

## 간접유도가열용 고주파 공진형 인버터 시스템에 관한 연구

권혁민\*, 신대철\*, 김기환\*\*, 김용주\*\*\*

\*호서대학교, \*\*세명대학교, \*\*\*특허청

### A Study on the High-Frequency Resonant Inverter System for Indirect Induction Heating

H.M. Kwon, D.C. Shin, K.H. Kim, Y.J. Kim

Hoseo Univ., Semyoung Univ., Korea Industrial Property Office

#### ABSTRACT

In this paper are described the indirect induction heated boiler 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 inverter and turbulence fluid through this induction heater to moving fluid generates in the vessel. The operating performances of this unique appliance in next generation and its effectiveness are evaluated and discussed from a practical point of view.

#### 1. 서 론

최신의 고주파 전력용 반도체 소자를 응용하여 고주파 스위칭 제어동작을 행하는 전력변환장치 및 각종 응용시스템에 관련된 제어장치에 관한 일반 이론과 실제의 각종 응용에 연관되는 기술분야로서 고주파 P.E(Power Electronics)기술은 최근 고주파 전력용 반도체소자 및 관련되는 부품기술의 진보에 힘입어 앞으로 유망한 하나의 기술분야로 주목을 받고있다.

기존의 전력변환장치는 하드스위칭방식으로 장치의 대형화 및 효율문제로 인하여 미·일을 중심으로 10여년 전부터 시스템의 고주파화를 추진하기 시작하여, 현재 전력변환장치에 있어서 동작주파수가 청주파수대인 20kHz 이상에서 동작 가능하게 되

었다.

특히, 유도가열기술 분야에 있어서 전자유도가열 발열체와 유체이동과의 새로운 열교환 방식은 파이프라인 시스템에 있어서 여러 가지의 기체, 액체 및 증발체 등을 상온에서 초고온에 이르기까지 고 정도의 가열을 가능하게 하는 전혀 새로운 방법으로 일체의 연소과정이 없다는 점에서 작업환경의 개선 및 온도제어 신뢰성에 있어서 뛰어난 특성을 보이는 전자유도 유체가열기술은 IGBT대응의 고주파 인버터를 사용함으로써 고성능, 고효율의 시스템화가 가능하여 고주파 P.E의 새로운 분야로 주목받고 있다.<sup>[1,2]</sup>

본 논문에서는 주파수 범위가 20kHz에서 50kHz 인 전류형 직렬공진 고주파 인버터를 이용하여 열기체를 발생시키는 간접 유도가열시스템 및 알미늄 박판 가열시스템에 대하여 논하고자 한다.

#### 2. 유도가열시스템

##### 2.1 유도가열의 원리

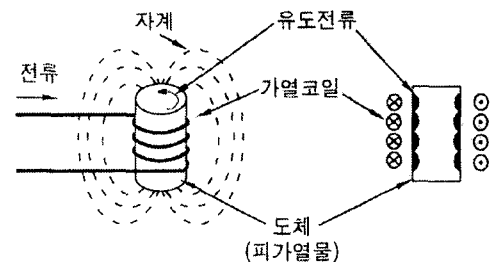


그림 1 유도가열의 원리

유도가열의 원리는 패러데이-렌츠의 전자기 유도현상으로 그림 1과 같이 유도코일에 교류를 공급해주면, 패러데이-렌츠의 전자기 유도현상에 의하여 피열물에  $e = -N \frac{d\phi}{dt}$  의 유기기전력이 발생되

고, 이로 인하여 피열물에 와전류가 흐르게 되는데 이 와전류는 표피효과에 의하여 피열물에 분포하게 되고, 피열물에서는 이 와전류와 저항에 의하여  $P=I^2R$ 의 전력크기 만큼 열을 발생하게 된다. 따라서 피열물은 이 열에 의해 가열이 되는 것이다.

### 2.2 유도가열 시스템의 구조

그림 2에 나타낸 유도가열시스템의 구조는 절연 파이프내의 가열용기 내부에 특수발열체인 적층형 규칙충진물을 워킹코일로부터 전자유도에 의해 와전류로 발열시켜 절연파이프 용기에 물이나 공기 등의 이동유체를 전자유도 발열체인 적층형 규칙충진물에 접촉시킴에 따라 작은 비열의 규칙충진물을 급속가열 가능하게 하는 새로운 유체가열 시스템의 구조를 나타낸다.

그림 3은 발열체로서 특수하게 설계된 적층형 규칙충진발열체를 나타내는데 이 발열체는 금속선이 아닌 금속박판을 이용하기 때문에 고온 가열시 단선, 단락 및 전기절연 성능이 뛰어나며 열 용량이 작은 발열부의 구성이 가능하고 유체 통과저항이 극히 작아 출력부의 온도 응답특성이 빠르며 정밀 온도제어가 가능하다는 종래의 유체가열장치에서 얻을 수 없었던 뛰어난 특성을 갖는다.<sup>[3-5]</sup>

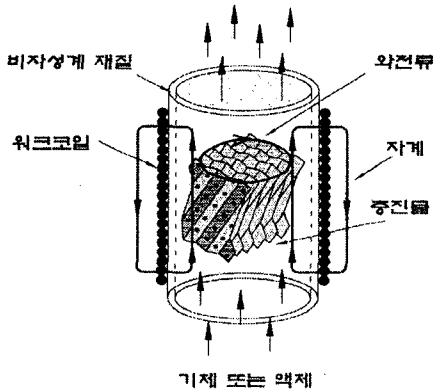


그림 2. 유도가열시스템 구조

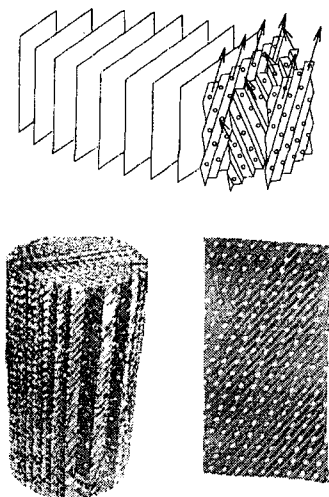


그림 3. 충전발열체

표 1. 발열체 물리적 특성

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

DPH에서 이용되고 있는 실제 발열체의 표면적 크기를 살펴보면 직경 100mm, 높이 200mm 크기로 약 22,000cm<sup>2</sup>의 표면적을 보유하고 있는 반면에 동일한 크기의 원통의 표면적을 살펴보면 약 1/35인 627cm<sup>2</sup>에 지나지 않는데 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 금속판에 의해 작은 용적임에도 불구하고 충분한 전열면적을 확보할 수 있으며 금속판 자체가 자기발열을 한다는 특징을 갖고 있으며 그 물리적 특성은 표 1과 같다.

### 2.3 유도가열용 고주파 공진형 인버터

그림 4와 그림 5는 고주파인버터로서 하프브릿지와 풀브릿지 전류형 직렬부하 공진형 인버터를 나타내는데 이것은 절연파이프의 두께, 내부의 적층형 규칙충진발열체의 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-C직렬부하 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 최적동조조건하에서 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.<sup>[6, 8]</sup>

그림 6은 전압형 직렬공진 스위칭펄스 패턴을 나타낸 것이다. 스위치 S1과 S3가 동시에 ON, OFF되고 스위치 S2와 S4는 S1, S3와 180° 위상차를 두고 동시에 ON, OFF된다.

단상 풀브릿지 인버터의 실제 회로구성은 서로 독립적으로 스위칭 할 수 있는 2개의 폴로 이루어진다. 각 폴의 구성과 동작은 단상 하프브릿지 인버터에서와 같게 되며 그림 7은 각 폴의 폴전압이 구형파이고 두 폴전압이  $180^\circ$  위상차가 되도록 제어할 때, 인덕터 L을 부하로 갖는 단상 풀브릿지 인버터의 각부 파형을 나타낸다. 이때 인버터의 출력전압  $V(out)$ 은 그림 7과 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.<sup>[9]</sup>

본 실험에서 사용한 IGBT는 후지사의 IMBH 65D-090A 제품으로 내압이 900V, 65A이다. 또한 1차측의 파라미터로 용량이  $0.1 \mu F$  인 콘덴서 여러개를 사용하였으며, 코일 값인 인덕턴스는  $100 \mu H \sim 350 \mu H$ 로 조정하였다.

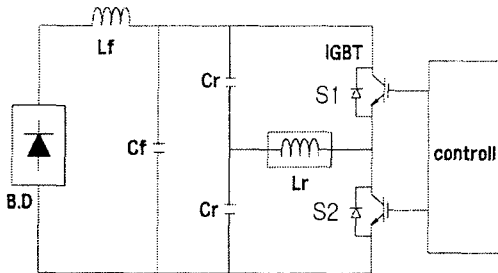


그림 4. 하프브릿지 공진형 인버터

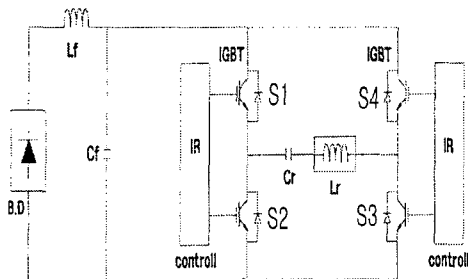


그림 5. 풀브릿지 공진형 인버터

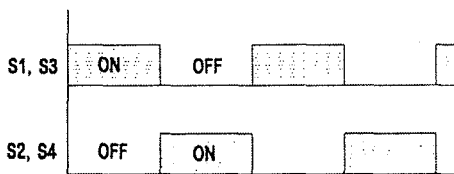


그림 6. 전압형 직렬공진 스위칭패턴

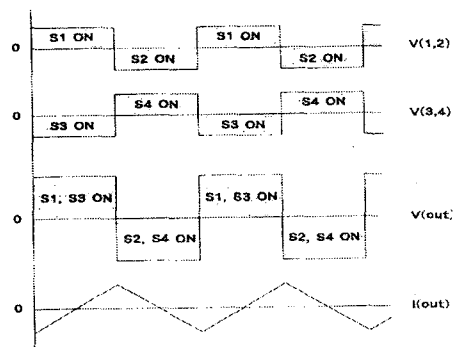


그림 7. 정상상태에서 각부 파형

공진 콘덴서는 주파수 특성이 좋은 폴리프로필렌계열을 주로 사용하지만 리플전류를 고려해서 적절한 용량의 것을 사용하였다. 브릿지 다이오드 뒷단에 사용되는 LC 필터는 상용주파수의 전원 측에서 보면 복잡한 액티브 PWM제어를 행하지 않고 고효율 특히 선 전류의 정현파화 기능을 갖도록 설계하는데 소형화로 구성된 시스템 특성상 120Hz 리플성분을 그대로 통과시키도록 작은 용량의 필터를 선정하였다. 또한 필터선정시 역률 제어특성을 고려하여 통상 LC필터로 사용되는 인덕턴스는 수백  $\mu H$ , 콘덴서는 수  $\mu F$  정도의 용량을 사용하였다.

이상의 조건하에서 설계된 하프브릿지와 풀브릿지의 입력/출력관계를 살펴보면 다음 표 1과 같다.

그림 8은 60Hz 입력의 상용전원 파형을 나타낸 것이며 그림 9와 그림 10은 하프브릿지와 풀브릿지인버터의 Pspice 시뮬레이션에 의한 출력전압 및 전류 파형과 실측파형을 비교한 것이다.

표 1. 하프브릿지와 풀브릿지의 입,출력 특성

	입력			출력			
	V	A	kW	V	A	kW	kHz
하프브릿지	220	8	18.6	400	16	6.4	23
풀브릿지	110	8	0.9	200	16	3.2	23

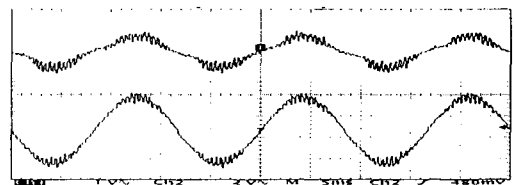
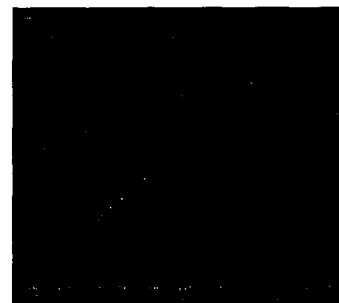
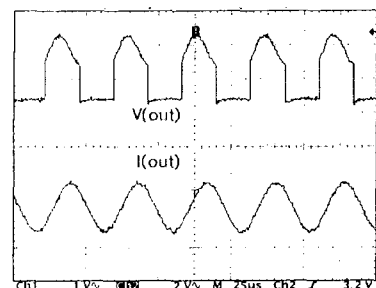


그림 8. 입력전압 및 전류파형

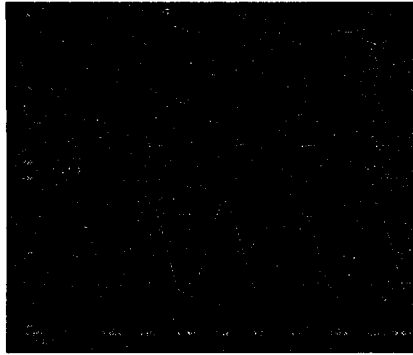


(a) 하프브릿지 시뮬레이션파형

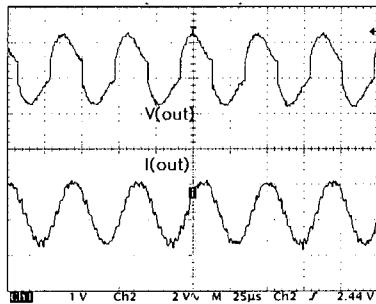


(b) 하프브릿지 실측파형

그림 9. 시뮬레이션파형과 실측파형(하프브릿지)



(a) 풀브릿지 시뮬레이션파형



(b) 풀브릿지 실측파형

그림 10. 시뮬레이션파형과 실측파형(풀브릿지)

### 3. 결 론

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 전자유도가열시스템은 열교환 효율이 높고 고정도의 온도제어와 순시가열이 가능한데 본 시스템 장치는 비접촉이므로 히터의 신뢰성이 높으며 스케일 부착에 따른 유체품질의 저하가 없으며 시스템 전체를 소형화 할 수 있는 특징을 가지고 있다.

유도가열 방식이 연소에 의한 종래의 발열 방식과 비교하여 우수한 장점은 다음과 같다.

- a. 가열효율이 높기 때문에 경제적이다.
- b. 신속한 가열을 통하여 Warming Up 등을 위하여 소비되는 손실을 줄일 수 있다.
- c. 출력 및 온도의 제어가 용이하여 사용이 편리하다.
- d. 안전성이 뛰어나다.
- e. 배출가스 등의 오염 물질의 발생이 없어 위생적이며 청결하다.

앞으로 고주파인버터의 스위칭손실 및 노이즈 대책, 고성능화 그리고 소프트 스위칭방식에 대한 실

증적 연구가 계속 필요하며, 특히, 고주파인버터의 회로방식 및 제어부의 개발 그리고 유체가열부의 새로운 구조의 제안과 그 열 교환효과에 대해 보다 구체적으로 연구가 진행되어야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

- [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クス構造形電子誘導器液加熱システム”, 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 Resonant 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”, 日本電氣學會全國大會, pp. 4~124. 1999年 3月.
- [7] 김용주, 김기환, 신대철, “직렬공진 PWM인버터를 이용한 전자간접유도가열 열유체 에너지시스템과 그 성능평가”, 전력전자학회 논문집, 2002년 2월.
- [8] 노의철, 정규범, 최남섭, “전력전자공학”, pp. 361~370, 2002년 1월.