

유도가열 증기발생장치의 온도제어

(A Study on the Temperature Control of Vapor System Using Induction Heating)

신대철* · 유재훈

(Dae-Chul Shin · Jae-Hoon Yoo)

요 약

제안한 유도가열 시스템은 증류탑 장치에 사용되는 특수적층 규척충진체에 의한 열 교환기술과 IH(Induction-Heating)전자유도가열용의 특수한 고주파 전력회로 기술을 응용한 차세대 가열방식이다.

본 전자유도 유체가열기술은 IGBT대응의 고주파 인버터를 사용하여 상용교류로부터 수[kHz]의 고주파 교류를 발생시킬 수 있다. 공진형 고주파 인버터를 사용함으로써 고성능, 고효율의 시스템화가 가능하다.

본 논문에서는 주파수 범위가 20[kHz]에서 44[kHz]인 고주파 공진형 인버터를 이용하여 증기를 발생시키는 유도가열시스템에 대해 제안한 온도제어에 대하여 기술하고자 한다.

Abstract

Proposed induction-heated system is innovative system which applied special high-frequency power circuit technique for thermal converse technique and IH(Induction-Heating) magnetic induction heating generated from induction-heated metallic package that is for distillation unit.

This electromagnetic induction heating technique is used high frequency inverter. By using high frequency inverter high frequency alternative current in the range of [kHz] can be made with conventional alternative current. In this contribution IGBT module is used for high frequency inverter. Resonant high frequency inverter make system of high capacity and high efficiency.

This paper describes the temperature control of induction heating system hot air producer using the voltage-fed series resonant high-frequency inverter which can operate in the frequency range from 20 to 44[kHz].

Key Words : Induction Heating, Resonant Inverter, IGBT, PE(Power Electronics)

* 주저자 : 호서대학교 전기공학과 교수
Tel : 041-589-4352, Fax : 041-589-4209
E-mail : dcsin@hoseo.edu
접수일자 : 2009년 9월 10일
1차심사 : 2009년 9월 15일
심사완료 : 2009년 10월 8일

1. 서 론

유도가열(IH: Induction Heating)기술의 기본 원리는 1831년 패러데이에 의해서 발견된 전자 유도현상이다. 코일에 교류전류를 흘려주면, 코일 주위에 자속

유도가열 증기발생장치의 온도제어

이 생기며 이 자속의 시간적 변화에 의해 코일 부근의 금속체에 와전류가 유기되어 금속체가 가열되는 현상이 유도가열의 원리이다.

이러한 유도 가열 방식은 연소에 의한 발열과 비교하여 우수한 장점을 지니고 있다. 유도가열은 가열효율이 높기 때문에 경제적이며 신속한 가열을 통하여 워밍업등을 위한 소비전력을 줄일 수 있다. 또한 출력 및 온도제어가 용이하여 사용이 편리하고, 안정성 및 배출가스 등의 오염 물질의 발생이 없어 위생적이며 청결하다.

유도가열 장치의 응용 분야에는 최근에 와서 생산설비의 합리화, 품질향상의 필요성, 소비 전력 절감을 위해 전자, 가전, 정밀기계, 금속, 자동차공업등 여러 분야에 이용되고 있다[1].

본 논문에서는 유도 가열기의 전력변환기를 사용한 위상천이(Phase-Shift)방식의 온도 제어방식과 주파수 가변을 이용한 온도 제어 방식을 비교한다.

2. 유도가열의 이론 및 원리

금속가열에 이용되는 고주파 가열은 정확하게는 고주파 유도가열이라 칭하는 것으로 전자유도 작용에 의한 것이다. 교류 전류가 흐르는 코일 속에 위치한 금속 등의 도전체는 와전류손과 히스테리시스손의 저항에 의하여 발생한 전력의 크기만큼 열이 발생한다. 이와 같이 발생하는 열에너지를 이용하여 피가열 물질을 가열하는 것을 유도가열이라 하며, 특히 고주파 전류를 이용하는 것을 고주파 유도가열이라고 한다.

그림 1과 같이 고주파 교류전원, 가열코일, 피가열물(발열체)로 구성이 되며 패러데이의 전자 유도 현상에 의해 가열코일에 고주파 교류전류가 흐를 때 발생하는 고주파 자계 중에 도전성을 가지는 금속을 위치시키면 금속에 식 (1)의 유기기전력이 발생되고 이로 인하여 금속의 표면에 와전류가 유기되어 표피저항에 의해 $P=I^2R$ 의 전력 크기만큼 주울열을 발생시키는 원리이다. 이러한 열의 대부분은 식 (2)로 표현되는 표피두께 δ 내에 분포하게 되며, δ 는 유도 가열의 인버터 동작주파수를 결정하는 중요한 요소가 된다[2].

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

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

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

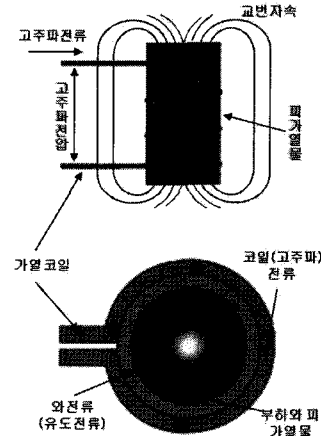


그림 1. 유도 가열의 원리

Fig. 1. Principle of induction heating

일반적으로 유도가열 시스템은 가열코일과 부하를 각각 1, 2 차 축으로 하는 변압기 등가 모델로 표현할 수 있다. 이 등가 모델은 그림 2와 같이 하나의 등가 인덕턴스 L_{eq} 와 등가 저항 R_{eq} 의 직렬연결로 나타낼 수 있다.

그림 2의 등가회로는 풀면 식 (3)과 같다.

$$V_1 = (R_1 + j\omega L_1)I_1 - j\omega MI_2$$

$$0 = -j\omega MI_1 + (R_2 + j\omega L_2)I_2 \quad (3)$$

여기서, M 은 상호인덕턴스이다.

식 (3)을 I_2 에 대해서 정리를 하면 식 (4)와 같다.

$$I_2 = \frac{j\omega MI_1}{R_2 + j\omega L_2} \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)에 의해 등가회로의 파라메타는 식 (5)와 같다.

$$\frac{V_1}{I_1} = R_{eq} + j\omega L_{eq} \quad (5)$$

한편, 식 (5)에서 등가화된 파라메타 L_{eq} , R_{eq} 는 가열 부하의 크기와 위치, 가열코일과 부하사이의 거리, 부하의 도전율과 투자율, 동작주파수 등에 의해 변하게 된다. 또한, 변압기 2차측 저항 R_2 는 와전류의 침투깊이 δ 에 의해 결정되므로 식 (6)과 같다. 실제 유도 가열에 의해 발생하는 출력전력은 저항과 전류의 관계에 의해서 식 (7)로 표현된다.

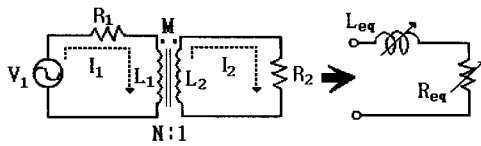


그림 2. 유도 가열 시스템의 등가 회로
Fig. 2. The equivalent circuit of induction heating system

$$R_2 = \frac{\rho}{\delta} = \sqrt{\pi\rho\mu f} \quad (6)$$

$$P = I_2^2 R_2$$

$$P = (\Im_1)^2 \cdot \sqrt{\pi\rho\mu f} \quad (7)$$

여기서, N : 가열코일의 턴수, $I_2 = \Im_1$ 이다.

3. 하프-브릿지 공진형 인버터

그림 3는 하프-브릿지 직렬부하 고주파 공진형 인버터를 나타내는데 이것은 절연파이프의 두께, 내부의 발열체부하의 소재 그리고 가열 유체계에 의해 변화하는 인덕턴스와 저항분으로 구성되는 전기회로 모델로 볼 수 있다. R-L부하와 L을 보상하는 C로부터 직렬공진 회로계를 위한 고효율 운전을 위하여 인버터의 동작 주파수 선정이 매우 중요하다[4].

하프-브릿지 인버터는 직류 전원전압이 커패시터에 의해 두 부분으로 분리되며 스위치의 수가 2개로 된다. 각 커패시터는 용량이 동일하며 양단에 $V_{DC}/2$ 의 전압이 걸리게 된다. S1이 닫혀있으면 부하전압이 $-V_{DC}/2$ 이고 S2가 닫혀있으면 부하전압이 $V_{DC}/2$

이다. 열려있는 스위치의 양단전압은 부하전압의 2배로서 V_{DC} 가 된다. 풀-브릿지 인버터에서와 마찬가지로 전원 양단이 단락되는 것을 방지하기 위해 스위치에 공백시간이 필요하며 유도성 부하의 전류를 연속적으로 흐르게 하기 위해 궤환다이오드가 필요하다[5].

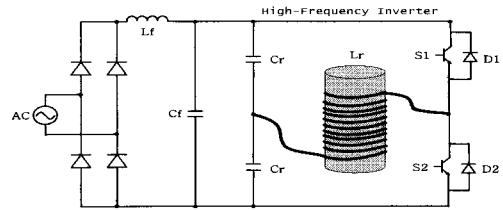


그림 3. 하프-브릿지 공진형 인버터
Fig. 3. Half-bridge resonant inverter

(1) 주파수 가변 온도 제어

유도가열의 부하는 직렬 RLC회로를 구성하고 있다. 직렬 RLC회로에 대한 입력 임피던스는 식 (8)과 같다.

$$Z(j\omega) = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (8)$$

식 (8)의 허수 부분이 식 (9)와 같은 조건을 만족하면 0이 된다.

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (9)$$

위의 관계를 만족하는 ω 의 값을 공진주파수 ω_0 라고 하면 식 (10)과 같다[3].

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (10)$$

공진상태에서는 전압과 전류가 동상이므로 위상각이 0이고 역률이 1이 된다. 직렬 회로의 경우 공진 상태에서 임피던스가 최소가 되므로, 주어진 전압에 대해 전류가 최대가 된다. RLC 직렬회로에 대한 선택도를 Q 라고 할 때 식 (11)과 같고, 입·출력 전압의 관계를 ω_0 와 Q 로 나타내면 식 (12)와 같다.

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (11)$$

$$\frac{V_0}{V_s} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{w}{w_0} - \frac{w_0}{w} \right)^2}} \quad (12)$$

식 (11)은 Q 가 R 에 종속적이며, R 에 반비례 관계를 알 수 있다. R 의 변화에 따른 Q 의 변화와 Q 에 따른 주파수 선택성을 보여주며, 식 (12)는 스위칭주파수에 따른 진폭을 나타낸다.

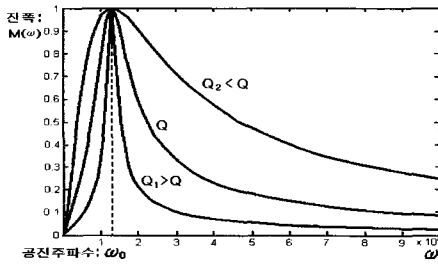


그림 4. 주파수 특성
Fig. 4. Frequency characteristics

그림 4은 Q 가 큰 회로는 대역폭이 작아서 매우 선택적임을 보여주며, 스위칭주파수가 공진주파수와 같을 때 진폭이 가장 큼을 보여주고 있다. 여기서 선택도는 $Q < Q_1$ 이고 $Q > Q_2$ 이다.

(2) 위상천이 온도제어 방식

위상제어는 전원의 각 반주기에서 제어소자의 도통시점을 변화시켜 출력의 실효치를 조정하므로 분수과제어 방식이며 이를 위상각제어라고도 한다. 위상제어는 회로가 간단하고 제어가 쉬운 장점이 있다.

위상제어 정류기의 부하가 인덕턴스 성분을 포함하게 되면 동작이 조금 복잡해진다. 부하에 포함된 인덕턴스 L 의 크기에 따라 출력전류가 연속이 되기도 하고 불연속이 되기도 한다.

전원전압 v_s 의 양의 반주기($0 \leq wt \leq \pi$) 동안에는 SCR T_1 과 T_4 가 순방향 바이어스되고 T_2 와 T_3 는 역방향 바이어스되므로 위상각 $wt = \alpha$ 에서 T_1 과 T_4 를 동시에 턴 온한다.

T_1 과 T_4 가 온 상태가 되면 전류는 전원 v_s , T_1 , $R-L$ 부하, T_4 로 구성되는 루프를 흐른다. 이 상태는 위상각 wt 가 π 를 지나 v_s 의 극성이 바뀌어도

$wt = \pi + \alpha$ 에서 T_2 와 T_3 를 턴 온할 때까지 지속된다. 왜냐하면 인덕터를 통해 흐르는 전류는 연속이고 T_1 과 T_4 의 턴 오프 제어는 불가능하기 때문이다. 따라서 출력전압 v_0 는 위상각 π 에서 $\pi + \alpha$ 구간 동안 v_s 와 같으며 음(-)의 값을 갖는다. 이 구간에서 T_2 와 T_3 는 순방향 바이어스 되어 있으므로 T_2 와 T_3 에 게이트신호가 인가되면 턴 온된다. T_2 (T_3)가 $wt = \pi + \alpha$ 에서 턴 온 되면 T_1 (T_4)을 통해 흐르던 전류는 T_2 (T_3)로 옮겨지므로 전원전류 i_s 의 극성이 바뀐다. $\pi + \alpha \leq wt \leq 2\pi + \alpha$ 구간에서의 전류는 전원 v_s , T_2 , $R-L$ 부하, T_3 로 구성되는 루프를 따라 흐른다.

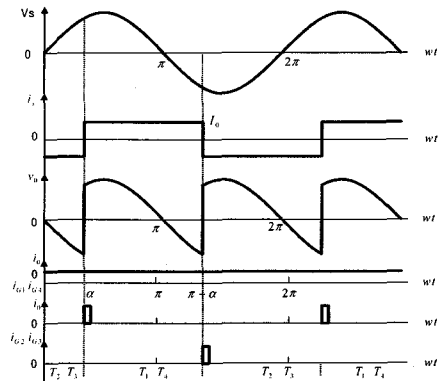
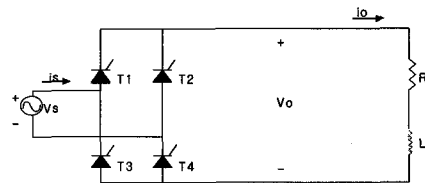


그림 5. 위상제어
Fig. 5. Phase control rectifier.

4. 유도가열 시스템

그림 6에 나타낸 유도가열 시스템의 구조는 가열용기 내부에 특수하게 설계된 발열체 부하를 위크코일로부터 전자유도에 의해 와전류로 발열시켜 용기내의 물이나 공기 등의 이동유체를 전자유도 발열체인 부하에 접촉시킴에 따라 작은 비열의 발열체를 급속하게 온도를 올리거나 내릴 수 있도록 하는 새로운 유체가열 시스템의 구조를 나타낸다.

발열체는 금속박판을 이용하기 때문에 고온 가열시

단선, 단락 및 전기절연 성능이 뛰어나며 비열이 작으며 열용량이 큰 발열부의 구성이 가능하고 유체 통과 저항이 극히 작아 출력부의 온도 응답특성이 빠르며 정밀 온도제어가 가능하다는 종래의 유체가열장치에서 얻을 수 없었던 뛰어난 특성을 갖는다.

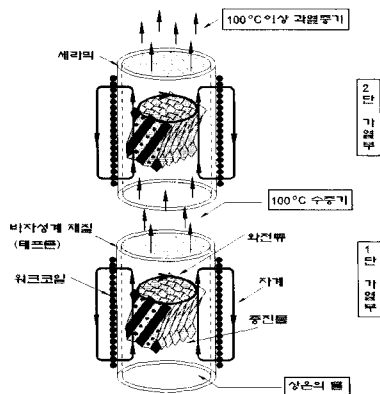


그림 6. 유도가열시스템 구조
Fig. 6. Configuration of the IH system

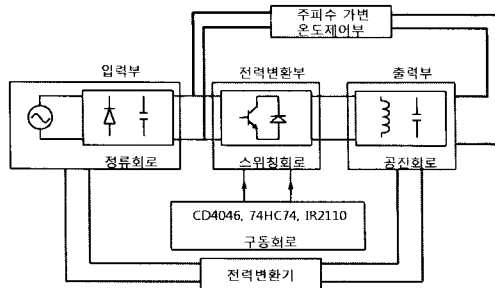


그림 7. 제안한 시스템의 구성도
Fig. 7. A block diagram of the proposed system

특히, 표면적이 크다는 것은 히터로 사용할 경우 전 열면적을 많이 사용할 수 있다는 것이며 이렇게 복수로 적층되어 있는 작은 용적의 금속판에 의해 충분한 전열면적을 확보할 수 있고 금속판 자체가 자기발열을 한다는 특징을 갖고 있다.

본 논문에서 제안한 인버터는 그림 7과 같이 구성하였다. 시스템 구성은 크게 입력부, 전력변환부, 출력부, 제어부로 나눌 수 있다. 입력부는 정류회로로 구성되며 전력변환부는 스위칭소자와 구동회로로 구성되며 본 실험에서 사용한 스위칭소자는 모듈타입으로 된 IGBT이며 구동회로의 주요 소자는 74HC4046,

74HC74, IR2110을 사용하였다. 그리고 출력부는 공진 회로로 구성되며 캐패시터와 부하 인덕터가 있다.

제어부는 온도를 제어하는 방식으로 2가지의 온도 제어 방식을 도입하여 비교하였다. 입력의 위상을 변화 시켜주는 전력변환기는 온도가 변화함에 따라 입력 전류의 위상이 천이되는 방식으로 입력전력을 변화하여 부하에 흐르는 전류를 제어하는 방식이다.

주파수 제어 방식은 온도에 따라 20~44[kHz]까지 주파수를 가변시켜 그림4에 따라 전류량을 조절하는 온도조절기로 구성되었다.

5. 실험 및 검토

그림 8은 실제 제작한 실험장치로 1차 보일러 시스템 및 2차 증기 발생장치이다.

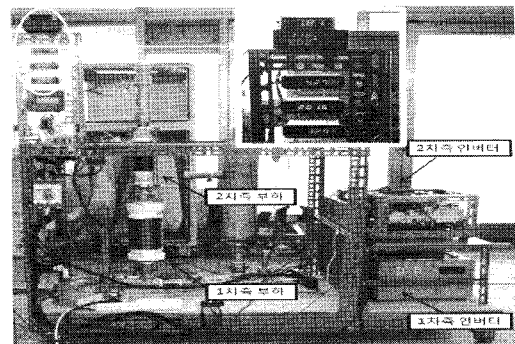


그림 8. 시스템 실험장치
Fig. 8. Experimental set up system

하프-브릿지 인버터를 사용한 1차 가열부는 10[kW]급으로 하였으며 상온의 물을 100[°C]의 수증기 상태로 만드는 역할을 한다. 2차 가열부는 5[kW]급 하프-브릿지 인버터로 구성하였으며 1차측으로부터 유입되는 증기를 다시 가열하여 100[°C]이상의 과열증기를 발생시킨다. 그리고 1차측의 보일러부에는 항상 적정량의 물이 공급되어야 하므로 본 실험에서는 수위조절 센서와 밸브를 설치하여 원활한 물의 공급을 하였다.

그림 9와 그림 10은 실제 제작한 인버터 장치의 실측파형을 나타낸 것이다.

실험 결과 1차측 목표온도(100[°C]) 도달 시간은 50[sec], 2차측 300[°C] 도달 시간은 200[sec]로 일체의

유도가열 증기발생장치의 온도제어

압력을 걸지 않은 상태에서 고온도의 과열증기를 단 시간에 발생시킬 수 있었다. 온도 측정부분은 2차측 출력단에 부착하여 실험하였다.

실험을 통하여 본 논문에서 설계 제작한 공진형 인버터가 20~50[kHz] 영역에서 부하 양단의 전압파형과 부하의 전류파형이 이론파형과 일치함을 확인할 수 있다.

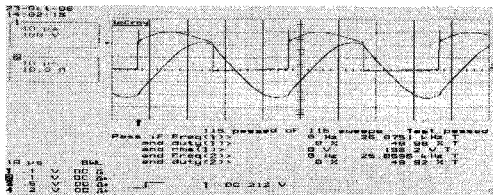


그림 9. 1차측 실측파형 (f_{sw} : 25[kHz], 입력: 200[V])
 Fig. 9. Switching and output waveforms (f_{sw} : 25[kHz], input: 200[V])

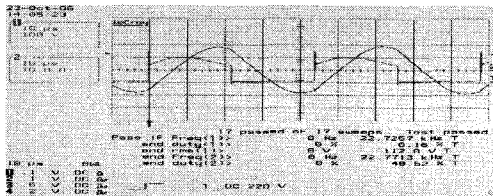


그림 10. 2차측 실측파형 (f_{sw} : 22[kHz], 입력: 110[V])
 Fig. 10. Switching and output waveforms (f_{sw} : 22[kHz], input: 110[V])

그림 11은 전력조절기에서 출력하는 전류로 정상동작일 때의 파형이다.

그림 12는 10[%] 위상제어 파형이고, 13과 14는 각각 50[%]와 90[%]로 위상제어를 하고 있는 실측파형이다.

인버터의 입력되는 전류의 위상을 조절하여 부하내에 입력되는 전류의 양을 감소시킴으로써 온도를 충분히 조절할 수 있다.

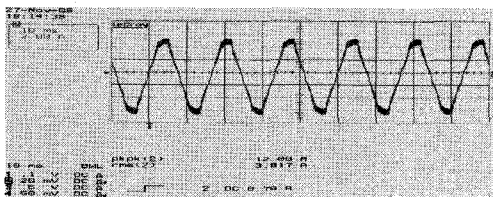


그림 11. 위상제어 정현파
 Fig. 11. Phase control sine wave

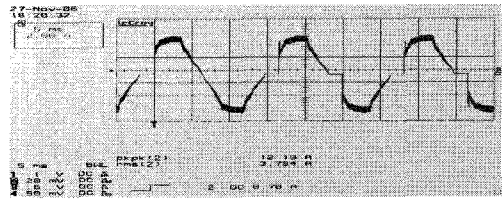


그림 12. 위상제어 10[%]
 Fig. 12. Phase control 10[%]

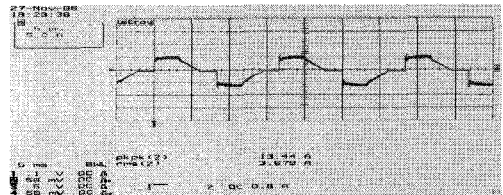


그림 13. 위상제어 50[%]
 Fig. 13. Phase control 50[%]

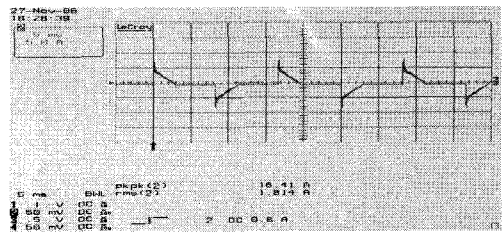


그림 14. 위상제어 90[%]
 Fig. 14. Phase control 90[%]

그림 15와 16은 주파수 변화에 따른 인버터 출력전류의 양을 확인한 실측 파형이다.

주파수를 변화시키면 식 (7)에 의해 전류의 양이 변화 한다. 변화되는 전류를 부하에 인가함으로써 온도 제어가 가능하다.

주파수 변화에 대한 입력전류와 출력전류를 표 1에 나타내었다.

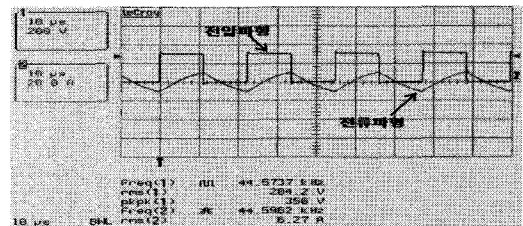


그림 15. 주파수제어(10[%] 출력)
 Fig. 15. Frequency control(10[%] output)

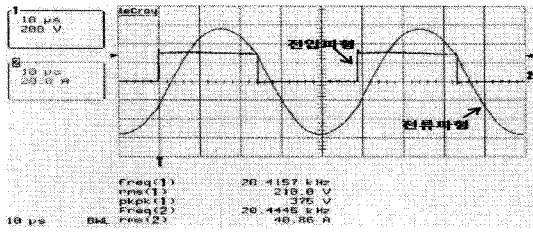


그림 16. 주파수제어(100[%] 출력)
Fig. 16. Frequency control(100[%] output)

표 1. 주파수에 대한 입력전류와 출력전류
Table 1. Input current and output current by frequency

주파수[kHz]	입력전류[A]	출력전류[A]
20	12.7	40.86
22	7	22.91
25	5.3	17.35
28	2.1	12.68
30	1.8	10.35
38	0.7	7.31
44	0.7	6.27

6. 결 론

본 논문에서는 유도가열용 하프브리지 공진형 인버터를 이용하여 전력의 위상과 주파수를 조절하여 온도를 제어할 수 있는 유도가열 시스템을 설계 및 제작하여 실험한 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 상압에서 100[°C] 이상의 과열증기를 단시간에 발생시킬 수 있는 장점을 가지고 있으며 LC공진에 있어서 부하 자체에 인덕터만을 사용하였다.
- 2) 고주파 공진형 인버터를 이용한 유체 가열방식은 유도가열에 있어 새로운 가열방식으로 기대가 되며 충분한 열원으로서 가능성을 확인할 수 있었다.
- 3) 위상 제어와 주파수 제어방식을 사용하여 온도제어가 가능함을 확인하였고 주파수 제어방식이 더욱 안정적임을 확인했다.

하프브리지 공진형 인버터를 이용하여 유도가열 시스템을 제품화하는데 앞으로 고주파인버터의 스위칭 손실 및 노이즈대책, 고성능화에 대한 실질적 연구가

계속 필요하며 특히, 고주파인버터의 회로방식 및 제어부의 개발 그리고 유체가열부의 새로운 구조의 제안과 그 열 교환 효과에 대한 보다 구체적으로 연구가 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 호서대학교의 교내연구(과제번호 : 20090021)의 지원으로 수행되었으며, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] Y. J. Kim, K. H. Kim, D. C. Shin, "Electromagnetic Indirect Induction Fluid Heating System using Series Resonant PWM Inverter and Its Performance Evaluations", The Transactions of The Korean Institute of Power Electronics, vol. 7, No. 1, pp.48-53, FEB, 2002.
- [2] S. M. Jang, S. H. Lee, H. C. Park, "Electromagnetic Induction Heating and Its Application", Proceedings of KIEE, vol. 50, No. 2, p.9, FEB, 2001.
- [3] S. B. Yoo, D. Y. Lee, D. S. Hyun, "Characteristics and System Trend of Induction Heating Inverter", Proceedings of KIEE, vol. 50, No. 2, p.22, FEB, 2001.
- [4] Y. J. Kim, D. C. Shin, K. H. Kim, Y. Uchihori, Y. Kawamura, "Fluid Heating System using High-Frequency Inverter Based on Electromagnetic Indirect Induction Heating", ICPE'01, pp.69-74, OCT, 2001.
- [5] S. C. Hong, H. J. Jeon, H. L. Baek, C. Y. Won, "Power Electronics using PSpice", INTERMISION, p.377, FEB, 2002.

◇ 저자소개 ◇

신대철 (申大澈)

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

유재훈 (俞在勳)

1979년 8월 24일생. 2005년 호서대학교 전기공학과 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 동 대학원 전기공학과 박사과정. 2008년~현재 티센크루프 엘리베이터 연구소 전기개발팀 연구원.