

토로이달 타입 플라이백 변압기의 누설 인덕턴스 해석

박창수¹, 강병극¹, 신경구¹, 정세교[†]

Analysis of Leakage Inductance for Toroidal Type Flyback Transformer

Chang-Soo Park¹, Byeong-Geuk Kang¹, Kyoung-Gu Shin¹, and Se-Kyo Chung[†]

Abstract - This paper presents an analysis of a leakage inductance for a toroidal type flyback transformer. The equation to calculate the leakage inductance is derived using the MMF diagram of the transformer. The analysis for the different types of the cores and winding structures is also provided using the FEM simulation. The winding structures minimizing the leakage inductance are finally discussed from the simulation and experimental results.

Keywords: toroidal type transformer, flyback converter, leakage inductance, FEM simulation

1. 서 론

플라이백 컨버터는 구조가 간단하고 적은 부품 수로 다수의 출력이 가능한 장점으로 인해 150W 이하의 전원장치에 널리 사용된다. 플라이백 컨버터에서 변압기는 가장 중요한 구성요소로 일반 변압기와 달리 일, 이차 전류가 동시에 흐르지 않고 결합 인덕터의 특성을 가진다.^[1]

플라이백 컨버터에서 변압기는 가장 큰 부피를 차지하며, 코어 손실은 변압기의 체적에 비례한다. 또한 변압기에서 발생하는 누설 인덕턴스는 스위치의 턴 오프 시 스위치 양단에 높은 전압 스트레스를 야기한다. 이로 인해 고사양의 스위치가 필요하며, 이러한 전압 스트레스를 줄이려면 클램프에서의 손실이 커지게 된다. 따라서 변압기의 소형화와 누설 인덕턴스의 저감은 플라이백 변압기의 설계에서 가장 중요한 고려사항이 된다.

토로이달 코어는 다른 형상의 코어에 비해 전력 밀도가 높고 누설 인덕턴스가 작다는 장점이 있다. 따라서 코어 측면에서 플라이백 컨버터에 적합하다고 볼 수 있으나, 권선 방법이 다른 형상의 코어에 비해 어렵다는

단점이 있다. 또한 권선 방법에 따라 변압기의 누설 인덕턴스가 달라진다. 따라서 토로이달 타입 플라이백 변압기의 효과적인 설계를 위해서는 권선 구조에 따른 누설 인덕턴스 해석이 필요하다.^{[2],[3]}

토로이달 코어에는 페라이트 또는 MPP, High flux 코어와 같은 iron powder 계열의 재질이 사용되며, iron powder 계열의 코어는 페라이트에 비해 코어 손실이 크므로 DCM 플라이백과 같이 교류 자속의 변화가 큰 경우에는 적합하지 않다.

따라서 본 논문에서는 공극을 가지는 페라이트 재질의 토로이달 코어를 사용한 플라이백 변압기의 특성을 분석하였다. 먼저 MMF 다이어그램을 이용한 누설 인덕턴스 식을 유도하고, 시뮬레이션과 실험을 통해 이를 검증하였다. 또한 다양한 권선 구조에 대한 누설 인덕턴스 해석을 통해 누설 인덕턴스를 최소화 할 수 있는 권선 방법에 대해 검토하였다.

2. 토로이달 변압기의 누설 인덕턴스 해석

2.1 MMF 다이어그램을 이용한 누설 인덕턴스 계산

그림 1은 토로이달 코어를 사용한 변압기의 구조와 MMF 다이어그램을 나타낸다. 그림 1(a)는 토로이달 변압기의 구조로 코어 표면 전체에 1차 권선과 2차 권선으로 고르게 감겨져 있으며, 그림 1(b)와 같이 면(surface) 권선을 이용한 간략화 된 변압기 모델로 나타낼 수 있다. 그림 1(c)는 변압기의 단면을 잘라 펼친 직육면체 형태의 변압기 구조를 얻는 과정을 나타낸다. 그림 1(d)는 그림 1(c)의 변압기 구조를 MMF 다이어그램

Paper number: TKPE-2014-19-2-9

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: skchung@gnu.ac.kr, Dept. of Control and Instrumentation Eng., Gyeongsang National University
Tel: +82-55-772-1744 Fax: +82-55-772-1749

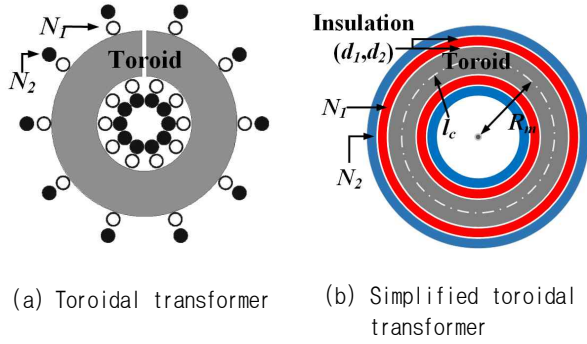
¹ Dept. of Control and Instrumentation Eng., Gyeongsang National University

Manuscript received Oct. 14, 2013; accepted Feb. 5, 2014

— 본 논문은 2013년 전력전자학술대회 외부장학금 수혜논문임

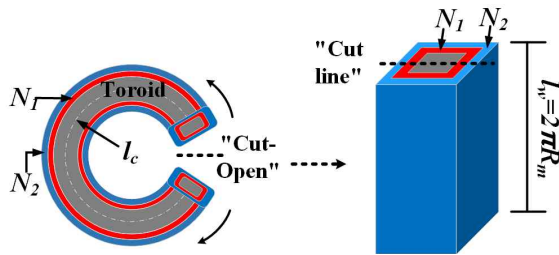
으로 나타낸다.

여기서 N_1, N_2 는 1, 2차 권선의 턴 수, I_1, I_2 는 1, 2차 권선에 흐르는 전류, d_1, d_2 는 절연 거리, h_1, h_2 는 1, 2차 권선의 두께, l_c 는 코어의 평균 둘레거리, l_w 는 단면에서 권선의 높이, r_o 는 코어의 반지름, μ_0 는 공기 중의 투자율이다.

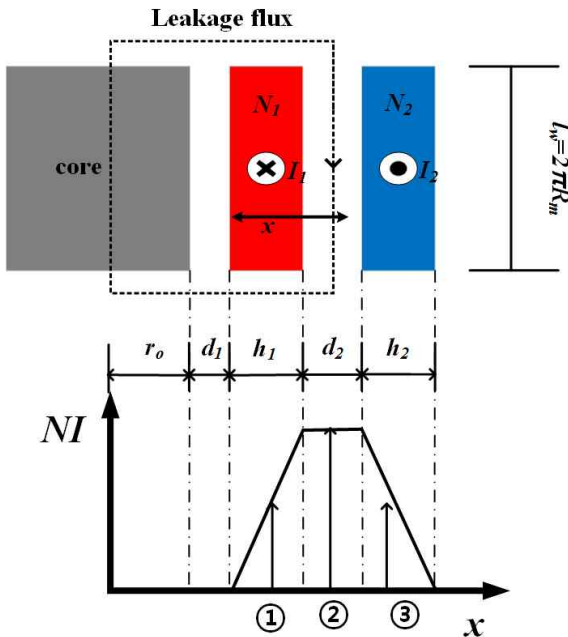


(a) Toroidal transformer

(b) Simplified toroidal transformer



(c) Process of obtaining the MMF diagram



(d) MMF diagram

Fig. 1 Structure of toroidal transformer and MMF diagram

그림 1(d)로부터 변압기의 1, 2차 권선 사이에 저장된 에너지는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.^{[4],[5],[6]}

$$W = \frac{1}{2} L_{lk} I_1^2 = \frac{1}{2} \mu_0 \int_v H^2 dv \quad (1)$$

식 (1)로 부터 변압기의 누설 인덕턴스(L_{lk})는 식 (2)와 같이 계산된다.

$$L_{lk} = \frac{\mu_0}{I_1^2} \int_v H^2 dv \quad (2)$$

여기서 H 는 1, 2차 권선 사이의 자기장의 세기로, MMF 다이어그램을 통해 권선 사이 각 구간에 따른 H 는 암페어 법칙에 의해 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$H = \begin{cases} \frac{N_1 I_1}{l_w} \left(\frac{x}{h_1} \right) & \text{for } 0 < x < h_1 \\ \frac{N_1 I_1}{l_w} & \text{for } h_1 < x < h_1 + d_2 \\ \frac{N_1 I_1}{l_w} \left(\frac{h_1 + d_2 + h_2 - x}{h_2} \right) & \text{for } h_1 + d_2 < x < h_1 + d_2 + h_2 \end{cases} \quad (3)$$

식 (1) ~ (3)으로부터 토로이달 변압기의 누설 인덕턴스를 유도하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{lk} = \frac{8\mu_0 N_1^2}{3l_w} \left[h_1 \left(r_o + d_1 + \frac{3}{4} h_1 \right) + 3d_2 \left(r_o + d_1 + h_1 + \frac{1}{2} d_2 \right) + h_2 \left(r_o + d_1 + h_1 + d_2 + \frac{1}{4} h_2 \right) \right] \quad (4)$$

식 (4)를 통해 토로이달 변압기의 누설 인덕턴스는 권선의 높이(l_w)에 반비례하고, 권선의 두께(h)와 절연 거리(d)에 비례하며, 1차 권선의 턴 수(N_1)의 제곱에 비례함을 알 수 있다. 따라서 누설 인덕턴스를 최소화하기 위해서는 1차 권선의 턴 수(N_1)를 최소화하고, 권선의 높이(l_w)를 크게, 권선의 두께(h_1, h_2)와 절연 거리(d_1, d_2)를 작게 해야 함을 알 수 있다.

2.2 토로이달 변압기의 누설 인덕턴스 시뮬레이션

유도된 누설 인덕턴스 수식의 검증을 위하여 Maxwell 3D simulation을 사용하여 수행하였다. 시뮬레이션은 코어의 투자율이 일정한 100kHz 영역에서 측정되었다.

그림 2는 시뮬레이션에 사용된 페라이트 토로이달 코

Table 1 Parameters of toroidal transformer

Parameter	Value	Parameter	Value
A_c [mm ²]	40.32	Permeability	2500
W_a [mm ²]	139.7	Turn ratio	54 : 9
V_e [mm ³]	2494	N_p diameter [mm]	0.45
MLT [mm]	28.4	N_s diameter [mm]	1.1

Table 2 Comparison of calculation and simulation results

	Calculation	Simulation
Magnetizing inductance	378.83 [uH]	380.88 [uH]
Coupling coefficient	0.9984	0.9982
Leakage inductance	1.21 [uH]	1.33 [uH]

어를 사용한 변압기의 형상과 단면을 나타낸다. 표 1은 변압기의 파라미터이다. 표 2는 그림 2 토로이달 변압기의 자화 인덕턴스(L_m), 결합계수(k), 누설 인덕턴스(L_{lk})의 계산 결과와 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 표 2에서 식 (4)를 이용한 누설 인덕턴스 계산 결과와 시뮬레이션 결과가 10%이내의 오차를 가짐을 알 수 있다.

2.3 EE 변압기와 토로이달 변압기의 비교 분석

토로이달 타입 변압기의 체적 및 누설 인덕턴스 저감 효과를 검증하기 위해 동일한 $W_a A_c$ 값을 가지는 EE 변압기와 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

표 3은 플라이백 변압기에 사용된 EE 코어와 토로이달 코어의 파라미터이다. 두 코어는 동일한 페라이트 코어으로써, 약 2500의 투자율을 가진다. 동일한 용량의 두 코어를 비교해 보면, 토로이달 코어는 EE 코어에 비해 체적이 약 20% 작고, 턴 당 평균 권선 길이(mean length turn ; MLT)가 작으므로 코어 손실과 권선 손실을 감소시킬 수 있다.^[7]

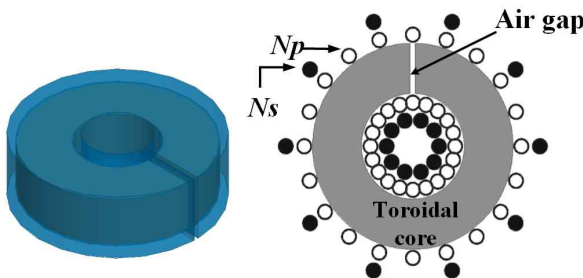


Fig. 2 Toroidal transformer

Table 3 Comparison of EE and toroidal core parameters

	A_c [mm ²]	W_a [mm ²]	V_e [mm ³]	MLT [mm]
EE core	40.32	139.7	3090	30.3
Toroidal core	40.32	139.7	2494	28.4

Table 4 Simulation results for EE and toroidal transformers

Transformer	L_m [uH]	k	L_{lk} [uH]
(a) EE ($N_p-N_p-N_s$)	378.37	0.9915	6.43
(b) EE-interleaved ($N_p-N_s-N_p$)	380.18	0.9973	2.05
(c) Toroidal (N_p-N_s)	380.88	0.9982	1.33

그림 3은 시뮬레이션에 사용된 EE 변압기와 토로이달 변압기의 형태와 권선 구조를 나타낸다. 그림 3(a)는 EE 코어에 1차-1차-2차($N_p-N_p-N_s$)의 권선 구조로 구성된 변압기이다. 그림 3(b)는 EE 코어에 누설 인덕턴스의 감소를 위해 일반적으로 사용되는 interleaved 권선 방법을 적용한 변압기를 나타내며, 1차-2차-1차($N_p-N_s-N_p$)의 권선 구조이다. 그림 3(c)는 토로이달

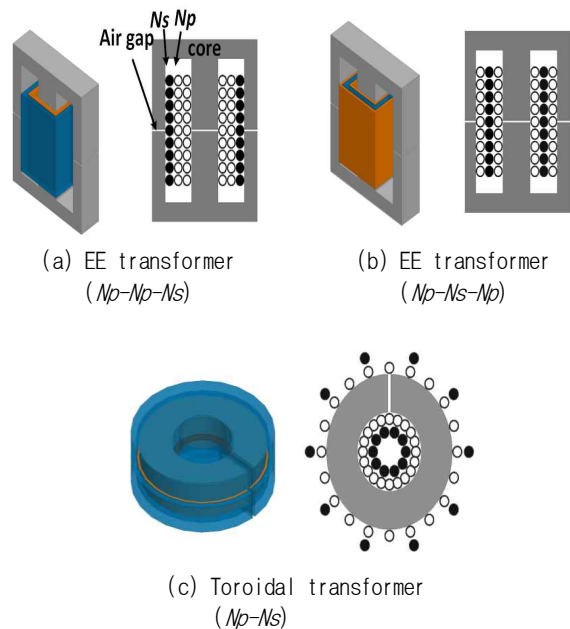


Fig. 3 Windings structures of EE and toroidal transformers

코어 표면 전체에 권선이 고르게 감겨있으며 1차-2차 (N_p-N_s)의 권선 구조를 가진다. 각 변압기의 턴 비는 54:9로 동일하다.

표 4는 그림 3의 각 변압기의 자화 인덕턴스, 결합계수, 누설 인덕턴스의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 이 결과를 통해 1, 2차의 권선의 높이(l_w)가 같을 경우, 토로이달 변압기의 누설 인덕턴스가 가장 작음을 알 수 있다. 토로이달 변압기는 l_w 가 EE 변압기에 비해 3배 이상 크고, 일반적으로 보빈을 사용하지 않기 때문에 d_i 가 매우 적어 EE 변압기 보다 누설 인덕턴스가 매우 작음을 알 수 있다. 따라서 토로이달 코어를 사용한 변압기가 플라이백 변압기에 적용되기에 더 효과적이라고 볼 수 있다.

3. 권선 방법에 따른 누설 인덕턴스 해석

3.1 권선의 면적에 따른 누설 인덕턴스 분석

이 장에서는 토로이달 변압기에서 권선 방법에 따른 누설 인덕턴스 변화에 대한 분석을 수행하였다.

그림 4는 토로이달 변압기에서 코어에 대한 권선 면적이 다른 경우에 대한 변압기 형상과 권선 구조를 나타낸다. 그림 4(a)는 1, 2차 권선이 코어 표면의 전체를 감싸고 있는 경우이며, (b), (c), (d)는 1, 2차 권선이 각각 코어의 75%, 50%, 25%의 면적을 감싸고 있는 경우이다. 각 변압기의 턴 비는 54:9로 동일하다.

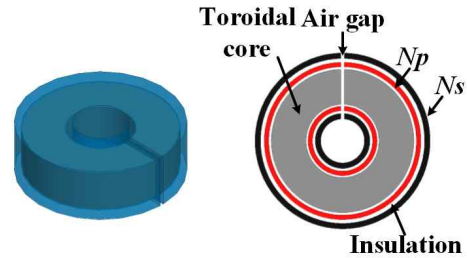
표 5는 그림 4의 각 변압기에 대한 자화 인덕턴스, 결합계수, 누설 인덕턴스의 계산 결과와 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 각 변압기의 시뮬레이션 결과와 식 (4)을 이용한 누설 인덕턴스 계산 값이 유사함을 확인할 수 있다. 그림 5는 표 5의 결과에서 코어의 평균 둘레 길이 (l_c)에 대한 권선의 높이(l_w)의 비에 대한 누설 인덕턴스 계산값과 시뮬레이션 결과값을 그래프로 나타내었다. 이 결과를 통해 권선의 높이(l_w)가 감소함에 따라 이에 반비례하여 누설 인덕턴스가 증가함을 알 수 있다. 따라서 토로이달 코어를 사용한 변압기에서는 코어의 둘레길이 가 타 코어에 비해 길고, 둘레 길이만큼 권선을 감을 수 있다는 장점을 이용해 최대한 코어의 표면을 감싸도록 권선을 감는 것이 누설 인덕턴스를 최소화하기 위한 방법으로 볼 수 있다.

3.2 2차 권선의 면적에 따른 누설 인덕턴스 분석

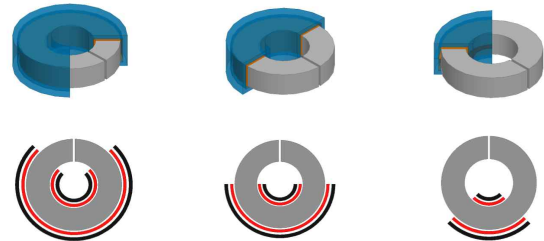
그림 6은 1차 권선으로 코어 표면 전체를 감싸고, 2차 권선의 면적이 다른 경우 변압기의 형태와 권선 구조를 나타낸 것이다. 그림 6(a)는 1, 2차 권선의 면적이 같을 경우이며, (b), (c), (d)는 각각 1차 권선으로 코어 표면 전체를 감싸고, 2차 권선으로 1차 권선의 75%, 50%, 25%의 면적을 감싸고 있는 경우를 나타낸다. 각 변압기의 턴 비는 54:9로 동일하다.

Table 5 Comparison of calculation and simulation results for Fig. 4

Transformer	Calculation			Simulation		
	L_m [uH]	k	L_{lk} [uH]	L_m [uH]	k	L_{lk} [uH]
(a) N_p, N_s - 100%	378.83	0.9984	1.22	380.88	0.9982	1.33
(b) N_p, N_s - 75%	378.83	0.9979	1.63	383.36	0.9976	1.77
(c) N_p, N_s - 50%	378.83	0.9968	2.44	380.30	0.9965	2.68
(d) N_p, N_s - 25%	378.83	0.9936	4.89	380.88	0.9932	5.1



(a) $N_p=100\%, N_s=100\%$



(b) $N_p, N_s=75\%$

(c) $N_p, N_s=50\%$

(d) $N_p, N_s=25\%$

Fig. 4 Toroidal transformers with different winding areas

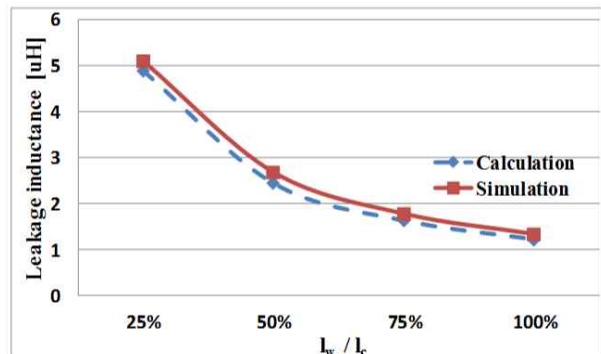


Fig. 5 Leakage inductances for transformers with different winding areas

Table 6 Simulation results for Fig. 6

Transformer	L_m [uH]	k	L_{lk} [uH]
(a) N_p -100%, N_s -100%	380.88	0.9982	1.33
(b) N_p -100%, N_s -75%	382.87	0.9934	5.02
(c) N_p -100%, N_s -50%	377.88	0.9783	16.25
(d) N_p -100%, N_s -25%	377.88	0.9513	35.95

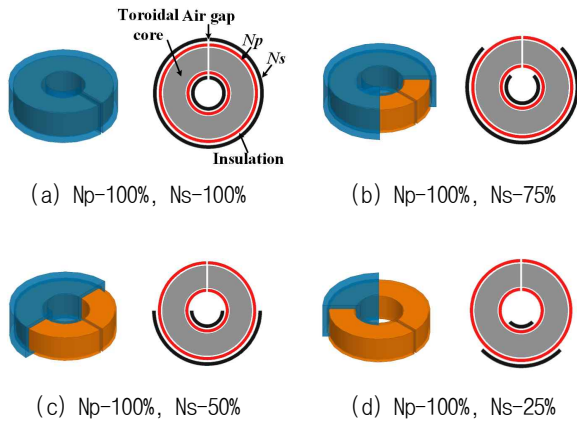


Fig. 6 Toroidal transformers with different N_s winding areas

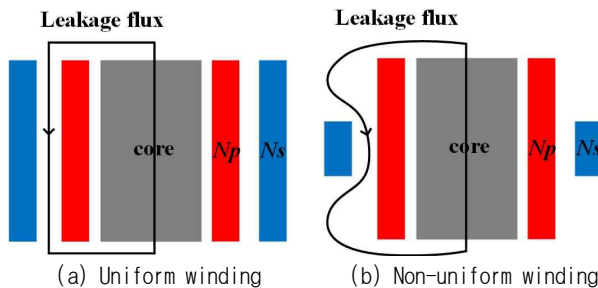


Fig. 7 Leakage fluxes for uniform and non-uniform windings

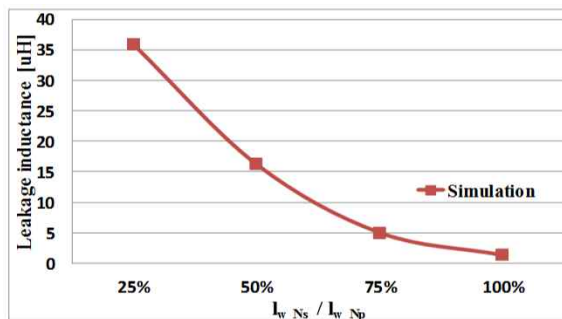


Fig. 8 Leakage inductances for transformers with different N_s winding areas

그림 7은 토로이달 변압기의 1, 2차 권선의 면적에 따른 누설 자속의 분포를 간략하게 나타낸 그림이다. 그림 7(a)와 같이 1, 2차 권선의 높이(I_w)가 동일한 경우의 누설 자속은 대부분 1, 2차 권선 사이에 균일하게 흐른다. 하지만 그림 7(b)와 같이 1, 2차 권선의 높이가 다른 경우의 누설 자속은 권선 사이에 균일하게 흐르지 않고, 방사형(radial) 누설 자속 성분이 발생한다. 이러한 경우의 누설 인덕턴스는 식 (4)를 직접 적용하기가 어렵다.^[1] 따라서 시뮬레이션을 통해 2차 권선의 면적에 따른 누설 인덕턴스의 경향을 분석하였다.

표 6은 그림 6의 각 변압기에 대한 자화 인덕턴스, 결합계수, 누설 인덕턴스의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 8은 표 6의 결과에서 누설 인덕턴스 시뮬레이션 결과를 나타낸 그래프이며, 1차 권선의 높이($I_{w,Np}$)에 대한 2차 권선의 높이($I_{w,Ns}$)의 비로 나타내었다. 토로이달 변압기의 누설 인덕턴스는 2차 권선이 1차 권선을 감싸는 면적이 감소할수록 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 1, 2차 권선의 높이(I_w)의 차이가 클수록 방사형 누설 자속성분이 급격히 커지게 된다. 따라서 1, 2차 권선의 높이(I_w)를 최대한 동일하게 하는 경우의 누설 인덕턴스가 최소가 되는 방법으로 볼 수 있다.

3.3 2차 권선 분포에 따른 누설 인덕턴스 분석

앞서 설명한 바와 같이 1, 2차 권선의 높이가 다른 경우 방사형 누설 자속 성분에 의해 누설 인덕턴스는 매우 커지게 된다. 이러한 변압기 권선 구조에서는 2차 권선의 분산을 통해 누설 인덕턴스를 줄이는 것이 가능하다.

그림 9는 그림 6(b), (c)의 권선 구조에서 2차 권선을 1차 권선의 위에 고르게 분산시켰을 경우에 대한 변압기 형상과 권선 구조를 나타낸다. 그림 9(a)와 (c)는 1차 권선으로 코어 표면 전체를 감싸고, 2차 권선으로 1차 권선위에 각각 75%, 50%의 면적을 감싸고 있다.

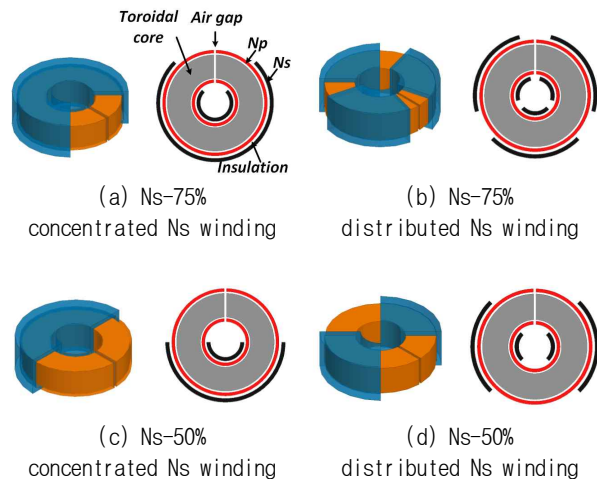


Fig. 9 Toroidal transformers with different N_s windings

Table 7 Leakage inductances for transformers with different N_s windings

N_s winding		Leakage inductance [uH]	Reduction [%]
75%	(a)	5.02	-
	(b)	2.37	52.9
50%	(c)	16.26	-
	(d)	7.89	51.5

Table 8 Parameters of experimental toroidal transformer

Parameter	Value
Core	Ferroxcube TN 26/15/11-157
Permeability	2300
Turn ratio	48 : 8
N_p wire	Litz wire 0.1*30
N_s wire	Litz wire 0.1*50

그림 9(b), (d)는 1차 권선을 코어의 표면 전체에 감싸며, 2차 권선을 1차 권선의 위에 75%, 50%의 면적으로 고르게 분산하여 감싸고 있는 권선 구조를 나타낸다. 각 변압기의 턴 비는 54:9이며, 자화 인덕턴스는 380uH로 동일하다.

표 7은 그림 9에 대한 누설 인덕턴스 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 시뮬레이션 결과에서 2차 권선의 면적이 동일하지만, 권선을 고르게 분산시켜 감은 경우에 누설 인덕턴스가 약 50%이상 감소하는 것을 확인할 수 있다. 2차 권선을 고르게 감았을 경우 y축(radial)에 대한 MMF를 감소시켜 interleaved 권선 효과를 가져온다.^{[4],[8]} 따라서 2차 권선이 1차 권선을 감싸는 면적이 적을 경우에, 2차 권선을 분산하여 감는 것이 효과적인 권선 방법으로 볼 수 있다.

4. 측정 및 실험

4.1 누설 인덕턴스 측정

수식과 시뮬레이션을 통해 분석한 토로이달 변압기의 여러 권선 방법에 따른 누설 인덕턴스의 경향을 검증하기 위하여 실제 변압기를 구성하여 측정 결과를 비교 분석한다. 표 8은 실험에 사용된 변압기의 파라미터를 나타낸다. 변압기는 50W급 DCM 플라이백 컨버터에 적용되도록 설계되었다. 변압기의 코어는 공극이 있는 토로이달 페라이트 코어가 사용되었고, 권선은 표피효과를 줄이기 위해 Litz wire를 사용하였다. 실험은 코어의 투자율이 일정한 100kHz 영역에서 측정되었다.

Table 9 Comparison of calculation, simulation, measurement results for L_m , k, L_{lk} of toroidal transformer

	L_m [uH]	k	L_{lk} [uH]
Calculation	376.96	0.9985	1.16
Simulation	374.65	0.9981	1.35
Measurement	377.3	0.9967	2.47

Table 10 Measured L_m , k, L_{lk} for transformers with different windings

Winding	L_m [uH]	k	L_{lk} [uH]
N_p, N_s - 100%	377.3	0.9967	2.47
N_p, N_s - 75%	380.1	0.9947	4.05
N_p, N_s - 50%	379.8	0.9927	5.61
N_p - 100%, N_s - 75% (concentrated)	383.6	0.9913	6.8
N_p - 100%, N_s - 50% (concentrated)	382.4	0.98	15.8
N_p - 100%, N_s - 75% (distributed)	381.7	0.9951	3.8
N_p - 100%, N_s - 50% (distributed)	380.3	0.9898	7.91

그림 10은 1, 2차 권선이 코어 표면 전체를 감싸고 있는 경우에 대한 실제 제작된 변압기를 나타낸다. 2차 권선으로 1차 권선을 최대한 감싸기 위하여 Litz wire 0.1*50을 3가닥 병렬로 연결하여 1, 2차 권선의 높이(l_w)를 최대한 동일하도록 하였다. 표 9는 그림 10의 변압기에 대한 자화 인덕턴스, 결합계수, 누설 인덕턴스의 계산값, 시뮬레이션 결과, 측정값의 비교를 나타낸다.

표 9의 결과에서 실제 변압기의 누설 인덕턴스 측정값이 계산과 시뮬레이션 결과에 비해 큰 값을 가진다. 계산과 시뮬레이션 과정에서는 누설 인덕턴스의 해석이 용이하도록 면(surface)권선 형태의 간략화 된 형태로



Fig. 10 Experimental toroidal transformer

Table 11 Parameters of experimental flyback circuit

Parameter	Value	Parameter	Value
Operation Mode	DCM	Turn Ratio	6 : 1
Input Voltage	400 [V]	Magnetizing inductance	380 [uH]
Output Voltage	15 [V]	Clamp Capacitor	50 [nF]
Output Power	50 [W]	Clamp Resistance	20 [kΩ]
Frequency	100 [kHz]	MOSFET	IPP90R800C3
Duty Ratio	0.158	Output Diode	V30100S

분석하였지만, 실제 토로이달 변압기에서는 변압기 외부 반지름이 내부 반지름에 보다 크기 때문에 내, 외부의 권선 간의 간격이 다르다. 따라서 일반적인 권선으로 감았을 경우 코어 외부에 감긴 권선 사이에서 간격이 벌어지므로, 1, 2차 권선이 코어 표면 전체를 감싸는 것이 어렵다. 이런 문제점에 의해 계산과 시뮬레이션 결과에 비해 높게 측정되는 것으로 분석된다.

표 10은 3장에서 분석된 여러 권선 방법을 적용한 변압기들의 자화 인덕턴스, 결합계수, 누설 인덕턴스의 측정 결과를 나타낸다. 누설 인덕턴스 측정 결과는 앞서 시뮬레이션으로 분석한 결과 보다는 다소 높게 측정되었지만 유사한 경향을 나타내고 있다. 1, 2차 권선이 코어를 감싸는 면적이 감소함에 따라 누설 인덕턴스가 비례하여 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 또한 2차 권선의 면적의 감소에 따라 누설 인덕턴스는 급격히 증가하며, 2차 권선을 분산시켜 감은 권선 구조의 누설 인덕

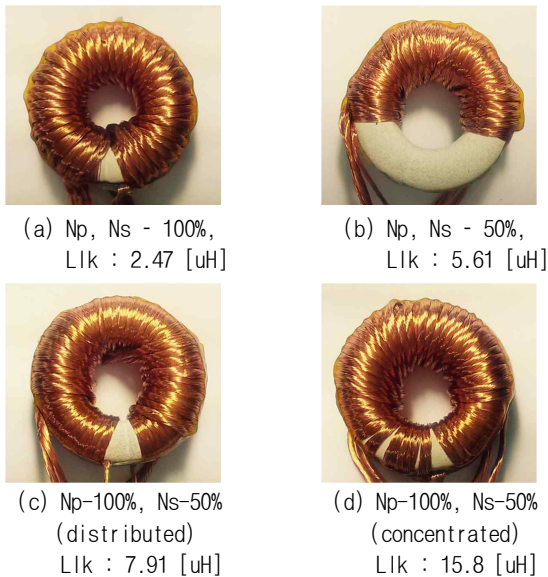


Fig. 11 Experimental flyback transformers

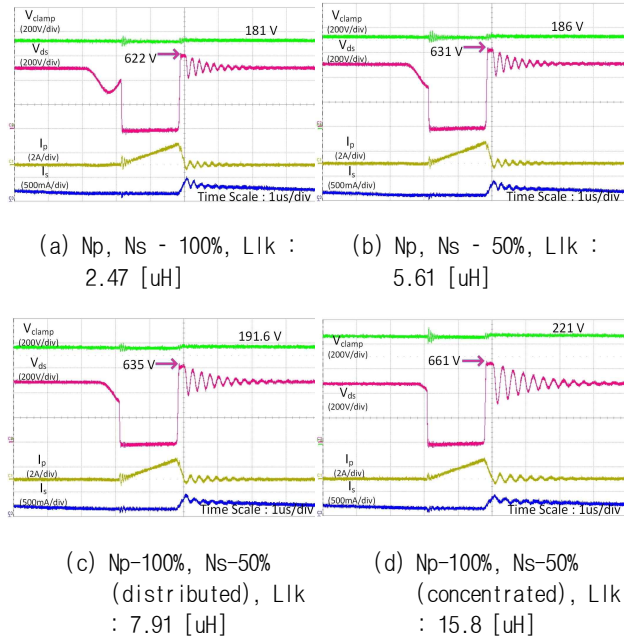
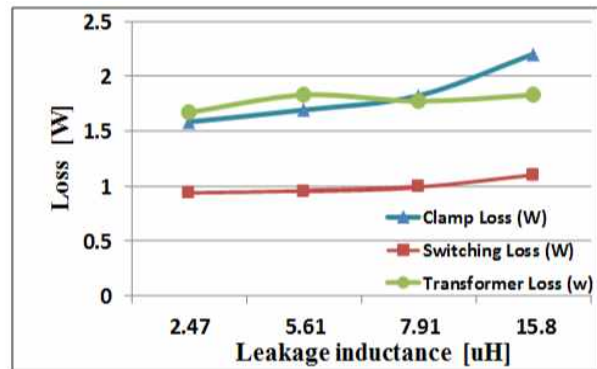
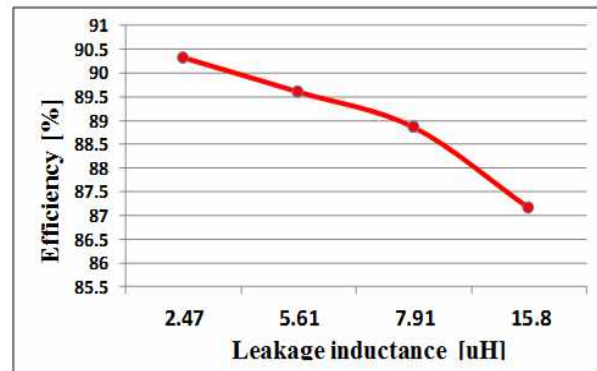


Fig. 12 Waveforms of clamp voltage, drain-source voltage, primary and secondary current



(a) Converter losses for different leakage inductance



(b) Converter efficiency for different leakage inductances

Fig. 13 Converter loss and efficiency for different leakage inductance

턴스는 약 50%이상 감소시킬 수 있다. 따라서 토로이달 변압기에서 누설 인덕턴스가 최소가 되는 권선 구조는 코어 표면 전체를 동일한 높이(l_w)의 1, 2차 권선으로 최대한 감싸는 방법이며, 높이가 다를 경우 2차 권선을 분산하는 것이 누설 인덕턴스 저감에 효과적이다.

4.2 실험

표 10에서 실제 제작된 변압기를 이용해 플라이백 컨버터 회로에 적용시켜 실험을 수행하였다. 컨버터 내에서 변압기의 권선 방법에 따라 발생하는 누설 인덕턴스의 영향을 확인하기 위해 클램프 전압, 스위치 드레인-소스 전압, 컨버터 효율 측정 실험을 수행하였다.

표 11은 실험에 사용된 플라이백 컨버터의 사양을 나타낸다. 실험에 적용된 변압기는 표 10에서 제작된 변압기 중 누설 인덕턴스의 차이가 크게 나는 4가지 종류를 선정하였으며, 그림 11에 나타내었다. 그림 11(a)는 누설 인덕턴스가 가장 작은 Np , Ns -100%의 변압기이며, 그림 11(b)는 Np , Ns -50%의 변압기, 그리고 그림 11(c), (d)는 Np -100%, Ns -50%로 2차 권선의 밀집된 분포와 고르게 분산된 분포를 가진 변압기이다.

그림 12는 플라이백 컨버터 회로에 각 변압기들을 사용하여 실험을 통해 측정된 클램프 전압, MOSFET 드레인-소스 전압, 1, 2차 전류의 파형들을 나타낸다.

실험을 통해 토로이달 변압기를 이용한 플라이백 컨버터가 정상적으로 DCM 모드로 동작함을 알 수 있다. 스위치가 OFF 되는 전도구간에서 1차 전류가 감소하며, 누설 인덕턴스에 의한 에너지에 의해 스위치의 드레인에서 전압 스파이크를 유발함을 알 수 있다.

변압기의 누설 인덕턴스 증가에 따라 스위치 드레인에서의 전압 스파이크가 증가하며, 클램프 전압 역시 증가함을 확인하였다. 이 결과 클램프 회로에서의 손실과 MOSFET에서 스위칭 손실이 증가하는 결과를 그림 13(a)에 나타내었다. 그림 13(b)는 누설 인덕턴스의 변화에 따른 컨버터 효율 측정 결과를 나타낸다. 누설 인덕턴스가 증가함에 따라 클램프 손실, 스위칭 손실이 증가하여 컨버터 효율이 급격히 감소함을 확인하였다.

따라서 앞서 분석된 바와 같이 플라이백 컨버터에 적용되기에 가장 적합한 토로이달 변압기의 권선 방법은 최소의 누설 인덕턴스를 가지는 Np , Ns -100%의 구조로써, 1, 2차 권선으로 코어에 최대한 고르고 많이 감싸고 있는 권선 구조임을 실험을 통해 검증하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 토로이달 타입의 코어를 사용한 플라이백 변압기에서 다양한 권선 형태에 대한 누설 인덕턴스를 분석하였다. 먼저 단순화된 토로이달 변압기의 MMF 다이어그램으로부터 누설 인덕턴스 수식을 유도

하였으며 시뮬레이션을 통하여 이를 검증하였다. 그리고 다양한 권선 방법에 따른 누설 인덕턴스 변화를 시뮬레이션과 실험을 통해 분석하였다.

분석 결과 토로이달 변압기에서 1, 2차 권선의 높이(l_w) 차이가 누설 인덕턴스에 큰 영향을 미치며, 높이 차이가 클 경우 권선을 분산시킴으로써 누설 인덕턴스를 크게 줄일 수 있음을 알 수 있다.

본 논문은 경상대학교 2012학년도 연구년제연구교수 연구지원 과제임.

References

- [1] R. Prieto, J. A. Cobos, O. Garcia, R. Asensi and J. Uceda, "Optimizing the Winding Strategy of the Transformer in a Flyback Converter," *Power Electronics Specialist Conference (PESC)*, Vol. 2, pp. 1456 - 1462, Jun. 1996.
- [2] 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.* Vol. 1, pp. 359 - 364, Sep. 1998.
- [3] R. Prieto, J. Cobos, V. Bataller, O. Garcia and J. Uceda, "Study of Toroidal Transformers by Means of 2D Approaches," *Power Electronics Specialist Conference (PESC)*, Vol. 1, pp. 621 - 626, Jun. 1997.
- [4] 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.*, Vol. 1, pp. 220 - 226, Mar. 1999.
- [5] A. Dauhajre, R. D. Middlebrook, "Modeling and Estimation of Leakage Phenomena in Magnetic Circuits," *IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, pp. 213 - 226, Apr. 1986.
- [6] I. Hernández, F. de León, and P. Gómez, "Design Formulas for the Leakage Inductance of Toroidal Distribution Transformers," *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 26, No. 4, pp. 2197 - 2204, Oct. 2011.
- [7] C. M. T. McLyman, *Transformer and Inductor Design Handbook*, Marcel Dekker Inc. New York, 1998.
- [8] L. E. Blume, A. Boyajian, G. Camilli, T. C. Lennox, S. Minnecl, V. M. Montsinger, *Transformer Engineering*, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1951.



박창수(朴昶守)

1985년 10월 29일생. 2012년 경상대 제어계측공학과 졸업. 2014년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사).



강병극(姜秉克)

1983년 3월 16일생. 2008년 경상대 공대 전기전자공학부 졸업. 2010년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2011년~현재 동 대학원 제어계측공학과 박사과정.



신경구(辛炯詢)

1988년 11월 24일생. 2013년 경상대 제어계측공학과 졸업. 2013~현재 동 대학원 제어계측공학과 석사과정.



정세교(鄭世敎)

1966년 11월 26일생. 1989년 경북대 전자공학과 졸업. 1992년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박). 1997년~현재 경상대 제어계측공학과 교수 및 공학연구원 연구원. 1999년 12월~2000년 2월 일본 큐슈 공업대 객원교수. 2002년 2월~2003년 2월, 2012년 2월~2013년 2월 미국 Texas A&M 대학 Visiting Scholar.