

플브리지 공진형 인버터를 이용한 알루미늄 박판가열에 관한 연구

(A Study on the Heating of Aluminum Sheet by Full-Bridge Resonant Inverter)

신대철* · 김성호

(Dae-Chul Shin · Sung Ho Kim)

요 약

본 논문에서는 유도 가열(Induction Heating)의 원리와 부하특성 및 등가회로를 해석하였고, Pspice를 이용하여 시뮬레이션을 수행하여 회로의 타당성을 검증하였다. 실험에서는 2[kW]의 공진형 인버터를 환류 다이오드가 내장된 IGBT 모듈로 제작하였다. 인버터의 스위칭 주파수는 20~50[kHz] 대역에서 사용하였으며, 인버터의 출력제어는 위상전이(Phase shift)방식을 이용하였다.

본 논문에서 설계 제작한 플브리지 공진형 인버터의 동작 특성 및 성능을 검증하여, 유도 가열을 이용한 알루미늄 박판 가열의 활용 가능성을 실험을 통하여 확인하였다.

Abstract

The induction heating is widely used not only in the industrial fields but also in the home appliances. But the conventional induction heating systems have shortcoming that it use only magnetic utensil. in this paper, heating of Aluminum sheet by full-bridge series resonant high-frequency inverter is proposed. Also, the principle of induction heating and operations of full-bridge inverter equivalent circuit are explained. The proposed inverter controls the output voltage using phase-shift irrespective of the switching frequency using phase-shift. As a result, the proposed induction heating system by full-bridge resonant inverter shows the possibility that make up for the shortcoming of the conventional existing induction heating systems.

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

1. 서 론

유도 가열의 기초가 되는 전자기유도 현상은 패러데이의 법칙에 의해서 발견되었다. 그 이후 전자기유도의 잠재적 응용성을 인식한 많은 사람들은 수십 년에 걸쳐 고주파의 교류 전류를 발생 시키는 장치의 개발에 몰두하였다. 최근에는 전압구동 제어소자로 구동 회로

* 주저자 : 호서대학교 전기공학과 교수
Tel : 041-540-5651, Fax : 041-540-5693
E-mail : dcsin@office.hoseo.ac.kr
접수일자 : 2005년 7월 14일
1차심사 : 2005년 7월 18일, 2차심사 : 2005년 8월 25일
심사완료 : 2005년 9월 6일

의 전력 소모가 적고 스위칭 속도가 빠른 중·대용량 스위칭 소자(GTO, MOSFET, IGBT)가 개발되어 수백 [kHz]대 또는 그 이상의 고속 스위칭이 가능해짐에 따라 전력변환 장치의 응용 기술이 날로 발전하고 있다. 이러한 전력변환 장치의 발전은 고주파 인버터를 사용하는 유도가열이 단조, 성형, 표면경화, 용해 등의 산업현장과 IH쿠킹팬, 온탕기, IH밥솥등 생활가전에 폭넓게 응용되고 있다.

그러나 유도가열 제품의 가장 큰 단점은 사용할 수 있는 금속이 자성체 금속으로 제한된다는 것이다. 그 이유는 비자성체는 자성체와 비교해 저항률과 비투자율이 매우 작기 때문이다. 이러한 비자성체의 특성은 자성체의 부하와 유사한 출력을 얻기 위해서는 가열코일의 턴 수를 크게 하거나, 더 빠른 스위칭 주파수를 이용해야 한다. 스위칭 주파수와 가열코일의 증가는 인버터의 손실과 경열 코일의 손실을 증가시켜 시스템 효율을 저하시키는 주된 요인이 된다[1-4].

본 논문에서는 유도가열의 원리와 부하특성 및 등가 회로를 해석하였고, Pspice를 이용하여 시뮬레이션을 수행하여 회로의 타당성을 검증하였다. 그리고 실험을 통하여 설계 제작된 풀브리지 공진형 인버터가 유도가열용 인버터로 사용가능의 동작 특성 및 성능을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 고주파 유도가열

일반적으로 고주파 가열에는 유도가열과 유전가열로 나눌 수 있다. 유도가열이란 금속과 같은 도전 물질에 고주파 자장을 가할 때 도체에 생기는 와전류(Eddy current)에 의하여 물체를 가열하는 방법이며, 유전가열이란 유전체에 고주파 자장을 가할 때 생기는 유전손에 의하여 유전체를 가열하는 방법을 말한다.

고주파 유도가열의 원리는 그림 1과 같이 가열하고자 하는 도체에 코일을 감고, 이 코일에 고주파 전류를 흘리면 도체에는 고주파 자속이 통과한다. 고주파 자속의 변화에 의해서 도체에는 전류가 유기되며, 이 유기된 전류가 와전류이다. 이 와전류는 주파

수가 낮은 경우에는 도체 단면의 전체에 전류밀도가 거의 같지만, 주파수가 높아짐에 따라 전류 밀도는 표면에 집중된다. 이와 같은 현상을 표피효과(Skin effect)라 한다.

주파수가 매우 높아지면 표피효과의 영향으로 와전류는 도체의 표면에 대부분 흐르고 중심부에는 거의 흐르지 않게 된다. 그러므로 유도가열에 있어 용도에 따른 주파수 선정이 매우 중요하다.

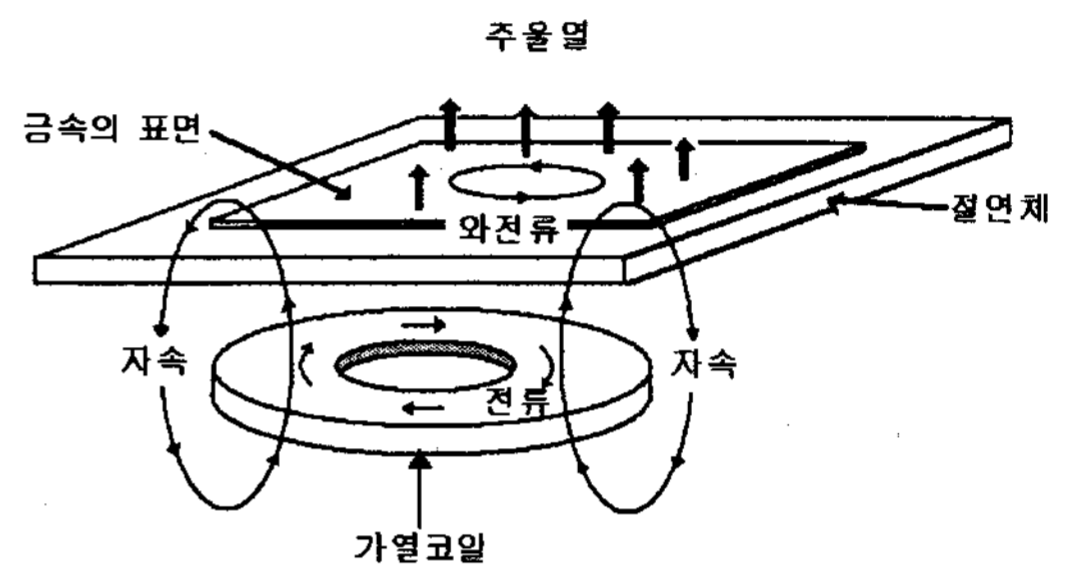


그림 1. 유도가열의 원리
Fig. 1. Principle of induction heating

2.1.1 표피효과

일반적으로 도체를 관통하는 자속의 변화 또는 자속과 도체가 상대적으로 도체내의 자속이 시간적으로 변화를 일으키면, 이 변화를 막기 위하여 도체에 국부적으로 형성되는 폐회로를 따라 전류가 유기되는데 이 전류를 와전류라 한다. 이 전류는 도체의 횡단면에 일률적으로 흐르는 것이 아니고 표면에서 특정 깊이까지 집중되고 내부로 가면서 지수 함수적으로 감소한다. 식 (1)의 δ 는 고주파 전류의 침투 깊이로 재료의 투자율 μ [H/m]과 피가열물의 도전율 σ [Ω/m], 주파수 f [Hz]에 의해서 정해진다.

식 (1)에서 침투 깊이는 주파수가 낮을수록 침투 깊이가 깊고, 도전율이 작을수록 깊다는 것을 보이고 있다.

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

전류 및 전력의 분포에서도 표면에서 δ 까지의 깊이에서 발열의 90[%]가 발생하므로, 와전류의 전부가 표면에서 침투 깊이 δ 까지 집중되어 있다고 할 수 있다[5,6].

2.1.2 와전류 손실

와전류손은 앞에서 말한 와전류에 의해서 생기는 저항 손실이다.

그림 2에서 반지름 a , 길이 l , 체적 $V(=\pi a^2 l)$, 저항률 $\rho[\Omega \cdot \text{cm}]$ 를 갖는 원주의 축 방향으로 자속 밀도 $B=B_m \sin \omega t[\text{wb}/\text{m}^2]$ 의 자계를 가했을 때 지름 $r(<a)$ 의 단면적을 관통하는 자속 Φ 는 식 (2)와 같다.

$$\Phi = \pi r^2 B_m \sin \omega t \quad (2)$$

원주방향으로 유기되는 기전력은 식 (3)과 같다.

$$e = -\pi r^2 \omega B_m \cos \omega t \quad (3)$$

반지름 r 의 위치에 두께 dR 의 원통을 생각하면 이 원주에 흐르는 전류의 실효값 I_e 는 식 (4)와 같다.

$$I_e = \frac{\omega a^2 l B_m}{4\sqrt{2} \rho} \cos \omega t \quad (4)$$

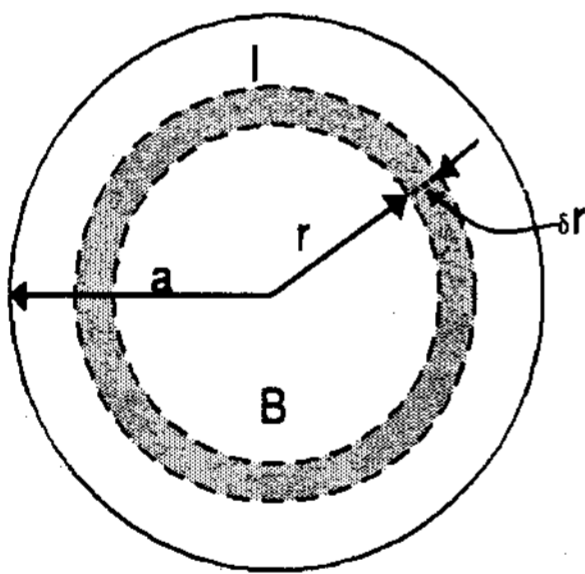


그림 2. 와전류 회로
Fig. 2. Eddy current circuit

와전류에 의한 전력 P 는 식 (5)와 같다.

$$P = \int_0^a dp = \frac{\pi}{8\rho} \omega^2 a^4 B_m^2 \cos^2(\omega t) \quad (5)$$

와전류의 대부분이 표면에서 침투깊이 δ 까지 90[%]가 집중된다. 따라서 평균전력 P_m 은 와전류에 의해 발생하는 손실인 와전류 손실 P_e 와 같다고 볼 수 있다. 그러므로 와전류 손실은 교번자속의 주파수와 최대 자속밀도의 자승에 비례하고 도전율에

반비례하기 때문에 도체의 도전율을 σ 라 하면, 단위 체적당 와전류 손실은 식 (6)과 같다.

$$P_e \propto \sigma f^2 B_m^2 [\text{W}] \quad (6)$$

여기서 $B_m[\text{wb}/\text{m}^2]$ 은 최대 자속밀도이다. 식 (6)에서 어떤 일정 부하에 주파수를 광범위하게 바꾸어 가열할 때의 발생 전력은 주파수가 낮을 때는 주파수의 2승에 비례하고 주파수가 높게 되면 주파수의 평방근에 비례하도록 된다.

즉 어느 것으로 해도 주파수가 높을수록 발열이 크게 되지만, 이 양 특성의 분기점을 유도 가열의 임계 주파수라고 말한다[7].

2.2 유도 가열용 고주파 공진형 인버터

일반적으로 유도 가열 시스템은 가열 코일과 부하를 각각 1, 2차측으로 하는 변압기 등가 모델로 표현할 수 있다. 이 등가 모델은 그림 3과 같이 하나의 등가 인덕턴스 L_{eq} 와 등가 저항 R_{eq} 의 직렬연결로 나타낼 수 있다.

그림 3의 등가회로를 식으로 나타내면 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} V_1 &= (R_1 + j\omega L_1)I_1 - j\omega MI_2 \\ 0 &= -j\omega MI_1 + (R_2 + j\omega L_2)I_2 \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)을 정리한 등가회로의 파라메타는 식 (8)과 같다.

$$\frac{V_1}{I_1} = R_{eq} + j\omega L_{eq} \quad (8)$$

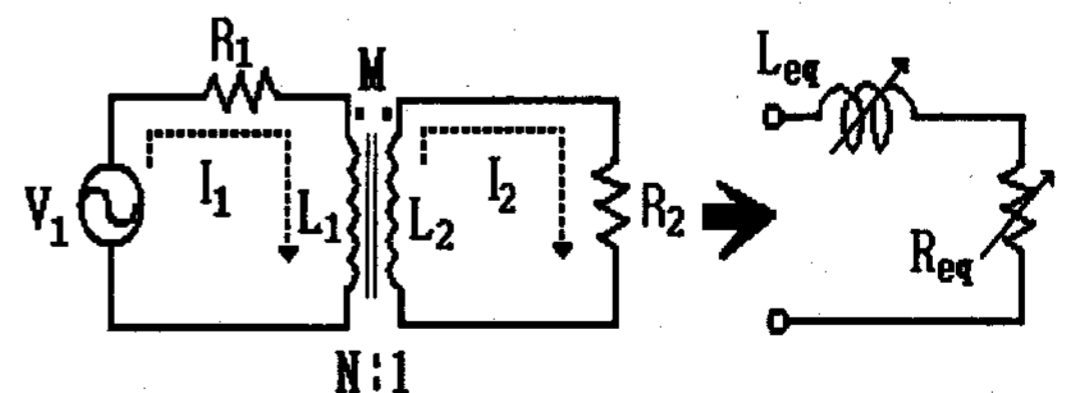


그림 3. 유도 가열 시스템의 등가 회로
Fig. 3. The equivalent circuit of induction heating system

한편 이 증가화된 파라메타 L_{eq} , R_{eq} 는 가열 부하의 크기와 위치, 가열 코일과 부하사이의 거리, 부하의 도전율과 투자율, 동작 주파수 등에 의해 변하게 된다. 또한 변압기 2차측 저항 R_2 는 와전류의 침투깊이 δ 에 의해 결정되므로, 실제 유도 가열에 의해 발생하는 출력전력은 저항과 전류의 관계에 의해 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$P = (NI_1)^2 \cdot \sqrt{\pi \rho \mu f} [W] \quad (9)$$

여기서 N : 가열 코일의 턴 수

2.2.1 인버터의 준구형파 출력전압 제어

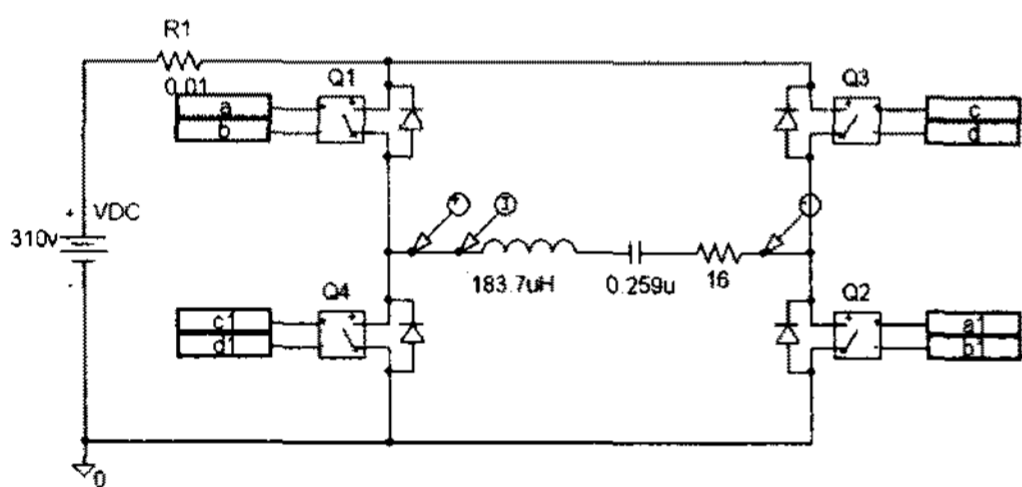


그림 4. 단상 풀브리지 인버터 회로
Fig. 4. Power circuit of single-pulse full bridge inverter

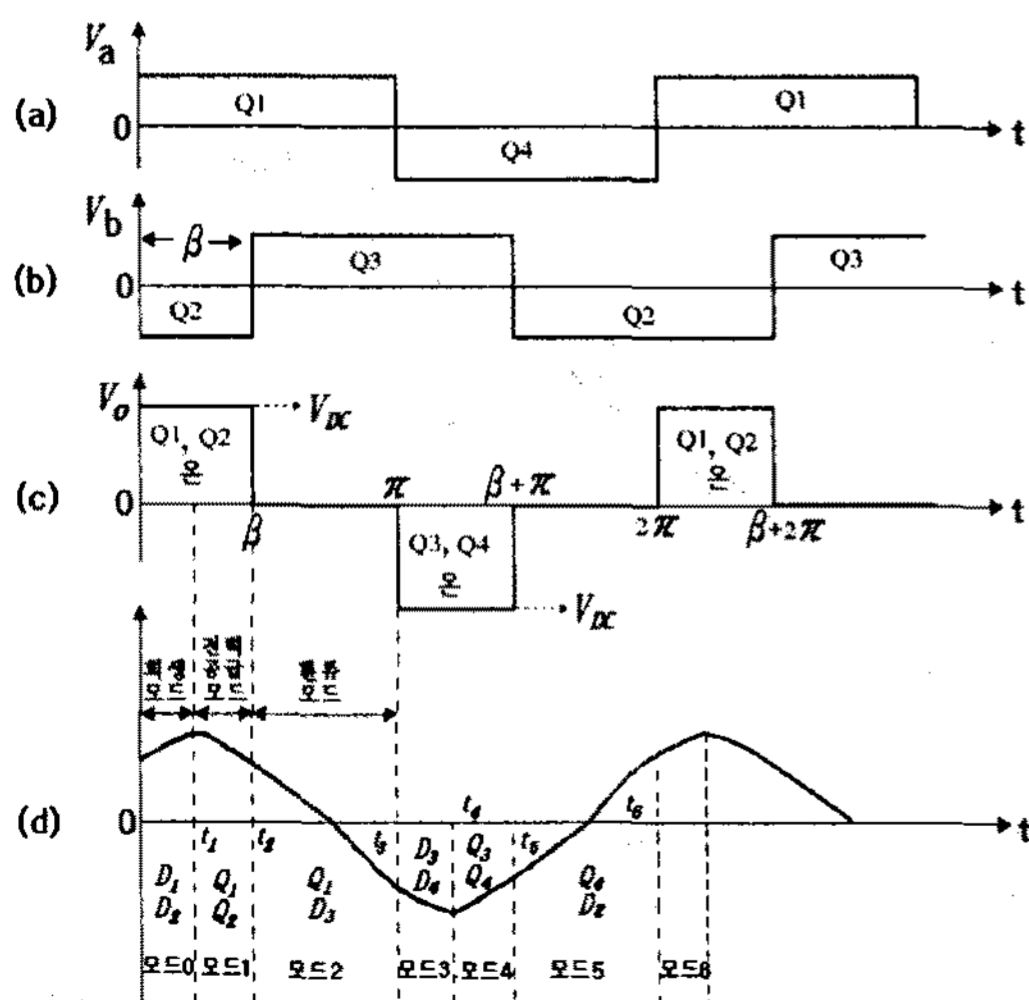


그림 5. 풀브리지 인버터의 동작파형
Fig. 5. Operating waveforms of full bridge inverter

풀브리지 공진형 인버터는 그림 4와 같이 구성된다. 그림 5의 (b)와 같이 두 스위칭 쌍의 전압 위상차가 발생하면 V_o 는 그림 5의 (c)와 같이 준구형파 출력전압이 나오게 된다. 이때 출력전압의 실효출력전압 V_o 는 식 (10)과 같다

$$V_o = V_{DC} \sqrt{\frac{\beta}{\pi}} \quad (10)$$

여기서 β : 스위칭 신호의 위상차이다. 식 (10)과 같이 인버터의 출력 전압은 인버터의 스위칭 신호의 위상차를 조절하여 출력전압을 제어할 수 있게 된다 [8-10].

3. 실험결과 및 파형

그림 4와 같이 R, L, C 직렬 부하로 풀브리지 인버터를 회로를 시뮬레이션하였다. 직렬 부하 R, L, C는 가열코일과 알루미늄부하의 저항과 인덕턴스를 측정하여 사용하였고, C는 공진 캐패시터로 실험에 사용된 값을 이용하였다. 그림 6은 Pspice를 이용한 시뮬레이션 결과의 파형이다. 위상 지연이 180[°]을 가지고 인버터의 스위칭을 할 때 스위치 게이트 신호와 출력 전압, 전류 파형이다.

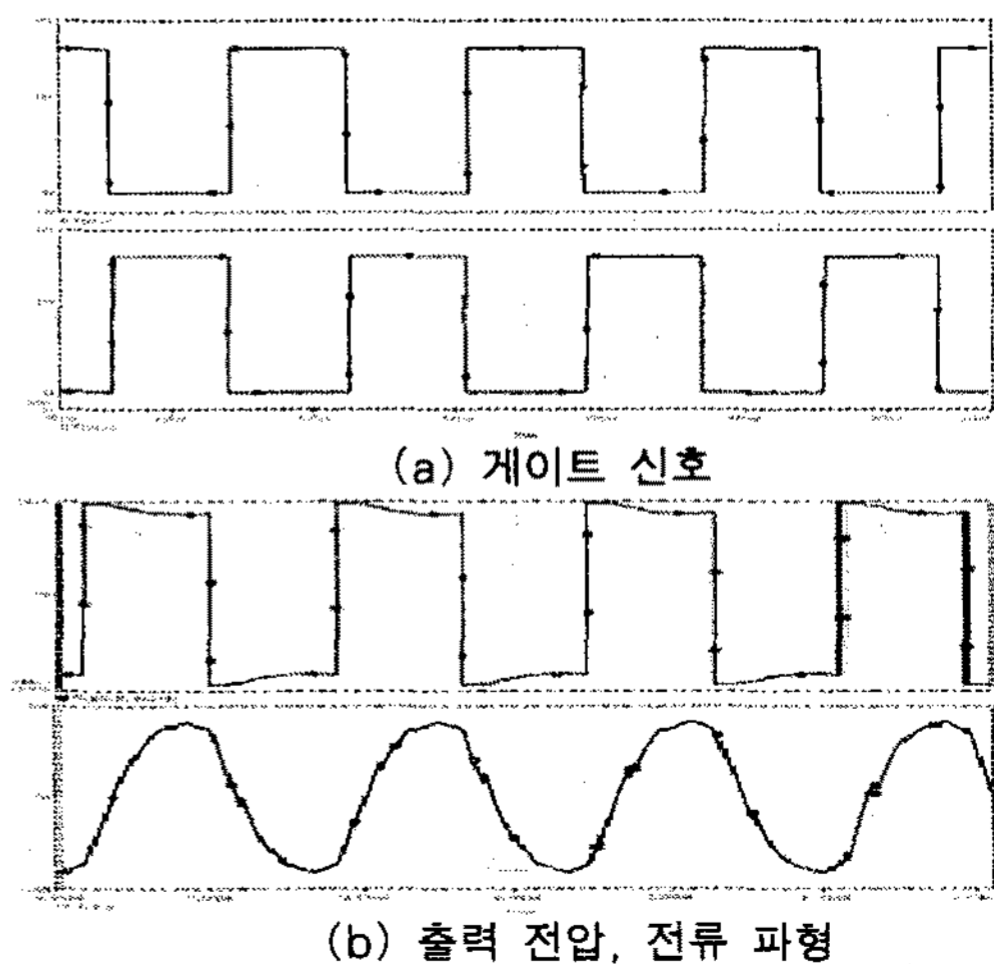


그림 6. 시뮬레이션 파형
Fig. 6. Simulation waveforms

그림 7은 게이트 신호의 위상을 90[°]를 유지하여 시뮬레이션을 수행하였을 때, 입력 신호와 출력 전압, 전류 파형을 나타내고 있다.

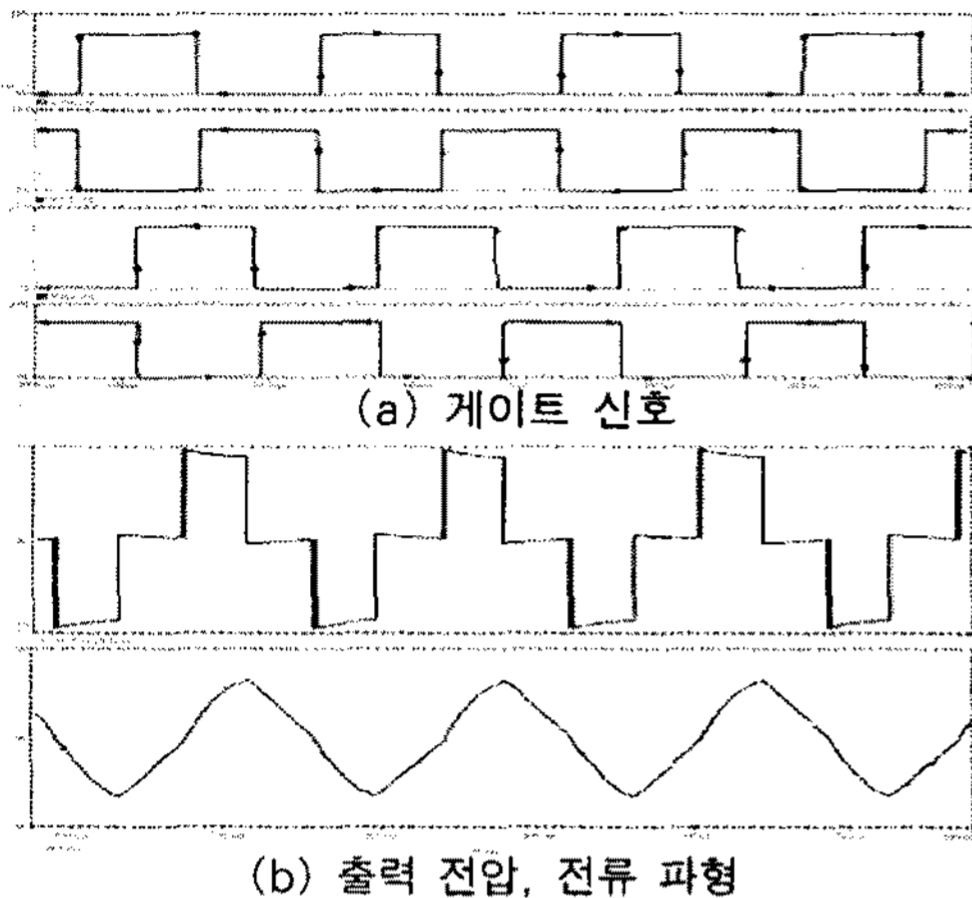


그림 7. 시뮬레이션 파형
Fig. 7. Simulation waveforms

이론과 시뮬레이션을 통하여 검증한 위상지연 방식으로 제어회로와 인버터를 제작하였고, 부하는 0.1[mm]의 두께의 알루미늄 용기를 사용하였다. 그리고 가열코일은 와전류 손실을 줄이기 위하여 리즈 와이어를 사용하여 직접 제작하여 사용하였다. 그림 8은 실험한 실측 파형이다. 위상 지연 없이 동작할 때 게이트 인가 신호와 출력 전압, 전류 파형이다.

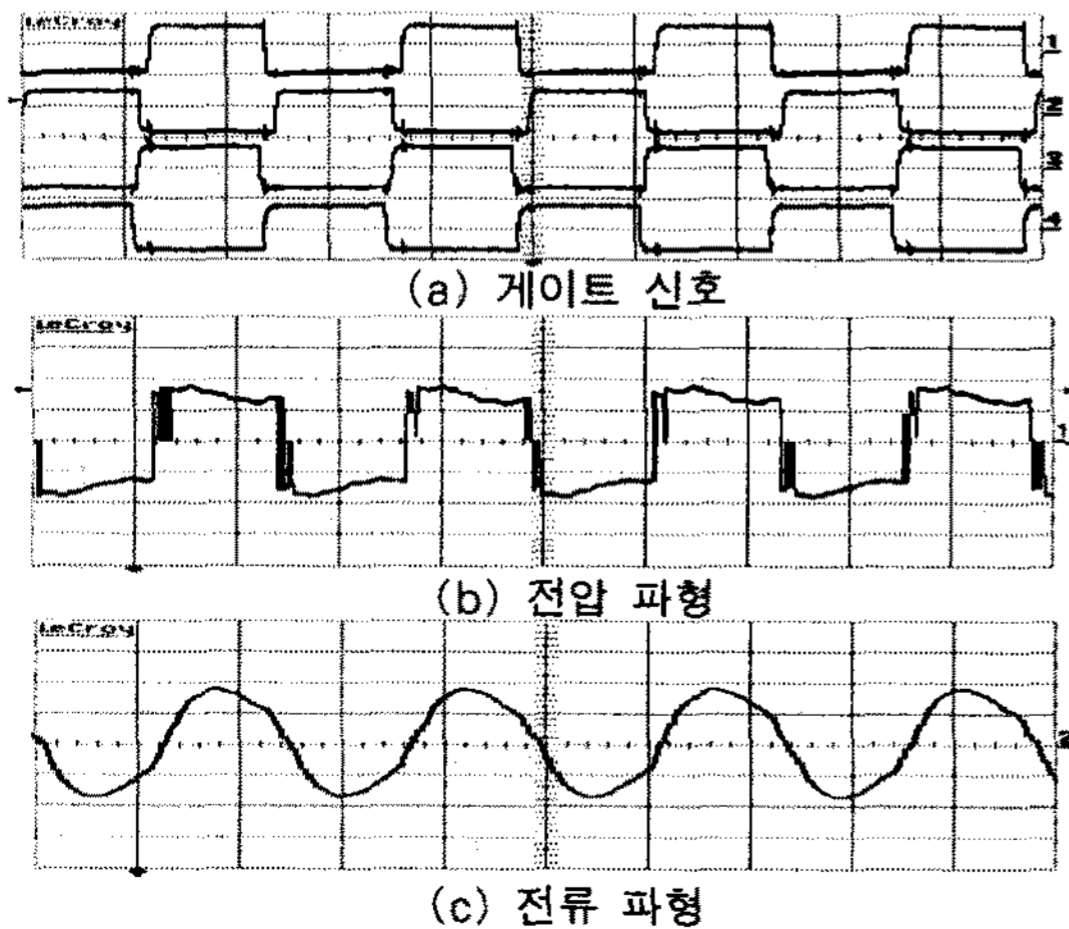


그림 8. 인버터 각부 파형
Fig. 8. Inverter of waveforms

그림 9는 위상 지연을 통하여 출력 전압 제어를 하였을 때 스위치 소자의 게이트 신호와 출력 전압, 전류 파형이다. 본 논문에서 제안한 위상 지연을 이용한 출력전압 제어가 가능함을 확인하였다.

위의 실험을 통하여 설계 제작된 인버터가 이론과 시뮬레이션을 통해 얻어진 결과와 일치하며, 실제 알루미늄 박판을 이용한 유도 가열에 이상이 없이 적용할 수 있음을 확인하였다.

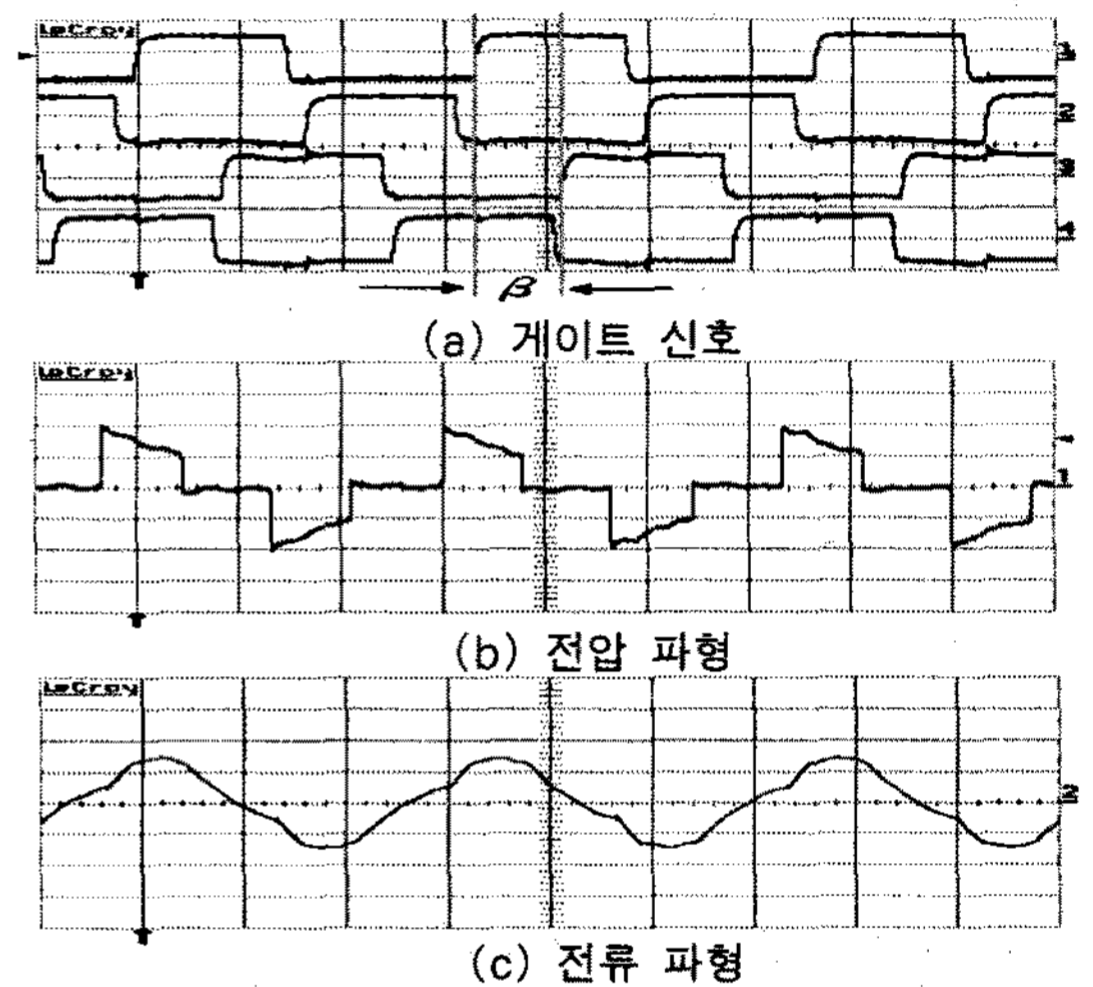


그림 9. 인버터의 출력 파형
Fig. 9. Output waveforms of Inverter

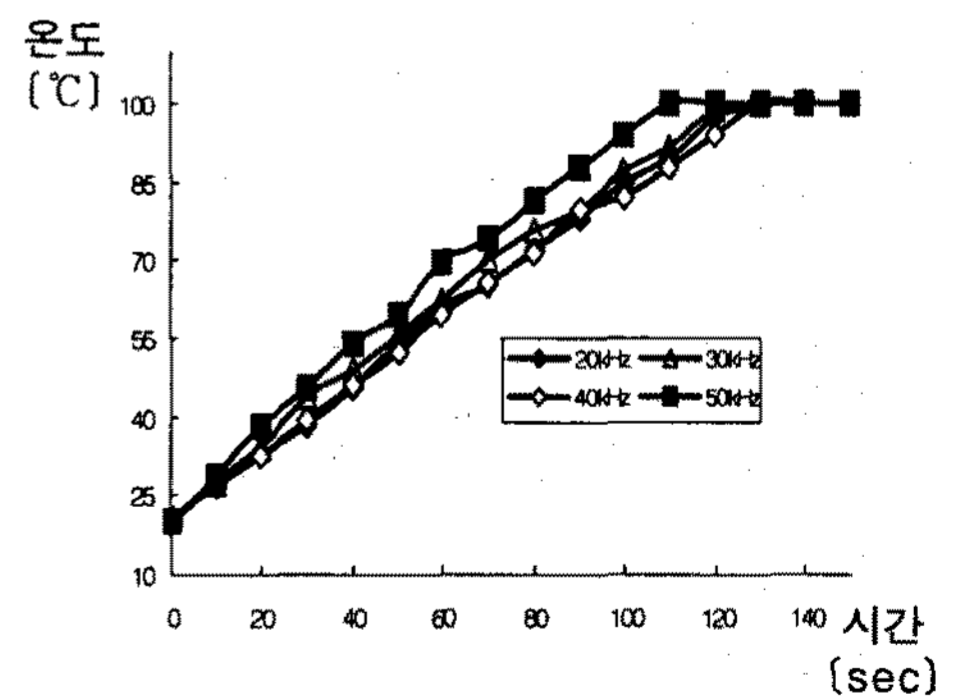


그림 10. 온도 상승 곡선
Fig. 10. Rises curve for temperature

그림 10, 11은 실제 유도가열이 주파수에 어떠한 영향을 미치는지 보여주는 것으로, 그림 10과 같이 주파수가 증가함에 따라 온도 상승 폭은 변동이 적

으나, 효율적 측면에서는 주파수의 증가에 따른 효율 증가를 그림 11과 같이 확인할 수 있었다.

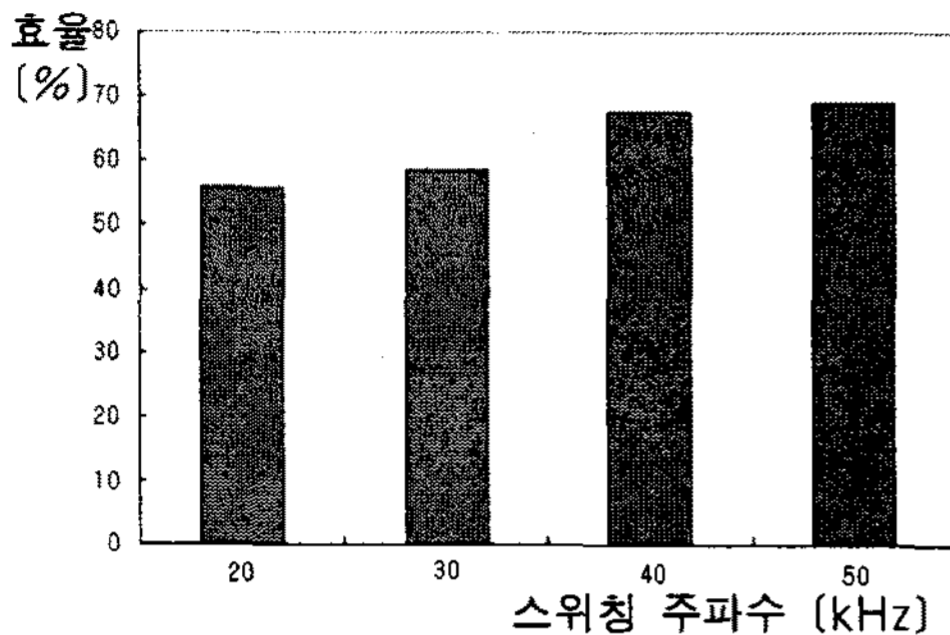


그림 11. 효율
Fig. 11. Efficiency

유도가열은 가열하고자 하는 부분과 부하의 재질에 따른 충분한 스위칭 주파수를 고려해야 함을 확인하였다

4. 결 론

본 논문에서는 유도가열용 풀브리지 공진형 인버터를 제안하고 동작특성을 통하여 성능을 검증하였다. 또한 인버터의 출력을 제어하기 위해 위상 지연 회로를 제안하였다. 그리고 유도가열을 이용한 알루미늄 박판 가열의 활용 가능성을 확인하였다.

유도가열에 관한 이론적 고찰과 실험을 통하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 제작한 풀브리지 공진형 인버터가 각 주파수 영역에서 실험 파형과 이론 파형이 거의 일치함을 확인하였다.

2) 인버터 출력제어를 하기 위한 지연 회로가 위상 지연에 따라 정확한 출력제어가 가능함을 확인하였다.

3) 알루미늄 박판가열용 인버터의 발열효율은 약 70[%]임을 확인하였다. 종래의 가스 렌지 발열방식의 효율 50[%]임을 감안할 때 알루미늄 박판가열의 효율이 더 경제적이다.

향후 과제로는 인버터의 스위칭 주파수가 증가함에 따라 가열코일의 손실에 대한 대책에 지속적인 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

이 논문은 2005년도 호서대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

References

- (1) 장석명, 이성호, 박희창, "전자유도가열 및 그 응용," KIEE, vol. 50, no 2, pp.8-14, 2001.
- (2) 정용채, 박병욱, 조관열, "가전제품의 유도가열 기술현황," 전기학회지, 제50권, 2호, pp. 15-20, 2003.
- (3) Shengpei Wang, et al., "Induction-heating cooking appliance using new quasi-resonant ZVS-PWM inverter with power factor correction," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 34, no. 4, pp.705-712, 1998.
- (4) Magne Runde, Niklas Magnusson, "Design, building and testing of a 10KW superconducting induction heater," IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 13, no. 2, pp.1612-1615, 2003.
- (5) 이봉섭, "고주파 유도가열용 전원장치의 개발에 관한 연구," 한국 산업응용학회지, 제5권, 제3호, pp.179-186, 2002.
- (6) J.M.Ho, M.T.LEE, "A novel PWM inverter control circuitry for induction heating," IEEE International Power Electronics Congress, vol. 10, no. 15, pp.113-119, 1996.
- (7) 임영도, "주파수 추종과 위상전이가 가능한 유도가열기의 공진형 인버터 개발," 동아대학교 박사학위논문, pp.6-11, 1998.
- (8) 권영섭, 유상봉, 현동석, "유도 가열 시스템의 성능과 안정성 향상에 관한 연구" KIEE, vol. 48B, no. 8, pp.417-425, 1999.
- (9) 양홍석, 회로해석, 동일출판사, pp.595-637, 1988.
- (10) 오수익, 김광섭, 한상준, "전자기 유도 가열을 이용한 열간 단조 공정의 해석," 한국학술진흥재단, KRF연구결과논문, 1998.

◇ 저자소개 ◇

신대철 (申大澈)

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

김성호 (金成鎬)

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