

토로이달 타입 변압기 권선의 Interleaving 효과 분석

신경구¹, 강병극¹, 정세교[†]

Analysis of Interleaving Effect for Toroidal Type Transformer Windings

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

Abstract

An analysis of the interleaving effect for the secondary winding distribution of a toroidal transformer is presented in this paper. The equations to calculate the leakage inductance of the toroidal transformer are derived using MMF diagrams for the different secondary winding distributions. The simulation and experimental results are provided to show the validity of the theoretical calculation.

Key words: Toroidal transformer, Transformer winding, Interleaved winding, Leakage inductance, MMF diagram, 3D FEM simulation

1. 서 론

변압기와 인덕터 등의 자성체 부품은 스위칭 전원 장치의 소형화에 가장 큰 요인이며 전원장치의 전력밀도도 향상을 위해서는 자성체 부품의 적절한 설계가 필수적이라 할 수 있다^{[1],[2],[3]}.

변압기의 설계에 있어서 누설 인덕턴스는 가장 중요한 파라미터 중의 하나이다. 변압기의 누설 인덕턴스는 자속 손실 및 전압 강하, 그리고 컨버터의 스위칭 시 높은 스위칭 전압을 야기하며, 이에 따라 변압기와 컨버터의 효율에 나쁜 영향을 미친다.

토로이달 코어는 동일한 WAc 값을 갖는 다른 형상의 코어에 비해 전력밀도가 높고, 누설 자속이 적어 효율이 좋다는 장점이 있다. 하지만 보빈이 없어 변압기 권선에 어려움이 있으며 권선 구조가 다양하지 못하다는 단점이 있다^{[4],[5]}.

토로이달 변압기의 권선에서 1, 2차 권선의 폭이 일치할 경우, 등가적인 원통형 권선으로 누설 인덕턴스를 쉽게 계산할 수 있으나, 두 권선의 폭이 다를 경우, 방사

형 누설 자속이 존재하게 되며, 이로 인해 누설 인덕턴스의 값은 커지고 수식적으로 계산이 어렵다. 현재까지 1, 2차 권선의 폭이 같은 경우에 대한 누설 인덕턴스의 수식적 해석에 대해서는 많은 연구결과가 있지만, 권선 폭이 다른 경우에 대한 결과는 드물다.

따라서 본 논문에서는 토로이달 변압기에서 1, 2차 권선의 폭이 다른 경우에 대해, MMF 다이어그램을 이용하여 누설 인덕턴스 계산식을 유도하였고, 이 결과로부터 2차 권선의 분할에 따른 Interleaving 효과에 대해 분석하였다. Maxwell 3D 시뮬레이션과 실험을 통해 이론적인 결과를 검증하였다.

2. 누설 인덕턴스의 계산

2.1 1, 2차 권선 폭이 같은 경우

그림 1은 1, 2차 권선의 폭이 같은 경우 토로이달 변압기의 구조를 나타낸다. 누설 인덕턴스 계산을 위해 환형코어를 잘라 펼치면 오른쪽 그림과 같이 근사화 할 수 있다^[5].

그림 1에서 N_1 , N_2 는 1, 2차 권선의 턴 수, d_1 , d_2 는 절연 거리, h_1 , h_2 는 1, 2차 권선의 두께, R_m 은 변압기 중심과 코어의 평균 거리, l_m 은 코어의 평균 둘레길이, r 은 코어의 반지름, μ_0 는 공기 중의 투자율이다.

그림 2는 1, 2차 권선의 폭이 같은 경우에 대한 자속의 경로를 나타낸 것이다. 그림 2(a)는 축(axial) 방향의 자속경로를 나타낸 것이고, 그림 2(b)는 방사(radial) 방

Paper number: TKPE-2015-20-3-8

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

[†] Corresponding author: skchung@gnu.ac.kr, Dept. of Control & Instrumentation Eng., Gyeongsang Nat'l Univ.

Tel: +82-55-772-1744 Fax: +82-55-772-1749

¹ Dept. of Control & Instrumentation Eng., Gyeongsang Nat'l Univ.

Manuscript received Sep. 23, 2014; accepted Feb. 11, 2015

- 본 논문은 2014년 전력전자학술대회 우수추천논문임

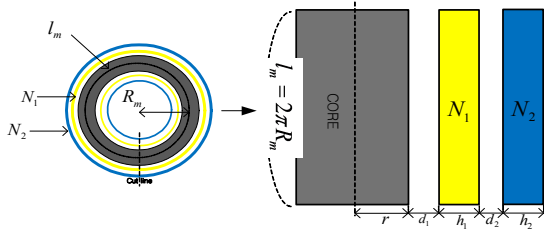
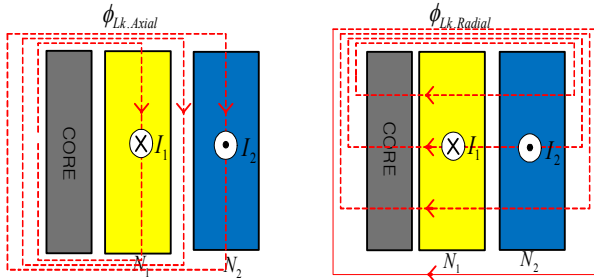


Fig. 1. Structure of the toroidal transformer.



(a) Axial flux path (b) Radial flux path

Fig. 2. Flux paths of toroidal transformer with uniform winding.

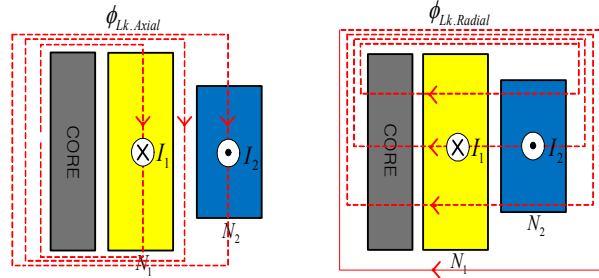
향의 자속경로를 나타낸 것이다. 그림에서 I_1 , I_2 는 1, 2차 권선에 흐르는 전류이다.

그림 2(a)와 같이 1, 2차 권선 폭이 같은 경우 축방향으로는 1, 2차 권선에 쇄교하지 않는 자속이 발생하므로 인해 알짜 MMF (Net MMF)가 발생하게 된다. 반면에 그림 2(b)와 같이 방사 방향으로 자속경로 내에 알짜 MMF가 영이 되어, 누설 인덕턴스가 발생하지 않게 된다. 따라서 1, 2차 권선 폭이 같은 경우 축 방향의 누설 자속만으로 누설 인덕턴스를 계산할 수 있다. 에너지 식을 이용하여 축 방향 누설 자속이 가지는 에너지는 다음과 같다.

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

여기서 H 는 자기장 세기이며 구간 별로 다음과 같이 나타낼 수 있다^{[6],[7]}.

$$H = \begin{cases} \frac{N_1 I_1}{l_m} \left(\frac{x}{h_1} \right) & \text{for } 0 < x < h_1 \\ \frac{N_1 I_1}{l_m} & \text{for } h_1 < x < h_1 + d_1 \\ \frac{N_1 I_1}{l_m} \left(\frac{h_1 + d_1 + h_2 - x}{h_2} \right) & \text{for } h_1 + d_2 < x < h_1 + d_2 + h_2 \end{cases} \quad (2)$$



(a) Axial flux path

(b) Radial flux path

Fig. 3. Flux paths of toroidal transformer with non-uniform winding.

이 식으로부터 누설 인덕턴스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{lk} = \frac{\mu_0}{I_1^2} \int_v H^2 dv \quad (3)$$

2.2 1, 2차 권선 폭이 다른 경우 누설 인덕턴스의 계산

그림 3은 1, 2차 권선의 폭이 다른 경우에 대한 누설 자속의 경로이다. 그림 3(a)는 축 방향 누설 자속 경로를 나타낸 것이고, 그림 3(b)는 방사방향의 누설 자속 경로를 나타낸 것이다.

그림 3(a)와 같이 축 방향 누설 자속은 1, 2차 권선의 폭이 다른 경우에도 그림 2(a)와 유사하게 발생한다. 그러나 그림 3(b)와 같이 1, 2차 권선의 폭이 다른 경우 방사방향의 자속경로 내의 1, 2차 권선에서 발생하는 MMF는 서로 상쇄되지 않아 알짜 MMF가 발생하게 된다. 식 (2)와 (3)에서 보는 바와 같이 누설 인덕턴스는 누설 자속의 자기장의 세기 H 에 관계되며, H 는 자속 경로의 길이에 반비례 한다. 따라서 방사 방향으로 큰 H 를 가지게 되므로, 1, 2차 권선 폭이 다른 경우 대부분의 누설 인덕턴스는 방사 방향의 누설 자속에 의해서 발생한다.

그림 4는 1, 2차 권선의 폭이 다른 토로이달 변압기의 방사 방향 누설 인덕턴스를 구하기 위해 1, 2차 권선을 하나의 등가적인 권선으로 나타내는 방법이다. 여기서 1차 권선은 코어를 모두 감싸고 있고 ($l_1 = l_m$), 2차 권선의 폭은 1차 권선의 $x\%$ 만을 감싸고 있다고 가정한다. 여기서 $x = l_2/l_1 \times 100$ 이다. 그림 4(a)는 1, 2차 권선으로 구성되어 있는 토로이달 변압기의 단면을 잘라 전개한 모형이다. 그림 4(b), (c)는 두 개의 권선을 하나의 등가적인 권선으로 표현하는 과정을 나타낸 것이다. 여기서 h 는 1, 2차 권선 두께의 합이다. 그림 4(c)의 각 섹션 수치는 각 권선에서 발생하는 전체 MMF를 100으로 볼 경우 등가적인 알짜 MMF의 비율을 y 축 방향의 MMF 다이어그램을 나타낸다. 그림 4(d)는 의해 y 축 방향의 MMF 다이어그램을 좀 더 자세히 나타낸 그림이다.

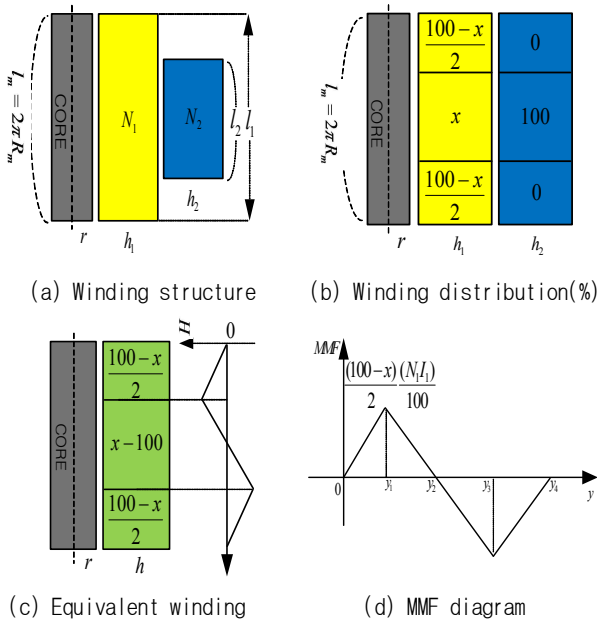


Fig. 4. Equivalent winding and MMF diagram for the different primary and secondary winding width.

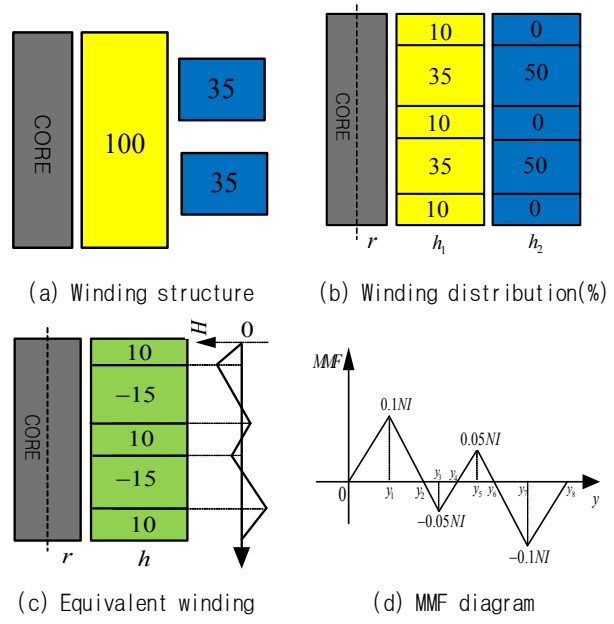


Fig. 6. Equivalent winding and MMF diagram for the secondary winding with 70% width and two sections.

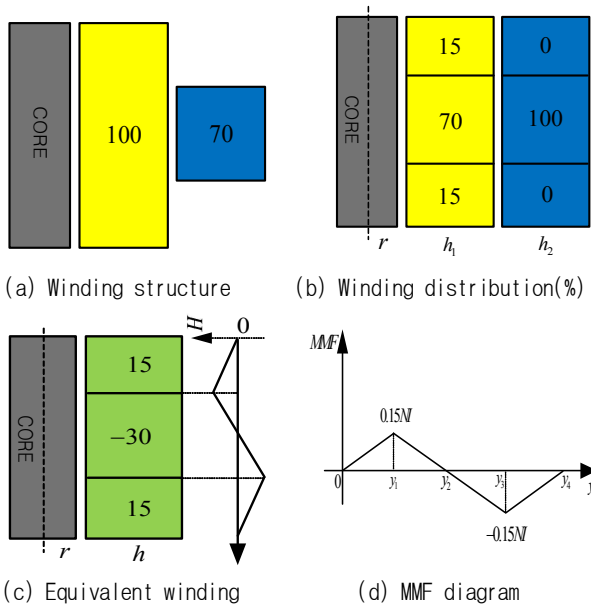


Fig. 5. Equivalent winding and MMF diagram for the secondary winding with 70% width.

그림 5는 1차 권선이 코어의 단면을 모두 감싸고 있고 1차 권선에 대한 2차 권선의 폭이 70%인 토로이달 변압기 대한 예를 나타낸 그림이다. 그림 5(a)는 1, 2차 권선의 폭, (b)는 각 권선의 전체 MMF를 100으로 보았을 때 서로 대면하는 권선 면적의 MMF 비율이다. 그림 5(c)는 1, 2차 권선을 하나의 권선으로 표현한 경우 등가적인 알짜 MMF를 나타낸다. 이때 y 축에 대한 알짜 MMF는 그림 5(d)와 같이 나타낼 수 있다.

그림 5와 같은 권선 구조에서 MMF 다이어그램은 4 구간으로 나눌 수 있으며, 전체 누설 자속의 에너지는

각 구간의 누설 자속의 합으로 나타낼 수 있다.

$$W_{1t} = W_{1,1} + W_{1,2} + W_{1,3} + W_{1,4} = \sum_{n=1}^4 W_{1,n} \quad (4)$$

여기서 각 구간의 에너지는 식(1)을 이용해 구할 수 있다. 그리고 식 (3)을 이용하여 이와 같은 권선 구조에 대한 누설 인덕턴스를 구하면 다음과 같다.

$$L_{lk,1} = \frac{2}{I_1^2} W_{1t} = \frac{0.125^2}{6} \frac{N^2 \mu_0 \pi (h + 2r)}{h} y_4 \quad (5)$$

여기서 $h \approx h_1 + h_2$ 이며, 절연 층의 두께는 무시하였다. 위 식에서 그림 5(b)와 같이 권선의 빈 공간이 균등하도록 (양쪽으로 15% 씩) 배치되어 있다면 누설 인덕턴스는 다음과 같이 정리하여 나타낼 수 있다.

$$L_{lk,1} = \frac{N^2 \mu \pi (h + 2r) l_m}{6h} \left(\frac{1}{3} \frac{100 - x}{100} \right)^2 \quad (6)$$

3. Interleaving 효과

3.1 2차 권선 분할에 따른 누설 인덕턴스 계산

앞의 예에서는 폭이 다른 2차 권선이 한곳에 모아져 있을 경우에 대한 방사 방향의 누설 자속에 대한 계산식을 구하였다. 여기서 2차 권선을 분할하여 배치할 경우 y 축에 대한 알짜 MMF를 감소시킬 수 있으며, 이에 따라 누설 인덕턴스가 감소 효과를 얻을 수 있다.

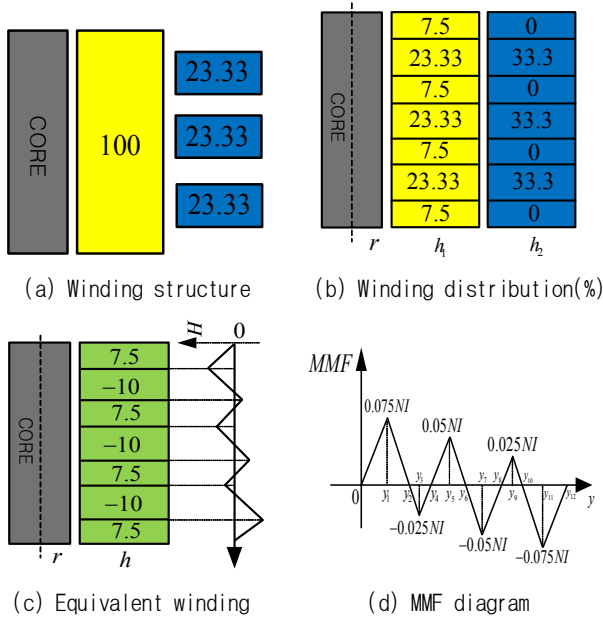


Fig. 7. Equivalent winding and MMF diagram for the secondary winding with 70% width and three sections.

그림 6은 1차 권선에 대한 2차 권선의 폭이 70%이고 2차 권선을 2등분 하였을 때의 등가적인 권선과 MMF 다이어그램을 나타낸다. 2차 권선을 2등분 했을 경우 MMF 다이어그램은 그림 6(d)와 같이 나타 낼 수 있으며 전체 누설 자속의 에너지는 다음과 같이 각 구간의 에너지의 합으로 나타낼 수 있다.

$$W_{2t} = \sum_{n=1}^8 W_{2,n} \quad (6)$$

이로부터 누설 인덕턴스를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L_{lk,2} &= \frac{2}{I_1^2} \sum_{n=1}^8 W_{2,n} \\ &= \frac{N^2 \mu_0 \pi (h+2r)}{6h} \left\{ 0.0833^2 (y_2 + y_8 - y_6) \right. \\ &\quad \left. + 0.04165^2 (y_6 - y_2) \right\} \quad (7) \end{aligned}$$

위 식에서 그림 6(b)와 같이 권선의 빈 공간이 균등하도록 (10% 씩) 배치되어 있다면 누설 인덕턴스는 다음과 같이 정리하여 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} L_{lk,2} &= \frac{N^2 \mu \pi (h+2r) l_m}{6h} \\ &\cdot \sum_{k=0}^1 \left[\left\{ (k+1) \left(\frac{100-x}{3 \cdot 100} \right) + k \left(\frac{x-100}{2 \cdot 100} \right) \right\}^2 \right. \\ &\cdot \left. \frac{2x(2-k)}{3 \cdot 100} \right] \quad (8) \end{aligned}$$

그림 7은 1차 권선에 대한 2차 권선의 폭이 70%이고

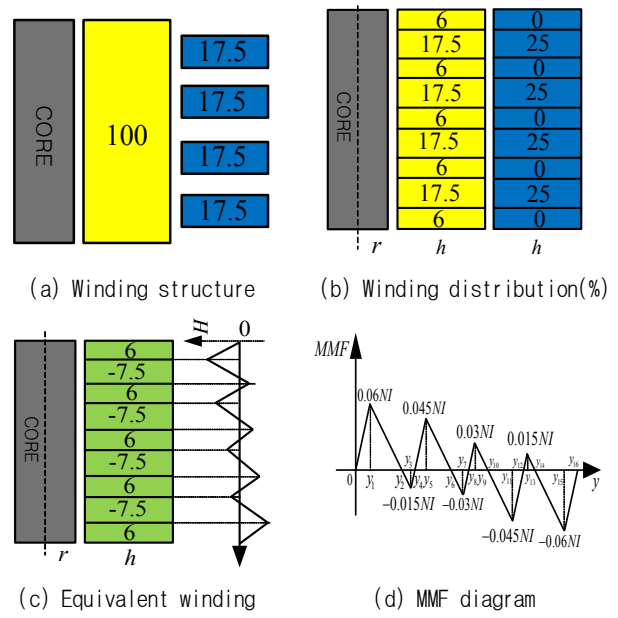


Fig. 8. Equivalent winding and MMF diagram for the secondary winding with 70% width and four sections.

2차 권선을 3등분 하였을 때 등가적인 권선과 MMF 다이어그램을 나타낸다. 2차 권선을 3등분 했을 때 MMF 다이어그램은 그림 7(d)와 같이 12구간으로 나눌 수 있으며, 전체 누설 자속의 에너지와 누설 인덕턴스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_{3t} = \sum_{n=1}^{12} W_{3,n} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} L_{lk,3} &= \frac{2}{I_1^2} \sum_{n=1}^{12} W_{3,n} \\ &= \frac{N^2 \mu_0 \pi (h+2r)}{6h} \left\{ 0.0625^2 (y_2 + y_{12} - y_{10}) \right. \\ &\quad \left. + 0.042^2 (y_8 - y_4) \right. \\ &\quad \left. + 0.0205^2 (y_4 + y_{10} - y_2 - y_8) \right\} \quad (10) \end{aligned}$$

위 식에서 그림 7(b)와 같이 권선의 빈 공간이 균등하도록 (7.5% 씩) 배치되어 있다면 누설 인덕턴스는 다음과 같이 정리하여 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} L_{lk,3} &= \frac{N^2 \mu \pi (h+2r) l_m}{6h} \\ &\cdot \sum_{k=0}^2 \left[\left\{ (k+1) \left(\frac{100-x}{4 \cdot 100} \right) - k \left(\frac{100-x}{3 \cdot 100} \right) \right\}^2 \right. \\ &\cdot \left. \frac{x(3-k)}{6 \cdot 100} \right] \quad (11) \end{aligned}$$

그림 8은 1차 권선에 대한 2차 권선의 폭이 70%이고 2차 권선을 4등분 하였을 때 등가적인 권선과 MMF 다

이어그램을 나타낸다. 2차 권선을 4등분 했을 때 MMF 다이어그램은 그림 8(d)와 같이 나타낼 수 있으며, 전체 누설 자속의 에너지와 누설 인덕턴스는 다음과 같다.

$$W_{4t} = \sum_{n=1}^{16} W_{4,n} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} L_{lk,4} &= \frac{2}{I^2} \sum_{n=1}^{16} W_{4,n} \\ &= \frac{N^2 \mu_0 \pi (h+2r)}{6h} \{0.05^2 (y_2 + y_{16} - y_{14}) \\ &\quad + 0.0375^2 (y_6 + y_{12} - y_4 - y_{10}) \\ &\quad + 0.025^2 (y_{10} - y_6) \\ &\quad + 0.0125^2 (y_4 + y_{14} - y_2 - y_{12})\} \end{aligned} \quad (13)$$

위 식에서 그림 8(b)와 같이 권선의 빈 공간이 균등하도록 (6% 씩) 배치되어 있다면 누설 인덕턴스는 다음과 같이 정리하여 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} L_{lk,4} &= \frac{N^2 \mu \pi (h+2r) l_m}{6h} \\ &\cdot \sum_{k=0}^3 \left[\left\{ (k+1) \left(\frac{100-x}{5 \cdot 100} \right) + k \left(\frac{x-100}{4 \cdot 100} \right) \right\}^2 \right. \\ &\quad \left. \cdot \left\{ \frac{x(4-k)}{40 \cdot 100} + \frac{x(4-k)}{18 \cdot 100} \right\} \right] \end{aligned} \quad (14)$$

3.2 Interleaving 효과

앞 절에서 유도된 MMF 다이어그램과 누설 인덕턴스 계산식으로부터 권선 분할이 많아질수록 MMF 최대값이 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 누설 인덕턴스도 감소하게 된다. 이러한 누설 인덕턴스 감소효과는 EE 코어 등을 사용하는 변압기에서 Interleaved 권선을 사용할 경우 나타나는 MMF 감소효과와 유사하다. 표 1은 2차 권선을 1-4등분 한 경우, MMF 최대값을 계산한 것이다. 여기서 1차 권선에 대한 2차 권선의 폭은 50-80% 인 경우를 가정하였다.

표 2는 표 1의 각 경우에 대해서 앞의 식을 이용해 누설 인덕턴스를 계산한 결과이다.

표 1과 2의 결과에서 권선을 분할할수록, 1차 권선에 대해 2차 권선의 폭이 증가할수록 MMF 최대값이 감소하며, 이로 인해 누설 인덕턴스가 감소함을 알 수 있다. 예를 들면 70%의 권선 폭에서 권선을 4개로 분할 할 경우 분할하지 않은 경우에 비해 MMF는 40%, 누설 인덕턴스는 25%로 크게 감소한다. 또한 2차 권선의 폭이 80%인 경우 50%인 경우에 비해 권선을 분할하지 않은 경우 MMF는 40%, 누설 인덕턴스는 21%로 감소한다. 표 1과 2의 결과를 정리하면 누설 인덕턴스를 저감하기

TABLE I
MAXIMUM MMF FOR SECTIONAL SECONDARY WINDINGS (NI)

No. of sections	x (b/h)			
	50%	60%	70%	80%
1	0.25	0.2	0.15	0.1
2	0.1666	0.1333	0.1	0.0666
3	0.125	0.1	0.075	0.05
4	0.1	0.08	0.06	0.04

TABLE II
LEAKAGE INDUCTANCE FOR SECTIONAL SECONDARY WINDINGS (μH)

No. of sections	x (b/h)			
	50%	60%	70%	80%
1	9.926	6.582	3.978	2.118
2	3.727	1.98	1.746	1.125
3	1.919	1.62	1.188	0.913
4	1.56	1.311	1.02	0.8

TABLE III
PARAMETERS OF TOROIDAL TRANSFORMER

Parameter	Value	Unit
V _e	1845	mm ³
l _e	55.8	mm
A _e	33.1	mm ²
L _m	235	uH
N _p diameter	0.45	mm
N _s diameter	1.1	mm
Turn radio	44:9	

위해서는 x값(2차 권선의 폭/1차 권선의 폭)을 가능한 100%에 가깝게 하고 권선 분할 수를 늘려야 함을 알 수 있다.

4. 시뮬레이션 및 실험

앞의 이론적인 계산 결과를 검증하기 위해서 Maxwell 3D Simulation과 실험을 수행하였다. 그림 9-12는 토로 이달 변압기의 2차 권선의 분할에 대한 시뮬레이션 모델이다. 표 3은 실험에 사용된 변압기의 파라미터이다.

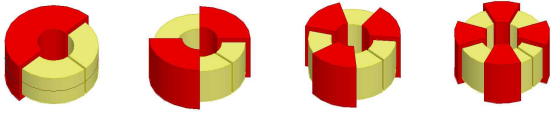


Fig. 9. Simulation model of toroidal transformer with different secondary windings (50%).

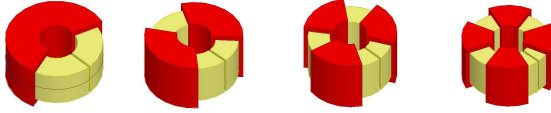


Fig. 10. Simulation model of toroidal transformer with different secondary windings (60%).

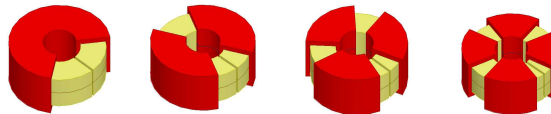


Fig. 11. Simulation model of toroidal transformer with different secondary windings (70%).

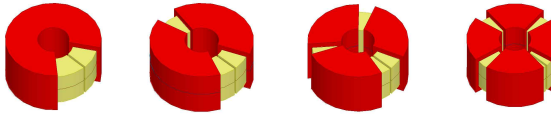


Fig. 12. Simulation model of toroidal transformer with different secondary windings (80%).

TABLE IV
LEAKAGE INDUCTANCE BY MAXWELL 3D SIMULATION (μH)

No. of sections	x (b/h)			
	50%	60%	70%	80%
1	10.54	7.14	4.43	2.498
2	5.3	3.66	2.84	1.725
3	3.4	2.5	1.91	1.422
4	2.66	2	1.62	1.287

표 4는 그림 9-12에 주어진 시뮬레이션 모델에 대해 Maxwell 3D simulation을 통해서 얻은 누설 인덕턴스 값이다. 시뮬레이션 결과 또한 계산식과 유사하게 2차 권선을 분할할수록, 1차 권선에 대한 2차 권선의 비가 증가할수록 누설 인덕턴스가 감소한다.

그림 9-12와 동일한 권선 구조를 가진 토로이달 변압기를 제작하여 실험을 수행하였다. 그림 13은 1차 권선에 대한 2차 권선의 비가 50%인 토로이달 변압기를 제작한 사진을 나타낸다.

표 5는 실험에서 측정된 변압기의 누설 인덕턴스 값이며, 그림 14는 2차 권선구조에 대한 누설 인덕턴스의

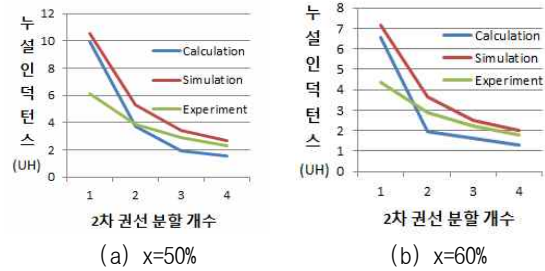


(a) $x=50\%$, $n=1$ (b) $x=50\%$, $n=2$

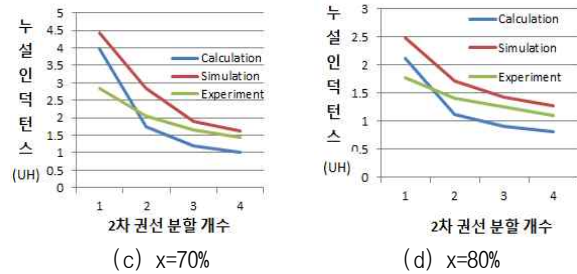


(a) $x=50\%$, $n=3$ (b) $x=50\%$, $n=4$

Fig. 13. Experimental toroidal transformers.



(a) $x=50\%$ (b) $x=60\%$



(c) $x=70\%$ (d) $x=80\%$

Fig. 14. Leakage inductances for calculation, simulation and experiment.

TABLE V
LEAKAGE INDUCTANCE BY EXPERIMENTAL (μH)

No. of sections	x (b/h)			
	50%	60%	70%	80%
1	6.14	4.35	2.85	1.78
2	3.91	2.88	2.06	1.41
3	2.88	2.21	1.65	1.71
4	2.31	1.81	1.44	1.1

계산, 시뮬레이션 및 실험결과를 비교한 그래프이다. 시뮬레이션과 실험의 결과가 이론적인 결과와 약간의 오차를 가지지만 전체적으로 유사한 결과를 나타냄을 알 수 있다. 따라서 2차 권선의 분할에 의해 MMF 최대값과 누설 인덕턴스가 감소하는 Interleaving 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 토로이달 타입 변압기에서 2차 권선의 분할에 의해 MMF의 최대값과 누설 인덕턴스가 감소하는 Interleaving 효과를 분석하였다. 2차 권선의 분포에 따른 MMF 다이어그램을 해석하여 권선 분할에 따른 누설 인덕턴스 계산식을 유도하였으며 계산식의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 시뮬레이션과 실험결과가 이론적인 계산과 유사한 결과를 나타내었으며, 누설 인덕턴스를 최소화하기 위해서는 2차 권선이 1차 권선의 폭과 최대한 일치시키고 2차 권선의 분할 수를 늘려야 함을 알 수 있다.

References

- [1] A. N. Jahromi, J. Faiz, and H. Mohseni, "A fast method for calculation of transformer leakage reactance using energy technique," *IJE Transaction B: Applications*, Vol. 16, No. 1, 2003.
- [2] K. R. Hameed, "Finite element calculation of leakage reactance in distribution transformer wound core type using energy method," *Journal of Engineering and Development*, Vol. 16, No. 3, 2012.
- [3] A. G. Kladas, M. P. Papadopoulos, and J. A. Tegopoulos, "Leakage flux and force calculation on power transformer windings under short circuit," *IEEE Transaction on magnetics*, Vol. 30, No. 5, Sep. 1994.
- [4] R. Prieto, V. Bataller, J. A. Cobos, and J. Uceda, "Influence of the winding strategy in toroidal transformers," *IEEE conference publication*, Vol. 1, pp. 359-364, 1988.
- [5] R. Prieto, J. A. Cobos, V. Bataller, O. Garcia, and J. Uceda, "Study of toroidal transformers by means of 2D approaches," *IEEE PESC 1997*, Vol. 1, pp. 621-626, 1997.
- [6] J. Wang, A. F. Witulski, J. L. Vollin, T. K. Phelps, and G. L. Cardwell, "Derivation, calculation and measurement of parameters for a multi-winding transformer electrical model," *IEEE APEC 1999*, Vol. 1, pp. 220-226, 1999.
- [7] I. Hernandez, F. De Leon, and P. Gomez, "Design formulas for the leakage inductance of toroidal distribution transformer," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 26, No. 4, pp. 2197-2204, 2011.



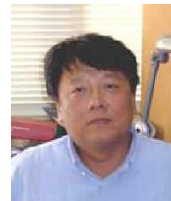
신경구(辛炯洵)

1988년 11월 24일생. 2013년 경상대 제어계측공학과 졸업. 2015년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 현재 KPOS 사원.



강병극(姜秉克)

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



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 큐슈공업대 객원교수. 2002년 2월~2003년 2월, 2012년 2월~2013년 2월 미국 Texas A&M 대학 Visiting Scholar. 당 학회 JPE Associate Editor.