

# 비자성체 용기 가열을 위한 Induction Cooker 공진 네트워크 설계 및 검증

장은수<sup>1</sup>, 박상민<sup>1</sup>, 주동명<sup>1</sup>, 이병국<sup>†</sup>

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

Eun-Su Jang<sup>1</sup>, Sang-Min Park<sup>1</sup>, Dong-Myoung Joo<sup>1</sup>, and Byoung-Kuk Lee<sup>†</sup>

### Abstract

This paper proposes a procedure for designing a resonant network for induction cookers that enables the induction heating of magnetic and non-magnetic vessels. In order to design such network, the range of operating frequency must be determined according to the material of the vessels by measuring several parameters, such as equivalent resistance and inductance, which are reflected in the working coil of the vessels. Through this process, the capacitance of the resonant capacitor is determined. The PSIM simulation and experiment results verify the feasibility of the proposed design and the heating performance of the designed resonant network.

**Key words:** Half bridge control, Half bridge converter, IH(Induction Heating), Nonmagnetic vessel, Resonant converter, Resonant network design

### 1. 서 론

기존 Induction Cooker는 Induction 전용 용기, 비자성체 용기 밑면에 철가루를 도포한 이중 용기 등의 자성체 용기 가열을 목적으로 제어 알고리즘 및 공진 네트워크가 설계되어있다. 하지만 상당 수 가정에서는 알루미늄과 같은 비자성체 용기를 주로 사용하므로 기존 Induction Cooker를 통한 용기 가열이 제한되어 용기의 사용성이 낮아지는 단점을 갖는다. 따라서 Induction Cooker의 용기 사용성 증대를 위해 용기를 판별 및 용기 재질에 따라 공진 네트워크를 변경하여 자성체뿐만 아니라 비자성체 용기도 모두 가열이 가능한 시스템의 설계 기술이 필요하다.

자성체 및 비자성체 용기 가열이 모두 가능한 Induction Cooker 공진 네트워크의 설계 고려사항은 워킹 코일 절

TABLE I  
COMPARISON OF CHARACTERISTICS OF  
ALUMINIUM AND CAST IRON

Parameter [Unit]	Value	
	Fe	Al
Specific Resistance [ $\Omega \cdot m$ ]	$9.8 \times 10^{-18}$	$2.5 \times 10^{-18}$
Relative Permeability [-]	100	1

연 내량 및 턴 수, 용기 재질에 따른 전력변환장치의 동작 주파수, 공진 커패시터의 커패시턴스 등이 있다. 비저항, 비투자율과 같은 물질의 고유 특성은 용기의 등가 저항 및 등가 인덕턴스에 영향을 미친다. 표 1에서 볼 수 있듯이 비자성체인 알루미늄의 경우 주철에 비하여 25.5% 수준의 낮은 비저항을 갖는다. 또한 0.01% 수준의 낮은 비투자율을 가진다. 비자성체의 낮은 비저항 특성으로 인해 워킹코일에 투영되는 용기의 등가 저항은 자성체 용기에 비해 작게 나타난다. 이에 따라 자성체 용기와 동일 전력으로 가열하기 위해 필요한 전류의 크기가 증가하며 워킹 코일 양단에 인가되는 전압이 자성체 용기를 가열할 때에 비해 크게 증가한다. 따라서 워킹 코일 설계 시 전압 및 전류 내량을 필수적으로 고려하여 설계하여야 한다<sup>[1]</sup>. 또한 각 용기별 등가 저항, 등가 인

Paper number: TKPE-2017-22-6-5

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

<sup>†</sup> Corresponding author: bkleesku@skku.edu, Dept. of Electrical Eng., Sungkyunkwan University  
Tel: +82-31-299-4581 Fax: +82-31-299-4612

<sup>1</sup> Dept. of Electrical Eng., Sungkyunkwan University  
Manuscript received Sep. 11, 2017; revised Oct. 10, 2017; accepted Nov. 3, 2017

— 본 논문은 2017년 전력전자학술대회 우수논문상 수상논문임

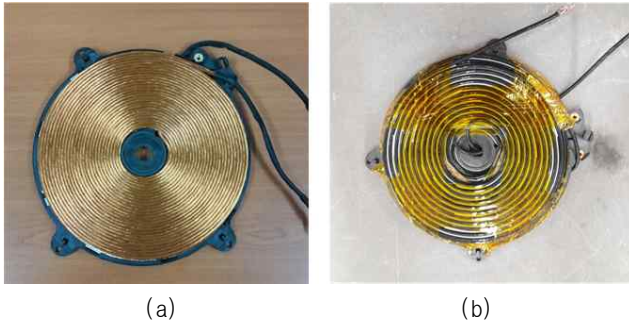


Fig. 1. Comparison of working coil. (a) Self bonding litz wire, (b) teflon tubing litz wire

덕턴스와 같은 파라미터의 측정 및 분석을 통해 목표 전력을 내기 위한 최적 동작 주파수 영역 및 커패시턴스를 선정하여 공진 네트워크를 설계해야 한다. 그리고 용기 재질에 따라 다른 비투자율 특성에 의해 용기의 등가 인덕턴스가 다르게 나타나므로 용기 재질 별 상이한 인덕턴스를 보상하기 위한 방식을 구현해야 한다.

이러한 방식은 용기의 재질을 판별하고 공진 네트워크를 변경함으로써 구현할 수 있으며, 대표적으로 커패시터 절체 방식, 이중 코일 방식 등이 있다. 커패시터 절체 방식 및 이중 코일 방식은 용기를 판별하여 공진 커패시터의 커패시턴스 혹은 워킹 코일의 턴 수를 변경함으로써 공진 네트워크를 다르게 구성하는 방식이다. 커패시터 절체 방식의 경우 이중 코일 방식에 비해 시스템의 부피를 상대적으로 작게 가져갈 수 있는 장점을 갖는다. 이중 코일 방식은 워킹 코일의 턴 수를 증가시켜 용기의 등가 저항을 증가시키는 방식이다. 따라서 최대 입력 전력 조건에서 워킹 코일에 흐르는 전류의 크기가 커패시터 절체 방식에 비해 작은 장점을 갖는다<sup>[2]-[3]</sup>. 본 논문에서는 커패시터 절체 방식을 사용하여 자성체 용기와 비자성체 용기의 가열이 가능한 Induction Cooker의 워킹 코일을 설계한다. 또한 용기 및 워킹 코일의 부하 모델링을 통해 전력 변환장치의 최적 동작 주파수 및 커패시턴스를 고려한 전력 변환 장치의 공진 네트워크를 설계한다. 그리고 시뮬레이션 및 실험을 통해 설계한 시스템의 가열 성능을 검증한다.

## 2. 전력변환장치 공진 네트워크 설계

### 2.1 워킹 코일 설계

기존 Induction Cooker에 사용되고 있는 워킹 코일은 그림 1 (a)의 셀프 본딩 리츠 와이어를 사용한다<sup>[4]</sup>. 자성체 용기의 경우 용기의 등가 저항이 비자성체 용기에 비해 상대적으로 크므로 워킹 코일 양단에 인가되는 전압을 충분히 견딜 수 있다. 하지만 비자성체 용기의 경우 용기 가열 시 낮은 등가 저항으로 인해 워킹 코일 양단에 걸리는 전압이 약 2500V 이상으로 증가하게 되어 절연이 파괴되는 현상이 발생한다. 따라서 워킹 코일 양

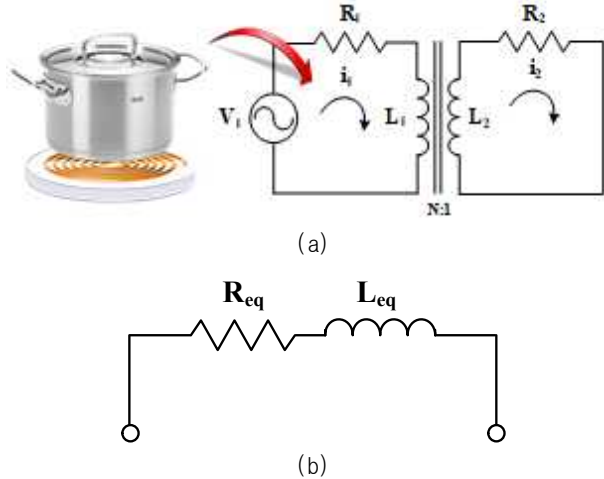


Fig. 2. Equivalent circuit of induction heating. (a) Equivalent circuit of working coil and vessel, (b) load modeling reflected in working coil

단에 걸리는 전압을 충분히 견딜 수 있는 그림 1 (b)와 같은 튜빙된 리츠 와이어를 사용해야 한다. 용기(2차 측)의 저항  $R_2$  및 인덕턴스  $L_2$ 와 워킹 코일(1차 측)의 저항  $R_1$  및 인덕턴스  $L_1$ 은 그림 2 (a)와 같은 모델로 나타낼 수 있으며 워킹 코일에 투영된 용기의 등가 저항 및 등가 인덕턴스는 R-L 부하로 모델링하여 그림 2 (b)와 같이 나타낼 수 있다<sup>[5]</sup>. 용기의 저항은 Skin depth에 의한 표면 저항으로 식 (1)과 같이 결합 계수  $k$ , 전기 저항률  $\rho$ , 비투자율  $\mu$ , 주파수  $f$ 를 통해 계산할 수 있으며, 2차 측에 흐르는 전류  $i_2$ 는 식 (2)와 같이 턴 수  $N$ 과 워킹 코일에 흐르는 전류  $i_1$ 을 통해 계산한다. 비자성체 용기의 경우 자성체 용기에 비해 상대적으로 낮은 등가 저항을 갖는다. 따라서 용기의 낮은 등가 저항을 보상해야 하며 식 (3)과 같이 발열 전력  $P$ 를 증가시키기 위해 워킹 코일의 턴 수를 충분히 크게 설계한다. 또한 그림 3과 같이 워킹 코일 밑면에 페라이트를 추가함으로써 워킹 코일에 투영되는 용기의 등가 저항을 증가시켜야 한다<sup>[6]-[7]</sup>.

$$R_2 = R_{vessel} = k\sqrt{\rho\mu f} \quad (1)$$

$$i_2 = Ni_1 \quad (2)$$

$$P = (Ni_1)^2 k\sqrt{\rho\mu f} \quad (3)$$

### 2.2 동작 주파수 및 커패시턴스 설계

본 논문에서는 가격 및 전체 시스템의 부피 등의 측면을 고려하여 전력변환장치의 구조를 Half-Bridge로 선정한다. 전력변환장치의 공진 네트워크는 R-L 부하로 등가화 되는 워킹 코일에 커패시터를 직렬로 연결하여 가장 간단하게 구성할 수 있는 SRC(Series Resonant Converter) 토폴로지로 구성하며 시스템의 구성은 그림

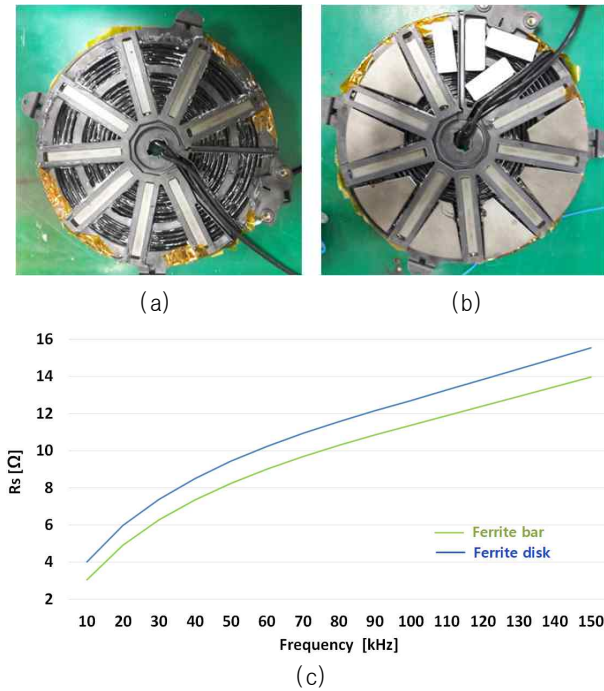


Fig. 3. Equivalent resistance according to ferrite structure. (a) bar type, (b) disk type, (c) Comparison of equivalent resistance according to ferrite structures

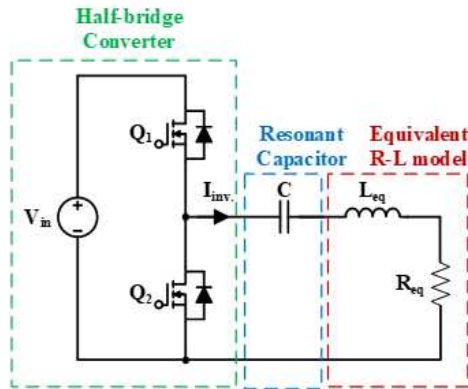


Fig. 4. Configuration of power conversion system for induction cooker

4와 같다. 그림 5는 용기 가열 시험에 사용한 알루미늄 및 주철 용기의 사진이며 설계한 워킹 코일 위에 주철 용기 및 알루미늄 용기를 각각 올려 두고 LCR 미터를 통해 등가 저항 및 등가 인덕턴스 파라미터를 측정한다. 그래프는 그림 6과 같다. 워킹 코일 측에 투영되어 나타나는 등가 저항 및 등가 인덕턴스 파라미터는 용기 재질 별로 다른 비저항 및 비투자율과 같은 고유 특성에 의해 상이하게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 식 (4)-(5) 및 그림 6을 통해 등가 저항은 주파수에 비례하여 증가하는 반면 등가 인덕턴스는 주파수가 증가할수록 감소하는 양상으로 나타나는 것을 볼 수 있다<sup>[8]</sup>.

공진 주파수 및 공진 커패시터의 커패시턴스는 그림 6의

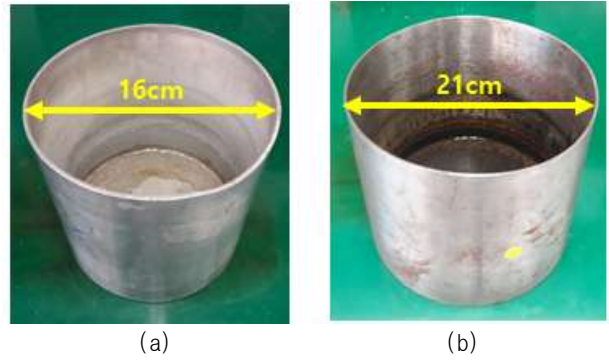


Fig. 5. Experimental vessel. (a) Aluminium vessel, (b) Cast iron vessel

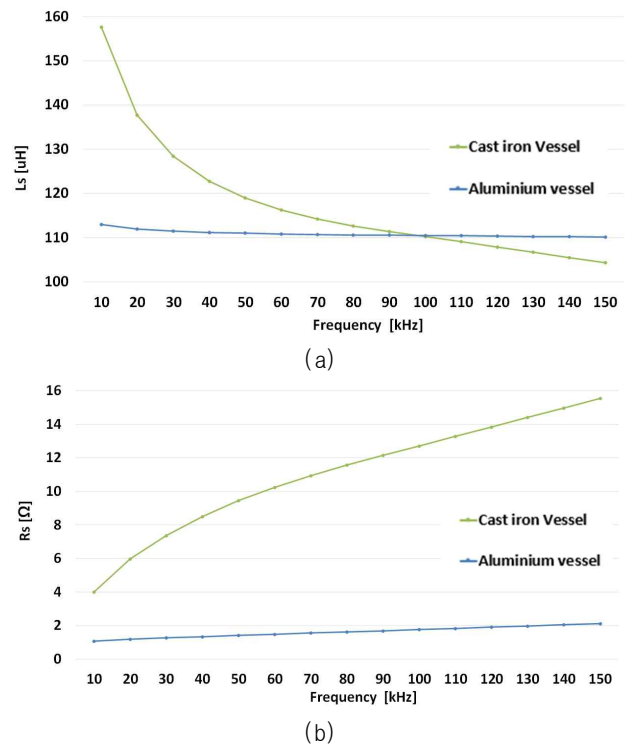


Fig. 6. Parameters of vessel according to frequency variation. (a) equivalent inductance, (b) equivalent resistance

$$R_{eq} = R_1 + \frac{(\omega M)^2 \cdot R_2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \quad (4)$$

$$L_{eq} = L_1 - \frac{(\omega M)^2 \cdot L_2}{R_2 + (\omega L_2)^2} \quad (5)$$

측정한 파라미터들을 고려하여 설계해야 한다. 서론에서 언급했던 바와 같이 용기 재질에 따라 등가 인덕턴스 및 등가 저항이 다르게 나타나기 때문에 용기의 재질 별로 가열이 용이한 최적의 동작 주파수 영역을 선정해야 한다. 이러한 방식은 용기 판별 과정 이후 릴레이

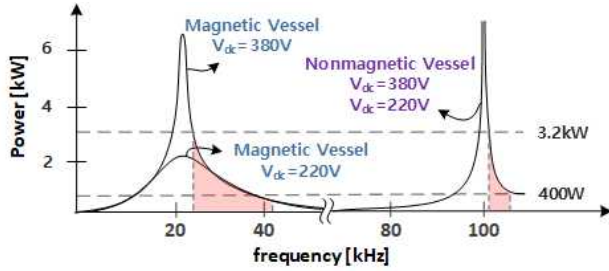


Fig. 7. Power curve according to switching frequency variation.

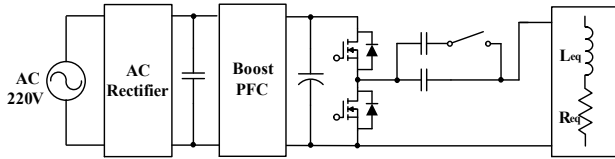


Fig. 8. System configuration of induction cooker.

를 통해 커패시터를 절체함으로써 구현할 수 있으며 용기의 재질은 입력 전력을 계측하여 주파수를 감소시킬 때 초기에 용기 재질에 따라 발생하는 전력 양상을 비교하여 판별한다. 본 논문에서 설계하는 Induction Cooker의 최대 입력전력은 자성체 용기를 가열하는 경우 가정용 전원을 고려하여 3.3kW, 비자성체 용기를 가열하는 경우 공진 전류의 크기를 제한하기 위해 2.6kW로 선정한다. 자성체 용기 가열 시 동작 주파수는 식 (6)과 같이 용기의 등가저항이 최대 입력전력을 만족할 수 있도록 낮은 주파수 영역에서 동작시켜야 한다. 반면 비자성체 용기를 가열하는 경우는 용기의 등가 저항이 낮기 때문에 높은 주파수 영역에서 동작하여 Skin depth에 의해 등가 저항을 증가 시켜 워킹 코일에 흐르는 전류를 줄여야 한다. 하지만 용기 등가 저항을 증가시키기 위해 동작 주파수를 너무 크게 선정하면 이에 따라 스위칭 손실이 증가하는 Trade Off를 가지므로 동작 주파수 선정에 유의해야하며 이러한 사항을 고려하여 설계한 파라미터는 표 2와 같다. 그림 7은 MATLAB을 통해 그림 6의 등가 인덕턴스 및 등가 저항과 선정한 커패시턴스를 바탕으로 공진 네트워크의 전력 곡선을 도시한 그림이다. SRC 토폴로지의 경우 부하 저항에 의해 공진 네트워크에 흐르는 전류의 크기가 제한되는 특징을 가진다. 자성체 용기는 그림 6에서 볼 수 있듯이 약 6-8Ω의 상대적으로 큰 등가 저항을 갖는다. 이에 따라 입력 전력 3.2kW를 만족하는 전류를 출력할 수 없으므로 식 (6)에 의해 DC-Link 전압을 증가시켜 설계 조건을 만족시켜야 한다. 따라서 DC-Link 전단에 Boost PFC(Power Factor Correction)를 통해 DC-Link 전압을 380V으로 승압시켜 전력변환장치를 동작하게 함으로써 최대 입력 전력 조건인 3.2kW를 만족하도록 설계해야하며 그림 8과 같이 Induction Cooker System를 구성한다.

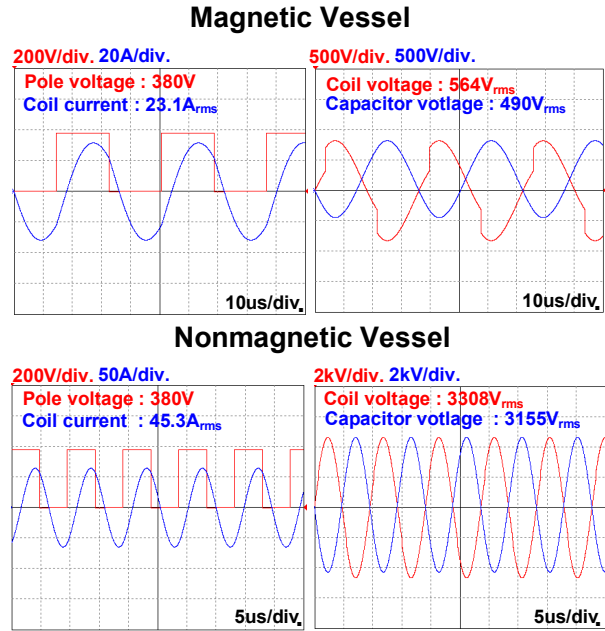


Fig. 9. Simulation verification.

TABLE II  
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, $f_{sw\_min}$	26.6 [kHz]	105.4 [kHz]
Min. Input Power, $P_{in\_min}$	400 [W]	400 [W]
Switching frequency, $f_{sw\_max}$	47 [kHz]	109 [kHz]

$$P_{max} = \frac{V^2}{R_{eq}} \quad (6)$$

### 3. 시뮬레이션 검증 및 용기 가열 시험

#### 3.1 시뮬레이션 검증

본 절에서는 본문 2에서 설계한 내용을 토대로 PSIM 시뮬레이션을 구현하여 설계한 공진 네트워크를 검증한다. 각 용기 재질 별 최대 입력 전력 조건을 만족할 때의 주요 파형은 그림 9과 같으며 주파수 가변에 따른 입력 전력 제어가 정상적으로 동작하는 것을 확인하였다. 최대 입력 전력 조건으로 시뮬레이션을 진행했을 때 워킹 코일에 흐르는 전류는 각각 23.1A<sub>rms</sub>, 45.3A<sub>rms</sub>로 비자성체 용기 가열 조건에서 동작 시 자성체 용기 가열 조건에 비해 약 2배 이상의 전류가 워킹 코일에 흐르는 것을 볼 수 있다. 또한 네트워크 동작 시뮬레이션을 통



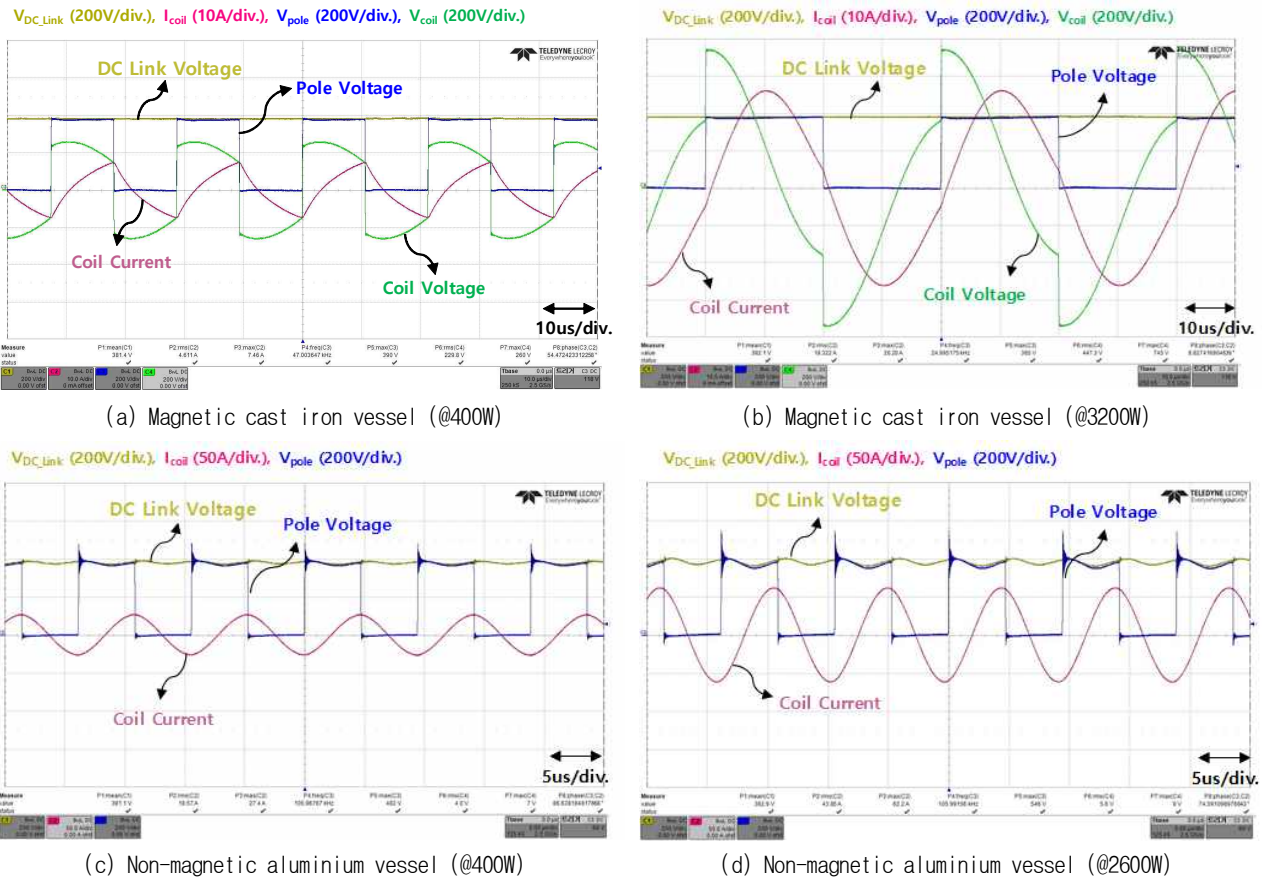


Fig. 10. Waveform of vessel heating test according to switching frequency variation.

해 비자성체 용기 가열 시 커패시터 및 워킹 코일 양단에 걸리는 전압이 자성체 용기를 가열 할 때에 비해 약 5배 이상 증가하게 되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 워킹 코일 뿐 만아니라 공진 커패시터를 설계할 때에도 커패시터 양단에 걸리는 고전압을 고려하여 충분한 절연 내압을 갖도록 설계하여야 한다.

또한 최대 입력 조건에서 자성체 용기 가열 동작 시 폴 전압과 코일 전류의 위상이 거의 동상에 가깝게 동작하므로 ZCS(Zero Current Switching) 구간으로 넘어 가지 않도록 제어가 필요하며, 비자성체 용기 가열 동작 시에는 높은 Q-factor에 따라 제어하는 주파수 범위가 약 4kHz 정도로 작아 주파수 가변에 따라 전력이 민감하게 제어되는 점을 유의해야 하며 추가적인 과전류 보호 제어가 필요하다.

### 3.2 용기 가열 시험

본 절에서는 시뮬레이션을 통해 검증한 내용을 토대로 하드웨어를 제작하여 용기 가열 및 가열 성능을 비교한다. 기존의 Induction Cooker와 용기의 가열성능 비교할 수 있는 Boil speed 측정 시험은 용기의 사이즈에 따라 표 3에 나타나있는 IEC(International Electrotechnical Commission Standard) 60335-2-9 규격 수 부하 양만큼

TABLE III  
QUANTITY OF WATER ACCORDING TO VESSEL SIZE

Diameter of cooking zone [mm]	Quantity of Water [L]
≤ 145	1
>145 and ≤ 180	1.5
>180 and ≤ 220	2
>220 and ≤ 280	2.5

의 물을 넣고 최대 전력 조건으로 상온에서 100°C까지 가열하는데 걸리는 시간을 측정하는 시험을 의미한다<sup>[9]</sup>. 각각의 용기에 해당하는 수 부하 양의 물을 넣고 가열 시험을 진행했을 때의 실험 과정은 그림 10과 같다. 주파수 가변을 통해 최소 입력 전력(400W) 및 최대 입력 전력(주철 용기 3.2kW, 알루미늄 용기 2.6kW)을 정상적으로 만족하는 것을 확인하였으며, 용기 가열 시 워킹 코일에 흐르는 전류는 주철 규격 용기 가열 시 18.32A<sub>rms</sub>, 알루미늄 규격 용기 가열 시 43.85A<sub>rms</sub>로 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증했던 결과와 거의 일치하게 나타나는 것을 확인하였다. 또한 표 3에 따라 각 용기 별 Boil speed를 측정할 시간은 주철 규격 용기에 2L의 수 부하 양 만큼의 물을 채워 가열할 때, 약 4분 05초가 걸렸으며 알루미늄 규격 용기에 1.5L의 수 부하 양 만큼의 물을

채워 가열 할 때는 약 4분 45초가 걸리는 것을 확인하였으며 기존 Induction Cooker 제품과 흡사한 성능을 가지며 자성체 및 비자성체 용기의 가열이 가능함을 확인하였다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 자성체 용기뿐만 아니라 비자성체 용기의 가열이 가능한 Induction Cooker의 공진 네트워크를 설계 하였다. 용기 재질에 따라 상이한 등가 저항을 고려하여 워킹 코일을 설계하였고, 이를 통해 워킹 코일 측에 투영된 각 용기 재질 별 등가 저항 및 등가 인덕턴스 파라미터를 측정하여 용기 재질 별 가열이 용이한 최적의 동작 주파수 및 커패시턴스를 설계하였다. 또한 설계한 파라미터를 바탕으로 PSIM 시뮬레이션을 통해 시스템의 정상동작을 검증하였으며 하드웨어 제작 및 실험을 통해 제작한 하드웨어의 정상동작 및 가열 성능을 검증하였다.

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지인력양성 사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20164030200980)

## References

- [1] H. Sadakata, A. Fujita, S. Sumiyoshi, and H. Omori, "Latest practical developments of triplex series load resonant frequency-operated high frequency inverter for induction-heated low resistivity metallic appliances in consumer built-in cooktops," *Proc, IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2010)*, pp. 1825-1832, Feb. 2010.
- [2] I. Milan, J. M. Burdio, J. Acero. O. Lucia and S. Llorente, "Series resonant inverter with selective harmonic operation applied to all-metal domestic induction heating," *IET Power Electron.*, Vol. 4, No. 5, pp. 587-592, 2011.
- [3] T. Tanaka, "A new induction cooking range for heating any kind metal vessels," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, Vol. 35, No. 3, pp. 635-641, Aug. 1989.
- [4] D. Simha, B. P. K. Sadhu, N. Pal, "Computation of induction and AC resistance of a twisted litz-wire for high frequency induction cooker," *International Conference on Industrial Electronics, Control and Robotics*. (IECR 2010) pp. 85-90, Dec. 2010.
- [5] S. R. Ghuge, M. R. Roda, "Summary of overall topologies of an induction cooker for home use (298)," *International Conference on Energy System and Application (ICESA 2015)*, pp. 655-657, Oct. 2015.
- [6] K. A. Kwon, Y. C. Jung, J. T. Kim and W. J. Yang, "Induction Heating for Aluminium Vessel and Application," *The Institute of Electronics Engineers of Korea*, pp. 864-867, July 1995.
- [7] H. S. Roh, K. A. Kwon, and W. J. Yang, "The analysis of inverter circuit with induction heating load," *The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp. 424-427 July 1995.
- [8] Y. S. Kwon, S. B. Yoo, D. S. Hyun "A study on the improvement of performance and stability of induction heating system," *The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 48, No. 8, pp. 417-425, Aug. 1999.
- [9] *International Electrotechnical Commission Standard*, IEC 60335-2-9, 2012



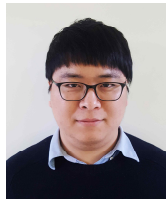
### 장은수(張恩洙)

1991년 7월 16일생. 2016년 조선대 전기공학 학과 졸업. 2016년~현재 성균관대 대학원 전자전기컴퓨터공학과 석박사통합과정.



### 박상민(朴相珉)

1988년 4월 18일생. 2013년 부경대 전기공학 학과 졸업. 2013~현재 성균관대 대학원 전자전기컴퓨터공학과 석박사통합과정



### 주동명(朱東明)

1988년 10월 9일생. 2011년 성균관대 전자 전기공학과 졸업. 2013년 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 2017년 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(공학박). 2017년~현재 성균관대 박사 후 연구원.



### 이병국(李秉國)

1968년 12월 25일생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 미국 Texas A&M University 전기공학과 졸업(공학박). 2002년~2003년 Postdoctoral Research Associate, Texas A&M University. 2003년~2005년 한국전기연구원 산업전기 연구단 전력전자그룹 선임연구원(팀장). 2006년~현재 성균관대 정보통신공학부 교수. 2004년~현재 IEEE Senior Member, IEEE VPPC2012 조직위원장. 2016년~현재 국제전기기술위원회 (IEC) 적합성평가위원회 (CAB) 이사. 당 학회 총무이사.