

## 저온 플라즈마 공정용 펄스발생 전원장치의 성능시험

장성덕<sup>\*&\*\*, 변영철\*, 조우현\*, 신동남<sup>\*\*\*</sup>  
 포항공과대학교\*, 포항 가속기연구소\*\*, 포항산업과학연구원\*\*</sup>

### Test Results of Pulsed Power Supply for Nonthermal Plasma Process

S. D. Jang<sup>\* & \*\*</sup>, Y. C. Byun<sup>\*</sup>, M. H. Cho<sup>\*</sup>, D. N. Shin<sup>\*</sup>  
 POSTECH<sup>\*</sup>, PAL<sup>\*\*</sup>, RIST<sup>\*\*\*</sup>

**Abstract** - The application of a pulsed power system is being extended to an environmental and industrial field. The non-destructive gaseous pollutants from industrial plants such as power generation plants and incinerators can be processed by applying high voltage pulses with a fast rising time (a few nanoseconds) and short duration (nano to microseconds) in a pulsed corona discharge reactor. The pulsed plasma generator with a triggered switch has been developed. Its corona current in load can be adjusted by applied voltage and repetition rate. We investigated the performance of the pulsed plasma generator by analyzing the concentration of ozone in small reactor. This paper describes the electrical characteristics of the pulse generator with a voltage of 30 kV at repetition rate of 50 PPS. In addition, we briefly discuss a configuration of the system and initial test results.

#### 1. 서 론

최근 들어 나노초 대역의 고전압펄스를 이용한 장치들이 환경 산업 및 공업기술 등 여러 분야에서 응용되고 있다[1]. 펄스코로나 방전을 이용한 대기압 저온플라즈마기술에 대한 연구는 1981년 이후부터 현재까지 꾸준히 진행되어 오고 있다[2]. 플라즈마는 전자, 라디칼, 양이온, 음이온을 포함하는 준 중성의 기체로서 전자가 방출될 때 발생된다. 양성코로나 방전을 이용한 저온플라즈마는 강한 전기장에 의한 고에너지 전자를 이용하므로 플라즈마와 화학반응에서 높은 선택도와 에너지 효율을 제공하고 낮은 가스 온도에서 효과적으로 작용할 수 있다. 플라즈마 스스로부터 높은 전기장이 가스입자에 인가되면, 높은 에너지의 전자(energetic electrons)가 오염가스내로 방출된다. 이 전자는 충돌을 통하여 중성가스분자로 에너지를 전달하여 가스분자의 여기, 흡착, 해리 및 이온화를 초래한다.

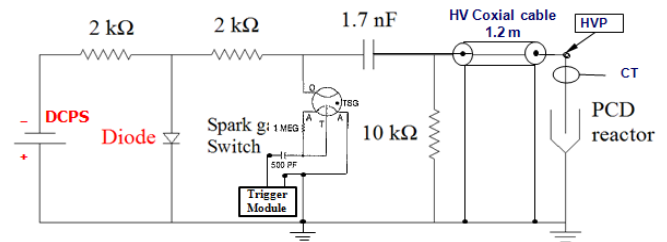
탈황/탈질 분야에 대한 전기방전의 적용은 1986년 일본에서 처음으로 실험실 규모로 연구가 진행되었으며, Masuda와 Mizuno 등에 의해 각각 질소산화물 및 황산화물의 제거 가능성이 입증된 이후 많은 연구자에 의해 연구가 이루어져 왔다. Civitano 등은 석탄 화력발전소의 배가스를 처리목표로 1986년부터 1992년에 걸쳐 전기방전에 의한 탈황-탈질연구를 실험실 및 파일럿 규모로 진행하였다[3]. 1995년부터 한국에서 대기압 저온 플라즈마 공정을 대규모의 배연가스 처리에 적용하려는 연구가 꾸준히 진행되어 저온플라즈마 발생을 위한 펄스전원장치의 실용화 기술은 어느 정도 확보된 상태이다[4][5]. 그러나 저온 플라즈마 배연처리 공정상에 아직 주목할 만한 결과를 보여주지 못하고 있다. 그러므로, 실제 공정설계와 적용 과정에서 발생하는 문제점 검정을 위하여 실험실 규모에서 공정변수 변화에 따른 제거특성과 반응경로에 대한 보다 정확한 연구가 필요한 실정이다.

펄스코로나 방전 저온플라즈마 기술을 이용한 다양한 가스상 오염물질(NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, HCl, CO, CO<sub>2</sub>, Mercury vapor, Dioxin, Freon, PBC, VOC, Ordors)의 제거처리에 관한 실험연구를 위하여 나노펄스 발생기 전원시스템(30 kV, 38 A, 300ns, 50 Hz)을 제작하고 성능시험을 실시하였다. 본 시스템은 트리거형 스파크 갭 스위치를 이용하여 출력 전압과 펄스 반복율을 가변할 수 있다. 본 논문에서는 고전압 나노 펄스 발생기의 주요동작과 설계, 전기집진기형 플라즈마 반응기를 부하를 이용한 사용한 고전압 성능시험 과정과 시뮬레이션 결과를 비교 고찰하였다. 최종 실험 결과는 68 pF 병렬 콘덴서 부하에 대하여 25 kV, 250ns 출력펄스를 얻었다.

#### 2. 펄스전원장치 시스템

##### 2.1 시스템 구성과 동작

그림 1은 펄스코로나 방전 저온플라즈마를 이용한 가스상 오염물질의 제거처리 실험에 사용될 나노 펄스발생 전원장치의 기본 회로를 나타낸다. 회로도 상에 주요 소자값을 병기하였다. 이 시스템은 반응기 부하에 최고전압 30 kV, 펄스폭 250ns, 펄스반복율이 50 Hz인 고전압 양성 펄스코로나를 발생시킬 수 있도록 설계 되었다. 회로도 동작은 음극 고전압 직류전원장치(Glassmann HV)를 사용하여 충전용 커패시터(1.7 nF)에 DC 전압 25 kV를 충전을 완료한 후 트리거 스파크 갭 스위치의 스위칭 동작에 의하여 플라즈마 반응기 부하로 방전을 시킨다.

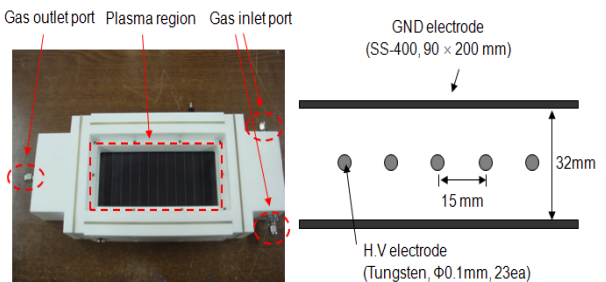


〈그림 1〉 저온플라즈마 발생용 펄스 전원장치의 회로도

대출력 펄스가 방전극에 인가되면 반응기를 충전시키기 시작하며, 방전극과 집진사이의 전압이 코로나 개시전압 (Corona Onset Voltage)에 이를 때 방전극으로부터 스트리머 코로나가 생성되어 집진판 방향으로 전파된다. 이러한 스트리머 코로나에 의해 반응기 내에서 고 에너지의 활동성이 강한 전자들이 대량으로 방출되어 라디칼 생성이 원활한 것으로 알려져 있다. 시스템의 주요 구성과 기능은 다음과 같다.

##### 2.2. 플라즈마 반응기 구조

배가스 펄스코로나 처리용 플라즈마 반응기는 향후 대용량 가스처리 적용에 적합한 판형 전기집진기 구조이다. 펄스코로나 플라즈마 반응기의 개념도가 그림 2에 나와있다. 반응기 구조에 대한 파라미터들이 표시되어 있으며, 반응기 크기는 폭이 90mm, 폭이 200mm이고, 집진판 간격은 32mm, 방전극 간격은 15mm이다. 3.5 l/min의 배기가스 처리가 가능하다.



〈그림 2〉 펄스코로나 플라즈마 반응기의 개념도

### 2.3. 회로 내 주요소자의 기능

- 고전압 다이오드(diode): 스위칭시 발생하는 역전압으로부터 고전압 전원장치와 스위치를 보호하는 기능이다.
- 저항(2 kΩ): 콘덴서 충전전류를 제한하고 스위칭시 부하 단락에 의한 과전류를 막기 위한 기능이다.
- 반응기 병렬저항(10 kΩ): 코로나 소멸 후 반응기에 충전된 전압의 하강시간을 빠르게 하여 아아킹을 막기 위한 기능이다.
- 고전압 삼축 케이블(HV triaxial cable): 자체제작품으로 충전 커패시터에 저장된 에너지를 반응기로 전달하는 기능을 가지며, 누설인덕턴스가 줄어들어서 상승시간이 개선되고, 노이즈 차폐에 유리한 구조이다.

### 3. 실험결과 및 토의

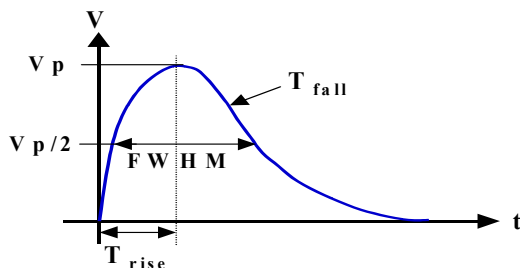
대기압에서 펄스파워를 인가하면 스파크나 아킹없이 높은 피크전압과 스파크 전압을 인가할 수 있어서 높은 전자에너지와 낮은 이온분자 에너지를 가진 비평행 플라즈마를 발생시킬 수 있다. 즉, 상대적으로 큰 질량을 가진 이온과 분자와는 다르게 라디칼 생성에 필요한 전자에 충분한 에너지를 줄 수 있다. 그러므로 반응기 면적을 키우지 않고도 높은 제거효율과 전기소비 효율(~70%)을 얻을 수 있다.

펄스코로나 방전에 의한 대기오염물질 처리는 반응기의 전영역에 걸치는 스트리머 전개특성 때문에 양성코로나 방전이 유리한 것으로 알려져 있다. 대기압 스트리머 방전에 의해 기체상 오염물질 제거에 필요한 고에너지 전자들과 활성화된 라디칼들이 생성되려면 반응기부하에 강 전기장을 가진 펄스신호를 인가하여 에너지를 전달하여야 한다.

코로나 방전부하는 전로의 인덕턴스와 전극간의 정전 용량, 방전 스트리머 코로나의 전압, 전류의 비로 계산되는 비선형 저항, 그리고 방전개시전압에 해당되는 역방향 제너 다이오드를 포함하도록 전기회로적인 변수로 표현할 수 있다. 코로나 반응기의 구조의 인덕턴스는 1μH 정도로 추정하고 그 외의 값은 추정식에 의해 구할 수 있다. 저항은 방전극과 접지판사이의 간격, 인가전압과 방전극의 길이의 함수이고 인가전압과 방전극 길이와는 반비례하고 방전극과 접지판의 간격의 제곱에 비례한다. 25 kV의 양극전압이 대기압 가스가 흘러가는 반응기 내 고전압 단자에 인가된다. 방전극 wire와 관형 집진극 사이의 거리는 16 mm이다. 집진극 근처의 전계강도(V/d)는 15.6 kV/cm 이다. 방전극 근처에서의 코로나 전계강도는 다음의 실험적에 의하여 31.3 kV/cm로 계산되어진다[6]. 여기서, dw(cm)는 방전극 직경이다.

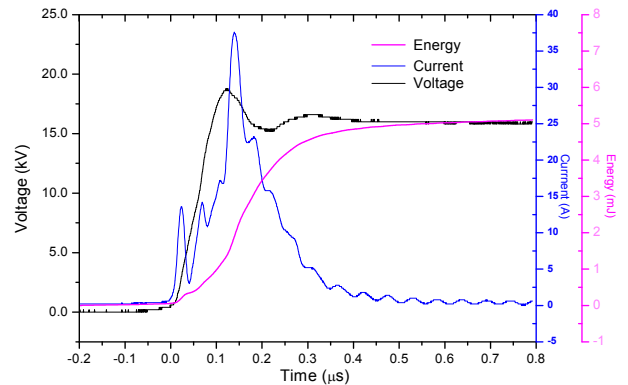
$$E_b = 30 + 12.7 \sqrt{d_w}$$

나노펄스 발생기는 콘덴서 충전을 위한 직류 고전압 발생 회로, 초기 충전 회로, 스위치를 포함하는 펄스 발생용 방전 회로로 구성된다. 충전용 콘덴서의 용량은 반응기의 초기 정전용량에 비해 크게 키울 필요가 있으며 펄스상승시간을 짧게 만들고, 주어진 충전전압을 만족하면서 부하에 요구되는 전압을 인가할 수 있도록 설계하여야 한다. 저전압 고전류 시스템에서는 케이블 커패시턴스보다 직렬 인덕턴스가 효율과 펄스파형에 더 큰 영향을 미친다. 고전압 저전류 시스템 일 경우는 병렬 커패시턴스가 펄스 시작부분에 높은 서지 전류를 유도하여 효율을 저하시킨다 [7]. 그러므로 최적 방전회로 설계를 위하여 수동요소인 병렬 커패시턴스와 직렬 인덕턴스성분을 최소화하는 것이 필요하다. 그림 3은 펄스 스트리머 형성을 위한 전압파형 개념도이다.



〈그림 3〉 펄스 전압파형 개념도

펄스코로나 발생에 있어 전압상승속도의 증가는 펄스발생초기 짧은 시간내에 보다 많은 에너지를 투입할 수 있기에 펄스이용 효율면에서 유리하다. 펄스전원장치로부터 반응기에 이르는 케이블을 고전압 삼축 케이블(HV triaxial cable)을 사용한 펄스형성 회로에서의 선로인덕턴스를 줄임으로써 빠른 전압상승속도를 개선했다.



〈그림 4〉 펄스발생기를 사용한 부하단 전압, 전류파형과 에너지

전원장치에서 부하로 정확한 에너지 전달과 반복율 조절을 위하여 스위치로써 트리거형 스파크 갭 스위치를 사용하였다. 그림 4는 펄스발생기를 사용한 최종 반응기 부하단에 나타나는 전압, 전류와 그의 곱에 대한 시간의 적분으로 표현되는 에너지 파형이다. 충전전압 25 kV에서 반응기에서의 첨두전압(Vp)은 19 kV, 펄스폭(FWHM)은 200ns, 펄스 상승시간(Trise)은 120ns이다. 300 ns이내에 코로나 전류가 종료됨을 알 수 있습니다. 큰 전압강하의 원인은 진공 스위치 자체의 전압강하(전체 스위칭 전압의 20% 이상)에 의한 것으로 판단된다. 전압과 전류파형의 곱으로부터 적분되어 계산되어진 반응기 부하에 전달된 에너지는 5 mJ/pulse를 나타내었다. 입력에너지에 따른 플라즈마 발생특성을 파악하기 위하여 오존분석기(UV digital ozone monitor, O<sub>3</sub> Tech Co. Ltd)를 사용하여 반응기내 오존 생성농도를 측정하였다. 초기 시험으로 질소(1600 cc)와 산소(400 cc) 주입 조건에서 190 ppm의 오존 농도를 나타내었다.

향후 펄스코로나공정의 산업화 공정적용을 위한 문제점 파악과 개선점 도출을 위하여 개발된 전원시스템을 이용하여 가스오염물질 제거에 대한 실험실 규모에서의 시스템 공정변수(인가 에너지, 첨가제, 온도, 수분 등), 반응 메카니즘 규명 등 기초 및 최적화 실험이 계속 진행되어야 할 것이다.

### [참고 문헌]

- [1] S. D. Jang, Y. G. Son, J. S. Oh, O. Jung, Kwon, J. Korean Society of Industrial Application, Vol. 4, No. 3, pp311-318, August, 2001
- [2] Masuda, Senichi, 4th International Conference on Electrostatic Precipitation, Chap. 9, pp. 615-623, 1990.
- [3] L. Civitano, Proc. 9th Int. Conf. Gas Discharges and Appls., Venice, September, pp. 603 (1988),
- [4] Y. S. Mok et al, Proc. 7th Int. Conf. Electrostatic Precipitation, Hilton, Kyungju, Korea, 1998, pp. 270-277.
- [5] S. D. Jang et al., J. of the Korean Physical Society, Vol. 44, No. 5, May 2004.
- [6] Chao-Heng Tseng, a dissertation submitted to Ph.D. Environmental Engineering, University of Cincinnati, 2000.
- [7] Dr. Marcel P.J. Gaudreau, P.E., Jeffrey A. Casey, Michael A. Kempkes, Timothy J. Hawkey, James M. Mulvaney, Fourth International Plasma-Based Ion Implantation Workshop, Dearborn, MI, June 1998