

유도가열용 고주파 공진형 인버터를 이용한 과열증기 발생장치 개발에 관한 연구

申大澈[†], 權赫敏^{*}, 金基桓^{**}, 金龍柱^{***}

A Study on the Development of Superheater Using High-Frequency Resonant Inverter for Induction Heating

Dae-Cheul Shin, Hyuk-Min Kwon, Kee-Hwan Kim, and Yong-Ju Kim

요 약

본 논문에서는 간접 유도가열 되는 보일러 시스템과 주파수 범위가 20[kHz]에서 50[kHz]사이에서 작동되는 전압형 직렬공진 고주파인버터를 이용하여 열 기체를 발생시키는 전압형 공진형 인버터에 관하여 설명하였다. 얇은 스테인레스 판재가 서로 스폿 용접되어 연결되어있고 기포성 적층형 충전발열체로 특수하게 설계된 유도 가열기는 외부에 워크 코일로 감겨져 있는 불소수지계의 절연용기 안에 삽입되어있다. 이 워크 코일은 공진형인버터와 연결되어 있으며 유도가열기를 통해 흐르는 관 유체를 1단가열부에서 저압의 포화증기를 2단가열부에서 열방사성 증발유체를 생성하는 본 시스템의 성능 및 효율성을 실용적인 측면에서 논의하고 평가 한다.

ABSTRACT

This paper is described the indirect induction heated boiler system and induction heated hot air producer using the voltage-fed series resonant high-frequency inverter which can operate in the frequency range from 20 [kHz] to 50 [kHz]. A specially designed induction heater, which is composed of laminated stainless assembly with many tiny holes and interconnected spot welding points between stainless plates, is inserted into the ceramic type vessel with external working coil. This working coil is connected to the resonant inverter. In the induction heater, it's primary heating section creates low-pressure saturated steam and secondary heating section generates heat distribution evaporating fluid from the turbulence fluid which is flowing through the vessel. The operating performances of this unique appliance in next generation and its effectiveness are evaluated and discussed from the practical point of view.

Key Words : High-Frequency Resonant Inverter Applications, Fluid Heating Appliance, Pipe-line Heating, Electromagnetic Induction-Fluid Heating

1. 서 론

고주파 유도가열은 무공해 에너지절약을 기본으로 하는 전기가열의 한 방법으로 화석연료 사용에 대한 환경보호 및 에너지 절감의 요구에 부응 및 온도에 대한 응답특성을 크게 개선하기 위한 공진형 인버터 및

[†] 교신저자 : 정회원, 호서대 전기공학과 교수

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

* 정회원, 호서대 전기공학과 박사과정

** 정회원, 세명대 전기공학과 조교수

*** 정회원, KIMS 국제변리사

접수일자 : 2003. 8. 25 1차 심사 : 2003. 10. 21

2차 심사 : 2003. 11. 25 심사완료일 : 2003. 11. 28

열 교환 기술을 적용한 새로운 기술이다.

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

전자유도가열 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 작업환경의 개선이 가능하며 온도제어 신뢰성에 뛰어난 본 기술은 IGBT대응의 고주파 인버터를 사용하여 고성능, 고효율화 시스템화가 가능한 고주파 PE(Power Electronics)의 새로운 분야로 주목받고 있다^[1,2].

종래의 사고를 벗어난 전혀 새로운 발상의 전환 하에서 만들어진 고효율의 가열장치로 그 응용분야가 매우 광범위하다. 이러한 전자유도가열의 유효성은 인지도가 매우 높아져 산업설비에서부터 현재 가정용 전자조리기로 대표되는 IH기술로 일반 가정에 널리 보급되어 생활환경을 크게 개선시키기도 하였다.

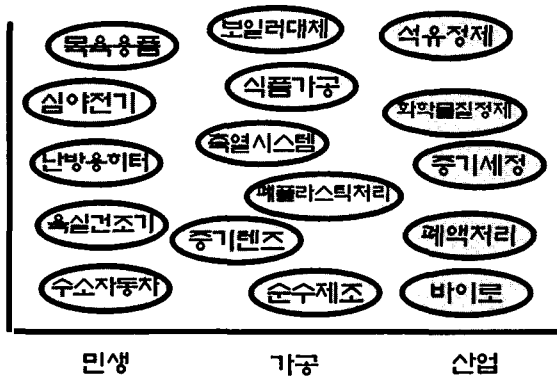


그림 1 시스템의 응용분야
Fig. 1 Application parts of system

본 시스템은 휴대가 간편하면서도 증발기, 온수기, 과열수증기 발생기, 난방기 등의 여러 기기에 응용되어 사용될 수 있으며 식품가공산업 뿐만 아니라 화학 산업, 반도체산업, 의료산업 등에도 폭넓게 응용할 수 있는 장치이다. 또한 기존의 가열장치에서는 얻을 수 없었던 다양한 장점들을 가지고 있다. 응용 가능한 분야를 정리하면 그림 1과 같으며 상온에서 1000[°C]까지의 열원을 사용하는 전 산업에 크게 이용 가능하다.

본 논문은 실제 제작한 1.5[kW]급 하프-브릿지 고주파 공진형 인버터 시스템과 4[kW]급 풀-브릿지 인버

터 시스템의 동작해석, 특성분석 및 본 시스템을 이용한 2단가열 과열증기 발생장치의 개발과 이동유체의 순시가열 시스템의 성능평가 및 그 응용에 대해 논하기로 한다.

2. 유도가열 시스템

2.1 유도가열의 원리

금속가열에 이용되는 고주파가열은 정확하게는 고주파 유도가열이라 칭하는 것으로 전자유도(電磁誘導)작용에 의한 것이며 교류(고주파) 전류가 흐르는 코일(coil) 속에 위치한 금속 등의 도전체는 와전류(Eddy current)손실과 히스테리시스(Hysteresis)손실의 저항에 의하여 전력의 크기만큼 열이 발생한다. 이와 같이 발생하는 열에너지를 이용하여 피가열(금속 또는 도전체)물질을 가열하는 것을 유도가열이라 하며, 특히 고주파 전류를 이용한 것을 고주파 유도가열이라 한다.

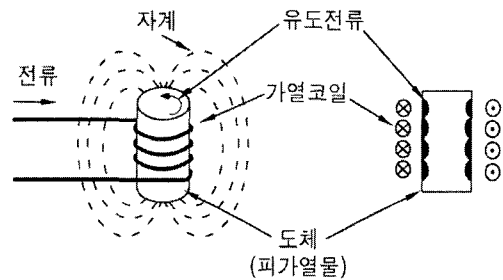


그림 2 유도가열의 원리
Fig. 2 Principal of induction-heating

그림 2와 같이 코일에 교류(고주파)전류를 통하면 코일 주변의 교류전류에 의한 교번자속이 발생하고 이 자계 속에 놓인 도전체에는 전자기 유도현상에 의하여 $e = -Nd\phi/dt$ 의 유기기전력이 발생하게 된다. 이때 발생하는 유기기전력에 의해 생기는 전류를 와전류라 하고 피가열체의 고유저항과 와전류에 의한 전력의 크기만큼 열을 발생하게 된다.

2.2 유도가열 시스템의 구조

그림 3은 유도가열 시스템의 구조를 나타낸다. 절연파이프의 가열용기 내부에 특수발열체인 적층형 규칙충진물을 위크코일로부터 전자유도에 의해 와전류로 발열시킨다. 그리고 절연파이프 용기에 물이나 공기 등의 이동유체를 전자유도 발열체인 적층형 규칙충진물에 접촉시키기에 따라 작은 비열의 규칙충진물을 금속

하게 온도를 올리거나 내릴 수 있도록 하는 새로운 유체가열 시스템이다.

그림 4는 발열체로서 특수하게 설계된 적층형 규칙 충진발열체를 나타낸다. 이 발열체는 금속선이 아닌 금속박판을 이용하기 때문에 고온 가열시 단선, 단락 및 전기절연 성능이 뛰어나며 비열이 작으며 열 용량이 큰 발열부의 구성이 가능하고 유체 통과저항이 극히 작아 출력부의 온도응답특성이 빠르다. 더욱이 정밀 온도제어가 가능하다는 종래의 유체가열장치에서 얻을 수 없었던 뛰어난 특성을 갖는다^[3,4,5].

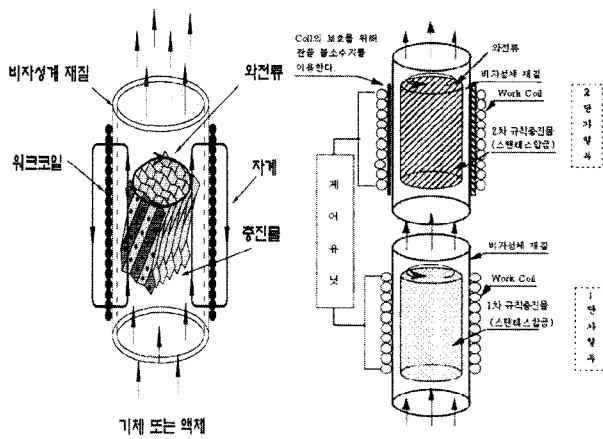


그림 3 유도가열시스템 구조
Fig. 3 Configuration of the IH system

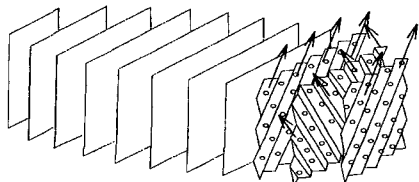
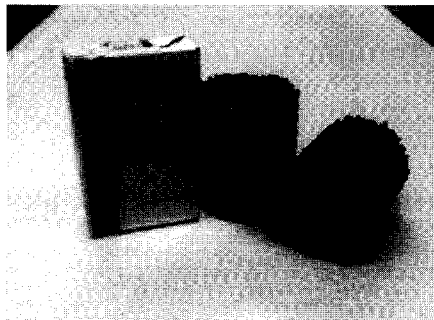


그림 4 적층형 규칙 충진물
Fig. 4 Induction-heated metallic package

특히, 표면적이 크다는 것은 히터로 사용할 경우 전열면적을 많이 사용할 수 있다는 것으로 가열 시에 표면 온도를 낮게 잡을 수 있다는 것을 의미한다. 이렇게 복수로 적층되어 있는 작은 용적의 금속판에 의해 충분한 전열면적을 확보할 수 있으며 금속판 자체가 자기발열을 한다는 특징을 갖고 있다.

3. 고주파 공진형 인버터

그림 5는 고주파 인버터로서 하프-브릿지 직렬부하 공진형 인버터를 나타내는데 이것은 절연파이프의 두께, 내부의 적층형 규칙 충진발열체의 소재 그리고 가열 유체계에 의해 변화하는 인덕턴스와 저항분으로 구성되는 전기회로 모델로 볼 수 있다. 실제로 워킹코일과 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-L회로계로 볼 수 있으므로 직렬부하보상 콘덴서 C는 R-L부하계의 L을 보상하는 최적 동조조건 하에서 사용 가능하다.

R-L부하계의 R이 IGBT의 도통저항에 비해 비교적 큰 경우에는 직렬공진회로계가, R-L부하계의 R이 IGBT의 도통저항에 비해 작은 경우에는 직렬 인덕턴스를 갖는 병렬공진회로가 효율적 측면에서 유리하다고 할 수 있다^[6,7,8].

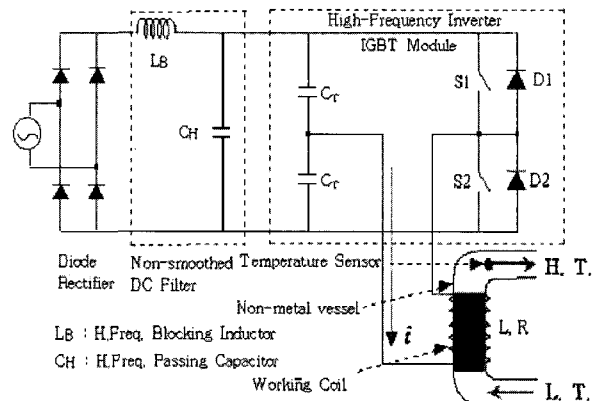


그림 5 하프-브릿지 공진형 인버터
Fig. 5 Half-bridge resonant inverter

대전력 스위칭 회로에서는 위상부(위쪽 IGBT)와 아래상(아래쪽 IGBT)의 암쇼트에 의해서 관통전류가 발생하게 된다. 관통전류가 발생하는 원인은 푸쉬-풀 드라이빙(Push-Full driving)시 소자의 턴 오프 딜레이(Turn off delay)가 발생하여 위, 아래상이 순간적으로 동시에 온 되기 때문이다. 그래서 보통 위상과 아래상의 스위칭 사이에 수[μ S]의 불감시간대를 고의로 발생시키게 되며 이 불감시간을 데드타임이라고 한다. 대개 IGBT의 경우에는 2~3[μ S]정도를 사용하며, 스위칭 속도가 좀더 빠른 FET의 경우에는 1~1.5[μ S]정도를 사용한다.

표 1은 스위치의 가능한 스위칭 상태와 각 경우에서의 인버터 출력전압을 보여준다.

표 1 스위칭 상태표
Table 1 Switching condition diagram

S1	S2	제어가능성	v_o
on	on	불가(KVL 위배)	-
on	off	가능	$V_{DC}/2$
off	on	가능	$-V_{DC}/2$
off	off	가능	$V_{DC}/2(i_o < 0)$ $-V_{DC}/2(i_o > 0)$

스위치 S1과 S2가 동시에 온 되면 직류 입력전압이 단락되므로 각 스위치는 서로 상보적으로 스위칭하며, S1이 온 되면 $V_{DC}/2$ 의 전압이, S2가 온 되면 $-V_{DC}/2$ 의 전압이 각각 부하에 인가된다. 또한 S1과 S2가 동시에 오프된 상태가 허용이 되는데 이 경우 부하전압은 부하전류의 방향에 따라 정해진다.

즉 $i_o > 0$ 이면 D_2 가 온 되어 $v_o = -V_{DC}/2$ 가 되고 $i_o < 0$ 이면 D_1 이 온 되어 $v_o = V_{DC}/2$ 가 된다.

그림 6은 고주파 인버터로서 풀-브릿지 직렬부하 공진형 인버터를 나타낸다. 단상 풀-브릿지 인버터의 실제 회로구성은 서로 독립적으로 스위칭 할 수 있는 2개의 폴로 이루어진다. 각 폴의 구성과 동작은 단상 하

프-브릿지 인버터에서와 같게된다.

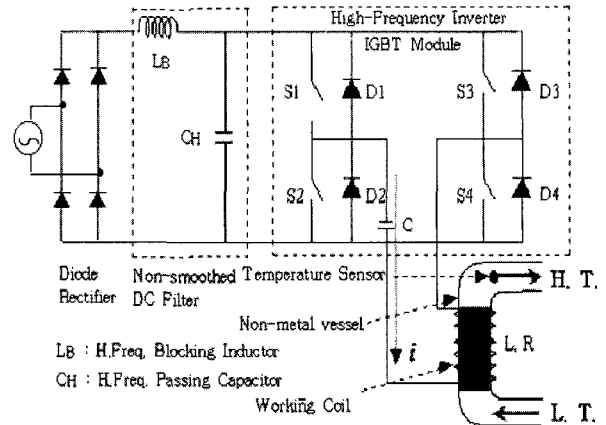


그림 6 풀-브릿지 공진형 인버터
Fig. 6 Full-bridge resonant inverter

4. 실험 및 고찰

본 실험에서 사용한 IGBT모듈은 후지사의 2MB I100L-120제품으로 내압이 1200[V], 100[A]이다. 또한 1차측의 파라메타로 용량이 0.1[μ F]인 콘덴서를 여러 개 사용하였으며, 코일 값인 인덕턴스는 100[μ H] ~ 200[μ H]으로 조정하였다.

공진 콘덴서는 주파수 특성이 좋은 폴리프로필렌계 열을 주로 사용하지만 리플전류를 고려해서 적절한 용량의 것을 사용하였다. 브릿지 다이오드 뒷단에 사용되는 LC필터는 상용주파수의 전원 측에서 보면 복잡한 액티브 PWM제어를 행하지 않고 고효율 특히 선전류의 정현파화 기능을 갖도록 설계하는데 소형화로 구성된 시스템 특성상 120[Hz] 리플성분을 그대로 통과시킬 수 있도록 작은 용량의 필터를 선정하였다. 또한 필터선정시 역률 제어특성을 고려하여 통상 LC필터로 사용되는 인덕턴스는 수십 [μ H], 콘덴서는 수 [μ F]정도의 용량을 사용하였다.

그림 7은 하프-브릿지 인버터에서 스위칭소자의 게이트단에 인가되는 전압형 직렬공진 스위칭펄스 패턴을 나타낸 것이다. 스위치 S1과 S2는 180° 위상차를 두고 서로 상보적으로 온/오프한다.

그림 8은 하프-브릿지 인버터의 전압 및 전류의 파형을 나타낸 것이다.



그림 7 하프-브릿지 스위칭패턴
Fig. 7 Switching pattern of half-bridge

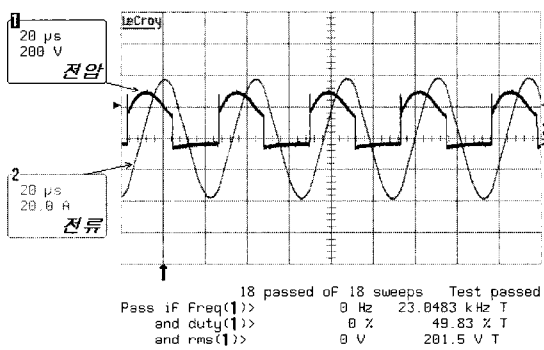


그림 8 하프-브릿지 인버터의 출력전압 및 전류파형
Fig. 8 Wave-forms of output voltage and current of half-bridge inverter

그림 9는 풀-브릿지 인버터에서 스위칭소자의 게이트단에 인가되는 펄스 패턴을 나타낸 것으로 스위치 S1, S4가 동시에 온, 오프 되고 스위치 S2, S3는 S1, S4와 180° 위상차를 두고 동시에 온, 오프 된다.

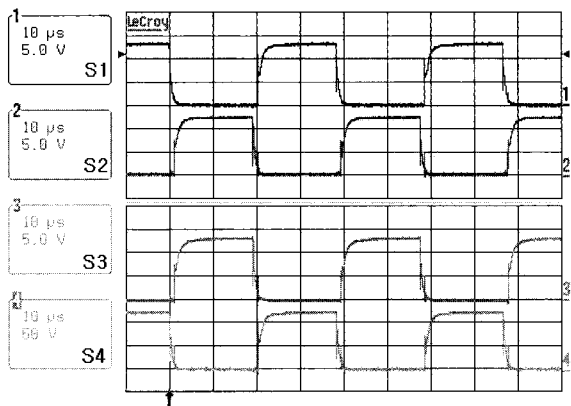


그림 9 풀-브릿지 스위칭패턴
Fig. 9 Switching pattern of full-bridge

그림 10은 각 폴의 폴전압이 구형파이고 두 폴전압이 180° 위상차가 되도록 제어할 때, 인덕터 L을 부하로 갖는 단상 풀-브릿지 인버터의 전압 및 전류 파형을 나타낸다. 이때 인버터의 출력전압 $V_{(out)}$ 은 그림 10과 같이 크기가 $V_{(DC)}$ 인 구형파가 된다. 인덕터 L에 구형파의 전압이 인가되면 부하전류 $I_{(out)}$ 은 $V_{(out)} = V_{(DC)}$ 인 동안은 증가, $V_{(out)} = -V_{(DC)}$ 인 동안은 감소된다^[8].

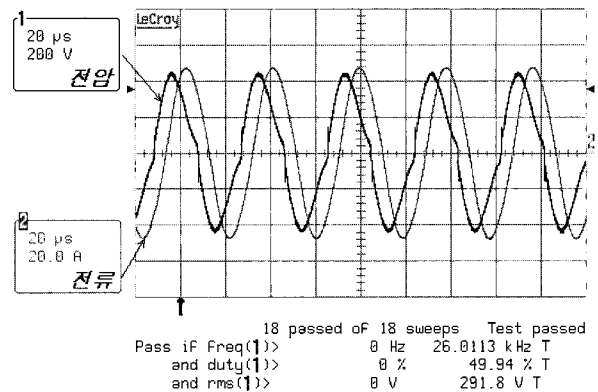


그림 10 풀-브릿지 인버터의 출력전압 및 전류 파형
Fig. 10 Wave-forms of output voltage and current of full-bridge inverter

표 2 하프·풀-브릿지의 입출력 특성
Table 2 Input and output characteristics of half and full-brid

방식	특성	입 력			출 력(L-C)		
		[V]	[A]	[Hz]	[V]	[A]	[kHz]
하프-브릿지		220	6	60	200	12	23
풀-브릿지		200	20	60	290	40	26

이상의 시험 조건 하에서 설계된 하프와 풀-브릿지의 입·출력관계를 살펴보면 다음 표 2와 같다.

그림 11은 2단으로 구성된 유도가열 과열기 시스템 구성도로 1차 보일러 시스템 및 2차 과열 증기 발생장치이다. 그림 12는 실제 제작한 실험장치를 나타낸다.

1차 가열부는 풀-브릿지 인버터를 사용하였으며 상온의 물을 100[°C]의 수증기 상태로 만드는 역할을 한다. 2차 가열부는 하프-브릿지 인버터로 구성하였으며 1차측으로부터 유입되는 증기를 다시 가열하여 200 [°C]이상의 과열증기를 발생시킨다.

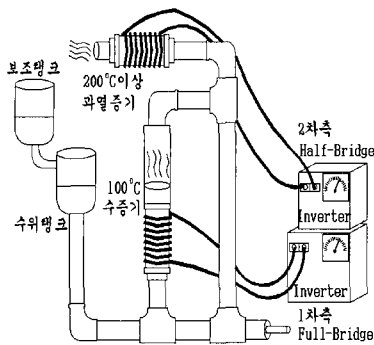


그림 11 제안한 시스템 구성도
Fig. 11 Structure of proposed system

1차측의 보일러부에는 항상 적정량의 물이 공급되어야 하므로 본 실험에서는 수위조절탱크 및 보조탱크를 설치하여 원활한 물의 공급을 하였으며 수위센서와 밸브를 이용한 수도직결도 가능하다.

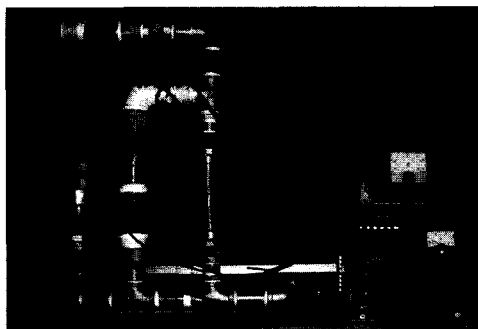


그림 12 과열기 시스템 실험장치
Fig. 12 Experimental set up superheater system

5. 결론

고주파 공진형 인버터를 이용한 유체 가열방식은 유도가열에 있어 새로운 가열방식으로 기대가 되며 충분한 열원으로써 가능성을 확인 할 수 있었다. 유도가열을 이용한 유체가열은 안정성이 뛰어나며, 연소에 따른 배출가스등의 오염물질의 발생이 없어 위생적이며 청결하다는 우수한 장점을 가짐을 알 수 있었다.

본 연구에서 제작한 과열증기 발생 시스템에서 1차와 2차 각 인버터의 입·출력 전압 및 전류 특성의 안정성을 확인하였다.

유도가열에 의한 유체가열방식은 절연체 용기 내에 특수 스텐레스 합금의 박판 적층형 규칙 충전발열체를

수납하여 용기 외부의 고주파 공진형인버터 접속의 워킹코일로부터 비접촉 상태로 전자유도 와전류를 구조체에 흘림으로서 발열하게 된다. 이러한 전자유도가열 시스템은 열 교환 효율이 높고 고정도의 온도제어와 순시가열이 가능한데 본 시스템 장치는 비접촉 방식으로 히터의 신뢰성이 높으며 스케일 부착에 따른 유체 품질의 저하가 없으며 시스템 전체를 소형화 할 수 있는 특징을 가지고 있다^[9].

이러한 유도가열 방식이 연소에 의한 종래의 발열 방식과 비교하여 가열 효율이 높아 경제적이고, 온도에 대한 신속한 응답성으로 인하여 시스템의 워밍업(Warming Up) 등에 수반되는 열 손실을 줄일 수 있으며, 출력온도 제어의 용이성 및 안전성이 뛰어나며, 배출가스 등의 오염 물질의 발생이 없어 위생적이며 청결하다는 우수한 장점을 갖는다고 할 수 있다.

앞으로 시스템의 출력 제어를 위한 컨트롤러 및 보호회로 설계와 충전 발열체의 재료에 대한 연구가 필요하며, 유도가열의 폭넓은 응용분야에 대한 조사가 진행되어져야 한다.

참고 문헌

- [1] 内堀, 川村, 中岡, “アクティブフィルタ機能付き高周波インバータを用いた電子誘導熱交換器”, 電気學會 半導體電力變換研究會(SPC), pp. 73~82, 1994年 6月.
- [2] 内堀, 川村, 金龍柱, 中岡, “オートチューニングPID制御インバータによるデュアルルックス構造形電子誘導體液加熱システム”, 平成6年電気關係學會完濟支部聯合大會GS-1, 1994年 11月.
- [3] 石間, “誘導加熱用インバータの新型マッチング技術”, 鳥田理化技報, Vol. 3, No. 1, pp. 29~31, 1993年 1月.
- [4] Y J KIM, D C SHIN, “Soft-Switched PWM DC-DC Converter with Quasi Resonant-Poles and Parasitic Components of High-Voltage Transformer”, 전력전자학회 논문지, Vol. 4, No. 4, pp. 384~395, 1999년 8월.
- [5] Y. Uchihori, Y. Kawamura, Y. J. Kim and M Nakaoka, New Induction Heated Fluid Energy Conversion Processing Appliance incorporating Auto tuning PID control based PWM Resonant IGBT Inverter with Sensorless Power Factor Correction”, Proceedings of the IEEE power Electronics Specialist Conference, pp. 1191~1197, 1995, June.
- [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”, 日本電気學會全國大會, pp. 4~124. 1999年 3月.
- [7] 김용주, 김기환, 신대철, “직렬공진 PWM인버터를 이용

한 전자간,접유도가열 열유체 에너지시스템과 그 성능평가”, *전력전자학회 논문집*, 2002년 2월.

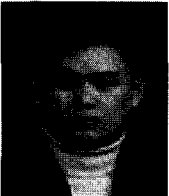
- [8] 노의철, 정규범, 최남섭, “전력전자공학”, pp. 361~370, 2002년 1월.
- [9] 권혁민, 신대철, 김기환, 김용주, “간접유도가열용 고주파 공진형 인버터 시스템에 관한 연구”, *전력전자학술대회 논문집*, pp. 322~325, 2002년 7월.

저 자 소 개



신대철(申大澈)

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



권혁민(權赫敏)

1999년 호서대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



김기환(金基桓)

1983년 건국대 전기공학과 졸업. 1990년 독일 Siegen Univ. 전기전자공학과 졸업(Dipl.-ing.). 1995년 동 대학원 졸업(Dr.-ing.). 1990년~1996년 Siegen Univ. Techn. Assit., 1997년~현재 세명대 전기전자공학부 조교수. 당 학회 총무이사.



김용주(金龍柱)

1984년 건국대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 Univ. of Kobe(공학박). 1995년 일본전자통신학회 국제학술조사위원. 1996년 SDI 선임연구원. 현재 KIMS 국제 변리사.