

3축 Strain Gauge와 Vector Single Sheet Tester¹⁾를 이용한 전기강판의 자왜 특성 측정

Measurement of Magnetostriction Characteristics of Electrical Steel Sheet using Three-axial Strain Gauge and Vector Single Sheet Tester

박 찬 혁* · 조 현 진* · 윤 희 성** · 하 정 우** · 김 중 경** · 고 창 섭[†]
(Chan-Hyuk Park · Hyun-Jin Cho · Hee-Sung Yoon · Jung-Woo Ha ·
Joong-Kyoung Kim · Chang-Seop Koh)

Abstract - Acoustic noise from a transformer, recently, has drawing more and more attentions. One of the main source of the noise is thought to be magnetostriction of the electrical steel sheets which compose transformer core. This paper deals with the magnetostriction of a highly grain-oriented electrical steel sheet measured by using a vector single sheet tester and a three-axial strain gauge. The results show that direction and axis ratio as well as the magnitude of the applied magnetic flux density contribute much to magnetostriction.

Key Words : Magnetostriction, Single sheet tester, Electrical steel sheet, Strain gauge, Vector single sheet tester

1. 서 론

여러 가지 전력설비 중에서 발전기 또는 모터의 소음과 진동에 대해서는 비교적 많은 연구가 이루어져 있지만 정지 기인 변압기의 소음과 진동에 대해서는 아직까지도 많은 연구가 이루어지지 않고 있다[1]. 최근에 많은 전원설비가 옥내화되면서 변압기의 소음과 진동 문제가 심각하게 대두되고 있다. 변압기의 소음은 변압기의 자체적인 소음뿐만 아니라 그 진동이 건물의 바닥과 벽을 넘어 전달되기 때문에 추가적인 소음을 유발하기도 한다[2]. 더욱이 변압기의 용량이 커질수록 소음과 진동도 커지게 되는데 이 진동은 경우에 따라서는 변압기 고장의 원인이 되는 것으로 알려져 있다[3].

변압기 소음과 진동의 주원인은 자왜 현상인 것으로 알려져 있다[4]. 자왜 현상은 전기강판으로 이루어진 코어가 자화와 탈자의 과정을 반복하면서 생기는 기계적인 변형으로 기본적으로는 전원 주파수의 두 배의 주파수를 갖는다.

본 논문에서는 vector single sheet tester(V-SST)와 3축 스트레인 게이지(3-axial strain gauge)를 이용하여 변압기용 고방향성 전기강판 (highly grain-oriented electrical steel sheet)의 자왜 측정 시스템을 제안하였다. 전기강판의 자기특성 측정에 대한 국제 표준 규격은 엡스타인 프레임

(Epstein frame)과 1차원 single sheet tester(1D-SST)에 대하여만 정해져 있을 뿐, V-SST에 대한 규격은 현재 정해져 있지 않은 실정이다[5],[6]. 본 논문에서는 위의 두 가지 자기특성 측정에 대한 표준 규격을 참고하여 V-SST에 대한 자기특성 측정시스템을 개발하고 이를 이용하여 자왜 특성 측정시스템을 개발하였다. 그리고 개발된 시스템을 이용하여 고방향성 전기강판의 자왜특성을 측정하고 자왜특성에 영향을 주는 요인들에 대하여 분석하였다.

2. 자왜 측정 시스템

2.1 측정 시스템

그림 1은 개발된 자왜특성측정 시스템의 구성도를 나타내며, 기본적으로는 전기강판의 벡터 히스테리시스 특성을 측정할 수 있는 V-SST 시스템[7]에 자왜(magnetostriction)를 측정하기 위한 3축 스트레인 게이지와 이로부터 나오는 신호를 취득하기 위한 브릿지 박스와 증폭기(strain amplifier)가 추가된 것이다. V-SST의 자계인가장치는 요크에 전기강판의 RD방향과 TD방향으로 수직하는 자계를 독립적으로 제어한다. 자계의 크기와 위상을 적절히 조절하면 임의의 교번자계와 회전자계를 측정 시료에 인가할 수 있다.

2.2 측정 시료 및 자속밀도의 측정

측정에 사용된 시료는 두께 0.3mm의 고방향성 전기강판

[†] Corresponding Author : College of Electrical and Computer Engineering, Chungbuk National University, Korea

E-mail : kohcs@chungbuk.ac.kr

* College of Electrical and Computer Engineering, Chungbuk National University, Korea

** Transformer Research Team, Power & Industrial Systems R&D Center, Hyosung Corporation, Korea

Received : April 8, 2014; Accepted : July 2, 2014

1) 종래의 Single sheet tester는 날장의 시료에 대하여 자계의 세기(H)와 자속밀도(B)의 방향이 일치하는 경우에 한하여 전기강판의 자기특성을 측정할 수 있는 장치이다. 이 경우 자기특성은 H 의 크기만의 함수로 표현되기 때문에 통상 1차원(one dimensional) single sheet tester라고 한다. 본 논문에서 다루는 single sheet tester는 날장의 시료에 대하여 1차원 자기특성은 물론 벡터자기특성을 측정할 수 있기 때문에 Vector single sheet tester라고 하였다.

으로 그림 2과 같이 직경 162.5mm인 원형이며 중심부에 압연방향(x축) 및 수직방향(y축)의 자속밀도를 측정하기 위하여 40mm간격으로 직경 0.3mm인 B-coil 권선용 구멍을 갖고 있다.

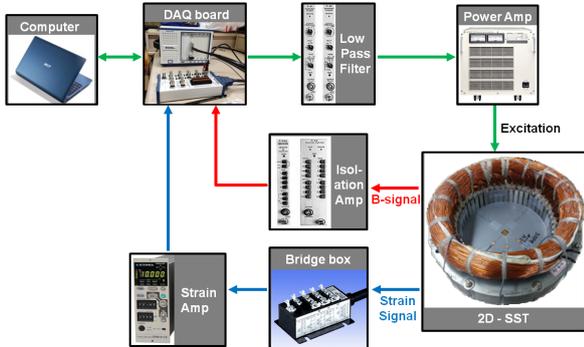


그림 1 V-SST와 3축 스트레인 게이지를 이용한 자왜 측정 시스템 구성도

Fig. 1 Block Diagram of Magnetostriction measurement system using V-SST and three-axial strain gauge.

자속밀도 측정은 B-coil을 이용하여 이뤄지며, B-coil에서 측정되는 유기전압은 다음과 같이 표현된다[8],[9].

$$e_B = -\frac{d\lambda}{dt} \tag{1}$$

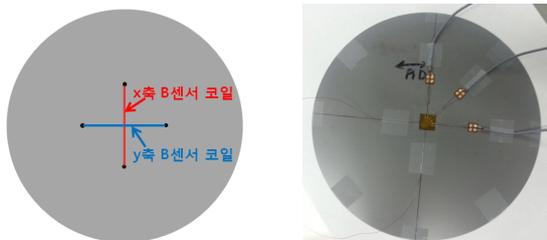
$$= -(NA)_B \frac{dB}{dt}$$

여기서, λ 와 $(NA)_B$ 는 각각 B-coil의 쇄교자속과 Area-turn을 나타내며, Area-turn은 국제 표준 규격 IEC 404-2를 참고하여 계산한다[5]. 식 (1)로부터 전기장판에 인가되는 자속 밀도 파형은 다음 식으로 계산된다.

$$B(t) = -\frac{1}{(NA)_B} \int_0^t e_B(\tau) d\tau \tag{4}$$

2.3 자속밀도 파형 제어

전기장판은 비선형 자기특성을 갖고 또한 여자권선의 전기저항으로 인하여 정현파 여자전압을 인가하면 그림 3(a)과 같이 비정현파의 B-coil 유기전압을 얻게 된다. 그러나 국제표준(IEC 404-2)에 의하면 전기장판의 특성은 정현파



(a) 시료 모델

(b) 실제 시료 모습

그림 2 전기 강판 시료

Fig. 2 Electrical steel sheet specimen

자속밀도의 조건에서 측정하여야 한다[6]. 따라서 자속밀도 파형을 정현파로 만들기 위해서는 정현파 유기전압이 얻어지도록 여자전압의 파형을 조절해야 하고, 이 과정을 자속밀도 파형제어(B-waveform control)라고 한다. 그림 3(b)는 자속밀도 파형제어 후의 여자전압과 유기전압을 나타낸 것으로 유기전압이 정현파가 되기 위해서 여자전압에 많은 왜곡이 일어났음을 알 수 있다. 본 논문에서는 이산계환법(Digital feedback method)을 사용하였으며, 그 방법은 다음과 같이 요약된다[10].

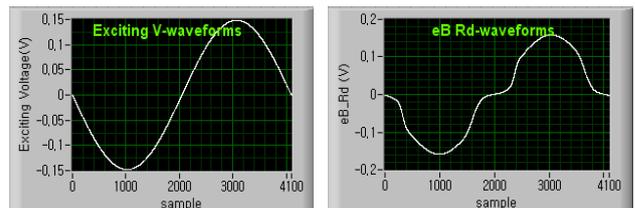
- 1) 컴퓨터에서 발생된 정현파 여자전압을 D/A converter, 저대역 통과 필터 및 전력증폭기를 통하여 여자권선에 인가한다.
- 2) B-coil에 유기되는 출력전압 e_B 를 측정한다.
- 3) 여자전압과 유기전압의 기본파성분 V_{c1} 과 e_{B1} 을 각각 구한다.
- 4) 새로 인가될 여자 전압의 파형은 다음과 같이 결정된다.

$$V_c^{new} = V_c - K \frac{V_{c1}}{e_{B1}} (e_B - e_T) \tag{5}$$

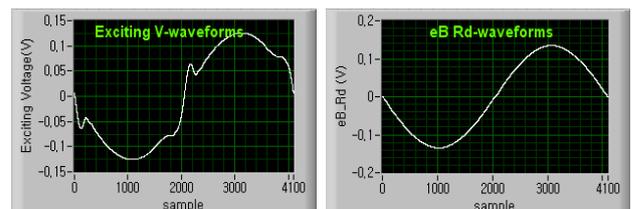
여기서 K는 계환계수(Feedback coefficient)이고 e_T 는 유기전압의 목표파형이다.

2.4 자왜 특성 측정

자왜에 의한 전기장판의 변형은 3축 스트레인 게이지를 이용해서 측정된다. 스트레인 게이지는 저항으로 이루어진 센서로서 피 측정물에 부착되어 물리적인 변형량을 전기적인 신호로 바꾸어 주는 센서이다. 본 논문에서 사용한 3축 스트레인 게이지는 그림 4(a)와 같다. 전기장판에 스트레인 게이지가 부착된 상태에서 자계가 인가되면 전기장판에 기계적인 변형이 생기고 이는 스트레인 게이지의 저항을 변화시켜 그림 4(b)의 휘스톤 브릿지를 통해 전기신호로 바뀌게 된다.



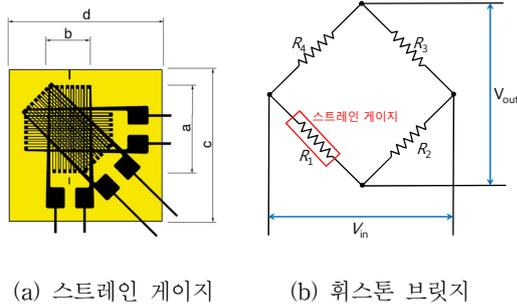
(a) 정현파 여자전압과 유기전압 파형



(b) 자속밀도 파형 제어 후, 여자전압과 유기전압 파형

그림 3 자속밀도 파형 제어

Fig. 3 Waveform Control



(a) 스트레인 게이지 (b) 휘스톤 브릿지

그림 4 자왜 측정 장치

Fig. 4 Magnetostriction measurement equipment

휘스톤 브릿지의 두 단자 A, B에 고정전압 V_{in} 을 인가했을 때, 출력전압 V_{out} 은 다음과 같이 계산된다.

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (6)$$

따라서 $R_1 R_3 = R_2 R_4$ 의 경우 V_{out} 는 0이 된다. 이때가 전기장관에 아무런 변화가 없는 평형 상태에 해당된다. 전기장관에 변형이 일어나게 되면 R_i 은 ΔR 만큼의 저항변화 값을 갖게 되고, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ 일 때, 식(6)는 다음과 같이 바뀐다[11].

$$V_{out} = V_{in} \frac{R^2 + R\Delta R - R^2}{(2R + \Delta R)2R} \cong V_{in} \frac{\Delta R}{4R} \quad (7)$$

식(7)에 의해 출력된 전압은 스트레인 게이지의 비례상수를 곱해서 자왜에 의한 변형률이 된다.

입의의 방향으로 발생하는 수직변형률(normal strain)은 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon(\theta) = \epsilon_x \cos^2 \theta + \epsilon_y \sin^2 \theta + \gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (8)$$

여기서 ϵ_x, ϵ_y 는 각각 x축 및 y축 방향으로의 변형률(strain)이고 γ_{xy} 는 전단변형률(shear strain)이다. 3축 스트레인 게이지로부터 측정되는 변형률은 그 방향을 각각 $\theta_a, \theta_b, \theta_c$ 라고 하면 다음 식으로 표현되며,

$$\begin{aligned} \epsilon(\theta_a) &= \epsilon_x \cos^2 \theta_a + \epsilon_y \sin^2 \theta_a + \gamma_{xy} \sin \theta_a \cos \theta_a \\ \epsilon(\theta_b) &= \epsilon_x \cos^2 \theta_b + \epsilon_y \sin^2 \theta_b + \gamma_{xy} \sin \theta_b \cos \theta_b \\ \epsilon(\theta_c) &= \epsilon_x \cos^2 \theta_c + \epsilon_y \sin^2 \theta_c + \gamma_{xy} \sin \theta_c \cos \theta_c \end{aligned} \quad (8)$$

이로부터 ϵ_x, ϵ_y 및 γ_{xy} 를 구하면 식 (8)로부터 입의의 방향으로 발생하는 수직변형률을 구할 수 있다. 본 연구에서 사용한 3축 스트레인 게이지는 그림 4(a)와 같이 θ_a, θ_b 및 θ_c 가 각각 0도, 45도와 90도인 경우이다.

3. 측정결과

그림 5는 고방향성 전기장관 시료에 압연방향(RD, rolling

direction)을 기준으로 45° 방향으로 주파수 50Hz인 자왜를 인가하였을 때 1주기 동안에 발생하는 자왜를 측정 한 것이다. 자왜파형은 자속밀도 주파수의 2배인 100Hz의 주파수를 가지며, RD방향으로의 자왜(Epsilon_x)는 자속밀도의 크기가 증가 할수록 음의 방향으로 크기가 점점 커지고, 즉, 수축변형(compressive strain)이 점점 크게 발생하고, 반대로 TD방향의 자왜(Epsilon_y)는 자속밀도의 크기가 증가 할수록 양의 방향으로 크기가 증가하여 팽창변형(tensile strain)이 일어남을 알 수 있다. 또한, 수축변형과 팽창변형은 동시에 일어나며, 자속밀도의 크기가 0일 때 자왜의 크기도 0이 됨을 알 수 있다. 그림 5를 자속밀도와 자왜 축으로 바꾸어 다시 그리면 그림 6과 같다.

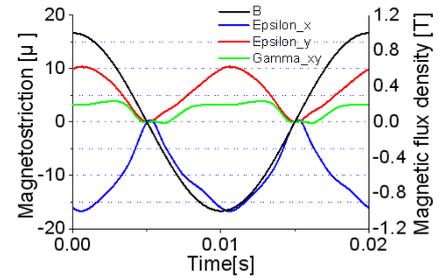
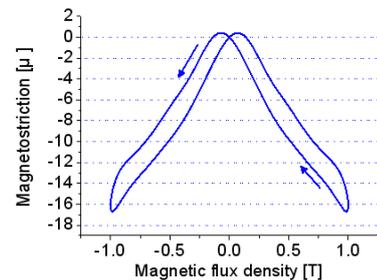
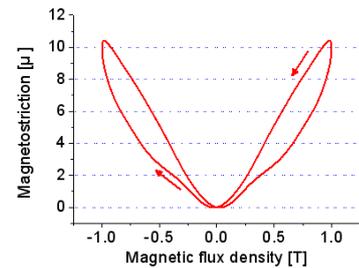


그림 5 측정된 자왜파형($\theta_B = 45^\circ, B=1.0T$)

Fig. 5 magnetostriction ($\theta_B = 45^\circ, B=1.0T$)



(a) x 방향



(b) y 방향

그림 6 Butterfly Loop ($\theta_B = 45^\circ, B=1.0T$)

Fig. 6 Butterfly Loop ($\theta_B = 45^\circ, B=1.0T$)

3.1 교번자계에서의 자왜특성 측정 결과

그림 7과 8은 RD방향을 기준으로 45도 방향의 교번자계가 인가될 때 인가 자속밀도의 증가에 따른 자왜 값의 변화를 나타낸다. 인가 자속밀도가 증가할수록 x축과 y축 방향

의 자왜는 점점 증가하다가 자속밀도가 1.5T를 넘는 순간부터는 다른 파형을 갖게 된다.

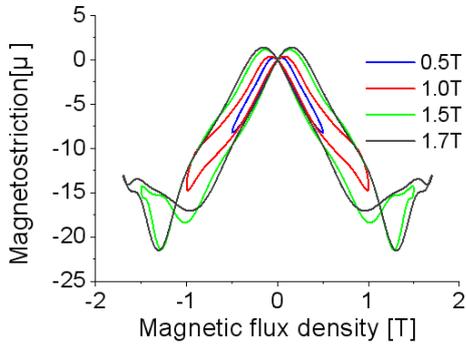


그림 7 교번자계에서 측정된 x-방향 Butterfly Loop ($\theta_B = 45^\circ$)
 Fig. 7 x-axis Butterfly Loop under alternating magnetic field ($\theta_B = 45^\circ$)

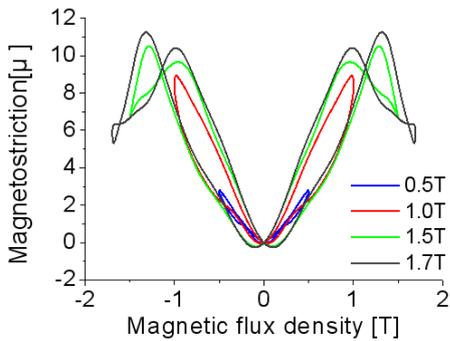


그림 8 교번자계에서 측정된 y-방향 Butterfly Loop ($\theta_B = 45^\circ$)
 Fig. 8 y-axis Butterfly Loop under alternating magnetic field ($\theta_B = 45^\circ$)

그림 9와 10은 각각 자속밀도의 크기가 1.2T일 때 전기장 관 시료에 인가되는 자계의 방향을 0° 부터 90° 까지 변화시키는 경우 측정된 자왜를 나타낸 것으로, 동일한 크기의 자속밀도인 경우에도 그 인가방향에 따라 자왜의 크기가 달라지는 것을 알 수 있다. 자속밀도의 인가방향이 RD방향 (0°)인 경우 자왜의 크기가 가장 작고, RD방향에서 멀어질

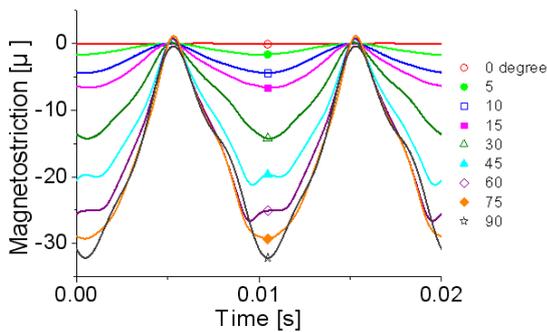


그림 9 자속밀도 인가방향에 따른 x축 방향 자왜 (B=1.2T)
 Fig. 9 x-axis magnetostriction Vs. the direction of the applied magnetic field (B=1.2T)

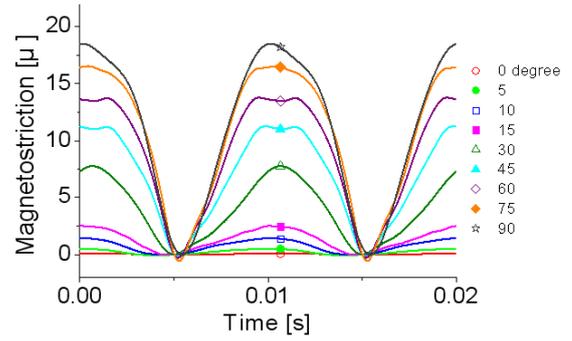


그림 10 자속밀도 인가방향에 따른 y축 방향 자왜 (B=1.2T)
 Fig. 10 y-axis magnetostriction Vs. the direction of the applied magnetic field (B=1.2T)

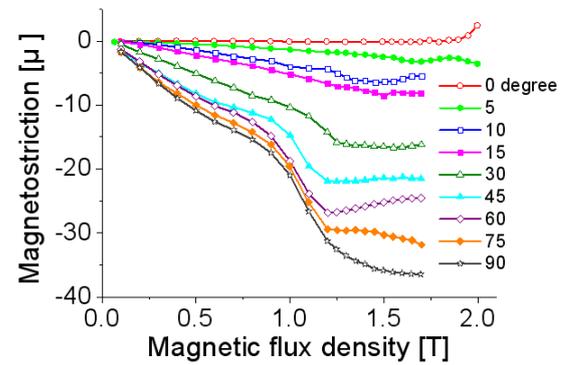


그림 11 자속밀도의 크기와 방향에 따른 x축 자왜의 최대치
 Fig. 11 Peak values of x-axis magnetostriction according to maximum value and direction of the applied magnetic field.

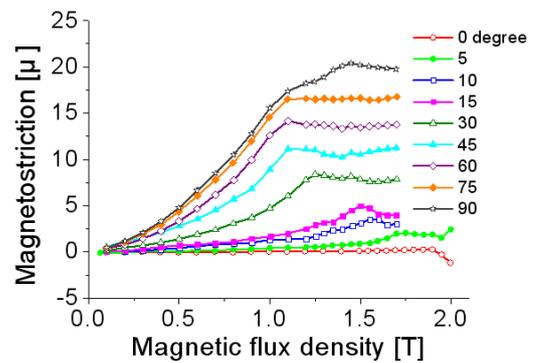


그림 12 자속밀도의 크기와 방향에 따른 y축 자왜의 최대치
 Fig. 12 Peak values of x-axis magnetostriction according to maximum value and direction of the applied magnetic field.

수록 자왜의 크기가 증가한다. x축 방향의 자왜는 인가 자속밀도의 방향이 0° 와 90° 일 때 그 최대치의 차이가 약 357 배이고, y축 자왜의 경우는 약 231배이다. 이로부터 전기장 관에서 발생하는 자왜는 자속밀도의 크기에 따라 달라짐은 물론 인가자계의 방향에 따라서도 많이 달라짐을 알 수 있다[12].

그림 11과 12는 인가된 자속밀도의 크기와 방향에 따른 자왜의 최대치를 보여준다. 자속밀도의 크기가 증가함에 따라 자왜도 함께 커지지만 자왜에 왜곡이 생기는 순간부터는 그 크기가 거의 증가하지 않고 조금씩 감소하는 부분도 발생하였다. 자왜파형이 왜곡이 생기는 시점은 인가자계의 방향에 따라 약간의 차이가 있으며, 인가자계의 방향이 RD방향에서 멀어질수록 자왜의 최대치는 커짐을 알 수 있다.

3.2 회전자계에서의 자왜특성 측정 결과

3상변압기의 T-joint 부분과 coner 부분에는 교번자계보다는 회전자계에 가까운 자속밀도가 인가된다. 본 논문에서는 회전자계가 자왜에 주는 영향을 파악하기 위하여 정현파 회전자계(elliptic rotating magnetic field)가 인가되는 경우의 자왜를 측정하였다. 정현파 회전자계는 그림 13과 같이 자속밀도의 최대치(B_{max}), 축비(axis ratio, α)와 자계의 인가 방향(inclination angle, θ_B)에 의하여 정의되며, 여기서 축비는 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha = \frac{B_{min}}{B_{max}} \tag{9}$$

전기강판에 인가되는 회전자계는 V-SST를 이용하여 x축과 y축 방향에 대하여 여자전압의 파형을 조절하여 만들어진다. 이때 x축과 y축 방향의 자속밀도 파형은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$B_{RD} = B_m \cos\theta_B \cos\omega t - B_m \alpha \sin\theta_B \sin\omega t \tag{10}$$

$$B_{TD} = B_m \sin\theta_B \cos\omega t + B_m \alpha \cos\theta_B \sin\omega t \tag{10}$$

그림 14와 15는 동일한 크기와 인가방향의 교번자계와 회전자계가 인가되는 경우 자왜의 크기가 최대인 순간에 측정된 값을 Strain loop로 나타낸 것이다. 자속밀도(파란색 화살표와 점선)의 크기와 방향이 각각 1.0T와 15°인 순간에 발생하는 팽창변형(빨간색 선)과 수축변형(검정색 선)을 비교해보면, 그림에서 볼 수 있듯이 동일한 크기와 방향의 자속밀도가 인가되는 경우에도 교번자계와 회전자계하에서 발생하는 자왜는 큰 차이를 보인다. 즉, 교번자계와 회전자계가 인가되는 경우에 수축 변형의 최대치는 각각 -5.37과 -7.24로 34.8%의 차이가 발생함을 알 수 있다.

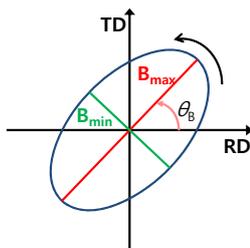


그림 13 회전자계의 정의
Fig. 13 Definition of rotating field

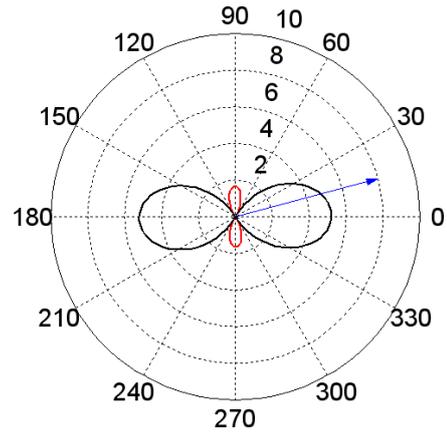


그림 14 교번자계에서 Strain loop ($B_{max}=1.0T, \theta_B=15^\circ, \alpha=0.0$)
Fig. 14 Strain loop under alternating field ($B_{max}=1.0T, \theta_B=15^\circ, \alpha=0.0$)

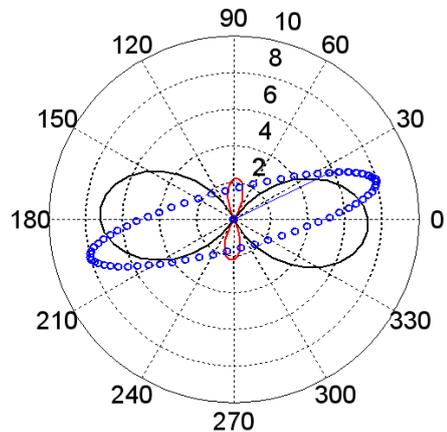


그림 15 회전자계에서 Strain loop ($B_{max}=1.0T, \theta_B=15^\circ, \alpha=0.2$)
Fig. 15 Strain loop under rotating field ($B_{max}=1.0T, \theta_B=15^\circ, \alpha=0.2$)

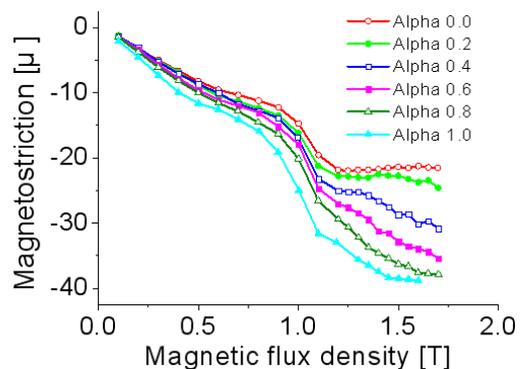


그림 16 회전자계에서 자속밀도의 크기와 축비에 따른 x축 자왜의 최대치 ($\theta_B=45^\circ$)
Fig. 16 Peak values of x-axis magnetostriction according to the magnitude and axis ratio of rotating magnetic field ($\theta_B=45^\circ$)

그림 16과 17은 회전자계에서 자속밀도의 인가방향이 45° 일 때, 자속밀도의 최대치(B_{max})와 축비(α)에 따라 자왜의 최대치의 변화를 보여주는 것으로 축비가 커짐에 따라 자왜는 점점 증가함을 알 수 있다. 따라서 전기강판에 동일한 크기와 방향의 자계가 인가되더라도 그 자계가 교번자계인지 또는 얼마의 축비를 갖는 회전자계인지에 따라서도 자왜는 큰 차이를 갖는다.

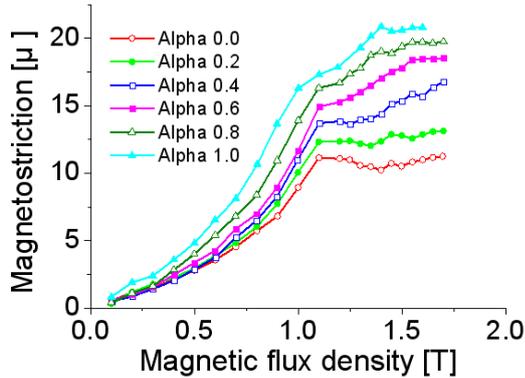


그림 17 회전자계에서 자속밀도의 크기와 축비에 따른 y축 자왜의 최대치 ($\theta_B=45^\circ$)

Fig. 17 Peak values of y-axis magnetostriction according to the magnitude and axis ratio of rotating magnetic field ($\theta_B=45^\circ$)

4. 결 론

본 논문에서는 변압기의 핵심소재인 고방향성 전기강판에 임의의 방향으로 교번자계와 회전자계를 인가할 수 있는 V-SST와 3축 스트레인 게이지를 이용하여 자왜측정 시스템을 개발하였다. 임의의 각도의 교번자계를 자속밀도의 크기를 변화시키며 전기강판에 인가하고 그에 따른 자왜 현상을 측정하였다. 또한 회전자계의 축비를 바꾸가며 회전자계가 자왜에 미치는 영향을 다루었다. 실험결과 전기강판에 발생하는 자왜는 자속밀도의 크기는 물론이고, 자속밀도의 인가방향 및 회전자계의 축비에도 큰 영향을 받는다는 사실을 알았다.

전기기기의 주재료인 전기강판에 자계가 인가될 때 일어날 소음과 진동을 모델링과 시뮬레이션 해석으로 미리 예측하고, 설계 단계에 반영된다면 그 신뢰도와 활용도가 매우 높을 것으로 생각된다.

References

[1] Robert J. Brozek, "No-Load to Full-Load Airborn Noise Level Change on High-Speed Polyphase Induction Motors," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. IA-9, No. 2, pp. 180-200, Mar. 1973.
 [2] "Measures to soundproof and dustproof of transformer," Technical Report, Electrical Technology, pp. 39-43, 2011. Aug. (in Korea)

[3] Young-Dal Kim, Sunf-Joong Kim, "Effect on Vibration According to the Load Capability and Elapsed Year of Power Transformer(154kV) in Operation," The Transactions of the KIEE, Vol. 58P, No. 2, pp. 172-177, Jun. 2009.
 [4] IEC/TR 62581, "Electrical steel. Methods of measurement of the magnetostriction characteristics by means of single sheet and Epstein test specimens," 2010.
 [5] IEC 404-2, "Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel sheet and strip by means of an Epstein frame," 1996.
 [6] IEC 60404-3, "Methods of measurement of the magnetic properties of magnetic sheet and strip by means of single sheet tester," 2002.
 [7] Young-Hwan Eum, Hong-Jung Kim, Chang-Seop Koh, Sun-Ki Hong, Pan-Seok Shin, "Measurement of 2 Dimensional Magnetic Property of Grain-oriented Electrical Steel Sheet According to Exciting Field Direction using SST with 2 Axes Excitation", The Transactions of the KIEE, Vol 55B, No. 5, pp. 250-257, May. 2006.
 [8] Gordon R. Slemon, Electrical machine and drives. Addison-Wesley publishing company, Inc., 1992.
 [9] Philip Beckley, Electrical Steels for rotating machine. Iee Power and Energy Series 37, 2002.
 [10] K. Matsubara, N. Takahashi, K. Fujiwara, and T. Nakata, "Acceleration technique of waveform control for single sheet tester," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 31, No. 6, pp. 3400-3402, Nov. 1995.
 [11] Akhtar S. Khan and Xinwei Wang, Strain Measurements and Stress Analysis, Prentice Hall, 2001.
 [12] Daisuke Wakabayashi, Takashi Todaka, and Masato Enokizono, "Three-Dimensional Magnetostriction and Vector Magnetic Properties Under Alternating Magnetic Flux Conditions in Arbitrary Direction," Electrical Engineering in Japan, Vol. 179, No. 4, 2012.

저 자 소 개



박 찬 혁 (朴贊赫)

1987년 10월 16일생. 2012년 충북대학교 전기공학과 졸업(학사). 2012년~2014년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
 Tel : 043-274-2426
 E-mail : hyuck1016@chungbuk.ac.kr



조 현 진 (趙 珉 振)

1988년 01월 01일생. 2013년 충북대학교 전기공학과 졸업(학사). 2013년~현재 동 대학원 석사과정.

Tel : 043-274-2426

E-mail : siesta3043@chungbuk.ac.kr



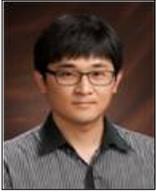
고 창 섭 (高 彰 燮)

1986년 서울대 전기공학과 졸업(학사). 1988년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1993~1994년 미국 Florida International University 전기 및 컴퓨터 공학과 객원 연구원. 1994~1996년 삼성전기(주) 종합 연구소 선임연구원. 2003년2월~2004년 1월 미국 Texas A&M University, 전기컴퓨터공학과 객원교수, 1996~현재 충북대 전기공학과 교수.

Tel : 043-261-2426

Fax : 043-274-2426

E-mail : kohcs@chungbuk.ac.kr



윤 희 성 (尹 熙 盛)

1982년 01월 17일생. 2005년 충북대학교 전기전자공학부 졸업(학사). 2005년~2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년~2012년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2012년~2013년 동 대학원 박사 후 연구원. 2013년~현재 (주)효성 중공업 연구소 변압기연구팀 책임연구원.

Tel : 055-279-7461

E-mail : hsyoon@hyosung.com



하 정 우 (河 政 佑)

1978년 01월 09일생. 2004년 홍익대학교 전기전자공학부 졸업(학사). 2005년~2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년~현재 (주)효성 중공업 연구소 변압기연구팀 선임연구원.

Tel : 055-279-7497

E-mail : wire4man@hyosung.com



김 중 경 (金 重 經)

1976년 9월 9일생. 2002년 동아대학교 전기공학과 졸업(학사). 2002년~2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년~2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2008년~현재 (주)효성 중공업 연구소 변압기연구팀 수석연구원.

Tel : 055-279-7474

E-mail : jkkim1976@hyosung.com