

# 40kV 친환경 응용을 위한 반도체 기반 펄스 전원장치

송승호, 조현빈, 박수미, 이승희, 진희성, 류홍제  
중앙대학교

## 40kV Solid State Pulsed Power Supply for Environmental Applications

Seung Ho Song, Hyun Bin Cho, Su Mi Park, Seung Hee Lee, Hee Sung Jin, Hong Je Ryoo  
Chung-Ang University

### ABSTRACT

This paper describes the 40kV solid state pulsed power supply for environmental applications. The output specifications of the pulsed power supply are 40kV, 300A, 3kHz, and average output power of 13kW. In order to generate a high voltage, a series stacking cell structure is used which is charged in parallel and discharged in series. Due to this structure, there is no dynamic voltage balancing problem as well as static voltage balancing problem for switches used in high voltage pulse power supplies. To verify this pulse power supply design, PSpice modeling was performed. Finally, experimental results with non inductive resistive load and gas treatment reactor proved the reliability of the solid state pulsed power supply.

### 1. 서 론

가스처리, 오폐수처리에는 여러 방법들이 사용되지만 고전압 펄스를 이용한 전기적 처리 방법은 부가적인 화학물질이나 열 에너지가 요구되지 않아 추가적인 환경오염을 방지하고 에너지 소모를 줄일 수 있다. 이와 같은 친환경 응용분야에 사용되는 펄스 전원장치는 빠른 상승시간 및 높은 반복률 등이 요구된다. 펄스 전원장치의 방전 스위치에는 기계적 스위치와 반도체 기반 스위치가 사용될 수 있다. 먼저, 싸이라트론, 스파크 갭과 같은 기계적 스위치를 이용하는 경우 스위치의 수명이 짧아 주기적인 교체가 요구된다는 단점이 있으며 특히, 펄스의 빠른 상승시간을 달성하기 어렵기 때문에 친환경 응용분야에 사용되기 어렵다. MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)이나 IGBT(Insulated Gate Bipolar Mode Transistor)와 같은 반도체 스위치를 이용하는 경우에는 스위치의 수명이 길어 반영구적으로 사용될 수 있으며 특히, 빠른 스위칭 특성으로 빠른 상승시간과 높은 반복률의 방전이 가능한 장점을 가지고 있어 최근 반도체 기반의 펄스전원장치가 활발히 연구되고 있다.<sup>[1] [2]</sup>

반도체 기반의 펄스 전원장치는 스위칭 소자의 전압전격이 낮아 높은 출력전압을 위해서 커패시터를 병렬로 충전하고 직렬로 방전하는 막스 제너레이터 방식의 다단 파워셀 구조를 가지는 고전압 펄스 전원장치가 제안되었다.<sup>[2]</sup> 본 논문에서는 높은 반복률과 빠른 상승시간을 가지며, 원하는 펄스폭, 반복률,

전압의 변동이 가능한 40kV 반도체 기반의 펄스 전원장치의 구조에 대해 소개한다. 또한 개발된 펄스 전원장치를 이용하여 친환경 가스처리 시스템을 구성하였으며, 가스처리 리액터 구동실험 및 가스처리 실험을 통해 개발된 펄스 전원장치가 친환경 응용에 효과적으로 사용될 수 있음을 검증하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 40kV 반도체 기반 펄스 전원장치

개발된 펄스 전원장치는 크게 충전부와 방전부로 나뉘며, 충전부는 13kW의 용량을 가지는 고효율 LCC 공진형 컨버터로 설계됐고 방전부는 40kV의 펄스를 방전하기 위해 다단 파워셀 구조로 설계되었다. 개발된 펄스 전원장치의 상세 사양은 표 1과 같다.

표 1 개발된 펄스 전원장치의 상세 사양  
Table 1 Specification of the designed pulsed power supply

Pulse output voltage	0 40kV
Pulse output current	0 300A
Average power	13kW
Pulse repetition rate	1 3kHz
Pulse width	1.5 5μs
Pulse rising time	< 400ns (300A output)
Storage Capacitor	ICEL DCB 900V 15μF
Discharging IGBT	IXYK120N120C3

#### 2.1.1 펄스 전원 장치의 구조

개발된 펄스 전원장치의 구조를 그림 1에 나타내었다. 방전부의 각 단은 12개의 파워셀로 구성되며, 총 4단으로 구성하여 40kV를 충전하고 방전하는 기능을 수행한다. 충전은 전력루프를 통해 병렬구조로 이루어지며, 방전은 컨트롤 루프를 통해 직렬구조로 동작된다.

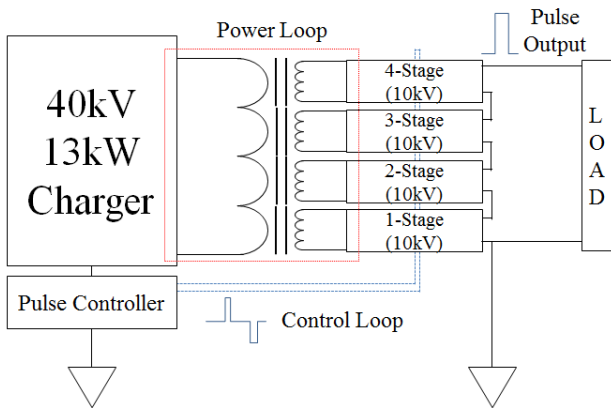


그림 1 개발된 펄스 전원장치의 구조  
Fig. 1 The structure of designed pulsed power supply

### 2.1.2 파워셀

파워셀은 총 48개로 설계됐으며, 크게 배전압 정류부와 방전부가 충전 커패시터를 공유하는 형태를 가진다. 배전압 정류부는 동일 스위칭 주파수에 비해 출력 리플이 증가하지만 전압을 2배로 출력할 수 있기 때문에 변압기 2차 측의 권선수를 줄일 수 있는 장점이 있다. 방전부는 방전 IGBT와 바이패스 다이오드로 이루어져 있으며, 방전 스위치의 동작 타이밍에 문제가 발생하거나 스위치가 손상이 되어도 바이패스 다이오드로 인해 스위치 양단 전압을 커패시터 전압으로 제한되기 때문에 스위치가 손상되는 것이 방지 되는 것이 특징이다.

### 2.3 친환경 가스처리 시스템

친환경 가스처리 실험을 위하여 그림 3과 같이 설계된 40kV 펄스 전원장치의 출력단과 가스처리 리액터를 연결하고 리액터에 인가되는 펄스의 반복률을 증가시키기 위해 풀다운 저항을 결선하였으며, VOCs가스를 주입하기 위한 주입기, 주입된 가스를 가스처리 리액터에 공급하기 위한 송풍기와 배관으로 이루어져 있다. 가스처리 반응기 내부전극은 그림2와 같으며, 전극에는 고전압 펄스가 인가되고 전극 양단의 극관은 접지와 연결되는 구조를 가진다. 전극에 고전압이 인가되면 코로나 방전막이 형성되고 이를 이용하여 VOCs가스가 분해된다.

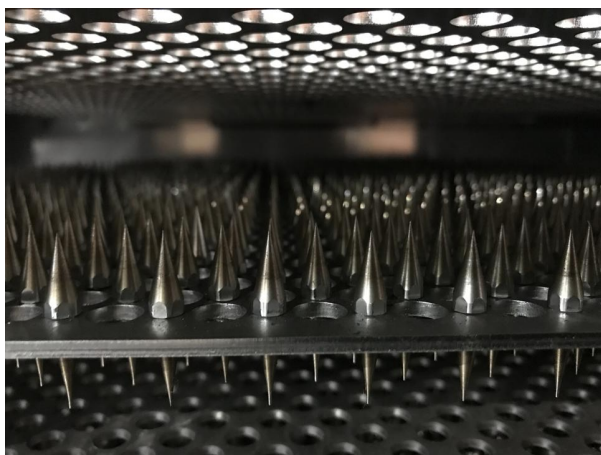


그림 2 반응기 내부전극  
Fig. 2 The electrode inside the reactor

### 2.4 실험 결과

개발된 펄스 전원장치의 동작과 신뢰성을 검증하기 위해 무유도 저항부하 실험, 리액터 부하 실험 그리고 리액터를 이용한 가스처리 실험을 진행하였다.

#### 2.4.1 무유도 저항 부하 실험

개발된 펄스 전원장치의 정격 펄스출력조건인 40kV / 300A 출력을 검증하고 펄스 상승시간을 측정하기 위해 부하저항은 무유도 저항이 사용되었다. 무유도 저항은 정격 전압이 매우 높으며 유도성분이 없어 고전압 펄스의 부하로 사용되기 적합하다. 정격 펄스출력 파형은 그림 3에 나타냈으며, 138Ω 무유도 저항부하 조건에서 41.7kV / 290A 펄스출력을 달성하였다.

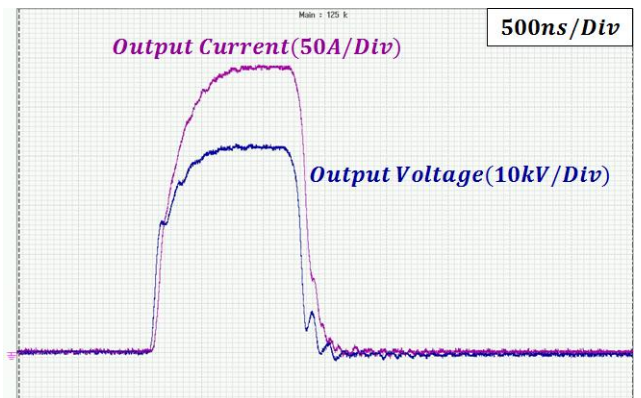


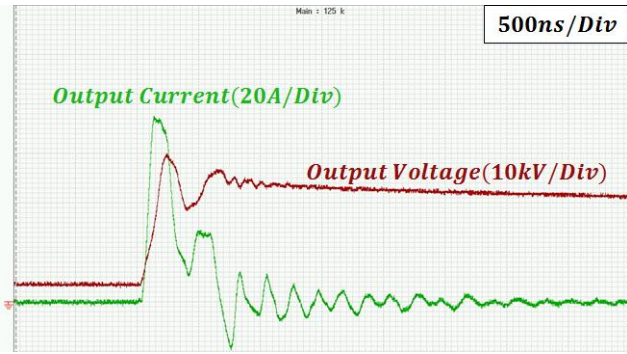
그림 3 무유도 저항 부하에서의 정격 펄스출력 파형  
Fig. 3 Rated pulse output waveforms at non inductive resistive load

#### 2.4.2 친환경 응용 리액터 부하 실험

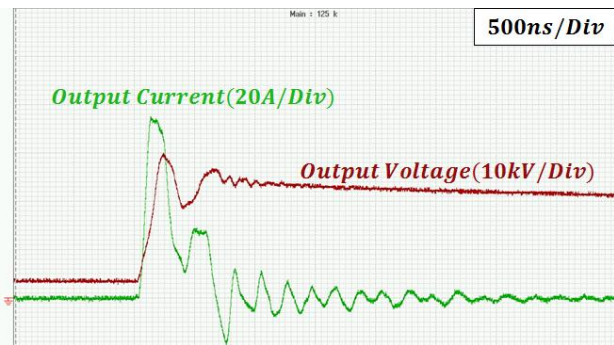
무유도 저항부하 실험을 통해 검증된 펄스 전원장치를 이용하여 리액터 부하 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 부하조건과 실험결과치는 표 2에 나타내었으며, 실험은 리액터와 리액터에 남은 전하를 제거하기 위한 6kΩ 풀다운 저항을 병렬로 결선하여 진행하였다. 각 조건에 따른 실험파형은 그림 4에 나타났다. 풀다운 저항없이 리액터 1기만 결선하여 구동하였을 때의 파형(a)은 리액터의 전극관 사이에 전하가 제거되지 않아 잔류전하가 존재하는 것을 볼 수 있다. 리액터 1기에 풀다운 저항 1기를 추가하여 측정된 파형(b)은 풀다운 저항을 통해 잔류전하가 제거되며 이로 인해 더욱 높은 출력이 가능함을 볼 수 있다.

표 2 각 부하조건에 따른 펄스출력 실험 결과  
Table 2 Pulse output experimental results according to each load condition

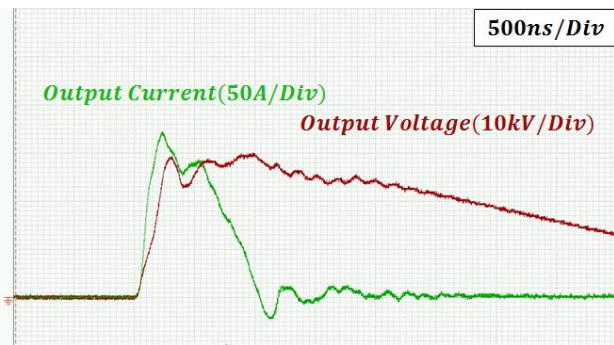
부하조건	출력 전압 / 전류 / 상승시간
리액터 (1)	30kV / 73A / 150ns
리액터 (1), 6kΩ저항 (1)	30kV / 100A / 100ns
리액터 (2), 6kΩ저항 (2)	30kV / 172A / 171ns
리액터 (3), 6kΩ저항 (3)	33kV / 208A / 200ns
리액터 (4), 6kΩ저항 (4)	33kV / 249A / 300ns



(a) 리액터 1기 부하조건에서의 펄스출력 파형



(b) 6kΩ 풀다운 저항을 포함한 리액터 1기 부하조건에서의 펄스출력 파형



(c) 6kΩ 풀다운 저항을 포함한 리액터 2기 부하조건에서의 펄스출력 파형

그림 4 풀다운저항 사용에 따른 펄스출력 파형의 비교  
Fig. 4 Comparison of Pulse Output Waveforms Using a Pull-down Resistor

### 2.4.3 가스처리 실험

VOCs가스처리 실험조건은 다음과 같다. 실험에 사용된 배출구의 직경은 300mm이며, 송풍기 가동 후 유속계를 이용하여 유속을 측정된 결과 2m/s였다. 펄스 전원장치를 이용하여 반응기에 인가한 펄스파형은 그림 5와 같으며, 출력 전압의 피크 값은 22.8kV, 출력 전류의 피크 값은 83.3A, 펄스 반복률은 1.5kHz의 조건에서 가스처리 실험을 진행하였다. 주입된 가스에는 톨루엔( $C_7H_8$ )이 사용되었고 가스처리 전은 약8ppm 리액터를 통과시켜 처리된 공기에서의 톨루엔 농도는 약 4ppm으로 측정되었으며 50%가 감소됨이 확인되었다. 가스처리 전/후 톨루엔 농도측정 결과는 그림 6과 같다.

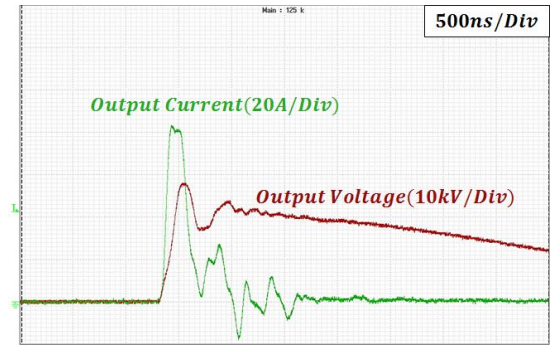


그림 5 가스처리 실험 파형  
Fig. 5 Experimental waveforms of gas treatment



그림 6 가스처리 전/후 톨루엔 농도비교 사진  
Fig. 6 Comparison of toluene concentration before and after gas treatment

## 3. 결론

본 논문에서는 친환경 응용을 위한 40kV 펄스 전원장치의 구조와 이를 이용한 가스처리 시스템을 소개하였다. 개발된 펄스 전원장치는 최대 40kV / 300A의 펄스출력이 실험을 통해 검증됐으며, 리액터 실험과 가스처리 실험을 통하여 고전압 펄스를 친환경 가스처리 응용에 이용될 수 있음을 검증하였다. 앞으로 펄스전압, 반복률 등의 변화에 따른 가스처리 실험과 리액터 병렬운전 실험을 진행하여 가스처리 효율향상을 위한 연구가 필요하다고 본다.

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.  
(No. NRF 2017R1A2B3004855)

## 참고 문헌

- [1] M. Reza Kazemi, "Waveform Control of Pulsed Power Generator Based on Solid State LTD", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 45, No. 2, pp. 247-251, 2017, Feb
- [2] Seung Bok, "Design of High Efficiency 40kV, 150A, 3kHz Solid State Pulse Power Modulator", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 40, No. 10, pp. 2569-2577, 2012, Oct