

고주파 공진형 인버터를 이용한 유도가열형 2단 히터

(Development a Two Step Heater Using Induction Heating Based on a High Frequency Resonant Inverter)

신대철* · 권혁민

(Dae-Cheul Shin · Hyuk-Min Kwon)

요 약

제안한 유도가열 시스템은 증류탑 장치에 사용되는 특수충진체에 의한 열교환기술과 IH(Induction-Heating) 전자유도가열용의 특수한 고주파 전력회로 기술을 응용한 차세대 가열방식이다. 특히 일체의 연소과정이 없다는 점에서 작업환경의 개선이 가능하며 본 기술은 IGBT대용의 고주파 인버터를 사용하여 상용교류로부터 수[kHz]의 고주파교류(HFAC)를 발생시킬 수 있다.

본 논문에서는 1.5[kW]급 하프-브릿지 공진형 인버터 시스템과 공진부하의 동작해석, 특성분석 및 본 시스템을 이용한 2단계 열 과열증기 발생장치의 개발과 시스템의 응용에 대해 논하였다.

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. In this occurs not burning, so that the working environment can be improved. This electromagnetic induction heating technique is used high frequency inverter. By using high frequency inverter high frequency alternative current (HFAC) 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 action analysis and characteristics analysis of 1.5[kW]-Class half-bridge resonant inverter system and resonant metallic package. In addition, by using this system, how two step heating superheated steam generator is developed and application of system are also discussed.

Key Words : High-Frequency, Inverter, Induction-Heating

1. 서 론

산업이 발달하면서 전기를 이용한 가열 및 건조기술은 양질의 제품을 효율적으로 생산하는데 매우 중요한 역할을 한다. 즉 전기 가열법은 화석연료를 이용하는 연소가열법에 비해 열 효율적 측면과 제어적

* 주저자 : 호서대학교 전기공학과 교수
Tel : 041-540-5651, Fax : 041-549-5651
E-mail : dcsin@office.hoseo.ac.kr
접수일자 : 2005년 7월 13일
1차심사 : 2005년 7월 18일, 2차심사 : 2005년 7월 29일
심사완료 : 2005년 8월 4일

고주파 공진형 인버터를 이용한 유도가열용 2단 히터

측면에서 월등히 우수하므로 전 산업분야에서 급격한 속도로 대체되고 있다. 이러한 전기가열방식은 저항가열, 아크가열, 유도가열, 유전가열, 전자빔가열, 적외선 가열 등이 있으며 그중에서도 유도가열 분야는 교류자계 중에서 도전성 물체에 유도되는 와전류손, 히스테리시스손을 이용하여 가열하는 방식으로 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 유리한 점이 많아 산업 현장의 여러 분야에 응용되고 있다.

제안한 유도가열 시스템은 증류탑 장치에 사용되는 특수충진체에 의한 열교환기술과 전자유도가열용 IH(Inducting-Heating)의 특수한 고주파 전력회로 기술을 응용한 차세대 가열방식으로 휴대가 간편하면서도 증발기, 온수기, 과열수증기 발생기, 난방기 등의 여러 기기에 응용되어 사용될 수 있는 차세대형의 열원이자 가열장치로서 액체, 기체, 고체의 가열장치에 필요한 기본적인 기능이 총망라되어 있어 식품 가공뿐만 아니라 화학, 반도체, 의료산업 등에도 폭넓게 응용할 수 있는 장치이다. 또한 기존의 가열장치에서는 얻을 수 없었던 다양한 장점들을 가지고 있다[1].

본 논문에서는 간접 유도가열 되는 보일러 시스템과 주파수 범위가 20[kHz]대역에서 작동되는 전압형 직렬공진 고주파 인버터를 이용하여 열 기체를 발생시키는 시스템에 관하여 설명하였다. 그리고 제작한 1.5[kW]급 하프-브릿지 공진형 인버터 시스템과 공진부하의 동작해석, 특성분석 및 본 시스템을 이용한 2단 가열 과열증기 발생장치의 개발과 이동유체의 순시가열 시스템의 응용에 대해 논하기로 한다.

2. 유도가열의 원리 및 특성해석

금속가열에 이용되는 고주파 가열은 정확하게는 고주파 유도가열이라 칭하는 것으로 전자유도 작용에 의한 것이며 교류 전류가 흐르는 코일 속에 위치한 금속 등의 도전체는 와전류손과 히스테리시스손의 저항에 의하여 전력의 크기만큼 열이 발생한다. 이와 같이 발생하는 열에너지를 이용하여 피가열 물

질을 가열하는 것을 유도가열이라 하며, 특히 고주파 전류를 이용하는 것을 고주파 유도가열이라고 한다.

그림 1과 같이 고주파 교류전원, 가열코일, 도체(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 유기기되어 표피 저항에 의해 $P=I^2R$ 의 전력 크기만큼 주열열을 발생시키는 원리이다. 이러한 열의 대부분은 식 (2)로 표현되는 표피두께 δ 내에 분포하게 되며, δ 는 유도 가열의 여러 응용분야에서 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]

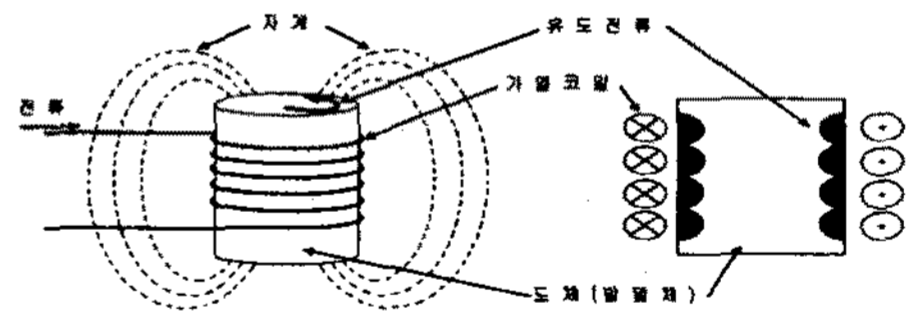


그림 1. 유도 가열의 원리
Fig. 1. Principle of induction heating

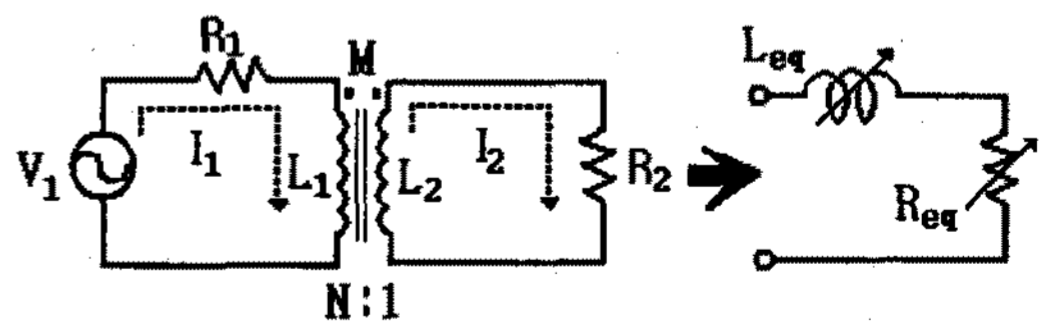


그림 2. 유도 가열 시스템의 등가 회로
Fig. 2. The equivalent circuit of induction heating system

일반적으로 유도가열 시스템은 가열코일과 부하를 각각 1, 2차측으로 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 회로를 풀면 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} V_1 &= (R_1 + j\omega L_1)I_1 - j\omega MI_2 \\ 0 &= -j\omega MI_1 + (R_2 + j\omega L_2)I_2 \end{aligned} \quad (3)$$

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 이 등가화 된 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.

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

$$P = I_2^2 R_2$$

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

여기서 N : 가열코일의 턴수, $I_2 = \Im_1$ 이다.

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.

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

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \quad (12)$$

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.

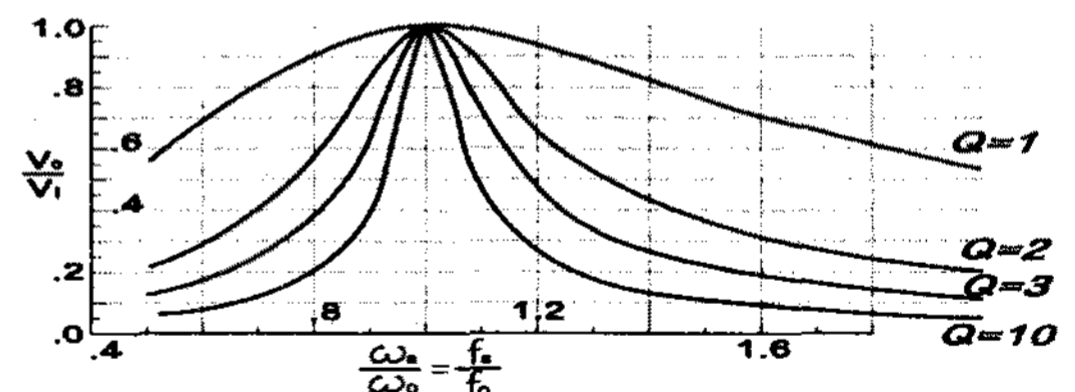


그림 3. 주파수 특성
Fig. 3. Frequency characteristics

그림 3은 Q 가 큰 회로는 대역폭이 작아서 매우 선택적임을 보여주며, 스위칭주파수가 공진주파수와 같을 때 진폭이 가장 큼을 보여주고 있다.

그림 4는 인버터로서 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].

고주파 공진형 인버터를 이용한 유도가열형 2단 히터

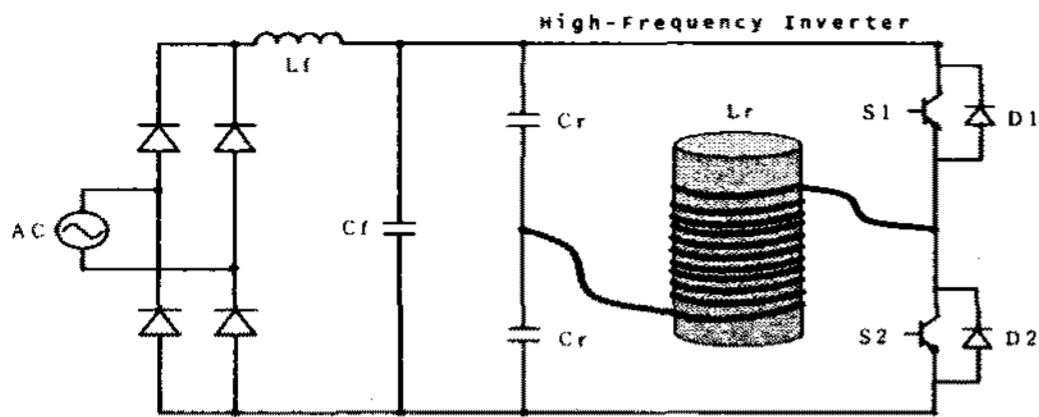


그림 4. 하프-브릿지 인버터
Fig. 4. Half-bridge inverter

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].

3.유도가열 시스템의 구조

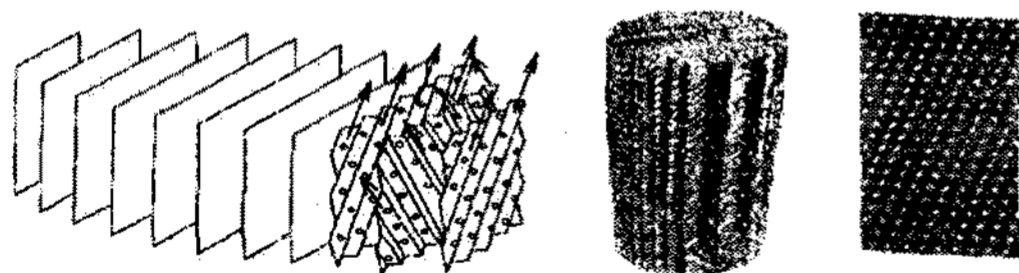


그림 5. 발열체
Fig. 5. Metallic package

그림 5에 나타낸 발열체의 구조는 규칙 충전물의 구조와 거의 동일한데 그 근원은 정체형 혼합기(Static Mixer)로서 이것은 동력 또는 압력을 이용하지 않고 유체만을 흘려보냄으로서 유체를 혼합시킨다는 것을 그 특징으로 들 수 있다. 예를 들면 한 쪽에서 백색과 적색의 두가지 액체를 따로따로 흘려보내면 다른 쪽에서는 완전하게 섞인 핑크색의 액체가 흘러나오는 것과 같은 것이다. 화학에서는 액체와 기체가 다 존재하므로 이 동작을 [회산·방산·확산·분산]이라고 표현하며 증류탑은 이 혼합작용과 표면적의 크기를 이용하여 원료액을 효율적으로 반

응 혹은 분리시킨다. 특수하게 설계된 발열체는 금속박판을 이용하기 때문에 고온 가열시 단선, 단락 및 전기절연 성능이 뛰어나며 비열이 작으며 열용량이 큰 발열부의 구성이 가능하고 유체 통과저항이 극히 작아 출력부의 온도응답특성이 빠르며 정밀 온도제어가 가능하다는 종래의 유체가열장치에서 얻을 수 없었던 뛰어난 특성을 갖는다. 특히 표면적이 크다는 것은 히터로 사용할 경우 전열면적을 많이 사용할 수 있다는 것이며 이렇게 복수로 적층되어 있는 작은 용적의 금속판에 의해 충분한 전열면적을 확보할 수 있고 금속판 자체가 자기발열을 한다는 특징을 갖고 있으며 직경 100[mm], 높이 200[mm]를 기준으로 한 물리적 특성은 표 1과 같다.

표 1. 발열체의 물리적 특성
Table 1. Physical characteristics of metallic package

직 경	100[mm]	표면적	22000[cm ²]
높 이	200[mm]	공간율	90[%]
체 적	1570[cc]	실공간	10[%]
중 량	1000[g]	재 질	스텐레스
공 간	0.07[cc/cm ³]	비 열	0.11[cal/g]

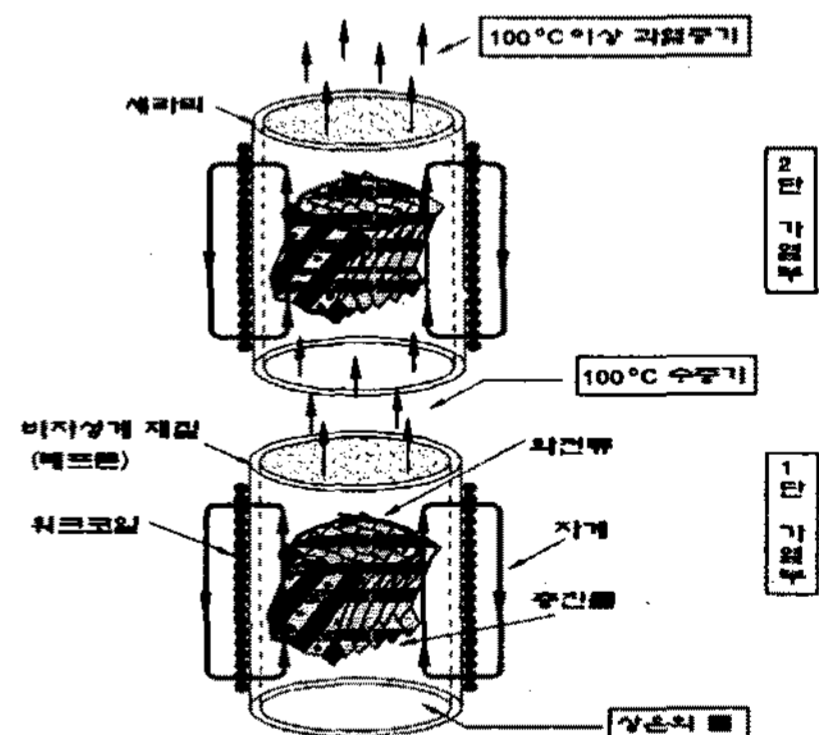


그림 6. 유도가열시스템 구조
Fig. 6. Configuration of the IH system

그림 6에 나타낸 유도가열 시스템의 구조는 가열 용기 내부에 특수하게 설계된 발열체부하를 위크로일로부터 전자유도에 의해 와전류로 발열시켜 용기 내의 물이나 공기 등의 이동유체를 전자유도 발열체인 부하에 접촉시킴에 따라 작은 비열의 발열체를 금속하게 온도를 올리거나 내릴 수 있도록 하는 새

로운 유체가열 시스템의 구조를 나타낸다.

표 2는 본시스템 방식을 이용한 대용량 시스템과 종래의 시스템과의 특징 비교를 나타낸 것이다[4].

표 2. 종래의 시스템과 본시스템의 특징 비교
Table 2. Comparison between conventional system and proposed system

가열방식	단위	시즈히터	본시스템
최고사용온도	[°C]	260	500이상
전열방법		열매유	직접가열
총전기용량	[kW]	14	14
발열용량	[kcal]	8170	11000
모터출력	[kW]	3.8	/
냉각수		모터냉각용	/
총중량	[kg]	600	20
목표시간		약1시간	1분이하
전열면적	[cm ²]	약4400	약22000

4. 실험 및 검토

본 실험에서 사용한 스위칭소자는 FAIRCHILD사의 모듈타입 IGBT를 사용하였다. 또한 1차측의 파라미터로 용량이 0.1[μF]인 콘덴서를 여러 개 사용하였으며, 코일 값인 인덕턴스는 80~150[μH]로 조정하였다. 공진 콘덴서는 주파수 특성이 좋은 폴리프로필렌계열을 주로 사용하지만 리플전류를 고려해서 적절한 용량의 것을 사용하였다. 또 부하이자 공진L은 자성스텐레스(발열체), 테프론(절연체), 릿쓰와이어(위크코일)로 특수하게 설계하였다.

그림 7은 실험에 사용한 3개의 발열체부하이며 표 3에 발열체부하 A, B, C 각각의 사양을 나타낸다. 파라미터 측정은 LCR메타 MIT9216A를 사용하였다.

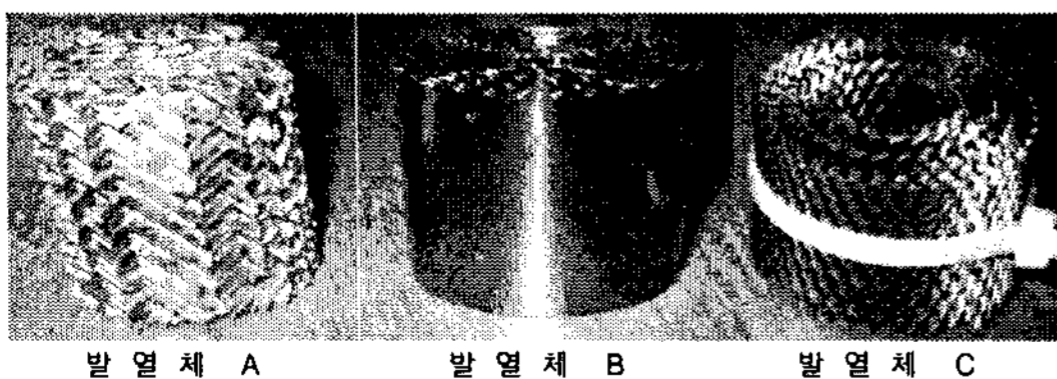


그림 7. 발열체부하
Fig. 7. Induction-heated metallic package

유도가열 부하로 사용된 발열체A, B, C는 모두 자성체 스텐레스로 제작되었으며 A는 얇은 스텐레스

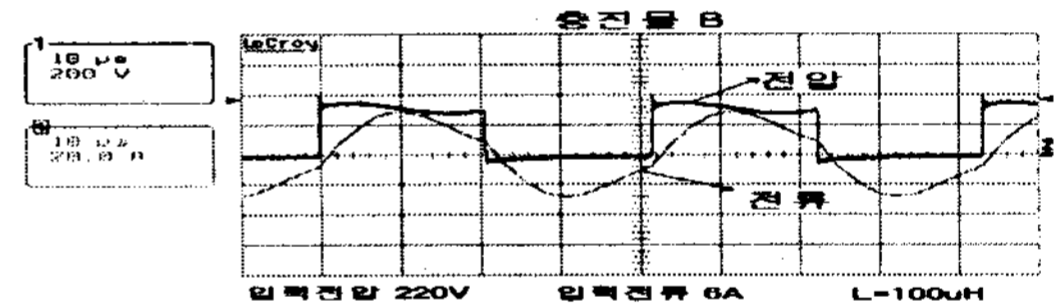
박판을 전기 스폿용접하여 전열면적을 넓게 하기위해 특수 설계 제작한 것이며, B는 스텐레스 박판을 주름지게 감아 제작, C는 스텐레스 망을 감아 제작하였다.

표 3. 발열체에 따른 파라미터
Table 3. Parameters according to metallic package

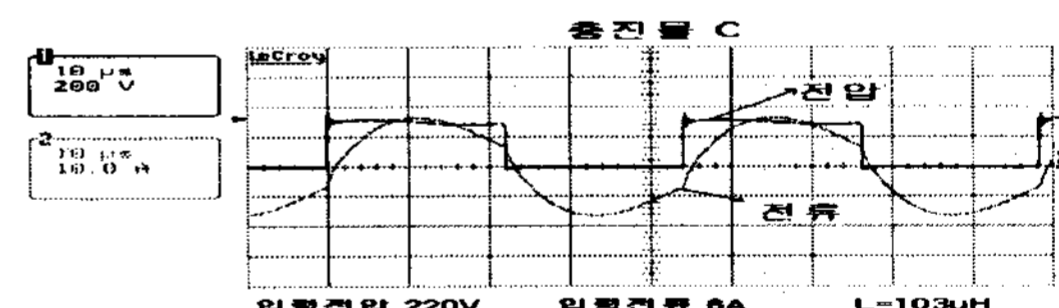
부하종류	발열체 A	발열체 B	발열체 C
L[μH]	104	100	103
Q	5.1	2.7	2.0
WxH[mm]	50 X 60	50 X 70	50 X 70
코일[mm]	0.26X25	0.26X25	0.26X25
fr[kHz]	20.2	20.6	20.3



(a) 발열체 A



(b) 발열체 B



(c) 발열체 C

그림 8. 발열체부하에 따른 출력파형
Fig. 8. Output waveforms according to metallic package

그림 8은 각 발열체부하 양단의 출력전압과 전류의 실측파형을 나타낸 것이다. 실험파형에서 나타난 것과 같이 모두 정상 동작 되었으며, Q값이 높은 발열체부하 A가 부하 B, C에 비해 공진전류값이 높게 나타남을 알 수 있다. 따라서 공진부하 발열체 L(공진 인덕턴스) 설계시 Q값은 공진전류 증가에 중요한 변수로 작용함을 알 수 있다.

고주파 공진형 인버터를 이용한 유도가열형 2단 히터

그림 9는 실제 제작한 응용실험장치로 1차와 2차로 구성된 과열기 시스템이다. 1차 가열부는 1.5[kW]급 하프-브릿지 인버터를 사용하였으며 상온의 물을 100[°C]의 수증기 상태로 만드는 역할을 한다. 2차 가열부는 1[kW]급 하프-브릿지 인버터로 구성하였으며 1차측 으로부터 유입되는 증기를 다시 가열하여 100[°C]이상의 과열증기를 발생시킨다. 그리고 1차측의 보일러부에는 항상 적정량의 물이 공급되어야 하므로 본 실험에서는 수위조절센서와 밸브를 설치하여 원활한 물의 공급을 하였다.

실험 결과 1차측 목표온도(100[°C]) 도달 시간은 50[sec], 2차측 300[°C] 도달 시간은 200[sec]로 일체의 압력을 걸지 않은 상태에서 고온도의 과열증기를 단시간에 발생시킬 수 있었다.

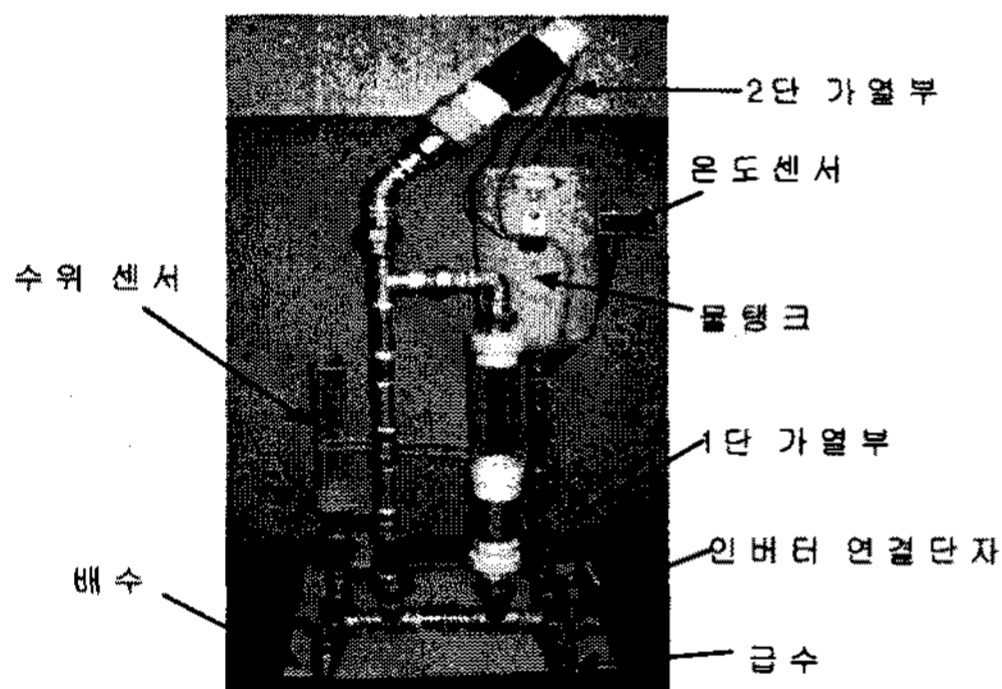


그림 9. 과열기 시스템 실험장치
Fig. 9. Experimental set up superheater system

4. 결 론

본 논문에서는 하프-브릿지 고주파 공진형 인버터 2대를 이용한 2단 유도가열 시스템의 응용에 대하여 제안하였다. 실험을 통해 인버터 장치의 정상 작동을 확인 할 수 있었으며 공진부하 L제작성 Q값의 중요성을 설명하였다.

일체의 압력을 걸지 않고 100[°C]이상의 과열증기를 빠른 시간에 발생시킬 수 있는 장점을 가지고 있으며 LC공진에 있어서 부하자체를 L로 제안하여 효율을 높였다.

제안한 유도가열 방식은 유체가열(여기서는 물)에 사용되는 모든 발열방식(석탄, 석유, 가스, 전기저

항가열)과 비교하여 90[%]이상으로 열변환효율이 높아 경제적이고, 온도에 대한 신속한 응답성(컨트롤러에 의해 높은 온도를 단시간에 올리고 내릴 수 있다)으로 인하여 시스템의 워밍업 등에 수반되는 열 손실을 줄일 수 있으며, 출력온도 제어의 용이성 및 폭발 위험에 의한 안전성이 뛰어나며, 배출가스 등의 오염 물질의 발생이 없어 위생적이며 청결하다는 우수한 장점을 갖는다고 할 수 있다.

앞으로 시스템의 출력제어를 위한 컨트롤러 및 보호회로 설계와 발열체부하와 절연용기의 재료에 대한 연구가 필요하며, 유도가열의 폭넓은 응용분야에 대한 조사와 연구가 진행되어야 한다.

이 논문은 2005년도 호서대학교 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Y. J. Kim, K. H. Kim, D. C. Shim, "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", IOPE'01, pp.69-74, OCT, 2001.
- [5] S. C. Hong, H. J. Jeon, H. L. Baek, C. Y. Won, "Power Electronics using PSpice", INTERMISON, 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(박사). 1989~1990년 나가사키대학 visiting scholar. 1989년~현재 호서대학교 전기공학과 교수.

권혁민 (權赫敏)

1971년 3월 26일생. 1999년 호서대학교 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 전기공학과 박사수료.