

# 자왜현상에 의한 변압기 진동 해석

\*유승열<sup>1</sup>, 이준신<sup>3</sup>, 이육륜<sup>3</sup>, 노명규<sup>2</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단, <sup>2</sup>충남대학교 메카트로닉스공학과, <sup>3</sup>전력연구원

## Vibration Analysis of Transformer by Magnetostriction

\*S. Y. Yoo<sup>1</sup>, J. S. Lee<sup>3</sup>, U. R. Lee<sup>3</sup>, M. Noh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>BK21 Mechatronics Group at CNU, <sup>2</sup>Mechatronics. Eng. CNU, <sup>3</sup>KEPRI

Key words : Magnetostriction (자왜현상), Hysteresis (히스테리시스), Vibration (진동)

### 1. 서론

원전(원자력 발전소) 주변압기는 발전소에서 생산된 전력을 계통에 공급하는 중요한 기기이다. 그렇기 때문에 높은 신뢰성이 요구되나 고장으로 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 평가에만 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. 주변압기 기계적 고장의 주 원인으로 변압기 진동을 들 수 있는데, 원전 주변압기는 보통의 변압기와는 달리 154kV, 345kV 또는 765kV 의 고전압을 다루기 때문에 다른 변압기와 비교하여 크기가 크다. 그렇기 때문에 진동 역시 크게 되어 고장 원인으로 작용하게 된다.

변압기의 기계적 진동은 그 자체가 비선형성을 띄고 있으며, 자왜 현상에 기인한다. 자왜 현상이란 자성체가 자화될 때 자화와 함께 기계적 변형이 동반되는 것을 의미한다. 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. 자왜 변형은 자화에 의해 발생하므로 자왜 모델은 자화 모델과 밀접한 관계가 있다. 본 연구에서는 Jiles-Atherton 히스테리시스 모델을 사용하였다.

### 2. 자왜 현상의 수학적 모델

#### 2.1 히스테리시스 모델

Jiles-Atherton 의 히스테리시스 모델은 반히스테리시스 모델 (anhysteresis model)로부터 출발한다 [2].

$$M_a = M_s [\coth(H_e / a) - a / H_e] \quad (1)$$

식(1)에서  $M_a$  는 반히스테리시스 자화강도이고,  $M_s$  는 포화 자기장을,  $H_e$  는 유효 자기장을 의미하며  $\mu_0$  는 진공의 투자율이다.  $a$  는 재료의 물리적 특성에 기인한 상수이다. Jiles-Atherton 에 따르면 히스테리시스는 가역적 부분과 비가역적 부분으로 나뉘어지는데 비가역적 히스테리시스는 식(2)와 같이 표현된다.

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{M_a - M_{irr}}{\frac{\delta k}{\mu_0} - \alpha(M_a - M_{irr})} \quad (2)$$

식(2)에서  $\delta$  는 자기장 ( $H$ )이 증가할 때 +1 의 값을 가지며, 감소할 때 -1 의 값을 가지며,  $\alpha$  는 평균 자기장 파라미터이고,  $k$  는 pinning 파라미터로서 상수 값을

가진다. 가역적 히스테리시스 성분은 위에서 정의한 반히스테리시스 곡선과 비가역적 히스테리시스를 이용하여

$$M_{rev} = c(M_a - M_{irr}) \quad (3)$$

와 같이 표현할 수 있고,  $c$  는 초기 자기 민감성의 비율을 나타내며, 초기 자화 곡선의 기울기로부터 구할 수 있다. 식(2)과 (3)를 이용하여 미분 형태로 표현하면 식(4)와 같이 히스테리시스 모델을 기술 할 수 있다.

$$\frac{dM}{dH} = \frac{M_a - M_{irr}}{\frac{\delta k}{\mu_0} - \alpha(M_a - M_{irr})} + c \left( \frac{dM_a}{dH} - \frac{dM_{irr}}{dH} \right) \quad (4)$$

#### 2.2 자왜 모델

자기포화(saturation)에서 자왜 스트레인( $e_{me}$ )은 아래와 같다. [2]

$$e_{me} = -\frac{2b(1+\nu)}{3Y} + \frac{2b(1+\nu)}{3Y} \left\{ 1 - \frac{9Y}{2b^2(1+\nu)^2} (\phi_{mag}(M) - \phi_{mag}(M_s)) \right\}^{1/2} \quad (5)$$

일반적인 자왜 스트레인의 정의는 [2]

$$\frac{3}{2}\lambda = e_{me}(M) - e_{me}^0 \quad (6)$$

이며, 이를 이용하면

$$\frac{3}{2}\lambda = -\frac{2b(1+\nu)}{3Y} \cdot \left[ \left\{ 1 + \frac{9Y\phi_{mag}(M_s)}{2b^2(1+\nu)^2} \right\} - \left\{ 1 + \frac{9Y[\phi_{mag}(M_s) - \phi_{mag}(M)]}{2b^2(1+\nu)^2} \right\}^{1/2} \right] \quad (7)$$

와 같이 자왜 스트레인을 표현할 수 있다. 식(7)에서  $Y$  는 Young 의 계수이며,  $\nu$  는 Poisson 의 비이다. 그리고  $b$  는 등방위 자기커플링 상수이다. 식(7)에서 자기 에너지  $\phi_{mag}$  는 아래와 같다.

$$\phi_{mag}(M) = \frac{1}{2}\alpha\mu_0 M^2 - \alpha_1\mu_0(M_a - M)H + \frac{1}{2}\alpha_2\mu_0(M_a - M)^2 \quad (8)$$

식(8)에서  $\mu_0$  는 진공의 투자율,  $\alpha_1, \alpha_2$  등은 실험적으로 구해지는 파라미터들이다.

### 3. 실험 결과

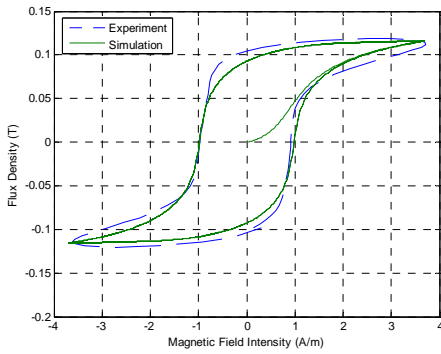


그림.1 자화 곡선

그림 1 은 실험으로부터 구한 자화 곡선과 모델을 비교한 결과이다. 실험은 원전 주변압기의 철심에 사용되는 동일한 재료로 시편을 제작한 후 Flux meter(MD-10)와 전류 센서를 이용하여 측정하였다. 모델에 사용된 파라미터들은 Table.1 에 나타나있다.

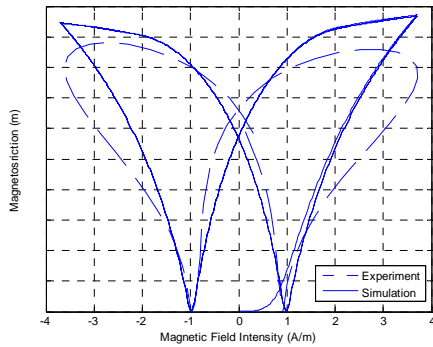


그림.2 자왜 스트레인

그림.2 는 앞서 기술한 자왜 모델과 실험 결과를 비교한 그래프이다. 실험은 변압기로부터 자왜 스트레인을 스트레인 게이지를 이용하여 측정하였다. 자왜 모델에 사용한 파라미터값들은 Table.1 에 나타나있다. 그림.2 에서 볼 수 있는 바와 같이 자왜 모델이 실험결과와 유사한 형태의 변형 특성을 보여준다.

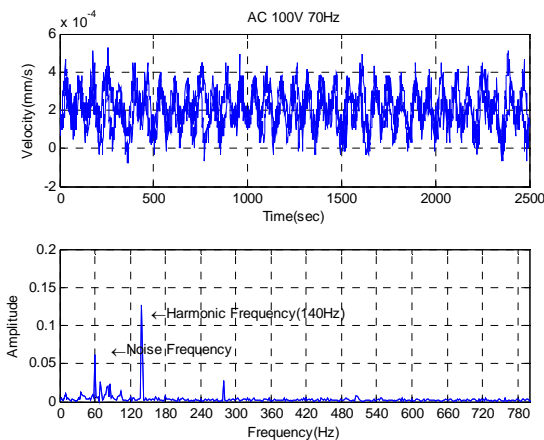


그림.3 100V 70Hz 입력 전압에 대한 진동파형과 FFT 그래프

그림.3 은 변압기의 진동 특성을 측정한 실험결과이다. 실험은 변압기에 70Hz 교류전기를 가진하고 진동을

스트레인 게이지로 측정하였다. 자왜 모델에서 예측할 수 있듯이 입력 주파수의 2X 성분에서 진동을 확인할 수 있었다. 60Hz 의 진동 Peak 는 노이즈에 기인한 것으로 생각된다.

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

### 4. 결론

본 논문에서는 변압기를 대상을 하여 자왜 현상에 의한 진동을 모델링하고 실험을 통하여 모델을 검증하여 보았다. B-H Curve 실험을 통하여 자성체의 성질을 나타내는 가장 중요한 특성 중 하나인 히스테리시스 Curve(B-H Curve)를 측정하여 변압기 Core 의 자기학적 특성을 알아 보았다. 그러한 특성을 기초로 하여 변압기 진동의 원인인 자왜 현상을 예측해 볼 수 있었고, 이론적으로 접근한 자왜 모델을 근거로 히스테리시스 Curve 를 이용하여 자왜 현상을 유추하여 보았다. 수학적 자왜 모사 그래프와 측정 데이터를 기반으로 한 자왜 그래프간의 차이는 파라미터의 정확성의 차이에 따라 발생한 오차로 생각된다. 본문에서 유도된 자왜 모델과 자왜 스트레인 모델을 이용하여 변압기 설계나 자성체를 이용한 액추에이터, 모터 등을 설계할 때 자기학적 진동을 저감시키는 설계가 가능할 것으로 보인다

### 참고문헌

1. D. C. Jiles and D. L. Atherton, "Theory of ferromagnetic hysteresis," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 61, pp. 48-60, 1986.
2. M. J. Sablik and D. C. Jiles, "Coupled magnetoelastic theory of magnetic and magnetostrictive hysteresis," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 29, pp. 2113-2123, 1993.
3. D. C. Jiles, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, Chapman and Hall, 1998.
4. L. Gros.. "Strong Coupling Magneto Mechanical Methods Applied to Model Heavy Magnetostrictive Actuators" *IEEE, Transactions on Magnetics*, Vol. 34 No.5 September 1998
5. C. Body, G. Reyne.. "Nonlinear Finite Element Modelling of Magneto-mechanical Phenomenon in Giant magnetostrictive Thin Films." *IEEE, Transactions on Magnetics* Vol. 33, No.2 march 1997
6. Marcelo J. D and Ralph C. S.. "An Active and Structural Strain model for magnetostrictive Transducers." *SPIE Symposium on Smart Structure and Materials*, Paper #3329-24, 1998