

# Half-Bridge 고주파 직렬 공진형 인버터를 이용한 유도가열 시스템의 최적화에 관한 연구

김철호, 신대철, 권혁민, 김기환, 김용주  
호서대학교, 세명대학교, KIMS 국제 변리사

## A Study on the Optimization of Induction Heating System for Using Half-Bridge High-Frequency Series Resonant Inverter.

Chul-Ho Kim, Dae-Cheul Shin, Hyuk-Min Kwon, Kee-Hwan Kim and Yong-Ju Kim  
Hoseo Univ., Semyoung Univ. and KIMS International agent

### ABSTRACT

This paper is described the stability and optimization according to each load of induction heating system for using half-bridge high-frequency series resonant inverter. Each metallic package is inserted into the ceramic type vessel with external working coil. This working coil is connected to the resonant inverter. It evaluates performance and stability of this system according to metallic package.

### 1. 서론

산업이 발달하면서 전기를 이용한 가열 및 건조기술은 양질의 제품을 효율적으로 생산하는데 매우 중요한 역할을 한다. 즉, 전기가열법은 화석연료를 이용하는 연소가열법에 비해 열 효율적 측면과 제어적 측면에서 월등히 우수하므로 전 산업분야에서 급격한 속도로 대체되고 있다. 이러한 전기가열방식으로는 저항가열, 아크가열, 유도가열, 유전가열, 전자빔가열, 적외선 가열 등이 있으며 그중에서도 유도가열분야는 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.

본 논문은 유도가열 중에서도 전자유도가열 발열체와 유체이동에 의한 새로운 열 교환 방식으로 여러 가지 기체, 액체 및 증발체를 상온에서 초고온으로 가열이 가능하고 일체의 연소 과정이 없는 파이프 라인 시스템을 사용하고, 고주파 인버터는 모듈 IGBT를 사용한 직렬 공진형 인버터를 도입하여 부하로서 이동유체를 가열시키기 위해 고주파 자속을 발생시키는 유도자 워크코일을 사용하였다. 이러한 시스템으로 각 부하에서의 성능 해석과 실험 결과를 토대로 분석하여 최적화하고자 한다.

### 2. 유도가열 시스템

#### 2.1 유도가열의 원리

금속가열에 이용되는 고주파가열은 정확하게는 고주파 유도가열이라 칭하는 것으로 전자유도 작용에 의한 것이며 교류전류가 흐르는 코일 속에 위치한 금속 등의 도전체는 와전류 손실과 히스테리시스 손실의 저항에 의하여 전력의 크기만큼 열이 발생한다. 이와 같이 발생하는 열 에너지를 이용하여 피가열 물질을 가열하는 것을 유도가열이라 하며, 특히 고주파 전류를 이용하는 것을 고주파 유도가열이라고 한다.

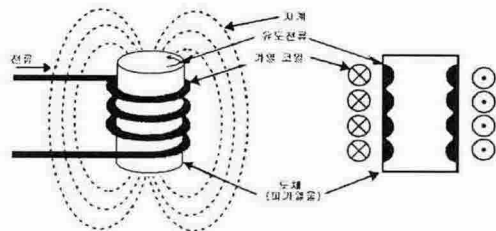


그림 1 유도 가열의 원리

Fig. 1 Principle of induction heating.

그림 1과 같이 고주파 교류 전원, 가열 코일, 피가열체로 구성이 되면 패러데이의 전자 유도 현상에 의해 가열 코일에 고주파 교류 전류가 흐를 때 발생하는 고주파 자계 중에 도전성을 가지는 금속을 위치시키면 금속에 식(1)의 유기기전력이 발생되고 이로 인하여 금속의 표면에 와전류가 유기되어 표피저항에 의해  $P=I^2R$ 의 전력크기만큼 주열 열을 발생시키는 원리이다. 이러한 열의 대부분은 식(2)로 표현되는 표피 두께  $\delta$ 내에 분포하게 되며,  $\delta$ 는 유도 가열의 여러 응용분야에서 인버터 동작 주파수를 결정하는 주요한 요소가 된다.<sup>[1,2]</sup>

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \tag{1}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{4\pi^2 \times 10^{-7}} \cdot \frac{\rho}{\mu_r f}} \tag{2}$$

여기서  $\rho$ :저항률( $\Omega \cdot m$ ),  $\mu_r$ :비투자율,  $f$ :주파수(Hz)

## 2.2 유도 가열 시스템의 구조

그림 2는 유도가열 시스템의 구조를 나타낸다. 절연 파이프의 가열 용기 내부에 발열체인 충전물을 워크코일로부터 전자유도에 의해 와전류로 발열시켜 절연파이프 용기에 물이나 공기 등의 이동유체를 전자유도 발열체인 충전물에 접촉시킴에 따라 작은 비열의 충전물을 급속가열이 가능하게 하는 새로운 유체가열 시스템의 구조를 나타낸다.

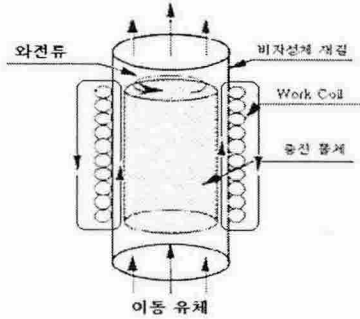


그림 2 유도가열 시스템의 구조  
Fig. 2 Configuration of the induction heating system.

## 3. 고주파 공진형 인버터

그림 3은 고주파 인버터로서 Half-Bridge 직렬 공진형 인버터를 나타내는데 이것은 절연파이프의 두께, 내부의 충전물의 소재 그리고 가열 유체계에 의해 변화하는 인덕턴스와 저항분으로 구성되는 전기회로 모델로 볼 수 있다. 실제로 워크코일과 피가열 물체계의 사이에 정합 트랜스가 사용되는데 R-L부하와 L을 보상하는 C로부터 직렬 공진 회로계를 위한 고효율 운전을 위하여 인버터의 동작 주파수 선정이 매우 중요하다. 이는 R-L회로에 직렬보상 C를 사용하여 R-L-C직렬부하 공진회로 부하계를 구성하는데 발열체를 극한정도까지 가열하지 않으면 전기회로 정수는 거의 변화하지 않기 때문에 R-L회로계로 볼 수 있으므로 직렬부하보상 콘덴서 C는 R-L부하계의 R이 IGBT의 도통 저항에 비해 작은 경우에는 직렬 인덕턴스를 갖는 병렬공진회로가 효율적 측면에서 유리하다고 할 수 있다.

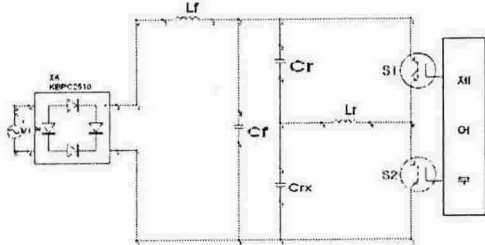


그림 3 하프-브릿지 공진형 인버터  
Fig. 3 Half-bridge resonant inverter.

대전력 스위칭 회로에서는 위상부(위쪽 IGBT)와 아래상부(아래쪽 IGBT)의 암쇼트에 의해서 관통전류가 발생하게 된다. 관통전류가 발생하는 원인은 푸쉬-풀 드라이빙 시 소자의 턴 오프 딜레이가 발생하여 위, 아래상이 순간적으로 동시에 온 되기 때문이다. 따라서 보통 위상

과 아래상의 스위칭 사이에 수[ $\mu$ s]의 불감시간대를 고의로 발생시키게 되며 이 불감시간을 데드타임이라고 한다. 대가 IGBT의 경우에는 2~3[ $\mu$ s]정도를 사용하며, 스위칭 속도가 좀 더 빠른 FET의 경우에는 1~1.5[ $\mu$ s]정도를 사용한다.<sup>[2]</sup>

그림 4와 5는 Is-Spice를 이용한 Half-Bridge 인버터의 시뮬레이션 파형을 나타낸 것으로서 그림 5는 Half-Bridge 인버터에서 스위칭 소자의 게이트단에 인가되는 전압형 직렬공진 스위칭 펄스 패턴을 나타낸 것이고, 그림 6은 부하양단에 인가되는 전압 및 전류의 파형을 나타낸 것이다.

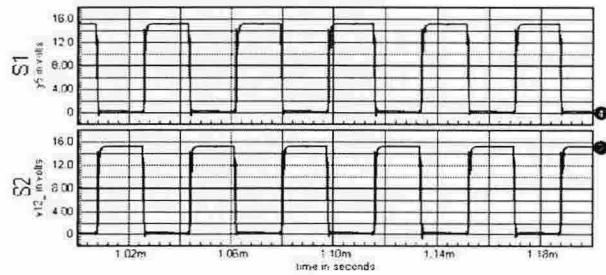


그림 4 Half-bridge 스위칭 패턴  
Fig. 4 Switching pattern of half-bridge.

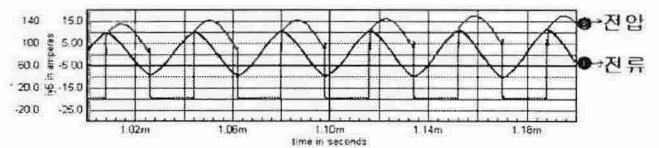


그림 5 Half-Bridge 인버터의 출력전압 및 전류파형  
Fig. 5 Waveforms of output voltage and current of half-bridge inverter.

그림 3의 Half-Bridge에서 스위치 S1과 S2가 동시에 ON되면 직류 입력 전압원이 단락되어 각 스위치는 서로 상보적으로 스위칭이 되고, S1이 온 되고 S2가 오프일 때는  $v_0 = V_{DC}/2$ 가 되고, S1이 오프되고 S2가 온일 때는  $v_0 = -V_{DC}/2$ 가 되어 각각 부하에 인가된다. 또한, S1과 S2가 동시에 OFF되면 부하전압은 부하전류의 방향에 따라 정해진다.

즉,  $i_0 > 0$ 이면  $D_2$ 가 온되어  $v_0 = -V_{DC}/2$ 가 되고,  $i_0 < 0$ 이면  $D_1$ 이 온되어  $v_0 = V_{DC}/2$ 가 된다.<sup>[3,4]</sup>

## 4. 실험 및 고찰

본 실험에서 사용한 IGBT모듈은 페어차일드사의 FMG2G100US60제품으로 내압이 600[V], 100[A]이다. 또한 1차측 파라미터로 용량이 0.1[ $\mu$ F]인 콘덴서를 여러 개 병렬연결하여 사용하였으며, 코일 값인 인덕턴스는 100[ $\mu$ H]~200[ $\mu$ H]으로 조정하였다.

공진 콘덴서는 주파수 특성이 좋은 폴리프로피렌계열을 주로 사용하지만 리플전류를 고려해서 적절한 용량의 것을 사용하였다. 브릿지 다이오드 뒷단에 사용되는 LC 필터는 상용주파수의 진원측에서 보면 복잡한 액티브 PWM제어를 행하지 않고 고효율 특히 선전류의 정현파

화 기능을 갖도록 설계하는데 소형화로 구성된 시스템 특성상 리플성분을 그대로 통과시킬 수 있도록 작은 용량의 필터를 선정하였다. 또한 필터 선정 시 역률 제어 특성을 고려하여 통상 LC 필터로 사용되는 인덕턴스는 수십 $[\mu H]$ , 콘덴서는 수 $[\mu F]$ 정도의 용량을 사용하였다.

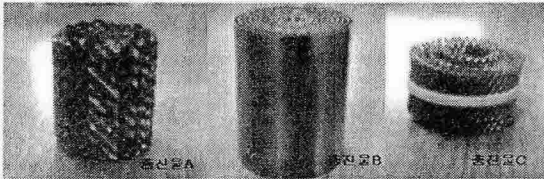


그림 6 충전물  
Fig. 6 Metallic package.

그림 6은 발열체로서 특수하게 설계된 적층형 규칙 충전물인 충전물 A와 대체 충전물로 사용하기 위한 충전물 B, C의 그림을 보여준다.

표 1 충전물에 따른 파라미터  
Table 1 Parameters according to metallic package.

충진물	L값	Q값(선택도)	공진주파수
충진물 A	104 $[\mu H]$	5.1	20.147 $[kHz]$
충진물 B	100 $[\mu H]$	2.7	20.549 $[kHz]$
충진물 C	103 $[\mu H]$	2.0	20.254 $[kHz]$

표 1은 충전물 A, B, C 각각에 따른 L값과 그에 따른 공진 주파수의 값들을 보여준다.

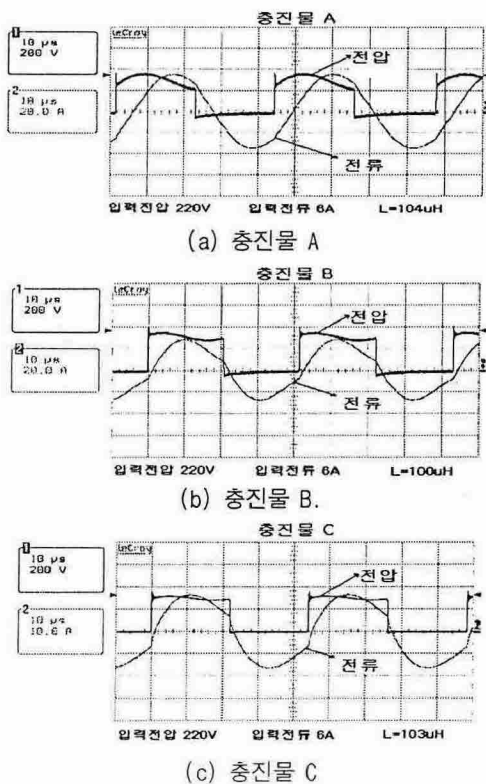


그림 7 충전물에 따른 출력 전압 및 전류파형  
Fig. 7 Waveforms of output voltage and current according to metallic package.

그림 7은 각 충전물을 사용하여 각 부하에 양단의 출력 전압과 전류의 실측 파형을 나타낸 것이다.

유도가열 부하로 사용된 충전물 A, B, C는 모두 자성체 스텐레스로 제작되었으며 전열면적을 넓게 하기 위해 특수설계되었다. 실험파형에서 나타난 것과 같이 모두 정상 동작 되었으며 공진선택도가 높은 충전물 A가 충전물 B, C에 비해 공진전류값이 높게 나타남을 알 수 있었다. 따라서 공진부하 충전물 L(공진인덕턴스) 설계 시 선택도 Q값은 공진전류 증가에 중요한 변수로 작용한다.

## 5. 결 론

전자유도가열 발열체와 유체이동에 의한 새로운 열 교환 방식으로 여러 가지 기체, 액체 및 증발체를 상온에서 초고온으로 가열이 가능하고 일체의 연소 과정이 없는 파이프 라인 시스템을 사용하고, 고주파 인버터는 모듈 IGBT를 사용한 직렬 공진형 인버터를 도입하여 부하로서 이동유체를 가열시키기 위해 고주파 자속을 발생시키는 유도자 워크코일을 사용하였다.

본 연구에서 사용한 각 충전물에 따른 부하변동에 있어서도 고주파 공진형 인버터를 이용한 유도가열 시스템에서의 안정성을 확인할 수 있었다. 그리고 부하에 따른 공진 선택도가 높을수록 공진전류값이 증가됨을 알 수 있었다.

앞으로 고주파 인버터의 스위칭 손실 및 노이즈 대책, 고성능화 그리고 시스템의 출력 제어를 위한 컨트롤러 및 보호회로의 설계에 대한 연구가 필요하며, 유도가열의 보다 넓은 응용분야에 대한 연구가 진행되어야 한다.

## 참 고 문 헌

- [1] Y J KIM, K H KIM, D C SHIN, "Electromagnetic Indirect Induction Fluid Heating System using Series Resonant PWM Inverter and Its Performance Evaluations", 전력전자학회 논문집, 2004년 4월.
- [2] 권혁민, 신대철, 김기환, 김용주, "간접유도가열용 고주파 공진형 인버터 시스템에 관한 연구", 전력전자학술대회 논문집, pp. 322~325, 2002년 7월.
- [3] 최규하, "반도체 전력변환을 중심으로 한 전력전자", pp. 269~331, 2003년 2월.
- [4] 신대철, 권혁민, 김기환, 김용주, "유도가열용 고주파 공진형 인버터를 이용한 과열증기 발생장치 개발에 관한 연구", 전력전자학회 논문집, pp. 119~125, 2004년 4월.