

# Optimal Design of High-Frequency Transformer for LLC Resonant Converter based on NSGA-II Algorithm for Accelerated Design Time

설계 시간 가속화를 위한 NSGA-II 알고리즘 기반 LLC 공진형 컨버터용 고주파 변압기 최적 설계 기법

Myeong-Jun Cha · Su-Seong Park · Seon-Ho Jeon · Rae-Young Kim

차명준\* · 박수성\* · 전선호\* · 김래영†

## Abstract

This paper proposes an optimal design method to minimize the volume and losses of the frequency converter for achieving high efficiency and high density in LLC resonant converters. Specifically, we focus on reducing the volume and losses of the high-frequency transformer, utilizing the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) for this purpose. The proposed method, in contrast to global search methods exploring all possibilities, efficiently acquires Pareto Set values using NSGA-II, thereby reducing design time. The design process was conducted using Matlab, and the results obtained from applying the algorithm were compared with those from global search in terms of design time and accuracy. Additionally, the optimal design points were validated through experimentation.

## Key Words

High-Frequency Transformer, LLC Converter, NSGA-II Algorithm, Optimal Design

## 1. 서론

LLC 공진형 컨버터는 태양광 시스템, 전기 자동차 충전기, LED 드라이버, LCD TV 등 다양한 현대 산업 응용 분야에서 활용되고 있다[1]. LLC 공진형 컨버터의 주요 특징은 고주파 동작이 가능하여 자성 소자의 크기를 축소하여 고밀도화를 실현할 수 있으며, 영전류(ZCS) 및 영전압(ZVS) 소프트 스위칭이 가능하여 고효율 달성을 가능하게 한다.

LLC 공진형 컨버터의 구성 중 하나인 고주파 변압기는 턴 비에 따라 승압 및 강압을 통해 전력을 변환하며, 입력과 출력 사이에 갈바닉 절연(Galvanic Isolation)을 제공하여 안전성을 보장한다. 또한, 자화 인덕턴스(Magnetizing Inductance)를 활용하여 컨버터의 Peak Gain을 조절할 수 있다[2]. 이러한 다양한 기능을 수행하는 고주파 변압기는 LLC 공진형 컨버터 내에서 큰 부피를 차지하고 있다. 고밀도 고효율 달성하기 위해서는 설계 시 부피와 손실을 최소화하는 최적의 설계 점을 찾는 것이 중요하다.

하지만, 부피와 손실을 동시에 고려한 고주파 변압기 설계는 매우 복잡한 문제이다. 일반적으로 설계 변수들은 서로 상호 연관되어 있어 한 변수의 변화가 다른 설계 변수에 영향을 미친다. 예를

들어, 변압기 부피를 줄이기 위해서는 전류 밀도를 높여야 하지만, 이는 손실을 증가시킬 수 있다. 따라서, 최적 설계를 도출하기 위해서는 이러한 복잡한 상충 관계를 철저히 고려해야 한다.

이러한 고주파 변압기의 설계 방법은 과거부터 꾸준히 진행됐다. 참고논문 [3]은 높은 전력 밀도를 달성 및 높은 효율을 얻기 위해 변압기의 설계 방법을 제안하였고, 참고논문 [4]은 코어와 권선의 온도를 고려한 변압기 설계 방법을 제안하였다. 참고논문 [5]은 공극의 크기를 고려한 LLC 공진형 컨버터의 고주파 변압기의 설계 방법을 제안하였고, 참고논문 [6]은 코어의 재료 및 기하학적 매개변수와 리프 와이어의 크기를 고려한 고주파 변압기의 설계 방법론을 제안한다. 하지만 이러한 방법을 통해 고주파 변압기를 설계하는 경우, 설계 과정은 노동 집약적이고 시간 소모적이다. 또한, 설계자의 능력에 크게 의존하기 때문에 품질과 효율성은 설계자의 능력에 크게 좌우되는 단점이 있다. 한편, 참고 논문[7]은 컴퓨터를 활용한 설계 변수의 모든 경우를 고려해 최적해를 찾는 설계 방안을 제안하고 있다. 이 방법은 최적 설계 점에 대한 낮은 오차율을 갖지만, 설계를 위해 600만 개의 평가에서 설계 시간이 오래 걸리는 한계가 존재한다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea.  
E-mail: rykim@hanyang.ac.kr  
<https://orcid.org/0000-0002-3753-7720>

\* Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea.  
<https://orcid.org/0009-0006-0093-6548> <https://orcid.org/0000-0003-3028-895X>  
<https://orcid.org/0009-0006-0263-0075>

Received: Nov. 27, 2023 Revised: Dec. 26, 2023 Accepted: Dec. 27, 2023

Copyright © The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

따라서 본 논문은 LLC 공진형 컨버터의 고주파 변압기 설계 시간을 단축하기 위한 다목적 최적화 알고리즘인 NSGA-II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II)를 도입했다. 최적 설계점 탐색은 Matlab을 활용하여 수행하였으며, 알고리즘 결과와 전역 탐색 결과를 비교하여 설계 시간과 정확도를 분석했다. 더불어, 실험을 통해 최적 설계점의 검증도 수행했다.

## 2. NSGA-II 알고리즘

NSGA-II는 다목적 최적화 문제에 대한 유전 알고리즘 (Genetic Algorithm) 기반의 솔루션으로, 둘 이상의 목적 함수를 동시에 최적화하는 데 사용된다. 이 알고리즘은 "Elitism" 전략을 통해 이전 세대의 최적해를 다음 세대로 유지함으로써 알고리즘의 효율성을 향상한다.

여기서 유전 알고리즘은 풀고자 하는 문제에 대한 해들을 정해진 형태의 자료구조로 표현하여 이를 점차적으로 변형해 좋은 해를 도출하는 알고리즘이다. 여기서 자료구조는 염색체, 이를 변형하는 것을 진화로 표현한다. 유전 알고리즘의 절차는 무작위의 초기 염색체를 생성하여, 이를 2진수로 바꾸고 합친다. 2진수로 표현된 염색체를 교차(Crossover) 및 변이(Mutation)를 일으켜 자식 세대를 형성하고, 이를 반복하여 최적해를 탐색한다. 그림 1은 교차와 변이를 나타내는 그림이다. 교차는 선택된 지점에서 두 부모의 꼬리가 새로운 자손을 얻기 위한 진화이고, 변이는 적합도를 증가시키기 위해 한 지점의 비트를 바꾸거나 두 지점을 교환하는 진화 방법이다.

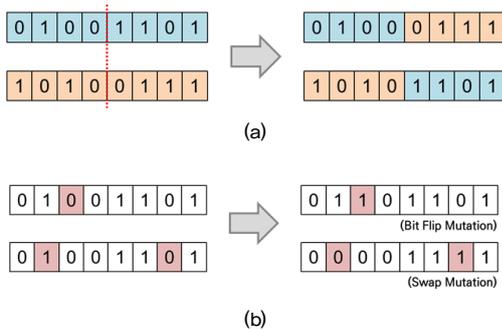


그림 1 유전 알고리즘의 진화 방법 (a) 교차 (b) 변이  
Fig. 1 Evolutionary methods of genetic algorithm (a) Crossover (b) Mutation

NSGA-II의 절차는 그림 2에 나타나 있으며 다음과 같다. 먼저, 초기 모집단  $P_t$ 를 크기  $N$ 으로 생성하고, 교차 및 돌연변이 연산을 통해 새로운 모집단  $Q_t$ 를 생성한다. 그 후에  $P_t$ 와  $Q_t$ 를 결합하여 새로운 모집단  $R_t$ 를 형성하고, 이를 비지배 정렬 (Non-Dominated Sorting)하여 다른 등급으로 분류한다. 다음으로,  $R_t$ 에서  $N$ 개의 개체를 선택하여 새 모집단  $P_{t+1}$ 을 생성한다. 첫 번째 등급의 개체 수가  $N$ 을 초과하는 경우 해당 등급에서 가장 덜 밀집된 지역에서  $N$ 개의 개체를 선택한다. 만약  $N$ 을 채우지 못하는 경우, 첫 번째 등급의 모든 개체를 다음 세대

로 이동시키고, 남은 개체는 덜 밀집된 지역의 2차 등급에서 가져와 추가합니다. 교차 및 돌연변이 연산을 통해  $Q_{t+1}$ 을 생성하고 합쳐  $R_{t+1}$ 을 형성합니다. 이 과정을 세대 수만큼 반복한다[8]. 알고리즘 결과로 나오는 Pareto Set은 그림 3에 나와 있다. 이는 다중 목적 최적화 문제에서 사용되는 개념으로, 적어도 한 목적 함수에서 우수하며, 다른 목적 함수에서는 최소한 동등한 결과를 가지는 값의 'Pareto Solution'이라 하는데 이것의 집합을 Pareto Set이라고 한다.

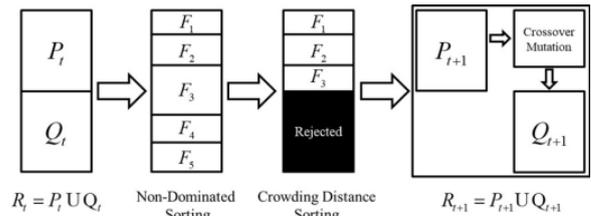


그림 2 NSGA-II 알고리즘 절차  
Fig. 2 Process of NSGA-II Algorithm

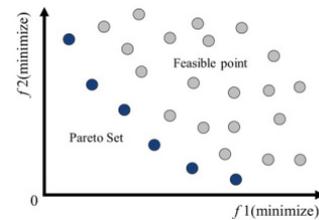


그림 3 Pareto Set  
Fig. 3 Pareto Set

그림 4는 Elitism 전략을 나타낸 그림이다. Elitism 전략은 두 가지 방법으로 나눌 수 있다. 첫 번째는 비지배 정렬(Non-Dominated Sorting)이고, 두 번째는 혼잡거리 정렬(Crowding Distance)이다. 비지배 정렬은 해 집합을 우선순위에 따라 분류하여 다른 해에 의해 지배되지 않는 단계로 나누는 전략이고, 혼잡거리 정렬은 해의 다양성을 유지하기 위해 Rank 1의 해 공간에서 더 넓은 분포를 가진 해를 선택하는 전략이다.

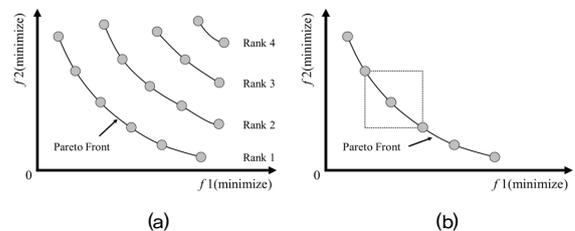


그림 4 Elitism 전략 (a) 비지배 전략, (b) 혼잡거리 정렬  
Fig. 4 Elitism Strategy (a) Non-Domination Strategy, (b) Crowding Distance Sorting

## 2. 제안하는 NSGA-II 기반 고주파 변압기 설계 과정

일반적인 LLC 컨버터의 고주파 변압기 코어는 EE 형태로

설계되며, 높은 투자율을 보장하기 위해 페라이트(ferrite) 물질을 사용한다. 이는 고주파 동작에 적합하며, 고주파 동작으로 인해 발생하는 권선의 AC 손실을 줄이기 위해 리프 와이어(Litz-Wire)가 사용된다. 또한, 코어와 코어 사이에 공극(Air-Gap)을 두어 코어가 포화점에 도달하는 것을 방지한다. 이를 통해 온도와 주파수에 따른 투자율 변화를 감소시키고, 원하는 인덕턴스 값을 쉽게 얻을 수 있다. 그림 1은 제안하는 고주파 변압기의 설계 과정을 나타낸다. 이는 크게 7가지 단계로 나뉜다.

### Step 1. 설계 파라미터 입력

설계자가 원하는 파라미터를 입력한다. 여기에는 자화 인덕턴스, 턴비, 최대자속밀도, 창 이용계수 등이 있다 ( $L_m, n_1/n_2, B_{max}, K_u \dots$ )

### Step 2. Topology Data 입력

LLC 공진형 컨버터의 Topology Data를 입력한다. 여기에는 1차측 전압, 1,2차측 전류, 스위칭 주파수 등이 있다. ( $V_{pri}, I_{p.peak}, I_{s.peak}, I_{p.r}, I_{s.r}, f_{sw} \dots$ )

### Step 3. 목적함수, 설계 변수, 모집단, 세대 수 설정

#### 3-1 목적함수 설정

목적함수  $f_1$ 은 손실,  $f_2$ 는 부피로 설정한다.  $f_1$  손실은 고주파 변압기의 동손과 철손의 합으로 나타낸다. 동손은 식(2)와 같이 표현된다.

$$R_p = \sigma \frac{I_{winding.pri}^2}{A_{pri}}, R_s = \sigma \frac{I_{winding.sec}^2}{A_{sec}} \quad (1)$$

$$P_{Winding} = I_{p.r}^2 R_p + I_{s.r}^2 R_s \quad (2)$$

식 1의  $\sigma$ 은 구리의 도전율이고,  $I_{winding.pri}$  및  $I_{winding.sec}$ 는 1차측 및 2차측의 권선 길이를 나타낸다.  $A_{pri}$  및  $A_{sec}$ 는 권선의 단면적을 나타낸다. 이때, 리프 와이어 사용으로 AC 권선 손실은 없다고 가정한다. 철손은 IGSE(Improved Generalized Steinmetz Equation) 방식을 사용해 계산한다[9]. 이는 식 (3)과 같이 표현되고  $\alpha, \beta, K$ 는 코어의 물질 계수를 나타낸다.

$$P_{Core} = K \cdot f^\alpha \cdot \Delta B^\beta \cdot (D^{1-\alpha} + (1-D)^{1-\alpha}) \quad (3)$$

목적함수  $f_1, f_2$ 는 식 (4),(5)와 같이 표현된다.

$$\min f_1 = P_{Winding} + P_{Core} \quad (4)$$

$$\min f_2 = N_{Core} \cdot l_W \cdot l_D \cdot (l_g + l_H) \quad (5)$$

식(5)에서  $N_{Core}$ 는 코어의 병렬 수,  $l_W$ 는 코어의 가로 길이,  $l_D$ 는 코어의 세로 길이,  $l_g$ 는 코어의 공극 길이,  $l_H$ 는 코어의

높이 길이이다.

### 3-2 설계 변수, 모집단, 세대 수 설정

설계 변수  $V_1$ 은 전류밀도,  $V_2$ 는 공극으로 설정한다. 모집단은 한 세대에 진화하는 개체의 수를 나타내며, 문제의 복잡성에 따라 모집단의 크기가 결정된다. 세대 수는 NSGA-II에서 진행되는 세대의 총수를 나타내며, 세대 수가 증가할수록 더 다양하고 설계 정확도가 높은 해를 찾을 수 있지만 설계 시간이 증가할 수 있다.

### Step 4. 초기화

랜덤의 설계 변수 값에 따라 와이어와 코어, 턴 수 및 실제 공극을 계산한다.

#### 4-1 리프 와이어 선정

리프 와이어는 동작 전류와 전류 밀도 값으로 선정한다. 이는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$A_{w.p} = \frac{I_{p.r}}{J_{max}}, A_{w.s} = \frac{I_{s.r}}{J_{max}} \quad (6)$$

#### 4-2 코어 선정

와이어가 선정되면 고주파 변압기의 코어 크기를 선정한다. 코어를 선정하기 위한 이론적인 코어의 단면적 및 창 면적은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$W_{a.th} = \frac{n_1 \cdot A_{w.p} + n_2 \cdot A_{w.s}}{K_u}, A_{c.th} = \frac{L_m \cdot I_{1.peak}}{n_1 \cdot B_{max}} \quad (7)$$

이론적으로 계산된 코어의 단면적 및 창 면적 값의 곱을 식 (8)과 같이 표현되고, 식 (8)보다 큰 코어를 선정한다.

$$W_{a.th} \cdot A_{c.th} = \frac{(n_1 \cdot A_{w.p} + n_2 \cdot A_{w.s}) \cdot (L_m \cdot I_{1.peak})}{K_u \cdot n_1 \cdot B_{max}} \quad (8)$$

#### 4-3 턴 수 및 공극 선정

코어가 선정되면 실제 코어의 단면적 크기로 1차측 턴 수를 계산한다. 이는 식 (9)와 같다.

$$N_p = \frac{L_m \cdot I_{1.peak}}{A_c \cdot B_{max}} \quad (9)$$

식 (9)를 통해 계산된 1차측 턴 수는 소수점으로 계산됨으로 올림 또는 내림으로 선정한다. 이에 따라 설계자가 원하는 자화 인덕턴스값이 변할 수 있으므로, 인덕턴스값을 맞추기 위해 공극을 조절한다. 공극은 식 (10)과 같이 표현된다. 이때, 비투

자을  $\mu r$ 은 자속의 평균 이동 경로  $l_c$ 보다 매우 크다.

$$l_g = \frac{\mu_0 \cdot A_c \cdot N_p^2}{L_m} \quad (10)$$

앞서 선정된 와이어, 코어, 턴 수 및 공극을 통해 목적함수 값을 도출한다. 이는 모집단 크기만큼 반복한다.

**Step 5. Elitism 전략**

Elitism 전략을 통해 초기 값의 해를 분류한다.

**Step 6. 알고리즘 과정**

유전 알고리즘을 통해 최적해를 탐색하는 과정이다. 이는 세대 수만큼 반복하고 Elitism 전략으로 우수한 해를 다음 세대로 넘겨줌으로 설계 정확도를 높일 수 있다.

**Step 7. Pareto Set 도출**

알고리즘 결과로 Pareto Set을 도출한다.

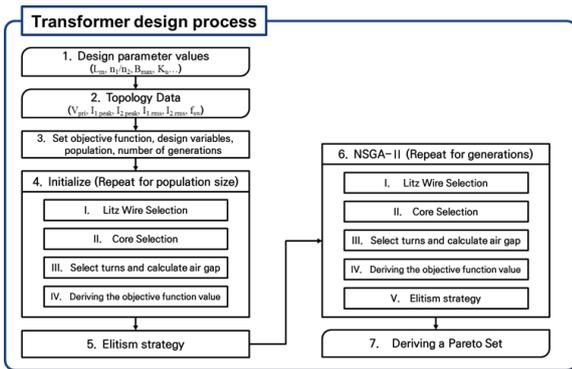


그림 5 제안하는 고주파 변압기 설계 과정  
Fig. 5 Proposed High-Frequency Transformer Design Process

**3. 설계 시간 및 정확도 검증**

그림 6는 LLC 하프 브릿지 컨버터 회로를 나타낸다. LLC 하프 브릿지 컨버터의 고주파 변압기를 제안하는 고주파 변압기 설계 방법을 통해 설계를 진행했다. 각 설계 조건 값은 표 1에 나와 있다. 설계는 Matlab을 통해 진행했다.

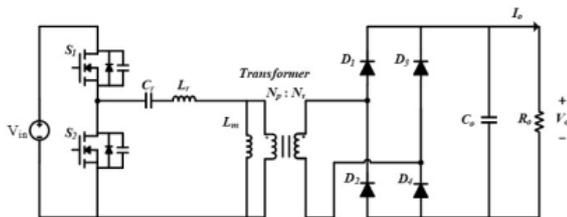


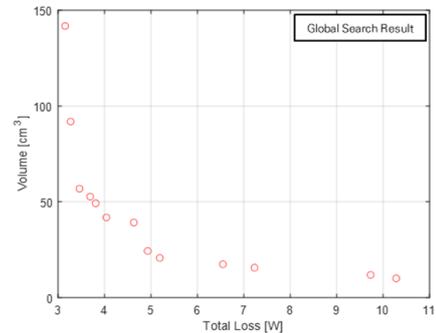
그림 6 LLC 하프 브릿지 컨버터  
Fig. 6 LLC Half-Bridge Converter

표 1 설계 파라미터 값

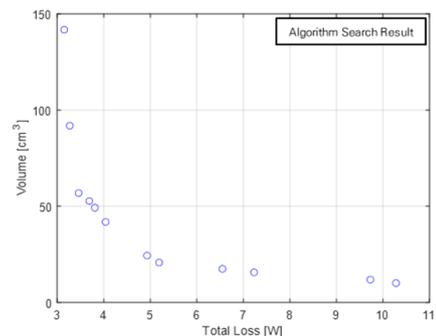
Table 1 Design Parameters

Parameter	Value
Output Power ( $P_o$ )	500[W]
Resonant Frequency ( $f_r$ )	300[kHz]
Turn Ratio ( $n_1/n_2$ )	1.5
Magnetizing Inductance ( $L_m$ )	30[uH]
Maximum magnetic flux density ( $B_{max}$ )	200[mT]
Current density range ( $J_{max}$ )	250~350[A/cm <sup>2</sup> ]
Air-Gap range ( $l_g$ )	0.5~2[mm]

그림 7은 Matlab의 설계 결과를 나타낸다. 그림 6(a)는 전역 탐색을 통해 얻은 Pareto Solution을 나타내고, 그림 6(b)는 제안한 알고리즘을 통해 얻은 Pareto Solution이다. 전역 탐색의 결과는 Pareto Solution 수가 13개이며, 설계 시간은 258초가 소요되었고, 알고리즘을 통해 얻은 결과는 Pareto Solution 수가 12개이며, 설계 시간은 76초가 걸렸다. 이를 통해 제안된 방법을 활용하여 최적 설계점의 높은 정확도를 유지하면서도 설계 시간을 182초(70.5%) 단축할 수 있었다.



(a)



(b)

그림 7 Matlab 설계 결과 (a) 전역 탐색 결과, (b) 알고리즘 결과  
Fig. 7 Matlab Design Results (a) Global Search Results, (b) Algorithm Search Results

설계 집단수가 커지면 알고리즘의 효과는 더욱 크게 나타난다. 그림 8은 설계 집단 수에 따른 설계 시간 비교를 나타낸 그림이다.

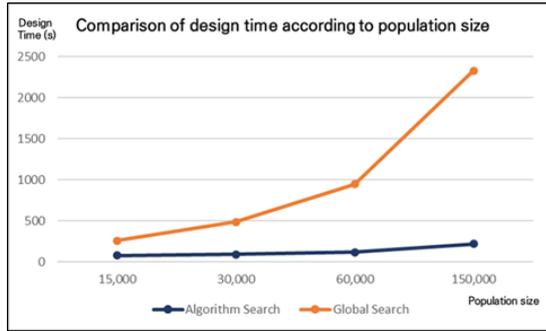


그림 8 설계 집단수에 따른 설계 시간 비교  
Fig. 8 Comparison of design time according to population size

설계 집단수가 15,000개인 경우 설계 시간은 182초 차이를 보이고, 설계 집단수가 150,000개인 경우 설계 시간은 2,110초 차이를 보인다. 따라서 설계 집단수가 많을수록 설계 시간 가속화가 증가한다.

### 4. 최적 설계점 검증

설계 결과로 얻은 Pareto Solution, 즉 최적 설계점을 검증하기 위해 비교군 2개를 선택했다. 비교군 1은 최적 설계점과 손실이 유사하고 부피 차이가 큰 경우이며, 비교군 2는 최적 설계점과 부피가 유사하고 손실 차이가 큰 경우로 선정했다. 그림 9은 선택한 최적 설계점과 비교군 1, 2의 위치를 시각적으로 보여주는

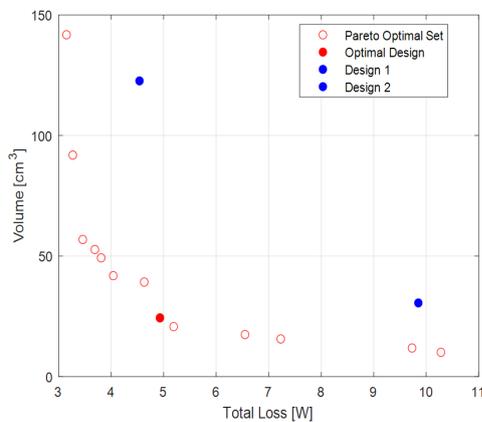


그림 9 검증을 위해 선택한 비교군 및 최적 설계 지점  
Fig. 9 The comparison group and optimal design point for validation

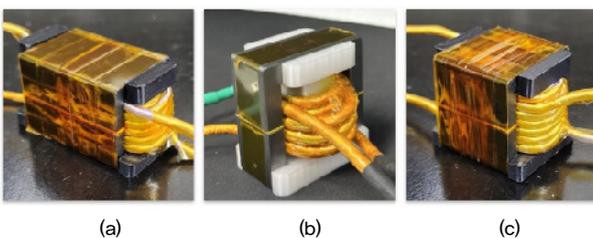


그림 10 제작한 고주파 변압기 (a) 최적 설계점 (b) 비교군 1 (c) 비교군 2  
Fig. 10 Manufactured High-Frequency Transformer (a) Optimal Design Point, (b) Comparison Group 1, (c) Comparison Group 2

표 2 제작된 변압기의 파라미터값 (a) 최적 설계점 (b) 비교군 1 (c) 비교군 2  
Table 2 Parameter Values of the Manufactured Transformer (a) Optimal Design Point, (b) Comparison Group 1, (c) Comparison Group 2

	(a)	(b)	(c)
Parameter	Value	Value	Value
Core Data	E25/13/7	E65/32/27	E32/16/9
Core Parallel Number	5	1	3
Turn Ratio	1.5	1.5	1.5
Magnetizing Inductance	20[uH]	20.02[uH]	20[uH]
Leakage Inductance	0.92[uH]	0.94[uH]	0.96[uH]
Volume	24.7cm <sup>3</sup>	118cm <sup>3</sup>	30.6cm <sup>3</sup>

그림이다. 그림 10는 선정된 변압기를 제작한 실물 사진이다. 또한 표 2는 선정된 변압기의 파라미터를 나타낸다.

그림 11은 최적 설계점을 검증하기 위한 실험 환경을 보여준다. 실험 조건은 표 3에 상세히 나와 있다. 실험은 다른 조건은 모두 동일하게 유지하면서, 제작한 3가지 고주파 변압기만을 교체하여 LLC 공진형 컨버터의 총 손실을 비교했다.

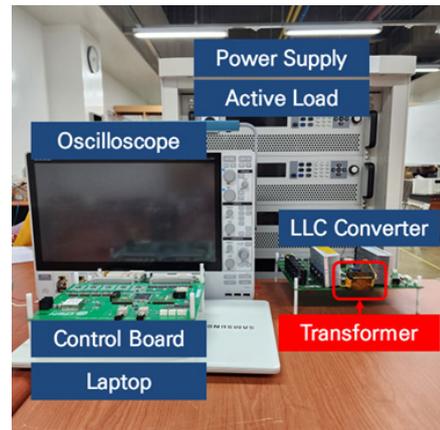


그림 11 실험 환경  
Fig. 11 Experimental environment

표 3 실험 조건  
Table 3 Experimental conditions

Parameter	Value
Output Power ( $P_o$ )	500[W]
Input Voltage ( $V_i$ )	240[V]
Output Voltage ( $V_o$ )	100[V]
Resonant Frequency ( $f_r$ )	300[kHz]
Switching Frequency ( $f_{sw}$ )	250[kHz]
Magnetizing Inductance ( $L_m$ )	20[uH]
Resonant Inductance ( $L_r$ )	9.4[uH]
Resonant Capacitance ( $C_r$ )	30[nF]

그림 12은 최적으로 설계된 고주파 변압기와 비교군 1을 비교한 사진을 보여준다. 실험 결과에 따르면, 최적으로 설계된 변압기는 부피가 79% 감소했지만 컨버터 손실은 동일하게 유지되었다. 그림 13는 최적 설계된 변압기와 비교군 1의 파형을 비교한 그림이다. 공진전류가 동일하기 때문에 변압기의 성능이 동일함을 확인할 수 있다.

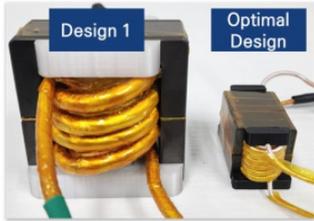


그림 12 최적 설계와 비교군 1 비교 사진  
Fig. 12 Comparison between Optimal Design and Comparison Group 1

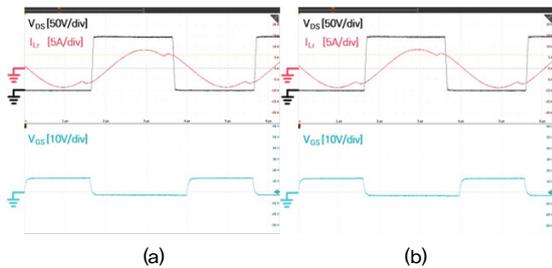


그림 13 실험 파형 비교 (a) 최적 설계점, (b) 비교군 1  
Fig. 13 Experimental Waveform Comparison (a) Optimal Design, (b) Comparison Group 1

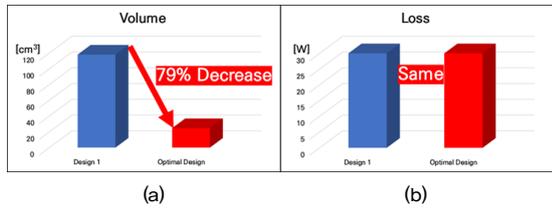


그림 14 목적함수 값 비교 (a) 변압기 부피, (b) 컨버터 손실  
Fig. 14 Objective Function Value Comparison (a) Transformer Volume, (b) Converter Loss

그림 15은 최적으로 설계된 고주파 변압기와 비교군 2을 비교한 사진을 보여준다. 실험 결과에 따르면, 최적으로 설계된 변압기는 부피가 19% 감소하고 컨버터 손실은 9% 감소했다.

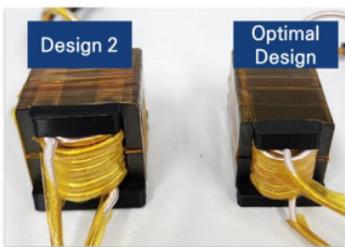


그림 15 최적 설계와 비교군 2 비교 사진  
Fig. 15 Comparison between Optimal Design and Comparison Group 2

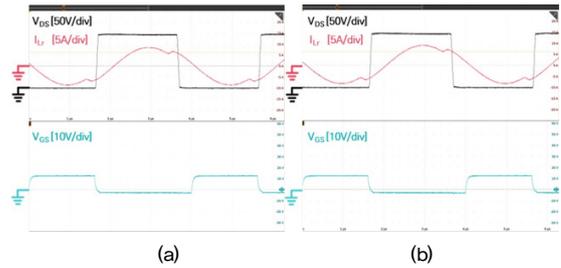


그림 16 실험 파형 비교 (a) 최적 설계점, (b) 비교군 2  
Fig. 16 Experimental Waveform Comparison (a) Optimal Design, (b) Comparison Group 2

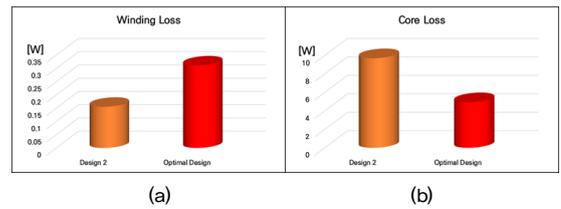


그림 17 변압기 손실 크기 비교 (a) 동손 (b) 철손  
Fig. 17 Transformer Loss Comparison (a) Winding Loss, (b) Core Loss

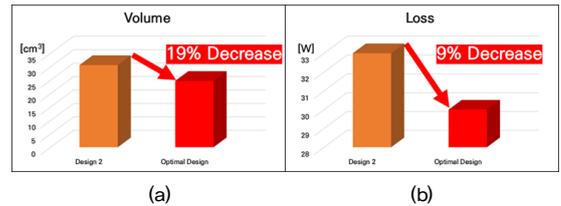


그림 18 목적 함수 값 비교 (a) 변압기 부피, (b) 컨버터 손실  
Fig. 18 Objective Function Value Comparison (a) Transformer Volume, (b) Converter Loss

컨버터 손실 감소는 최적 설계점의 변압기의 코어 손실의 감소를 통해 이루어진다. 그림 17은 최적 설계점과 비교군 2의 변압기 손실 비교를 보여준다. 그림 16는 최적 설계된 변압기와 비교군 2의 파형을 비교한 그림이다. 공진전류가 동일하기 때문에 변압기의 성능이 동일함을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

기존 고주파 변압기의 설계 방법은 높은 정확도를 갖추고 있지만, 설계에 소요되는 시간이 상당히 길다는 한계가 있다. 이러한 문제에 대한 대안으로 NSGA-II 알고리즘을 도입한 설계 방법을 제안했습니다. 이 방법은 Elitism 전략을 적용하여 신속하게 최적 설계점을 찾아내는 특징을 갖추고 있다. NSGA-II 알고리즘을 적용한 결과, 설계 집단수가 15,000개인 경우 설계 시간이 전역 탐색을 기반으로 한 결과와 비교했을 때 182초 단축되었다. 또한, 설계 집단 수를 150,000개로 늘리는 경우 2,110초의 단축 효과를 나타냈다. 이를 통해 설계 집단수가 증가함에 따라 설계 시간이 가속화됨을 확인했다. 또한, 제한한 설계 방법을 통해 얻어지는 최적 설계점의 유효성을 실험을 통해 검증했다. 실험은 모든 조건을 동일하게 유지하면서, 제작한 3가

지 고주파 변압기만을 교체하여 LLC 공진형 컨버터의 총 손실을 비교했다. 비교군 1에서는 부피를 79% 감소시키면서도 동일한 성능을 유지할 수 있었고, 비교군 2에서는 부피와 손실이 각각 19%와 9% 감소하면서도 성능이 동등하게 유지되었습니다. 이러한 결과는 제안된 방법이 높은 효율성과 성능을 동시에 만족한다는 것을 확인했다.

#### Acknowledgements

본 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(20212020800020, 통합형 최적설계 플랫폼 기반 초고효율 전력변환시스템 개발)과 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018201010650A)

#### References

- [1] Zeng, G. Zhang, S. S. Yu, B. Zhang, and Y. Zhang, "LLC resonant converter topologies and industrial applications &#8212; A review," in Chinese Journal of Electrical Engineering, vol. 6, no. 3, pp. 73-84, Sept. 2020.
- [2] H. Huang, "Designing an LLC Resonant Half-Bridge Power Converter," 2010 Texas Instruments Power Supply Design Seminar, pp. 1-27, 2010.
- [3] R. Pethov, "Optimum Design of a High-Power, High-Frequency Transformer," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 11, no. 1, pp. 33-45, Jan 1996.
- [4] S. Yang, S. Abe and M. Shoyama, "Design consideration of flat transformer in LLC resonant converter for low core loss," The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA, pp. 343-348, 2010.
- [5] J. Zhang, W. G. Hurley, and W. H. Wolfle, "Gapped Transformer Design Methodology and Implementation for LLC Resonant Converters," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 52, no. 1, pp. 342-350, Jan.-Feb. 2016.
- [6] D. Ahmed and L. Wang, "Optimal Area-Product Model (OAPM) Based Non-Iterative Analytical Design Methodology for Litz-Wired High-Frequency Gapped- Transformer (LHFGT) in LLC Converters," in IEEE Access, vol. 8, pp. 18134-18148, 2020.
- [7] A. Garcia-Bediaga, I. Villar, A. Rujas, L. Mir, and A. Ruf er, "Multiobjective Optimization of Medium-Frequency Transformers for Isolated Soft-Switching Converters Using a Genetic Algorithm," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 4, pp. 2995-3006, April 2017.
- [8] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," in IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, April 2002.
- [9] J. Muhlethaler, J. Biela, J. W. Kolar, and A. Ecklebe, "Improved Core-Loss Calculation for Magnetic Components Employed in Power Electronic Systems," in IEEE Transactions

on Power Electronics, vol. 27, no. 2, Feb. 2012.

#### 저자소개



**차명준 (Myeong-Jun Cha)**

He received the B.S. degree in electronic engineering from Hanbat National University, Daejeon, South Korea, in 2022, where he is currently pursuing the Ph.D. degree with the Energy Power Electronics Control System Laboratory, Hanyang University, Seoul. His research interests are high frequency transformer in dc-dc converter and high-density and high-efficiency power converters.



**박수성 (Su-Seong Park)**

He received the B.S. degree in electrical engineering from Hanyang University, Seoul, South Korea, in 2020, where he is currently pursuing the Ph.D. degree with the Energy Power Electronics Control System Laboratory Hanyang University, Seoul. His research interests include the design of high-density, high-efficiency power converters, the control of distributed power converter systems, renewable energy, and grid-connected inverter and microgrids.



**전선호 (Seon-Ho Jeon)**

He received the B.S. and M.S. degrees in electronic and computer engineering from Hanyang University in 2012 and in Hanyang University, Seoul, Korea, he is currently working toward a PhD degree at the Energy Power Electronics Control System Laboratory, Hanyang University, Seoul. His research interests include the design of high-density and high-efficiency power converters.



**김래영 (Rae-Young Kim)**

He received the B.S. and M.S. degrees in electrical engineering from Hanyang University, Seoul, South Korea, in 1997 and 1999, respectively, and the Ph.D. degree from the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, USA, in 2009. Since 2010, he has been with Hanyang University, where he is currently a Professor with the Department of Electrical and Biomedical Engineering. His research interests include the design of high-power density converters and the distributed control of power converters for modular power converter systems in applications of renewable energy, wireless power transfer, microgrids, and motor drives.