

# 전류공급 Push-pull형 ZVS 고주파 발진전원장치

( Current-fed Push-pull type ZVS high frequency oscillating power supply)

송진화 서철식 이경호 김종해 노재균

( Jin-hwa Song ,Cheol-sik Seo ,Kyung-ho Lee , Jong-hae Kim , Chae-kyun Noh )

## Abstract

This paper proposes a current-fed type high frequency inverter using a soft switching technology Zero-Voltage-Switching to reduce turn on and off loss at the switching. The analysis of the proposed circuit was described by using normalized parameter and operating characteristics have been evaluated as to switching frequency and parameters. The theoretical results are in good agreement with the experimental ones.

In the future,the proposed circuit is considered to be useful for induction heating applications.

## 1. 서론

최근 Power-MOSFET, IGBT 및 SIT 등 자기 소호 능력을 가진 전력용 스위칭 반도체소자가 실용화 되어 대전력 고주파 유도가열용 전원, 정보통신용 전원장치 등 소형 경량화를 요하는 전력변환 제어장치에 많이 사용되고 있다.

전력용 스위칭 반도체소자를 고속 스위칭함에 따른 문제점으로는 스위칭시에 발생하는 스위칭 손실의 증가를 들 수 있다.

이러한 스위칭 손실의 증가는 전력용 반도체 스위칭 소자에 발열을 유발시킬 뿐만 아니라, 장치전체의 효율을 저하시키고, 냉각장치의 대형화를 가져오므로 신뢰성 및 관리상에 여러 가지 문제점을 가진다.

회로 출력 주파수의 고주파화에 따라 스위치에 발생하는  $dv/dt$ ,  $di/dt$ 의 스트레스 경감과 스위칭 손실의 최소화를 위해 ZVS(Zero-Voltage-Switching), ZCS (Zero-Current-Switching) 및 E급 스위칭 등의 스위칭기법을 적극 도입한 전력변환회로에 관한 연구가 널리 행해지고 있다.[1][2][7]

따라서 본 논문은 상기와 같은 기술적 배경을 기초로 하여 Sealing Wax용 전원에 적용 가능한 push-pull형 ZVS부하 공진 고주파 인버터의 기본 동작원리 및 특성에 관해 기술하고 있다.

또, 회로해석에 범용성을 부여하기 위하여 무차원화 파라미터를 도입하였고 수치해석과 Pspice를 이용하여 회로의 동작특성을 해석·평가하였다.

또한, 회로해석 결과를 기초로 한 회로 설계기법의 일 예도 제시하고 있다.

## 2. 전류형 고주파 공진인버터

### 2.1. 주회로 구성 및 동작원리

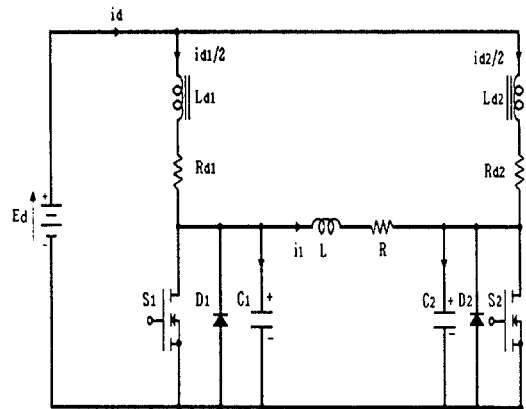


그림 1. 전류형 고주파 공진인버터  
Fig. 1. Current fed high frequency resonant inverter

그림 1은 본 논문에서 제안하고 있는 전류형 고주파 공진 인버터의 스위치 양단에 공진용 커패시터( $C_1, C_2$ )를 연결하여 스위칭시 발생하는 스위칭 손실을 최소화 시킬수 있는 인버터 회로구성을 나타내고 있다.

스위칭 소자( $S_1 \sim S_2$ )로는 Power-MOSFET, Po

wer -TR, MCT, IGBT, SIT 등 고주파 전력용 자기소호형 소자가 사용될 수 있으며, 역병렬 다이오드( $D_1, D_2$ )는 회로 운전 특성상 나타나는 무효전류를 흘려주기 위한 통로로 사용되고 있다. 회로는 L-R- $(C_1, C_2)$ 로 되는 공진루프를 구성하고 있으며 부하는 유도 가열 부하를 상정하였다.

회로 구성에서 알 수 있듯이 제안한 인버터는 전류형이면서 ZVS 동작이 가능하고, 또한 스너버용 커패시터를 공진용 커패시터로 사용이 가능하다. 더욱이, 1석형 전류형 인버터에 비해 스위치의 전류부담이 적다는 특징을 가지고 있다.

### 2.2. 회로 해석

그림 2는 그림 1의 인버터 회로에서 고주파 출력 전력을 제어하기 위한 방법으로 스위칭 소자( $S_1, S_2$ )에 인가하는 구동신호 패턴과 이에 따른 각 소자에 나타나는 정상적인 전압 및 전류파형을 나타내고 있다.

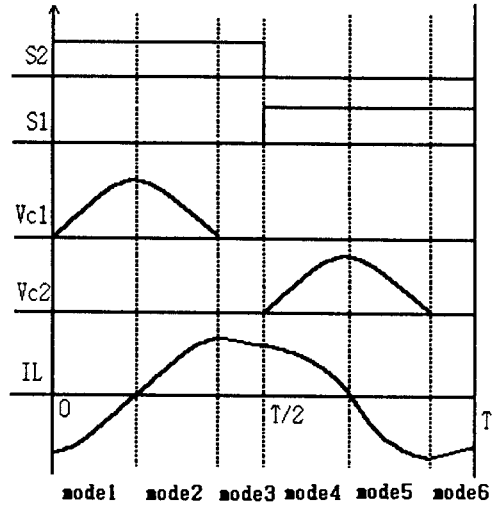
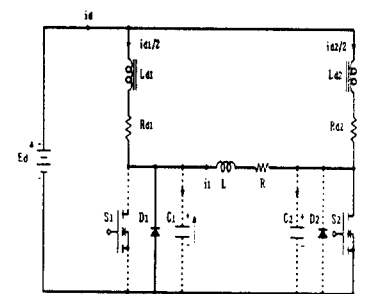
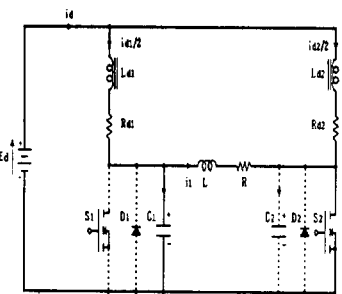
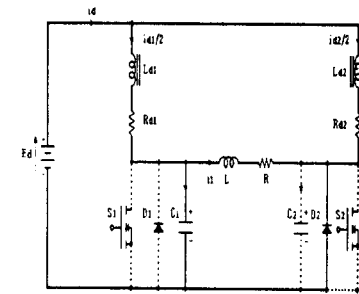


그림 2. 구동신호 패턴과 이론파형  
Fig. 2 Drive switching signal pattern & Theoretical waveforms

MODE1 ( $S_1, S_2$ ): 오프,  $D_1$ : 오프,  $D_2$ : 온

MODE2 ( $S_1$ : 오프,  $S_2$ : 온,  $(D_1, D_2)$ : 오프

MODE3 ( $S_1$ : 오프,  $S_2$ : 온,  $D_1$ : 온,  $D_2$ : 오프



MODE4 ( $S_1, S_2$ ): 오프,  $D_1$ : 온,  $D_2$ : 오프

MODE5 ( $S_1$ : 온,  $S_2$ : 오프,  $(D_1, D_2)$ : 오프

MODE6 ( $S_1$ : 온,  $S_2$ : 오프,  $D_1$ : 오프,  $D_2$ : 온

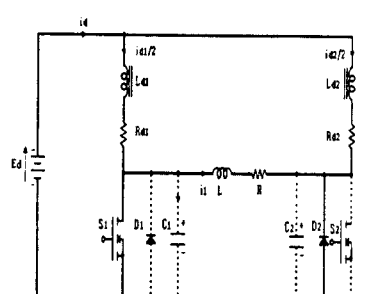
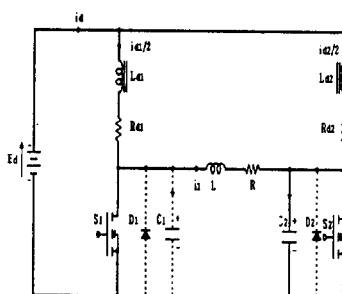
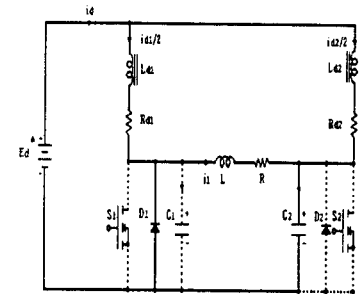


그림 3. 등가 회로의 동작모드  
Fig. 3. Equivalent circuit of Operating mode

표 1. 무차원화 파라메타  
Table. 1. Normalized parameters

	Reference Values	Normalized Values
Voltage	$E_d$	$V^*(z)=V(t)/E_d$
Current	$I=E_d/Z_s$	$i^*(z)=i(t)/I$
Time	$T_o=1/f_{sw}$	$Z=t/T_o$
Frequency	$f_r=1/2\pi\sqrt{L_s C_s}$	$\mu=f_{sw}/f_r$
Impedance	$Z_s=2\sqrt{L_s/C_s}$	$\lambda=R/Z_s$ $\lambda_1=R_{d1}/Z_s=R_{d2}/Z_s$
Power	$P_s=E_d \cdot I$	$P^*(z)=P(t)/P_s$
Remarks	$f_{sw}$ : Operating Frequency of Inverter $T_o$ : Operating Period of Inverter $L_s = L$ , $C_s = C_1 = C_2$ $\frac{L_{d1}}{L} = \frac{L_{d2}}{L} = \alpha$	

회로의 동작모드는 그림 1의 스위칭 소자(S1, S2)와 다이오드(D1, D2)의 온·오프 동작과 C1, C2의 충·방전에 의해서 6개의 모드로 분류할 수 있다.

그림 3은 각 동작 모드에 대한 등가 회로를 나타내고 있으며 회로 해석에 범용성을 부여하기 위하여 각 모드에 따른 회로 상태 방정식은 표 1에 나타난 무차원화 제어변수를 도입하여 표현하였다.

회로의 파라메터( $\lambda$ ,  $\mu$ )를 설정하고, 초기값을 설정한 후에 무차원화 시간 Z를 0에서부터 1까지를 한 주기로 하여 임의의 step으로 증가시키면서 스위칭 전류의 방향과 각 소자에 나타나는 전압의 크기와 방향을 비교하여 동작모드를 판정하고 있다.

정상상태에 도달했는지의 판정은 모든 상태변수의 초기치와 최종치와의 절대값의 차가 지정한 오차 범위내로 들어오면 정상상태로 판정을 하여 제특성값을 산정하였다.

그림 4는 전류형 고주파 인버터의 각 부 이론 파형을 보여주고 있다. 그림 (a)는  $\mu = 0.8$ 일 경우의 이론 파형이고, 그림 (b)는  $\mu = 1.0$ 일 경우의 이론 파형이다.

$\mu < 1.0$  인 경우에는 그림 3에서와 같이 6개의 모드로 동작한다. 그렇지만 그림 1의 고주파 인버터가 자기여자방식으로 제어할 경우, 즉  $\mu = 1.0$  일 때에는 그림 3의 동작모드에서 mode3과 mode 6이 제외된 4개의 모드로 동작한다

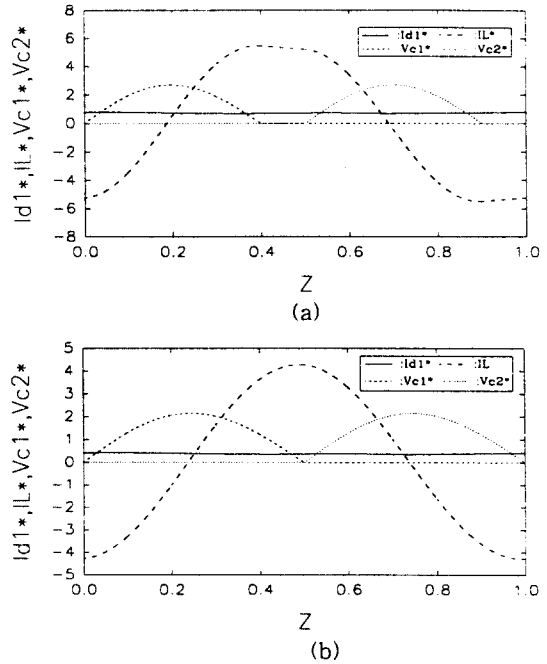


그림 4. 이론파형  
Fig. 4. Theoretical waveforms

### 3. 특성평가

그림 5는 무차원화 주파수( $\mu$ )와 무차원화 부하 저항( $\lambda$ )를 파라메터로 하였을 경우 최대 출력 전력특성( $P_{max}^*$ )을 나타내고 있다. 특성도에서 보는 바와 같이,  $\lambda$ 가 일정한 경우  $\mu$ 가 감소함에 따라  $P_{max}^*$ 는 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

$\mu$ 변화시,  $\mu \approx 1.0$ 에서 출력 특성의 크기가 가장 적게 나타났으며,  $\mu \approx 1.0$ 을 벗어날수록 그 값이 점점 커짐을 알 수 있다. 이는  $\mu \approx 1.0$ 을 벗어나게 되면, 부하 회로에 무효전력이 발생하므로 전원에서 이를 감당할 전원 공급 전력이 증가 하기 때문에  $P_{max}^*$ 가 증가하게 된다.

무차원화 주파수( $\mu$ )의 변화에 따라 출력 전력이 변화하고 있으므로, 인버터 회로를 유도 가열계에 적용할 경우 스위칭 주파수를 가변 시킴으로써 출력 전력을 제어할 수 있다.

그림 6에서 알 수 있듯이  $\lambda$ 에 대하여  $\mu$ 가 증가할수록  $V_{C1max}$  값은 감소하는 특성을 나타내고

있다.

공진용 커패시터의 최대 전압은 인버터 부하의 최대 전류를 적분한 값으로 주어진다.

그림 7은 무차원화 주파수( $\mu$ )와 무차원화 부하 저항( $\lambda$ )을 파라미터로 하였을 경우의 스위칭 전류의 최대치 특성( $i_{sum}^*$ )을 나타내고 있다.

그림 6과 그림 7의 특성은 사용하는 스위칭 소자와 공진용 커패시터의 설계시 정격을 결정하는데 중요한 자료로 사용된다.

그림 8은 무차원화 주파수( $\mu$ )와 무차원화 부하 저항( $\lambda$ )의 변화에 따른 입력 전류( $i_d^*$ )에 대한 부하 전류( $i_L^*$ )의 이득 파형이다.

전류 이득식은 다음과 같다.

$$GAIN = 10 \log \frac{i_{out}^*}{i_{in}^*} [dB]$$

여기서  $i_{in}^* = i_d^*$ ,  $i_{out}^* = i_L^*$  이다.

전류 이득은  $\mu = 1.0$ 에서 가장 크며,  $\mu = 1.0$ 을 벗어 날수록,  $\lambda$ 가 증가할수록 감소함을 알 수 있다.

그림 9의 경우  $\lambda = 0.03$ 로 일정하게 하고, 무차원화 주파수( $\mu$ )를 변화 시켰을 경우의 부하 전류의 고조파 함유율을 나타내고 있다.

그림 10의 경우  $\lambda = 0.03$ 로 일정하게 하고, 무차원화 주파수( $\mu$ )를 변화 시켰을 경우의 부하 전압의 고조파 함유율을 나타내고 있다.

고조파 함유율은  $H_n$ 은  $i_n / i_1$ 로 정의하여 계산하였다.

단,  $i_1$ 은  $i$ 의 기본파 성분을 나타내며,  $i_n$ 은  $i$ 의 제  $n$  고조파 성분이다.

$H_n$ 의 스펙트럼에서 알 수 있듯이 고조파 함유가 적은 출력 전류를 발생하고 있음을 보여주고 있다.

그림 9과 그림 10에서  $\mu = 1.0$ 인 경우가 고조파 함유율이 거의 영으로 나타나고 있으며,  $\mu = 0.8$ 에서는 고조파 함유율이  $\mu = 1.0$ 인 경우에 비해서 높다는 것을 알 수 있는데, 특히 제 3고조파의 영향이 가장 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

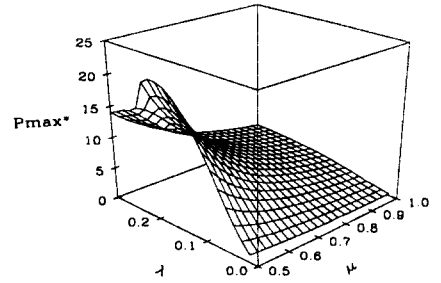


그림 5. 출력 특성  
Fig. 5. Characteristics of Output Power

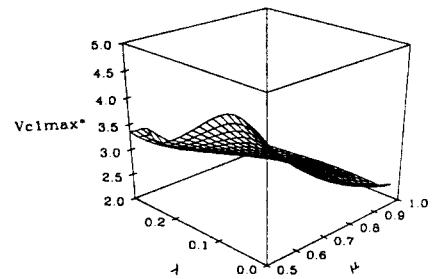


그림 6. 커패시터의 최대전압 특성  
Fig. 6. Characteristics of Peak Capacitor Voltage

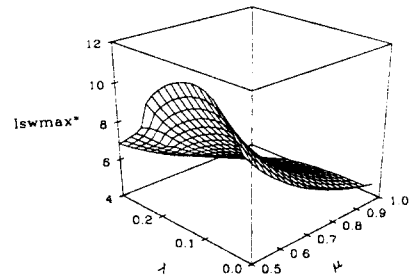


그림 7. 스위치 최대 전류 특성  
Fig. 7. Characteristics of Peak Switching Current

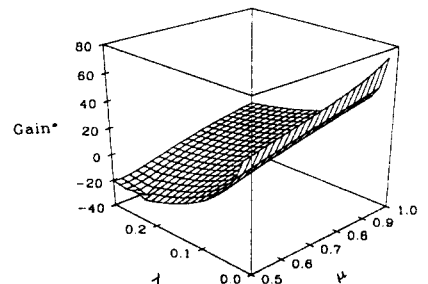


그림 8. 전류 이득 특성  
Fig. 8. Current Gain Characteristics

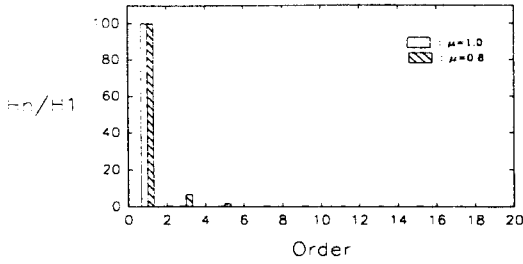


그림 9. 부하전류의 고조파 함유율 특성  
Fig. 9. Harmonic Characteristics of Output Current

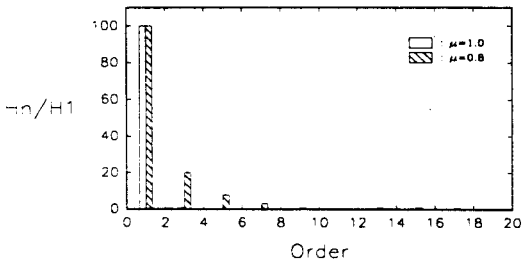


그림 10. 부하전류의 고조파 함유율 특성  
Fig. 10. Harmonic Characteristics of Output Voltage

#### 4. 회로 설계

회로 특성평가에서 얻은 결과를 기초로 하여 입력전압  $E_d$  (V), 출력전력  $P$  (kW), 출력주파수  $f_{sw}$  (kHz)가 설계 사양으로 주어진 경우 회로 설계법의 일 예는 다음과 같다.

Step 1. ( $\mu$ ,  $\lambda$ ,  $P_{max}$ )를 결정 [그림 5참조]

Step 2. 기준 임피던스 산출

$$P^*(Z) = \frac{P}{P_s} = \frac{P}{E_d^2 / Z_s}$$

$$Z_s = \frac{E_d^2 \cdot P^*(Z)}{P} = 2\sqrt{\frac{L_s}{C_s}}$$

Step 3. 회로 고유 주파수  $f_r$  (kHz) 산출

$$f_r = \frac{f_{sw}}{\mu} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}}$$

Step 4.  $L_s$ ,  $C_s$  산정

Step 5. 커패시터 전압 및 부하전류 산출

$V_{C1max}$  : [그림 6참조]

$i_{s1max}$  : [그림 7참조]

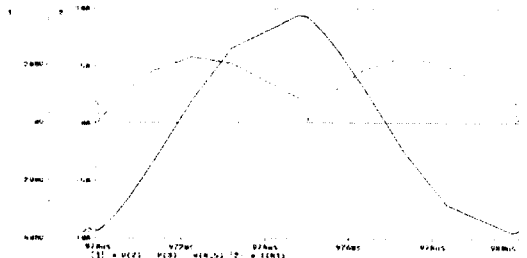
#### < 설계 예 >

STEP에 의해서 설계된 회로 설계 수치 예는 표 2와 같다.

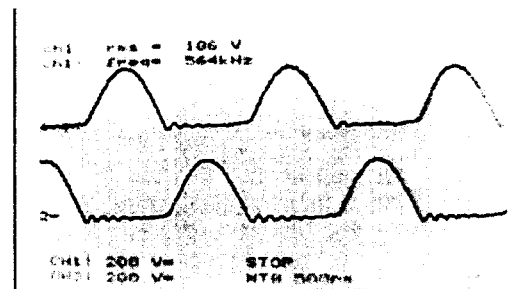
표 2. 설계 수치 예  
Table 2. Example of design

Circuit Parameter	$E_d = 100[V]$ , $P = 1[kW]$
$L_s$	36.229 [ $\mu H$ ]
$C_s$	69 [nF]
$I_{s1max}$	7.593 [A]
$V_{C1max}$	208.11[V]

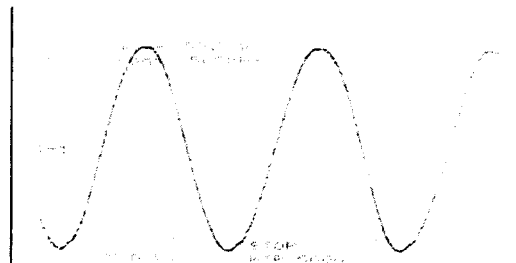
그림 11(a)는 범용시뮬레이터 툴인 Pspice를 사용한 시뮬레이션 파형을 보여주고 있고, 그림 11(b), (c)는 위의 설계를 바탕으로 한 실험 파형을 보여주고 있다.



(a) Pspice 파형  
(a) Pspice waveforms



(b)  $V_{C1}$  ·  $V_{C2}$  실험파형  
(b) Experimental waveforms



(c)  $I_L$  실험파형

(c) Experimental waveforms

그림 11. Pspice 파형과 실험 파형  
Fig. 11. Pspice and Experimental waveforms

## 5. 결론

본 연구는 ZVS를 도입하여 출력주파수의 고주파화에 따른 스위칭 손실을 저감시킬수 있는 전류형 고주파 공진 인버터를 연구 대상으로 하여 회로 동작과 특성을 이론적으로 검토하였다.

제한한 고주파 인버터에 Sealing Wax를 유도가열 부하로 선정하여, 설계 전 단계에 필요한 특성 평가를 무차원화 파라미터( $\mu, \lambda$ )를 도입하여 범용성 있게 기술하였다.

이론 해석의 정당성을 입증하기 위하여 이론 해석을 통해서 얻은 특성값을 기초로 하여 회로를 설계하고, Power-MOSFET를 스위칭 소자로 하여 회로를 구성하여 얻은 실험결과와 이론 해석의 결과를 비교·검토하여 실험결과와 이론 결과가 거의 일치함을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] K. Harade, H. Sakamoto and M. Shoyama, "Phase controlled DC-AC converter with high frequency switching", IEEE Trans. Power Electron. Vol. 3, No. 4, pp. 406-411, 1988.
- [2] A. Takeuchi et. al: "Zero-Voltage-Switching Controlled High Power-Factor Converter", PESC96, Vol. 1, pp.1859~1864, 1996.
- [3] Herman L. N. Wiegman: "A Resonant pulse Gate Drive for High-Frequency applications", APEC' 92, pp. 738~743, 1992.
- [4] W. E. Frank et. al: "New Induction Heating Transformers", IEEE, Vol. MAG18, NO. 6, pp.1752~1755, 1982.
- [5] M. Kamli, S. Yamamoto and M. Abe, "A 50-150 KHz Half-Bridge Inverter for Induction Heating Application", IEEE Trans. Ind. Electron, Vol.43, No.1, pp 163-171, Feb.1996.
- [6] L. Grajales et. al., "Design of a 10kW, 500kHz Phase-Shift Controlled Series-Resonant Inverter for Induction Heating". IEEE-IAS Conf. Rec., pp 843-849, 1993.
- [7] 배기훈, 심광열, "ZVS를 이용한 지체식 고주파 인버터의 특성해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1993.
- [8] 송진화, 김동희, 노재균외 4명 "지체식 전류형 고주파 공진 인버터의 특성해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1999.