

# 인버터용 고주파 변압기의 효율 향상을 위한 코어 형상 최적화 설계에 대한 연구

(A Study on Core shape optimization to Improve The Efficiency of High Frequency Transformer for Inverter)

유진형\* · 정태욱\*\*

(Jin-Hyung Yoo · Tae-Uk Jung)

## Abstract

The purpose of high frequency transformer in the inverter is to reduce the voltage and current stresses of switch components when it operates at the large conversion ratio. But the loss of transformer is the major contributor in the efficiency of inverter. This paper presents the method of core design to minimize the loss of transformer. The total loss of transformer is minimized by adjusting the effective cross-sectional areas of core. The component ratio of losses are compared by using the finite-element analysis.

Key Words : High Frequency Transformer, Efficiency, Optimization

## 1. 서 론

최근 잇따른 원자력 발전소 사고로 인하여 신재생 에너지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그중에서도 태양광 발전방식은 초기 투자비용이 다른 발전

방식에 비해 높은 편이지만 소음이 거의 없는 점과 에너지원이 풍부한 장점이 있어 많은 연구가 진행되고 있다.

최근 계통 연계형 마이크로 인버터를 적용하여 소규모 태양광 발전 설비의 효율을 향상시키는 연구가 진행되고 있다. 마이크로 인버터의 장점은 태양전지마다 독립된 최대 출력 점에서 발전이 가능하기 때문에 발전효율을 최대로 할 수 있는 장점이 있다[1-3].

태양광 발전용 인버터는 태양 전지의 낮은 출력 전압을 계통 전압으로 승압시킬 필요가 있기 때문에 변압기를 사용하여 변압비를 증가시킨다. 하지만 변압기는 인버터의 손실을 증가시키는 요인이 되는데, 이것은 인버터의 높은 동작 주파수로 인한 표피효과와 근접효과로 인하여 변압기의 철손과 동손의 증가가

---

\* 주저자 : 경남대학교 전기공학과 석사과정  
\*\* 교신저자 : 경남대학교 전기공학과 부교수  
\* Main author : Electrical Engineering at  
Kyungnam Univ. M.S. student  
\*\* Corresponding author : Electrical Engineering at  
Kyungnam Univ. Professor  
Tel : 055-249-2628, Fax : 0505-999-2161  
E-mail : tujung@kyungnam.ac.kr  
접수일자 : 2013년 12월 31일  
1차심사 : 2014년 1월 7일  
심사완료 : 2014년 3월 10일

원인이다. 이러한 손실은 인버터뿐만 아니라 SMPS 등 동작주파수가 높은 장치에서 공통적으로 효율을 저하시키는 원인이 된다.

이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 연구가 진행되었으나, 대부분의 경우 변압기 내부의 최대 자속 밀도를 기준으로 최대한 작은 코어를 선정하고 권선 구조를 설계하는 방법에 대한 연구였으며, 이러한 연구에도 불구하고 여전히 고주파 변압기는 인버터의 손실에서 큰 비중을 차지하고 있다[4-8].

본 연구의 목적은 240W급 태양광 발전용 인버터에 2병렬로 구성된 DC-DC 회로에 사용된 변압기의 높이를 기존 20mm에서 15mm 이하로 낮추면서 효율을 95% 이상 달성하기 위함이다. 이러한 목적을 달성하기 위해서 본 논문에서는 변압기의 철손과 동손의 관계를 이용하여 변압기 손실이 최소가 되면서 부피는 최소가 되는 권선 및 코어의 구조를 설계하는 방법을 연구하였다. 제안된 최적화 과정에서 변압기의 철손과 동손을 보다 정확하게 비교하기 위해서 실제 회로에 포함되는 변압기 동작을 유한요소해석 프로그램 외부회로를 통해 고려하였다.

## 2. 초기 모델 분석

변압기의 최적 설계를 시작하기 전에 초기 모델을 유한요소 해석법을 이용하여 분석하였다. 이 때 사용된 코어의 B-H curve를 그림 2에 나타내었고, 표 1에는 초기 모델 해석 조건들을 나타내었다.

초기 모델의 해석결과는 표 2에 나타내었다. 해석 결과에 따르면, 초기 모델에서 동손이 철손에 비해 4배가량 큰 것을 확인할 수 있었다.

철손에 비해 동손이 큰 원인으로는 표피효과로 인해 그림 3에 나타낸 전류밀도와 같이 Flat wire를 사용한 1차 측 권선의 전류가 외곽에 집중된 것이 가장 큰 원인이다. 전류가 외곽으로 집중되면서 권선의 유효 단면적이 감소하고 권선 내에 전류 밀도와 저항이 상승된 것이 원인으로 작용하였다. 그리고 출력전압이 급격히 상승하는 구간에서 일시적으로 그림 4와 같이 부분적인 자기 포화가 발생하였다.

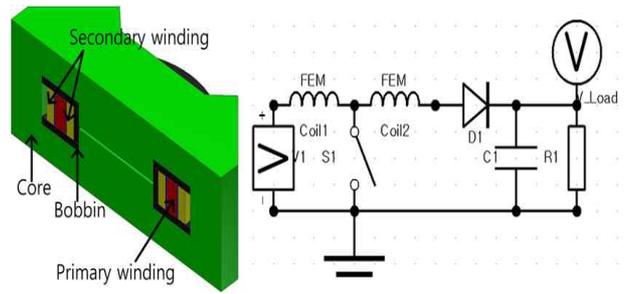


그림 1. 변압기의 해석 모델 및 외부회로  
Fig. 1. Analysis model of transformer and circuit

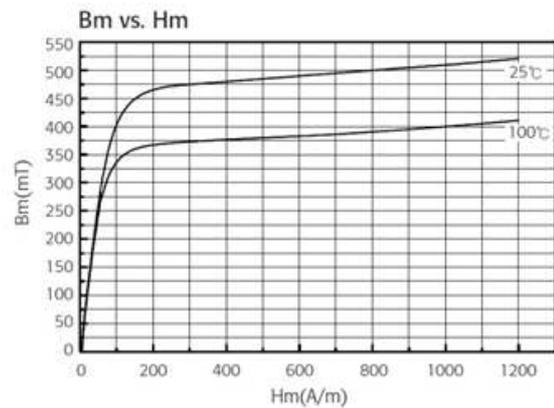


그림 2. 코어의 B-H curve  
Fig. 2. B-H curve of core material

표 1. 초기 모델 해석 조건  
Table 1. Analysis condition of initial model

항 목	사 양	단 위
입력전압(rms)	30	V <sub>dc</sub>
출력전압(rms)	310	V <sub>dc</sub>
정격출력(rms)	120	W
동작주파수	100	kHz
시비율	52	%
권선비	1 : 5	-
1차측 인덕턴스	15	uH
1차측 저항	22.34	mΩ
2차측 인덕턴스	375	uH
2차측 저항	449.76	mΩ
권선의 저항율	1.68·10 <sup>-5</sup>	Ω·mm

표 2. 초기 모델 손실 해석 결과  
Table 2. Loss analysis result of initial model

Model	Pin W	Pout W	Pcore W	Pcu W	Eff. %
Initial	135.2	120.8	3.08	11.1	89.4

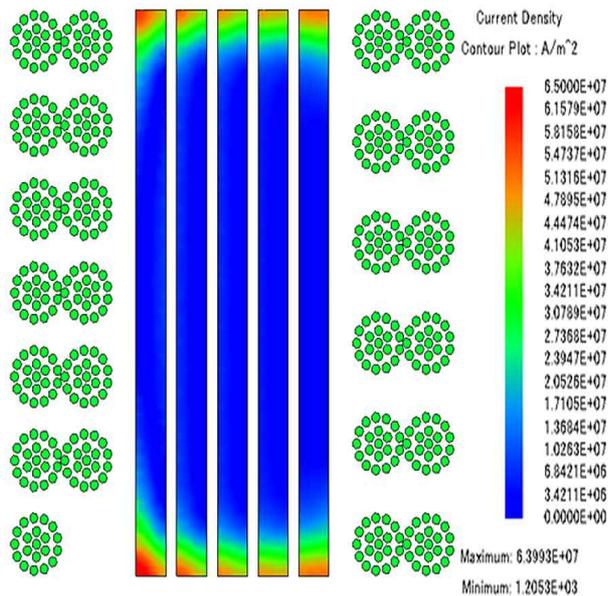


그림 3. 초기 모델의 전류밀도  
Fig. 3. Current density of initial model

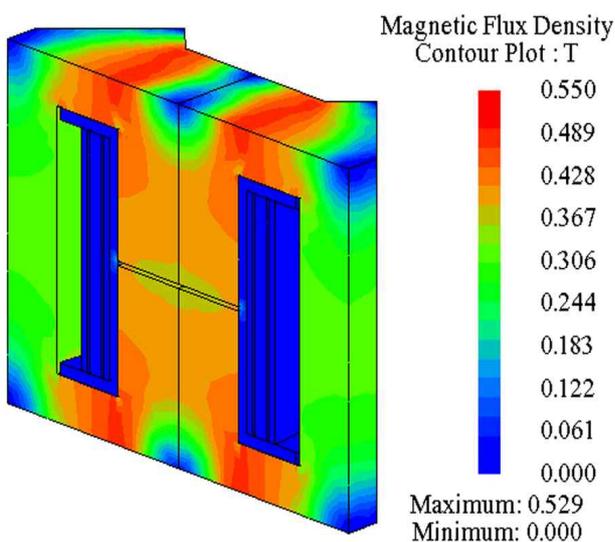


그림 4. 초기 모델의 자속밀도  
Fig. 4. Flux density of initial model

### 3. 변압기 구조의 최적화 과정

#### 3.1 동손과 철손의 관계

부피가 최소이고 효율이 최대인 코어의 형상을 설계하기 위해서 본 논문에서는 그림 5에 나타낸 변압기의 철손과 동손의 관계를 기초로 최적화 과정을 연구하였다.

그림에서 확인할 수 있듯이 철손과 동손은 동시에 증가하거나 감소하지 않으며 두 손실의 크기가 같을 때 전체 손실이 최소가 됨을 알 수 있다.

이러한 동손과 철손의 관계는 코어 내부의 자속 밀도를 결정하는 코어의 유효단면적과 변압기 권선의 전류 밀도를 결정하는 코어 창 넓이의 관계와 동일하며, 이를 통해 변압기의 손실을 최소화하는 것이 가능하다. 본 논문에서는 코어 창의 넓이를 기준으로 코어의 형상을 변경하는 방법을 사용하였다.

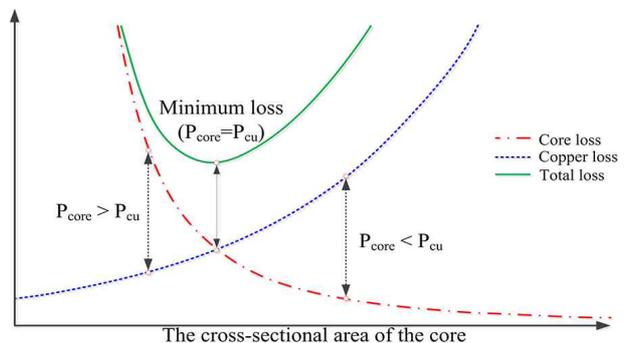


그림 5. 변압기의 철손과 동손의 관계  
Fig. 5. Correlation characteristics between losses



그림 6. 실험을 위한 초기모델  
Fig. 6. Prototype for the test

그림 6은 실험을 위해 제작된 초기 변압기이다. 초기 변압기에 사용된 코어는 PCB상에 고집적화가 가능한 장점이 있는 RM코어의 형상을 기초로 설계된 형상이며 이 모델을 기준으로 그림 7에 나타낸 설계 변수를 설정하였다.

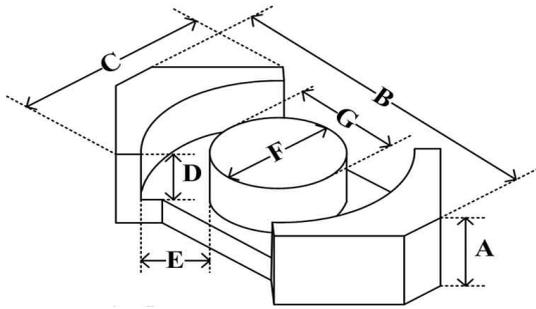


그림 7. 변압기 코어의 치수  
Fig. 7. Dimension of transformer core

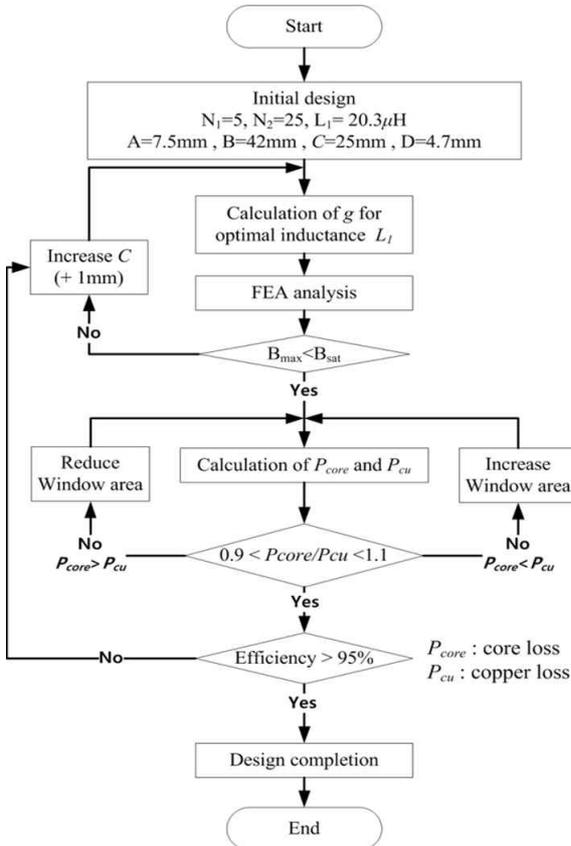


그림 8. 코어 형상 최적화 과정  
Fig. 8. Design optimization process of core

효율이 최대가 되는 코어의 형상을 철손과 동손의 비율을 기준으로 찾아가기 위한 초기모델과 코어의 형상 최적화 과정을 그림 8에 나타내었다.

그림 8에 나타낸 최적화 과정에서 자기포화가 발생하거나 효율이 목표치를 달성하지 못했을 경우에는 코어의 단면적을 넓힘과 동시에 자기 경로 상의 자기저항과 코어 창의 면적을 유지하기 위해서 C와 F값을 변경하였다. 코어 창의 높이는 D와 E값으로 결정되지만 실제 코어의 높이가 제한되어 있기 때문에 D값은 자속 밀도를 고려한 최대치로 고정된 상태에서 E를 통해 코어창의 넓이를 조절하였다. 각 설계 변수들은 1mm 단위로 변경하였다.

### 3.2 권선 구조 최적화

변압기의 동작주파수가 최대 100kHz이므로 초기설계에서 Flat wire의 두께를 0.35mm로 선정하고 누설 인덕턴스를 최소화하기 위해서 2차 측 권선 사이에 1차측 권선을 배치하는 방식을 사용하였다.

하지만 초기모델 해석결과를 통해 1차 측 권선의 단면이 효율적으로 이용되지 못함을 확인하여 Litz wire로 재설계하였다.

Litz wire 규격은 1차 측 권선은 0.1Φ 100가닥을 이용하였으며 2차 측 권선은 상대적으로 전류 밀도가 낮기 때문에 20가닥을 사용하였다.

그림 9에 나타낸 개선된 권선 구조를 적용한 해석 결과를 통해서 전류밀도가 균일해졌음을 확인할 수 있다.

또한 1차 측 권선이 기존보다 얇아지면서 변압기 권선에 필요한 코어 창의 면적을 줄일 수 있었다.

추가적으로 동손을 감소시키기 위해서 1차 측 권선을 병렬로 설계하여 해석한 결과, 이전 해석결과와는 다르게 근접효과로 인해 초기 모델과 유사하게 1차 측 권선의 전류가 편중되는 현상이 확인되었으며, 이는 그림 10에 나타내었다.

이러한 해석 결과를 바탕으로 1차 측 권선을 병렬로 사용하는 대신 권선에 필요한 창의 넓이를 줄이는 방향으로 권선 구조를 선정하였다.

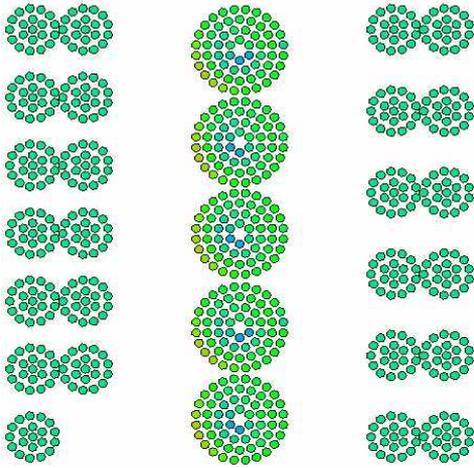


그림 9. 개선된 모델의 전류밀도  
Fig. 9. Current density of improved model

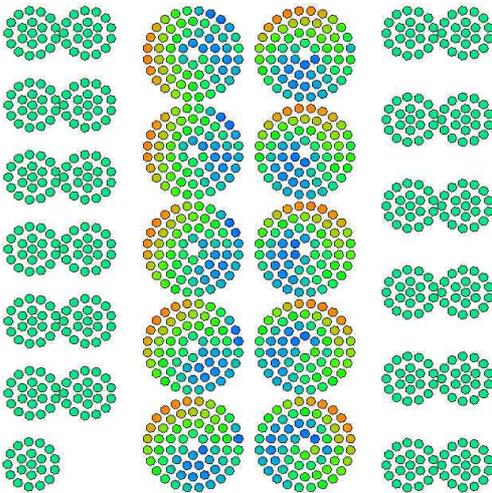


그림 10. 병렬권선 모델 전류밀도  
Fig. 10. Current density of parallel winding model

### 3.3 적정 인덕턴스 계산

초기 모델의 해석결과 상에서 출력 전압이 상승되는 구간에서 1차 측 권선의 전류가 비정상적으로 상승하는 현상이 확인되었다. 이와 같은 현상은 1차 측 권선의 인덕턴스가 부족하여 발생한 것이다.

초기 모델 설계를 진행하면서 정상상태 기준으로 설계를 하였기 때문에 발생한 문제로, 변압기의 1차 측 권선의 인덕턴스를 증가시키거나 인버터에 Soft

starting과 같은 추가적인 제어가 필요하다.

해석을 통해 얻은 권선 전류 값을 이용하여 식 (1)과 (2)를 통해서 1차 측 권선의 적정 인덕턴스를 계산하였다. 식 (1)에서  $W$ 는 1차 측 권선에서 2차 측 권선으로 전달되는 에너지를 의미한다.

$$W = \frac{1}{2} L_1 i_{1\max}^2 = P_1 \times t_{on} = V_1 \times i_1 \times t_{on} \quad (1)$$

$$L_1 = \frac{2 \times V_1 \times t_{on}}{i_{1\max}} [H] \quad (2)$$

계산 결과 1차 측 권선의 적정 인덕턴스는 20uH로 계산되었으며, 1차 측 권선의 인덕턴스를 증가시키기 위해서 공극의 길이를 0.5mm에서 0.4mm로 조절하였다. 그림 11에 나타난 개선된 모델의 입력권선 전류파형 해석결과를 통해 과도상태 특성이 개선되었음을 확인하였다.

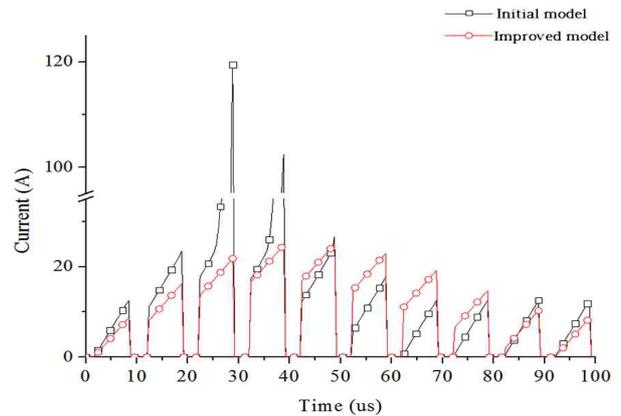


그림 11. 입력 권선의 전류파형 비교  
Fig. 11. Comparison of current waveform in winding

### 3.4 최종모델 해석결과

이전 과정을 통해 권선 구조와 1차 측 권선의 인덕턴스를 최적화한 모델을 기준으로 그림 8에 나타난 순서도에 따라 변압기 코어의 형상 변경을 통한 효율 최적화 과정을 진행하였다.

최적화된 모델은 초기 모델에 비해 코어창의 넓이가

좁아지면서 코어의 부피가 13% 감소하였으며, 정격출력 조건에서 동손과 철손의 크기가 비슷해지면서 변압기의 효율이 약 95%로 약 6% 향상되었다. 표 3에는 최적화 과정 진행 중에 해석한 모델의 손실 해석 결과를 포함하여 비교하였다.

정격출력 조건에서의 자속밀도 분포는 초기 모델보다 최종 모델에서 최대 자속밀도가 상대적으로 낮고 포화가 발생되지 않음을 그림 12를 통해 확인할 수 있다. 이는 포화가 발생했던 지점의 단면적 증가로 인해 코어 내부의 최대 자속 밀도가 감소했기 때문이다.

그림 13에는 정격출력 조건에서의 출력 전압 파형을 비교하였는데, 증가된 권선의 인덕턴스로 인하여, 개선된 모델의 전압 상승구간이 초기 모델보다 긴 것을 확인할 수 있었다.

그림 14에 나타난 출력 변화에 따른 효율 해석 결과를 비교해본 결과, 개선된 코어를 사용한 변압기가 초기모델을 사용한 변압기보다 전체 구간에서 효율이 향상되었음을 확인할 수 있었으며, 특히 정격출력 조건에서 가장 큰 차이를 나타내었다.

표 3. 손실특성 비교

Table 3. Comparison of loss characteristics

Model	Pin W	Pout W	Pcore W	Pcu W	Eff. %
Initial	135.2	120.8	3.08	11.1	89.4
Model 1	134.7	122.4	3.11	9.23	90.8
Model 2	130.1	120.1	3.19	6.81	92.3
Model 3	128.1	121.3	3.25	3.54	94.7
Final	128.2	121.9	3.27	3.00	95.1

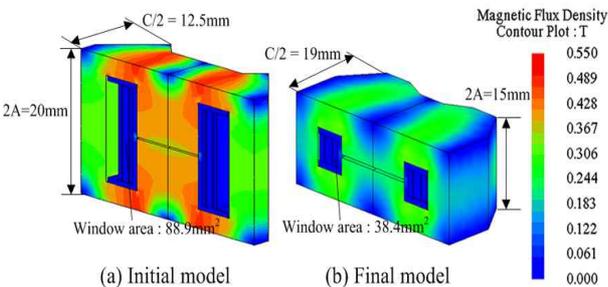


그림 12. 코어 내부의 자속밀도 비교  
Fig. 12. Comparison of flux density in the core

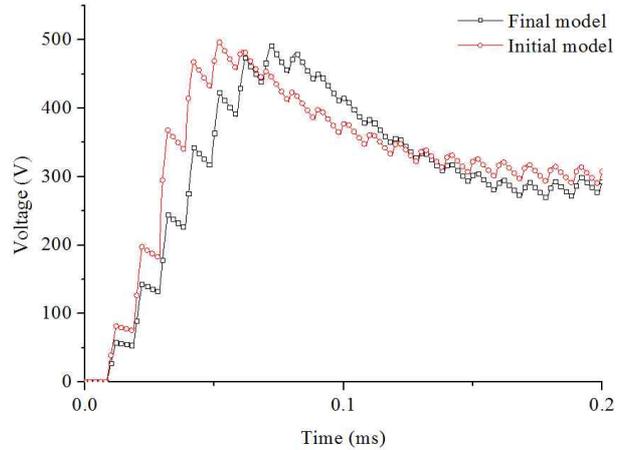


그림 13. 출력 전압 파형 비교  
Fig. 13. Comparison of output voltage waveform

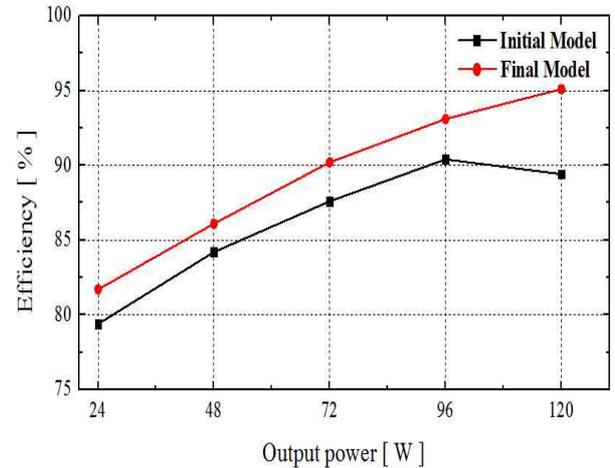


그림 14. 출력 변화에 따른 효율 비교  
Fig. 14. Comparison of efficiency along the output power variation

#### 4. 결 론

본 연구의 목적은 240W급 태양광 발전용 마이크로 인버터에 사용된 변압기의 높이를 기존 20mm에서 15mm 이하로 낮추면서 인버터의 전체 효율을 95% 이상 달성하기 위한 코어를 설계하는 것이다.

본 연구에서는 권선과 코어의 구조를 최적 설계하여 변압기의 부피와 손실을 최소화하기 위해 동손과 철손의 관계를 기초로 하는 변압기 코어의 창 넓이를 기

준으로 최적화 과정을 제안하였다.

정확한 손실 분석을 위해 해석 모델을 3D로 구성하여 코어의 형상을 보다 정확하게 반영하였고, 변압기가 사용되는 회로를 해석 프로그램의 외부회로를 통해 구현하는 방법을 이용하여 실제 변압기의 동작을 유사하게 구현하였다.

초기 모델의 권선 구조를 개선하여 변압기 권선에 필요한 코어 창의 넓이를 최소화할 수 있었으며, 이를 통해 변압기 코어의 부피를 크게 감소시킬 수 있었다.

제안된 최적화 과정을 통해 코어 창의 넓이를 기준으로 효율 및 코어 형상 최적화 과정을 수행한 결과, 고주파 변압기의 형상을 요구조건에 맞게 축소하면서 효율을 향상시키는 것이 가능함을 확인하였다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2013년도 춘계학술대회에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성 사업으로 수행된 연구결과임.  
(NRF-2013H1B8A2028789)

## References

[1] Tae-Young Seo, Jae-Sub Ko, Chang-Wook Lee, Hyouk-Sung Kwon, Dong-Hwa Chung, "Comparison and Study of MPPT Control of Photovoltaic System", Proceedings of KIEE Annual Conference, page:124-125, 2013.11.

[2] Jung-Sik Choi, Jae-Sub Ko, Dong-Hwa Chung, "Optimal Current Detect MPPT Control of PV System for Robust with Environment Changing", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 25, No. 10, page:47-58, 2011.10.

[3] Jae-Hoon Cho, Won-Pyo Hong, "Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic System", Proceedings of KIEE Annual Conference, page:282-283, 2011.5.

[4] R. Petkov, "Optimum design of a high-power high frequency transformer", IEEE Trans. Power Electronics, vol.11, no. 1, pp. 33 - 42, 1996.

[5] William Gerard Hurley, Werner Hugo Wölfle and John G. Breslin, "Optimized Transformer Design: Inclusive of High-Frequency Effects", IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 13, No. 4, pp 651-659, July 1998.

[6] H. R. Karampoorian, Gh. Papi, and A. Zadehgo, "Volume and Loss Optimization of High Frequency Transformer for Compact Switch Mode Power Supply Considering Corrected Waveform Factor", in Proc. IEEE Power India Conference, 2006.

[7] Nilanga Abeywickrama, "High-Frequency Modeling of Power Transformers for Use in Frequency Response Analysis" IEEE Trans, on power delivery, Vol. 23, No. 4, October 2008.

[8] A. J. Moses, "Comparison of Transformer Loss Prediction from Computed and Measured Flux Density Distribution", IEEE Trans, on magnetics, Vol. 34, No. 4, July 1998.

## ◇ 저자소개 ◇



**유진형** (柳晉馨)

1986년 9월 8일생. 2012년 2월 경상대 전기공학과 졸업. 현재 경남대 전기공학과 대학원 석사과정.



**정태욱** (鄭泰旭)

1970년 5월 16일생. 1993년 부산대공대 전기공학과 졸업. 1955년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996~2005년 LG전자(주) 책임연구원. 2006~2007년 한국생산기술연구원 선임연구원. 2007년 ~ 현재 경남대 전기공학과 부교수.