

소비자 가전 제품의 전력 변환 장치에 적용된 고전력 밀도와 경박형 공진형 컨버터 트랜스포머에 대한 전자기 시뮬레이션 기법 설계

장진행 엘지전자
박수현 앤시스 코리아

An electro-magnetic simulation methodology for an integrated transformer applied to power supply of consumer electronics

JANG JIN HAENG LG electronics
PARK SOO HYUN ANSYS Korea

ABSTRACT

소비자 가전제품의 전체 개발 과정에서 시제품 제작 전 시뮬레이션을 통한 설계 및 검증은 디지털 트랜스포메이션 시대에서는 거의 필수적이다. 이러한 시뮬레이션을 활용한 설계와 검증 방법은 제품 개발 과정에서 시제품을 반복 제작하는 비용과 시간을 효율적으로 단축시키고, 제품 최적화를 통한 재료비 감소와 품질 불량 사례에 대한 시나리오를 사전에 검토하여 위험요소를 효과적으로 미연에 방지할 수 있다. 요즘 슬림한 TV 디자인이 선호됨에 따라 높은 전력 밀도는 물론, 낮은 높이의 파워 서플라이 설계가 요구되고 있다. 이러한 파워 서플라이의 구성 부품 중 자성체 트랜스포머에 대한 집적화 설계가 가장 까다롭고 핵심적이라고 할 수 있다. 본 논문에서는 Ansys사의 유한 요소 해석 기법의 전자기 시뮬레이션 소프트웨어인 Maxwell을 활용한 OLED TV용 600 W 파워 서플라이에 적용된 공진형 컨버터의 고집적 트랜스포머에 대한 설계 및 검증 방법을 소개하고, 그 개발의 효과를 확인하였다.

1. 고주파 구동 공진형 초박형 집적 트랜스포머

직렬 공진 방식 컨버터는 우수한 효율과 높은 전력 밀도로 인해 TV용 파워 서플라이의 컨버터로서 유용하게 활용되어지고 있다. 그림 1에 나타난 것과 같이, OLED TV의 낮은 출력 전압과 비교적 높은 부하 전류의 특성으로 인해 입력측은 하프 브리지 방식 스위칭 회로가 적용되고, 출력측은 센터 탭 방식의 정류 회로가 적용된다 [1]. 직렬 공진 방식 컨버터에 적용된 집적형 트랜스포머는 별도의 직렬 인덕터 부품을 사용하지 않고, 누설 인덕턴스로서 그 역할을 대신하도록 설계한다. 입력측과 출력측 권선을 분리시켜 결합도를 낮춤으로써 누설 인덕턴스를 최대로 얻을 수 있다. 자성체 페라이트 코어의 요구되는 체적을 줄이기 위해 동작 주파수를 증가시킴으로써 자화 인덕턴스를 낮추도록 설계하였다. 증가된 동작 주파수에 의한 동선의 표피효과를 최소화하여 도통 손실을 줄이기 위해 리츠 와이어가 사용되었으며, 코어의 손실을 줄이기 위해 자로의 길이를 최소화하도록 수직 방향의 자로를 가지는 코어 형상을 사용하였다. 본 논문에 사용된 직렬 공진형 집적 트랜스포머의 구조를 그림 2에 나타내었으며, 표 1에 그 사양을 정리하였다. 위에 나타난 구조와 형상의 설계로부터

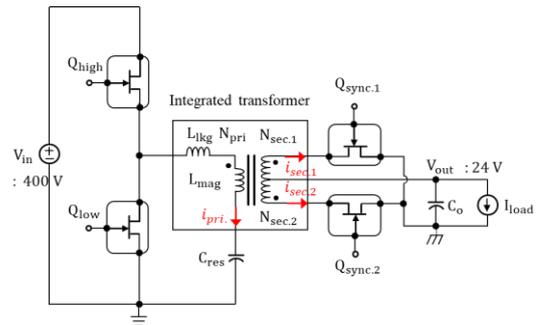
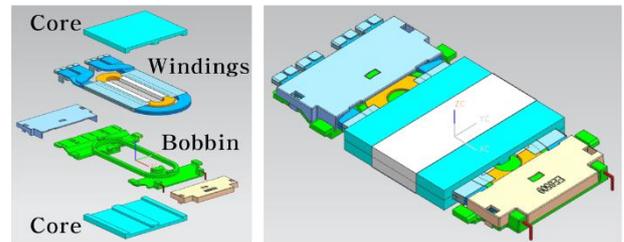


그림 1. LLC 직렬 공진형 DC-to-DC 컨버터
Fig.1 LLC series resonant DC-to-DC converter



(a) (b)
그림 2. 초박형 집적 트랜스포머 (a)구성도 (b)결합도
Fig. 2 Compact integrated transformer (a) Structure (b) Assembly

표 1 트랜스포머 사양
Table 1 Specification of integrated transformer

코어 재질	GP98	코어 형상	EE6509
입력 턴수	13	입력 권선	0.04 ϕ × 360
출력 턴수	1	출력 권선	0.06 ϕ × 240 5병렬
누설 인덕턴스	30 μ H \pm 20%	자화 인덕턴스	150 μ H \pm 10%

높은 전력 밀도와 낮은 높이를 가지면서 높은 효율을 나타내는 고주파 구동용 트랜스포머를 개발하였다.

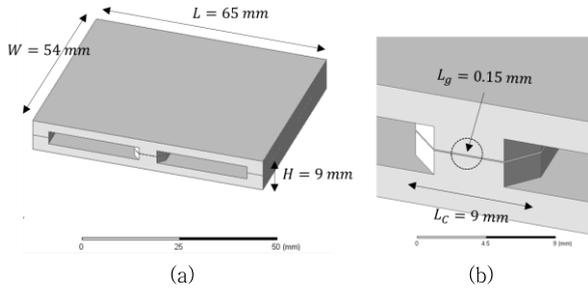


그림3. 페라이트 코어 형상 모델링 (a) 조립 모델 (b) 중족 공극
Fig.3 Ferrite core (a) Assembled model (b) Air-gap

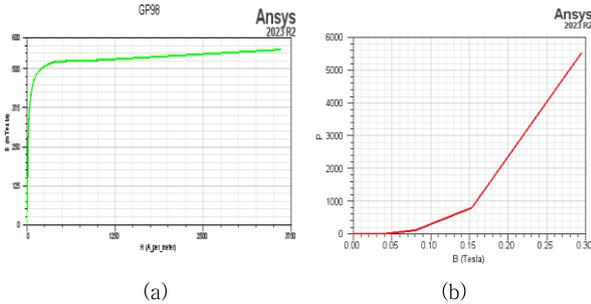


그림4. 페라이트 코어 재질 특성 (a) B-H 곡선 (b) B-P 곡선
Fig.4 Material characteristics (a) B-H curve (b) B-P curve

2. 전자기 시뮬레이션 설계 및 검증

본 장에서는 고주파 구동 공진형 초박형 집적 트랜스포머 설계 및 검증을 위해 활용한 Ansys사의 유한 요소 해석 기법의 전자기 시뮬레이션 소프트웨어인 Maxwell을 활용한 방법을 소개한다 [2].

2.1 트랜스포머 모델링

트랜스포머에 대한 모델링은 크게 자성체 코어의 형상과 함께 재질 특성인 초기 자화 곡선(Initial B-H curve), 주파수에 따른 자속 밀도와 그에 따른 철손(B-P curve by frequency) 등을 정의해주어야 한다. 그림 3에서는 페라이트 코어의 중족에 공극을 가진 조립된 형상에 대한 모델링을 보여준다. 또한, 그림 4에서 보여준 바와 같이 페라이트 코어의 중요한 재질 특성인 B-H 곡선과 함께 자속 밀도에 대한 코어의 손실 곡선을 모델링에 반영하였다. 권선에 대한 모델링의 경우, 그림 5와 같이 입력 권선과 출력 권선을 구조적으로 분리하여 배치함으로써 결합도를 낮추어 높은 누설 인덕턴스를 얻도록 한다. 또한, 고주파 동작에 의한

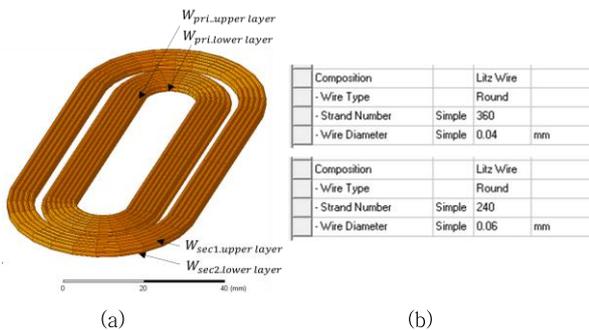


그림5. 권선 모델링 (a) 권선 구조 (b) 리츠 와이어
Fig.5 Winding model (a) Structure (b) Litz wire

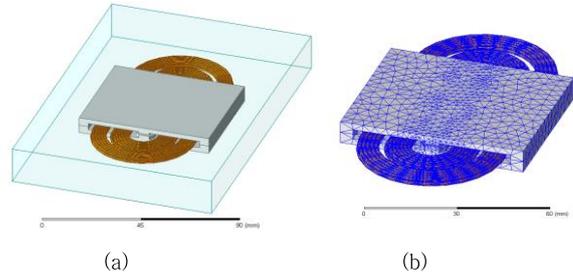


그림6. 트랜스포머 모델 (a) 완성 모델 (b) 메쉬
Fig.6 Transformer model (a) Mesh (b) Completed model

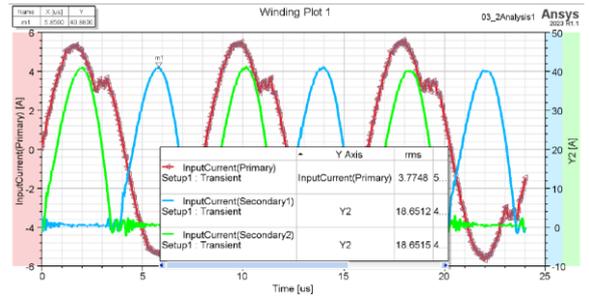


그림7. 인가된 입력력 여자 전류
Fig.7 Applied excitation currents obtained by function

코일의 동손을 최소화하도록 리츠 와이어를 사용하였으며, 선경과 가닥 수를 코일의 모델링에 반영하여 도통 손실뿐만 아니라 표피 효과에 의한 AC 손실이 나타날 수 있도록 모델링에 반영하였다. 그림 6에 코어와 코일이 조립된 완성된 형태의 트랜스포머 모델과 유한 요소 해석을 위한 메쉬로 나누어진 모델을 나타내었다.

2.2 트랜스포머 해석 및 검증

시뮬레이션을 통해 트랜스포머의 자기적 특성을 확인하기 위해서는 모델링뿐만 아니라, 여자 조건을 정확하게 반영하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 Maxwell의 과도 해석 솔버를 사용하였으며, 그림 7에 보여진 것과 같이, 입력의 사인파 공진 전류와 센터탭 정류 회로에 흐르는 두 권선의 출력 전류 파형을 여자원으로 직접 입력하여 사용하였다. 그림 8에서는 집적 트랜스포머의 모델링과 여자로부터 얻은 입력측과 출력측의 자기 인덕턴스를 나타내며, 그림 9에서는 각 권선의 임피던스값을 나타낸다. 그림 10에서는 고압이 인가되는 입력 권선과 출력 권선 간 근접 효과에 의하여 병렬로 연결된 출력

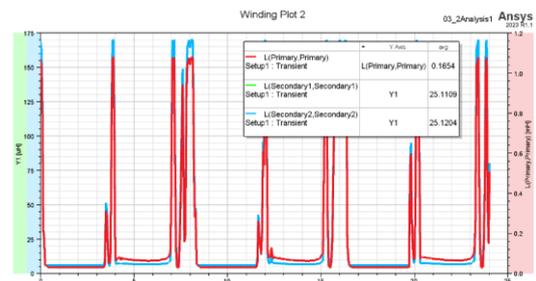


그림8. 자화 및 누설 인덕턴스 해석
Fig.8 Magnetizing and leakage inductances

	1
Freq [kHz]	125.000000
Matrix1.R(Primary,Primary) [mOhm]	103.485229
Matrix1.R(S11,S11) [mOhm]	5.305684
Matrix1.R(S12,S12) [mOhm]	6.550072
Matrix1.R(S13,S13) [mOhm]	6.935725
Matrix1.R(S14,S14) [mOhm]	7.312412
Matrix1.R(S15,S15) [mOhm]	7.668828

그림9. 권선 임피던스 해석
Fig.9 Analysis on winding impedances

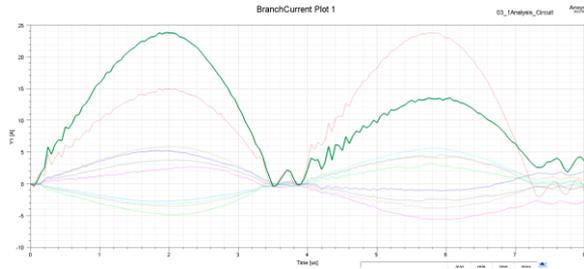


그림10. 근접효과 해석
Fig.10 Copper loss caused by proximity effect

CoreLoss Setup1 : Transient	CoreLoss	15.0355	PerWindingStrandedLossAC(S21) Setup1 : Transient	Y1	0.8750
PerWindingStrandedLossAC(Primary) Setup1 : Transient	Y1	2.1724	PerWindingStrandedLossAC(S22) Setup1 : Transient	Y1	0.0685
PerWindingStrandedLossAC(S11) Setup1 : Transient	Y1	0.9082	PerWindingStrandedLossAC(S23) Setup1 : Transient	Y1	0.0449
PerWindingStrandedLossAC(S12) Setup1 : Transient	Y1	0.0522	PerWindingStrandedLossAC(S24) Setup1 : Transient	Y1	0.0338
PerWindingStrandedLossAC(S13) Setup1 : Transient	Y1	0.0425	PerWindingStrandedLossAC(S25) Setup1 : Transient	Y1	0.0723
PerWindingStrandedLossAC(S14) Setup1 : Transient	Y1	0.0490	StrandedLoss Setup1 : Transient	Y1	3.2151
PerWindingStrandedLossAC(S15) Setup1 : Transient	Y1	0.0604	StrandedLossAC Setup1 : Transient	Y1	4.3792

그림11. 트랜스포머 손실 해석
Fig.11 Transformer losses

권선들 내에서 균등하게 전류가 흐르는 것이 아니라, 입력 권선에 가까운 출력 권선에 많은 전류가 흐르는 것을 잘 나타낸다. 과도 솔버를 사용하여 해석한 트랜스포머의 각 구성 부품들의 손실을 그림 11에 나타내었다. 본 논문에서 설계된 트랜스포머의 경우, 출력 권선으로 비교적 높은 부하 전류가 흐르기 때문에 권선의 손실을 최소화하기 위한 설계를 하였으며, 코어의 손실과 권선의 손실이 비교적 균형을 맞추어 설계된 것을 알 수 있다. 그림 12에 트랜스포머의 전자기 손실의 필드를 컬러맵으로 나타내었다. 코어의 두께가 얇은 자로의 영역에서 높은 자속 밀도와 그에 따른 높은 손실을 확인할 수

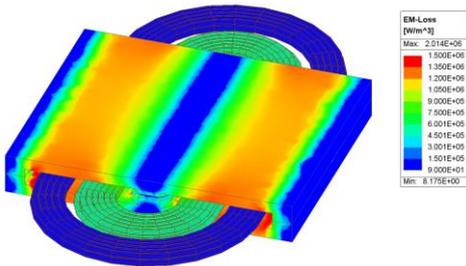
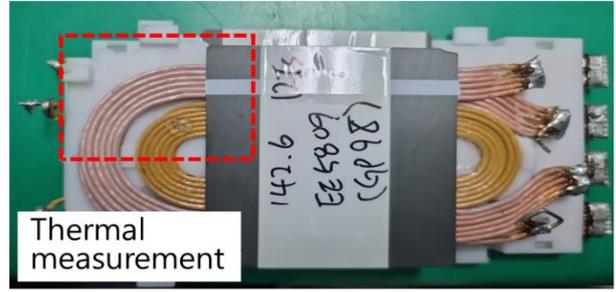
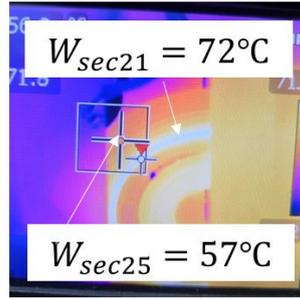


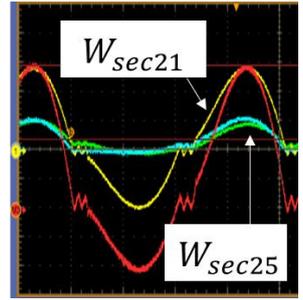
그림12. EM 손실 해석
Fig. 12 EM loss



(a)



(b)



(c)

그림13. 실험적 검증 (a) 프로토타입 (b) 발열 평가 (c) 근접 효과 평가

Fig.13 Experimental verification (a) Prototype (b) Thermal evaluation (c) Proximity evaluation

있다. 시뮬레이션 해석을 기반으로 그림 13에서 보여진것과



그림14. 완성된 트랜스포머
Fig.14 Completed transformer

같이 실제 프로토타입 트랜스포머를 제작하였으며, 시뮬레이션에서 보여준 근접 효과가 동일하게 나타나는 것을 확인하였으며, 구성 부품의 손실과 그에 따른 발열 특성 측정 결과, 시뮬레이션 해석 결과와 실험의 결과가 잘 일치하는 것을 확인하였다. 그림 14에 최종 개발 완성된 트랜스포머 제품을 보여준다.

3. 결론

본 논문에서는 직렬 공진형 컨버터의 집적형 트랜스포머를 Ansys사의 Maxwell 소프트웨어를 활용하여 해석 및 설계하는 방법을 소개하였으며, 실제 제작된 프로토타입을 통해 그 성능을 실험적으로 검증하였다.

참고 문헌

- [1] J. Jang, "LLC resonant DC-to-DC power converter with synchronous rectifiers using high- and medium-voltage gallium nitride-based transistors", Journal of Power Electronics, Vol. 22, No. 8, pp. 1279-1289, Aug. 2022.
- [2] ANSYS Electronic Desktop 2023 R2.