

# 비자성체 용기 가열을 위한 Induction Cooker 공진 네트워크 설계

장은수, 박상민, 주동명, 이병국<sup>†</sup>  
성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

## Resonant Network Design of Induction Cooker for Heating Nonmagnetic Vessel

Eun Su Jang, Sang Min Park, Dongmyoung Joo, and Byoung Kuk Lee<sup>†</sup>  
Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

### ABSTRACT

본 논문에서는 비자성체 용기 가열이 가능한 Induction Cooker의 공진 네트워크를 설계한다. 용기 재질에 따른 워킹 코일의 R, L 파라미터를 고려한 최적 동작 주파수 및 커패시턴스를 선정하여 시스템을 설계한다. 또한 설계한 시스템의 가열 성능을 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증한다.

### 1. 서론

기존 Induction Cooker는 자성체 용기 가열을 목적으로 제어 알고리즘 및 공진 네트워크가 설계되었기 때문에 비자성체 용기 가열이 제한된다. 그러나 상당 수 가정용 용기는 비자성체인 알루미늄 용기이기 때문에 자성체 용기 및 비자성체 용기의 가열이 모두 가능한 Induction Cooker 설계 기술이 필요하다.

자성체 및 비자성체 용기 가열이 모두 가능한 Induction Cooker의 워킹 코일 설계 시 절연 내량, 턴 수, 동작 주파수 및 커패시턴스 등을 고려하여야 한다. 알루미늄 용기는 주철 용기 대비 25.5% 수준의 낮은 비저항과 0.01% 수준의 비투자율을 가지므로 동일 전력을 내기 위해 큰 전류가 필요하다. 따라서 워킹 코일 양단에 걸리는 전압이 자성체 용기 가열할 때에 비해 크게 증가한다<sup>[1]</sup>. 따라서 워킹 코일 설계 시 전류 및 전압 내량을 고려하고, 용기별 R, L 파라미터 분석을 통해 목표 전력을 출력하기 위한 최적 동작 주파수 및 커패시턴스를 선정해야 한다. 또한 하드웨어 설계 단계에서 용기 재질 별로 상이한 인덕턴스를 보상하기 위해 전력변환장치의 공진 주파수를 변경할 수 있는 방법을 구현해야 한다<sup>[1]</sup>.

본 논문에서는 자성체 용기와 비자성체 용기의 가열이 가능한 Induction Cooker의 워킹 코일을 설계하고 이에 따른 용기 부하 모델링을 통해 최적 동작 주파수 및 커패시턴스를 고려한 전력변환장치의 공진 네트워크를 설계한다. 그리고 시뮬레이션 및 실험을 통해 시스템의 가열 성능을 검증한다.

## 2. 전력변환장치 공진 네트워크 설계

### 2.1 워킹 코일 설계

비자성체 용기 가열 시 용기의 낮은 등가 저항으로 인해 목표 전력을 출력하는데 필요한 전류가 크고, 워킹 코일 양단에 높은 전압이 인가된다. 기존에 사용되고 있는 Induction Cooker의 워킹 코일은 그림 1의 셀프본딩 리츠 와이어를 사용한다.



(a) 셀프본딩 리츠 와이어 (b) 테프론 튜빙 리츠 와이어

그림 1 셀프본딩 및 테프론 튜빙 리츠와이어  
Fig. 1. Self bonding and teflon tubing litz wire.

셀프본딩 리츠 와이어가 비자성체 용기 가열에 사용될 경우 코일 간에 걸리는 전압을 견디지 못하고 절연이 파괴된다. 따라서 코일 간 걸리는 전압을 충분히 견딜 수 있는 튜빙된 리츠 와이어를 사용해야 하며, 용기 등가 저항 및 발열 전력을 증가시키기 위해 워킹 코일의 턴 수를 크게 설계한다<sup>[2]</sup>.

### 2.2 공진 주파수 및 커패시턴스 설계

전력변환장치의 공진 네트워크는 R L부하로 등가화 되는 워킹 코일에 커패시터를 직렬 연결하여 가장 간단하게 구성할 수 있는 SRC (Series Resonant Converter) 토폴로지로 구성한다. 설계한 워킹 코일 위에 자성체 및 비자성체 용기를 각각 올려 두었을 때, 워킹 코일 측에 등가화 된 R, L 파라미터는 그림 2와 같다. 용기 재질 별 비저항 및 투자율 등의 특성으로 인해 등가 R, L이 다르게 나타나며 각각의 파라미터는 주파수에 따라 변화하는 것을 볼 수 있다<sup>[3]</sup>.

공진 주파수 및 커패시턴스는 측정된 등가 R, L 파라미터를 고려하여 설계한다. 그림 1과 같이 용기 재질에 따른 등가

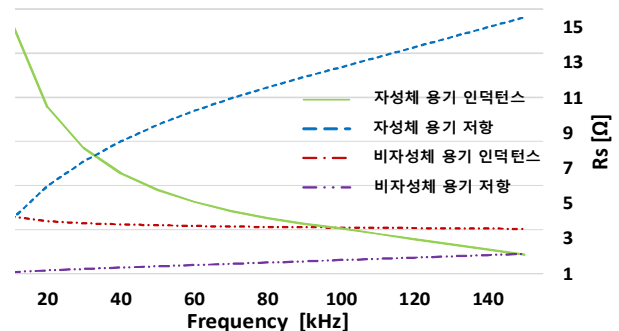


그림 2 주파수 변화에 따른 용기 별 R,L 파라미터  
Fig. 2. Parameters of vessel according to frequency variation.

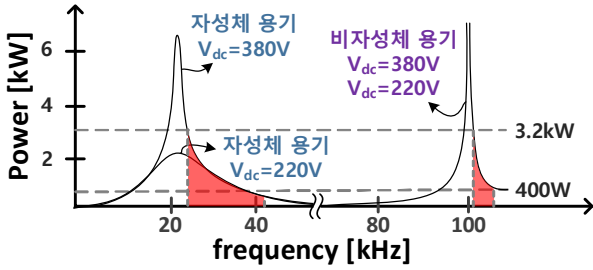


그림 3 동작 주파수에 따른 전력 곡선  
Fig. 3. Power curve according to switching frequency variation.

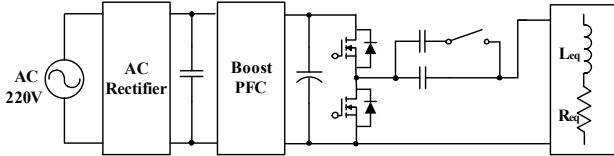


그림 4 시스템 구성  
Fig. 4. System configuration of Induction cooker.

표 1 시스템 파라미터  
Table 1 System parameter

Parameters	Value [Unit]	
	Mag.	Nonmag.
DC-Link Voltage, $V_{dc}$	380 [V]	
Capacitance, $C$	22 [nF]	300 [nF]
Max. Input Power, $P_{in\_max}$	3.2 [kW]	2.6 [kW]
Switching frequency, $f_{sw\_max}$	26.6 [kHz]	105.4 [kHz]
Min. Input Power, $P_{in\_min}$	400 [W]	400 [W]
Switching frequency, $f_{sw\_min}$	47 [kHz]	109 [kHz]

인덕턴스가 서로 다르게 나타나기 때문에 표 1과 같이 각각의 커패시턴스를 설계하여 공진 네트워크를 구성하고 용기 등가 저항을 고려하여 동작 주파수를 선정해야 한다. 그림 3은 그림 2와 표 1의 파라미터로 구성된 공진 네트워크의 동작 주파수에 따른 전력 곡선을 나타내며 목표 출력을 만족하는 용기별 동작 주파수 범위는 그림 3에 표시한 것과 같다. 자성체 용기의 경우 해당 동작 주파수 영역에서의 등가 저항이 크기 때문에 SRC 특성상 식 (1)과 같이 목표하는 전력의 출력이 불가능하다. 따라서 그림 4와 같이 전력변환장치 전단에 Boost PFC (Power Factor Correction)를 통해 입력 전압을 380V로 승압하여 목표 전력을 만족하도록 한다. 비자성체 용기의 목표 전력을 내기 위한 전류가 크기 때문에 그림 2와 같이 등가 저항을 증가시키기 위해 동작 주파수를 높게 선정해야 한다.

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (1)$$

### 2.3 용기 가열 시험

자성체 용기 가열 시 인버터 출력 전압 및 전류의 위상은 높은 등가 저항으로 인해 공진 주파수에 가깝게 동작한다. 반면 비자성체 용기 가열 시에는 등가 저항이 작아 그림 4에서 볼 수 있듯이 동작 주파수 영역이 공진 주파수와 많이 떨어져 있어 충분한 위상 여유를 갖는다. 또한 용기 가열 시 워킹 코일의 온도 상승에 따라 등가 R, L 파라미터가 변화하기 때문에 위상이 증가하여 전력이 감소하므로 일정한 전력을 유지하도록 제어해야 한다.

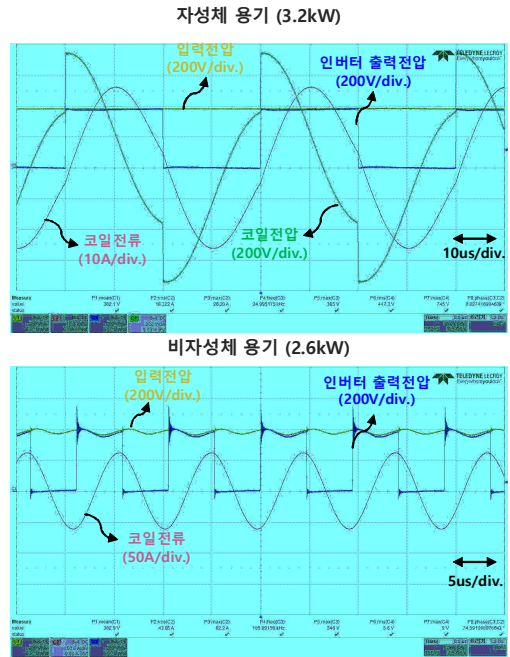


그림 5 자성체 용기 및 비자성체 용기 가열 시험  
Fig. 5. Boiling test of magnetic and nonmagnetic vessel.

그림 5는 설계한 파라미터를 바탕으로 하드웨어를 제작하여 각 용기 재질 별로 가열 시험을 진행한 결과 파형이다. 용기 재질 별 공진 네트워크의 출력 전류는 ZVS (Zero Voltage Switching)로 정상 동작 하며 자성체 용기가열 시 최대 전력 조건에서 18.32 A<sub>rms</sub>, 최소 전력 조건에서 4.61 A<sub>rms</sub>가 흐르고, 비자성체 용기 가열 시에는 최대 전력 조건에서 43.85 A<sub>rms</sub>, 최소 전력 조건에서 18.57 A<sub>rms</sub>가 흐르는 것을 확인 하였다. 그리고 설계 목표 33 kW, 26 kW를 정상적으로 출력하는 것을 확인하였다.

### 3. 결론

본 논문은 비자성체 용기의 가열이 가능한 Induction Cooker의 공진 네트워크를 설계하였다. 비자성체 및 자성체 용기의 가열이 가능하도록 워킹 코일을 설계하였고, 이에 따른 각 용기 재질별 등가 R, L 파라미터를 바탕으로 최적 동작주파수 및 커패시턴스를 선정하였다. 또한 설계한 결과를 시뮬레이션을 통하여 검증하였으며 하드웨어 제작 및 실험을 통해 설계한 시스템의 가열 성능을 검증하였다.

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20164030200980)

### 참고 문헌

- [1] I. Milan, "Series resonant inverter with selective harmonic operation applied to all metal domestic induction heating" *IET Power Electron*, 2011, Vol. 4, No. 5, pp. 587-592.
- [2] 권경안, "비자성 금속용기 가열 유도 조리기", 대한전자공학회 학술대회 논문집, 1995. 6, pp. 301-302.
- [3] 장은수, "유도가열방식 세정장치용 전력변환장치 용량 선정 및 부하 분석", 전력전자학술대회 논문집, 2016. 11, pp. 37-38.