

고주파 공진형 인버터를 이용한 알루미늄 박판가열에 관한 연구

(A Study on the Induction Heating for Aluminum Sheet Using High-Frequency Resonant Inverter)

신대철* · 김성호

(Dae-Chul Shin · Sung-Ho Kim)

요 약

본 논문에서는 고주파 공진형 인버터를 이용하여 유도가열(Induction Heating)용 고주파 공진형 인버터와 고 주파수로 인한 표피효과(Skin effect)에 관하여 설명하였다. 그리고 실험기구를 제작하여 상자성체의 대표적 금속인 알루미늄을 사용하여 유도가열과 표피효과의 현상을 확인하였으며, 알루미늄 박판 가열의 가능성과 활용방안에 대하여 제안하였다.

Abstract

In this treatise, The "Induction-Heating" and "The Skin Effect" which resulted from the High-Frequency using the High-Frequency Resonant Inverter are showed by this paper. It would research into "The Electro-magnetic Induction Heating" and "The skin Effect" with an aluminum which is the typical paramagnetic metal. Ultimately, it was focused on the possibility of the heating for an aluminum sheet and draw up its practical use-plan.

Key Words : Induction-Heating, High-Frequency, Skin Effect

1. 서 론

유도가열은 주로 금속의 열처리 및 용접, 용해 등에 주로 사용되는 기술이었으나, 현재는 전자 유도 가열 발열체를 이용한 열교환방식을 이용하여 여러 가지 기체, 액체 및 증발체 등을 가열하는 다양한 분야로 영역을 확장하고 있으며, 청결성, 안정성, 고효율, 고출력, 신뢰성, 제어의 용이성 등의 여러 가지 장점가지고 있다.

그러나 유도가열은 알루미늄 부하와 같은 저항률과 투자율이 낮은 비자성 금속일 경우 높은 주파수로 인한 워크 코일과 인버터 손실이 크게 증가하는 문제점 때문에 자성의 특성을 갖는 특수한 부하에서만 사용 하였다. 이에 워크 코일 손실과 고효율 공진형 인버터의 설계 및 유도가열의 열해석 등이 연구되어지고 있다[1-4].

본 논문에서는 상자성체 금속인 알루미늄에 적합한 공진형 half-bridge를 제안하고 유도가열에 새로운 응용분야 및 부하의 연구로 알루미늄 박판을 이용한 유체가열을 실험하였다. 또한 기존의 제품과 비교 실험하여 알루미늄 박판가열의 가능성 확인하고자 한다.

* 주저자 : 호서대학교 전기공학과 교수
Tel : 041-540-5651, Fax : 041-540-5693
E-mail : dcsin@office.hoseo.ac.kr
접수일자 : 2003년 11월 6일
1차심사 : 2003년 11월 20일
심사완료 : 2003년 12월 23일

2. 본 론

2.1 고주파 유도가열

금속가열에 이용되는 유도가열은 정확하게는 고주파 유도가열이라 칭하는 것으로 코일에 교류 전류를 흐르게 하면 자계 내에 있는 도전성 피가열체에 와전류가 발생되어, 이 와전류 I와 가열물이 가지고 있는 고유 저항 R에 의해 $P=I^2R$ 의 전력크기 만큼 joule열이 발생한다. 이와 같이 발생된 열에너지를 이용하여 피가열체를 가열하는 방식이 고주파 유도가열이다.

그림 1 와 같이 전원은 상용주파수 전력을 정류기에서 DC 전원으로 변환하여 인버터에서 고주파전력으로 변환된 전류를 워크코일에 인가하여 고주파 자계를 생성하는 것을 유도가열이라 한다.

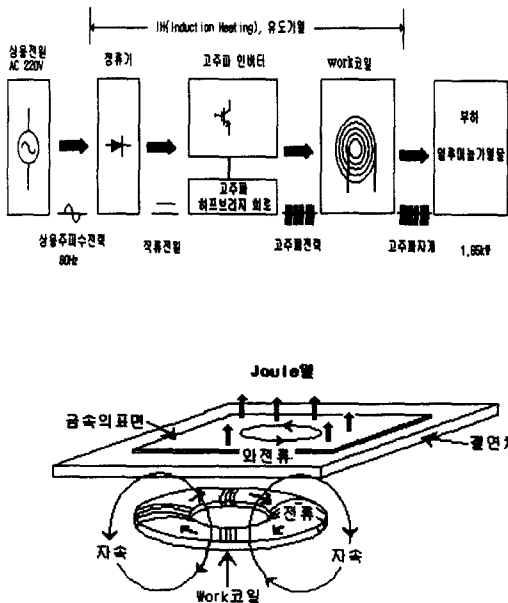


그림 1. 유도가열의 원리
Fig. 1. Principle of induction heating

그림 1 과 같이 코일에 교류(고주파) 전류(電流)를 통하면 코일 주변의 교류전류에 의한 교번자속이 발생하고 이 자계 속에 놓인 도전체에는 유도전류가 발생하게 된다. 이 전류를 와전류(eddy current)라

하고 피가열체의 고유저항과 와전류에 의한 joule열이 발생하며 이를 와전류 손실이라 하고 유도가열시의 발열원이 된다. 이와 같은 유도가열이 될 수 있는 것은 전기의 도체에 한정되어지고 그 외 비도체의 경우 응용기술을 이용하여야 하며 도체 중에 자성체 금속에 와전류 손실과 히스테리시스 손실이라고 하는 자화에 따른 전기적 손실이 생겨서 비철금속에 비해 가열이 쉬우며 가열 효율도 양호하다[2].

2.1.1 유도전류의 침투 깊이의 정의

워크코일에서 주파수가 높아질수록 피가열체를 통하여 흐르는 전류는 피가열체의 표면에 집중되는 현상이 더욱 커진다. 그러므로 전류밀도는 가열되는 부분의 표면으로부터 중앙으로 가면서 감소하게 된다. 이 현상은 표피효과(skin effect) 또는 켈빈효과로 알려져 있다. 전류밀도는 가열되는 부분의 표면으로부터 중앙으로 갈수록 식 (1)과 같이 지수 함수적으로 감소함을 볼 수 있고, 침투깊이는 맥스웰 방정식으로부터 얻어진 식 (2)의 공식에 따른다.

$$i_x = i_0 e^{-\frac{x}{d_0}} \quad (1)$$

i_x : 표면에서 x 만큼 떨어진 부분의 전류밀도
[A/m²]

i_0 : 부하표면에서의 전류밀도 ($x = 0$) [A/m²]

d_0 : 특히 주파수의 의존하는 상수(침투깊이) [m]

$$d_0 = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} \quad (2)$$

ρ : 부하 저항률 [Ω · m]

f : 인덕터를 통하여 흐르는 전류의 주파수 [Hz]

μ : 부하의 자성 투자율 [$\mu = \mu_0 \mu_r$]

식 (2)의 공식에 의하여 표피효과는 주파수에 관계가 있고 주파수가 높을수록 표피효과가 크게 된다. 다음 표 1은 금속의 유도가열에 있어 주파수에 따른 침투깊이를 나타내고 있다.

임계주파수는 동일한 피가열물에 주파수를 바꾸어 가열하면 발열량은 주파수가 낮을 때는 주파수의 2제곱에 비례하여 증가하나 일정주파수 이상이 되면

고주파 공진형 인버터를 이용한 알루미늄 박판가열에 관한 연구

평방근에 비례하여 증가하게 된다. 이러한 두가지 특성의 경계가 되는 주파수를 유도가열의 임계주파수라고 하며 피가열 물질의 반경이 침투 깊이의 2.25배가 되는 주파수이다. 보통 효율을 높이기 위하여 임계 주파수 이상의 주파수를 사용한다[5].

표 1. 금속의 주파수에 따른 침투 깊이 (단위:cm)
Table 1. Infiltration depth in accordance with frequency of metal

재료	온도	주파수[Hz]					
		50	500	1k	3k	10k	400k
철	상온	0.32	0.11	0.08	0.02	0.02	
	1200℃	6.60	2.30	1.62	0.95	0.52	0.08
알루미늄	상온	1.07	0.37	0.26	0.14	0.08	0.01
	500℃	1.93	0.60	0.47	0.27	0.15	0.02

2.2 유도가열용 고주파 공진형 인버터

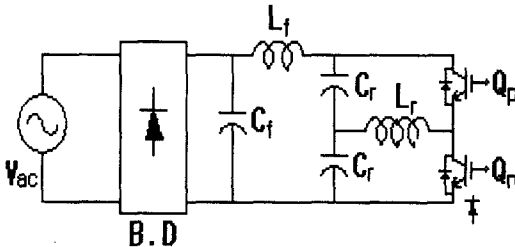


그림 2. 유도 가열용 Half-Bridge 인버터
Fig. 2. Half-Bridge inverter for induction heating

그림 2는 유도 가열을 위한 half-Bridge 공진형 인버터 시스템의 회로이다.

실제로 위크코일과 피가열 물체계의 사이에 정합 트랜스가 사용되는데 R-L부하와 L을 보상하는 C로부터 직렬공진 회로계를 위한 고효율 운전을 위하여 인버터의 동작 주파수 선정이 매우 중요하다.

이는 R-L회로에 직렬보상 C를 사용하여 R-L-C 직렬부하 공진회로 부하계를 구성하는데 발열체를 극한정도까지 가열하지 않으면 전기회로 정수는 거의 변화하지 않기 때문에 R-L회로계의 L을 보상하는 최적 동조 조건하에서 사용 가능하다.

R-L부하계의 R이 IGBT의 도통저항에 비해 비교

적 큰 경우에는 직렬공진회로계가, R-L부하계의 R이 IGBT의 도통저항에 비해 작은 경우에는 직렬인덕턴스를 갖는 병렬공진회로가 효율적 측면에서 유리하다고 할 수 있다[6-7].

3. 실험 결과 및 고찰

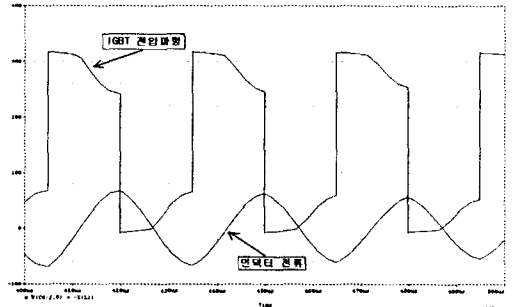


그림 3. 출력 전압 시뮬레이션 파형
Fig. 3. Simulation waveform of output voltage.

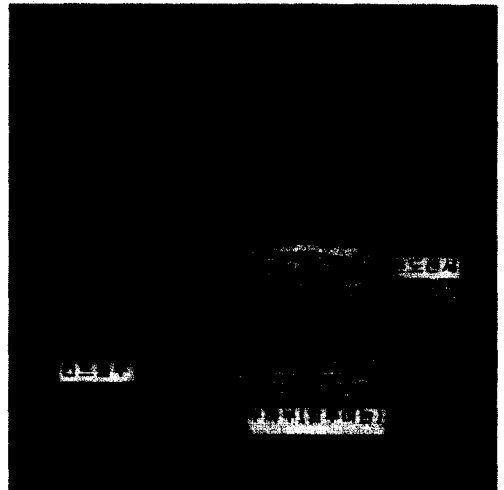


그림 4. 실험장치
Fig. 4. Experimental equipment

그림 3은 고주파 공진형 인버터를 이용한 알루미늄 박판 가열의 가능성을 검증하기 위해 Pspice를 이용한 시뮬레이션 결과로 얻은 출력 전압 파형이다.

그림 4는 실험장치 및 시험을 나타내고 있다. 실험장치에서 신호부와 위크코일 그리고 발열체 역할을 하는 알루미늄 부하로 나눌 수 있다. 공진회로의

Lr 은 수십[μ H]를 직접 제작하였고, Cr은 0.1[μ F]를 여러개 사용하여 회로를 제작하였다.

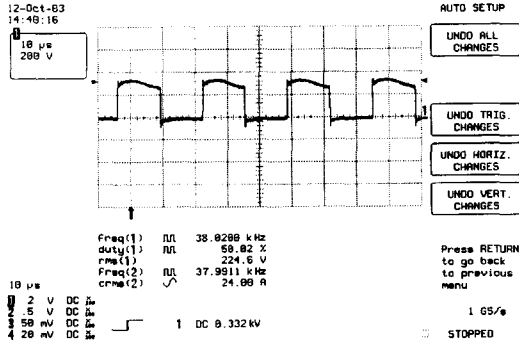


그림 5. 출력 전압 실험 파형
Fig. 5. Experimental waveform of out put voltage

그림 5는 실제 IGBT양단의 전압과 워크코일에 흐르는 전류 파형이다.

시뮬레이션의 출력 파형과 실험장치의 출력 파형을 비교하여 실험을 위하여 제작된 고주파 공진형 인버터가 정상적으로 알루미늄 박판가열에 가능성을 확인하였다.

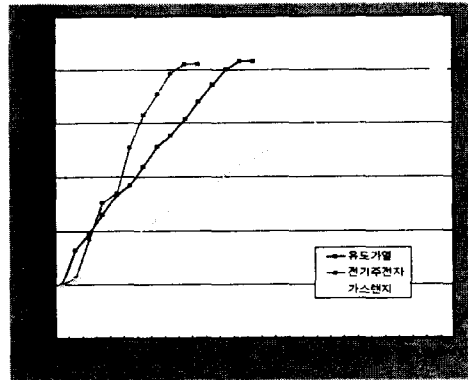
표 2. 하프-브릿지의 입,출력 특성
Table 2. Input and output characteristics of half-bridge

방식	특성	입력			출력			역률
		[V]	[A]	[Hz]	[V]	[A]	[kHz]	
하프-브리지		220	7.5	60	220	15	30~40	0.99

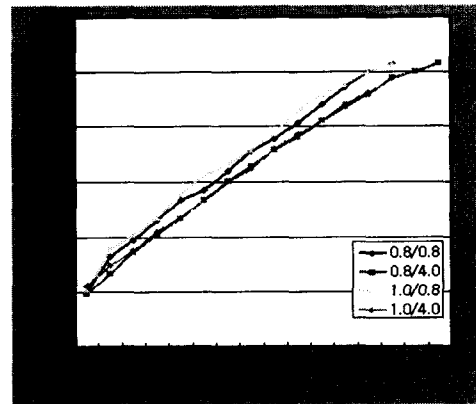
실험장치의 특성은 표 2와 같은 입출력과 같고, 500[ml]의 물을 가열하여 상온에서 100[$^{\circ}$ C]까지의 온도 시간을 측정하였고, 주파수는 실험중 출력을 7.5[A]로 일정하게 유지하기 위하여 조정을 하였다. 그리고 power meter[PM01]로 전압 max 500[V], 전류 max 20[A], 역률 0.100~1.00까지 측정가능한 장비로 전압과 전류의 변화 및 역률을 측정하였다.

그림 6 (a)는 실험 장치의 특성을 비교하기 위하여 전열기구인 전기주전자와 화석연료를 사용하는 가스렌지로 상온 100[$^{\circ}$ C]까지의 온도를 측정하였고, 그림 6 (b)은 각각의 고주파 공진형 인버터를 이용한

알루미늄 박판가열에 사용된 코일의 굵기와 워크코일과 알루미늄 사이의 갭에 따른 온도 특성 곡선으로 워크코일은 0.8[mm], 1[mm]를 사용하였고 워크코일과 알루미늄 부하사이의 갭은 0.8[mm]에서 4.0[mm]까지 변화 시키면서 실험을 하였다.



(a)



(b)

그림 6. 온도 특성 곡선
Fig. 6. Temperature characteristics curve

상온 100[$^{\circ}$ C]까지의 온도 상승은 2분 정도로 상용화된 전기주전자보다는 늦지만 가스렌지보다 빠름을 확인하였다. 알루미늄을 사용한 유도가열이 열원으로서 충분한 가능성을 확인하였다.

워크코일과 알루미늄 박판 사이의 갭이 작을수록 온도 상승 시간이 짧음을 알 수 있었다. 그리고 워크 코일의 굵기에 따른 온도 특성은 큰 차이를 가지

고 있지 않지만 굽을수록 약간의 특성이 좋아짐을 확인하였다.

그림 7은 실험장치로 알루미늄 박판을 가열하여 물이 100[°C]로 되는 동안의 전류의 변화를 측정하였다. 전류는 물의 온도 상승에 반비례하여 일정하게 떨어짐을 확인하였고, 물이 100[°C] 되는 시점에서 워크코일의 온도는 80[°C]의 온도가 됨을 측정하였다. 이런 현상과 측정은 워크코일이 온도 상승에 따라 인덕턴스가 변화함을 추론할 수 있다.

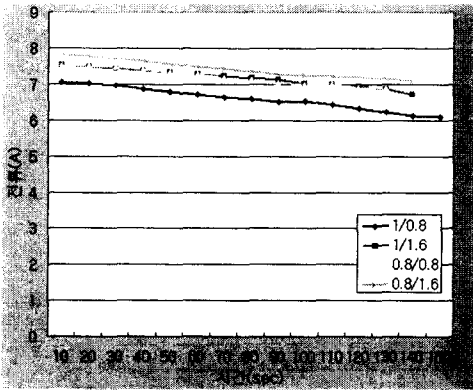


그림 7. 전류 특성 곡선
Fig. 7. Current characteristics curve

4. 결 론

고주파 공진형 인버터를 이용한 알루미늄 박판가열은 유도가열에 있어 상자성체를 이용한 새로운 가열방식으로 기대가 되며, 비교실험을 통하여 충분한 열원으로써 가능성을 확인 할 수 있었다. 유도가열을 이용한 박판가열은 안정성이 뛰어나며, 오염 물질의 발생이 없어 위생적이고 청결하다는 우수한 장점을 이용하여 보일러 및 조리기구등에 활용 수 있다고 유추되어진다.

본 연구에서 제작한 박판가열 시스템에서 온도 상승시간에 따른 전류의 변화를 확인하였다. 전류의 변화는 박판 가열에 있어 매우 중요한 요인으로 작용함을 확인하였고 앞으로 워크 코일에 따른 영향과 워크 코일과 알루미늄의 방열에 대하여 많은 연구가 필요성하고, 특히 박판 가열의 응용분야의 연구가 진행되었으면 한다.

References

- (1) 김용주, 김기환, 신대철, "직렬공진 PWM인버터를 이용한 전자간,접유도가열 열유체 에너지시스템과 그 성능 평가", 전력전자학회 논문집, 2002. 2.
- (2) S.M. Jang, S.K. Cho, I.K. Yoon, S.S. Jeong, H.C. Park, Y.S. Son, "Eddy Current and Thermal Analysis of Induction Heating Roll", Proceedings of the KIEE Summer Annual Conference, pp. 709-711, 2002.
- (3) Yong Ju Kim, "Study on Power Conversion Control Systems with High-Frequency Resonant Topologies and Its Performance Evaluations", Kobe University Doctor Dissertation, pp. 92-115, 1996.
- (4) Hong-Seok Oh, "A study on the Thermal Analysis of Induction Heating Cooker with Finite Element Method", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 17, no.1, pp.80-85, 2003.
- (5) 성병기, "유도가열을 위한 고효율 고주파 직렬 공진형 인버터 설계에 관한 연구", 부산대학교 대학원 석사논문, 1999.
- (6) 金龍柱, 中岡, 陸雄, "部分共振高周波負荷共振 PWM Inverter を使用した小型電子ボイラ應用", 日本電氣學會全國大會, pp. 4-124. 1999. 3.
- (7) 신대철, 권혁민, "DPH용 고주파 공진형 인버터시스템", 조명·전기설비학회, Vol. 16, pp. 3-8. 2002.

◇저자소개◇

신대철 (申大澈)

1952년 3월 2일생. 1973년 건국대학교 전기공학과 졸업. 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원(박사). 1989년~1990년 나가사키대학교 visiting scholar. 1979년~현재 호서대 전기공학과 교수.

김성호 (金成鎭)

1977년 9월 15일생. 2003년 호서대학교 전기공학과 졸업. 2003년~현재 동 대학원 석사과정.