

# 램프형 오존발생기용 Forward type 고주파 펄스 전원장치의 특성에 관한 연구

(A study on characteristics of the forward type high frequency pulse power supply for lamp type ozonizer)

김경식\* · 김동희\*\* · 이광식\*\* · 원재선\*\* · 송현직\*\*

(Kyung-Sik Kim · Dong-Hee Kim · Kwang-Sik Lee · Jae-Sun Won · Hyun-Jig Song)

## 요 약

본 논문은 최근의 반도체 스위칭 소자(Power-MOSFET)를 사용하여 상용화의 관점에서 회로구성이 간단하고 취급이 용이한 Forward형 펄스 전원장치에 관하여 기술하고 있다.

Forward형 고주파 펄스 전원장치에 인가되는 펄스전압의 최대값은 브리지 정류회로의 위상각 제어에 의해서 이루어지고 있으며, 펄스전압은 Power-MOSFET의 듀티비에 의해 펄스주기가 정해진다.

또한, 본 논문에서는 Forward형 펄스 전원장치의 회로동작과 전원장치의 특성 및 전원장치의 방전특성을 스위칭 주파수와 위상각의 변화에 따라서 검토하였다.

첨가해, 펄스 전원장치를 제작하여 램프형 오존발생기를 부하로 하였을 때 이론해석과 특성해석의 정당성을 입증하였다.

본 장치는 향후 다양한 분야로의 펄스 전원 시스템에 응용 가능성을 보여주고 있다.

## Abstract

This paper describes the forward type pulse power supply which is the simple circuit configuration and easy to be managed using a power semiconductor switching device(Power-MOSFET) in the view of commercialization.

The maximum value of output pulse voltage of the proposed pulse power supply system can be realized by the variation of phase angle( $\phi$ ) of bridge rectifier circuit and also its pulse period is determined by the duty ratio of Power-MOSFET.

The principle of basic operating and the operating characteristics of the forward type pulse power supply are estimated by the switching frequency, the variation of phase angle( $\phi$ )

It is shown that theoretical and experimental results are in good agreement by comparing simulation and experimental results of proposed pulse power supply when a lamp type ozonizer can be used as a load.

This proposed pulse power system shows that it can be practically used in the future as a power source system in various fields.

Key Words : Forward type, High frequency, Pulse transformer, Ozonizer

\* 정회원 : 경북전문대학 전기설비과

\*\*정회원 : 영남대학교 전기·전자공학부

접수일자 : 2000년 2월 15일

## 1. 서 론

전력용 반도체 스위칭 소자들이 속속 개발되어, 이들을 사용한 전력 전자기술이 날로 발전하고 있다. 전력 전자기술은 대전력 고주파 등의 전력변환에 관한 다양한 응용분야를 구축하고 있다.[1][2]

산업사회의 발달로 대기 및 수질오염 등이 리우환경 회의 이후, 심각한 국제 환경과피 문제로 부각되고 있으며, 국내에서도 화석연료 및 자동차 사용의 급증에 따라서 연소시에 발생하는 대기 오염물질로 인한 자연과피, 농장물 피해, 스모그 현상 및 산성비 등으로 국민의 건강 및 보전에 심각한 위협이 초래되고 있다.

상술한 바와 같이, 환경과피 문제가 사회적인 문제로 부각됨에 따라 환경오염물질을 정화하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.[3][4][5]

펄스 파워기술의 그 응용분야가 환경정화뿐만 아니라 반도체 장치의 고집적화에 따른 미세가공과 어류 양식분야에 이르기까지 다양하게 응용되고 있다.

펄스 파워기술은 종래의 고전압·대전류 공학을 기초로 하여 콘덴서 및 인덕터 등에 저장된 초기 전자에너지를 시간적으로 성형·중첩·압축하여 수ns~수ms의 짧은 시간안에 고출력(10[TW] 이상도 가능)을 발생시켜 좁은 공간에 에너지를 집중 공급하는 기술이다[6]

지금까지의 펄스 발생용 전원장치는 상용주파수 전원을 입력으로 하여 콘덴서의 충·방전 전압에 의한 고전압 발생기(Pulse Generator)가 일반적으로 사용되어 왔고, 이러한 장치의 외형이 대형화 되어서 취급이 불편할 뿐만 아니라 가격면에서도 고가로 되는 단점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 상기와 같은 기술적 배경을 기초로 하여 상용화의 관점에서 회로구성이 간단하고 취급이 용이한 Forward형 펄스 전원장치의 회로동작과 전원장치의 특성 및 전원장치의 방전특성을 검토하였다.

더욱이, 펄스 전원장치를 제작하여 램프형 오존발생기를 부하로 하였을 경우, 이론해석과 특성해석의 정당성을 입증하였다.

## 2. Forward형 고주파 펄스 전원장치

### 2.1 주회로 구성 및 회로해석

그림 1은 본 논문에서 고주파 고전압 출력전압을 발생시키기 위한 Forward형 고주파 펄스 전원장치의 주회로 구성을 나타내고 있다. 펄스 전원장치에 인가되는 펄스전압의 최대값은 브리지 정류회로의 위상각제어에 의해 이루어지고 있으며, 펄스전압은 Power-MOSFET의 듀티비(duty ratio)에 의해 펄스 주기가 정해진다.

일반적으로 고주파 펄스전압의 경우 펄스발생에는 7[kV]의 펄스전압이 요구된다

본 회로의 특징은

- i) 회로구성이 간단하다.
- ii) 장치의 소형·경량화가 용이하다
- iii) 펄스 주파수 가변 및 펄스 상승시간 단축이 용이하다.
- iv) 상용화 시킬 경우에 가격면에서 유리하다는 등을 들 수 있다.

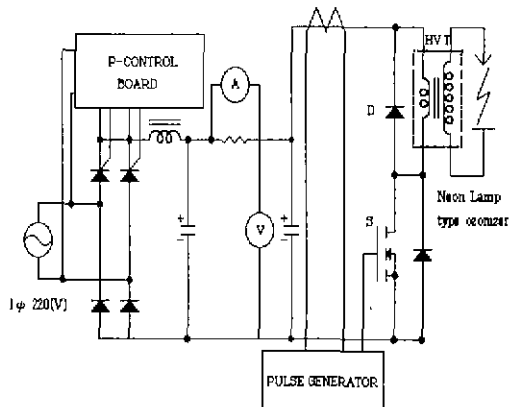


그림 1. Forward형 고주파 펄스 전원장치  
Fig. 1. Forward type pulse power supply

본 회로의 사양은 입력 전압 : 220(V), 1φ이며, 용량은 1(kVA), 사용 주파수는 0.4~3(kHz)으로 하였으며, 이러한 조건 하에서 출력 펄스 전압은 무부하시 최대전압은 15(kV)이며, 부하시 최대전압은 10(kV)이다.

그림 1의 회로의 동작모드는 스위칭 소자(S)와 다이오드(D)의 온·오프 동작에 따라서 두 개의 동작모드로 분류할 수 있다.

각 모드에 따른 회로 상태방정식을 회로해석을 행

하기 위하여 벡터-행렬 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{dX}{dz} = A \cdot X + B \cdot U$$

$$Y = C \cdot X$$

여기서,  $X = [ i_1(t) \ i_2(t) \ v_R(t) ]^T$

$$U = [ 1 \ 1 \ 0 ]^T, \quad j = \frac{M}{(M^2 - L_1 L_2)}$$

이고 각 모드별 A, B, C 는 다음과 같다.

**Mode 1**

$$A = \begin{bmatrix} \frac{jL_2 R_1}{M} & -jR_2 & -j \\ -jR_1 & \frac{jL_1 R_2}{M} & \frac{jL_1}{M} \\ 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}$$

$$B = [ -\frac{jL_2 E_d}{M} \quad jE_d \quad 0 ]^T$$

$$C = [ 0 \ 1 \ 0 ]$$

**Mode 2**

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -jR_2 & -j \\ 0 & \frac{jL_1 R_2}{M} & \frac{jL_1}{M} \\ 0 & \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}$$

$$B = [ 0 \ 0 \ 0 ]^T$$

$$C = [ 0 \ 1 \ 0 ]$$

2.2 고압 펄스 변압기

고압 펄스전압을 발생하기 위해 고주파에 동작하는 승압용 변압기가 필요하다. 고압 펄스 변압기를 제작함에 있어 우선적으로 고려하여야 할 사항은 1차와 2차권선간의 절연과 펄스 전압을 전송시 발생하는 권선간의 분포 정전용량이다.

고주파 고전압 변압기의 설계에 있어서 1차권선은 단층구조로 구성하고 2차권선은 다층구조로 구성되어 층간의 표유 정전용량에 의한 무효전류가 흘러 펄스 전원장치의 전력변환 효율이 저하된다.

이러한 무효전류는 전압에 의존하기 때문에 특히 경부하 조건일 경우에는 효율을 더욱더 저하시키게 되는데 이러한 것을 막기 위해서는

- i) 철심의 재질은 Ferrite Core를 사용
- ii) 1,2차 권선 양분배치 (1차 병렬, 2차 직렬)

1차권선을 병렬로 한 이유는 대출력의 전류가 흐를 때 1차측의 누설 인덕턴스를 격감시킬 수가 있고 2차측 권선을 직렬로 한 이유는 2차측의 표유 정전용량을 격감할 수 있기 때문이다.

따라서, 그림 2에서 보는 바와 같이 2차 권선을 분할 설치하였으며, 분포 정전 용량을 최소화시켜 고속 스위칭시 펄스의 링킹 현상을 억제시켰다. 그림 1 및 2의 고압 Pulse 변압기에 사용한 소자 및 정격은 표 1과 같다.

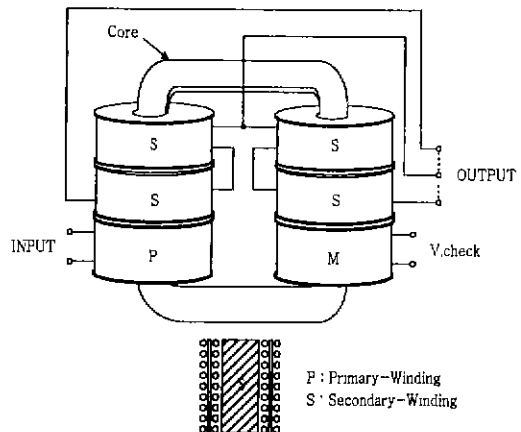


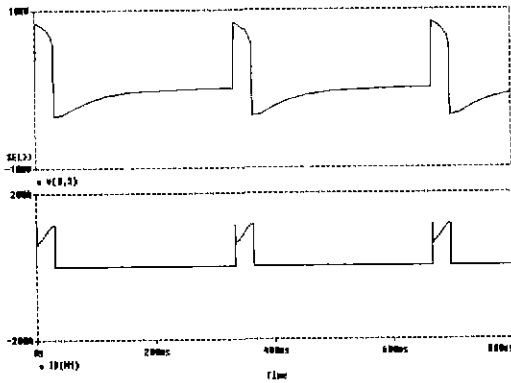
그림 2. 고압 펄스 변압기  
Fig. 2. High voltage pulse transformer

표 1. 사용한 소자와 정격  
Table 1. Using Devices and Rating

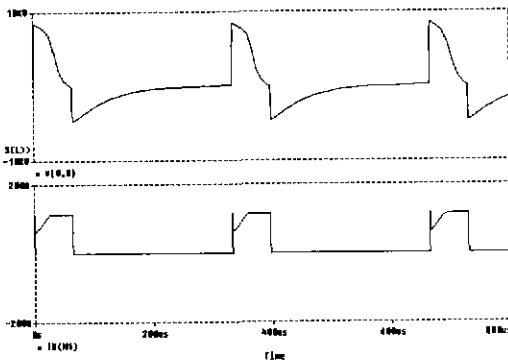
	Using Devices	Rating
1	MOSFET	400(V), 120(A)
2	Diode	600(V), 20(A) (High speed)
3	Primary side	4T(3.5mm <sup>2</sup> )
	Secondary side	200T(0.25mm <sup>2</sup> )
4	CORE	U Type ferrite (High frequency)

### 3. 고주파 펄스 전원장치의 특성

그림 3(a) (b)는 시뮬레이션 툴인 Pspice를 사용하여 스위칭 주파수 3(kHz)인 경우, 출력주파수와 듀티비에 따른 출력 전압(kV)과 스위치에 흐르는 전류(A)의 변화를 보여주고 있다.



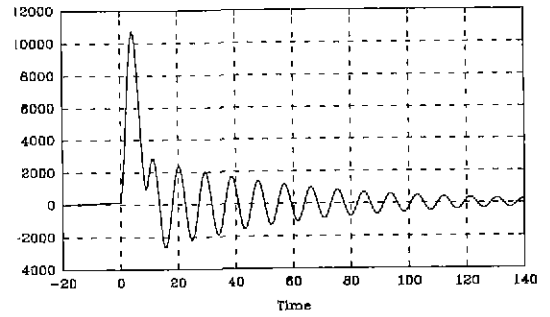
(a) 3(kHz), Duty Ratio 10%



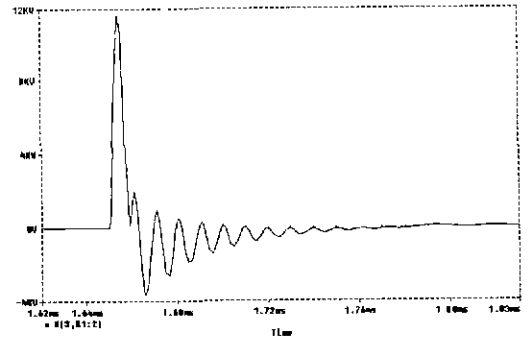
(b) 3(kHz) Duty Ratio 20%

그림 3. 출력전압 (kV) 과 스위치 전류 (A)  
Fig. 3. Output voltage and switch current

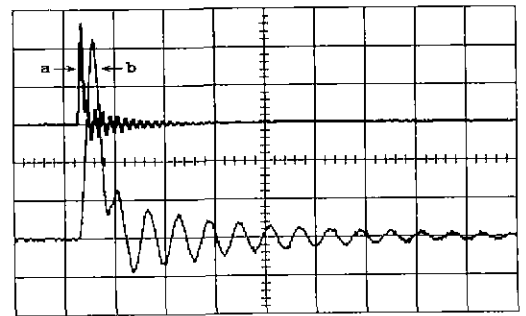
그림에서 알 수 있듯이, 듀티비가 적을수록 출력 전압과형 및 스위치에 흐르는 전류가 이상적인 펄스 파에 근접하고 있으며, 듀티비가 증가함에 따라서 고압변압기에 포화현상이 나타나 실제 출력 전압이 감소함을 알 수 있다.



(a) 이론과형



(b) Pspice과형



(c) 실험과형

(a) : (Voltage : 500V/div, Time : 20  $\mu$ s/div)

(b) : (Voltage : 250V/div, Time : 5  $\mu$ s/div)

그림 4. 무부하시 출력 펄스 전압  
Fig. 4. Output pulse voltage of no load

그림 4 (a)는 3(kHz), 출력전압 13(kV)의 경우, 이론해석을 통해서 얻은 무부하시 출력 펄스전압을 나타내고, 그림 4 (b)는 Pspice를 이용한 시뮬레이션을 통해서 얻은 무부하시 출력펄스 전압, 그림 4 (c)는 실험을 통하여 얻은 무부하시 출력 펄스전압을 나타내고 있다.

실측 파형으로부터 알 수 있듯이, Peak값까지 도달하는 상승시간은 1.4~1.8(μs)이고, Peak전압 상승률은 2~2.1(kV)/200(ns)이어서 효과적인 펄스 출력 전압임을 확인하였다.

수치해석한 이론파형과 Pspice파형 및 실험파형의 경향이 거의 일치하고 있어 이론해석의 정당성을 뒷받침하고 있다.

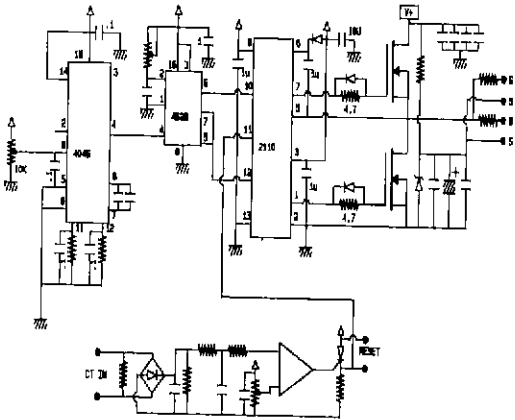


그림 5. 신호 발생 회로  
Fig. 5. Signal generation circuit

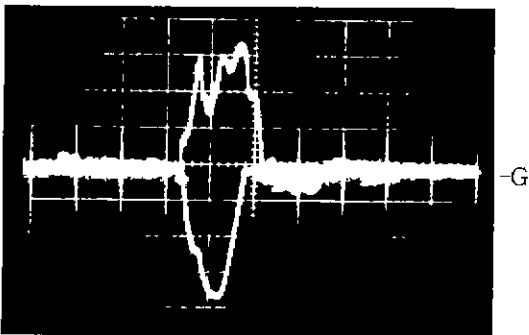


그림 6. 출력전압의 실측파형  
Fig. 6. Experimental waveforms of output voltage (3kV/div, 25A/div)

그림 5는 그림 1의 스위치(S)에 인가되는 펄스신호를 발생하는 신호 발생회로 및 스위치의 드라이브 회로를 보여주고 있다. 신호발생은 VCO 기능을 가진 MCI4046을 사용하여 출력주파수를 제어하고 있으며, MCI4528에 의해 듀티비를 변화 시키고 있다.

그림 6은 출력주파수 3(kHz), 듀티비 10(%)인 경우의 출력전압의 실측파형을 보여주고 있다. 실측파형으로부터 본 개발한 장치가 펄스 발생용 전원장치로서 유효함을 확인할 수 있다.

#### 4. 펄스 전원장치의 방전특성

그림 7은 고주파 펄스 전원장치를 부하인 램프형 오존발생기에 적용하여 방전특성 및 오존생성농도 특성을 연구하기 위하여 사용된 실험장치의 배치도를 나타낸 것이다.

이 오존생성농도는 램프형 오존발생기의 무성방전에 의하여 생성된 오존화 가스를 자외선 흡수방식의 기상용 오존 monitor(0~100,000[ppm], Okitronics社, 일본)를 사용하여 매 실험마다 0.3[l/min]로 표본추출하여 측정하였다. 여기서 원료가스의 온습도는 특별히 조정하지 않았으며, 램프형 오존발생기로부터 오존 monitor까지의 거리는 최단거리 300[mm]로 구성하였다.

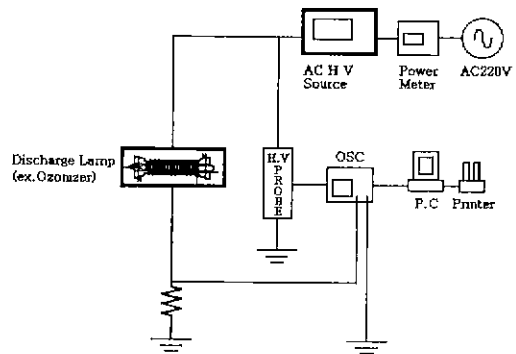


그림 7. 펄스전원장치와 램프형 오존발생기를 이용한 특성실험장치의 배치도  
Fig. 7. Arrangement diagram of characteristics test devices using pulse power supply and lamp type ozonizer

그리고 램프형 오존발생기의 방전특성을 조사하기 위하여 오존발생기로부터 출력되는 방전전압 및 그

때의 파형을 측정하였다. 이때 전압파형은 고전압 probe(주파수 대역; DC ~ 50[MHz], 내압; 50[kV], 분압비; 2000 : 1)에 의하여 감쇄된 전압을 Digital storage oscilloscope (LeCray 9350AL, 500[MHz], 1[Gs/s]), 퍼스널 컴퓨터 및 프린터를 사용하여 측정 및 출력하였다.

그림 8은 펄스 전원장치 출력전압의 최대치까지 도달하는 시간폭이 1.8[ $\mu$ s]이고 원료가스의 유량이 각각 2[l/min]일 때, 방전 전압 및 주파수 변화에 따른 오존생성농도 특성을 나타낸 것이다.

그림에서와 같이 각 주파수에서 방전 전압이 증가됨에 따라서 오존생성농도가 상승하였고, 방전전압이 일정한 경우, 주파수가 증가할수록 오존생성농도가 상승하였다.

즉, 주파수가 증가할수록 램프형 오존발생기의 gap에서 무성방전에 의하여 발생된 전자수는 무성방전의 발생빈도에 비례하게 되어 산소분자를 해리하여 오존을 생성하는 반응이 활성화되어, 오존 생성농도가 상승하는 것으로 사료된다.

그 결과 방전전압이 10.7[kV]이고 주파수가 3.0[kHz]인 경우 그림 8에서 최대 8600[ppm]의 오존생성농도를 얻을 수 있었다.

그림 9는 유량이 2[l/min]이고 방전전압이 10[kV]일 때, 펄스 전원장치 출력전압의 최대치까지 도달하는 시간폭의 변화에 따른 오존생성농도 특성을 나타낸 것이다.

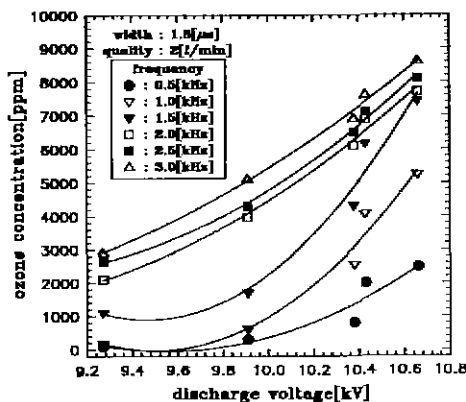


그림 8. 방전전압과 오존 생성 농도 특성  
Fig. 8. Characteristics of discharge voltage vs. ozone concentration

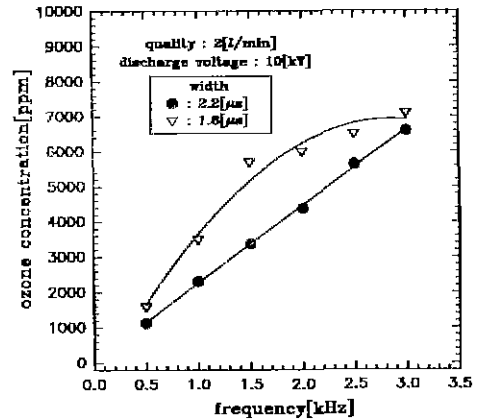
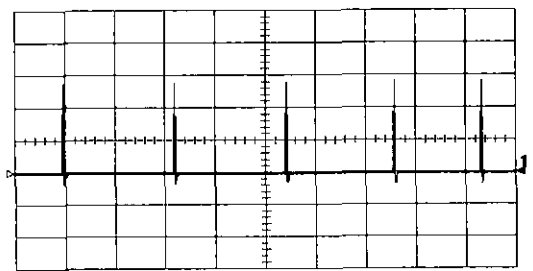


그림 9. 주파수-오존 생성농도 특성  
Fig. 9. Characteristics of frequency vs. ozone concentration

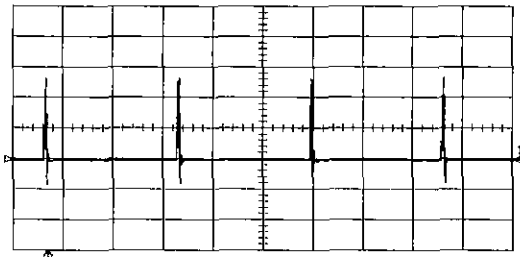
그림에서와 같이 주파수가 동일할 때, 1.8[ $\mu$ s]인 경우가 2.2[ $\mu$ s]보다 오존생성농도가 높게 나타났다.

즉, 무성방전에 의하여 발생된 전자가 산소원자, 산소분자 및 여기 산소분자와 충돌하여 오존을 생성하는 시간폭은  $\mu$ s로부터 ns로 갈수록 오존생성효율이 높은 것으로 알려져 있다.[4]

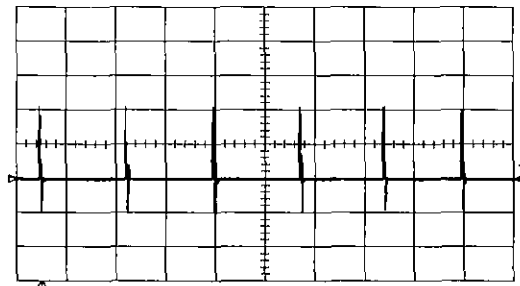
그림 10의 (a), (b), (c)는 펄스 전원장치 출력전압의 최대치까지 도달하는 시간폭이 1.8[ $\mu$ s]이고 방전 전압이 10.7[kV]일 때, 주파수의 변화에 따른 방전 전압 파형을 그림 11의 (a), (b), (c)는 램프형 오존발생기의 외관을 측정한 것이다. 사진에서와 같이 주파수가 증가할수록 오존을 생성하는 반응이 활성화된다는 것을 확인할 수 있었다.



(a) 5[kV/div], 0.5[ms/div], frequency · 1.0[kHz]

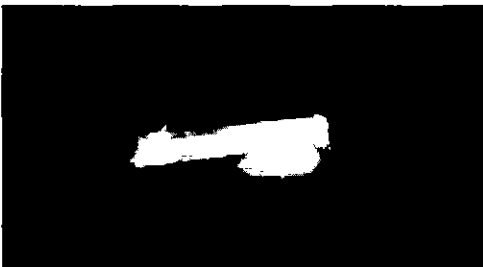


(b) 5[kV/div], 0.2[ms/div], frequency : 2.0[kHz]



(c) 6[kV/div], 0.2[ms/div], frequency : 3.0[kHz]

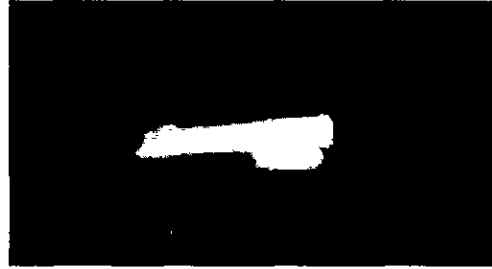
그림 10. 방전전압 파형  
Fig. 10. Waveform of discharge voltage



(a) 5[kV/div], 0.5[ms/div], frequency : 1.0[kHz]



(b) 5[kV/div], 0.2[ms/div], frequency : 2.0[kHz]



(c) 6[kV/div], 0.2[ms/div], frequency : 3.0[kHz]

그림 11. 램프형 오존발생기의 외관  
Fig. 11. Photograph of ozonizer

## 5. 결 론

본 논문은 최근의 반도체 스위칭 소자 (Power-MOSFET)를 사용하여 상용화의 관점에서 회로구성이 간단하고 취급이 용이한 Forward형 펄스 전원장치를 연구 대상으로 하여 회로동작과 전원장치의 특성 및 전원장치의 방전특성을 검토하였다.

펄스 전원장치는 출력전압의 주파수 및 펄스폭을 가변할 수 있도록 하여 방전량을 용이하게 조정하도록 하였다.

연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. Power-MOSFET를 적용하여 펄스 전원장치에 출력전압 10(kV)에서도 안정된 운전이 가능함을 확인하였다.
2. 본 장치의 전기적인 특성은 출력 Peak 전압까지 도달하는 상승시간이 1.4~1.8( $\mu$ s), 펄스까지 도달하는 상승률은 2~2.1(kV)/200(ns)로 효과적인 펄스 전압을 얻을 수 있었다.
3. 본 펄스 전원장치에서 출력되는 펄스전압으로 부하인 램프형 오존발생기에 적용하여 특성실험을 행한 결과 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

이상의 결과로부터 고주파·고전압 펄스 전원장치의 소형 경량화가 가능하여졌고, 상용화 시킬 경우 저 가격으로 경쟁력이 있으리라 사료된다.

향후 제안한 펄스 전원장치는 대장균 살균, 표면 살균, 탈색 및 NOx 가스제거 등과 같이 오존을 이용한 다양한 분야로의 활용이 가능할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] K. Kit Sum and Bruce W. Carsten "Trends in High Frequency Power Conversion", *HFPC*, pp. 198~204, May, 1988

[2] A. Tsui: "Commutating SOA Capability of Power-MOSF ETS", *IEEE APEC*, pp 481~485, 1990.

[3] C. Blanco: "An Improved Electronic Transformer for Low Power Halogen Cycle Lamps", *IEEE IAS*, vol. 3, pp. 197 9~1983, 1994

[4] H. J. Song, K. S. 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.

[5] 김종해, 배상준, 이영식, 조기연, 정성균, 이봉섭, "오존 발생기용 전원장치 개발 및 특성에 관한 연구", *전기학회 하계학술대회*, PEP 2, pp. 2069 ~2071, 1997

[6] 이형호, 김영배, "고전압·대전류 pulsed power의 이용 기술", *전기학회 하계학술대회*, DHO 14, pp.1678~1680, 1997

[7] Y. J. Kim and M. Nakaoka, "Comparative Characteristic Evaluations of Specially-Designed High-Voltage Transformer Parasitic Resonant PWM Inverter-Linked High-Power DC-DC Converter", *IEEE-PESC Preceedings*, pp. 120~127, June 1995.

[8] 김 경식, 원 재선, 송 현직, 김 동희, 이 광식, "Forward 형 고주파 펄스 전원장치", *한국조명·전기설비학회 학술대회 논문집*, 1-B-15, pp, 184~188, 1999.

김 동 희 (金東熙)

1950년 11월 20일생 1973년 영남대 공대 전기공학과 졸업 1975년 영남대 공대 전기공학과 졸업(석사) 1987년 Kobe대학 졸업(공학). 1987년~1989년 한국전기연구소 전력전자 연구부장 현재 영남대 공대 전기·전자공학부 교수.

이 광 식 (李廣植)

1948년 10월 20일생 1971년 영남대 공대 전기공학과 졸업 1987년 영남대 공대 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙 교수. 1995~1998년 당학회 대구·경북지회장. 현재 당학회 부회장. 대한전기학회 방전·고전압 연구회 간사장. 영남대 공대 전기·전자공학부 교수

원 재 선 (元載善)

1973년 2월 20일생 1995년 삼척대 공대 제어계측공학과 졸업. 1999년 영남대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1999년~현재 영남대 공대 전기공학과 박사 과정.

송 현 직 (宋炫直)

1968년 7월 30일생. 1991년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 공대 전기공학과 졸업(석사). 1997년 영남대 공대 전기공학과 졸업(박사). 현재 영남대 공업기술연구소 연구원.

◇ 저자소개 ◇

김 경 식 (金京植)

1958년 6월 13일생. 1987년 서울산업대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 영남대 공대 전기공학과 졸업(석사) 1998년 영남대 공대 전기공학과 박사과정 수료. 현재 경북전문대학 전기설비과 조교수. 한국조명·전기설비학회 대구·경북지회 이사