

## 5[kW]급 풀-브릿지 고주파 공진형 인버터를 이용한 고효율 유도가열 히터 개발

申大澈<sup>†</sup>, 權赫敏<sup>\*</sup>

Development a High-Efficiency Induction Heating Heater using  
a 5[kW] Class Full-Bridge High Frequency Resonant Inverter

Dae-Cheul Shin and Hyuk-Min Kwon

### 요 약

제안한 유도가열 시스템은 증류탑 장치에 사용되는 특수충진체에 의한 열교환기술과 IH(Induction-Heating)전자 유도가열용의 특수한 고주파 전력회로 기술을 응용한 차세대 가열방식이다. 특히 일체의 연소과정이 없다는 점에서 작업환경의 개선이 가능하며 본 기술은 IGBT대응의 고주파 인버터를 사용하여 상용교류로부터 수[kHz]의 고주파 교류를 발생시킬 수 있다. 본 논문에서는 절연체 용기 내에 특수 스텐레스 발열체부하를 수납하여 용기 외부의 고주파 공진형 인버터 접속의 워킹코일로부터 비접촉 상태로 전자유도 와전류를 구조체에 흘림으로서 발열하게 되는 새로운 유체가열방식을 제안한다. 그리고 5[kW]급 풀-브릿지 공진형 인버터 시스템과 공진부하의 동작해석, 특성분석 및 본 시스템을 이용한 고효율 스팀 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 in the range of [kHz] can be made with conventional alternative current. In this contribution IGBT module is used for high frequency inverter. This paper proposes new fluid heating method. Which is operated as follows. Working coil, which is wrapped outside of pipeline, makes the eddy current. Inside of heating vessel in isolated pipeline the specially designed stainless metallic package is inserted, which can be heated by eddy current losses. And then In this paper are discussed action analysis and characteristics analysis of 5[kW] class full-bridge resonant inverter system and resonant metallic package. In addition, by using this system, how high-efficiency heater is developed and application of system are also discussed.

**Key Words** : Induction Heating, High Frequency, Resonant, Inverter, High-efficiency heater

### 1. 서 론

<sup>†</sup>교신저자 : 정회원, 호서대 전기공학과 교수

E-mail : dcsin@office.hoseo.ac.kr

<sup>\*</sup>정회원, 호서대 전기공학과 박사과정

접수일자 : 2005. 8. 4                      1차 심사 : 2005. 8. 23

2차 심사 : 2005. 9. 2                      심사완료 : 2005. 9. 3

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 속  
 용성 및 신뢰성이 높고 소형, 경량이면서 전력밀도가  
 높은 것이 요구되어지고 있으며 공진회로를 이용한 전  
 력 변환 장치의 고주파 스위칭화의 도입은 짧은 스위  
 칭동작으로 탱크 회로내에 큰 진폭의 전류가 발생하므  
 로 공진 요소 부품들이 소형·경량화 되고 고출력화가  
 가능하게 되었다.

한편 이러한 전력변환장치 기술 중의 하나인 유도 가  
 열 기술은 산업 전반에 걸쳐서 아주 폭 넓게 사용되는  
 기술로서 그 근본이 되는 원리는 1831년 패러데이의  
 의해서 발견된 전자기 유도현상이다. 이 현상을 약간  
 변형시켜서 코일에 교류전류를 흘려주면 이 코일 안에  
 있거나 또는 근처에 있는 금속체에 와전류가 유도되어  
 금속체가 가열되는 현상이 유도 가열의 원리이다. 이러  
 한 유도 가열 방식은 종래의 연소에 의한 발열 방식과  
 비교하여 가열 효율이 높아 경제적이고, 온도에 대한  
 신속한 응답성으로 인하여 시스템의 워밍업 등에 수반  
 되는 열 손실을 줄일 수 있으며, 출력온도 제어의 용  
 이성 및 안전성이 뛰어나며, 배출가스 등의 오염 물질  
 의 발생이 없어 위생적이며 청결하다는 우수한 장점을  
 갖는다고 할 수 있다. 이러한 전자기유도 가열의 유효성  
 은 인지도가 매우 높아져 산업설비에서부터 현재 가정  
 용 전자조리기로 대표되는 IH기술로 일반 가정에 널리  
 보급되어 생활환경을 크게 개선시키기도 하였다<sup>[1]</sup>.

전자유도 가열 발열체와 유체이동과의 새로운 열교환  
 방식은 기체 및 액체 등을 저온에서 초고온에 이르기  
 까지 고정도 가열이 가능한 방법으로서 주목을 받고  
 있다. 특히 일체의 연소과정이 없다는 점에서 작업환  
 경의 개선이 가능하며 온도제어 신뢰성에 뛰어난 본  
 기술은 IGBT대응의 고주파 인버터를 사용하여 고성  
 능, 고효율화 시스템화가 가능한 고주파 PE(Power  
 Electronics)의 새로운 분야로 주목받고 있다<sup>[2]</sup>.

본 논문에서는 절연체 용기 내에 특수 스텐레스 발  
 열체부하를 수납하여 용기 외부의 고주파 공진형 인버  
 터 접속의 워킹코일로부터 비접촉 상태로 전자유도 와  
 전류를 구조체에 흘림으로서 발열하게 되는 새로운 유  
 체가열방식을 제안한다. 설계한 시스템 인버터는 스위  
 칭주파수 20[kHz]대역에서 작동되는 5[kW]급 풀-브릿  
 지 고주파 직렬 부하 공진형이며 LC공진 설계시 부하  
 자체를 L로 설정하여 효율을 최대화 하였다. 그리고  
 시뮬레이션 및 실험을 통한 정상 동작해석, 시스템의  
 성능분석을 하였으며 본 시스템 인버터를 이용한 고효  
 율 히터의 개발 및 응용에 대해 설명하였다.

## 2. 유도 가열 등가 회로

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

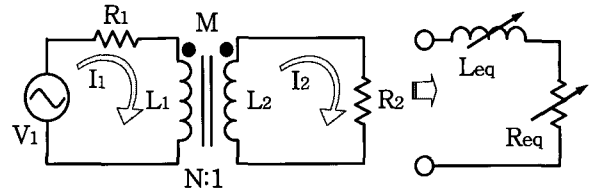


그림 1 유도 가열 시스템의 등가 회로  
 Fig. 1 The equivalent circuit of induction heating system

그림 1의 회로를 풀면 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} V_1 &= (R_1 + j\omega L_1)I_1 - j\omega MI_2 \\ 0 &= -j\omega MI_1 + (R_2 + j\omega L_2)I_2 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $M$ 은 상호인덕턴스이다.

식 (1)을  $I_2$ 에 대해서 정리를 하면 식 (2)와 같다.

$$I_2 = \frac{j\omega MI_1}{R_2 + j\omega L_2} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)에 의해 등가회로의 파라메타는 식 (3)과 같다.

$$\frac{V_1}{I_1} = R_{eq} + j\omega L_{eq} \quad (3)$$

한편, 이 등가화 된 파라메타  $L_{eq}$ ,  $R_{eq}$ 는 가열 부하  
 의 크기와 위치, 가열코일과 부하사이의 거리, 부하의  
 도전율과 투자율, 동작주파수 등에 의해 변하게 된다.  
 또한, 변압기 2차측 저항  $R_2$ 는 와전류의 침투깊이  $\delta$ 에  
 의해 결정되므로 식 (4)와 같다. 실제 유도 가열에 의  
 해 발생하는 출력전력은 저항과 전류의 관계에 의해서  
 식 (5)로 표현된다.

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{\rho}{\delta} = \sqrt{\pi\rho\mu f} \\ P &= I_2^2 R_2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$P = (NI_1)^2 \cdot \sqrt{\pi\rho\mu f} \quad (5)$$

여기서,  $N$  : 가열코일의 턴수,  $I_2 = NI_1$  이다<sup>[3]</sup>.

### 3. 직렬 공진형 인버터

인버터는 직류전원을 교류전원으로 변환하는 장치로써 대전력을 얻기에 가장 적합한 풀-브릿지 인버터를 이용한다.

그림 2는 인버터로서 풀-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<sup>[4]</sup>.

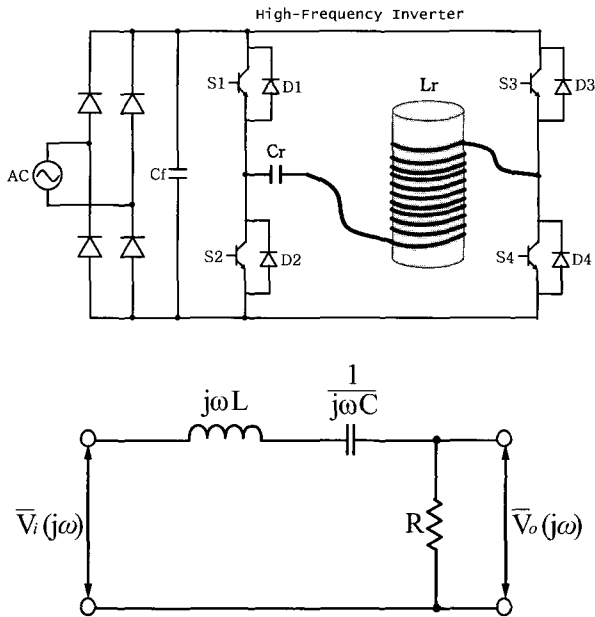


그림 2 직렬공진 인버터 및 페이저 등가회로  
Fig. 2 Series resonant inverter and phasor equivalent circuit

그림 2의 페이저 등가회로에서 직렬 RLC회로에 대한 입력 임피던스는 식 (6)과 같다.

$$Z(jw) = R + jwL + \frac{1}{jwC} \quad (6)$$

식 (6)의 허수 부분이 식 (7)과 같은 조건을 만족하면 0이 된다.

$$wL = \frac{1}{wC} \quad (7)$$

위의 관계를 만족하는  $w$ 의 값을 공진주파수  $w_0$ 라고 하면 식 (8)과 같다.

$$w_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (8)$$

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 (9)와 같고, 입·출력 전압의 관계를  $w_0$ 와  $Q$ 로 나타내면 식 (10)과 같다.

$$Q = \frac{w_0L}{R} = \frac{1}{w_0CR} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (9)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{w}{w_0} - \frac{w_0}{w} \right)^2}} \quad (10)$$

식 (9)는  $Q$ 가  $R$ 에 종속적이며,  $R$ 에 반비례 관계를 알 수 있다. 또한  $R$ 의 변화에 따른  $Q$ 의 변화와  $Q$ 에 따른 주파수 선택성을 보여준다. 그리고 식 (10)은 스위칭주파수에 따른 진폭을 나타낸다.

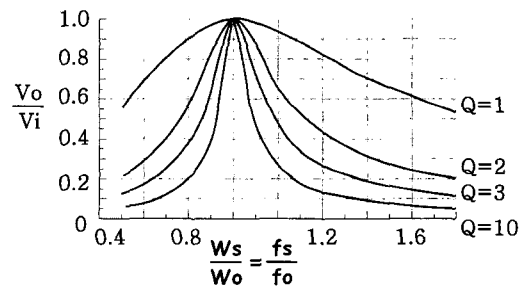


그림 3 주파수 특성  
Fig. 3 Frequency characteristics

그림 3은  $Q$ 가 큰 회로는 대역폭이 작아서 매우 선택적임을 보여주며, 스위칭주파수가 공진주파수와 같을 때 진폭이 가장 큼을 보여주고 있다<sup>[5]</sup>.

4. 시스템 구성

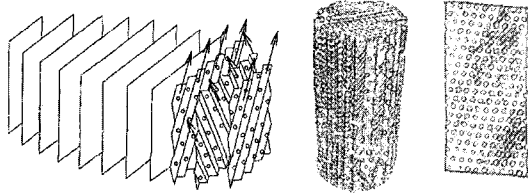


그림 4 발열체  
Fig. 4 Metallic package

그림 4에 나타난 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 [휘산·방산·확산·분산]이라고 표현하며 증류탑은 이 혼합작용과 표면적의 크기를 이용하여 원료액을 효율적으로 반응 혹은 분리시킨다. 특수하게 설계된 발열체는 금속박판을 이용하기 때문에 고온 가열시 단선, 단락 및 전기절연 성능이 뛰어나며 비열이 작으며 열용량이 큰 발열부의 구성이 가능하고 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 그 물리적 특성은 표 1과 같다<sup>[6]</sup>.

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

직경	100[mm]	표면적	22000[cm <sup>2</sup> ]
높이	200[mm]	공간율	90[%]
체적	1570[cc]	실공간	10[%]
중량	1000[g]	재질	스텐레스
공간	0.07[cc/cm <sup>2</sup> ]	비열	0.11[cal/g]

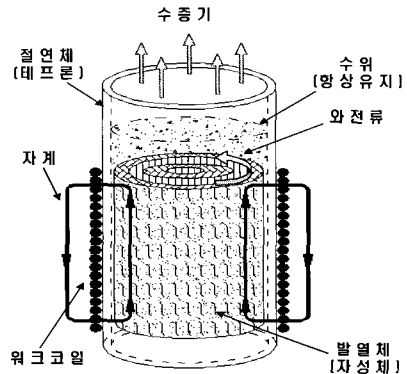


그림 5 공진 발열체부하의 구조  
Fig. 5 Configuration of resonant metallic package

그림 5에 나타난 시스템의 구조는 가열용기 내부에 특수하게 설계된 발열체부하를 워크코일로부터 전자유도에 의해 와전류로 발열시켜 용기내의 물이나 공기 등의 이동유체를 전자유도 발열체인 부하에 접촉시킴에 따라 작은 비열의 발열체를 급속하게 온도를 올릴 수 있는 새로운 유체가열 시스템의 구조를 나타낸다.

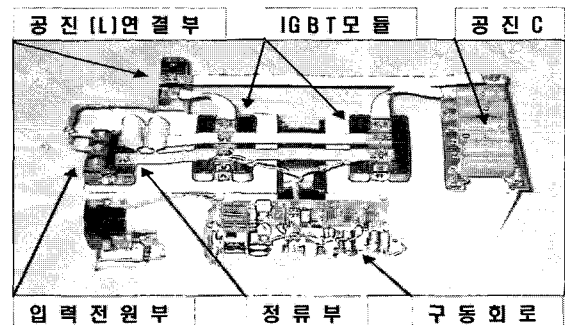
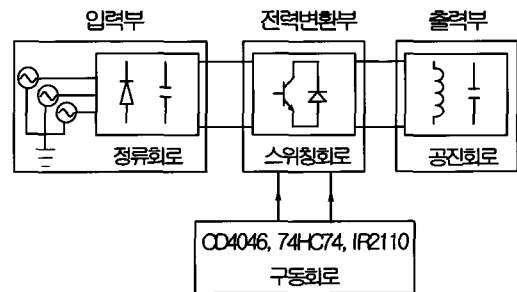


그림 6 인버터 시스템  
Fig. 6 Inverter system

그림 6은 제작한 풀-브릿지 고주파 공진형 인버터 장치와 그 구성도를 보여준다.

시스템 구성은 크게 입력부, 전력변환부, 출력부로 나눌 수 있다. 입력부는 정류회로로 구성되며 주요 소자는 3상 브릿지다이오드와 콘덴서로 브릿지 다이오드 뒷단에 사용되는 콘덴서는 상용주파수의 전원 측에서 보면 복잡한 액티브 PWM제어를 행하지 않고 고효율 특히 선 전류의 정현화 기능을 갖도록 설계하는데 시스템 특성상 120[Hz] 리플성분을 그대로 통과시킬 수 있도록 수  $[\mu F]$  정도의 용량을 사용하였다. 전력변환부는 스위칭회로와 구동회로로 구성된다. 본 실험에서 사용한 스위칭소자는 모듈타입 IGBT이며 구동회로의 주요 소자는 CD4046, 74HC74, IR2110을 사용하였다. 출력부는 공진회로로 구성되며 콘덴서(C)와 부하(L)가 있다. 공진 파라메타로는 용량이 0.1 $[\mu F]$ 인 고내압 콘덴서를 병렬 연결하여 사용하였으며, 부하의 인덕턴스는 50 $[\mu H]$ ~150 $[\mu H]$ 로 조정하였다. 공진 콘덴서는 주파수 특성이 좋은 폴리프로필렌계열을 주로 사용하지만 리플전류를 고려해서 적절한 용량의 것을 사용하였다. 또 부하이자 공진L은 자성스텐레스(발열체), 테프론(절연체), 릿쓰와이어(워크코일)로 특수하게 설계하였다.

5. 실험 및 고찰

그림 7은 시뮬레이션 툴인 IsSpice를 이용하여 작성한 회로이며 그림 8은 작성한 회로의 시뮬레이션 파형이다. 스위치 Q1·Q4와 Q2·Q3가 서로 상보적으로 스위칭하며 암단락을 방지하기 위해 데드타임도 주었다. 공진주파수는 20[kHz]대역으로 설정하였고 스위칭 주파수는 공진주파수 보다 약간 높게 설정하였다.

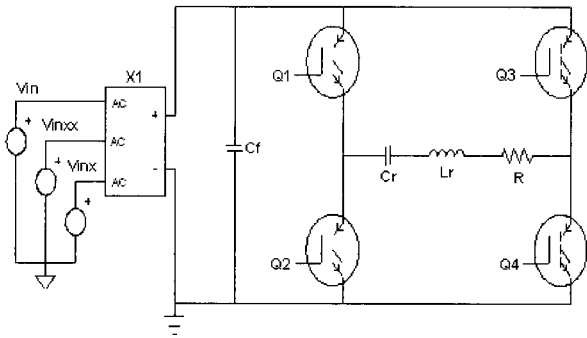


그림 7 시뮬레이션 회로  
Fig. 7 Simulation circuit

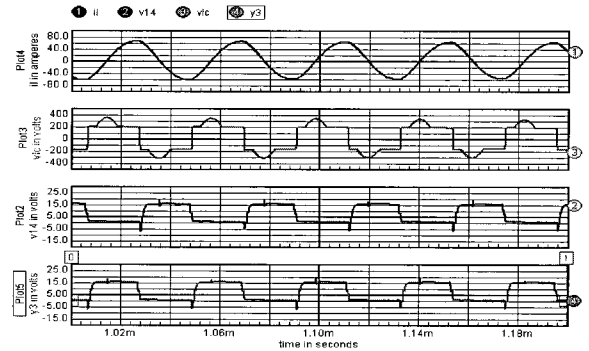


그림 8 시뮬레이션 파형  
Fig. 8 Simulation waveform

그림 9는 풀-브릿지 고주파 공진형 인버터의 스위칭 패턴 및 그에 따른 전압과 전류의 출력파형을 나타낸 것이다. 앞서 표시한 시뮬레이션 파형과 거의 일치함을 알 수 있으며 본 장치의 정상동작상태를 말해준다.

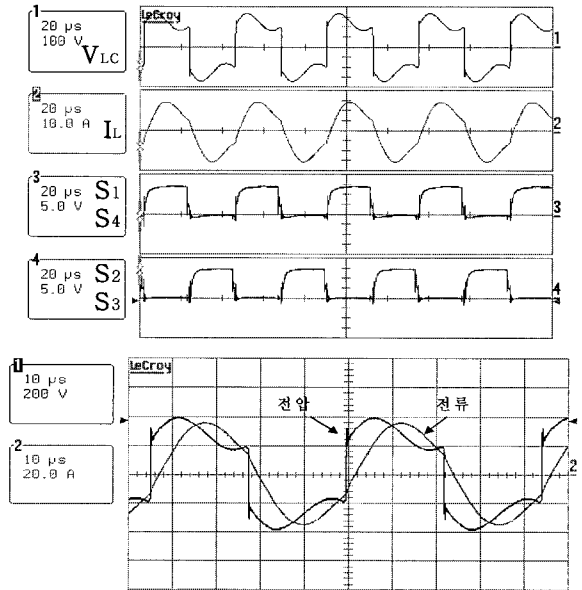


그림 9 출력파형  
Fig. 9 Output waveform

그림 10은 각종 계측기를 부착한 시스템의 전체 실험 세트를 나타낸 것이다. 인버터장치의 입력은 3상 200[V], 17.5[A], 역률 0.9이상 이렇게 5[kW]급으로 셋팅 하였으며 실시간 물보충은 수도직결을 사용하여 수위센서와 솔밸브를 사용하여 제어하였고 라인에 계량기를 설치하여 표 2와 같이 증발량을 측정하였다.

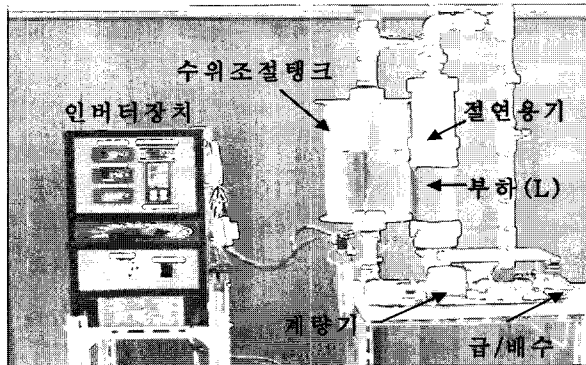


그림 10 전체 실험 세트  
Fig. 10 Experimental set-up

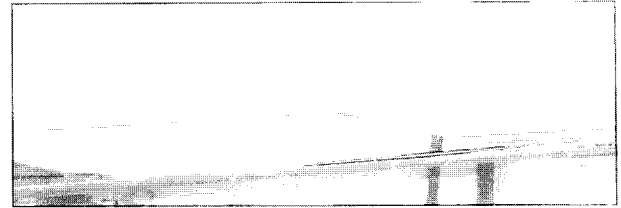


그림 11 100[°C] 수증기  
Fig. 11 100[°C] steam

표 2 수증기 증발 데이터  
Table 2 Steam vaporization data

입력 : 3상 200[V], 17.5[A], 1시간, T <sub>0</sub> =15[°C]		
밸브작동[회]	메타논급[L]	1회 증발량
0	3.10	
1	3.45	0.35
2	3.80	0.35
3	4.05	0.35
4	4.40	0.35
5	4.75	0.35
6	5.10	0.35
7	5.45	0.35
8	5.80	0.35
9	6.15	0.35
10	6.50	0.35
11	6.85	0.35
12	7.20	0.35
13	7.55	0.35
14	7.90	0.35
15	8.25	0.35
16	8.60	0.35
17	8.95	0.35
18	9.30	0.35
19	9.65	0.35
20	10.00	0.35
21	10.35	0.35
22	10.70	0.35
23	11.05	0.35
총 증발량	7.95	

그림 11은 제작한 실험 장치에서 발생하는 100[°C] 수증기의 상태를 보여준다. 표 2에 나타난 데이터처럼 총 7.95[L]의 물이 1시간 동안 수증기로 증발하였으며 열변환효율을 계산하면 약 94[%]로 높게 나타났다. 본 시스템의 또 하나의 특징은 한번에 많은 양의 물을 가열하는 것이 아니라 항상 가열 적정량을 공급 보충하기 때문에 효율을 더욱더 높일 수 있다.

### 6. 결론

본 논문에서는 풀-브릿지 고주파 공진형 인버터를 이용한 유도가열 시스템의 새로운 응용에 대하여 제안하였다. 시뮬레이션 및 실험을 통해 인버터 장치의 정상 작동을 확인 할 수 있었으며 부하자체를 L로 하는 LC공진형을 제안하여 효율을 높일 수 있었다.

유도가열 방식은 연소에 의한 종래의 발열 방식과 비교하여 가열 효율이 높아 경제적이고, 온도에 대한 신속한 응답성으로 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.

현재 산업용으로 주로 사용되는 가습기는 외국에서 수입하고 있는 실정이다. 뿐만 아니라 가격이 고가이며 워밍업 등에 걸리는 시간도 길다. 게다가 동작은 전극식으로 원리상 순수 수증기가 필요한 곳에서는 사용하지 못 하고 있다. 이러한 관점에서 제안한 시스템은 충분히 응용 가능하리라 생각된다.

앞으로 고주파 공진형 인버터의 스위칭손실 및 노이즈 대책, 고성능화에 대한 실증적 연구가 계속 필요하며 특히, 고주파 공진형 인버터의 회로방식 및 제어부의 개발 그리고 유체가열부의 새로운 구조의 제안과 그 열교환 효과에 대해 보다 구체적으로 연구가 진행되어야 할 것이다.

이 논문은 2005년도 호서대학교 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- [1] 정용채, 박병욱, 조관열, "가전제품의 유도가열 기술현황," *전기학회지*, Vol. 50, No. 2, pp. 15-19, 2001년 2월.
- [2] 김용주, 김기환, 신대철, "직렬공진 PWM인버터를 이용한 전자간,접유도가열 열유체 에너지시스템과 그 성능평가", *전력전자학회 논문집*, 2002년 2월.
- [3] 유상봉, 이동윤, 현동석, "유도 가열 인버터의 특성 및 시스템 동향", *전기학회지*, Vol. 50, No. 2, p.22, 2001년 2월.
- [4] 권혁민, 신대철, 김기환, 김용주, "간접유도가열용 고주파공진형 인버터 시스템에 관한 연구", *전력전자학술대회논문집*, pp. 322-325, 2002년 7월.
- [5] 홍순찬, 진희중, 백형래, 원충연, "PSpice를 활용한 전력전자공학", 인터넷판, pp.431-433, 2002년 2월.
- [6] Yong-Ju Kim, Dae-Cheul Shin, Kee-Hwan Kim, Y. Uchihori, Y. Kawamura, "Fluid Heating System using High-Frequency Inverter Based on Electromagnetic Indirect Induction Heating", *ICPE'01*, pp.69-74, 2001, 10.

## 저 자 소 개



### 신대철(申大澈)

1973년 건국대 전기공학과 졸업. 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 졸업(공학박사). 1989년~1990년 나가사키대학 visiting scholar. 1979년~현재 호서대 전기공학과 교수.



### 권혁민(權赫敏)

1999년 호서대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 전기공학과 박사과정.