

소형산업용 인덕션 히터의 최대에너지 전달에 관한 연구

A Study on the Maximum Energy Transfer of a Small Industrial Induction Heater

이 정 빈*, 김 태 명**, 김 영 완***★

Jeong-Bin Lee*, Tae-Myoung Kim**, Young-Wan Kim***★

Abstract

Induction heating method that allows the maximum heating power to be delivered by varying switching frequency in the inductance change of the work coil of induction heater was proposed in this paper. Depending on the type of work piece in the work coil and proximity to the work coil, the resonance frequency of the resonant circuit will be changed. It may be difficult to deliver the maximum power due to the damage of the induced heater element or switching loss depending on the resonance frequency and switching frequency operating relationship. The switching frequency was variable to maintain the maximum power transmission by sensing the heating power due to the change of the resonance frequency. Through the result of the proposed method that can be controlled within the required output change range according to the change of the switching frequency corresponding to the change of the resonance frequency, the induction heater having a variable switching frequency characteristic that can transmit almost constant output power (within 0.43 dB) power efficiency was achieved.

요 약

본 논문에서는 유도 가열코일의 인덕턴스 변화 환경에서 스위칭주파수를 가변하여 최대 가열 전력이 전달될 수 있는 유도 가열 방식을 제안하였다. 가열코일내 피 가열체 종류 및 가열코일과의 근접도에 따라 공진회로의 공진주파수가 변화하게 되며, 공진주파수와 스위칭주파수 관계에 따라 유도가열기 소자의 파손 또는 손실이 발생하여 최대 전력 전달이 어려울 수 있다. 공진주파수의 변화에 따른 가열 전력을 감지하여 최대 전력 전달이 유지되도록 스위칭주파수를 가변하도록 하였다. 공진주파수 변화에 대응하는 스위칭주파수 가변에 따라 요구하는 출력 변화 범위내로 제어될 수 있는 제안된 방식의 결과를 통하여 거의 일정한 출력전력(0.43 dB 이내) 전달이 가능한 스위칭주파수 가변특성을 갖는 유도가열기의 전력 효율성을 확보할 수 있었다.

Key words : Induction heating, Work coil, Resonant frequency of induction heater, High frequency induction heater, Variable switching frequency

* Dept. of Smart Electrics, Korea Polytechnic College

** Entec Korea Co., Ltd.

*** Dept. of IT Convergence Communication Engineering, Kunsan National University

★ Corresponding author

E-mail : jblee2@hanmail.net, Tel : +82-63-540-7683

Manuscript received Sep. 24, 2021; revised Sep. 28, 2021; Accepted Sep. 30, 2021.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

유도가열 기술은 산업 현장의 여러 분야에 응용되는 기술로, 패러데이(Michael Faraday)에 의해서 발견된 전자기 유도현상 원리를 적용하고 있다[1]. 패러데이의 전자유도 현상에 의해 가열코일(Work Coil)에 고주파 전류가 흐를 때 발생하는 고주파 자기장 중에 가열하고자 하는 도전성의 금속(Metal)을 위치시키면 금속의 표면에는 와전류가 유기되어 표피저항에 의한 주울 열이 발생되고 이는 금속의 표면온도 상승을 유도하게 된다[1]. 즉, 주파수가 높은 고주파 전류를 사용하여 와전류에 의한 표피작용 및 근접효과에 의해서 피 가열체의 표면층에 자속과 와전류가 집중하고, 이때 발생하는 열손실(와전류 손, 히스테리시스 손)이 피 가열체의 표면층을 가열하여 온도가 상승하게 된다[2]. 이러한 원리로써 피 가열체의 해당 부분에 에너지를 집중시켜 효율적으로 급속가열이 가능하기 때문에 생산성과 작업성이 높아진다. 이러한 유도가열 방식은 종래의 연소에 의한 발열방식이나 열선 가열방식과 비교하여 와전류에 의한 전력변환 공급방식으로 전력 변환효율이 높아 경제적이고, 온도에 대한 신속한 응답성으로 인하여 가열기 초기동작 시 수반되는 열 손실을 감소시킬 수 있다. 이러한 장점으로 인하여 유도가열 원리를 적용하여 다양한 산업분야에 적용하는 연구가 활발히 이루어지고 있다[3][4][5].

유도가열기에서 중요한 요소는 가열 효율로써 코일전류, 코일권수의 곱에 비례하고 주파수, 유효투자율, 고유저항의 제곱근에 비례한다. 주파수가 높으면 가열효율은 높아지나 표피효과(Skin Effect)에 의해 표면만 가열되므로 두꺼운 물체를 가열시에는 낮은 주파수가 효율적이다. 높은 주파수를 사용하여 녹슨 볼트 등을 가열하여 해제할 수 있는 유도가열기의 경우, 최대 전력을 전달하여 가열 효율을 유지하여야 하나 가열코일(Work Coil)내 피 가열체(볼트 등)가 위치할 경우, 가열코일의 인덕턴스가 변화하게 되어 공진주파수 변화가 발생되어 가열 전력을 최대로 전달하기 어려운 문제점이 발생된다. 아울러, 스위칭주파수와 공진주파수 관계에 따라 스위칭 손실 또는 스위칭 소자의 파손이 발생할 수 있다. 따라서 공진주파수의 변화에 따라 스위칭주파수를 가변할 수 있는 유도가열기 구성

이 필요할 수 있다.

본 논문에서는 피 가열체의 환경에 따라 공진주파수의 변화에 대응할 수 있는 스위칭주파수를 가변할 수 있는 방식을 제안한다. 가열코일내 피 가열체가 위치할 경우, 인덕턴스가 변화되어 공진주파수의 이격이 발생되어 피 가열체에 전달되는 전력이 줄어드는 현상이 발생한다. 본 방식에서는 최대 전력이 전달되도록 공진주파수 변화에 대한 전력 변화를 검출하여 스위칭 주파수를 가변할 수 있게 한다.

II. 본론

1. 유도가열기

가. 유도가열기의 원리

고주파 유도가열기는 그림 1과 같이 코일에 교류 전류를 통과시키면 코일에는 자기장(Magnetic field)이 형성된다. 이때 피 가열체인 도체에 교류 자력이 가해지게 되며 도체에는 전자기 유도 현상에 의해 식 (1)과 같은 유기기전력(e)이 발생되고, 이로 인하여 금속 표면에 소용돌이 전류(와전류)가 발생되어 소용돌이 전류로 인하여 발생하는 주울 열에 의해 물체가 가열된다. 즉, 유도가열은 전자유도작용의 원리를 이용하여 코일에 전류를 흘려 자장이 발생하게 함으로써, 이 자장 내에 있는 피 가열체(도체)에 유도전류가 발생된다[6].

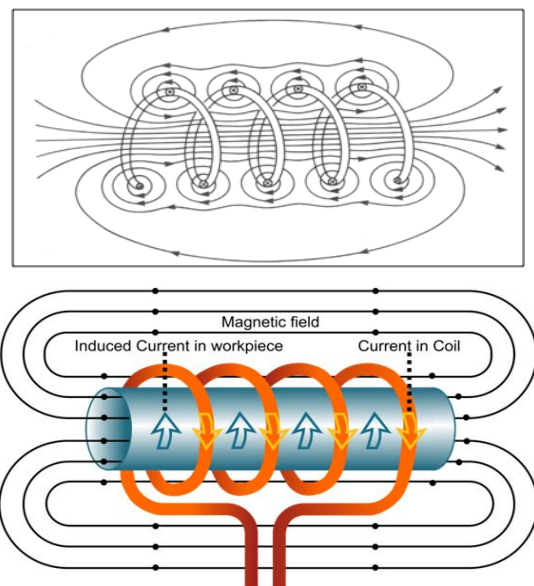


Fig. 1. Principle of induction heating.

그림 1. 유도가열 원리

이 유도전류는 물체 내에서 전류가 소용돌이치며 흐르는 와전류에 의해 생기는 손실(Eddy Current Losses)과, 히스테리시스 손실(Hysteresis Losses)에 의한 식 (1)과 같은 주울(Joule's Law)열이 발생하여 매우 단 시간에 발열이 되는 원리를 적용한다.

$$e = -N \frac{d\phi}{dt}, \quad P = I^2 R \quad (1)$$

여기서, N 은 가열코일의 턴 수이며, ϕ 는 자속밀도, 그리고 R 은 표피저항이다.

나. 와전류 손실 및 표피효과

그림 2와 같이 가열코일에 고주파 전류가 흐를 경우, 코일 주위에 자속이 발생하고 인접한 피 가열체인 금속 내부에 자속이 침투하게 되어 전류가 발생한다. 발생한 전류에 의해 금속체에는 온도가 상승하여 철손에 의한 발열이 발생한다. 금속이 자성체이면 자속은 전류의 교변에 의해 히스테리시스 루프(Hysteresis loop)특성을 가지며, 루프의 면적이 클수록 손실이 증가하지만, 손실의 크기는 자성체에 따라 다르게 나타난다. 히스테리시스 손실은 식 (2)로 표현되는 스타인메츠(Steinmetz) 식으로 구할 수 있다[9].

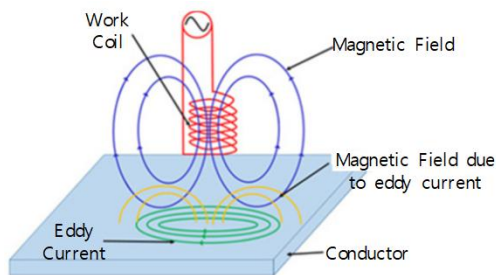


Fig. 2. Eddy current generation.

그림 2. 와전류 발생

$$P_h = \eta f (B_m)^{1.6} V [W] \quad (2)$$

여기서, η 는 히스테리시스 상수이며, f 는 주파수, B_m 은 최대 자속밀도이다. 그리고 V 는 철심의 체적이다.

와전류는 그림 2와 같이 도체를 관통하는 자속의 변화 또는 도체와 자속의 상대적인 운동에 따른 도체내 자속 변화로 인하여 도체내에 국부적으로 형성되는 임의의 폐회로에 유기되는 전류이다. 이러

한 와전류(Eddy Currents)는 도체내에서 발생되면 정상 전류분포에 영향을 주며, 와전류손 인 주울열을 유발하여 도체인 피 가열체를 가열시킨다. 와전류에 의해 나타나는 와전류 손실은 와전류의 크기 및 유선은 도체의 종류, 크기, 전도도 및 자속의 시간적 변화에 의해 매우 복잡하게 발생되고 도체내 전류 분포가 일정하지 않으므로 간단히 식 (1)을 적용하기에는 어려움이 있다. 그러나 일반적으로 와전류 손실(P_e)은 식 (3)과 같이 비례관계를 갖는다.

$$P_e \propto \sigma f^2 B_m^2 [W] \quad (3)$$

여기서, σ 는 도체의 도전율이다.

식 (2)와 식 (3)으로부터 10 kHz 이상의 높은 주파수를 사용하는 유도가열기에서는 히스테리시스 손실보다 와전류 손실이 지배적으로 나타나므로 히스테리시스(Hysteresis) 손실을 무시할 수 있다. 유도가열기의 가열 효율은 주파수가 높을수록 좋은 특성을 보여주고 있으나, 표피효과나 근접효과 등이 나타나 취급하기가 어려울 수 있으므로 유도가열기의 용도에 따라 적당한 주파수를 선정하여야 한다.

표피효과는 그림 3과 같이 신호의 주파수가 높아질수록 도체내 흐르는 전류는 도체 표면에 나타나는 현상으로, 도체에 교류 신호가 흐르면 표면으로부터 도체 중심으로 들어갈수록 전류밀도가 작아진다. 표피효과에 의해 도체 내부는 전류 전도에 거의 관여되지 않고, 도체 표면의 전기저항 성분이 식 (1)의 유도가열기의 등가 표피 저항성분으로 나타난다.

표피깊이(δ : Skin Depth)는 도체 표면의 전류밀도에 비해 36.8 % 감소되는 지점까지의 도체 두께이며, 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (4)$$

여기서, ω 는 사용 신호의 각 속도이며, μ 는 도체의 투자율이다.

식 (4)로부터 피 가열체의 가열 깊이는 주파수가 증가할수록 그리고 도전율 및 투자율이 높은 도체일수록 가열 깊이가 낮아진다. 따라서 피 가열체의

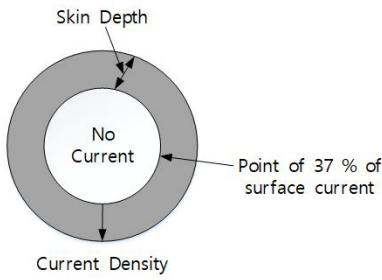


Fig. 3. Skin effect.
그림 3. 표피효과

가열 용도에 따라 주파수 선정이 필요하며, 도전율과 투과율이 높은 도체일수록 낮은 주파수를 갖는 유도가열기 특성이 요구될 수 있음을 알 수 있다.

2. 스위칭주파수 가변 유도가열기

유도가열기는 전원 입력부, 전력변환부, 그리고 출력부로 구성된다. 전원 입력은 AC 또는 DC 전원을 사용하며, AC 전원을 사용할 경우에는 AC-DC 정류회로를 포함한다. 전력 변환부는 인버터 회로로 구성되며, 출력부는 공진회로를 형성하며 커패시터와 가열코일인 인덕턴스로 구성된다. 피 가열체(볼트 등)가 가열코일내 위치하여 가열될 경우, 무부하시 가열코일의 인덕턴스 값으로부터 변동되어 공진주파수의 변화가 발생된다. 그림 4와 같이 직렬공진형 하프브리지 인버터인 경우, 스위칭주파수와 공진주파수의 관계에 따라 인버터의 동작 특성이 다르게 나타난다[7][8].

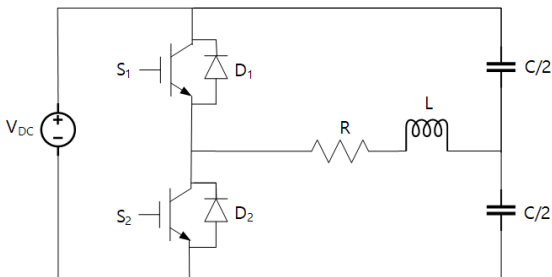


Fig. 4. Series resonant half-bridge inverter.
그림 4. 직렬공진형 하프브리지 인버터

그림 4에서 직렬공진회로의 입력전압은 V_{DC} 크기를 갖는 구형파이며, 공진회로의 선택도($Q = \sqrt{L/C}/R$)가 높으면, 공진회로의 출력 전류는 정현파 특성으로 나타난다. 스위칭주파수(ω_s)와 공진주파수(ω_r)가 같을 경우, 스위칭 소자(S_1, S_2)는 영전압(Zero Voltage)에서 턴-온(Turn-on)과 턴-오프(Turn-off)하여 높

은 효율과 낮은 스위칭 손실과 역방향 다이오드 (D_1, D_2)가 도통되지 않는 높은 출력을 갖는다. 그러나 스위칭주파수가 공진주파수보다 낮을 경우, 공진회로는 용량성 부하를 갖는 회로로 나타나며, 턴-오프시 역방향 다이오드 전류의 역회복 전류가 스위칭 전류에 큰 스파이크를 유발한다[10]. 이러한 역회복 피크전류로 인하여 스위칭 소자가 파손될 수도 있으며, 큰 스위칭 손실로 나타날 수 있다. 또한, 스위칭 주파수가 공진주파수보다 클 경우에는 공진회로는 유도성 부하를 갖는 공진회로로 표현된다. 이런 동작 환경에서는 역방향 다이오드에 적은양의 음(陰)전압이 걸리기는 하나, 입력전압에 비해 무시해도 될 정도이다. 그러나 턴-오프시에는 스위치 전압과 전류파형이 겹쳐지고 스위칭소자의 입력 커패시턴스가 증가하여 손실이 발생된다. 따라서 공진회로의 공진주파수에 따른 변화에 대응하여 스위칭주파수의 가변화가 필요하며 그림 5와 같은 스위칭주파수 가변 회로를 적용한다.

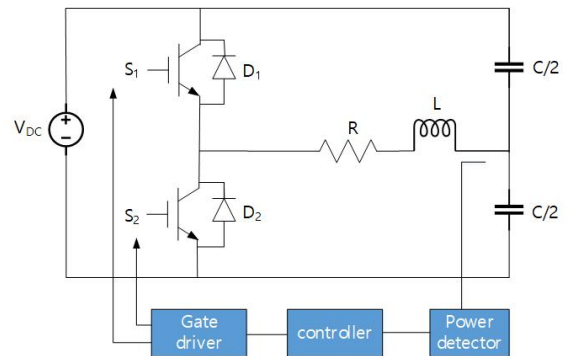


Fig. 5. Series resonant half-bridge inverter with variable switching frequency.
그림 5. 스위칭주파수 가변특성을 갖는 직렬공진형 하프브리지 인버터

그림 5는 공진회로소자인 가열코일내 피 가열체 종류 및 위치에 따라 인덕턴스 변화가 발생되며, 이로 인한 공진주파수 변동에 따른 출력전력 감소를 해결하기 위하여 공진회로의 전달 출력을 감지하여 최대전력조건에 설정된 값과 비교하여 스위칭주파수를 가변할 수 있도록 한다.

그림 6은 공진주파수 변동에 따른 스위칭주파수 가변을 위한 제어 흐름도를 보여준다.

스위칭주파수 제어를 위하여 그림 6의 a 값은 전력 감지기의 오차범위 등을 고려하였으며, 스위칭주파수의 가변크기는 1 kHz를 가정하였다.

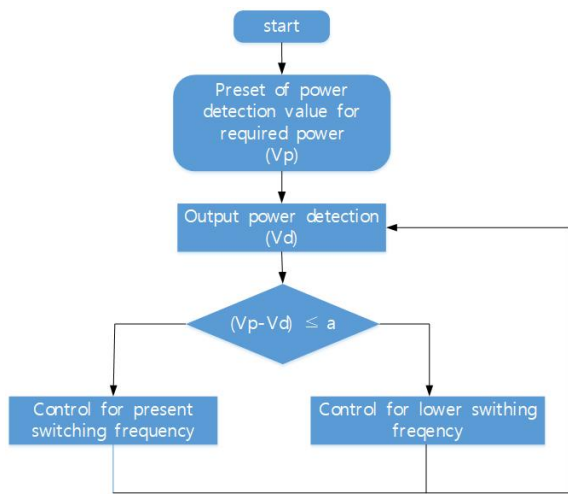


Fig. 6. Control signal flow chart for variable switching frequency.

그림 6. 스위칭주파수 가변을 위한 제어흐름도

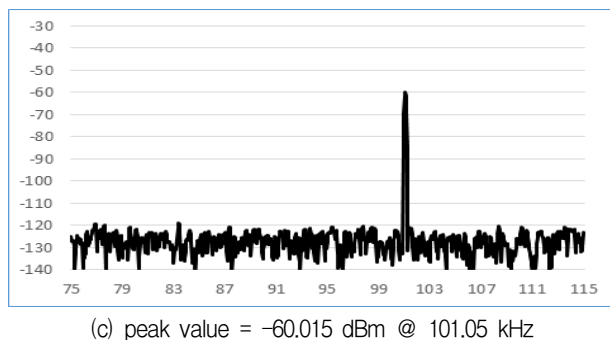
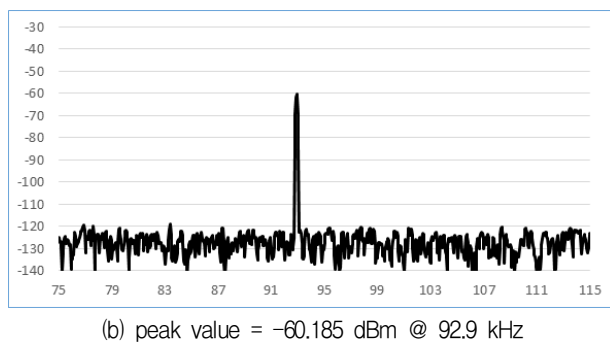
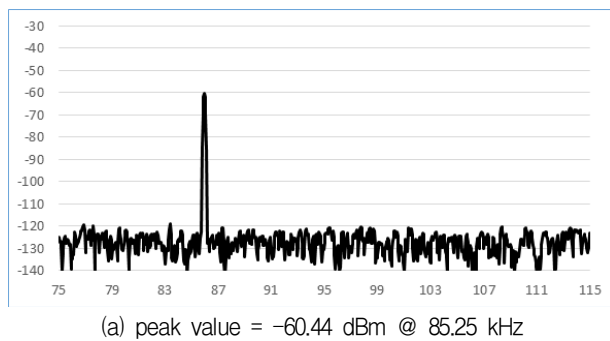


Fig. 7. Output power characteristics in case of induction heater with variable switching frequency.

그림 7. 스위칭주파수 가변특성을 갖는 유도가열기의 출력 특성

그림 7은 100 kHz 스위칭주파수를 갖는 유도가열기에 대해 각각 스위칭 공진주파수를 가변하면서 측정된 출력 전력의 제어 결과를 보여주고 있다. 가열코일 주위의 신호를 감지한 전력 스펙트럼으로, 일정한 거리를 유지한 상태에서 전력 변화를 측정하였다. 사용된 유도가열기는 100 kHz 공진주파수를 갖는 기존의 소형 모델에 대해 적용하였으며, 피 가열체로부터 변화되는 가열코일의 인덕턴스 값이 일정범위(약 15%) 변화되도록 하였다. 그림과 같이 가열코일의 인덕턴스 변화로 인한 공진주파수 변동에 대응하는 스위칭주파수 가변으로 거의 일정한 출력 전력(0.43 dB 이내) 전달이 가능함을 보여주고 있다.

III. 결론

본 논문에서는 가열코일내 피 가열체 종류 및 위치에 따른 가열코일의 인덕턴스 변화로 발생하는 공진주파수 변화에 대응하도록 스위칭주파수를 가변하여 가능한 최대전력이 전달될 수 있는 고주파 유도가열기 제어방법에 대해 제안하였다. 공진회로의 공진주파수 변화에 따른 출력 변동을 감지하여 최대 전력이 전달되도록 스위칭주파수를 가변하여 일정한 출력 전달이 가능할 수 있도록 하였다. 전통적인 기계부품 소재가공분야에 제안된 방법을 적용한 유도가열기를 사용하여 에너지 절감도 제고할 수 있으며, 향후 강자성체 금속의 피 가열체 및 가열코일과 가열코일내 피 가열체의 근접도 등에 대한 공진회로의 변화 등에 대한 해석적 결과를 적용한 능동적 가변 범위 및 제어 기술에 대한 진보적인 연구를 수행할 필요가 있다.

References

[1] L. HLQ Induction Equipment Co., "Induction Heating Theory-Principle," https://dw-inductionheater.com/wp-content/uploads/2020/05/induction_heating_theory.pdf

[2] Henry W. Koertzen, et al, "Design of the Half-Bridge Series Resonant Converter for Induction Cooking," in *proc. of IEEE-PESC conference*, pp.729-735, 1995. DOI: 10.1109/PESC.1995.474899

[3] Dmitriy S. Brazhnik, Kirill E. Bolotin, "Different

Approaches to Taking Joule Heat into Induction Heating of Graphite Crucible,” in *Proc. of IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*, pp.616-618, 2020. DOI: 10.1109/EICOnRus49466.2020.9039247

[4] Ryosuke Kawashima, et al., “Three-Phase to Single-Phase Multiresonant Direct AC-DC Converter for Metal Hardening High Frequency Induction Heating Applications,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.36, issue1, pp.639-653, 2021. DOI: 10.1109/TPEL.2020.3003026

[5] Sang-hoon Park, “A study on the characteristics of electric superheater using induction heating,” *Domestic Master’s Thesis, Hoseo University Graduate School*, 2012.

[6] Seong-hyuk Im, “Temperature rise of hot bar in induction heating process,” *Domestic Master’s Thesis, Chonbuk National University Graduate School*, 2015.

[7] R. Beiranvand, B. Rashidian, M. Zolghadri and S. M. H. Alavi, “A Design Procedure for Optimizing the LLC Resonant Converter as a Wide Output Range Voltage Source,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.27, no.8, pp.3749-3763, 2012. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2187801

[8] R. Zheng, B. Liu and S. Duan, “Analysis and Parameter Optimization of Start-Up Process for LLC Resonant Converter,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.30, no.12, pp.7113-7122, 2015. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2389116

[9] Rashid, Muhammad H., *Power Electronics Handbook, 4th Ed.*, Butterworth-Heinemann, ISBN 978-0128114087, 2017.

[10] Sang-bong Yoo, “A Study on the Reliability and Optimal Control of Half-Bridge Inverter for Induction Heating System,” *Journal of the Korean Society of Professional Engineers*, vol.33, no.1, pp.94-105, 2000.

BIOGRAPHY

Jeong-Bin Lee (Member)



1993 : BS degree in Electrical Engineering, Chonnam National University.

1995 : MS degree in Electrical Engineering, Chonnam National University.

1997~Present : Prof. in Dept. of Smart Electrics, Korea Polytechnic College.

Tae-Myoung Kim (Member)



2009 : MS degree in Information and Radio Engineering, Kunsan National University.

2018~ : PhD Course in Information and Radio Engineering, Kunsan National University.

2007~Present : CEO in Entec Korea Co., Ltd.

Young-Wan Kim (Member)



1983 : BS degree in Electrical Engineering, Kyungpook National University.

1985 : MS degree in Electrical Engineering, Kyungpook National University.

2003 : PhD degree in Electrical Engineering, Chungnam National University.

2004~Present : Prof. in Dept. of IT Convergence Comm. Engineering, Kunsan National University.