

공진부하 일체형 유도가열 인버터 개발에 관한 연구

김철호, 신대철, 권혁민, 유재훈, 우형균
호서대학교

A Study on the Development of Single-piece Resonant Load Inverter for Induction Heating

Chul-Ho Kim, Dae-Cheul Shin, Hyuk-min Kwon, Jae-Hoon Yoo, Hyung-Kyun Woo
Hoseo Univ.

요 약

고주파 유도가열은 무공해 에너지 절약을 기본으로 하는 전기가열의 한 방법으로 환경 친화적 에너지 절감에 많은 기대를 하고 있다.

본 논문에서는 절연체 용기내에 특수 발열체 부하를 수납하여 외부의 코일과 비접촉상태로 전자유도에 의해 와전류를 발열체에 흘림으로서 발열하게 되는 새로운 방식을 제안하였다. 설계한 인버터는 스위칭 주파수 20[kHz] 대역에서 작동되는 고주파 직렬 부하 공진형이며 LC 공진 설계에서 L을 부하로 설정하여 효율을 최대화 하였다.

1. 서 론

전력변환장치 기술 중의 하나인 유도가열 기술은 산업전반에 걸쳐서 아주 폭 넓게 사용되는 기술로 그 근본이 되는 원리는 1831년 패러데이의 의한 전자기 유도현상이다. 이 현상을 약간 변형하여 코일에 교류전류를 흘려주면 이 코일 안에 있거나 또는 근처에 있는 금속체에 와전류가 유도되어 금속체가 가열되는 현상이 유도가열의 원리이다. 이러한 유도가열 방식은 종래의 연소에 의한 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 안전성이 뛰어나며, 배출가스 등의 오염 물질의 발생이 없어 위생적이고 청결하다는 우수한 장점이 있다. 이러한 전자유도가열의 유효성은 인지도가 매우 높아 산업설비에서부터 현재 가정용 전자조리기에 이르기 까지 대표되는 IH 기술로 일반 가정에서 널리 보급되어 생활환경을 크게 개선하고 있다^[1].

본 논문에서는 절연체 용기내에 특수 발열체 부하를 수납하여 외부의 코일과 비접촉상태로 전자유도에 의해 와전류를 발열체에 흘림으로서 발열하게 되는 새로운 방식을 제안하였다. 설계한 인버터는 스위칭 주파수 20[kHz] 대역에서 작동되는 고주파 직렬 부하 공진형이며 LC 공진 설계에서 L을 부하로 설정하여 효율을 최대화 하였다.

2. 유도가열

2.1 유도가열의 원리

고주파 유도가열은 전자유도작용을 이용하여 코일에 고주파 전류를 흘려 고주파 자장이 발생하게 함으로서 이 고주파 자장 내에 있는 가열물에 유도전류가 흐르도록 한다. 이 유도전류는

물체 내에 흐르는 와전류에 의해 생기는 손실과 히스테리시스 손실에 의한 주열 열이 발생하며 매우 단시간에 발열이 이루어진다. 이렇게 발생된 열로서 가열하는 것을 유도가열이라고 하고, 고주파 전류를 이용한 것을 고주파 유도가열이라 한다. 주파수가 높은 고주파 전류를 사용하기 때문에 전류의 표피작용 및 근접효과에 의해서 피가열물의 표면층에 자속 및 와전류가 집중하며 이때 발생하는 열손실이 피가열물의 표면층을 가열하게 된다.

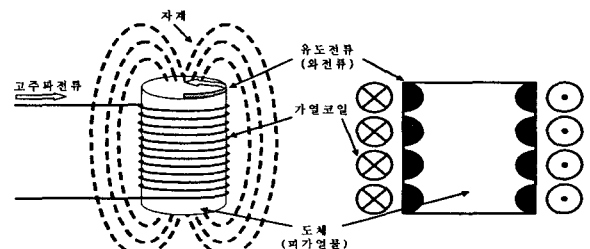


그림 1 유도가열의 원리
Fig. 1 Principle of induction heating

즉, 그림 1과 같이 전자유도 작용에 의한 것이며 고주파 전류가 흐르는 코일 속에 위치한 금속 등의 도전체는 와전류손, 히스테리시스손의 저항에 의하여 발생하는 전력의 크기만큼 열이 발생한다^[2].

2.2 유도가열 등가회로

일반적으로 유도가열 시스템은 가열 코일과 부하를 각각 1,2 차축으로하는 변압기 등가모델로 표현가능하다. 이 모델은 그림 2와 같이 하나의 등가 인덕턴스 L_{eq} 와 등가 저항 R_{eq} 의 직렬연결로 나타낼 수 있으며, 등가화된 파라미터 L_{eq}, R_{eq} 는 식 (1), (2)와 같이 표현된다.

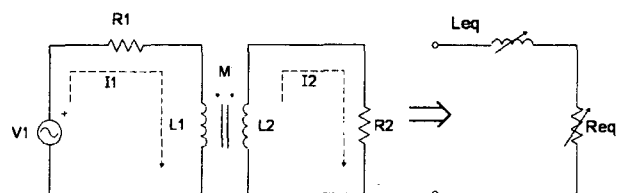


그림 2 유도가열 회로 및 등가회로
Fig. 2 Induction heating circuit and equivalent circuit

$$R_{eq} = r + \frac{(\omega M)^2 \cdot R_L}{R_L^2 + (\omega L_2)^2} = r + A^2 R_L \quad (1)$$

$$L_{eq} = L_1 - \frac{(\omega M)^2 \cdot L_2}{R_L^2 + (\omega L_2)^2} = L_1 - A^2 L_2 \quad (2)$$

여기서, $A = \frac{\omega M}{\sqrt{R_L^2 + (\omega L_2)^2}} \approx \frac{M}{L_2} \omega L_2 \gg R_L$ 일 경우

한편, 이 등가화된 파라미터 L_{eq}, R_{eq} 는 가열 부하의 크기와 위치, 가열 코일과 부하사이의 거리, 부하의 도전율과 투자율, 동작 주파수 등에 의해 변하게 된다. 또한, 변압기 2차측 저항 R_L 은 와전류의 표피두께 δ 에 의해 결정되므로 실제 유도 가열에 의해 발생하는 출력 전력은 저항과 전류의 관계에 의해 식 (3), (4)와 같이 표현된다.

$$R_L = \frac{\rho}{\delta} = k \sqrt{\rho \mu_r f}, \quad I_2 = N I_1 \quad (3)$$

$$P = k \cdot (N I_1)^2 \cdot \sqrt{\rho \mu_r f} \quad (4)$$

여기서, k : 상수 ($\sqrt{4\pi^2 \times 10^{-7}}$), N : 가열코일의 턴 수^[2]

3. 공진형 인버터

그림 3은 고주파 공진형 인버터로서 풀-브리지 전압형 직렬 부하 공진형 인버터를 나타내는데 이것은 절연파이프의 두께, 내부의 공진발열체의 소재 그리고 가열 유체계에 의해 변화하는 인덕턴스와 저항분으로 구성되는 전기회로 모델로 볼 수 있다.

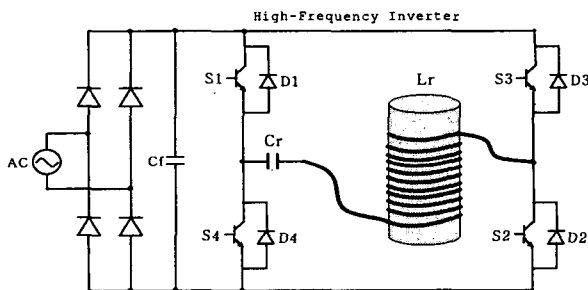


그림 3 풀-브리지 공진형 인버터회로
Fig. 3 Full-bridge resonant inverter

대전력 스위칭 회로에서는 위상부(위쪽 IGBT)와 아래상부(아래쪽 IGBT)의 암쇼트에 의해서 관통전류가 발생하게 된다. 관통전류가 발생하는 원인은 푸쉬-풀 드라이빙 때 소자의 턴 오프 딜레이가 발생하여 위, 아래상이 순간적으로 동시에 온 되기 때문이다. 따라서 보통 위상부와 아래상부의 스위칭 사이에 수[μs]의 불감시간대를 고의로 발생시키게 되며 이 불감시간을 데드타임이라고 한다. 대가 IGBT의 경우에는 2~3[μs] 정도를 사용하며, 스위칭 속도가 좀 더 빠른 FET의 경우에는 1~1.5[μs] 정도를 사용한다^[3].

4. 시스템의 구성

그림 4는 유도 가열 시스템의 구조를 나타낸다. 절연 파이프의 가열 용기 내부에 발열체인 충전물을 워크코일로부터 전자 유도에 의해 와전류로 발열시켜 절연파이프 용기에 물이나 공

기 등의 이동유체를 전자유도 발열체인 충전물에 접촉시킴에 따라 작은 비열의 충전물을 급속가열이 가능하게 하는 새로운 유체가열 시스템의 구조를 나타낸다.

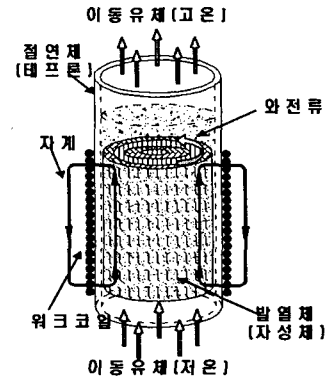


그림 4 유도 가열 시스템의 구조
Fig. 4 Configuration of the IH system

그림 5는 대용량 풀-브리지 인버터용으로 특수하게 설계된 발열체 부하를 나타낸다. 이 발열체는 금속박판을 이용하기 때문에 고온 가열시 단선, 단락 및 전기절연 성능이 뛰어나고, 유체 통과저항이 극히 작아 온도응답 특성이 빠르며 정밀 온도제어가 가능하다는 종래의 유체가열 장치에서 얻을 수 없었던 뛰어난 특성을 갖는다. 특히, 표면적이 크다는 것은 히터로 사용할 경우 전열면적을 많이 사용할 수 있다는 것으로 가열시에 표면 온도를 낮게 잡을 수 있다는 것을 의미한다. 또한, 금속판 자체가 자기발열 한다는 특징을 가지고 있다^[4].

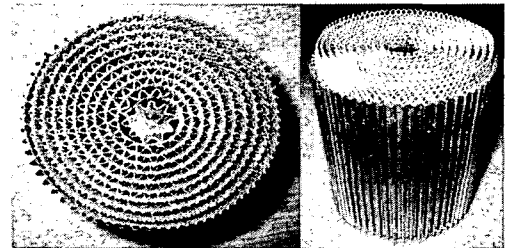


그림 5 금속 충전물
Fig. 5 Induction-heated metallic package

5. 실험 및 고찰

그림 6은 IsSpice를 이용하여 작성한 회로이고, 그림 7은 작성된 회로의 시뮬레이션 파형을 나타낸다. 스위치 Q1·Q4와 Q2·Q3는 서로 상보적으로 스위칭 되고 압단락을 방지하기 위해 적정한 데드타임을 주었다. 스위칭 주파수는 공진주파수 (20[kHz])보다 조금 높게 설정하였다.

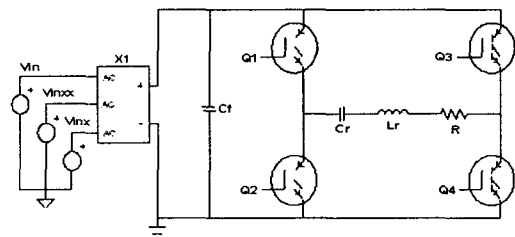


그림 6 시뮬레이션 회로
Fig. 6 Simulation circuit

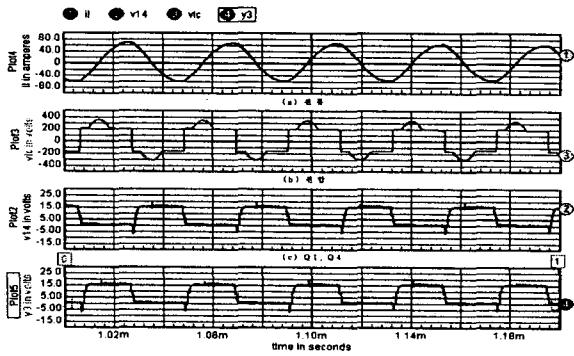


그림 7 시뮬레이션 파형
Fig. 7 Simulation waveform

그림 8은 실제 제작한 고주파 공진형 인버터의 스위칭 패턴 및 그에 따른 전압과 전류의 실제 출력파형을 나타낸 것이다. 앞서 시뮬레이션 파형과 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

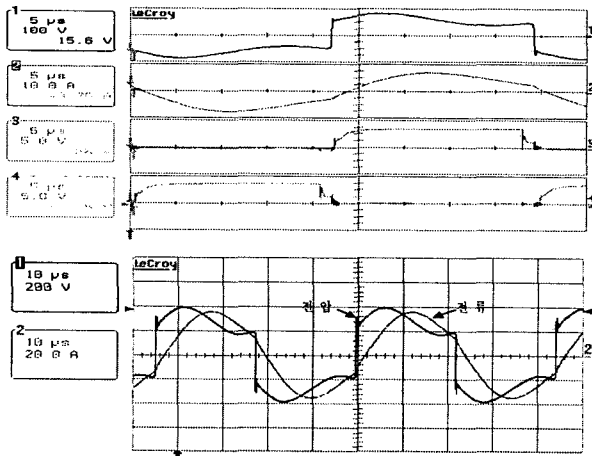


그림 8 출력파형
Fig. 8 Output waveform

그림 9는 유도가열용 공진형 인버터를 이용한 순간 온수기 실험 장치를 나타낸다. 풀-브리지 공진형 인버터를 이용한 1단 가열 시스템으로 워터펌프에 의해 물이 순환하면서 피가열체인 충전 발열체를 통과함으로써 온수가 되는 시스템이다.

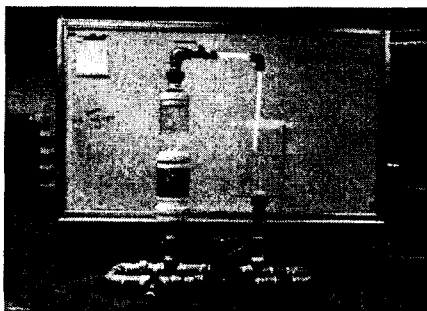


그림 9 실험 장치
Fig. 9 Experimental set-up

표 1은 10[l]의 물을 순환시키면서 가열하여 70[°C]의 온수로 만드는 과정에서의 시간에 따른 온도변화를 측정된 데이터이다. 표에서 나타난 데이터처럼 총 10[l]의 물이 69.7[°C]까지 가열하는 시간은 10분이었으며 열변환 효율을 계산하면 약 80[%]정도로 나타났다.

표 1 온도변화 데이터

Table 1 Change of temperature data

시간[min]	온도[°C]
0	17
2	28.7
4	39.6
6	50.1
8	60.1
10	69.7

6. 결론

본 논문에서 제안한 고주파 공진형 인버터를 이용한 유체가열 방식은 유도가열 분야에 있어 새로운 가열 방식으로 충분한 열원으로써 가능성을 확인하였다. 또한 유도가열을 이용한 유체가열은 연소에 따른 오염물질의 발생이 없어 위생적이고, 안정성이 우수한 장점들을 확인할 수 있었다.

본 논문에서 제안한 고주파 공진형 인버터를 이용한 순간 온수 시스템에서 인버터의 입·출력 전압 및 전류의 특성이 안정하다는 것을 확인하였다. 또한 일체의 연소 과정이 없는 파이프 라인 시스템을 사용하였고, 고주파 인버터는 모듈타입의 IGBT를 사용한 직렬 공진형 인버터를 사용하였다. 그리고 이 동유체를 가열시키기 위해 고주파 자속을 발생시키는 유도가열 코일을 LC 공진에 있어서 부하 자체로 사용하여 효율 80[%]의 결과를 실험을 통해 얻을 수 있었다.

앞으로 고주파 공진형 인버터의 각 손실 방지 대책 및 고성능화, 고용량화 대책에 대하여 연구되어야 한다. 또한, 시스템의 출력을 제어하기 위한 컨트롤러 및 보호회로의 설계에 대한 연구와 유도가열의 폭넓은 응용분야에 관한 연구도 병행되어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] 유재훈, 신대철, 권혁민, 박희창 "1.5[kW]급 고주파 공진형 인버터를 이용한 유도가열 가정용 시스템에 관한연구" 2005년 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2005.
- [2] 신대철, 권혁민, 김기환, 김용주 "유도가열용 고주파 공진형 인버터를 이용한 과열증기 발생장치 개발에 관한 연구" 2004년 4월 전력전자학회 논문지.
- [3] 권혁민, 신대철 "5[kW]급 풀-브리지 고주파 공진형 인버터를 이용한 고효율 유도가열 히터 개발" 2005년 10월 전력전자학회 논문지.
- [4] 노의철, 정규범, 최남섭, "전력전자공학", 2002년 1월.