

마이너루프와 자화의존 모델을 이용한 에버렐 함수 생성과 히스테리시스 특성 시뮬레이션

Everett Function Formulation Using Minor Loops and Magnetization-dependent Model and Hysteresis Characteristics Simulation

김형섭* · 홍선기†
(Hyeoung-Seop Kim · Sun-Ki Hong)

Abstract - In hysteresis simulation, the Preisach model is most widely used as the reliability. However, since the first-order transition curves used in the conventional Preisach model are very inconvenient for actual measurement, many researches have been made to simplify them. In this study, the minor loops obtained along the initial magnetization curve are used to obtain the Everett function used in the Preisach model. In other words, The Everett table is constructed by using the minor loops, and are applied to the magnetization dependent Preisach model to reconstruct the Everett table. In order to minimize the error, the spline interpolation method is used to complete the final Everett table and the hysteresis loop simulation is performed with the Everett table. Furthermore, it is applied to the inductor analysis to perform not only sinusoidal wave and square wave drive but also PWM wave drive considering hysteresis. The validity of the proposed method is confirmed by comparison with simulation and experiment.

Key Words : Hysteresis, Magnetization-dependent preisach model, Everett function, Minor loops, Inductor, Inverse preisach model, PWM current waveform

1. 서 론

히스테리시스 현상 해석은 전기기기에서 자성재료가 가지고 있는 자기적 현상을 해석하기 위한 필수적인 부분이다. 이는 일반적인 전기기기 해석에서 철손의 일부가 되기도 하고, 영구자석의 착자과정에 이용될 수도 있으며, 히스테리시스 전동기의 경우는 출력으로 동작하기도 한다. 이러한 히스테리시스 해석은 기기들을 히스테리시스 특성을 정밀하게 해석하는데 기반이 된다. 고전적 프라이자흐 모델은 히스테리시스를 잘 설명할 수 있는 모델로 널리 이용되고 있다. 여기에 일부 모순을 개선하거나, 해석의 편의성을 도모하기 위한 개선된 모델 개발에 많은 연구가 수행되어 왔으며[1,2], 실제 전기기기의 해석 등에 적용하려는 연구도 많이 시도되어 왔다. 다만, 상당수는 이를 적용하지 않고 근사화하여 기기를 해석하거나 설계하고 있는 것이 아직까지의 실정이다. 그 주된 이유는 그 필요성을 알지만, 실제 적용하기에 매우 번거로운 작업들이 수반되기 때문이다. 즉, 기존의 프라이자흐 모델의 경우 우선, 사용하려고 하는 자성재료의 자기적 특성을 측

정하여야 한다. 이를 위해 1차 전이곡선을 측정하여야 하고[3], 이로부터 필요한 프라이자흐 밀도함수나 에버렐 함수를 작성할 수 있게 된다. 실제로 1차 전이곡선을 측정할 수 있는 장비가 보편적이지 않아, 국내에서는 찾아보기도 어렵다. 이 단계를 지나도, 측정된 데이터로부터 계산에 필요한 밀도함수를 만드는 과정 중 측정에서 오는 오차나, 재료의 특성에 따라 고려해야 하는 문제들이 발생하여 실제 적용을 널리 하지 못하고 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 첫 번째 단계로서, 측정하기 어려운 1차 전이곡선을 이용하지 않고, 대부분의 히스테리시스 루프 트레이서가 갖고 있는 기능인 초기자화곡선을 따르는 마이너루프들을 측정하여, 이 루프 데이터로부터 히스테리시스 현상을 시뮬레이션 하는데 필요한 에버렐 함수를 얻는 방법을 제시한다. 실험에서 측정되지 않은 부분이나, 실험 데이터에서 발생할 수 있는 측정 오차를 줄이기 위한 방법으로 선형 보간법 외에 2차원 스플라인을 이용하여, 오차를 최소화한다. 여기서 얻어진 에버렐 함수를 자화의존 프라이자흐 모델을 이용하여 히스테리시스 루프를 시뮬레이션하고 측정된 루프와 재비교하여, 제안된 방법의 실용성과 타당성을 확인한다. 또한, 이 모델을 이용하여 인덕터에 대한 특성을 계산하고 실험치와 비교하여 응용 가능성도 확인한다. 즉, 정현파, 구형파 뿐 아니라 PWM 전압이 인가될 때의 히스테리시스 루프 특성을 적용하여 인덕터에 흐르는 전류 파형을 계산하고 실험과 비교함으로써 제안된 모델링 과정과 응용의 타당성을 확인한다.

† Corresponding Author : Dept. of Digital Control Engineering, Hoseo University, Korea.
E-mail: sunkih4@naver.com

* Dept. of Information Control Engineering, Hoseo University, Korea.

Received : November 1, 2017; Accepted : November 21, 2017

2. 마이너 루프를 이용한 에버렐 함수 구성

2.1 마이너 루프 측정

프라이자흐 모델은 히스테리시스 현상 시뮬레이션을 수행하는데 그림 1(a)와 같은 1차 전이곡선을 실험으로부터 얻고, 이로부터 프라이자흐 함수를 구성하여 히스테리시스 현상을 시뮬레이션할 수 있다. 이러한 전이곡선은 인가 자계 값이 음(-)으로 포화된 상태에서 임의의 값까지 인가 자계 값을 증가시키고 다시 -로 포화하는 과정을 반복하여 측정될 수 있다. 하지만 일반적인 루프 트레이서는 이러한 측정 기능을 가지고 있지 않은 경우가 많으며, 가지고 있다고 하더라도 자속밀도 측정시 드리프트 현상 때문에 세심한 주의를 기하며 측정을 수행하여야만 한다. 이렇게 얻어진 전이곡선 데이터로부터 프라이자흐 밀도함수를 얻어야 하는데, 여기서 발생할 수 있는 작은 측정오차도 실제 밀도함수가 미분 또는 차분을 이용하기 때문에 적지 않은 큰 변화를 갖게 되어 실용적으로 사용하려는데 많은 절차적 노력이 요구된다.

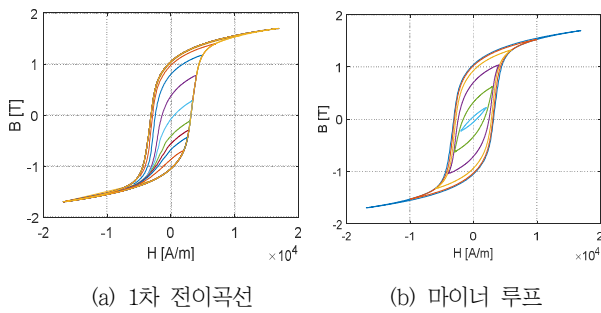


그림 1 1차 전이곡선과 마이너 루프
Fig. 1 1st order transition curves and Minor loops

반면, 그림 1(b)와 같은 마이너 루프 측정은 일반적인 루프 트레이서가 갖고 있는 기능이므로 데이터를 얻는데 크게 어려움은 없다. 이런 마이너루프를 이용하여 프라이자흐 밀도함수나 에버렐 함수를 얻을 수 있다면, 상당한 절차적 어려움을 제거할 수 있고, 실험으로부터 얻는 신뢰할 수 있는 히스테리시스 시뮬레이션이 가능해진다.

2.2 마이너 루프를 이용한 에버렐 테이블 생성

그림 2는 히스테리시스 루프에서, 자계세기 축에 따라 최대 자계를 가했을 때 만들어지는 메이저 루프와, 이보다 작은 대칭 자계를 가했을 때 초기자화곡선 축에 따라 만들어지는 마이너루프들(centered minor loops)을 보이고 있다. 그림 3의 히스테리시스 루프들을 이용하여 에버렐 테이블을 구성할 수 있다. 에버렐 함수 $E(\alpha, \beta)$ 는 식 (1)과 같이 정의된다. 여기서, f_α 는 자계가 음의 포화에서 증가하여 α 까지 증가했을 때 자화 값, $f_{\alpha, \beta}$ 는 α 에서 β 까지 감소했을 때의 자화 값이다.

$$E(\alpha, \beta) = \frac{1}{2}(f_\alpha - f_{\alpha, \beta}) \tag{1}$$

이 정의에 따라, 음의 포화에서 자계가 상승하여 α 까지 상승했을 때 자화 값은 그림 2에서와 같이 $B_{\alpha, s}$ 라고 하면, 에버렐 함수 정의로부터 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$B_{\alpha, s} = -E(H_s, -H_s) + 2E(\alpha, -H_s) \tag{2}$$

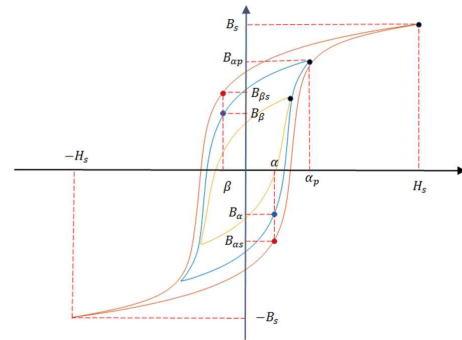


그림 2 히스테리시스 메이저 및 마이너 루프들
Fig. 2 Hysteresis major loops and minor loops

따라서 상승곡선이 만드는 에버렐 함수는 다음과 같다.

$$E(\alpha, -H_s) = \frac{1}{2}(B_s + B_{\alpha, s}) \tag{3}$$

같은 방법으로 자계가 하강시, β 까지 하강했을 때는 같은 방법으로 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$E(H_s, \beta) = \frac{1}{2}(B_s - B_{\beta, s}) \tag{4}$$

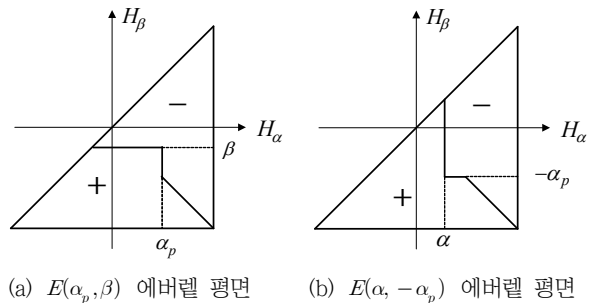


그림 3 그림 2에 대응하는 에버렐 평면 상태
Fig. 3 Everett planes corresponding to Fig. 2

즉, (3), (4)로부터, 포화곡선에 대응하는 에버렐 평면 함수를 구성할 수 있다. 이와 같은 방법으로 내부 마이너루프에 대해서도 식을 유도하면 (5), (6)으로 표현할 수 있다.

$$E(\alpha_p, \beta) = \frac{1}{2}(B_{\alpha_p} - B_\beta) \quad (5)$$

$$E(\alpha, -\alpha_p) = \frac{1}{2}(-B_{\alpha_p} + B_\alpha) \quad (6)$$

그림 3은 이에 대응하는 에버렐 평면의 상태를 보여준다. 이로 부터 메이저 및 마이너루프에 의한 에버렐 테이블을 구성할 수 있게 된다. 이러한 직각삼각형의 에버렐 함수 세밀도는 마이너루프의 개수에 의존하게 된다.

그림 4(a)는 측정된 마이너루프의 예이며, 7개의 마이너루프로 구성되어 있다. 이것을 위 식들에 의해 에버렐 테이블로 구성하면 그림 4(b)처럼 7개의 직각 삼각형의 에버렐 함수 값들로 매칭

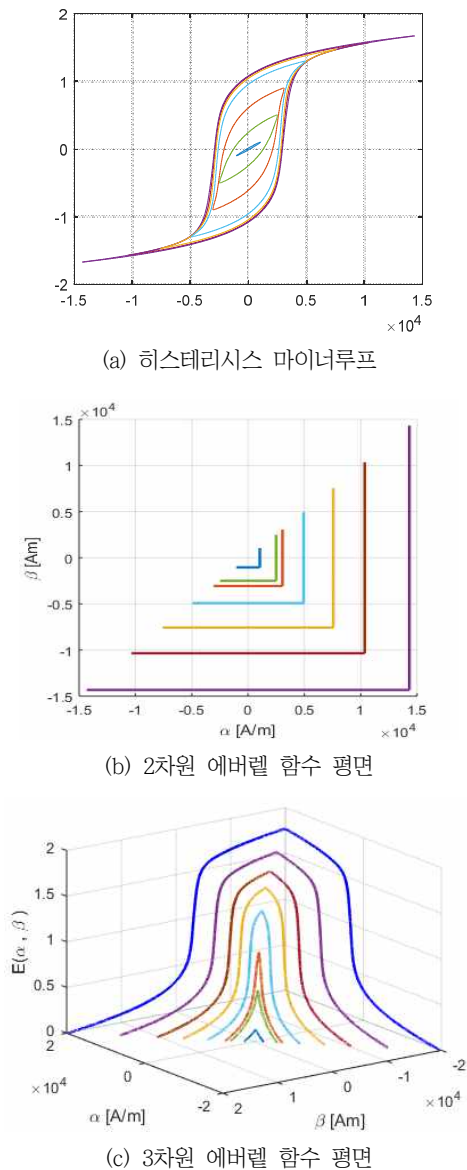


그림 4 히스테리시스 마이너루프와 에버렐 함수 평면
Fig. 4 Hysteresis minor loops and Everett planes

할 수 있다. 이것은 다시 3차원으로 표현하면 그림 4(c)와 같이 표현된다. 측정된 데이터로 전 영역의 값을 구하려면 매우 많은 실험을 해야 하지만, 적절한 개수의 실험과 보간법을 이용하면, 적은 개수의 마이너루프로부터도 적절한 히스테리시스 시뮬레이션이 가능해진다. 이러한 마이너루프는 B-H 트레이서로서는 간단한 측정이 되기 때문에 실용적으로 용이하게 에버렐 테이블 작성 가능해진다.

2.3 보간

그림 4(a)의 실측된 히스테리시스 루프를 2.1절에서의 계산을 통하여 그림 4(b) 또는 그림 4(c)처럼 에버렐 함수를 구할 수 있다. 하지만 이 경우는 측정 루프에 의해 만들어진 데이터가 측정되지 않아 데이터가 없는 부분이 더 많다. 매우 많은 마이너루프를 측정하여 측정 데이터가 충분하다면 문제가 없지만, 대부분의 경우는 그렇지 못하다. 따라서 측정되지 않은 부분의 값을 알 수 없는데, 이런 영역안의 값들은 보간법을 이용하여 추정할 수 있다. 선형 보간은 가장 쉽게 구현할 수 있는 방법이지만 측정된 데이터에 따라 적절치 않을 수 있다. 또 다른 보간 방법으로 측정되지 않은 부분에서 오차를 감소시키기 위하여 2차원 스플라인이 이용될 수 있다. 그림 5는 그림 4에서 만들어진 데이터로부터 자화의존 프라이자흐 모델[4]을 적용한다. 마이너루프의 합동성 모순[4]을 설명하고 해결한 자화의존 모델에서는 아래 식(7)과 같이 자성재료의 자화 상태를 결정하는 것은 인가자계 H_a 만이 아니라 자화값에 비례하는 값 $\zeta \cdot M$ 즉 자화의존 자계와의 합인 전체 자계 H_t 에 의해 결정된다. ζ 는 자화의존 상수이며, 재료에 따라 달라진다.

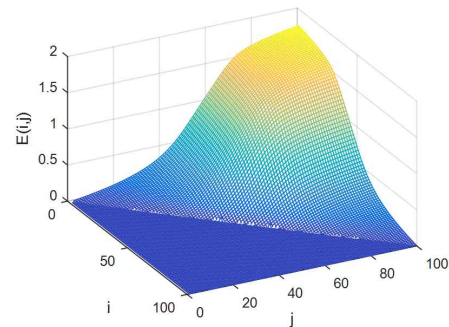


그림 5 전체자계에 대한 에버렐 함수 3차원 도식화
Fig. 5 3-D Everett plane for total magnetic field

$$H_t = H_a + \zeta \cdot M \quad (7)$$

자화의존 상수 $\zeta = 7000$ 인 경우의 값으로 인가 자계 값을 전체 자계 값들을 변환한 후, 에버렐 테이블의 값을 2차원 스플라인하여, 에버렐 함수를 재생성한 것이다. 여기서는 히스테리시스 시뮬레이션 계산의 편의성을 위하여 데이터를 101×101 로 작성하였다. 그림에서 알 수 있듯이 매끈해 보이는 데이터 테이블이 준비되면 히스테리시스 현상을 임의의 자계에 대하여 시뮬레이션 할 수 있게 된다.

3. 히스테리시스 및 인덕터 특성 시뮬레이션

3.1 히스테리시스 시뮬레이션

그림 6은 그림 4의 루프에서 얻어진 에버렛 테이블을 이용하여, 히스테리시스 루프를 시뮬레이션한 결과이다. 앞 내용과 같이 마이너 루프를 사용하여 얻어진 에버렛 테이블을 사용하여 히스테리시스 시뮬레이션을 수행할 수 있으며, 제안된 방법을 이용하면 전이곡선을 구하거나, 많은 수의 마이너루프, 또는 복잡한 수식을 이용하지 않고도 히스테리시스 루프를 비교적 안정적이고 용이하게 모사할 수 있음을 확인할 수 있다. 그림 7은 실측값과 시뮬레이션을 동일 그래프에 나타내 것이다. 실측된 실선 루프는 시뮬레이션된 파선 루프 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 그림 8은 자계를 포화 값으로부터 주기 T 에 대해 지수함수 $e^{-2t/T}$ 로 감소시키면서 자속밀도의 변화를 시뮬레이션한 것이며, 임의의 자계에 대한 자속밀도를 계산할 수 있음을 보이고 있다.

그림 9는 또 다른 시료인 시료2에 대해 마이너 루프를 측정하고 얻어진 에버렛 테이블로부터 계산된 메이저 및 마이너루프를 보이고 있다. 앞의 경우와 마찬가지로, 매우 매끈한 시뮬레이션 결과를 얻었다. 그림 10은 실선인 실측 파형과 파선인 시뮬레이션 루프를 비교한 것이다.

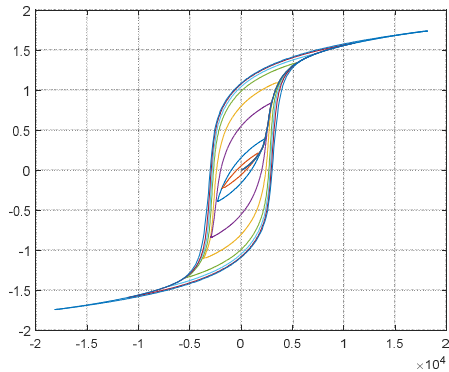


그림 6 자계 크기에 따른 마이너루프 시뮬레이션
Fig. 6 Minor loop simulation for magnetic fields.

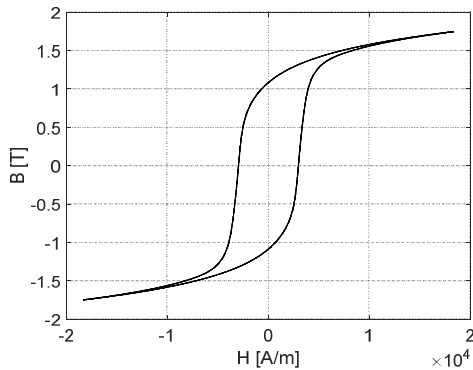


그림 7 실측, 시뮬레이션 메이저 루프 비교
Fig. 7 Comparison of Measured, simulated Major loops.

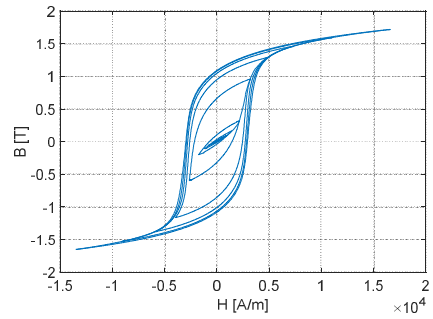


그림 8 감쇄 정현자계 인가시 루프 시뮬레이션
Fig. 8 Loop simulation with attenuated sinusoidal field

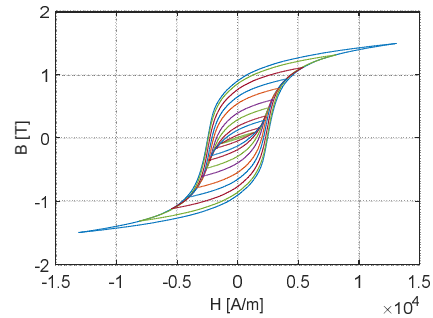


그림 9 자계 크기에 따른 마이너루프 시뮬레이션
Fig. 9 Minor loop simulation for magnetic fields.

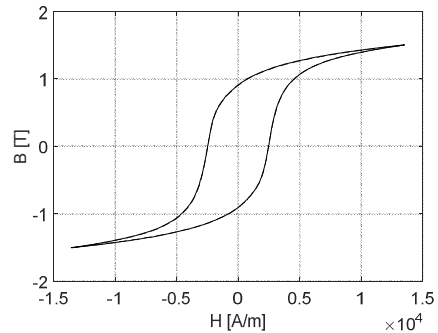


그림 10 측정 및 시뮬레이션 메이저 루프 비교
Fig. 10 Comparison of Measured, simulated Major loops.

위의 시뮬레이션과 실험과의 비교 결과에서 알 수 있듯이 히스테리시스 특성을 계산하기 위해 1차 전이곡선이 아니라 마이너 루프를 측정함으로써 히스테리시스 현상을 정확하고 용이하게 시뮬레이션 할 수 있음을 확인할 수 있다.

3.2 히스테리시스를 고려한 토로이달 인덕터 전류 해석

히스테리시스를 고려한 인덕터에서의 전압-전류 관계에 대한 과도현상 해석은 인가전압 조건에 따라 빠르게 되는 전류 파형을 계산하는 과정이다. 이를 위해서는 다음과 같은 전압 방정식

으로부터 자속의 관계식을 이산적으로 유도함으로써 가능해진다 [5]. 토로이달은 다음과 같은 전압방정식을 세울 수 있다.

$$v_t(t) = r_1 i_1 + N \frac{d\phi}{dt} \tag{8}$$

여기서, v_t 는 인가전압, r_1 은 토로이달 권선 저항, N 은 권선수이다. 식(8)을 자속 ϕ 에 관한 식으로 다시 정리하고 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 이산화 수식을 유도하면 (9), (10)과 같다.

$$\phi = \frac{1}{N} \int (v_t(t) - r_1 i_1(t)) dt \tag{9}$$

$$\phi(k) = \phi(k-1) + \frac{\Delta t}{N} [v_t(k) - r_1 i_1(k-1)] \tag{10}$$

이러한 과정으로 자속을 구하게 되면, 이로부터 철심 단면적으로 나누어 자속밀도를 얻을 수 있으며, 다시 여기서 자계 세기를 역(inverse) 프라이자흐 알고리즘[6]으로부터 구할 수 있게 된다. 이와 같은 알고리즘을 통해, 히스테리시스를 해석할 수 있다면, 변압기나 인덕터의 인가전압에 대한 전류 파형을 계산할 수 있다. 여기에 전압을 인가하고, 이 때 흐르는 전압 파형을 계산하여 전류 파형을 실험치와 비교하여 타당성을 확인한다. 즉, 1차측에 교류 전압을 인가하고, 여기에 흐르는 전류를 측정한다. 보통은 인덕터의 값을 상수로 보고 인덕터의 효과를 고려한다. 이 경우는 코어가 포화되기 전까지는 실제와 유사하지만 포화가 일어나면 큰 차이가 날 수 있다. 이런 부분을 더 고려하여 인덕터 링의 초기자화곡선을 고려해서 전압에 따른 전류를 해석하기도 한다. 하지만, 실제로 히스테리시스가 존재하고, 앞의 두 방법은 정밀한 계산을 하고자 할 때는 모두 실제와 다른 오차를 유발한다.

4. 시뮬레이션 및 실험

검증을 위해 그림 11과 같이 히스테리시스 링에 권선을 하였고, 표 1과 같은 토로이달을 만들어 실험하였다. D_{out} 는 외경,

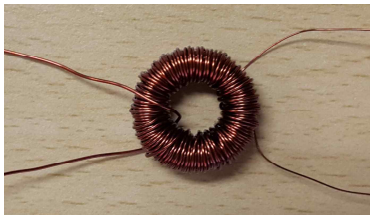


그림 11 히스테리시스 링에 권선한 토로이달
Fig. 11 Toroidal wound on hysteresis ring

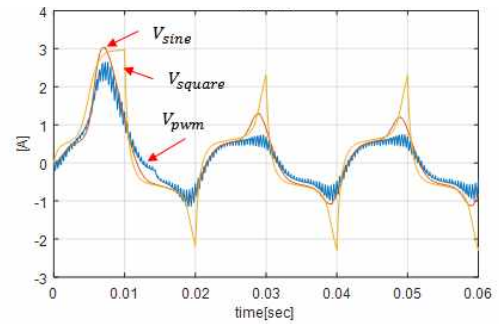
표 1 제작된 토로이달 파라미터
Table 1 Manufactured toroidal parameters

	D_{out}	D_{in}	l_h	N_1/N_2
Dim.	19.9mm	17.6mm	3.96mm	280/50

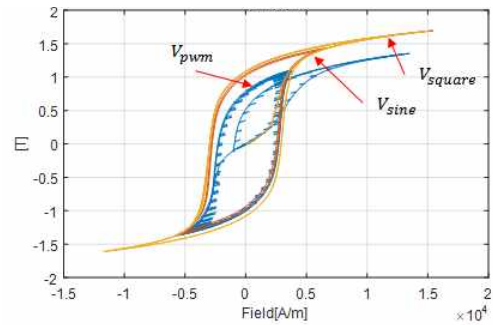
D_{in} 은 내경, l_h 는 링 두께이고, N_1, N_2 는 1, 2차 턴수이다. 안정적 전류 공급을 위해 전압 팔로워 회로를 구성하여 실험했다.

4.1 인가전압 파형에 따른 시뮬레이션 비교

다양한 인가전압의 파형에 따른 전류 등의 파형을 비교한다. 입력전압 파형은 정현파, 구형파 및 PWM 파형을 입력으로 한다. 그림 12(a)는 정현파, 구형파 및 정현파를 기준으로 하는 PWM 전압이 토로이달에 인가되었을 때의 계산된 전류 파형을 보여주고 있다.



(a) 정현파, 구형파, PWM 전압에 대한 전류 파형



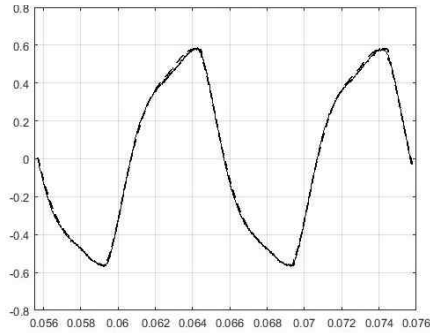
(b) (a)에 해당하는 히스테리시스 루프 파형

그림 12 전압파형에 따른 전류 및 히스테리시스 루프 파형
Fig. 12 Current and hysteresis loops for voltage waveform.

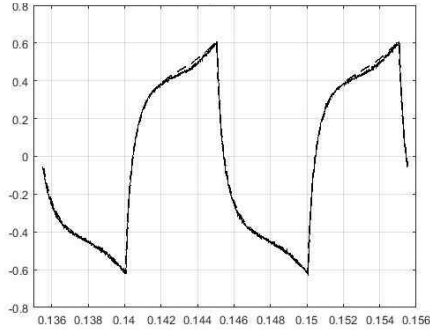
히스테리시스 현상으로 인하여 왜곡되는 파형을 볼 수 있으며, PWM 전압 인가시도 히스테리시스에 의한 전류의 왜곡 파형을 계산할 수 있음을 보여주고 있다. 그림 12(b)는 이 경우에서의 히스테리시스 루프의 변화를 보여준다. PWM의 경우 매우 많은 작은 마이너루프를 그리고 있는데 이는 모두 손실로 작용하게 된다. 주파수 $f = 50\text{Hz}$, $V_m = 0.8\text{V}$ 일 때, 구형파는 V_m or $-V_m$ 이며, 정현파는 $V_m * 4/\pi$, PWM 전압은 $V_m * 4/\pi$ 의 값 및 주파수는 5kHz를 인가하였을 때 결과이다. 정현파 피크값이 $V_p = 1.02\text{V}$ 인 이유는 정현파가 구형파의 기본과 성분과 동일하게 실험을 구성하기 위한 것이다.

4.2 파형 별 시뮬레이션, 실험 데이터 비교

그림 13은 100Hz, $V_p=0.63V$ 의 정현파와 $V_p=0.5V$ 의 구형파 전압이 인가되었을 때 전류 파형을 실험데이터와 시뮬레이션 데이터를 비교하였다. 실선파형이 실험데이터이며, 파선파형이 시뮬레이션 파형이다. 정현파의 경우 히스테리시스 현상에 의해 전류 파형이 왜곡되고 있음을 볼 수 있다. 즉, 좌우대칭으로 만들어지는 포화만 고려한 경우에 비해 상승과 하강시의 파형이 다를 수 있다. 입력 전압이 구형파인 경우는 더욱 이러한 현상이 두드러지게 나타난다. 모두 실험과 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.



(a) 정현파 인가시 전류파형



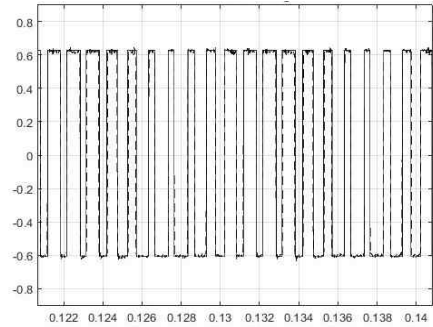
(b) 구형파 인가시 전류파형

그림 13 정현파, 구형파 인가 전압에 따른 전류 파형 비교
Fig. 13 Comparison of current waveform

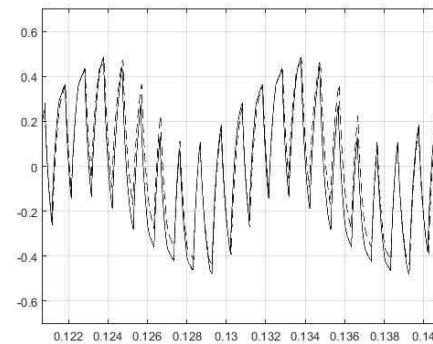
그림 14는 PWM 전압을 인가하였을 때에도 히스테리시스 영향을 고려한 전류파형을 계산할 수 있음을 보이고 있다. 인가전압은 $V_p=0.63V$ 로 그림 13 경우와 동일하며, PWM 주파수는 기본과 100Hz에 대하여 10배, 20배로 비교하였다. 그림 14(a)는 1kHz의 정현파 PWM 전압파형, 그림 14(b)는 이 때의 전류 파형이다. 파선은 시뮬레이션 파형이며, 실선은 실험된 전류의 파형데이터이다. 그림 14(c)는 2kHz 정현파 PWM 전압을 인가하였을 때의 전류파형을 나타내고 있다.

부분적으로 오차가 발생하는 이유는 실험에서 만들어지는

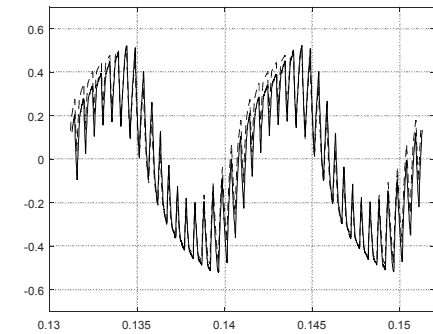
PWM 인가전압 파형이 시뮬레이션 전압파형과 정확히 일치하지 않아 발생하는 것으로 보인다. 하지만, 전반적으로 계산된 전류파형과 실험파형은 비교적 잘 일치한다고 볼 수 있다.



(a) $f_{carr}=1kHz$ 일 때 정현파 PWM 인가전압 파형



(b) $f_{carr}=1kHz$ 일 때 토로이달 전류 파형



(c) $f_{carr}=2kHz$ 일 때 토로이달 전류 파형

그림 14 PWM 인가전압에 따른 전류 파형 비교
Fig. 14 Comparison of current waveform according to PWM applied voltage

5. 결 론

본 논문은 히스테리시스 시뮬레이션을 위하여 가장 널리 이용되고 있는 프라이자흐 모델에서 반드시 필요한 프라이자흐 밀도

함수 또는 에버렐 함수를 구하는데 있어서, 측정하기 어려운 1차 전이곡선을 이용하지 않고 초기자화곡선 측에 따라 얻어지는 마이너 루프들을 이용하여 에버렐 함수 데이터를 얻었다. 또한 계측되지 못한 부분은 측정된 에버렐 함수 데이터를 2차원 스플라인을 이용하여 구하였고, 이를 바탕으로 히스테리시스 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과는 실제 루프와 비교하여 상당히 만족할만 하였으며, 이 과정은 기존 방법보다 신뢰성은 유지하면서 상당히 단순화되어 히스테리시스를 계산할 수 있게 되었다. 응용에 대한 실험적 비교를 위하여 토로이달 인덕터에 적용하였다. 인덕터에서 정현파, 구형파 및 PWM 인가전압에 따른 전류파형과 히스테리시스 루프 시뮬레이션을 진행하며, 실험과 비교하고 그 타당성을 확인하였다. 연구 결과는 히스테리시스 전동기의 정적, 동적 특성을 계산하는데 적용될 수 있을 뿐 아니라, 철심 코어를 사용하는 고정밀 전류 센서에서 히스테리시스를 고려한 해석과 성능향상에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 일반연구지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다(2017R1A2B4008087).

References

[1] S. Bi, F. Wolf, and R. Lerch, "An Inverted Preisach Model With Analytical Weight Function and Its Numerical Discrete Formulation," *IEEE Trans. on Mag.*, Vol. 50, No.11, ASN.7300904, Nov. 2014.

[2] P. Pruksanubal; A. Binner; K. H. Gonschorek, "Determination of distribution functions and parameters for the Preisach hysteresis model", 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 258-261, 2006.

[3] J. Eichler, M. Novak and M. Kosek, "Implementation of the First Order Reversal Curve Method for Identification of Weight Function in Preisach Model for Ferro-magnetic," *ELECTRO*, pp. 602-607, 2016.

[4] F. Vajda, E. Della Torre, "Minor loops in magnetization-dependent Preisach models", *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 28, No. 2, pp. 1245-1248, 1992.

[5] Sun-Ki Hong, Sanghoon Lee and Jungsoo Won, "Simulations of Magnetization-Dependent Hysteresis Model Characteristics", *KIEE*, Vol. 42, No. 6, pp. 9-17, 1993.

[6] Daniele Davino, Alessandro Giustiniani and Ciro Visone, "Fast Inverse Preisach Models in Algorithms for Static and Quasistatic Magnetic-Field Computations", *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 44, Issue 6, pp. 862-865, 2008.

저 자 소 개



김형섭 (Hyeoung-Seop Kim)

2017년 호서대학교 시스템제어공학과 졸업, 2017년~현재 호서대학교 정보제어공학과 대학원 석사과정, 관심분야는 히스테리시스 전동기 해석, 전기기기 해석, 서보기기 제어



홍선기 (Sun-Ki Hong)

1987년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1989년 동 대학원 석사졸업. 1993년 동 대학원 전기공학 박사. 1993~1995 렉스산전(주) 선임연구원, 1995~현재 호서대학교 디지털제어공학과 교수, 관심분야는 히스테리시스 해석, 전기기기 해석, 설계 및 고장진단, 서보기기 제어, 컨버터 및 인버터 설계