

플라즈마 살균효과 향상을 위한 공진형 인버터 전원시스템

(A Resonance Inverter Power System for Improving Plasma Sterilization Effect)

서기영* · 문상필 · 정장근 · 김주용

(Ki-Young Suh · Sang-Pil Mun · Jang-Gun Jung · Ju-Yong Kim)

요 약

전기 에너지를 이용한 살균장치는 화학적인 과정이 없으며, 2차적인 환경 오염도 발생시키지 않는 장점을 가지고 있다. 또한 전력변환회로에는 영전류 스위칭과 영전압 스위칭을 사용한 소프트 스위칭 토폴로지에 의하여 스위칭 손실을 감소시키고, 장치의 크기를 소형화시킬 수 있는 장점이 있다. 제안한 전원장치는 기존의 장치들보다 출력전류가 매우 적어 전원 시스템으로 제작할 경우 소형화가 가능하며 가격이 저감될 수 있다. 따라서 이 전원 장치는 전력 소비가 적고 전력 변환이 급격한 곳에 적합하다.

Abstract

A sterilizer equipment by using electrical energy has merits that no process of chemical and no second environmental pollution. Also, the power conversion circuit for sterilizer equipment has merits that are reducing switching loss for soft switching topology by using zero current and zero voltage switching, and miniaturizing size of equipment. The proposed power device which has lower output current than other devices is possible to be compacted in it's size and reduced it's price if the proposed power device is used for power system. Therefore, it is adapted for both less power consumption and sudden power conversion

Key Words : sterilization, DC-DC converter, phase-shift full-bridge Inverter

1. 서 론

최근 살균처리 방법 중 여러 가지 방법이 많이 연구되어지고 있지만, 그 중에서 고온 살균처리 방법이 가장 일반적으로 이용되어 진다. 하지만 이 방법은 내용물을 파괴하는 단점이 있다[1]. 화학적인 살균 처리 방법도 있지만 약품의 유독성 잔여물이 남기 때문에 2차 오염이 발생한다. 현재에는 방사선을

사용해서 박테리아를 제거하는 방법이 있으나, 방사선의 보호, 사용의 불편성, 운반중의 오염, 높은 가격 등의 단점이 있다[2]-[3]. 이러한 이유로 본 논문에서는 2차 오염이 없고 내용물을 직접 파괴 시키지 않는 비열 플라즈마를 이용하여 대기 플라즈마를 발생시켜 분말 형태의 균을 살균 하고자 한다.

제안한 살균 전원 장치는 기존의 전력변환회로 [4]-[9]와 비교하여 공진 소프트 스위칭 기법으로 스위칭 손실과 고조파를 저감시켜 전원 부분을 안정화 시킵니다 동시에 안정한 플라즈마를 발생시켜 살균력과 에너지효율을 높이고, 입력 전류를 불연속적으로 동작하게 함으로써 입력 전류를 정현파로 만들어 고역율화를 시도하고자 한다. 그리고 출력 필터를 이

* 주저자 : 경남대학교 전기전자공학부 교수
Tel : 055-249-2630, Fax : 055-249-2630
E-mail : skiyoung@kyungnam.ac.kr
접수일자 : 2004년 2월 9일
1차심사 : 2004년 2월 11일
심사완료 : 2004년 4월 1일

플라즈마 살균효과 양상을 위한 공진형 인버터 전원시스템

용하여 출력 선간전압 파형을 정현파화하여 고조파를 제거하고자 한다.

또한, 보조 부분공진에 의한 영전압, 영전류 동작시의 하드 스위칭시의 손실과 소프트 스위칭시의 손실, 출력전압의 증대와 고조파 제거성능을 분석하고자 한다. 이러한 모든 사항은 실험을 통하여 그 타당성을 입증하고자 한다.

2. 플라즈마 살균용 전원장치의 구성

제안한 플라즈마 살균용 전력변환장치의 실험회로도를 그림 1에 나타내었다. 회로구성은 직류 입력측 정류부와 인버터부 사이에 부분공진 기법이 적용된 소프트 스위칭 모드 승압형 컨버터를 접속한다. 부분공진 회로부는 제어소자들($S_1 \sim S_2$)과 승압 및 공진용 인덕터(L_r), 그리고 공진용 무손실 스너버 커패시터(C_r)로 구성되며, 커패시터에 축적된 에너지는 스위치 S_1 , S_2 의 턴-온 시에 전원측으로 회생되는 모드를 가진다. 스위치 S_1 , S_2 는 턴-온 시에 공진용 인덕터(L_r)의 전류가 불연속적으로 제어되므로 영전류 스위칭으로 되고, 턴-오프 시에는 공진용 커패시터(C_r)의 전압이 영으로 될 때 동작하므로 영전압 스위칭으로 된다. 본 논문에서는 플라즈마를 인가하기 위한 실험장치를 구성하여 미생물의 살균율을 조사하고자 한다. 그림 2는 플라즈마 반응기의 등가회로를 나타낸 것이다. 그림 2에서 인가전압이 낮은 경우에는 GAP의 정전용량 C_a 와 유리 유전체의 정전용량 C_g 가 직렬회로로 구성되며, 인가전압이 높은 경우에는 GAP이 방전을 개시하고, 이때 GAP전압은 방전유지전압 V_z 에 클램프하게 된다. 일반적으로 발생관 인가전압이 저감하면 안정한 방전을 유지하지만 만일 전압이 높아지면 절연파손에 의해 관이 손상되므로 발생관 인가전압 V_b 를 적정치로 유지할 필요가 있다. 그리고 실험을 위해 제작된 전력변환장치는 영전압, 영전류 스위칭 손실 저감 기법을 적용한 인버터 회로로서 삼상 380[Vac], 60[Hz]를 정류, 네온변압기를 통하여 AC 10[kV]~12[kV]를 플라즈마 반응기에 인가한다.

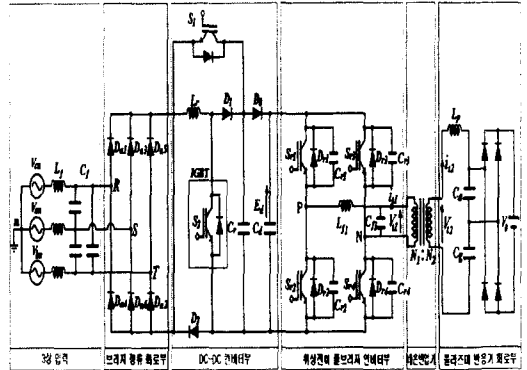


그림 1 플라즈마 살균용 전력변환장치의 실험회로도
Fig. 1 Experimental circuit of power conversion equipment for plasma sterilization

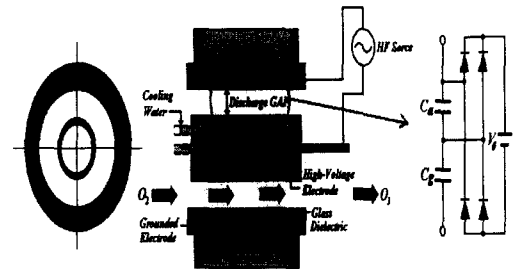


그림 2 플라즈마 반응기의 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of plasma reactor

회로동작 모드 해석을 위하여 출력 부하측 인덕턴스가 공진용 인덕턴스와 비교하여 충분히 큰 것으로 가정하면, 공진 1주기 동안에는 인버터부를 정전류원 I_0 로 보는 것이 가능하다. 그림 3은 스위칭 한 주기에서의 각 동작모드별 등가회로를 나타내고 있으며 네 가지 동작모드로 구분된다. 공진회로부의 초기 조건으로 스위치 S_1 , S_2 는 오프이며, 공진용 커패시터(C_r)에는 클램프용 커패시터(C_d)의 전압 V_{Cd} 로 충전되어 있다.

■ Mode 1 ($T1$, $t_0 < t \leq t_1$) : 시각 t_0 에서 스위치 S_1 과 S_2 를 동시에 턴-온 하면, 회로 경로는 $V_{d+} - L_r - S_2 - C_r - S_1 - V_{d+}$ 의 직렬공진 회로로 된다. 턴-온 직전의 공진용 인덕터(L_r)의 전류 i_{L_r} 는 영이므로 S_1 , S_2 는 영전류 스위칭으로 동작한다.

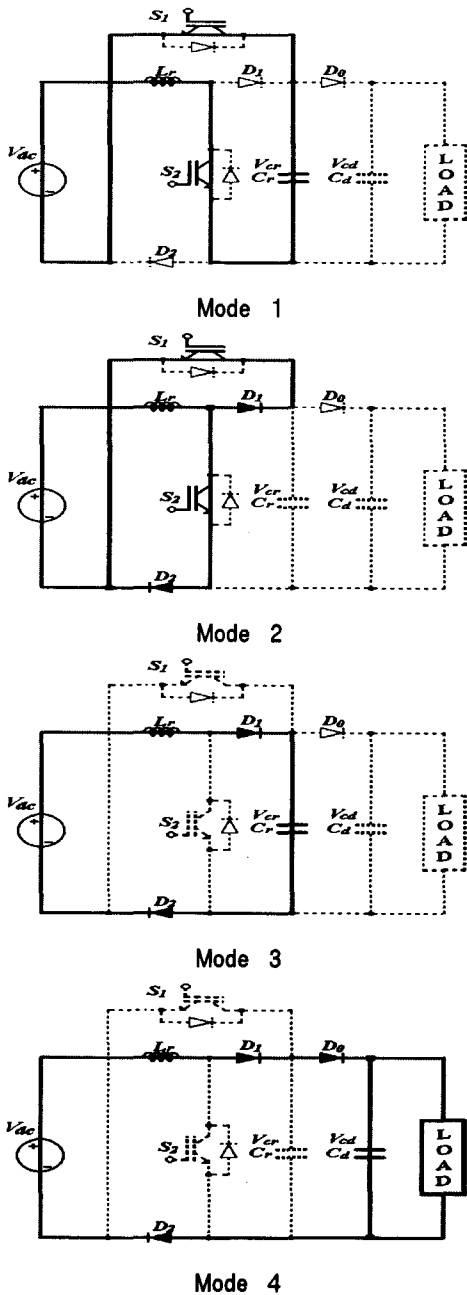


그림 3 등가회로의 동작 모드
Fig. 3 Operation mode of equivalent circuit

■ Mode 2 ($T_2, t_1 < t < t_2$) : 공진용 커패시터(C_r)의 전압 V_{Cr} 이 영으로 되어 다이오드 D_1, D_2 가 도통되는 모드이다. 제어 스위치들에 의한 단락회로가

형성되어 공진용 인덕터(L_r)의 전류는 D_1-S_1, S_2-D_2 의 두 회로로 분류되어 흐른다. 이 모드 기간에서 공진용 인덕터(L_r)는 에너지를 축적한다. 이 때의 인덕터 전류 i_{Lr} 는 직선적으로 증가한다. 인버터 부의 스위치들은 이 기간에서 절환 동작이 되어 영전압 스위칭이 가능하다.

■ Mode 3 ($T_3, t_2 < t < t_3$) : 시각 t_2 에서 스위치 S_1, S_2 를 오프하면, 공진용 인덕터(L_r)의 전류는 $D_1-C_r-D_2$ 를 통하여 흐르며, 공진용 인덕터(L_r)와 공진용 커패시터(C_r)는 직렬공진을 하여 충전된다. 공진용 커패시터(C_r)와 병렬로 배치된 스위치들의 턴-오프 동작은 공진 초기의 공진용 커패시터(C_r)의 전압이 영이므로 영전압 스위칭으로 동작된다.

■ Mode 4 ($T_4, t_3 < t < t_4$) : 공진용 커패시터(C_r)의 전압이 클램프용 커패시터(C_d)의 전압으로 되면, 공진용 인덕터(L_r)의 전류 i_{Lr} 는 다이오드 D_0 를 통하여 클램프용 커패시터(C_d)를 충전시키고, 동시에 부하측으로 유입되어 직선적으로 감소한다. 모드 4는 공진용 인덕터(L_r)의 전류 i_{Lr} 이 영이 되면 끝난다.

위의 네가지 동작모드는 스위치 S_1, S_2 의 스위칭 한 주기 동작에 대한 것으로서 스위칭 일정 시비율에 의해 지속적으로 반복된다. 그 결과 공진용 커패시터(C_r)의 전압은 지속적인 부분공진 동작에 의해 클램프 된 진폭을 가진 공진 펄스열의 파형으로 되어 인버터부의 입력단에 가해진다. 인버터부의 SPWM 제어신호에 의해 동작하는 스위치들은 일정 듀티율로 동작하는 부분공진 회로부의 스위치들과 동기화되어 커패시터(C_r)의 전압이 영으로 될 때 동작하여 소프트 스위칭을 이룬다.

그림 4는 스위치 S_1, S_2 의 한 주기에 해당하는 게이트 신호와 그에 따른 각부 파형을 나타내고 있다. 사용된 스위치 S_1, S_2 는 소프트 스위칭 동작을 한다. 그림 5에 위상 전이 브리지 방식의 동작파형을 나타내었다. 그림 5에서 안정한 영전압 스위칭 동작영역(ZVS-ASO)을 확보하기 위하여 스위치 $Sr2$ 와 $Sr4$

플라즈마 살균효과 향상을 위한 공진형 인버터 전원시스템

에 대한 게이트 신호가 스위치 Sr1과 Sr3에 대하여 위상전이 되게 함으로써, 2차측 전압이 영(0)인 시간 간격 동안 1차측 스위치 중 하나가 항상 온되게 제어한다. 이는 변압기의 누설 인덕턴스 L과 스위칭 소자의 기생접합 커패시턴스 ($C_{r1}, C_{r2}, C_{r3}, C_{r4}$)의 기생진동 문제를 해결 할 수 있도록 누설 인덕턴스 L에 따른 전류를 순환시키기 위한 저 임피던스 경로를 제공시켜준다. 누설 인덕턴스 L에 저장된 에너지는 스위치의 기생접합 커패시턴스에 저장된 에너지를 방전시키는데 사용되며 이는 1차측 스위치들이 영전압 스위칭 동작을 한다. 각각의 주 스위칭 소자는 약 50[%]의 시비율을 가지고 교번적으로 온/오프 동작을 하고, 위상전이 동작에 따라 인버터의 유효 제어 시비율이 결정된다.

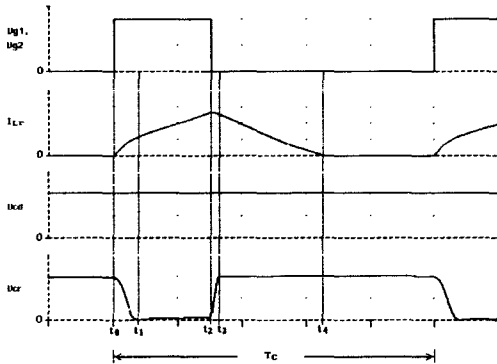


그림 4 DC-DC 컨버터부의 각부 파형
Fig. 4 The each part waveforms of DC-DC converter

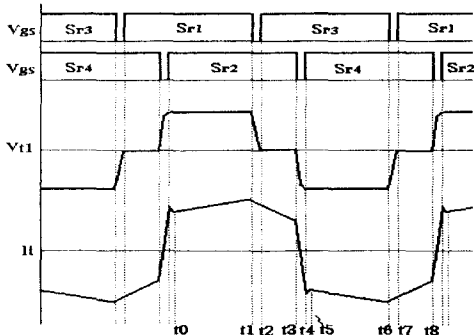


그림 5 위상전이 풀브리지 인버터의 동작 파형
Fig. 5 Waveforms of phase-shift FB inverter

3. 실험 결과의 검토

본 논문에서 상용 교류 380[V], 60[Hz]를 다이오드 정류기와 부분공진형 컨버터를 이용하여 맥동성분이 제거된 직류전압을 발생시켜 전압형 인버터와 네온 변압기를 이용하여 12[kV], 60[Hz]까지 승압한 후 공진 리액터와 커패시턴스로 구성된 직렬 공진회로에 의해서 방전에 필요한 전압을 생성시키게 된다.

표. 1 시뮬레이션과 실험에 사용된 컨버터의 회로정수
Table. 1 The converter circuit parameter using simulation and experiment

항 목	값	
입력 전압 V_i	380[V]/60[Hz]	
출력 전압 E_d	600[V]	
플라즈마 발생관 입력 전압 V_0	10[kV]~12[kV]	
입력 필터	C_f	100[uH]
	L_f	10[uF]
공진 인덕터 L_r, L_p	150[uH], 100[mH]	
공진커패시터 (C_r, C_a, C_g)	100[nF], 6000[pF], 9000[pF]	
평활용 커패시터 C_d	2200[uF]	
부하 전류원 I_0	0.4[mA]	
스위칭 주파수 f_s	20[kHz]	
듀티율 D	20[%]~40[%]	



그림 6 플라즈마 살균용 전원장치의 실험도
Fig. 6 The apparatus of power device for plasma sterilizers

제안한 회로의 실험에 사용된 회로 정수는 표 1과 같으며, 그림 6에 실제 제작한 살균용 전원장치의 실

물도를 나타낸 것이다. 그림 7은 전력 변환장치의 입력 전압과 전류 파형을 나타낸 것이며, 그림 8은 스위치 S_1 과 S_2 에 인가한 게이트 신호 파형이다.

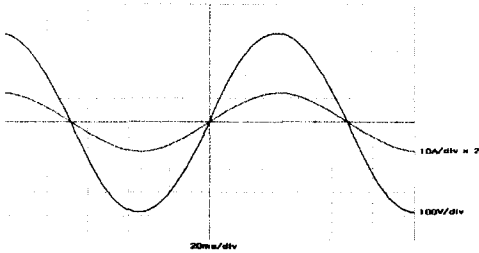


그림 7 제안한 회로의 입력 전압과 전류 파형
Fig. 7 Waveform of input voltage and current

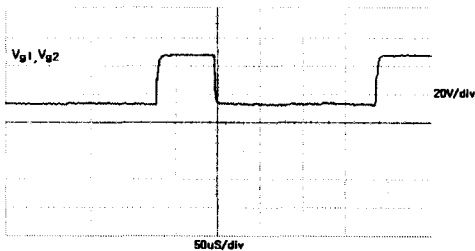


그림 8 스위치 S_1 , S_2 의 게이트 신호
Fig. 8 Gate signal of switch S_1 , S_2



그림 9 플라즈마 반응기
Fig. 9 Plasma reactor

그림 9는 실험에 사용된 플라즈마 반응기를 나타낸 것이다. 반응기의 형태는 침대 평판 반응기로서 가장 대표적인 불평등 전계를 발생시킬 수 있는 형태로서 인가 전압의 상승에 따른 플라즈마의 성장을 뚜렷이 구분할 수 있다. 이 때문에 인가 전압에 따른 살균 효과의 성장분석에 가장 적합하다 생각 되어

본 실험에서 침대 평판형 반응기를 사용하게 되었다. 그림 10, 11은 플라즈마 반응기에 인가된 전압이 각 10[kV], 11[kV], 로 변환했을 때 반응기의 입력 전압, 출력 전류 파형을 나타낸 것이다. 플라즈마 반응기에 플라즈마가 발생되면 전압 상승에 따라 매우 높은 아크성 펄스가 발생하게 된다. 이 아크성 펄스는 입력측으로 흘러 들어 입력 전압의 불균형을 가지고 오지만 제안한 전원장치에서는 그림 10, 11과 같이 아크성 펄스가 발생하더라도 그림 7과 같이 일정한 입력 전압이 흐른다.

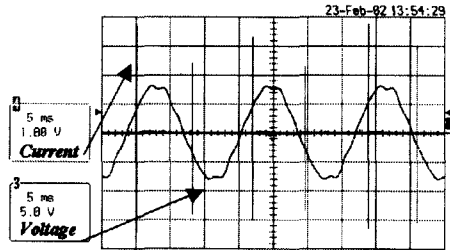


그림 10 인가전압이 10(kV)일 때 입력 전압과 출력 전류 파형
Fig. 10 Waveform of input voltage and output current while permit voltage is 10(kV)

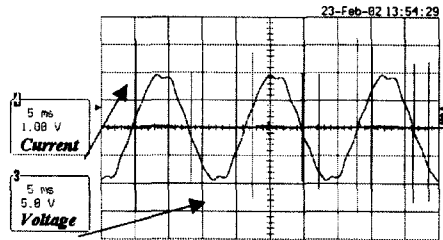


그림 11 인가전압이 11(kV)일 때 입력 전압과 출력 전류 파형
Fig. 11 Waveform of input voltage and output current while permit voltage is 11(kV)

그림 12는 실제 곰팡이를 가지고 살균시킬 때 인가된 전압과 시간에 따른 배양된 곰팡이의 사진을 나타낸 것이다. 실험에 사용된 시료의 형태는 밀가루와 같은 미세분말(수미크론)타입이다. 그림 13은 곰팡이를 가지고 살균하였을 때 인가한 전압과 시간에 따른 곰팡이의 살균 수를 나타낸 것이고 표 2는 살균율을 나타낸 것이다. 결론적으로 인가전압의 상승과 처리시간의 증가는 10[kV] 10[min]일 때 98[%]

의 살균율이 나타났으며 그 이상의 환경에서는 포화 곡선이 나타나며, 10[kV], 10[min]과 11[kV], 5[min] 일 때 가장 효율적인 살균현상이 일어나는 것을 확인하였다. 10[kV]보다 11[kV]일 때 살균율이 다소 떨어진 이유는 반응기 내의 균일한 밀도의 플라즈마 에너지를 조사시킬 수 없었기 때문에 나타나는 오차인 것으로 사료된다.

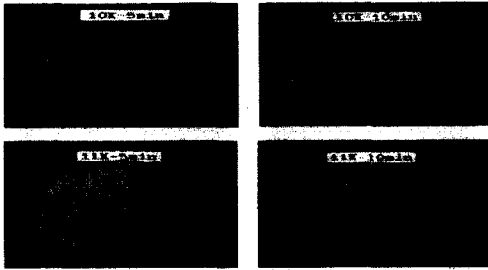


그림 12 인가전압과 시간에 따라 살균된 뒤에 배양된 곰팡이의 사진
Fig. 12 The picture of mould cultivated which is after sterilization for input voltage and time

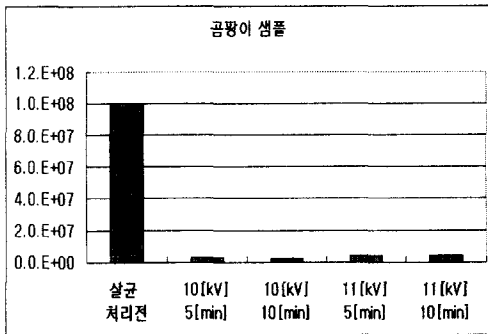


그림 13 살균된 곰팡이와 인가전압 및 시간의 특성
Fig. 13 The mould which sterilizes and input voltage and characteristic of time

표 2 인가된 전압과 시간 및 살균율
Table. 2 The input voltage and time and sterilizing ration

인가전압(kV) \ 시간(min)	표준	10(kV) 5(min)	10(kV) 10(min)	10(kV) 10(min)	10(kV) 10(min)
검출된 곰팡이 수	100×10 ⁶	3.0×10 ⁶	2.0×10 ⁶	4.0×10 ⁶	3.9×10 ⁶
살균율 (%)	0%	97%	98%	96%	96.1%

4. 결 론

본 논문에서는 플라즈마 살균용 전력 변환 장치를 설계하여 곰팡이가 포함된 분말가루를 실험장치에 투여 한 후 살균율을 측정하였으며, 실험을 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 공진용 컨버터 시스템을 제안함으로써 전기적 으로 전 시스템의 보호제어, 고효율, 고역률 및 전자 노이즈 스위칭 손실의 저감화를 용이하게 할 수 있다.
- 2) 인버터의 출력전력을 넓은 범위에서 선형적으로 제어하여 회복전류펄스를 유지, 공급함으로써 오존 발생관의 전압상승의 응답속도를 높일 수 있다.
- 3) 일반적인 전원 장치는 아크성 펄스가 입력측으로 흘러들어 입력전압의 불균형을 가지고 오지만 제한한 전원 장치는 일정한 입력전압을 가진다.
- 4) 분말에 대하여 살균율이 97~98%로 이므로 소비전력이 적은 분말 살균용 플라즈마 전원 장치로 사용이 적합하다.

이상에서의 모든 사항은 실험에 의해서 그 타당성을 증명하였으며, 제안한 회로를 플라즈마 발생용 전원장치에 적용한다면 속용성을 지닌 제어장치로 적절하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구는 2003학년도 경남대학교 학술논문게재연구비 지원으로 이루어졌습니다.

References

- (1) 川村光男, "마이크로파基礎工學", 『昭晃堂』, 1981.
- (2) 露木英男, 首藤厚, "食品의 마이크로파加熱", 『建帛社』, 1974.
- (3) 日本電氣學會, "高周波用デバイス又電力半導體 應用の技術動向" 電氣學會技術(II部) 第271號, pp.20~27, 1997.
- (4) K.Kit sum and Bruse W. Carsten, "Trends in High Frequency Power conversion", HFPC, pp.198~204, May, 1998.
- (5) H.J. Song, K.S.Lee, D.I.Lee, "A study on the high voltage nozzle type ozonizer", 11th International Conference on Gaseous Discharge and Their Applications. Vol. 2, pp.

- 320~323, 1995.
- [6] 石井哲夫, “ 妨電によゾソの發生機構る装置” 三秀書齋, pp 31~63, 昭和66.
 - [7] Shengpei Wang, Yoshihiro Konishi, “ Voltage-Fed Pulse Density and Pulse Width Modulation Resonant Inverter for silent Discharge Type Ozonizer”, H11 電氣學 會産業
 - [8] 石井哲夫, “ 妨電によゾソの發生機構る装置” 三秀書齋, pp 31~63, 昭和66.
 - [9] A. Tsul, “Commutating SOA Capability of Power MOSFET”, IEEE APEC, pp . 481~485, 1990.

◇저자소개◇

서기영 (徐基永)

1942년 4월 18일생. 1965년 한양대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현 경남대 전기전자공학부 교수.

문상필 (文相弼)

1975년 2월 9일생. 1997년 부경대 전기공학과 졸업. 1999년 경남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학).

정장근 (鄭章根)

1969년 10월 28일생. 1997년 경남대 전기공학과 졸업. 1999년 경남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학).

김주용 (金周容)

1977년 12월 1일생. 2002년 경남대 전기전자공학부 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현 경남대 대학원 전기공학과 박사과정.