과 이루는 각도  $\theta_B$ 에 대한 자속밀도와 자계세기 그리고  $\theta_H$ 를 측정하였다. 측정에 사용된 시료는 이방성 전기강판(Grain-oriented electrical steel sheet, 30PG158, thickness: 0.3mm)으로 하였다. 측정 주파수는 모두 50Hz로 하였다

그림 4는  $\theta_B$ 에 대한 자속밀도(B)와 자계(H)의 궤적을 나타낸다. 이는 실험결과에서 보듯이 실제로 전기강판에서 인가자계방향에 따른 자속밀도와 자계의 세기의 방향이 서로 일치하지 않음을 알 수 있다. 이로부터, 이방성 전기강판을 이용한 전기기기의 특성을 정확하게 해석하고, 손실을 계산하기 위해서는 자계의 인가방향에 따른 자기적인 특성의 변화를 반드시 고려해야 함을 알 수 있다.

그림 5는 이방성 전기강판의 측정결과, 즉 인가자계 방향에 따른 B-H곡선의 변화, 철손곡선의 변화, B- $\theta_B$ 곡선의 변화를 나타낸다. 그림 5-a)는 인가자계 방향에 따라 B-H Curve의 변화를 나타낸 것으로, 인가자계의 방향에 따라 B-H Curve 뿐만이 아니라 포화자속 밀도가 대략 1.8T이고 transverse direction에서 포화자속 밀도가 대략 1.3T이다. 일반적으로 rolling direction에서

transverse direction 방향으로 갈수록 포화자속밀도 값이 계속하여 작아질 것으로 생각되어 지나, 실제로  $\theta_B$  가 55deg 보다 클 때는 다시 포화자속밀도가 증가함을 알 수 있다. 또한 그림 5-b)에서 보듯이 자계의 인가방향에 따라 철손도 많이 달라짐을 알 수 있다. 그림 5-c)는 B- $\theta_{HB}$  Curve를 나타낸다. 자계의 세기(H)는  $\theta_B$ 로 고정되어진 자속밀도(B)의 변화에 따라서 측정되어졌다.  $\theta_B$ 는 0deg 와 90deg 에서 본질적으로  $\theta_{HB}$ 는 0이어야 하나 측정상의 error와 전기강판의 특성에 의하여 오차가 발생한다. 전기강판의 자계특성 측정 시 자속밀도(B)가  $\theta_B$ 는 0deg 와 90deg에서 약간의 각도로 이탈하게 되고 이로 인하여 각각 transverse direction 성분과 rolling direction 성분을 포함하게 되어 오차가 발생한다. 특히 이런 현상은  $\theta_B$ 는 0deg에서 더욱 크게 나타나게 되는데, 이는 아마도 측정시료의 grain size와 B waveform control의 측정오차의 영향에 의한 결과로 보인다. 그러나 자속밀도(B)가 점점 증가함에 따라 자속밀도 B의 이탈 정도가 점점 작아지게 되고 이에 따라 transverse direction 성분과 rolling direction 성분에 의한 영향이 감소하게 되어  $\theta_{HB}$ 가 0deg에 근접에 감을 알 수 있다.

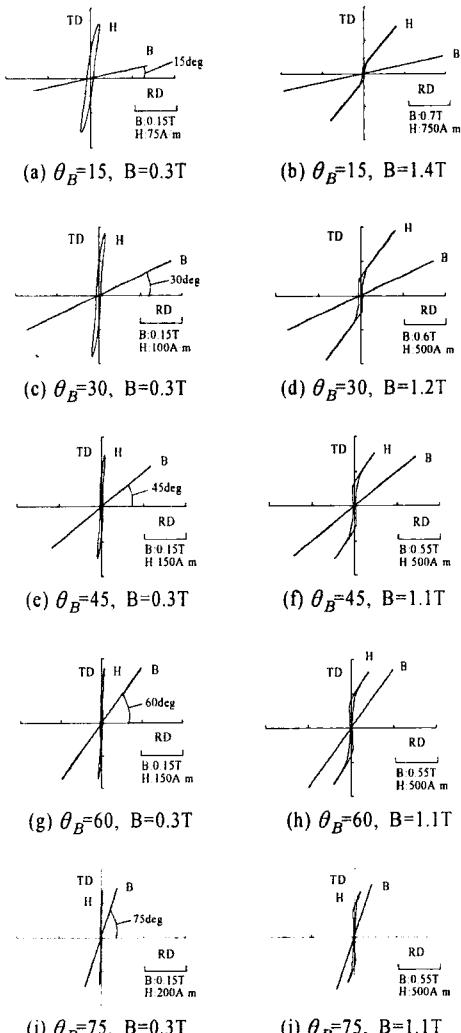


그림 4. 자속밀도와 자계의 세기 궤적

Fig. 4. Loci of flux density and magnetic field strength

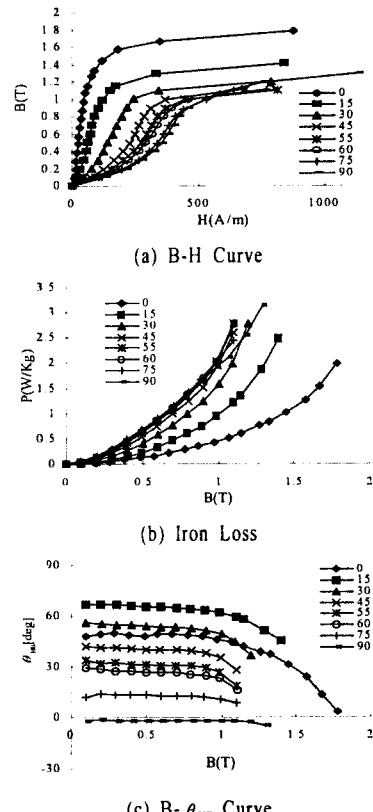


그림 5. 이방성 전기강판의 인가자계 방향에 따른 자계특성  
Fig. 5. The magnetic characteristics along arbitrary directions of grain-oriented electrical steel sheets.

## 5. 결 론

본 논문에서는 이방성 전기강판으로 만들어지는 전기 기기의 보다 정확한 해석을 위하여 인가자계 방향에 따른 이방성 전기강판의 자계특성을 측정하였다. 하지만 보다 높은 자속밀도(high flux density)에서의 자계 특성을 측정하기 위하여 강한 자장을 인가 할 수 있는 측정 장치와 좀 더 효율적인 B waveform control method의 연구가 필요하다. 본 논문에서는 이방성 전기강판에 교번자계가 인가되는 경우의 자계 특성과 손실만을 측정하였으나, 앞으로는 전기강판에 회전자계가 인가되는 경우의 특성 및 손실, 그리고 회전자계와 교번자계가 동시에 인가되는 경우의 특성 측정이 향후 연구주제가 될 것이다. 그리고 측정결과가 수치해석기법을 이용한 전기기기의 특성해석 과정에 반영 할 수 있도록 적절한 모델링 기법도 연구 되어야한다.

## [참 고 문 헌]

- [1] T. Nakata, N. Takahashi, K. Fujiwara and M. Nakano, "Measurement of magnetic characteristics along arbitrary direction of grain-oriented silicon steel up to high flux density", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 29, No. 6, pp.3544-3546 November 1999
- [2] M. Nakano, H. Nishimoto, K. Fujiwara and N. Takahashi, "Improvement of single sheet testers for measurement of 2-d magnetic properties up to high flux density" IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 35, No. 5, pp.3965-3967 September 1999
- [3] 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