

평판 유도발열체의 거리 · 주파수 가변특성에 관한 연구

(A study on the Distance and Frequency Variable Characteristics of Flat Plate Induction Heating Element)

우형균* · 신대철**

(Hyoung-Gyun Woo · Dae-Chul Shin)

Abstract

Induction-heated system is innovative system which applied IH(Induction Heating) magnetic induction heating generated from induction-heated metallic package and high-frequency power circuit technique for thermal converse technique. In this occurs not burning, so that the working environment and deterioration of products can be improved. This technique is used high frequency inverter. By using high frequency inverter high frequency in the range of kHz can be made with conventional alternative current. In this contribution IGBT module is used for high frequency inverter.

In this paper are discussed analysis of characteristics according to the each frequency and produced Flat plate induction heating system using 1.5kW-class half-bridge resonant inverter. In addition, operating characteristics of the system to changes in the distance between the coil and the heater, applications of system are also discussed.

Key Words : Frequency, Flat Plate, Induction Heating, Inverter, Resonant

1. 서 론

전기가열방식은 저항가열, 아크가열, 유도가열, 유전가열, 전자빔가열, 적외선 가열 등이 있으며 그중에서도 유도가열(Induction Heating)분야는 교류자계 중 도전성 물체에 유도되는 와전류손(Eddy current Loss), 히스테리시스손(Hysteresis loss)을 이용하여 가열하는 방식이다. 방사가열이나 연소가열의 가열방식은 열원과 피열물 사이의 온도차가 크기 때문에 효율이 나쁘지만, 유도가열은 표피효과에 의하여 피열물 자체가 가열되므로 손실이 적고 효율이 좋으며, 표면만 가열이 가능하다는 것 이외에도 여러 측면에서 유

* 주저자 : 호서대학교 대학원 전기공학과 박사과정
** 교신저자 : 호서대학교 전기공학과 교수
* Main author : The Graduate School Doctor
Course of Electrical Engineering, Hoseo University, Korea
** Corresponding author : Professor of Electrical Engineering, Hoseo University, Korea
Tel : 041-540-9588, Fax : 041-540-5658
E-mail : woosee7332@nate.com
접수일자 : 2013년 3월 14일
1차심사 : 2013년 3월 19일
심사완료 : 2013년 4월 19일

리한 점이 많아 여러 분야에 응용되고 있다[1].

유도가열 방식은 가열효율이 높기 때문에(가스기기 : 70%, 유도가열 : 90% 이상) 경제적이며, 신속한 가열을 통하여 위밍업 등의 소비전력을 줄일 수 있다. 또한 인버터의 제어 주파수나 통전율(Duty ratio)에 의해 출력 및 동작제어가 용이하여 사용이 편리하고, 안정성 및 배출가스 등의 오염물질의 발생이 없어 위생적이며, 청결하다. 이러한 유도가열 방식의 유효성은 인지도가 매우 높아져 산업설비에서부터 현재 가정용 전자조리기까지 일반 가정에 널리 보급되어 주방환경을 크게 개선시키기도 하였다[2-4].

전력소자의 발전과 더불어 전력변환장치 기술은 종래의 스위칭 회로기술을 기본으로 하여 고속화, 대용량화로 발전해 왔다. 또한 에너지의 효율적인 이용이 강조되고 있는 현재 산업 사회에서 각종 시스템은 신뢰성이 높고 소형, 경량이면서 전력밀도가 높은 것이 요구되어지고 있으며, 공진회로를 이용한 전력변환장치의 고주파 스위칭 기법의 도입은 짧은 스위칭 동작으로 회로내에 큰 진폭의 전류가 발생하므로 공진 요소 부품들이 소형, 경량화 되고 고출력화가 가능하게 되었다. 또한 새로운 고속 대전력 반도체 전력 소자들의 개발에 의해 가능한 스위칭 범위가 20kHz~수백 kHz인 공진형 인버터의 설계에 관련된 기술이 용이해 졌다[5].

최근에는 사출금형 및 나노구조의 열처리 분야에 유도가열의 사용이 급속히 증가하고 있으며 적합한 온도와 주파수를 결정하는데 관심이 많아지고 있다. 산업용 열처리의 종류로는 용융(Melting), 시효(Aging), 단조(Forging), 소결(Sintering)등이 있고, 각각의 열처리에서 사용되는 온도는 금속별, 종류별로 상이하 다. Aluminum alloy의 시효 열처리 온도는 121~230 °C이고 Steel 소결 열처리 온도는 1,093~1,288°C로 사용된다[6-8].

본 논문에서는 1.5kW급 평판형 유도가열 실험장치를 직접 제작하고 시뮬레이션 및 실험을 통하여 정상 동작해석, 특수 스텐레스 발열체 부하를 이용한 코일과 발열체의 거리변화에 따른 동작특성 및 주파수 변화에 따른 특성에 대하여 설명하였다.

끝으로 평판 유도가열의 산업용 열처리 분야의 유효

성을 검증하였다.

2. 유도가열의 원리

유도가열의 원리는 Faraday-Lenz의 전자 유도현상을 이용한 것으로 유도코일에 고주파 교류전류가 흐를 때 발생하는 고주파 자계 중에 도전성을 가지는 금속을 놓으면 금속에 유기기전력이 식 (1)과 같이 발생되고 이로 인하여 피 가열물인 금속에 와전류가 유기되어 표피저항에 의하여 $P=I^2RW$ 의 전력 크기만큼 주열 열을 발생시키는 원리이다.

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \tag{1}$$

원주 금속 내를 흐르는 유도전류는 표면에 가장 강하게 발생하고 내부로 갈수록 지수 함수적으로 감소하는 것이 특징으로, 이러한 경향은 전원의 주파수가 높을수록 현저하다. 이러한 열의 대부분은 식 (2)로 표현되는 침투깊이 δ 내에 분포하게 되며, δ 는 유도가열의 인버터 동작주파수를 결정하는 중요한 요소가 된다[9].

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

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

식 (2)에 의한 가열체 종류별 특성과 침투깊이에 관한 내용을 표 1에 나타내었다[10-11].

표 1. 가열체의 특성과 침투깊이
Table 1. Characteristic and skin depth of heater

가열체	STS 420	Copper	Aluminum
$\rho \mu\Omega \cdot cm$	55	1.67	2.73
μ_r	950	0.99983	1.00002
f kHz	침투깊이(mm)		
1	0.38	2.09	2.66
10	0.12	0.66	0.84
100	0.038	0.21	0.27

그림 1과 같이 평판형태로 코일을 감고 금속도체를 가까이 하여 코일에 고주파 교류 전류를 흘리면 도체 내에는 고주파 자속이 발생한다.

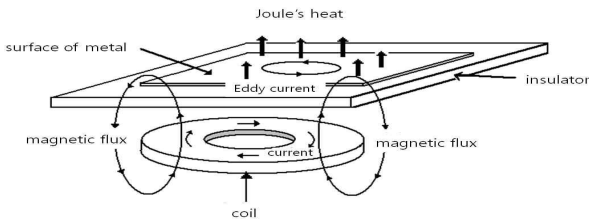


그림 1. 유도가열의 원리
Fig. 1. Principle of induction heating

이 도체 내에는 전자유도 작용에 의하여 코일 내에 있는 금속은 변압기의 2차 권선에 기전력이 발생하는 것과 같이 유도전류가 발생하여 와전류가 흐르게 되며, 이 와전류는 금속의 단면 각부에 균일하게 흐르는 것이 아니고 금속의 표면에 집중적으로 흐르게 되며 내부로 갈수록 지수 함수적으로 감소하게 된다.

이 와전류가 임의의 저항을 가진 도체 내를 흐르면 그 도체 내에 주울 열이 발생하며 이것이 와전류 손실로 식 (3)과 같다[12].

$$P_e = \frac{(\pi f r B_m)^2 V}{4\rho} [W] \quad (3)$$

여기서 r : 철심의 반지름 m , f : 주파수 Hz , B_m : 최대자속밀도 T , ρ : 저항률 $\Omega \cdot cm$, V : 철심의 체적 m^3 이다.

3. Half-Bridge 공진형 인버터

본 논문에서는 Half-bridge방식의 공진형 인버터를 사용하였다. Half-bridge 공진형 인버터는 저손실 ZVS(Zero Voltage Switching)가 가능하고 다양한 회로방식에서의 확장이 가능할 뿐만 아니라 Full-bridge 방식과 비교할 때 경제적인 면에서 우수하다.

그림 2의 하프-브릿지 인버터는 직류 전원전압이 캐패시터에 의해 두 부분으로 분리되며 스위치의 수가 2개로 된다. 각 캐패시터는 용량이 동일하며 양단에 $V_{dc}/2$ 의 전압이 걸리게 된다. 그리고 유도성 부하

의 전류를 연속적으로 흐르게 하기 위해 케환다이오드가 필요하다.

대전력 스위칭 회로에서는 상부(위쪽 IGBT)와 하부(아래쪽 IGBT)의 암단락에 의해서 관통전류가 발생하게 된다. 관통전류가 발생하는 원인은 푸쉬-풀 드라이빙(Push-full driving)시 소자의 턴 오프 딜레이(Turn off delay)가 발생하여 상, 하상이 순간적으로 동시에 온 되기 때문이다.

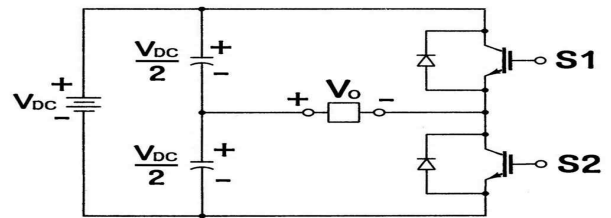


그림 2. 하프-브리지 공진형 인버터
Fig. 2. Half-bridge resonant inverter

그래서 보통 위상과 하상의 스위칭 사이에 수 μs 의 불감시간대를 고의로 발생시키게 되며 이 불감시간을 데드타임이라고 한다. 대개 IGBT의 경우에는 2~3 μs 정도를 사용하며, 스위칭 속도가 좀더 빠른 MOSFET의 경우에는 1~1.5 μs 정도를 사용한다[13].

4. 실험 장치 구성

실험 장치 구성은 크게 입력부, 전력변환부, 출력부, 제어부로 나눌 수 있다.

실험을 위해 제작한 장치의 사양을 표 2에 정리하였다.

표 2. 제작 시스템 사양
Table 2. Specification of system

구분	값	단위
용량	1.5	kW
사용전원	1 Φ 220	V
공진 인덕턴스	60	μH
공진 콘덴서	0.1 * 6개(병렬)	μF
공진 주파수	26.5	kHz
동작 주파수	27~35	kHz
스위칭 소자	IGBT 600V 75A	
Gate Driver	IR2110	

그림 3은 제작한 하프-브릿지 고주파 공진형 인버터의 블록도를 나타낸다.

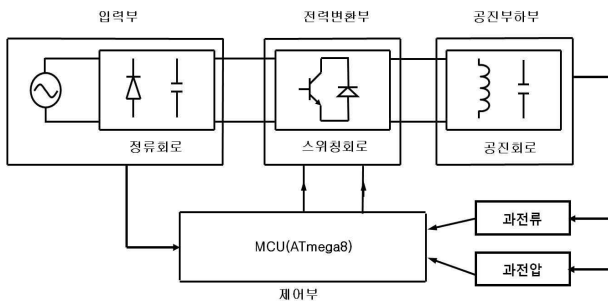


그림 3. 유도가열 시스템의 블록도
Fig. 3. A block diagram of induction heating system

입력부는 정류회로로 구성되며 주요 소자는 단상 브릿지다이오드와 콘덴서로 브릿지 다이오드 뒷단에 사용되는 콘덴서는 상용주파수의 전원 측에서 보면 복잡한 액티브 PWM제어를 행하지 않고 고효율 특이선 전류의 정현화 기능을 갖도록 설계하는데 시스템 특성상 120Hz 리플성분을 그대로 통과시킬 수 있도록 수 μF 정도의 용량을 사용하였다.

전력변환부는 스위칭회로로 구성되며 본 실험에서 사용한 스위칭소자는 정격전압, 스위칭 주파수와 냉각 능력을 고려한 전류정격, 안전동작영역에 적합한 모듈 타입 IGBT 600V, 75A이며 제어부는 ATmega8을 사용하였다.

출력부는 공진회로로 구성되며 콘덴서(C)와 부하(L)가 있다. 공진 콘덴서는 주파수 특성이 좋은 폴리프로필렌계열을 주로 사용하지만 리플전류를 고려해서 1,200V의 내압을 사용하였다. 또 부하이자 공진 L은 자성스텐레스(발열체), 테프론(절연체), 릿쓰와이어(가열코일)로 특수하게 설계하였다.

그림 4는 실제 제작된 공진형 인버터 실험장치의 각 부분에 대한 설명이다.

그림 5는 출력부 중에서 부하에 해당하는 장치로써, 구조는 테프론으로 제작된 평평하고 절연되어 있는 판에 가열코일이 단층으로 감겨 있으며 발열체를 거리에 따라 이동하여 실험할 수 있는 구조이다. 실험에 사용된 발열체는 STS 420재질로써 자성을 띄고 있는

특수한 스텐레스 재질이며 가로 250mm, 세로 300mm, 두께 0.5mm로 제작되었다.

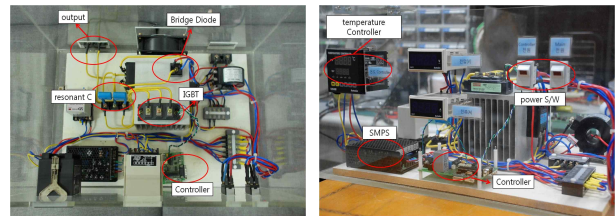


그림 4. 시스템 구성
Fig. 4. System composition

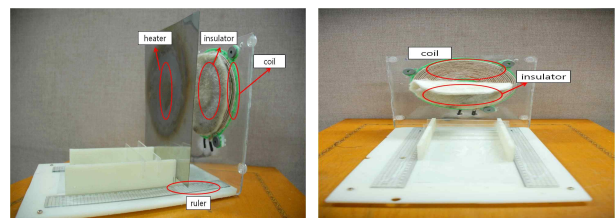


그림 5. 가열 시스템 실험장치
Fig. 5. Experimental set up heating system

5. 시뮬레이션 및 실험 결과

본 논문의 실험은 거리와 주파수 변화의 두가지 변수를 실험하기 위해 실험장치의 스위칭 주파수는 27kHz부터 점차 증가시키고 발열체와 코일간 거리는 1cm~5cm로 변화시키며 실험을 진행하였다.

또한 거리 설정 후에 전원을 켜 시점으로부터 10초 후에 온도와 파형을 측정하는 것이다. 그 이상의 시간이 되면 온도가 계속 상승하며 발열체가 과열되어 금속 특성을 잃게 될 수도 있기 때문에 시간을 설정하여 실험하였다.

그림 6과 그림 7은 ORCAD를 사용하여 본 논문에 사용된 회로에 대한 시뮬레이션 회로와 출력 파형이다.

시뮬레이션 결과를 통해 각부 파형을 확인함과 동시에 제작된 인버터의 정상동작을 확인할 수 있었다.

그림 8과 그림 10은 열화상 카메라(NEC사 TVS-200EX모델)를 이용하여 촬영한 사진이다. 거리와 주파수에 따라 코일 주위의 발열체 온도분포 및 최대온도를 확인할 수 있다.

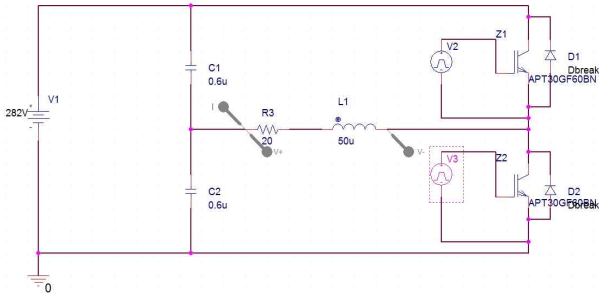


그림 6. 시뮬레이션 회로도
Fig. 6. Simulation circuit

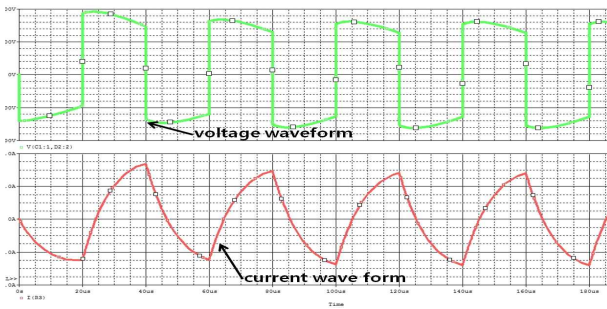


그림 7. 시뮬레이션 파형
Fig. 7. Simulation waveform

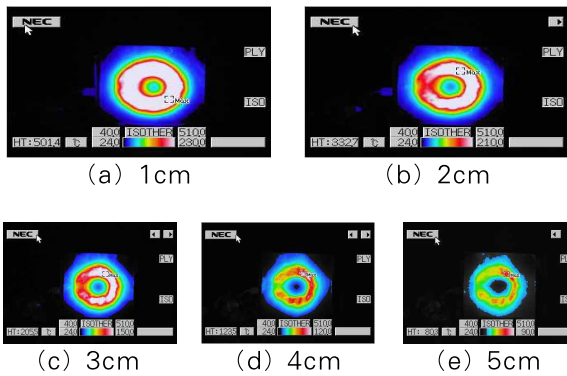


그림 8. 거리에 따른 온도변화
Fig. 8. Temperature change corresponding to the distance

그림 9와 그림 11은 오실로스코프(Lecroy-LT256)를 사용하여 전압파형과 부하전류를 실측한 파형이며, 시뮬레이션과 일치함을 알 수 있다.
그림 9의 주파수는 고정(30kHz)이며 발열체와 코일 사이의 거리를 변화하여 실험한 결과이다. 발열체와 코일사이의 거리가 가까워질수록 전류가 증가함을 확

인할 수 있다.

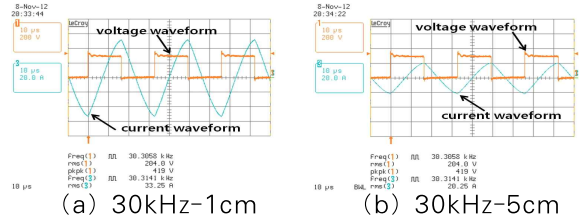


그림 9. 거리에 따른 파형변화
Fig. 9. Waveform change corresponding to the distance

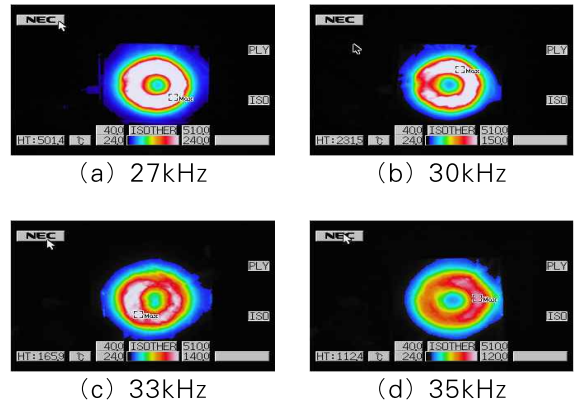


그림 10. 주파수에 따른 온도변화
Fig. 10. Temperature change corresponding to the frequency

그림 11은 발열체와 코일의 거리를 1cm로 고정시키고 주파수를 변화하며 실험한 결과이다. 주파수가 증가할수록 전류가 작아지는 것을 확인할 수 있다.

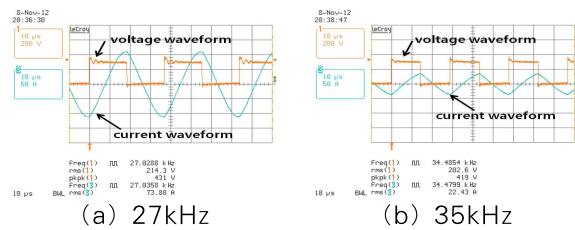


그림 11. 주파수에 따른 파형변화
Fig. 11. Waveform change corresponding to the frequency

유도가열의 가열 부위는 발열체의 열 전도로 인해

코일 폭보다 넓게 가열되며 코일의 결합적인 요소로 인하여 그림 12에서 나타내는 것처럼 코일 중앙의 자속밀도가 높아지고 온도분포 또한 코일 중앙에 발열이 집중되는 것을 확인할 수 있다.

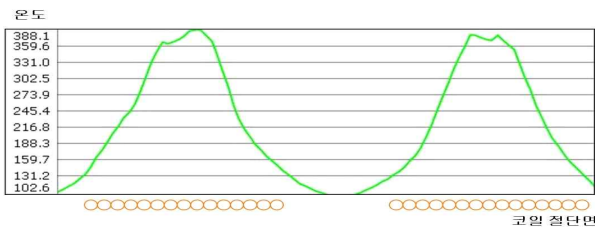


그림 12. 발열체의 온도분포
Fig. 12. Temperature distribution of heater

각각의 주파수와 거리를 변화 하였을 때 측정값을 표 3에 정리하였다.

표 3. 실험 결과
Table 3. Experimental result

Frequency kHz	distance cm	current A	maximun temperature °C
27	1	7.60	501.4
27	2	5.76	332.7
27	3	4.07	205.5
27	4	3.05	119.3
27	5	2.43	80.30
30	1	3.56	240.0
30	2	3.36	210.0
30	3	2.38	141.1
30	4	1.79	97.50
30	5	1.41	69.30
33	1	3.14	132.6
33	2	2.35	99.30
33	3	1.66	59.10
33	4	1.23	51.70
33	5	0.95	42.10
35	1	2.59	112.4
35	2	2.00	85.80
35	3	1.47	61.90
35	4	1.09	44.70
35	5	0.8	X

6. 결 론

본 논문은 평판 유도가열 실험 장치를 직접 제작하고 주파수 특성 및 코일과 발열체의 거리에 따른 특성에 관한 연구를 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 코일과 발열체의 거리가 가까울수록 발열특성이 좋아지는 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 코일과 발열체의 거리를 일정하게 하더라도 주파수를 변화하여 제어가 가능함을 확인하였다.
- 3) 전체적인 발열 특성은 코일 중앙에 집중되는 것을 확인할 수 있었다.
- 4) 기존의 평판형 유도가열은 가정용으로 많이 사용되어지고 금속 열처리나 산업용 유도가열은 원통형으로 코일을 감아 사용하였지만 본 논문의 실험을 통해 평판형 유도가열의 산업용 열처리 부분의 가능성을 검증하였다.

앞으로 더 발전적인 시스템 연구를 위하여 공진형 인버터의 손실대책 및 발열체 특성에 관한 연구가 꾸준히 진행되어야 할 것으로 사료된다.

References

- [1] D. C. Shin, H. M. Kwon, "Development a Two Step Heater using Induction Heating Based on a High Frequency Resonant Inverter", Journal of KIEE, Vol. 19, No. 7, pp. 81-86, Nov, 2005.
- [2] H. Ogiwara, and M. Nakaoka, "ZCS High Frequency Inverter Using SIT for Induction Heating Applications", IEE Proceedings-Electric Power Applications, Vol. 150, pp. 185, Mar, 2003.
- [3] Y. C. Jung, B. W. Park, K. Y. Jo, "Trend Technology for Induction Heat of Home Appliances", Proceedings of KIEE, Vol. 50, pp. 15-20, Feb, 1981.
- [4] B. K. Kang, S. M. Lee, J. W. Park, "A Study on the Parameter Optimization of Inverter for Induction Heating Cooking Appliance", Trans KIEE, Vol. 58, No. 1, pp. 77, Jan, 2009.
- [5] W. S. Shin, H. C. Park, "Inverter for Induction Heating using Simultaneous Dual-Frequency Method", The Transactions of KIPE, Vol. 16, No. 6, pp. 554-560, Dec, 2011.
- [6] J. O. Yun, Y. S. Yang, "A Study on the Flat-Type Induction Heating of Steel Plate" Transactions of the KSME, Vol. 28, No. 7, pp. 948-954, July, 2004.
- [7] Richard J. Reed, "North American Combustion Handbook"

- North American Mfg. co., pp. 368-369, 1978.
- [8] I. Y. Ko, N. R. Park, I. J. Shon, "Fabrication of Nanostructured $MoSi_2 - TaSi_2$ Composite by High-Frequency Induction Heating and its Mechanical Properties", *KJMM*, Vol. 50, No. 5, pp. 369-374, 2012.
- [9] Douglas W. Dietrich, "ASM Handbook, vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials", pp. 2207-2213, ASM international, 1990.
- [10] J. S. Lee, H. W. Kwon, M. H. Shin, B. W. Lee, "Introduction to the Electronic Properties of Materials", pp. 8-18, Hui-jung-dang, 1997.
- [11] S. M. Jang, S. H. Lee, H. C. Park, "Electromagnetic Induction Heating and Its Application", *Proceedings of KIEE*, vol. 50, No. 2, pp. 9, Feb, 2001.
- [12] D. C. Shin, S. H. Kim, "A Study on the Heating of Aluminum Sheet by Full-Bridge Resonant Inverter", *Journal of KIEE*, Vol. 19, No. 8, pp. 56-61, Dec, 2005.
- [13] S. C. Hong, H. J. Jeon, H. R. Baek, C. Y. Won, "Power Electronics used PSpice", pp. 431~433, *Intervision*, 2002.

◇ 저자소개 ◇



우형균 (禹亨均)

2007년 호서대학교 전기공학과 졸업.
2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
2013년 동 대학원 전기공학과 박사과정.



신대철 (申大澈)

1973년 건국대학교 전기공학과 졸업.
1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
1991년 동 대학원 (박사). 1989~1990년. 나가사키대학 visiting scholar.
1981년~현재 호서대학교 전기공학과 교수.