

워킹코일 온도 및 제어 속응성을 고려한 All-Metal Domestic Induction Heating 제어 시스템 설계

박상민¹, 장은수¹, 주동명¹, 이병국[†]

Design of Control System for All-Metal Domestic Induction Heating Considering Temperature and Quick-Response

Sang-Min Park¹, Eun-Su Jang¹, Dong-Myoung Joo¹, and Byoung-Kuk Lee[†]

Abstract

In this paper, an all-metal domestic induction heating (IH) system that can quickly identify ferromagnetic and non-ferromagnetic pots considering temperature changes in the working coil is designed. Load modeling is performed after analyzing the parameters of the pot material and the central misalignment of the working coil. To improve the performance and stability of the all-metal IH cooking heater, a power curve-fitting model is used to design a control system that quickly responds to load parameter fluctuations. In addition, a power control algorithm is established to compensate for the reference value by reflecting the increase in working coil temperature during heating of the non-ferromagnetic pot. The validity of the proposed control algorithm for the all-metal IH is verified by experiments using a 3.2 kW all-metal IH cooking heater.

Key words: IH(Induction Heating), SRC(Series resonant converter), All-metal induction cooker, High-frequency, Non-ferromagnetic pans

1. 서 론

최근 가스 가열 방식보다 안전하고 발열이 빠른 유도 가열 (Induction Heating, IH) 방식의 인덕션레인지가 전 세계적으로 각광을 받고 있는 추세이다. 가정에서 사용되는 인덕션 레인지는 강자성체(ferromagnetic) 용기만을 가열할 수 있다^[1]. 하지만 기존 인덕션 레인지는 흔히 가정에 보급되어 있는 조리용기인 알루미늄, 구리, 스테인리스 스틸 등의 비자성체(non-ferromagnetic) 용기는 사용할 수 없으며, 용기전체 또는 바닥면이 강자성체로 형성된 특정한 용기만 사용할 수 있는 제한을 가지고 있다^[2]. 따라서 인덕션 레인지의 보급성 및 활용성을 높이기 위해서 모든 용기를 가열할 수 있는 All

Metal IH Cooker의 연구개발이 필요하다. 앞서 설명한 자성체 용기를 가열 하는 유도가열 기술은 이미 상용화가 되어 있는 상태이다. 하지만, 비자성체 용기는 낮은 비저항과 비투자율을 갖기 때문에 유도가열이 어려우며, All Metal IH Cooker 제품 상용화를 위한 연구가 최근 진행되고 있다^{[3]-[6]}. 비자성체 용기를 유도가열 하기 위한 핵심 기술은 낮은 비저항과 비투자율의 보상기법이며, 이러한 기술들의 공통된 목적은 비자성체 용기의 낮은 비저항과 비투자율을 높이기 위해서 스위칭 주파수를 증가시키거나 입력전압을 가변하여 높은 출력을 얻기 위한 기술들이다. 그러나 이러한 연구들은 All Metal IH를 구현하기 위한 하드웨어 설계에 대한 연구가 주를 이룰 뿐 용기 재질 및 크기 판별 및 제어 알고리즘을 적용한 실험 결과가 제시되지 않고 있다^{[3]-[6]}. 특히 사용자의 안전성 측면에서 international electrotechnical commission(IEC) standard 60335-2-9 규격에서 제시하고 있는 무부하 판단용 규격 스틱 및 이물질질을 통한 무부하 판단 실험이 반드시 필요하지만, 이러한 연구에 대한 결과는 수행되지 않은 상황이다.

앞서 설명한 기존 연구들은 All Metal IH를 구현하기 위해 자성체/비자성체 용기종류에 따라 동작모드를 달리

Paper number: TKPE-2018-23-3-7

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

[†] Corresponding author: bkleskku@skku.edu, Dept. of Electrical Eng., Sungkyunkwan University
Tel: +82-31-299-4581 Fax: +82-31-299-4612

¹ Dept. of Electrical Eng., Sungkyunkwan University
Manuscript received Mar. 6, 2018; revised Mar. 23, 2018;
accepted Apr. 5, 2018

— 본 논문은 2017년 전력전자학회 우수논문상 수상논문임

— 본 논문은 2017년 전력전자학회 외부장학급 수혜논문임

하고 있다. 그러나 유도 가열시 용기 재질의 변경에 따라 동작 모드가 변경되는 과정 및 용기의 크기에 따른 실험 결과가 없으며 이는 제품 상용화를 위한 안정성과 직결되는 부분이다. 또한 비자성체 가열 시 상대적으로 큰 전류에 의해 위킹코일 온도가 상승하며 이는 위킹코일의 인덕턴스 변화를 야기한다^{[7],[8]}. 따라서 실제적인 All Metal IH 구현을 위해 위킹코일 온도 변화에 따른 위킹코일의 투자율 및 저항값 변화를 고려하고 이를 제어에 반영해야 한다. 따라서 실제적인 All Metal IH를 구현하기 위해서는 빠른 용기 재질 판별이 가능한 시스템이 필요하다. 또한 용기의 위치 및 무부하 상황을 고려하여 빠른 속응성을 갖는 제어 알고리즘 구현이 필수적이다.

따라서 본 논문에서는 All Metal IH 레인지의 성능 및 안정성 향상을 위해 전력 Curve-fitting 모델링을 통하여 용기 재질 및 위치를 빠르게 판단하고 부하 파라미터 변동에 민감하게 동작이 가능한 제어 알고리즘을 제안한다. 그리고 실제 유도가열 실험을 통하여 위킹코일 온도를 분석하고 변화량을 제어 기법에 반영하여 부하에 따른 인버터 동작 주파수를 자동적으로 추종 제어함으로써 온도 상승으로 인한 전력감소나 부하 조건의 변화에 관계없이 항상 안정된 출력 특성을 갖는 보상 알고리즘을 제안한다. 제안한 All Metal IH 제어 알고리즘은 실제 용기 데이터를 기반으로 3.2kW급 Cooking Heater를 이용한 실험 결과를 통해 그 타당성을 검증한다.

2. 유도가열 원리 및 부하 특성 해석

2.1 유도가열 원리

유도 가열은 가열 코일에 고주파 교류 전류가 흐를 때 발생하는 고주파 자계 중에 도전성의 금속을 위치시키면 금속의 표면에 Eddy Current가 유기 되어 표피 저항에 의해 Joule 열을 발생시키는 원리이다^[9].

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{4\pi^2 \times 10^{-7}}} \times \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (1)$$

여기서,

ρ : 저항률($\Omega \cdot m$), μ_r : 비투자율, f : 주파수(Hz)

이러한 열의 대부분은 수식 (1)로 표현되는 δ (Skin Depth) 내에 분포하게 되며 δ 는 인버터 동작 주파수를 결정하는 주요한 요소가 된다. 따라서 비자성체 용기의 낮은 저항값을 확보 하기 위하여 운전 주파수를 증가시켜야 한다^{[6],[7]}. 일반적으로 유도가열 시스템은 위킹코일과 부하를 각각 1, 2차 축으로 하는 변압기 등가 모델로 표현할 수 있다. 이 등가 모델은 그림 1과 같이 하나의 등가 인덕턴스 L_{eq} 와 등가 저항 R_{eq} 의 직렬 연결로 나타낼 수 있으며, 등가화 된 파라미터 L_{eq} , R_{eq} 는 식 (2),

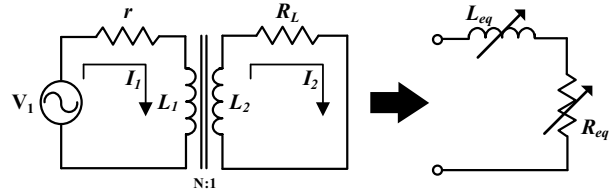


Fig. 1. Equivalent circuit of induction heating system.

TABLE I
CHARACTERISTICS BY METAL MATERIAL

Parameter	Fe, High Resistivity	Al, Low Resistivity
Resistivity [$\rho(\mu\Omega m)$]	0.17	0.027
Relative Permeability [μ_s]	200	1
Previous developed IH cooktop	O	X

Remarks; O applicable × Not applicable

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

$$R_{eq} = r + \frac{(\omega M)^2 \cdot R_L}{R_L^2 + (\omega L_2)^2} = r + A^2 R_L \quad (3)$$

$$\text{여기서, } A = \frac{\omega M}{\sqrt{R_L^2 + (\omega L)^2}} \approx \frac{M}{L_2}, \quad \omega L_2 \gg R_L$$

(3)과 같이 표현된다^[6]. 한편, 이 등가화된 파라미터 L_{eq} , R_{eq} 는 가열 부하의 크기와 위치, 가열 코일과 부하 사이의 거리, 부하의 도전율과 투자율, 동작 주파수 등에 의해 변하게 된다. 또한 변압기 2차측 저항 R_L 은 Eddy Current의 δ 에 의해 결정되므로, 실제 유도 가열에 의해 발생하는 출력 전력은 저항과 전류의 관계에 의해 식 (4), (5)와 같이 표현된다^[7].

$$R_L = R_{pot} = k \sqrt{\rho \mu_r 2\pi f}, \quad I_2 = N I_1 \quad (4)$$

$$P = k \cdot (N I_1)^2 \cdot \sqrt{\rho \mu_r 2\pi f} \quad (5)$$

여기서,

k : 상수($\sqrt{4\pi^2 \times 10^{-7}}$), N : 위킹코일의 턴(Turn) 수

2.2 유도가열 부하의 특성 해석

표 1은 금속 재질에 따른 전기적 특성과 기존 인덕션 레인지로 가열 유무를 나타낸다. 표에서 확인할 수 있는 바와 같이 알루미늄과 같은 비자성체는 철과 같은 자성체에 비해 훨씬 낮은 저항률과 비투자율을 갖는다. 따라서 가열 부하로 비자성체 용기를 적용 시, 수식 (5)로부터 유도가열 출력 전력을 증가시키기 위하여 가열 코일의 턴 수와 운전 주파수를 증가시켜야 한다. 하지만 이런

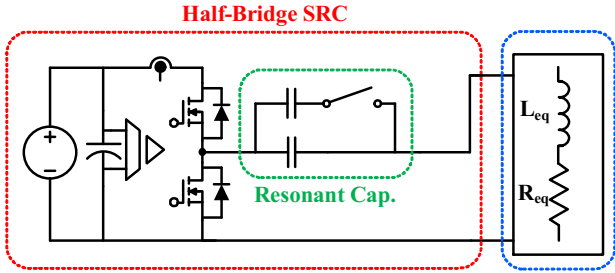


Fig. 2. Half-bridge resonant converter for all metal IH cooker.

조건들은 가열 워킹코일의(Skin Effect)와 근접 효과(Proximity Effect)로 인해 코일의 저항을 증가시키며, 비자성체 가열 시 상대적으로 큰 전류에 의해 코일 저항 상승으로 인한 발열과 동손으로 인한 페라이트 온도 상승으로 인하여 투자율이 급격히 감소하고 유도 가열 효율이 저하되는 문제점이 발생한다^[7]. 또한, 자속 밀도는 투자율에 비례하므로 자속밀도의 감소로 인하여 유도 기전력(induced EMF)이 줄어들고 결과적으로 Eddy Current의 발생량이 줄어들어 IH 시스템의 출력전력을 감소시키므로 그에 따른 보상이 필요하다. 특히 비자성체 용기는 자성체 용기와 비교하여 상대적으로 높은 Q-factor를 갖기 때문에 주파수 변화에 따른 출력 전력 특성이 자성체 용기에 비해 상대적으로 훨씬 더 민감하다^[10]. 따라서 부하 파라미터 변화를 감지하고 주파수 제어를 통해 전력 변동 없이 안정된 출력 특성을 갖는 제어가 필요하다.

3. All-Metal IH Cooker 시스템 설계

3.1 All-Metal IH 하드웨어 설계 및 부하 분석

All Metal IH Cooking Heater를 구현하기 위해서는 자성체 / 비자성체 용기 부하의 특성 차이로 인하여 운전 동작 모드를 달리해야 한다. 따라서 All Metal IH를 구현하기 위해서는 용기 재질 및 위치 판별이 가능한 알고리즘 시스템이 필요하며, 본 논문에서는 그림 2와 같이 비교적 간단한 구조의 자성체 / 비자성체 용기의 동작 주파수 영역을 고려한 공진 커패시터 절체방식의 HB-SRC를 이용하여 All Metal IH Cooking Heater를 구현한다. All Metal IH Cooking Heater의 부하는 워킹 코일과 피 가열체인 용기로 이루어지며 용기 크기 및 재질과 스위칭 주파수에 따라 부하의 인덕턴스값과 저항값이 변화한다. 따라서 용기 재질을 초반에 판별하여 공진 커패시터의 Relay 온-오프 선택이 가열전에 이루어져야 하며, 사용자의 실수로 인한 용기 벗어남 및 용기 이외의 숟가락과 같은 물체 감지 기능이 요구된다.

앞절에서 설명했듯이 유도 가열 출력 전력을 증가시키기 위해서는 수식 (5)로부터 가열 코일의 턴 수와 운전 주파수를 증가시켜야 한다. 하지만 턴 수를 무작정 늘려서

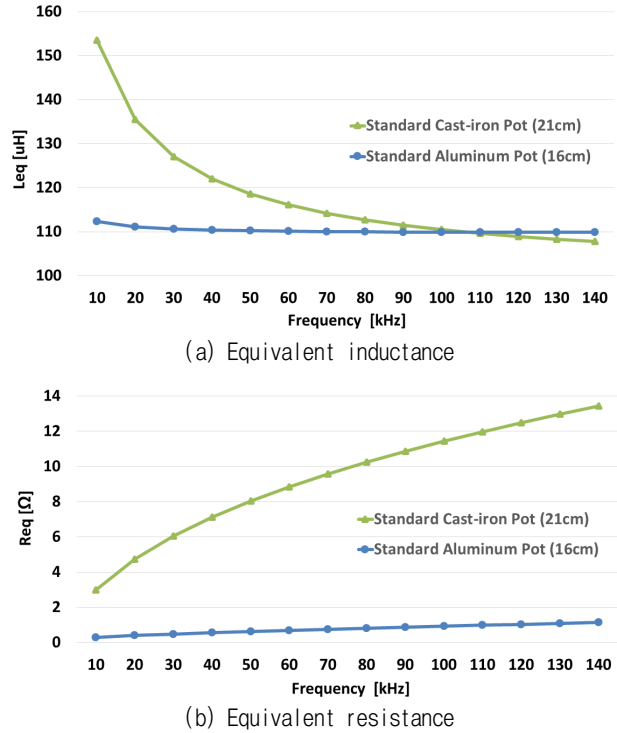





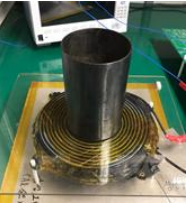
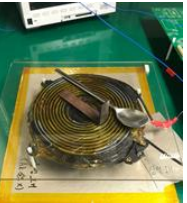
Fig. 3. Parameters of pot according to frequency variation.

등가저항을 확보하려고 하면, 자성체 용기 가열 시 용기 등가 저항이 매우 증가하여 HB-SRC 회로의 공진 네트워크에 흐르는 전류가 제한되는 문제가 발생한다^[11]. 그러므로 비자성체 용기의 저항은 키우면서 자성체 용기 가열 시 목표 입력 전력 조건을 만족할 수 있는 Trade off점을 찾아 워킹 코일의 턴 수를 설계해야 한다. 그림 3은 설계된 워킹코일 위에 Fe 규격용기(21cm)와 Al 규격용기(16cm)를 올려놓고 LCR 미터로 각각 측정한 주파수에 따른 등가 인덕턴스 L_{eq} 와 등가 저항 R_{eq} 를 나타낸다. 그래프에서 볼 수 있듯이 비자성체 용기는 매우 낮은 L_{eq} 와 등가 저항 R_{eq} 를 갖으므로 유도 가열 출력 전력을 증가시키기 위하여 운전 스위칭 주파수를 증가시켜야 한다. 또한 공진주파수 이상에서 스위칭을 함으로써 Turn-on 시에는 손실이 발생하지 않는 zero voltage switching (ZVS) 동작이 가능한 영역을 고려하여 공진 커패시터를 선정해야 한다. 표 2는 All Metal IH 시스템의 스펙과 워킹코일 및 공진 커패시터 파라미터 값을 나타낸다. HB-SRC의 입력전압은 power factor correction (PFC)의 출력전압으로 직류 380V이며, 입력 전력 범위는 자성체 용기 가열 시 3200W 이고 비자성체 용기 가열 모드는 낮은 등가저항 R_{eq} 를 고려하여 과전류 방지를 위해 입력전력을 2.6kW로 제한한다. 공진 커패시터 절체 구성은 Relay가 off시 비자성체 용기 가열 용량인 22nF를 갖으며, 자성체 가열 시에는 Relay를 on시켜서 300nF의 용량을 갖게 함으로써 동작 주파수 영역을 낮춘다.

TABLE II
SPECIFICATION OF ALL METAL IH SYSTEM

All Metal IH Spec.			Resonant Network	
Parameters	Value [Unit]		Parameters	Value [Unit]
	High Resistivity (Fe)	Low Resistivity (Al)		
Operating Power	400 - 3200 [W]	400 - 2600 [W]	Working Coil Layer	3 [Layer]
Operating Frequency	25 - 51 [kHz]	105 - 110 [kHz]	Working Coil Turns	39 [turn]
Maximum Coil Current	19 [A _{rms}]	48 [A _{rms}]	Capacitance for Fe	300 [nF]
Maximum Coil Voltage	490 [V _{peak}]	2500 [V _{peak}]	Capacitance for Al	22 [nF]

TABLE III
POT TYPE AND AMOUNT OF WATER FOR ALL METAL IH SYSTEM LOAD

Picture					
Pot	Standard Cast-iron Pot	Standard Aluminum Pot	Double Bottom Pot	Standard Mini Cast-iron Pot	Standard Stick or No-load
Diameter of cooking zone	210 [mm]	160 [mm]	180 [mm]	90 [mm]	70 [mm]
Quantity of Water	2 [L]	1.5 [L]	1.5 [L]	1 [L]	-

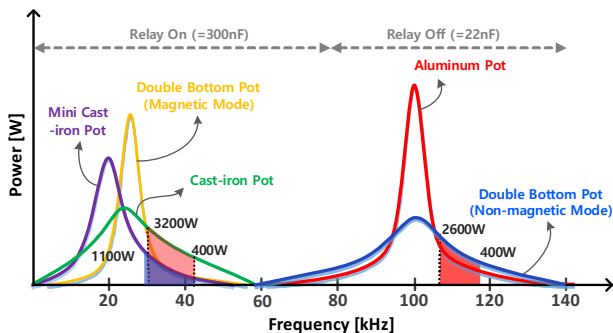


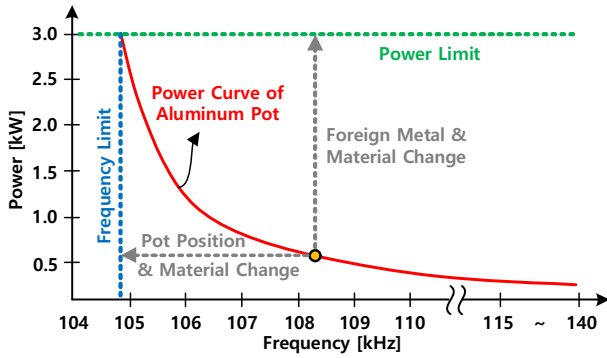
Fig. 4. Input power-curve according to pot type and frequency.

All Metal IH 시스템의 부하는 가정에 보급되어 있는 조리 용기로 재질은 크게 주철, 알루미늄 용기와 바닥에 철가루를 도포한 포한 이중용기로 나눌 수 있다. 이중용기는 비자성체 용기를 자장의 유도를 위해 바닥면에 철(Fe)성분을 도포한 유도가열 용기를 의미한다. 또한 부하 조건으로 사용자의 실수로 인한 용기 벗어남 및 용기가 없는 무부하 상태와 용기 이외의 숟가락과 같은 물체 등을 고려해야 한다. 따라서 All Metal IH 시스템의 부하는 총 5가지 케이스로 진행하며, 표 3은 5가지 케이스의 용기 재질별 바닥 면적과 IEC standard 60335-2-9 규격을 토대로한 유도가열 실험시의 수 부하량을 나타낸다^[12]. 그림 4는 각 부하상태의 파라미터값을 토대로 matlab 시뮬레이션을 통하여 도출한 주파수별 전력을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 이중용기는 비자성체 모드에서도 동작이 가능하다. 최대전력 조건에서

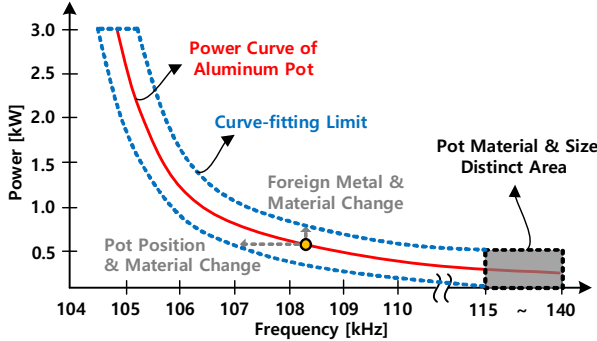
이중용기를 자성체 모드로 동작시키면 약 42A_{rms}의 전류가 흐르고 전압과 전류가 위상차가 많이 나는 반면에, 비자성체 모드로 동작시키면 위상이 크게 안 벗어나고 약 20A_{rms}의 코일 전류로 동작할 수 있기 때문에 비자성체 용기로 판단하는 것이 유리하다. 또한 9cm 자성체 용기는 ZVS 영역에서 최대전력 3.2kW를 뽑아낼 수 없으므로 용기 바닥 면적을 구별하여 전력 제어해야 한다. 따라서 본 논문에서는 이중용기를 비자성체 용기로 판단하고 9cm 자성체 용기의 전력을 1100W로 제한하고 실험을 진행한다. 또한 All Metal IH 시스템의 성능 및 안정성 향상을 위해 용기 재질 및 위치를 빠르게 판단이 가능하고 부하 파라미터 변동에 즉각적으로 민감하게 동작이 가능한 제어 알고리즘을 설계한다.

3.2 제안하는 용기 판별 알고리즘

All Metal IH 가열을 구현하기 위한 공진 커패시터 절체방식의 Half-Bridge 직렬 공진형 컨버터 토폴로지는 용기 재질이 자성체인지 비자성체인지 판단하여 각 용기에 맞는 모드로 동작하여야 하기 때문에 초기 용기 판별 알고리즘이 필요하다. 또한 가열 중 용기를 들어 올리거나 위킹코일 중앙에서 벗어날 시 전력이 차단되어야 하며, 다른 재질의 용기로 교체한다 하여도 정상적으로 모드 변경 후 가열 동작하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 주파수별 실제 전력곡선을 앞절에서 분석한 Matlab 시뮬레이션과 실제 가열 실험시의 전력분석을 토대로 Curve-fitting 모델링을 이용하여 제어 알고리즘을



(a) Conventional control method



(b) Proposed control method

Fig. 5. Comparison of pot identification using curve fitting.

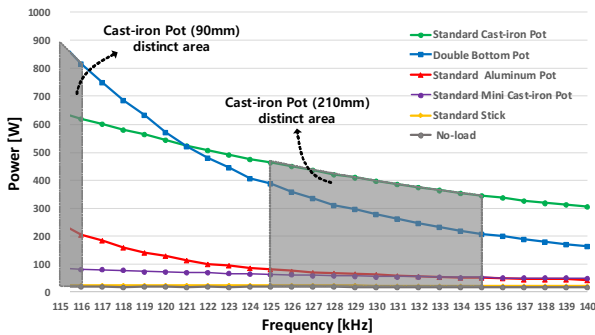
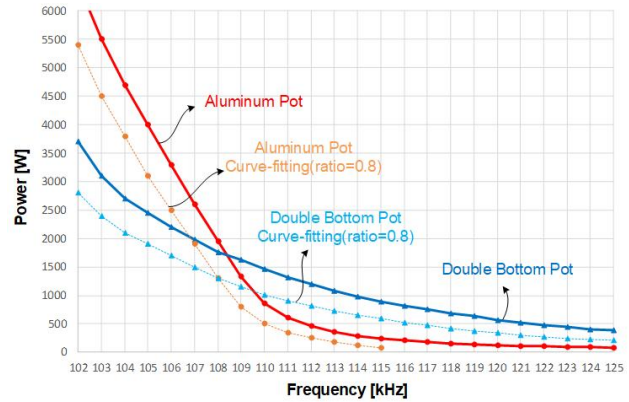
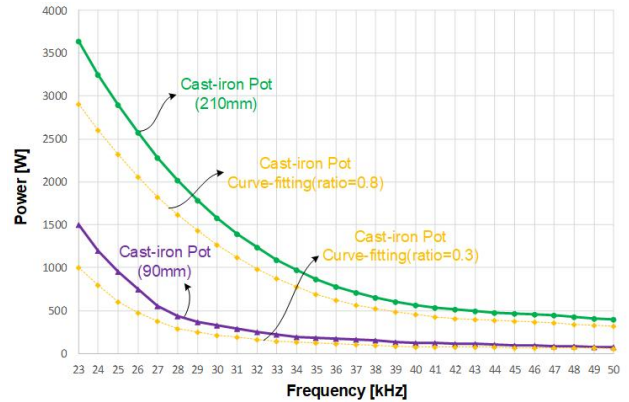


Fig. 6. Power curve according to pot type at frequencies from 140kHz to 115kHz.

설계한다. 기존 IH Cooker 제어 방식은 그림 5(a) 방식과 같이 최소 주파수와 최대 전력 Limit를 설정하는 방식으로써, 용기가 벗어나거나 이물질이 들어와서 부하상태가 변경되면 전력차단 시점까지 delay가 발생하는 단점이 있다. 이는 Q-factor가 높아 매우 민감하게 제어되어야 하는 비자성체 용기 유도가열 상황에서는 적합하지 않는 제어 방식이다. Curve-fitting 모델링 방식은 그림 5(b)와 같이 앞서 측정된 전력곡선을 Excel을 이용하여 3차 다항식을 도출하고 소프트웨어 코드상에 도출된 식을 적용하여 주파수별 전력을 모니터링하여 부하 파라미터 변동에 민감하게 동작이 가능한 제어방식이다. 이때 각 용기마다 주파수에 따른 전력이 다르기 때문에 용기 재질 및 크기를 초기에 구별하여 Curve-fitting 수식을 달리 해야 한다. 그림 6은 초기 Soft Start 시작점인 140kHz에서 115kHz까지의 용기별 전력을 나타낸다.



(a) Curve-fitting power of non-ferromagnetic pots

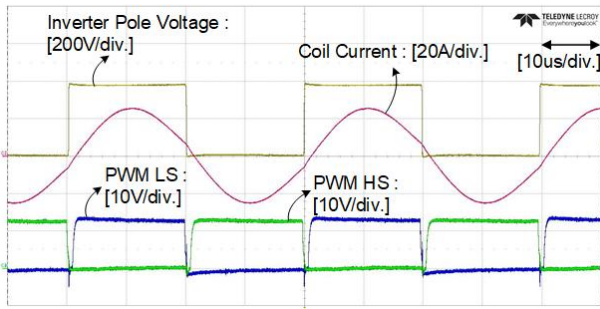


(b) Curve-fitting power of ferromagnetic pots

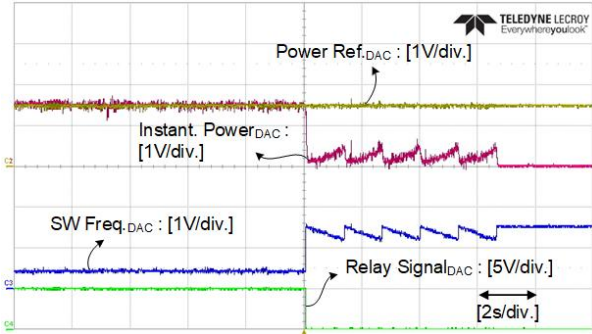
Fig. 7. Curve-fitting power according to frequency.

이때 공진커패시터 Relay 스위치 신호는 off 상태이고 항상 22nF 용량의 비자성체 모드에서 제어를 시작하며 초반 전력 차이를 이용하여 용기 재질을 판별 후 각 동작모드로 운전한다. 특히 자성체 용기들은 초기 Relay off 상태에서 22nF 공진 커패시터로 목표전력을 추종하기 위한 주파수 제어를 하게 되면 전력이 부족하여 공진주파수를 넘어서고 ZCS 영역으로 넘어가서 역회복 전류로 인한 스위치 스트레스를 야기시킬 수 있다^[13]. 따라서 140kHz에서 soft start를 시작하여 자성체 용기로 판별이 되면 즉시 Relay를 On시키고 스위칭 주파수를 자성체 용기 초기 동작 영역인 90kHz로 감소시킨다. 9cm 주철 용기는 초기에 무부하와 비슷한 전력을 갖으므로 115kHz 부근에서 판별을 한다.

Curve-fitting 곡선을 이용한 용기 판별법은 용기를 가열할 시 동작 주파수 정보와 각 해당 주파수에서의 전력은 MCU를 통해서 실시간으로 센싱을 받고 있으며, 용기 별 실제 전력곡선과 Curve-fitting 곡선의 비율을 조절하여 전력 Under Limit를 구현한 것을 의미한다. 가열 중 용기가 중앙을 벗어나면 부하 저항 R_{eq} 가 감소하여 목표전력을 추종하기 위하여 주파수가 감소하는데 이때 해당 운전 주파수에서 Curve-fitting 곡선보다 전력이 낮아지는 순간 초기 동작 모드로 리셋 되면서 부하 상태를 재 판별하다가 일정 리셋 횟수에 도달할 때까지

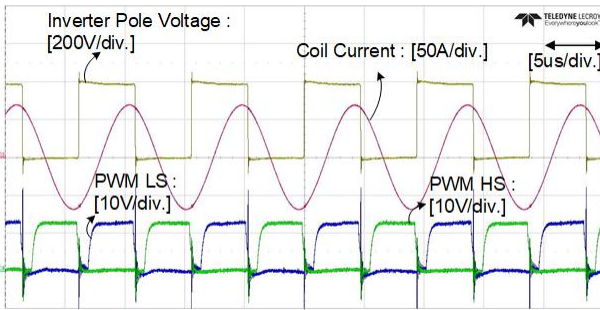


(a) Inverter and coil main waveform (@3200W)

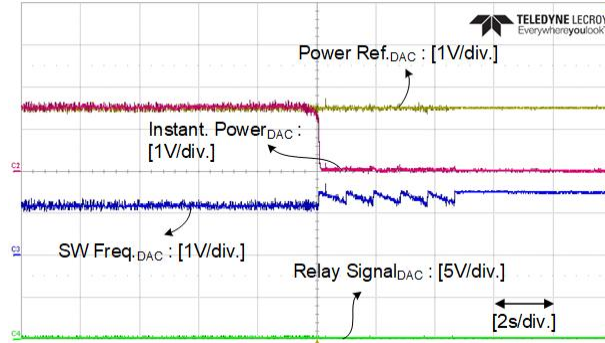


(b) Waveform of the pot discrimination algorithm

Fig. 8. Experimental waveform of standard cast-iron pot identification algorithm using curve-fitting.



(a) Inverter and coil main waveform (@2600W)



(b) Waveform of the pot discrimination algorithm

Fig. 9. Experimental waveform of standard aluminum pot identification algorithm using curve-fitting.

부하상태가 정상범주 안으로 안 들어올 시 전원이 차단 되는 제어 방식이다. 또한 용기가 없는 무부하 상태거나 숟가락 같은 물체가 올라왔을 시 전력추종을 위해 주파수가 감소하면 자동적으로 전력 Under Limit에 도달하여 리셋된다. 또한 Curve-fitting 비율을 조절하여 전력 Under Limit 마진을 증가 또는 감소시키면 용기가 워킹코일 중앙 지점에서 얼마나 벗어났을 때 전원을 차단시킬 건지 민감도를 손쉽게 조절할 수 있다. 특히 비자성체 용기 가열 동작 시에는 높은 Q-factor로 인하여 최대전력과 최소전력의 제어 주파수 범위가 약 5kHz 정도로 작고 매우 민감한 부하 특성을 갖는데, 전력 Curve-fitting 모델링을 통한 제어방식은 급변하는 부하 조건을 즉각적으로 반응할 수 있으며 입력전력 정보만으로 용기 판별을 할 수 있다는 장점이 있다.

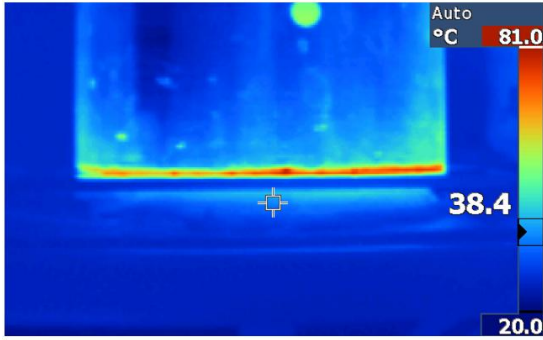
비자성체 모드로 동작하는 이중용기와 AI 규격용기는 그림 7(a)에서 볼 수 있듯이 주파수가 감소함에 따라서 전력이 상승 기울기가 다르므로 두 용기 가열 모드를 구분하여 각각의 다른 3차 다항식을 도출하여 Curve-fitting 모델링을 수행한다. 자성체 모드로 동작하는 경우에는 이중용기 및 AI규격용기와는 다르게 용기 면적에 따라서 기울기는 유사하고 전력 값만 차이가 나므로 그림 7(b)와 같이 전력차를 이용하여 용기를 판별하고, 9cm 용기는 21cm 용기와 동일한 3차 다항식에서 전력 Curve-fitting 곡선의 fitting ratio만 다르게 한다.

TABLE IV
WORKING COIL PARAMETER VALUE FOR
ALL-METAL IH

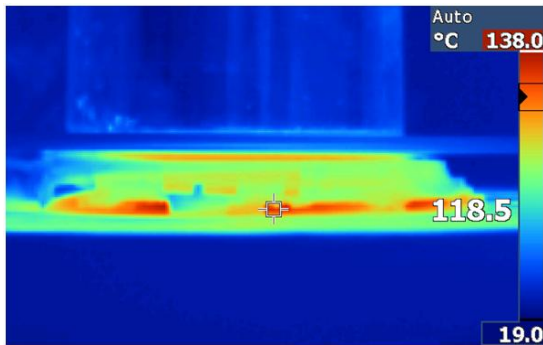
Parameter	Cast-iron Pot	Aluminum Pot
Working Coil Max. Temp. [°C]	50	145
Maximum Coil Current [A _{RMS}]	19	50
Operating Frequency [kHz]	28 - 51	105 - 110

비자성체 모드와 마찬가지로 용기가 없는 무부하 상태거나 숟가락 같은 물체가 올라왔을 시 전력추종을 위해 주파수가 감소하면 자동적으로 전력 Under Limit에 도달하여 전원이 차단되는 구조이다.

그림 8은 설계한 알고리즘을 적용한 21cm 주철 규격 용기의 실험파형을 나타낸다. 8(a)는 인버터 동작 중 주요 파형을 나타내며 8(b)는 가열중 용기를 중앙에서 1/2 지점 이상 벗어나게 했을 시의 파형을 나타낸다. 그림처럼 용기가 중앙에서 벗어나는 것을 감지하면 초기 운전 모드로 리셋이 되고 Relay 신호 역시 초기화가 된다. 또한 용기가 반쯤 걸친 상황에서 Curve-fitting을 통한 전력 Under Limit에 감지되어 전력이 상승하지 못하고 계속 리셋되는 것을 볼 수 있다. 용기가 벗어난 후 다시 정중앙에 위치하여 정상동작 할 때까지 대기하는 시간은 리셋 횟수를 조절함으로써 손쉽게 조절할 수 있다.



(a) Ferromagnetic pot heating mode



(b) Non-ferromagnetic pot heating mode

Fig. 10. Working coil temperature according to the pot material during induction heating.

본 실험을 진행할 때 리셋 알고리즘 횟수를 5번으로 설정하였기 때문에 이후 전원이 정상적으로 차단되는 것을 확인할 수 있다. 그림 9는 AI 규격용기로 주철용기와 동일한 실험을 한 파형을 나타낸다. 용기가 벗어나서 초기 동작으로 리셋 후 전력 Under Limit에 도달 할 때까지 전력 상승량이 자성체 용기와 다르게 현저하게 낮은 것을 확인할 수 있다.

3.2 제안하는 Working Coil 온도 보상 알고리즘

알루미늄과 같은 비자성체 용기는 표 1에서 확인할 수 있듯이 낮은 비저항과 비투자율 특성으로 인하여 식 (4)로 표현되는 용기 저항값 확보를 위하여 운전 주파수를 증가시켜야 한다. 또한 식 (5)로부터 출력 전력을 증가시키기 위하여 코일의 턴 수를 증가시켜야 하지만 이런 조건들은 가열 코일의 표피 효과(Skin Effect)와 근접 효과(Proximity Effect)로 인해 코일의 저항을 증가시키며, 비자성체 가열 시 상대적으로 높은 전류가 흐르므로 워킹코일 온도가 상승하는 문제점이 발생한다. 워킹코일 온도가 상승하면 투자율이 떨어지고 코일에 의한 동손이 증가하여 부하측 전력이 떨어지는 문제가 발생하는데 이때 용기가 워킹코일 정 중앙에서 정상적으로 가열을 하고 있더라도 전력 Under Limit에 도달하여 전원이 차단되는 문제가 발생하므로 워킹코일 온도 상승에 따른 유도 가열 전력 감소량을 고려해야 한다. 그림 10은 설계한 All Metal IH Cooker 시스템의 용기 가열

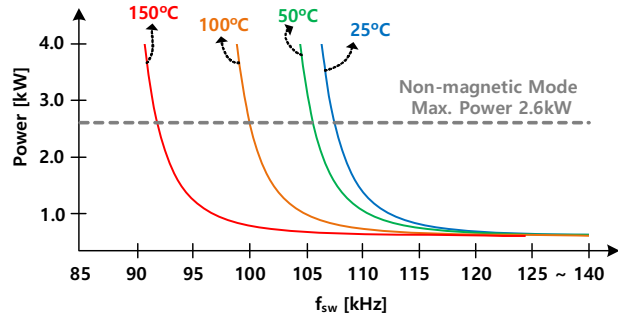


Fig. 11. Power curve variation due to rising working coil temperature.

중의 워킹코일을 나타내며, 실제 자성체/비자성체 용기를 가열 시 워킹코일 온도를 열관측기(Thermal Imager)로 촬영한 사진이다. 표 4에서 볼 수 있듯이 비자성체 가열 시 상대적으로 큰 전류가 흐르므로 그림 10(b)처럼 워킹코일 온도가 상승하여 페라이트의 큐리(Curie) 온도로 가깝게 접근할수록 투자율이 급격히 감소하고 코일 저항 상승으로 인한 발열로 문제로 유도 가열 효율이 저하된다. 따라서 비자성체 가열로 인한 워킹코일 온도 상승 시 Curve-fitting 모델링으로 구현한 전력 Under Limit 곡선은 온도에 따라서 좌측으로 이동하며 감소해야 한다. 또한 그림 10(a)처럼 자성체 가열 시 워킹코일 온도는 최대 50°C 수준이지만 비자성체 가열 후 워킹코일에 남아있는 잔존 열이 남아 있는 상황이거나 비자성체 가열 도중 자성체로 용기를 교체하는 상황에서는 전력 Under Limit 곡선이 틀어지기 때문에 자성체 용기 동작영역에서도 워킹코일 온도를 고려한 온도보상이 필요하다.

그림 11은 비자성체 용기 가열 시, 워킹코일 온도 상승에 따른 전력 변화값을 나타낸다. 최대전력 2.6kW로 유도가열을 하면 워킹코일 온도가 상승함에 따라 전력량이 감소하고, 목표 전력을 추종하기 위해 주파수 제어를 해야한다. 이에 따라 전력 Under Limit 곡선은 실제 전력이 상승하는 비율로 따라 감소해야 한다. 워킹코일 온도는 표면아래 열전대(Thermocouple)를 직접 부착하여 순시 온도를 측정하고, 제어 알고리즘에 온도 정보를 반영하여 Curve-fitting 용기판별 곡선과 전력 Under Limit의 비율을 조절한다. 따라서 워킹코일 온도가 상승함에 따라 변동되는 부하 파라미터 값들과 관계없이 적용적으로 동작할 수 있는 제어 알고리즘을 구현할 수 있다.

그림 12는 본 절에서 설명한 워킹코일 온도가 Curve-fitting 모델링에 반영된 All Metal IH 시스템의 용기 판별 제어 알고리즘 Flowchart를 나타낸다. 전력 Under Limit에 도달 하였을 시 초기 상태로 리셋되는 구조로써, 리셋시점에서 워킹코일 온도를 반영하여 Curve-fitting 모델링 값을 그림 11처럼 상황에 맞게 수정하는 방식이다. 그림 13은 비자성체 용기를 5분 이상 충분히 가열 후 자성체 용기로 교체한 실험 파형이다. 워킹코일 온도가

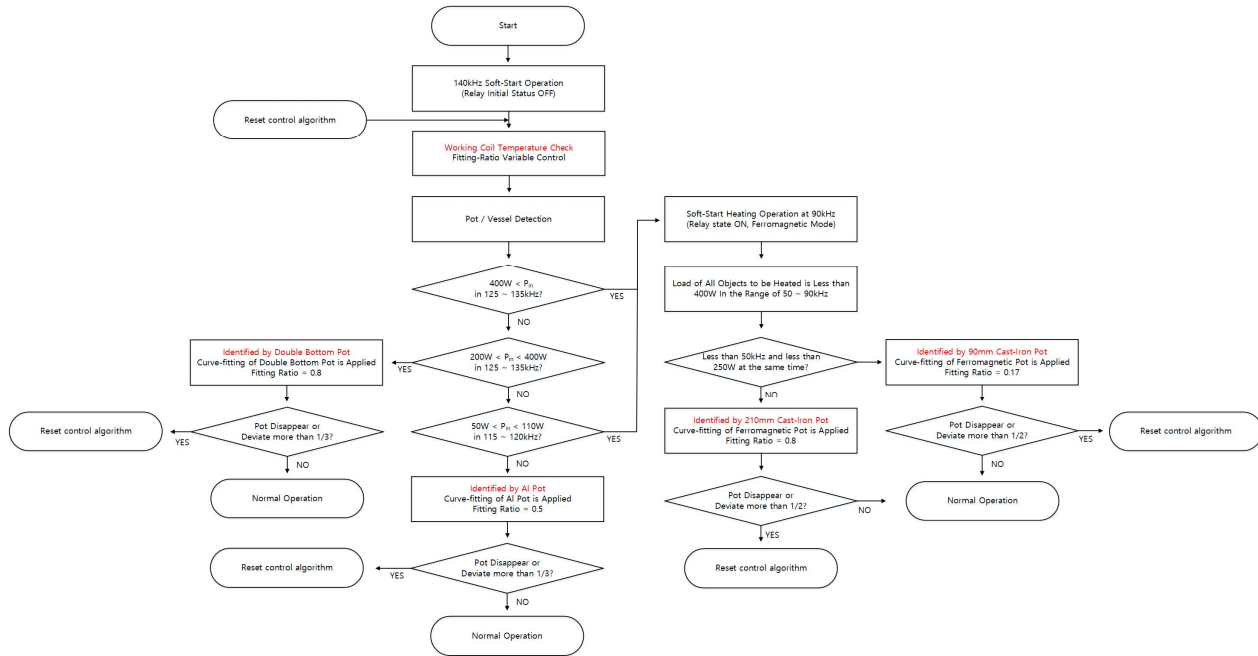


Fig. 12. Control algorithm flowchart for all-metal IH systems.

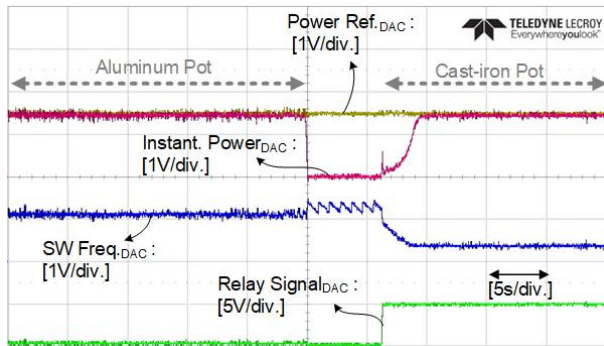


Fig. 13. Algorithm verification with working coil temperature elevated.

로써 부하 파라미터 변동에 민감하게 동작이 가능한 효과적인 전력 제어 알고리즘을 설계하였다. 제안한 All Metal IH 제어 알고리즘은 위킹코일 온도가 급상하여도 정상적으로 용기 재질 및 위치가 판단이 가능함을 3.2kW급 Cooking Heater를 이용한 실험 결과를 통해 그 타당성을 검증하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제 성과입니다. (No. 2016530050030)

100°C를 넘긴 상태에서 비자성체 용기가에서 자성체 용기로 교체되는 시간 동안에 알고리즘이 리셋을 반복하면서 위킹코일 온도를 반영하고 있다. 따라서 파형에서 볼 수 있듯이 정상적으로 자성체 용기를 판별하여 공진 캡 Relay가 붙고 자성체 모드로 변환 후 목표전력을 추종하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 자성체 및 비자성체 용기 판별이 가능하고 위킹코일 온도 변화가 고려된 All Metal IH 제어 알고리즘을 설계하였다. 용기 별 파라미터 분석을 통해 용기 재질 및 위치에 따른 여러가지 경우의 부하 모델링을 수행하였다. 또한 All Metal IH Cooking heater의 성능 및 안정성 향상을 위해 전력 Curve-fitting 모델링을 통하여 용기 재질 및 위치를 빠르게 판단이 가능하고, 비자성체 가열 시 급상하는 위킹코일 온도를 반영함

References

- [1] J. Acero, J. M. Burdio, L. A. Barragan, et al., "Domestic induction appliances: an overview of recent research," *IEEE Ind. Appl. Power Electron. Conf. and Expo.*, pp. 39-47, 2010.
- [2] H. W. Koertzen, J. D. van Wyk, and J. A. Ferreira, "Design of the half bridge series resonant converters for induction cooking," *Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf. Records*, pp. 729-735, 1995.
- [3] H. Shoji, J. Uruno, and M. Isogao, "Buck-boost-full-bridge inverter for all metal induction heating cookers," *Proc. of IEE Japan IAS Conference 2011*, pp. 513-516, 2011.
- [4] N. A. Ahmed and M. Nakaoka, "Boost-half-bridge edge resonant soft switching PWM high-frequency inverter for consumer induction heating appliances," *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, Vol. 153, No. 6, pp. 932-938, Nov. 2006.

- [5] I. Millan, 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 Electronics*, Vol. 4, No. 5, pp. 587-592, May 2011.
- [6] T. Tanaka, "A new induction cooking range for heating any kind of metal vessels," in *IEEE Trans. Consum. Electron.*, Vol. 35, No. 3, pp. 635-641, Aug. 1989.
- [7] J. Acero, J. M. Burdio, and L. A. Barragan, "Frequency-dependent resistance in litz-wire planar windings for all-metal domestic induction heating appliances," *Power Electronics Conf. and Expo., APEC 2005*, 2005.
- [8] P. Sergeant, D. Hectors, L. Dupre, and K. van Reusel, "Thermal analysis of magnetic shields for induction heating," *IET Electr. Power Appl.*, Vol. 3, No. 6, pp. 543-550, Nov. 2009.
- [9] J. Acero, R. Alonso, J. M. Burdio, L. A. Barragan, and D. Puyal, "Analytical equivalent impedance for a planar circular induction heating system," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 42, No. 1, pp. 84-86, Jan. 2006.
- [10] C. Hammouma, H. Zeroug, and A. Attab, "Investigations into performances of a low power parallel resonant inverter topology for induction metal hardening," *Power Electronics and Power Engineering Conf.*, Apr. 2017.
- [11] H. W. Koertzen, J. D. van Wyk, and J. A. Ferreira, "Design of the half bridge series resonant converters for induction cooking," *Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf. Records*, Jun. 1995.
- [12] Safety standards for household electrical products-IEC 60335-2-9, figure 103 and 104.
- [13] W. Martinez, M. Noah, and J. Imaoka, "Reverse-recovery current reduction in a ZCS boost converter with saturable inductors using nanocrystalline core materials," in *Power Electronics and Applications, Conf.*, Sep. 2016.



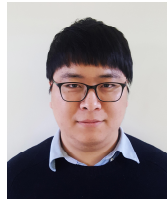
박상민(朴相珉)

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



장은수(張恩洙)

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



주동명(朱東明)

1988년 10월 9일생. 2011년 성균관대 전자전기공학과 졸업. 2013년 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 2017년 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(공학박사). 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(공학박사). 2002년~2003년 Post doctoral Research Associate, Texas A&M University. 2003년~2005년 한국전기연구원 산업전기연구단 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 연구사업이사.