

# 토로이달 타입 플라이백 변압기의 누설 인덕턴스 해석

박창수, 강병극, 신경구, 정세교  
경상대학교

## Analysis of Leakage Inductance for Toroidal Type Flyback Transformer

Chang Soo Park, Byeong Geuk Kang, Kyoung Gu Shin, Se Kyo Chung  
Gyeongsang National University

### ABSTRACT

This paper represents an analysis of a leakage inductance for a toroidal type flyback transformer. The equation to calculate the leakage inductance is derived using its MMF diagram. The analysis for the different types of the cores and winding structures is also provided using the Maxwell 3D simulation. The winding structures minimizing the leakage inductance are finally discussed, from the simulation results.

### 1. 서론

플라이백 컨버터는 다른 컨버터에 비해 적은 수의 소자와 간단한 구조를 가지고 있어, 소용량의 DC DC 컨버터에 널리 사용된다. 플라이백 컨버터에 있어서 변압기는 가장 중요한 구성 요소이다. 플라이백 변압기에 필요한 요구 조건으로는 소형화, 경량화 및 저가격화 등이 있고, 누설 인덕턴스의 저감이 변압기의 제작에서 가장 중요한 고려 사항이다. 변압기의 누설 인덕턴스는 스위치의 서지 전압과 컨버터 효율을 저하시키는 원인이 되므로, 변압기의 누설 인덕턴스 최소화를 위한 최적 설계가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 토로이달 페라이트 코어를 사용한 플라이백 변압기의 구성과 해석에 대해 연구하였다. 토로이달 코어는 다른 코어들에 비해 체적을 줄일 수 있는 장점이 있는 반면, 권선을 감는 어려움이 있다. 권선의 교호가 어렵고, 내부 반지름이 외부 반지름보다 작아 코어의 내부와 외부의 권선 간격이 다르기 때문에 권선 배치에 따른 누설 인덕턴스의 해석이 필요하다.<sup>[1]</sup> 따라서 MMF 다이어그램을 통해 변압기의 누설 인덕턴스를 해석하고, Maxwell 3D simulation을 통해 누설 인덕턴스가 최소가 되는 권선 구조에 대해서 설명한다.

### 2. 토로이달 플라이백 변압기의 누설 인덕턴스

#### 2.1 토로이달 타입 변압기의 누설 인덕턴스 해석

그림 1은 토로이달 변압기의 구조와 MMF 다이어그램이다. 그림 1의 토로이달 코어는 1차 권선과 2차 권선으로 감겨져 있으며, 코어를 잘라 원통의 모양으로 보았을 때, 원통의 단면을 MMF 다이어그램으로 나타낼 수 있다.

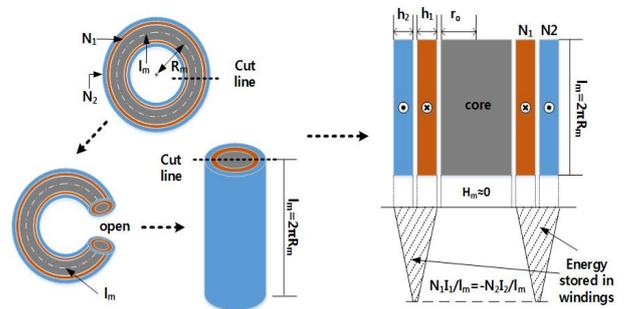


그림 1 토로이달 변압기 구조와 MMF 다이어그램  
Fig. 1 Toroidal transformer structure and MMF diagram

누설 인덕턴스는 권선 사이에 형성되는 MMF로부터 계산된다. 일반적으로 누설 인덕턴스는 식 (1)의 수식으로 정의된다.<sup>[2]</sup>

$$L_{lk} = \frac{2}{3} N_1^2 \pi \mu_0 \frac{1}{l_m} \left[ h_1 \left( r_o + \frac{3}{4} h_1 \right) + h_2 \left( r_o + h_1 + \frac{h_2}{4} \right) \right] \quad (1)$$

여기서  $N_1$ 은 1차 권선의 턴 수,  $\mu_0$ 는 공기중의 투자율,  $h_1, h_2$ 는 1, 2차 권선의 두께,  $l_m$ 은 단면에서 권선의 높이,  $r_o$ 는 코어의 반지름으로 표현된다. 식 (1)을 통해 누설 인덕턴스는 권선의 높이( $l_m$ )에 반비례하고, 권선의 두께( $h$ )에 비례하는 것을 알 수 있다.

#### 2.2 Maxwell 3D simulation 누설인덕턴스 분석

변압기의 누설 인덕턴스는 정자계 해석을 이용한 Maxwell 3D simulation tool을 사용하여 분석이 가능하다.

표 1 시뮬레이션 모델의 파라미터  
Table 1 parameter of simulation model

	단면적(mm <sup>2</sup> )	창면적(mm <sup>2</sup> )	체적(mm <sup>3</sup> )	MLT(mm)
EE core	40.32	139.7	3090	30.3
Toroidal core	40.32	139.7	2494	28.4

표 1은 시뮬레이션에 사용된 코어의 파라미터이다. 코어는 P material의 ferrite 코어로서 약 2500의 투자율을 가진다. 1, 2차 권선의 턴 비는 54 : 9 가 적용되었다. EE 코어와 토로이달 코어는 동일한 용량의 전력에 사용할 수 있도록 코어의 단면적과 창 면적, 권선의 면적과 턴 수를 동일하게 설계하였다.

토로이달 코어는 EE 코어에 비해 체적이 약 20% 감소하고, 턴 당 평균 권선 길이(mean length turn ; MLT)가 감소하므로 코어 손실과 권선 손실을 줄일 수 있다.

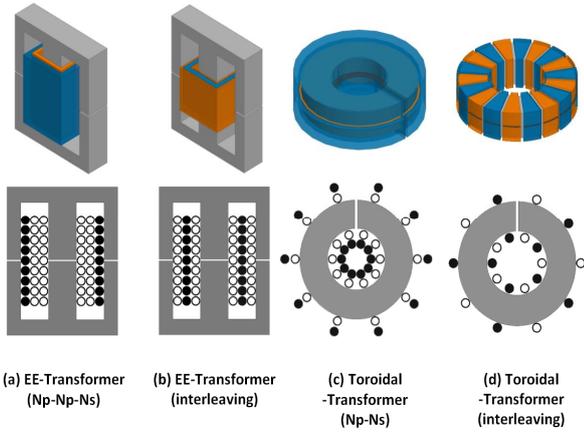


그림 2 EE 변압기와 토로이달 변압기의 권선 구조에 따른 형태  
Fig. 2 The forms of windings structures on EE transformer and toroidal transformer

그림 2는 EE 변압기와 토로이달 변압기의 권선 구조에 따른 형태이다. 그림 2의 (a)는 EE 코어를 이용한 변압기로 1차 권선은 2층의 구조로 되어있고, 그 위에 2차 권선이 감긴 일반적 권선 구조의 형태이다. 그림 2의 (b)는 일반적으로 누설 인덕턴스를 줄이기 위해 사용되는 interleaving 방법을 이용한 모델로써 EE 코어의 변압기에  $N_p N_s N_p$ 의 구조로 되어있다. 그림 2의 (c)는 토로이달 코어를 이용한 변압기로  $N_p N_s$ 의 구조로 감겨있는 형태이며 코어의 표면 전체를 권선으로 감싸고 있다. 그림 2의 (d)는 토로이달 변압기에 interleaving 방법을 이용한 권선 구조이다.

표 2 그림 2 모델의 누설 인덕턴스 시뮬레이션 결과  
Table 2 Result of leakage inductance simulation in Fig.2

(a)	6.23 $\mu\text{H}$	(b)	1.96 $\mu\text{H}$
(c)	1.33 $\mu\text{H}$	(d)	6.22 $\mu\text{H}$

표 2는 그림 2 모델의 누설 인덕턴스 시뮬레이션의 결과이다. 이 결과를 통해 그림 2 (c)의 토로이달 변압기의 누설 인덕턴스가 가장 작고, EE 코어에 interleaving 방법이 적용된 변압기의 누설 인덕턴스와 유사함을 확인할 수 있다. 또한 그림 2 (d)의 토로이달 코어에서 interleaving 권선 구조는 누설 인덕턴스의 감소 효과를 기대할 수 없기 때문에 토로이달 코어에서 적합하지 않은 권선 방법으로 볼 수 있다.

플라이백 컨버터의 경우 일반적으로 2차 권선의 턴 수가 작기 때문에 2차 권선이 1차 권선을 전체적으로 감싸는 것은 어렵다. 따라서 다음 그림 3과 같이 토로이달 코어에 다양한 권선 구조 및 배치에 따른 누설 인덕턴스를 시뮬레이션 하였다.

그림 3의 (a)는 1차 권선과 2차 권선이 코어 표면 전체를 감싸고 있는 형태로  $N_p N_s$ 의 구조를 이룬다. 그림 3의 (b)는 1차 권선으로 코어 표면 전체를 감싸고 2차 권선은 1차 권선의 표면위에 75%, 그림 3의 (c)는 2차 권선이 1차 권선의 50%를 감싸고 있다. 그림 3의 (d)와 (e)는 50%, 75%의 2차 권선을 고르게 감은 구조이며, (f)는 1차 권선과 2차 권선을 서로 겹치지 않고 마주보도록 된 구조이다.

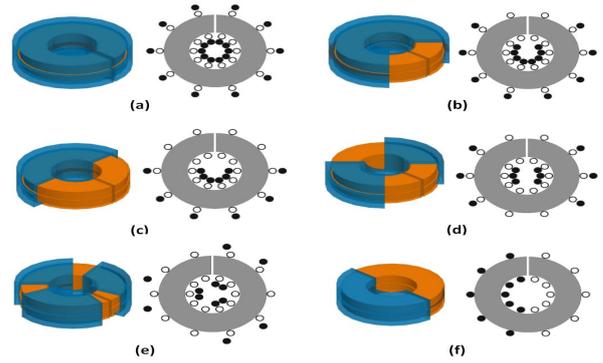


그림 3 토로이달 변압기의 권선 구조에 따른 시뮬레이션 모델  
Fig. 3 Simulation model of the winding structure on toroidal transformer

표 3 그림 3 모델의 누설 인덕턴스 시뮬레이션 결과  
Table 3 Result of leakage inductance simulation in Fig.3

(a)	1.33 $\mu\text{H}$	(b)	5.02 $\mu\text{H}$	(c)	16.25 $\mu\text{H}$
(d)	7.89 $\mu\text{H}$	(e)	2.37 $\mu\text{H}$	(f)	85.60 $\mu\text{H}$

표 3은 그림 3 모델의 누설 인덕턴스 시뮬레이션 결과이다. 이 결과를 통해 토로이달 코어를 이용한 변압기에서는 2차 권선과 1차 권선이 맞닿는 면적이 넓을수록, 권선이 코어에 고르게 감겨있을 때 누설 인덕턴스가 작다는 것을 확인할 수 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 토로이달 타입의 코어를 사용하여 플라이백 컨버터의 변압기를 구성하였다. 변압기에서 발생하는 누설 인덕턴스를 해석하고, 누설 인덕턴스를 줄이기 위한 권선 구조에 대해 시뮬레이션을 수행하여 분석하였다. 토로이달 코어를 이용한 변압기 권선 방법에서는 일반적으로 사용되는 interleaving 권선 방법이 효과적이지 않다는 것을 확인하였다. 또한 2차 권선이 1차 권선에 최대한 고르고, 맞닿는 면적이 넓을수록 누설 인덕턴스를 줄일 수 있다는 것을 검증하였다. 향후, 이 결과를 기반으로 PCB 패턴의 권선을 사용하여, 토로이달 타입 플라이백 변압기의 실험 및 연구 개발이 진행 될 것이다.

### 참고 문헌

- [1] R. Prieto, V. Bataller, J. A. Cobos, and J. Uceda, "Influence of the winding strategy in toroidal transformers," in Proc. IEEE 24th Annu. Conf. Ind. Electron. Soc., Sep. 1998, vol. 1, pp. 359-364.
- [2] A. DAUHJRE and R. D. MIDDLEBROOK, "Modeling and Estimation of Leakage Phenomena in Magnetic Circuits," IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1986 Record, pp. 213-226.
- [3] J. Wang, A. F. Witulski, J. L. Wollin, T. K. Phelps, and G. I. Cardwell, "Derivation, calculation and measurement of parameters for a multiwinding transformer electrical model," in Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo., 1999, pp. 220-226.