

# 공진형 인버터를 위한 범용 퍼지 논리 제어기 설계

## General Digital Fuzzy Logic Controller Design For Resonant Inverter

김 태 언, 김 남 수, 임 영 도  
Tae-Eon Kim, Nam-Su Kim, Young-Do Lim

### 요 약

고주파 유도 가열 시스템에서 철과 같은 물체를 가열하게 되면, 가열된 금속이 큐리점 부근에서 전기적인 임피던스가 급격하게 변화하는 특징을 가지는 시변 시스템이 된다. 또한 부하 임피던스가 변화함에 따라 시스템의 부하 공진 주파수가 달라지므로 해서 시스템의 효율이 감소하는 문제점이 있었다. 그리고, 피가열 물체의 용융이나 삼입 상태에 따른 시스템의 단락 현상으로 인해 시스템이 파괴되는 문제점이 있었다.

본 논문에서는 이런 문제점을 해결하기 위한 방법으로 PLL에 의한 부하 공진 주파수를 추종하면서 스위칭 손실을 줄이고, 시변 부하에 대한 유도 가열시 큐리점 부근의 급격한 부하 임피던스 변화에도 안정된 정전력 제어가 가능할 뿐 아니라 대전력용에 적합하고, 단락현상으로부터 시스템을 보호하는 병렬 공진형 인버터 시스템에 적용되는 퍼지 논리 제어기를 설계하였다.

### Abstract

Induction heating system is time varying system around curie point. So, it has many troubles which are system shut down and change the load impedance.

In this paper has been designed the parallel resonant inverter which controlling the constant power and tracking the load resonant frequency with PLL is possible, in order to minimize switching losses and solve it's many troubles. The current full-bridge type parallel resonant inverter of an induction heating system was composed of IGBT in switching device. For regulating the output power of an induction heating system, the Fuzzy logic controller is used. The Fuzzy controller makes the control signal for a stable power regulating control and when reference is changed, it is superior to adaptability. It has been evaluated a stable behavior for a noise with switching and a load disturbance.

Keywords : induction heating, FLC, PLL, frequency tracking, phasor shift, parallel resonant

## I. 서 론

유도가열은 물체의 용융, 용접, 열처리 등 다양한 분야에 응용이 가능하다. 물체의 전기가열을 위해 근래에 와서는 반도체식 고주파 방식을 이용하여 전력 절감 및 제품의 품질향상을 이루었다. 유도가열을 이용한 금속의 열처리, 금속판의 가공, 금속 모재의 용접의 경우 도체의 온도 조절이 중요하다. 저항성분을 가진 부하의 온도 조절을 하는 방법은 직접 부하의 온도를 검출하여 제어하는 방법과 도체에

흐르는 전류량을 계산하여 도체에 발생하는 열량을 추정하는 제어로 나눌 수 있다. 이 때 금속성 부하가 큐리점을 통과하는 순간 급격한 임피던스의 변화가 발생하고, 임피던스의 변화는 공진 주파수의 변화를 유발한다. 과도한 전류가 흘러 시스템의 파괴를 가져온다. 따라서, 큐리점 이후 발생하는 급격한 부하의 변화에 잘 적응하여 제어기 및 시스템 유도 가열 시스템의 안정성을 확보하고 출력값을 추정하여 정상상태 오차를 최소화 하여야 한다.<sup>[5][6]</sup>

본 논문은 병렬 공진형 인버터를 이용한 유도 가열 시스템에서 철과 같은 시변 부하의 큐리점 이후에 급격히 감소하는 임피던스 변화에서 부하의 공진 주파수를 추종하여 정전류 제어를 이용하여 부하의 가열 정도를 제어 할 수 있음을 보인다. 시변 부하의 큐리점 이후 유도 가열 시스템의

\*동아대학교 전기·전자·컴퓨터 공학부

접수 일자 : 2003. 8. 28 수정 완료 : 2003. 1. 19

논문 번호 : 2003-4-8

※본 논문은 2002년 정보통신(IT)사업 연구비에 의해 연구되었음.

안정성을 확인하기 위하여 퍼지 이론을 이용한 퍼지 논리 제어기를 구현하여 실험한 결과를 보인다.

퍼지 이론은 현상의 불확실한 상태를 그대로 표현해주는 방법으로서 1965년 Zadeh 교수에 의해 처음으로 소개되었으며, 퍼지이론의 응용분야로서 퍼지제어(Fuzzy Control)가 가장 활발히 연구되어 왔다. 특히 입출력 관계의 정량적인 분석이 어려운 여러 가지 공정의 제어시스템에서 모델에 기준한 기존 제어기의 부적합한 점을 보완 대체하여 성공적으로 도입되고 있다. 퍼지 제어는 퍼지논리(Fuzzy Logic)에 기초를 두고 있으며, 이 퍼지논리는 기존 논리 체계보다 인간의 사고나 자연어의 특성과 많은 유사성을 가지고 있어서 실세계의 근사적이고 불확실한 현상을 기술하는데 효과적으로 이용될 수가 있다. 이러한 관점에서 퍼지 제어기를 퍼지 논리제어기( FLC : Fuzzy Logic Controller)라고도 한다. 또한, 퍼지 제어기는 인간의 축적된 경험과 지식을 제어 하고자 하는 대상에 적용한 것이며, 제어 방법은 주로 전문가의 경험과 지식에 의해서 이루어진다. 퍼지 제어기의 핵심적인 부분은 일련의 언어적 형식의 제어규칙이며, 퍼지 합성 규칙에 의해서 제어입력이 생성되며, 결국 FLC는 전문가의 경험적 지식을 언어적 형태를 기술한 제어 규칙을 자동 제어가 동작하도록 역할을 바꾸어 주는 기능을 한다.<sup>[7]</sup>

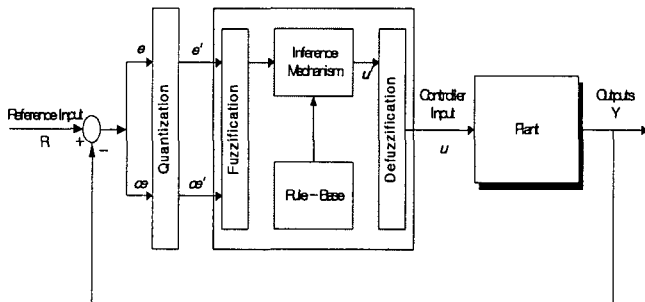


그림 1. 퍼지 제어 시스템 구성도

Fig.. 1 Block diagram of fuzzy control system

퍼지 제어는 퍼지논리에 기초를 두고 있는데 퍼지논리는 인간의 사고나 자연의 특성과 많은 유사성을 가지고 있어서 실세계의 근사적이고 불확실한 현상을 기술하는데 유용하게 이용될 수 있다. 다음 그림1.에서 퍼지 제어기의 기본적인 형태를 보여주고 있다.

퍼지 제어기의 구성은 입력변수를 받아 양자화 하는 입력부분, 규칙을 추론하는 제어기 부분, 추론된 값을 비퍼지화하는 출력부분으로 나뉜다. 그림 1.에 퍼지 제어기 시스템의 구성도를 나타내었다. 퍼지 제어기의 입력은 궤환되는 출력과 기준입력과의 오차 ( $e$  : error) 와 오차의 변화량 ( $ce$  : change in error)으로 나타낸다.

여기서 제어기의 역할은 오차 ( $e$ ), 오차의 변화량 ( $ce$ )을 입력받아서 제어입력( $u$ )를 계산하는 것이다. 퍼지 제어기는 애매한 오차입력으로부터 퍼지 제어기가 이용할 수 있는 퍼지 논리에 적합한 퍼지 연산을 하기 위한 퍼지 수로

변환(퍼지화)하여 퍼지 연산(추론)을 수행 한 후 이를 시스템에 적합한 이산값 으로 출력을 주는 변환 작업(비퍼지화)을 한다. 일반적으로 그림 2.와 같은 형태로 구성된다.<sup>[3][4]</sup>

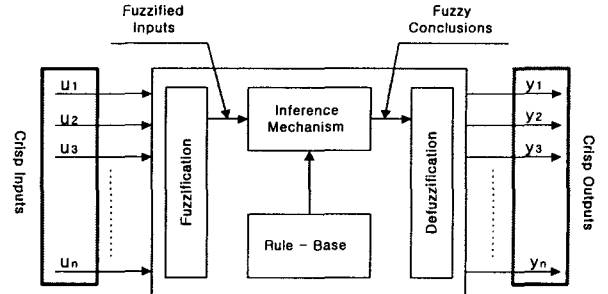


그림 2. 퍼지 제어기 구조

Fig. 2 Structure of fuzzy controller

## II. 공진형 인버터

DC-AC컨버터는 인버터(Inverter)로 알려져 있다. 인버터의 기능은 DC 입력전압을 원하는 크기와 주파수의 대칭 AC 출력전압으로 변환하는 것이다. 고정 또는 가변주파수에서 출력전압은 고정 또는 가변 될 수 있다. 가변 출력전압은 입력 DC 전압의 가변과 인버터상수의 이득을 일정하게 유지함으로써 얻을 수 있다. 인버터는 입력전압이 일정하게 유지되면 전압형 인버터라 하고, 입력전류가 일정하게 유지되면 전류형 인버터라 한다. 그리고 부하형태에 따라 직렬부하와 병렬부하로 나눌 수 있는데 유도가열장치의 기본적인 회로에는 전압형 인버터-직렬공진회로와 전류형 인버터-병렬공진회로가 있다. 인버터는 대전력을 얻기에 가장 적합한 전류형 Full Bridge 인버터-병렬 공진 회로를 이용하였다.

단상 전파브리지 전류형 인버터에서 입력은 전류원처럼 동작한다. 출력전류는 인버터부하와 관계없이 일정하게 유지되고 출력전압은 강제로 변환된다. 단상 전파브리지 전류형 인버터의 회로를 그림 3.에 나타내었다.<sup>[1][2]</sup>

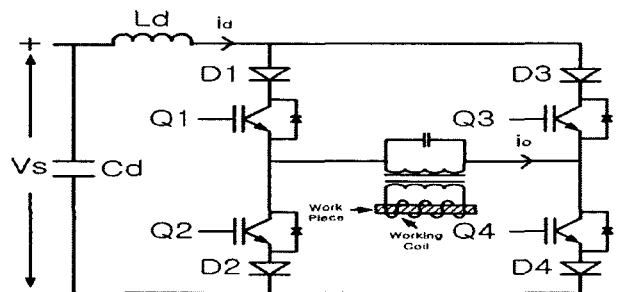


그림 3. 병렬 공진 전류형 인버터의 구성도

Fig. 3 Block diagram of parallel resonant current inverter

IGBT에 직렬로 연결된 다이오드는 IGBT상에 역전압을 저지하기 위해 필요하다. 다른 암에서 두 소자가 도통될 때, 소스전류  $I_d$ 가 부하를 통해 흐른다. 모든 암에서 두 소자가 도통될 때, 소스전류  $I_d$ 는 부하를 통하지 않고 바이패스 된다. 그러므로, 부하전류  $i_o$ 는

$$i_a = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{4I_L}{n\pi} \sin \frac{n\delta}{2} \sin n(\omega t) \quad (1)$$

같이 나타낼 수 있다.

전류원 특성을 나타내기 위해 비교적 큰 리액터  $L_d$ 가 필요하며, 외부 컨버터는 전류를 제어하기 위한 것이다. 동적 응답은 더 느리다. 전류가 스위치의 한 쌍으로부터 다른 쌍으로 전달되기 때문에, 출력전압 스파크를 억제하기 위해 출력필터가 필요하다. 전원으로부터 흐르는 전류가 연속적이어야 하므로, 두 개의 스위치가 항상 도통되어야 한다. 인버터 스위칭 신호를 그림 4.에 나타내었다.

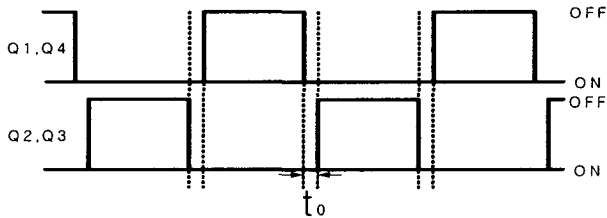


그림 4. 전류형 인버터 스위칭 파형

Fig. 4 Switching waveform of current inverter

### III. 퍼지 논리 제어기

퍼지 제어기는 애매한 오차 입력으로부터 출력을 얻어내는 작업을 하는데, 퍼지화부에서는 입력변수 값의 영역 (range)을 이에 대응되는 전체 집합으로 사상(mapping)시키고, 입력 값의 퍼지화를 수행한다.<sup>[7]</sup>

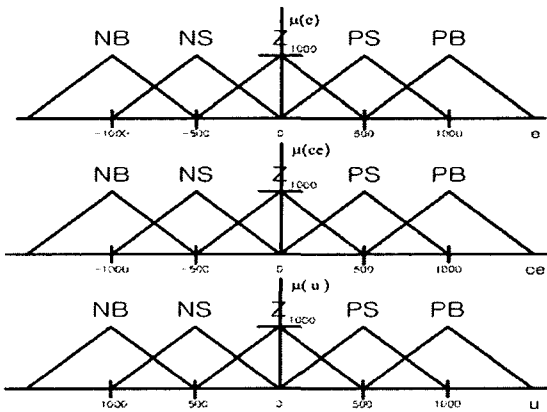


그림 5. 소속함수(e, ce, u)

Fig. 5 Membership function(e, ce, u)

그림 5.에서 입력 멤버십 함수는 삼각형을 사용하였고 전류센서에서 들어오는 값을 A/D변환하여 -1000에서 1000으로 사상시켰다. 출력 멤버십 함수도 D/A 변환을 사용하기 위하여 삼각형을 사용하여 -1000에서 1000으로 사상시켰다

퍼지 제어기의 지식 베이스는 "If ~ Then" 형식의 언어적 규칙으로 표현되며 또한 복수개의 규칙들이 모여서 제어규칙 집합을 이루고 각각의 규칙들 사이에는 서로 "also"라는 연관성을 가진다.

표 1. 유도 가열 시스템의 퍼지제어 규칙

Table 1. Fuzzy rule of induction heating system

ce \ e	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	Z
NS	NB	NS	NS	Z	PS
Z	NB	NS	Z	PS	PB
PS	NS	Z	PS	PS	PB
PB	Z	PS	PB	PB	PB

표 1.은 유도가열기의 퍼지 제어규칙이다. FLC에서 언어적인 형태로 기술된 퍼지 제어규칙을 적용하기 위해서는 논리적인 실행과정이 필요하고, 이를 퍼지 추론과정이라 한다. 이러한 퍼지 추론은 퍼지논리와 근사추론이 바탕이 된다. 본 논문에서의 퍼지화 추론방법은 Mamdani의 Max-Min 방법을 사용하였고, 비퍼지화는 무게 중심법을 사용하여 제어 출력값을 계산하였다.<sup>[7]</sup>

### IV. 병렬 공진형 유도 가열 시스템

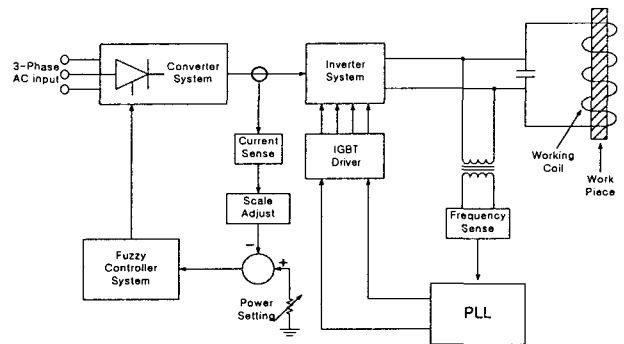


그림 6. 유도 가열 시스템의 구성도

Fig. 6 Block diagram of induction heating system

그림 6.은 유도가열기 시스템의 전체 구성도를 표시하였다.

부하의 종류에 따라 전기적인 임피던스가 다르고 가열된 온도가 변화함에 따라 부하특성이 서로 달라지므로 공진 주파수가 변한다. 큐리점 이후 부하는 가열 초기의 부하 조건과 급격하게 많이 변한다. 특히 부하 임피던스의 변화에 따른 공진 주파수가 변한다. 변화된 주파수를 추종하기 위한 가장 효과적인 방법이 PLL에 의한 공진 주파수 추종을

하는 FTPM(Frequency Tracking Pulse Modulation)방식을 채택하였다.<sup>[5][6]</sup>

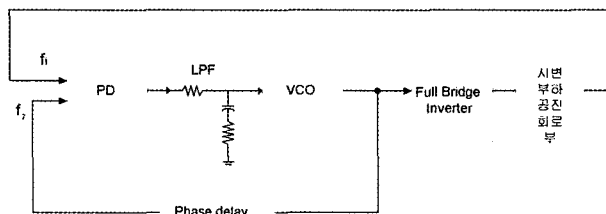


그림 7. FTPM 구성도  
Fig. 7 Block diagram of FTPM

그림 7.에서 인버터의 출력주파수는 부하 공진 주파수에 항상 추종되어야만 부하의 전력효율을 늘릴 수 있으므로 PD의 입력을 시변 부하 공진 주파수를 검출하여 궤환시키고 PD의 입력  $f_2$ 는 부하의 임피던스를 고려하여 VCO의 출력주파수를 위상지연 시킨다.

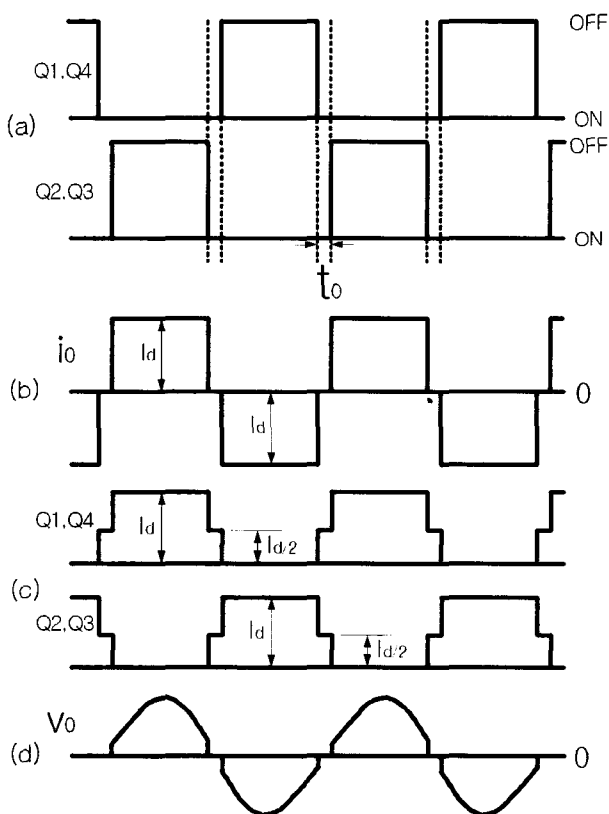


그림 8. 인버터 시스템의 파형  
Fig. 8 Waveform of inverter system

그림 8. (a)는 인버터 게이트 신호, (b)는 인버터 출력 전류  $i_0$ , (c)는 인버터 각 암에 흐르는 전류, (d)는 인버터 출력전압  $v_0$ 의 파형을 표시하였다.

공진형 인버터는 전류형이므로 스위칭시 에 그림 3.의 직

류전류  $i_d$ 의 연속성을 보존하도록 인버터회로에 있어서 상부암 IGBT의 게이트 신호 ( $Q_1, Q_3$ )와 하부암 게이트 신호 ( $Q_2, Q_4$ )가 동시에 점호하는중첩된 시간  $t_0$ 를 설정하고 있다. 중첩 기간 중 각 암에 흐르는 전류는 직류전류  $i_d$ 의 1/2정도이고, 인버터 출력 전류  $i_0$ , 전압  $v_0$ 는 0으로 된다.

그림 3.의 전류형 인버터 부분에서 직류 리액터  $L_d$ 를 접속하여 직류전원을 정전류원으로 만든다. 인버터는 IGBT를 이용하여 단상 전파 인버터이다. 이 때 부하인 가열 코일에 축적된 에너지의 역회복에 의한 소자의 파괴를 보호하기 위한 환류 다이오드는 IGBT에 내장되어 있다. 다이오드 D1, D2, D3, D4는 IGBT의 역전압 파괴를 보호하기 위해 각 암에 직렬로 접속하고 있다. 부하에 있는 유도가열장치는 LC 병렬공진 회로를 사용하고 있다.  $L_d$ 와 병렬로 접속한 콘덴서  $C_d$ 는 유도가열 동작시에 생기는 전기적 잡음을 억제하는 필터이다. 직류전원에는 SCR을 이용한 3상 위상제어 방식을 이용하였다.

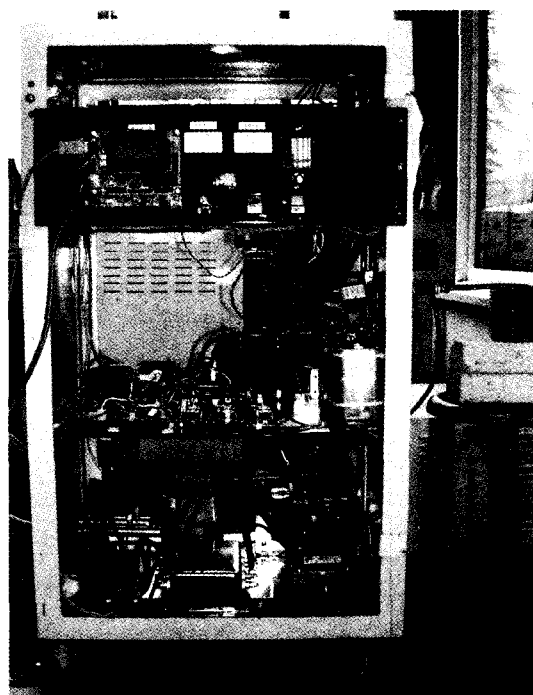


그림 9. 유도 가열 시스템 장치  
Fig. 9 Induction heating system plant

그림 9.는 이번 실험에 사용하기 위하여 제작한 유도 가열 시스템 장치이다.

### V. 실험 및 결과

가열기의 출력 전력조절을 위해서 Fuzzy 알고리즘을 이용한 디지털 제어를 사용하여 제어신호(u)를 만든다.

$$u = u + \Delta u \tag{2}$$

고주파 트랜스의 권선비와 전류, 전압의 비는

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (3)$$

과 같다. 2차 측 출력은 고주파 트랜스를 거친 출력이다. 본 실험에 사용한 고주파 트랜스의 1차 측 : 2차 측의 권선 비는 10 : 1 이다.

1차 측 전압이 입력 전압인 콘덴서의 충전 전압이 300V 인 경우 2차 측 출력 전압은 30V이다. 인버터의 입력단의 전류가 고주파 트랜스를 통과한 경우에는 이와 반대로 전류는 10 배 증가 한다.

1차 측 홀센서의 출력값을 검출하여 2차 측의 부하에 흐르는 출력 전류를 추정하여 현재의 부하전류에 비례하는 홀센서 출력전압을 얻고 이 전압은 설정치와 비교하여 Δu인 에러 신호를 제어기에 인가하여 부하전력을 조절하였다.

본 실험에 인가된 전력은 콘덴서 최대 충전 전압 300V, 인덕터 최대 전류 30A이다. 최대 전류는 홀센서 최대 검출시 5V의 출력 전압이 된다.

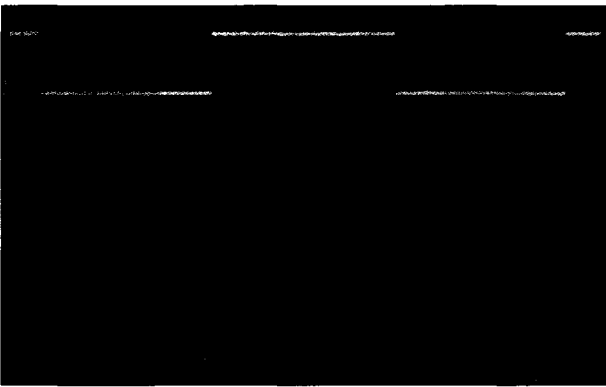


그림 10. 인버터 게이트 신호  
Fig. 10 Inverter gate signal

그림 10.은 실험장치의 인버터 게이트 신호 파형을 나타내었다. 이 때 가지 단락을 위하여 데드타임을 2 μSec를 주었다.

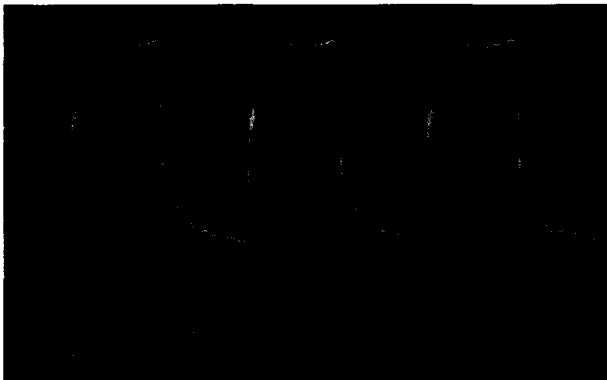


그림 11. 인버터 출력전류 및 출력전압  
Fig. 11 Inverter output current & voltage

그림 11.는 인버터 출력 전류와 출력 전압을 나타내었다. 구형파는 인버터의 출력전압이고, 정현파는 출력 전류이다

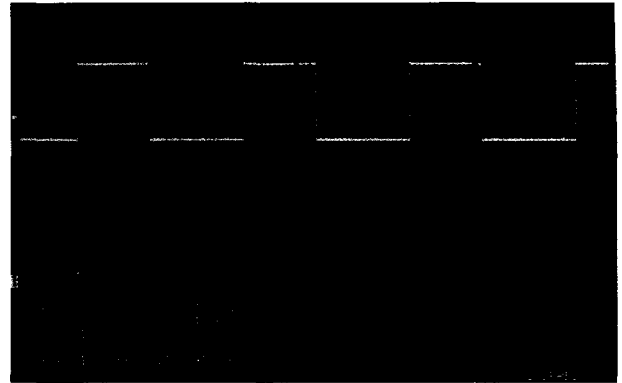


그림 12. FTPM방식을 이용한 위상지연 파형  
Fig. 12 Phase delay waveform

그림 12.는 부하 공진 주파수를 추종하면서 인버터 시스템에 위상 지연된 출력 주파수를 보내는 파형을 나타내고 있다. 여기서 위상 지연정도에 따라 유도성 또는 용량성 부하를 만들 수 있다. 는데 본 실험에서는 출력 전류와 출력 전압을 동일한 위상으로 하는 위상지연 출력 주파수를 내보낸다.

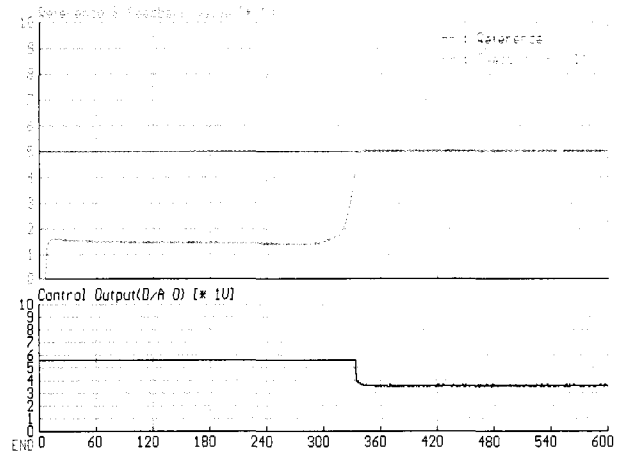


그림 13. 설정치, 피드백 값, 제어신호 파형  
Fig. 13 Reference value, feedback value, control signal waveform

그림 13.은 부하를 가열하면서 프로세스로부터 받은 값을 PC상에서 보인 것이다. 피 가열 물체가 가열되기 전 퍼지 제어기는 큰 정상상태 오차를 보이고 있다. 이 때 제어기의 출력은 최대이다. 피가열 물체인 철이 큐리점에 접근 할 수록 피 가열 물체의 임피던스가 감소하여, 동일한 제어 출력에 대하여 피드백 전류가 급작스럽게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 때 퍼지 제어기는 제어출력을 감소해서 콘덴서의 충전 전압을 감소하여, 부하에 흐르는 전류는 설정치를 추종하도록 한다. 이 후 부하의 출력이 설정치에 접근하면 출력은 정상상태 오차가 최소인 상태를 유지하면서 전류가 흐르도록 제어한다.

실험에 관한 각 설정값의 변화를 표 2에 나타내었다.

표 2. 설정치, 피드백 값, 제어 출력값  
Table. 2 Reference value, feedback value, control output value

Time (Sec)	설정값(전류)			피드백 값			제어 출력	
	설정 전압	1 차 (A)	2 차 (A)	홀 센서	1 차 (A)	2 차 (A)	PWM	D/A (V)
0	5	50	500	0	0	0	255	5.6
60	5	50	500	1.5	9	90	255	5.6
300	5	50	500	1.5	9	90	255	5.6
310	5	50	500	1.7	11	110	255	5.6
320	5	50	500	2	12	120	255	5.6
330	5	50	500	3	18	180	255	5.6
340	5	50	500	4	24	240	174	3.8
350	5	50	500	5	30	300	173	3.8
360	5	50	500	5	30	300	172	3.8
420	5	50	500	5	30	300	172	3.8

## VI. 결론

금속물체의 가열이 이루어짐에 따라 부하의 임피던스가 큐리점 이후 급격하게 변화하였지만, 퍼지 논리 제어기는 부하의 전력조절을 안정적으로 해주었다. 기존 직렬 공진형 유도 가열기의 문제점인, 철 금속의 큐리점 부근에서의 피 가열 물체의 급격한 임피던스 감소로 인해 전력조절이 용이 하지 않고, 시스템의 안정을 확보하기 어려웠으나, 병렬 공진형 유도 가열기는 큐리점 부근에서 피가열 물체의 임피던스가 급격히 감소하여도 부하에 흐르는 전류를 제어하여 전력 조절이 용이하다는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서 설계한 퍼지 논리 제어기는 철과 같은 시변 부하에 있어서 큐리점을 경계로 하여 부하 임피던스가 급격하게 변화하여도 부하의 공진 주파수를 추종하면서 정전력 조절이 가능한 정전류원 병렬 공진형 인버터의 주제어기로 사용하여 보다 효율적이고, 안정적인 유도 가열을 행할 수 있었다.

또한, 본 시스템은 IGBT를 사용한 전류형 인버터 병렬 공진 회로 방식에 특징이 있고, 유도 가열중에 생기는 용해된 금속으로 인한 공진회로 L의 단락이나, 정전등의 사고에 대한 보호는 전압형 인버터에 비해서 간단하다.

## 참 고 문 헌

[1] R. L. Steigerwald, "High Frequency Resonant Transistor DC-DC Converters", IEEE Trans. Ind. Electronics, Vol. IE-31, No. 2, pp.181-188, May, 1984.  
[2] H.Akagi, T.Sawae, A.Nabae, "130 kHz 7.5kW Current Source Inverters Using Static Induction Transistors

for Induction Heating", IEEE Trans. on PE, Vol.3 No.3, pp.303-309, July, 1988.

[3] C. C. Lee, "Fuzzy logic in control systems : Fuzzy logic controller-part I, II", IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol. 20, no. 2, pp. 404-435, Mar./Apr. 1990.  
[4] Han-Xiong Li and H. B. Gatland, "A New Methodology for Designing a Fuzzy Logic Controller", IEEE Transaction on System, Man, and Cybernetics, Vol. 25, No. 3, pp. 505 ~ 512, 1995.  
[5] 장중승, 박종오, 설재훈, 임영도, "퍼지 제어를 이용한 PFM방식과 PWM방식의 고주파 유도가열기 설계", 한국 퍼지 및 지능 시스템 학회 논문집, Vol. 8, No. 2, pp. 43 ~ 49, 1998.  
[6] 장중승, 김승철, 임영도, "뉴로퍼지 제어를 이용한 고주파 유도 가열기의 시변 부하에 대한 정전력 제어", 한국해양정보통신학회논문집, Vol. 2, No. 2, pp.223~230, 1998.  
[7] 이광형, 오길록, "제어 이론 및 응용 I, II권", 홍릉과학 출판사, 1991.



김 태 언 (Tae-Eon Kim)

準會員

1996 : 동아대학교 전자공학과 졸업  
1998 : 부산대학교 대학원 졸업(석사)  
2002 : 동아대학교 대학원 수료(박사)



김 남 수 (Nam-Soo Kim)

準會員

2001 : 동아대학교 전자공학과 졸업  
2003 : 동아대학교 대학원 졸업(석사)



임 영 도 (Young-Do Lim)

正會員

1973 : 동아대학교 전자공학과 졸업  
1978 : 동아대학교 대학원 졸업(석사)  
1993 : 동아대학교 대학원 졸업(박사)  
현재 : 동아대학교 전기·전자·컴퓨터 공학부 교수