

# 전자기력에 의해 유도된 변압기의 진동 해석을 위한 자왜 현상 모델링

유승열\*, 이준신\*\*, 이옥륜\*\*, 노명규#

## Magnetostriction Modeling for the Analysis of Electromagnetically Induced Vibration of Transformers

Seong Yeol Yoo\*, Jun Sin Lee\*\*, Uk Ryun Lee\*\* and Myounggyu Noh#

### ABSTRACT

Recently, there have been several instances that the nuclear power plants were shut down due to the mechanical faults in the main transformer of the plants. These mechanical faults are primarily originated from the electromagnetically induced mechanical vibrations. Magnetostriction is identified to be the main cause of the mechanical vibration after analyzing the vibration data of the main transformers in nuclear power plants. In this study, we derived a mathematical model of the magnetostriction based on the Jiles-Atherton hysteresis model. The validity of the model is checked by matching the simulations with the experimental observations. The magnetostriction model used in this study will be the first step toward developing a design tool for the transformers that have minimal mechanical vibrations and are robust to mechanical faults.

**Key Words** : Magnetostriction (자왜현상), Hysteresis (히스테리시스), Vibration (진동)

### 1. 서론

원자력 발전소(원전) 주변압기는 발전소에서 생산된 전력을 계통에 공급하는 중요한 기기로서 높은 신뢰성이 요구되나 고장으로 인해 발전정지를 유발하는 사례가 있어 이에 대한 원인을 분석한 결과, 전기적인 원인 외에 기계적인 문제점으로 인한 고장이 상당부분 차지하고 있는 것으로 판명되었다. 현재 원전 주변압기의 건전성 판단 기준은 권선의 전기적인 절연특성 및 절연유의 화학적 평

가에만 의존하고 있지만, 주변압기 고장유형 분석 결과 40% 정도가 기계적인 고장(붓싱 파손, 보호계전기 오동작, 냉각기 누설 등)인 것으로 나타나 변압기의 기계적 고장 원인에 대한 관심이 증가하고 있다. 원전 주변압기 기계적 고장의 주 원인으로 변압기 진동을 들 수 있는데, 원전 주변압기는 보통의 변압기와는 달리 154kV, 345kV 또는 765kV의 고전압을 다루기 때문에 다른 변압기와 비교하여 크기가 크다. 변압기의 기계적 진동은 크기에 비례하여 증가하며 원전 주변압기의 주요 고장 원

접수일: 2007년 1월 30일; 게재승인일: 2007년 10월 23일

\* 충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단

\*\* 한국전력연구원 원전기계그룹

# 교신저자: 충남대학교 메카트로닉스공학전공

E-mail : mnoh@cnu.ac.kr Tel. (042) 821-6877

인으로 파악되었다.<sup>1</sup>

변압기의 기계적 진동은 그 자체가 비선형성을 띄고 있으며, 자왜 현상에 기인하는 것으로 알려져 있다. 자왜 현상이란 자성체가 자화될 때 자화와 함께 기계적 변형이 동반되는 것으로 모든 자성체는 자왜 특성을 지니고 있으며, 자왜 변형이 특히 큰 재료는 액츄에이터나 센서로 사용되기도 한다. 본 연구에서는 자왜 특성의 수학적 모델을 도출하고, 이를 실험적으로 검증하고자 한다. 154kV, 345kV 등의 고전압을 사용하는 원전 주변압기에서 실험을 수행하는데 따르는 안전 문제 및 현실적 어려움으로 인해 본 논문에서는 100V 60Hz 조건에서 실험을 수행하였다. 자왜 변형은 자화에 의해 발생하므로 자왜 모델은 자화 모델과 자왜 모델 수립을 위하여 Jiles-Atherton 히스테리시스 모델을 사용하였다.

## 2. 변압기 진동 해석

Fig. 1 은 원전 주변압기의 진동 측정 결과를 FFT 를 이용하여 주파수 분석한 그래프로서, 60Hz 인 입력 주파수의 짝수 배에 해당하는 주파수가 진동의 주요 성분임을 알 수 있다. 진동 특성을 보다 자세히 파악하기 위해 실험용 변압기를 이용하여 기계적 진동을 측정하고 이를 주파수 분석하였다.

Fig. 2 는 원전 주변압기와 같은 소재로 제작한

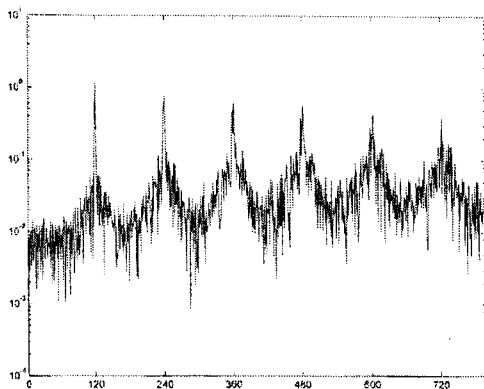


Fig. 1 Vibration measurement (upper graph) and its FFT results (lower graph) of the main transformer at a nuclear power plant with the input voltage of 100V at 60Hz

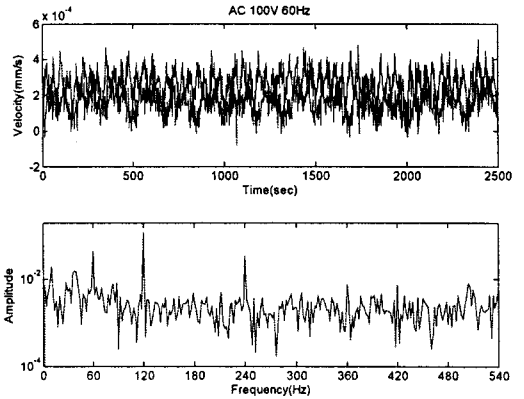


Fig. 2 Vibration measurement (upper graph) and its FFT results (lower graph) of the test transformer with the input voltage of 100V at 60Hz

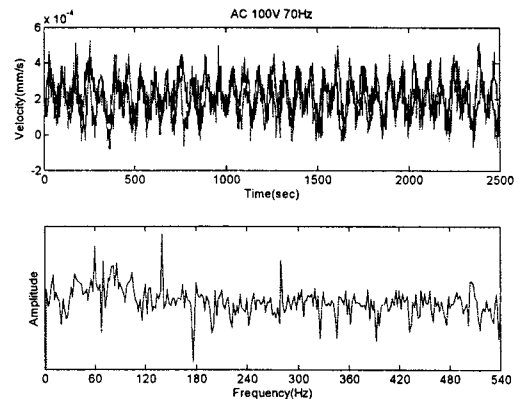


Fig. 3 Vibration measurement (upper graph) and its FFT results (lower graph) of the test transformer with the input voltage of 100V at 70Hz

실험용 변압기에 100V 60Hz 의 입력전압을 인가하였을 때 변압기 진동을 가속도계로 측정하고 주파수 분석을 한 결과이다. 주변압기 주파수 분석 결과와는 달리 Fig. 2 의 주파수 분석 결과에서 보면 실험용 변압기 진동은 입력 주파수의 짝수 배에 해당하는 진동뿐만 아니라 입력주파수와 동일한 신호가 측정되었다. 이는, 실험용 변압기 진동데이터 취득시 사용한 측정 장비의 전원 노이즈에 기인할 가능성이 있고, 하모닉 성분 역시 측정 장치의 전원 노이즈에 기인할 가능성도 있다. 전원 노이즈에 의한 측정 불확실성을 배제하고 자왜 현상에 의한 진동만을 측정하기 위해 변압기의 입력

주파수를 바꾸어 동일한 실험을 수행하였다.

Fig. 3 은 측정 장치들의 전원 전압으로부터 변압기 인가 전원을 분리하고, 인가 전압의 주파수를 70Hz 로 바꾸었을 때의 진동 파형과 FFT 분석 결과이다. Fig. 3 의 분석 결과를 보면 진동신호의 주요 성분으로 60Hz, 140Hz, 180Hz 등의 신호를 관측할 수 있는데, 입력 주파수와 관계가 없는 60Hz 성분은 전원 노이즈에 기인한 것이며, 140Hz 와 180Hz 성분은 입력주파수의 짝수 배에 해당하는 진동의 주요 성분으로 판단된다.

자왜 현상은 철심의 자화에 수반하는 기계적 변형으로 교류전원 주파수의 2 배로 변형이 일어나는 특징을 갖고 있음을 고려할 때 입력 주파수의 2X 성분인 120Hz, 140Hz 에서의 진동 성분은 변압기의 자화 특성에 기인한 것으로 진동의 대부분은 변압기 철심의 자왜 현상으로 인한 것으로 판단된다.

다음 절에서는 이러한 자왜 현상의 수학적 모델에 대해 기술하고자 한다.

### 3. 자왜 현상의 수학적 모델링

자왜 (Magnetostriction) 모델은 히스테리시스 모델을 기반으로 하기 때문에, 자왜 모델링을 위해서는 먼저 히스테리시스 현상을 모델링해야 한다. 히스테리시스모델은 Jiles-Atherton 모델을 이용하였다.<sup>2</sup> Jiles-Atherton 의 히스테리시스 모델은 도메인 이론에 기초하는데, 도메인이란  $10^{12} \sim 10^{16}$  개 정도의 원자가 모여 이루는 영역으로서 일정한 자화 방향을 갖는다. 일반적인 크기의 자성체 재료 시편은 무수히 많은 도메인으로 이루어져 있으며 각 도메인은 임의의 방향으로 자화되어 있다. 따라서 거시적인 측면에서 볼 때 시편은 자화되어 있지 않다고 할 수 있다. 외부에서 자기장이 인가되면, 도메인들에 변화가 발생하는데, 먼저 외부 자기장과 동일한 자화 방향을 갖는 도메인들은 확장하고, 그 외의 도메인 들의 자화 방향은 외부 자기장과 일치하는 방향으로 회전하게 된다. Jiles-Atherton 의 히스테리시스 모델은 물리 법칙을 이용하여 이러한 도메인들의 변화를 기술한다.

#### 3.1 히스테리시스 모델

Jiles-Atherton 의 히스테리시스 모델은 반히스테리시스 모델(anhysteresis model)로부터 출발한다.<sup>2,3</sup>

<sup>5</sup> 반히스테리시스 모델이란 재료가 히스테리시스를 가지지 않을 때의 자화 특성을 나타내는 것으로서 DC 자화 특성으로 간주 할 수 있다. 반히스테리시스 특성은 도메인 내 분자들이 열역학적으로 평형을 유지하고 있다고 가정하였을 때 나타나는데 각 도메인의 자성 모멘트는 임의의 방향을 가지고 있으며, 그 분포는 온도의 함수로 모델링할 수 있다.<sup>2-4</sup>

일정한 온도에서의 평균 모멘트는

$$M = \frac{\int_0^\pi M_s \cos\theta e^{-E_d(\theta)/k_B T} \sin\theta d\theta}{\int_0^\pi e^{-E_d(\theta)/k_B T} \sin\theta d\theta} \quad (1)$$

와 같이 표현할 수 있다. 식 (1)에서  $\theta$ 는 자기 모멘트와 인가된 자기장  $H$  사이의 각도이고,  $M_s$ 는 포화 자기장,  $k_B$ 는 Boltzmann 상수를 나타내며,  $T$ 는 온도이다.  $E_d(\theta)$ 는 외부 자기장  $H$ 에 의한 도메인의 에너지를 나타내는데

$$E_d(\theta) = -\mu_0 m H_e \cos\theta \quad (2)$$

와 같이 쓸 수 있다. 식 (2)에서  $\mu_0$ 는 진공의 투자율이며,  $m$ 은 도메인의 자화 모멘트,  $H_e$ 는 유효 자기장을 의미한다.

유효 자기장은 외부 자기장과 재료 내부 도메인 간의 상호 작용에 의한 자기장의 합이며

$$H_e = H + \alpha M \quad (3)$$

과 같이 표현할 수 있다. 식 (3)에서  $\alpha$ 는 내부 도메인 간의 상호작용을 나타내는 평균 자기장 파라미터이다. 식 (2)와 (3)을 이용하여 식 (1)을 적분하면

$$M = M_s [\coth(H_e / a) - a / H_e] \equiv M_a \quad (4)$$

와 같이 반히스테리시스 곡선을 얻을 수 있다. 식 (4)에서  $a = N k_B T / \mu_0 M_s$ 로 정의되어 있으며  $N$ 은 단위 부피당의 도메인 수를 의미한다.

식 (4)에 의해 기술되는 반히스테리시스 특성은 외부 자기장 하에서 도메인의 크기는 변하지 않고 자화 방향만 회전하는 상태라고 할 수 있다. 도메인의 회전은 완벽한 가역적 변화로서 히스테리시스를 동반하지 않는다.

재료의 히스테리시스는 위에서 기술한 반히스테리시스로부터의 편차로 간주할 수 있으며 이 편차는 재료 내 불순물에 의해 도메인 벽이 고정 (pinning)됨으로 생기는 에너지의 손실로부터 발생

한다고 생각할 수 있다. 고정(Pinning)이 일어나는 도메인의 확장에 필요한 에너지가 자화에 필요한 에너지에 비례한다고 가정하면

$$E_{pin}(M) = k \int_0^M dM \quad (5)$$

와 같이 쓸 수 있다. 식 (5)에서  $k$  는 고정(pinning) 상수이다. 자화에 필요한 전체 에너지는 따라서

$$\int_0^M M dB_e = \int_0^M M_a dB_e - k \int_0^M \left( \frac{dM}{dB_e} \right) dB_e \quad (6)$$

와 같이 표현할 수 있으며  $B_e = \mu_0 H_e$  이다. 식 (6) 을 미분하면

$$M = M_a - \delta k \left( \frac{dM}{dB_e} \right) \quad (7)$$

과 같은 히스테리시스 모델을 얻을 수 있다. 식 (7)에서  $\delta$  는 자기장 ( $H$ )이 증가할 때 +1 의 값을 가지며, 감소할 때 -1 의 값을 가진다. 식 (7)을  $dM/dH$  의 함수로 정리하면

$$\frac{dM}{dH} = \frac{M_a - M}{\frac{\delta k}{\mu_0} - \alpha(M_a - M)} \quad (8)$$

와 같은 히스테리시스 모델을 얻을 수 있다.

식 (8)의 히스테리시스 모델은 도메인 벽의 고정(pinning)에 의한 비가역적 히스테리시스를 기술한다.<sup>3</sup> 도메인 벽의 굽힘 (domain wall bowing)에 의한 가역적 히스테리시스는 반히스테리시스 곡선과 히스테리시스 곡선의 차이에 비례하며

$$M_{rev} = c(M_a - M_{irr}) \quad (9)$$

와 같이 표현할 수 있고,  $c$  는 초기 자기 민감성의 비율을 나타내며, 초기 자화 곡선의 기울기로부터 구할 수 있다. 식 (8)과 (9)를 합하여 미분 형태로 표현하면 식 (10)과 같다.<sup>1,2</sup>

$$\frac{dM}{dH} = \frac{M_a - M}{\frac{\delta k}{\mu_0} - \alpha(M_a - M)} + c \left( \frac{dM_a}{dH} - \frac{dM_{irr}}{dH} \right) \quad (10)$$

식 (10)의 히스테리시스 모델을 결정하는 파라미터 값들은 실험으로부터 얻은 자화 곡선으로부터 구할 수 있다. 즉, 실험으로 구한 자화곡선에 가장 근접하는 자화곡선을 만들어내는 파라미터 값들을 최적화 알고리즘을 이용하여 구할 수 있다.

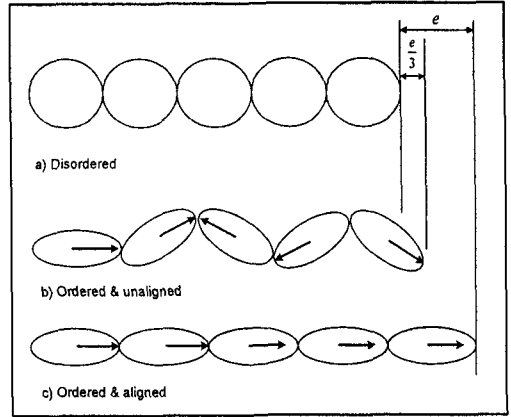


Fig. 4 Schematic diagram illustrating the magnetostriction in: (a) the disordered regime; (b) the demagnetized regime; and (c) the ferromagnetic regime, magnetized to saturation<sup>4</sup>

### 3.2 자왜 모델

Fig. 4 는 도메인 단위에서 일어나는 자왜 현상을 도식화한 그림이다. Fig. 4(a)는 재료가 큐리 온도 이상에서 자기장이 인가되지 않았을 때의 도메인 모습이다. Fig. 4(b)는 큐리 온도에서 재료가 강자성체가 되었을 때 도메인들의 모습이다. 이 때 임의의 자화가 생기며, 각 도메인들은 극성을 가지지만 각각 임의의 방향으로 정렬되어 있음을 알 수 있고, 이 때 자왜 스트레인( $\lambda_0$ )이 일어나게 된다. 그리고 Fig. 4(c)는 외부자기장이 포화상태로 인가되었을 때 도메인들의 모습이다. 각 도메인들은 극성을 띄며 자기장의 방향과 평행한 방향으로 정렬하게 되며, 이 때 포화 자왜 스트레인( $\lambda_s$ )이 일어나게 된다.<sup>3</sup> 인가된 자기장에 대한 임의의 방향의 자왜 스트레인은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$e(\theta) = e \cos^2 \theta \quad (11)$$

이 때,  $\theta$  는 인가 자기장 방향과 도메인의 극성 방향 사이의 각이고,  $e$  는 포화 자왜 스트레인이다. 변형되는 정도를 평균적으로 나타내면 아래와 같은 적분 형태로 나타낼 수 있다.

$$\lambda_0 = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} e \cos^2 \theta \sin \theta d\theta = e/3 \quad (12)$$

위 식을 이용하여 포화 자왜 스트레인을 표현하면 아래와 같다.<sup>3</sup>

$$\lambda_s = e - \lambda_0 = \frac{2}{3}e \quad (13)$$

기계적 평형 상태에서 에너지가 최소화하는 조건을 적용하면 인가 자기장 방향인  $z$  방향의 변형률(스트레인)은

$$e_{zz} = \frac{\sigma}{Y} - \frac{2}{3} \frac{b(1+\nu)}{Y} \pm \left\{ \left[ \frac{1}{Y} \left( \sigma - \frac{2}{3} b(1+\nu) \right) \right]^2 - \frac{2}{Y} (\phi_{mag} + c_z) \right\}^{1/2} \quad (14)$$

식 (14)에서  $Y$  는 Young 의 계수이며,  $\nu$  는 Poisson 의 비이다. 식 (14)에서 첫 번째 항인  $\sigma/Y$  는 기계적인 스트레인이며, 나머지 항은 자왜에 의한 스트레인  $e_{me}$  이다. 자기포화(saturation)에서  $e_{me}$  가 0 인 조건을 이용하여  $c_z$  를 구하면 자왜 스트레인은 다음과 같이 나타내어진다.

$$e_{me} = -\frac{2}{3} \frac{b(1+\nu)}{Y} + \frac{2}{3} \frac{b(1+\nu)}{Y} \left\{ 1 - \frac{9Y}{2b^2(1+\nu)^2} (\phi_{mag}(M) - \phi_{mag}(M_s)) \right\}^{1/2} \quad (15)$$

일반적인 자왜 스트레인의 정의는

$$\frac{3}{2} \lambda = e_{me}(M) - e_{me}^0 \quad (16)$$

이며 이를 이용하면

$$\frac{3}{2} \lambda = -\frac{2}{3} \frac{b(1+\nu)}{Y} \left[ \left\{ 1 + \frac{9Y \phi_{mag}(M_s)}{2b^2(1+\nu)^2} \right\} - \left\{ 1 + \frac{9Y [\phi_{mag}(M_s) - \phi_{mag}(M)]}{2b^2(1+\nu)^2} \right\}^{1/2} \right] \quad (17)$$

와 같이 자왜 스트레인을 표현할 수 있다.<sup>2</sup> 식 (17)에서 자기 에너지  $\phi_{mag}$  는

$$\phi_{mag}(M) = \frac{1}{2} \alpha_1 \mu_0 M^2 - \alpha_1 \mu_0 (M_o - M) H + \frac{1}{2} \alpha_2 \mu_0 (M_o - M)^2 \quad (18)$$

로 가정하였다. 자왜 모델에서  $c_{11}, c_{12}, b, \alpha_1, \alpha_2$  등은 실험적으로 구하여지는 파라미터들이다.

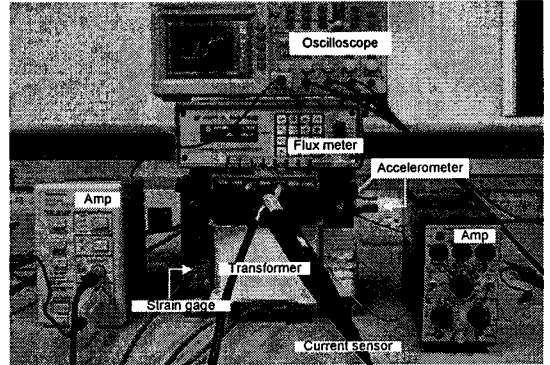


Fig. 5 Experimental apparatus

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 실험 장치

실험 장치는 Fig. 5 과 같이 구성되었다. 변압기는 원전 주변압기와 같은 재료로 만들어졌으며 입력전압은 100V, 60Hz 전원을 이용하였다. 변압기 진동 측정을 위해 가속도계와 스트레인 게이지를 부착하였다. 측정된 신호가 미약하기 때문에 각각 증폭기를 이용하였고, 자속 측정을 위해 Flux meter 를 사용하였고 전류 센서를 이용하여 전류를 측정하였다.

### 4.2 실험 결과

Fig. 6 은 앞 장에서 기술한 자화 모델 (10)을 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과와 실험 장치로부터 획득된 히스테리시스 곡선을 비교하여 보여 준다. 자화 모델은 여러 개의 파라미터에 의해 결정된다. 이러한 파라미터는 자화 모델이 실험으로 측정된 자화곡선에 가장 근접하도록 하는 최적화 과정을 통해 얻을 수 있다. 자화 곡선은 입력의 증감이 변하는 양단에서 불연속을 가지는 비선형성을 가지고 있으므로, Gradient 에 기초한 최적화 알고리즘 (예를 들어 Conjugate Gradient 혹은 Sequential Quadratic Programming)을 사용하기에 부적합하다. 본 연구에서는 Simplex 방법을 이용하여 최적의 파라미터를 구하였는데, 그 결과는 Table 1 에 정리되어 있다.

Fig. 6 에서 관측할 수 있는 바와 같이, 본 연구에서 사용한 자화 모델은 실제 히스테리시스 곡선과 매우 유사한 형태를 보여준다. Fig. 7 은 앞 장에서 기술한 자왜 모델(식 (17)~(18))을 이용하여 획득

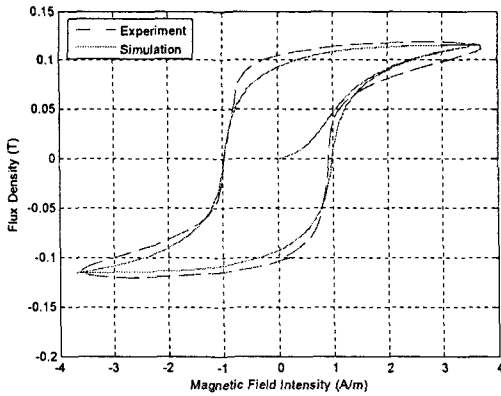


Fig. 6 Hysteresis Curve of experiment and simulation

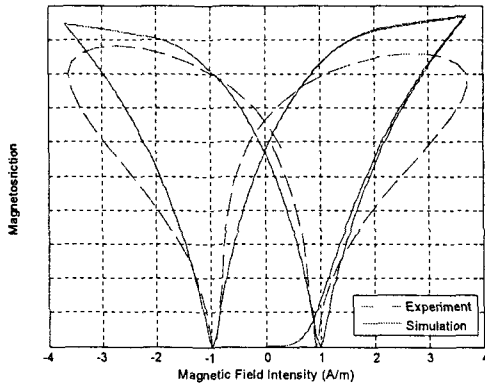


Fig. 7 Magnetostriction Curve of experiment and simulation

Table 1 Parameters of Simulation Model

파라미터	값	단 위
$Y$	$1.26 \times 10^{11}$	$N/m$
$k$	1070	$A/m$
$a$	1150	$A/m$
$c$	0.2	$N/m^2$
$b$	$-0.242 \times 10^{-7}$	$N/m^2$
$M_s$	$1.2 \times 10^6$	$A/m$
$\alpha_1$	$5.7 \times 10^{-9}$	
$\alpha_2$	$3.5 \times 10^{-5}$	
$\alpha$	$2.9 \times 10^{-3}$	
$\nu$	0.35	

특한 자왜 현상과 실험을 통하여 획득한 데이터로부터 얻은 자왜 현상을 비교한 그래프이다. 자왜 현상의 특징인 나비의 날개 모양을 실험 결과와 시뮬레이션에서 관측할 수 있다. 시뮬레이션의 경우 입력의 양단에서 곡선이 첨예한데 비해, 실험 결과는 완만한 변화를 보여주는데, 이는 모델에서 고려하지 않은 와전류에 의한 영향일 가능성이 높다. 자왜 모델에 사용한 파라미터 값들은 Table 1에 나타나 있다.

### 4.3 고찰

원전 주변압기의 진동 데이터 분석 결과 기계적 진동이 고장의 주요 원인으로 파악되었다.<sup>1</sup> 변압기의 기계적 진동은 전기적 입력으로부터 유도된 자왜 현상으로 인해 발생한다. 이러한 자왜 현상에 대한 연구는 액추에이터나 센서 분야에서 일부 이루어졌지만, 변압기의 기계적 진동과 관련된 연구는 국내외적으로 희박하며, 해석도구도 개발되어 있지 않은 실정이다.

자왜현상에 의한 변압기의 기계적 진동을 해석하기 위해서는 자왜현상에 대한 수학적 모델을 수립하는 것이 첫 번째 단계라고 할 수 있다. 이러한 수학적 모델의 신뢰도는 여러 가지 다른 환경에서 측정된 실험결과를 얼마나 잘 재현하느냐에 따라 결정될 수 있다. 본 논문에서는 소형 변압기의 진동 실험을 통하여 자왜 모델이 변압기의 진동 패턴을 모사하는데 적절함을 확인하였다. 실험에 소형 변압기를 이용한 이유는 첫째, 원전 주 변압기를 실험대상으로 하는 것에 대한 현실적인 어려움이고, 둘째, 변압기는 설계상 철심의 자기장이 포화에 도달하지 않도록 설계되어 있어 154kV, 345kV 등의 고전압에서 원전 주변압기의 철심에 생성되는 자기장과 저전압에서 소형 변압기의 철심에 생성되는 자기장은 큰 차이가 없기 때문이다. 따라서 본 논문에서 사용한 자왜 모델이 원전 주 변압기에 적용되었을 때 적절한 진동 패턴을 예상하는데 도움이 될 수 있을 것이다. 그리고 다양한 입력 조건과 변압기 크기의 변화 등을 고려한 추가적인 실험이 필요할 것이다.

현재 널리 사용되어지고 있는 상용 유한요소 해석 프로그램을 조사한 바로는 전기적 입력에 의한 기계적 변형의 해석이 가능한 경우는 전무한 실태이다. 본 연구에서 사용한 자왜모델은 변압기의 기계적 진동을 최소화하기 위한 해석 및 설계

의 첫 단계로서 전용 해석 프로그램의 기본 모델로 사용될 수 있을 것이다. 기존의 상용 유한요소 해석 프로그램을 사용하고자 한다면 전자기장 해석을 통해 전기적 입력에 따른 변압기 각 부분의 자기장을 결정하고 자왜모델을 통해 기계적 변형을 계산한 다음, 다시 기계적 유한 요소 해석으로 스트레스-스트레인 관계를 결정한 후 이를 다시 전자기장 해석의 입력으로 사용하여 결과가 수렴될 때까지 반복하는 준정적 해석 (Quasi-static analysis) 과정을 이용할 수 있을 것이다.

### 5. 결론

본 논문에서는 변압기 진동의 주원인으로 판단된 자왜 현상을 모델링하고 실험을 통하여 모델을 검증하였다. 현재 개발된 해석 도구 중 전기적 입력에 의한 기계적 변형에 대한 해석 도구의 개발은 전무한 상태이다. 이러한 시점에서 본 논문에서 수립된 자왜 모델은 해석 도구 개발 시 필요한 모델로 사용될 수 있고, 변압기나 자성체를 이용한 액츄에이터 설계 시 진동 저감을 위한 방법이나 변압기 건전성 판단 기준을 수립하는 기초 단계로 사용될 수 있을 것이다.

### 후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 전력산업연구개발사업과 한국 학술진흥재단의 지역우수과학자 사업의 지원을 받아 수행되었다.

### 참고문헌

1. KEPRI, "Development of vibration monitoring technique for nuclear power plant main transformer," Ministry of Commerce, Industry and Energy, KEPRI-NP-2005, pp.28, 2005.
2. Jiles, D. C. and Atherton, D. L., "Theory of ferromagnetic hysteresis(invited)," Journal of Applied Physics, Vol. 55, Issue 6, pp. 2115-2120, 1984.
3. Sablik, M. J. and Jiles, D. C., "Coupled magnetoelastic theory of magnetic and magnetostrictive hysteresis," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 29, No.3, pp. 2113-2123, 1993.
4. Jiles, D. C., "Introduction to Magnetism and Magnetic

- Materials," Chapman and Hall, pp. 120-122, 1998.
5. Dapino, M. J., Smith, R. C. and Flatau, A. B., "An Active and Structural Strain model for Magnetostrictive Transducers," Proceedings of SPIE, Vol. 3329, Pt. 1, pp. 198-209, 1998.