

새로운 열교환 방식을 이용한 유도가열 과열증기 발생장치 개발

설용태¹, 이의용², 권혁민^{2*}
¹호서대학교 전기공학과, ²(주)에이티에스

Development of induction heating superheater system using new heat exchanging method

Sul, Yong Tae¹, Lee, Eui Yong² and Kwon, Hyuk Min^{2*}

¹Electrical Engineering Hoseo University, ²ATS Co., Ltd

요약 본 논문에서는 공진형 유도가열기를 이용한 2단 직렬 부하형 유도가열 과열증기 발생장치를 제안하였다. 발열방식은 외부의 가열코일로부터 특수 합금 발열체에 비접촉 상태로 전자유도 와전류를 구조체에 흐르게 하였다. 인버터는 풀-브리지 고주파 직렬 부하 공진형이며, LC 공진 설계에서 부하자체를 인덕터로 선정하여 효율을 최대화 하였다. 개발된 장치는 전자유도가열 발열체와 유체이동에 의한 새로운 열교환 방식으로 일체의 연소과정 없이 기체, 액체 및 증발체 등을 상온에서 고온에 이르기까지 고정도의 가열이 가능하다.

Abstract Two step serial load induction superheater has been proposed using resonance type induction heat method in this paper. Heat method is a type of flowing the electron induction and current to special alloy heater in body from external heat coil with non-contact method. Inverter was a full bridge serial load resonance type and inductor was used as load in LC resonance design to maximize the efficiency. The developed system is a new heat exchanging method combined with electromagnetic induction heater and fluid movement, and very accurate to control of heating the gas, liquid and evaporated mass, so on without combustion process.

Key Words : Induction Heating, Resonant, Inverter, Superheater

1. 서론

최근 석유나 제지의 건조공정이나, 폐기물 건조, 조리, 살균 등 여러 산업분야에서 100[°C]이상의 증기인 과열증기를 활용하는 신기술 공정이 다양해지고 있다. 이러한 과열증기를 기존과 같이 화석연료를 연소시켜 발생할 경우에는 환경오염과 고유가에 따른 비용 등의 문제가 발생하여 새로운 방식의 과열증기 발생에 대한 연구가 활발해지고 있다[1].

그 중에서 온도제어 신뢰성에 뛰어난 특성을 보이는 전자유도 유체 가열기술은 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)를 이용한 고주파 인버터를 사용하여 고성능, 고효율의 시스템화가 가능한 전력전자의 새로운 분야로 주목받고 있다. 이러한 고주파 인버터는 상용교류·다이

오드정류 비평활 직류로부터 수[kHz]~수[MHz]의 고주파 교류를 발생시킬 수 있다. 고주파 인버터는 모듈타입의 IGBT를 사용한 전압형 직렬부하 고주파 공진형 인버터를 도입하여 부하로서 고주파자속을 발생시키는 유도자위크코일, 즉 이동유체를 가열시키기 위해 와전류를 이용하는 새로운 방법의 설계로 넓은 전열면적의 적층형 발열체를 사용한다. 이러한 전기에너지의 열교환 시스템은 절연체의 파이프내부에 새롭게 설계된 유도발열체 구조물을 통과하는 이동유체의 난류를 이용하여 유체를 내부로부터 가열하는 방식이다[2,3].

본 논문에서는 절연체 용기 내에 전도성의 특수 합금 발열체부하를 수납하여 용기 외부의 고주파 공진형 인버터 접속의 가열코일로부터 비접촉 상태로 전자유도 와전류를 구조체에 흘림으로서 발열하게 되는 새로운 유체가

본 논문은 호서대학교 벤처산업전소사업 연구과제로 수행되었음.

*교신저자 : 권혁민(hmkwon@at-s.co.kr)

접수일 09년 03월 04일

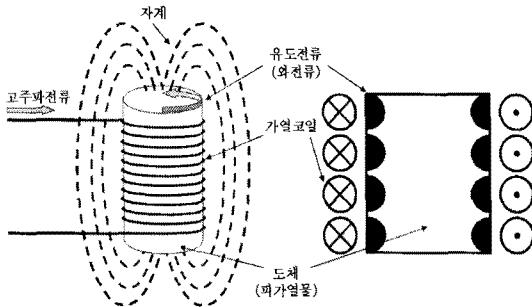
수정일 09년 04월 17일

게재확정일 09년 04년 22일

열방식을 제안하였다. 제안한 장치는 전자유도가열 발열체와 유체이동에 의한 새로운 열교환 방식으로 파이프라인 시스템에 있어서 여러 가지의 기체, 액체 및 증발체 등을 상온에서 500[°C]이상의 고온에 이르기까지 고정도의 가열이 가능한 방법으로 일체의 연소과정이 없다는 점에서 작업환경의 개선이 가능하다. 설계한 시스템 인버터는 스위칭주파수 20[kHz]대역에서 작동되는 풀-브리지 고주파 직렬 부하 공진형이며 수증기 발생의 1단가열부와 과열증기 발생의 2단가열부로 구성하였으며 인덕터와 커패시터 공진 설계에서 부하자체를 인덕터로 설계하여 효율을 최대화 하였다.

2. 유도가열의 원리

유도가열(Induction Heating)은 1831년 Michael Faraday의 전자 유도현상을 이용한 것으로 가열 코일에 고주파 교류 전류가 흐를 때 발생하는 고주파 교류 자계 중에 도전성의 금속 물질을 위치시키면 금속 물질의 표면에 유도 와전류(Eddy Current)가 발생하여 금속의 표피 저항에 의한 주울(Joule)열이 발생하게 되는 원리이다.



[그림 1] 유도가열의 원리

그림 1과 같이 가열하고자 하는 도체에 코일을 감고 이 코일에 고주파 교류 전류를 흘리면 도체 내에는 고주파 자속이 발생한다. 이 자속은 전류의 교번에 의해 히스테리 루프를 그리게 되며, 이 현상이 발생하면 자성체는 발열하여 온도를 상승시키는데 이것을 히스테리시스 손실(Hysteresis Loss)이라 한다. 이 손실의 크기는 자성체에 따라 다르지만 면적이 클수록 손실이 크며 이 손실은 다음 식(1)과 같다.

$$P_h = \eta f B_m^{1.5} V [W] \quad (1)$$

여기서, η : Hysteresis 계수, f : 주파수, B_m : 최대자속 밀도 [T], V : 철심의 체적[m³]이다.

이 도체 내에는 전자유도 작용에 의하여 코일 내에 있는 금속은 변압기의 2차 권선에 기전력이 발생하는 것과 같이 유도전류가 발생하여 와전류가 흐르게 되며, 이 와전류는 금속의 단면 각부에 균일하게 흐르는 것이 아니고 금속의 표면에 집중적으로 흐르게 되며 내부로 갈수록 지수 함수적으로 감소하게 된다. 이 와전류가 임의의 저항을 가진 도체 내를 흐르면 그 도체 내에 주울 열이 발생하며 이것을 와전류 손실(Eddy Current Loss)라고 하며 다음 식 (2)와 같다.

$$P_e = \frac{(\pi f a B_m)^2 V}{4\rho} [W] \quad (2)$$

여기서, a : 철심의 반지름[m], f : 주파수[Hz], B_m : 최대자속밀도[T], ρ : 저항률[Ω/m], V : 철심의 체적[m³]이다.

와전류는 금속의 표면에 집중하므로 전류의 침투깊이(Skin Depth)는 주파수에 반비례함으로써 금속의 표면가열을 할 수 있으며, 식 (3)과 같다.

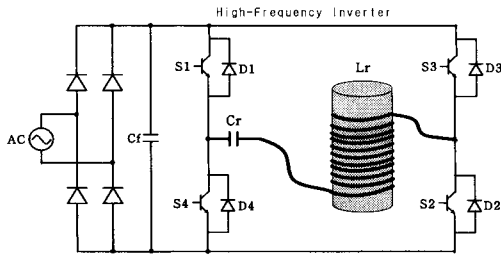
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} [m] \quad (3)$$

여기서, δ : 침투깊이[m], σ : 전도도[U/m], μ : 투자율[H/m]이다.

원주 금속 내를 흐르는 유도전류는 표면에 가장 강하게 발생하고 내부로 갈수록 지수 함수적으로 감소하는 것이 특징으로, 이러한 경향은 전원의 주파수가 높을수록 현저하다. 이러한 열의 대부분은 위의 식으로 표현되는 δ 내에 분포하게 되며 δ 는 유도가열의 여러 응용분야에서 인버터 동작 주파수를 결정하는 주요한 요소가 된다 [4.5].

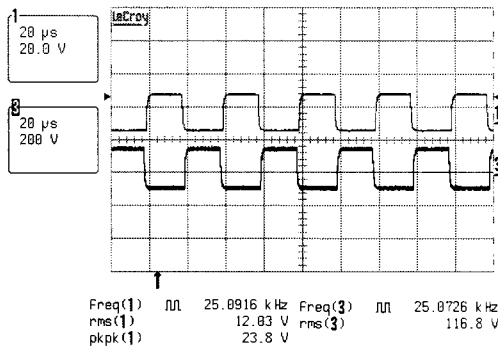
3. 고주파 공진형 인버터

그림 2는 고주파인버터로서 풀-브리지 전압형 직렬부하 공진형 인버터의 전기회로 모델이다. 이것은 절연파이프의 두께, 내부의 공진발열체의 소재 그리고 가열 유체계에 의해 변화하는 인덕턴스와 저항분으로 구성된다.



[그림 2] 풀-브리지 공진형 인버터 회로도

위 그림 2와 같이 독립적으로 동작할 수 있는 2개의 레그로 구성된 단상 풀-브리지 인버터에서 각 레그의 전압이 구형파이면서 서로 180° 위상차가 되도록 제어하면 출력전압도 구형파가 된다. 출력전압을 구형파로 제어할 경우, 실제 회로에서 스위치 S₁, S₂와 S₃, S₄는 동시에 온·오프되는 스위치 쌍처럼 동작하며 각 스위치 쌍의 통류율(duty ratio) D는 50[%]가 된다. 그림 3은 스위칭 주파수의 출력파형을 나타낸 것이다.

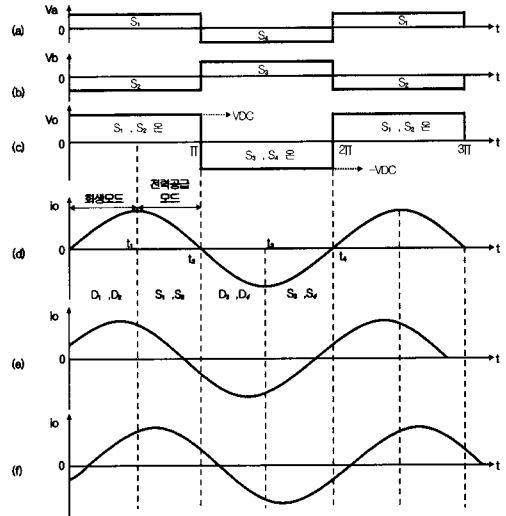


[그림 3] 스위칭 주파수 출력파형

대 전력 스위칭 회로에서는 상부(위쪽 IGBT)와 하부(아래쪽 IGBT)의 암쇼트에 의해서 관통전류가 발생하게 된다. 관통전류가 발생하는 원인은 푸쉬-풀 구동(push-full driving)시 소자의 턴 오프 지연(turn off delay)이 발생하여 위, 아래상이 순간적으로 동시에 온 되기 때문이다. 따라서 보통 위상과 아래상의 스위칭 사이에 수 [μs]의 불감시간대(dead time)를 고의로 발생시키게 된다. 대개 IGBT의 경우에는 2~3[μs]정도를 사용하며, 스위칭 속도가 좀 더 빠른 MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)의 경우에는 1~1.5[μs]정도를 사용한다.

전압형 인버터로 구성된 유도가열 장치는 출력을 조절하기 위해 스위칭 주파수보다 높은 주파수로 스위칭하여 인가전압에 따른 회로내의 전류위상 지연되어 상대적으로

로 무효전력의 양이 가감된다. 부하를 공진형으로 구성하여 공진주파수보다 높은 주파수로 스위칭하면 자동적으로 턴-온시에 영전압 스위칭(Zero Voltage Switching)을 구현할 수 있는 장점이 있다. 그러나 스위칭 주파수가 높아질수록 손실이 증가하므로 보조회로를 사용하거나 스위칭 제어 방식을 조정하여 손실을 저감시킬 수 있다[5].

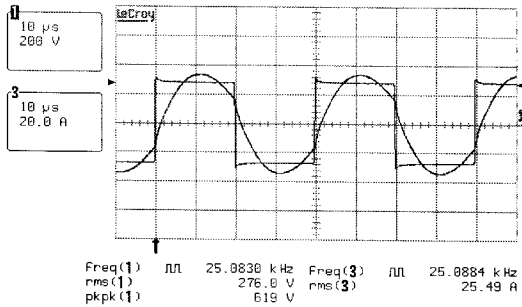


[그림 4] 풀-브리지 인버터의 동작파형

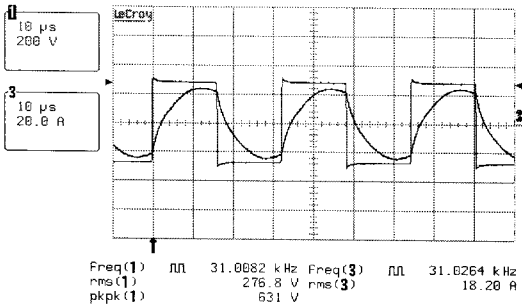
그림 4는 RLC를 부하로 갖는 단상 풀-브리지 공진형 인버터의 각부 파형을 나타낸다. 그림에서 파형 (a)와 (b)는 스위칭 상태를 나타내며, 파형 (c)는 출력전압을 나타낸다. 그리고 파형 (d), (e), (f)는 출력전류 파형을 나타낸 것으로 (d)는 공진주파수와 스위칭주파수를 같게 할 경우, (e)는 스위칭주파수를 공진주파수 보다 낮게 할 경우, (f)는 스위칭주파수를 공진주파수 보다 높게 할 경우의 파형이다[6].

본 연구에서는 영전압 스위칭 동작을 얻고 안정적인 스위칭 동작이 이루어지도록 공진점을 약간 상회하도록 스위칭 주파수를 선정하였다. 인버터는 영전압 스위칭에 의해 인버터의 스위칭 손실을 줄일 수 있었다.

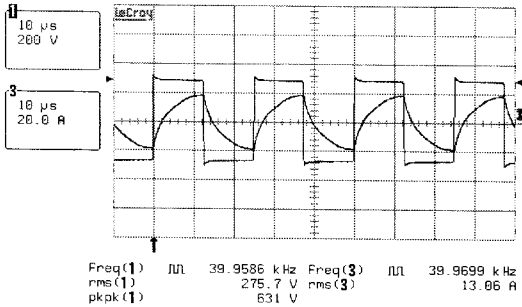
그림 5는 스위칭 주파수에 따른 출력파형을 나타낸 것이다. 실험조건은 입력 전압 3상 200[V]이고, 공진 파라메타로 커패시터와 인덕터값을 고정시킨 상태이며 스위칭 주파수에 따른 전압과 전류 파형을 나타낸 것이다. 그림 6은 주파수에 따른 출력 값을 그래프로 나타낸 것이다.



(a) 주파수 25[kHz]

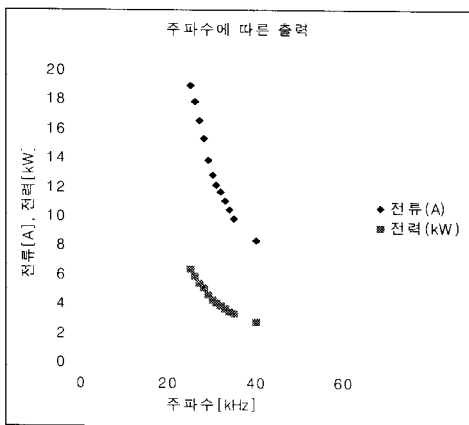


(b) 주파수 31[kHz]



(c) 주파수 40[kHz]

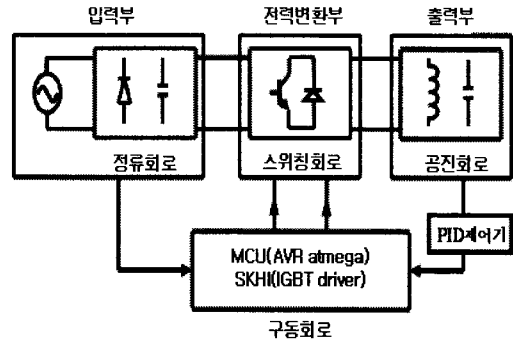
[그림 5] 스위칭 주파수에 따른 출력파형



[그림 6] 주파수에 따른 출력값

4. 과열증기 발생 시스템의 구성

본 논문에서 제안된 유도가열용 인버터는 그림 7과 같이 구성하였다.



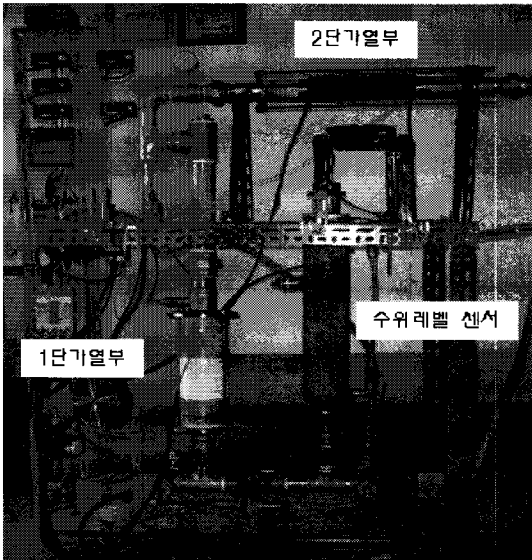
[그림 7] 제안한 인버터 시스템의 블록도

시스템 구성은 크게 입력부, 전력변환부, 출력부로 나눌 수 있다. 입력부는 정류회로로 구성되며 주요 소자는 브리지다이오드와 커패시터이다. 전력변환부는 스위칭소자와 스너버회로, 구동회로로 구성된다.

스위칭소자는 모듈타입으로 된 IGBT이며 구동회로는 보호회로가 내장된 전용 드라이버를 사용하였고, 컨트롤러는 AVR atmega 시리즈를 사용하였다. 그리고 출력부는 공진회로로 구성되며 커패시터(C)와 부하 인덕터(L)가 있다.

본 논문에서 공진 파라메타로 공진탱크의 커패시턴스는 용량이 0.1[μF]인 고 내압 커패시터 1~10개를 병렬 연결하여 사용하였으며, 부하의 인덕턴스는 50~150[μH]로 조정하였다. 공진 커패시터는 주파수 특성이 좋은 폴리프로필렌계열을 주로 사용하지만 리플전류를 고려해서 적절한 용량의 것을 사용하였다. 또 부하이자 공진 인덕터는 1차 측은 자성 스테인레스(발열체), 테프론(절연체), 리츠선(Litz Wire-가열코일)으로, 2차 측은 카본세라믹(발열체), 세라믹(절연체), 리츠선(가열코일)으로 특수하게 설계하였다.

가열코일에는 20[kHz]이상의 고주파 전류가 흐르기 때문에 고주파 특성이 뛰어난 리츠선이 사용되고 있다. 리츠선은 지름 0.1[mm]정도의 가는 에나멜선 또는 폴리우레탄선 등을 수십가닥 내지 수백가닥을 각각 1가닥씩 특수한 절연체로 도포하거나 견사(絹絲)로 감은 전선으로 표면적을 물리적으로 크게 하기 위한 것이며, 전기적으로는 표피 효과를 작게 하여 주파수 특성을 개선함으로써 노이즈나 고주파 전류에 의한 손실을 저감할 수 있다.

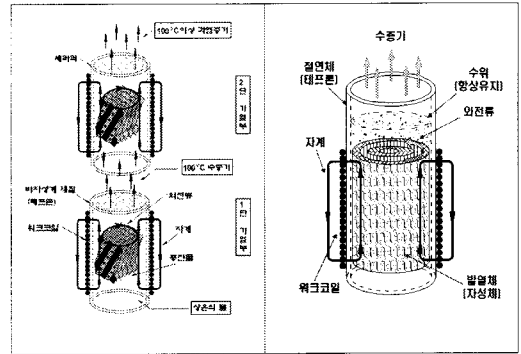


[그림 8] 2단 가열 과열증기 발생장치

유도가열방식 과열증기 발생장치는 그림 8과 같이 1단 가열부와 2단 가열부 구성의 2단으로 설계하였다. 1단 가열부는 물을 가열하여 100[°C] 수증기를 발생시킨다. 다시 이 증기는 단열치리가 되어 있는 배관을 통하여 2단 가열부를 통과하면서 추가 가열되면 여기서 습공기인 과열증기로 변하여 출구로 배출된다.

그림 9는 작은 비열의 발열체를 급속하게 온도를 올릴 수 있는 새로운 유체가열 시스템의 구조이다. 이 장치의 구조는 절연 파이프내의 가열용기 내부에 특수하게 설계된 발열체부하를 가열코일로부터 전자유도에 의해 와전류로 발열시켜, 절연파이프 용기내의 물이나 공기 등의 이동유체를 전자유도 발열체인 부하에 접촉시킨다.

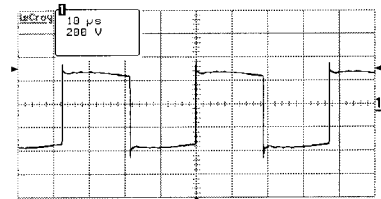
규칙 충진물을 이용한 열교환기는 기존의 열교환기에 비해 단위체적당 전열면적이 매우 크고, 규칙충진물 내부에 전열촉진제를 설치하여 유동의 혼합 및 난류를 생성함으로써 높은 열전달 특성을 얻을 수 있는 장점을 지니고 있다. 이와 같은 장점으로 인해 규칙 충진물을 사용하는 열교환기는 피가열 유체와 발열체와의 온도차를 줄일 수 있고 발열체의 과도한 온도상승으로 인한 파손을 방지할 수 있으며, 작은 열용량으로 급속한 가열이 가능한 장점이 있다.



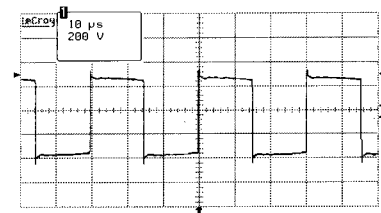
[그림 9] 2단 가열 시스템의 구조

1차측 절연체의 재질은 100[°C]의 물과 수증기에 견디고 가공성이 우수한 테프론을 사용하였으며, 압력을 고려하여 2차측과 같이 세라믹 가공도 가능하다. 2차측 발열체는 카본세라믹으로 하였다. 일반 금속의 경우 초고온가열시 큐리점 관계로 사용 불가능하나 카본세라믹의 경우 1,000[°C]이상에서 사용가능하다. 그리고 2차측 절연체의 재질은 세라믹(알루미나 99.8%)으로 사용온도가 1,800[°C]까지이다.

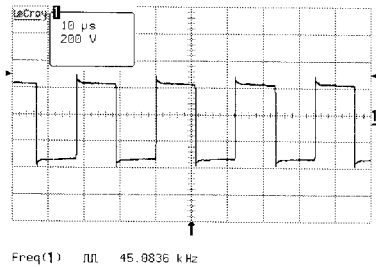
2단가열부의 출구에는 온도센서가 장착되어 있어 출구의 과열증기 온도를 읽을 수 있으며, 온도제어기를 통한 PID(Proportional-Integral-Derivative)제어로 공진 인버터의 출력을 제어하여 과열증기의 온도를 정밀하게 제어할 수가 있다. 각각의 가열부에는 공진형인버터가 연결되어 있으며, 1차 수증기를 발생시키는 가열부에는 역시 수위조절기가 장착되어 항상 일정 수위 이상 유지되도록 하였다.



(a) 100% 출력



(b) 50% 출력



(c) 10[%] 출력

[그림 10] PID제어기에 의한 주파수 출력파형

그림 10은 PID 온도컨트롤러의 제어신호에 따른 주파수 출력파형을 나타낸다. 제어기의 4~20[mA]전류신호는 전압값으로 환산되어 MCU(AVR atmega)의 포텐서메타를 조정하여 100[%]~0[%] 출력을 제어한다.

5. 결론

본 연구에서는 전자유도가열 발열체와 유체이동에 의한 새로운 열 교환 방식으로 여러 가지 기체, 액체 및 증발체를 고온까지 가열을 할 수 있는 장치를 제안하였다. 개발된 장치는 일체의 연소 과정이 없는 파이프라인 시스템을 사용하였고, 고주파 인버터는 모듈타입의 IGBT를 사용한 직렬 공진형 인버터를 도입하였다. 그리고 부하로서 이동유체를 가열시키기 위해 고주파 자속을 발생시키는 유도자 가열코일을 사용하였다.

개발된 장치는 일체의 압력을 가하지 않고 500[°C] 이상의 과열증기를 단시간에 발생시킬 수 있는 장점을 가지고 있으며, 인덕터와 커패시터 공진에 있어서 부하 자체를 인덕터로 사용하여 효율을 높일 수 있었다. 따라서 이론적 고찰과 실험을 통하여 고주파 공진형 인버터를 이용한 유체 가열방식이 유도가열에 있어 새로운 가열방식으로서의 가능성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

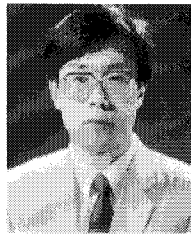
[1] 김옥신, 이동현, 전원표, “과열 증기 이용 친환경 건조기술”, Korean Chem. Eng. Res., Vol. 46, No. 2, pp.258-273, 2008.
 [2] D. C. Shin, H. M. Kwon, Y. J. Kim, H. D. Lee, K. H. Kim, “Development a Heater using Induction Heating Based on a High Frequency Resonant Inverter”, German - Korean Symposium 2004 on Power Electronics

and Electrical Drives, pp. 172-176, 2004.

[3] 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 KIPE, vol. 7, No. 1, pp.48-53, 2002.
 [4] 백주원, “고품위 식품제조를 위한 초고속 가열기기개발”, 농림부 과제, 최종보고서, pp.16-18, 2004.
 [5] 김홍삼, “유도가열을 위한 새로운 소프트 스위칭 고주파 인버터에 관한 연구”, 경남대학교 산업대 학원 전기공학과 석사학위논문, pp.1-10, 2008.
 [6] 노의철, 정규범, 최남섭, “전력전자공학”, 문운당, pp.313-415, 2002.

설 용 태(Yong-Tae Sul)

[정회원]



- 1979년 2월 : 한양대학교 전기공학과 (공학사)
- 1981년 2월 : 한양대학교 전기공학과 (공학석사)
- 1984년 8월 : 한양대학교 전기공학과 (공학박사)
- 1985년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 전기공학과 교수

<관심분야>
유도가열, 반도체

이 의 용(Eui-Yong Lee)

[정회원]



- 1991년 2월 : 순천향대학교 전기공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 호서대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 호서대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2001년 7월 ~ 현재 : (주)에이티에스 대표이사

<관심분야>
유도가열, 반도체, RF

권혁민(Hyuk-Min Kwon)

[정회원]



- 1999년 2월 : 호서대학교 전기공학
학과 (공학사)
- 2001년 8월 : 호서대학교 전기공학
학과 (공학석사)
- 2006년 2월 : 호서대학교 전기공학
학과 (공학박사)
- 2006년 2월 ~ 현재 : (주)에이티
에스 부설연구소 연구소장

<관심분야>

유도가열, 반도체