

플라즈마 전원(AC, DC, Pulse)에 따른 플라즈마 발생전압 비교

김신¹, 김영국¹
¹한국생산기술연구원

Comparison of plasma generation voltage by plasma power sources(DC, AC, Pulse power)

Shin Kim¹, Young-kuk Kim¹
¹Korea Institute of Industrial Technology(KITECH)

ABSTRACT

본 논문은 플라즈마 발생용 전원(AC, DC, Pulse)에 따른 플라즈마 발생전압의 차이에 대해 기술한다. 전원의 출력은 1 ~ 10 kV, 10 kHz로 진행하였고, AC의 경우 사각파 형태와 사인파 형태를 사용하였다. 펄스전원의 경우 신호발생기와 증폭기를 이용한 50 μs 펄스폭과 직접 개발한 500 ns의 전원을 사용하였다. 플라즈마 전극은 알루미늄을 사용하였고, 공기 중에서의 실험과 산화알루미늄(Al₂O₃)을 유전체로 사용한 두 가지 실험을 진행하였다. 최종적으로 두 가지 조건에서의 플라즈마 전원에 따른 플라즈마 발생 전압과 그 특성에 대해 분석한다.

1. 서론

최근 플라즈마 기술은 반도체 산업뿐만 아니라 환경, 농업, 의료 등 다양한 분야에서 적용되고 있다. 이러한 플라즈마 응용 분야서는 플라즈마의 형태, 온도, 생성되는 활성종, 오존 발생량 등 각각의 요구되는 조건들이 다르며 이는 전극 및 가스 그리고 플라즈마의 전원에 따라 크게 좌우된다. 본 논문에서는 플라즈마 발생을 위한 펄스전원을 개발하며, 상용 신호발생기와 증폭기를 이용한 DC, AC, Pulse 전압 형태의 출력들과 실험을 통해 같은 조건에서의 플라즈마 발생전압을 비교한다. 개발한 펄스전원은 인덕터에 에너지를 저장한 후 오프닝 스위치를 이용하여 방전하는 구조이며, 플라이백 컨버터를 기반으로 한다. [1]

비교실험은 동일한 전극을 이용하며, 전극 간 거리를 1 μs단위로 측정할 수 있도록 제작한 지그를 이용한다. 또한 전극은 알루미늄 소재를 이용하였고, 유전체에 의한 영향을 확인하기 위해 일반 공기 중에서도 유전체(Al₂O₃)판을 삽입한 두 가지 실험을 진행한다.

2. 플라즈마 발생용 펄스전원 설계

2.1 제안된 펄스전원 회로

제안된 펄스전원의 회로는 그림 1과 같다. 플라이백 컨버터를 기반으로 하며, 스위치가 도통되는 동안 변압기에 에너지를 저장하고 스위치가 꺼지게 되면 저장된 에너지가 변압기를 통해 2차 측으로 전달되면서 경로상에 있는 인덕터와 커패시턴스들의 공진에 의해 정현 반파 형태의 출력이 발생한다.

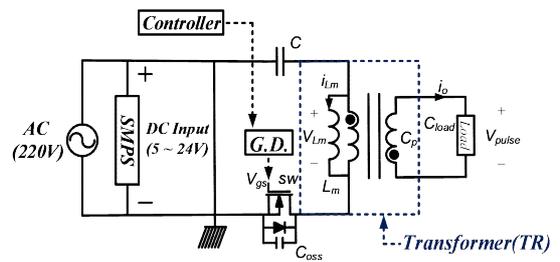


그림 1 제안된 플라즈마용 펄스전원 회로
 Fig. 1 Circuit of the proposed pulse power supply

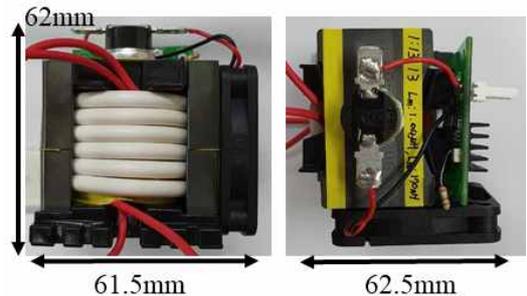


그림 2 제안된 플라즈마용 펄스전원 사진
 Fig. 2 Picture of the proposed pulse power supply

제안된 전원의 출력은 수식 (1)과 같이 계산될 수 있으며, 그림 1에 표시되어 있는 회로의 기생 인덕턴스(L_m)과 기생 커패시턴스(C_p) 그리고 부하의 커패시턴스(C_{load})에 의해 결정된다. 사양은 표 1과 같으며, DC 5 ~ 15 V의 입력전압을 받아 최대 10 kV의 펄스형태의 출력을 만들어 낸다. 출력의 주파수는 최대 30 kHz이며, 최대 출력은 50 W이다. 펄스의 폭은 부하의 커패시턴스에 따라 그 값이 변하지만 본 실험에서는 500 ns 이하로 진행되었다.

표 1 제안된 플라즈마용 펄스전원의 사양
 Table 1 Specification of proposed pulse power supply

Specification	Value
Input voltage	5 ~ 15 V
Output voltage	~ 10 kV
Maximum power	50 W
Pulse frequency	~ 30 kHz

$$V_{pulse,peak} = Z_{0,M2} \frac{I_{Lm,peak}}{N} = \sqrt{\frac{L_m}{C_{load}}} \times I_{Lm,peak} \quad (1)$$

2. 플라즈마 발생전압 비교 실험

2.1 실험용 지그 제작

플라즈마 생성 전압과 전극간의 거리를 분석하기 위해 1 μs 단위로 조정이 가능한 지그를 제작하였다. 전극의 재질은 알루미늄이며, 끝이 둥근 캡너트를 체결하여 플라즈마가 원하는 위치에 집중될 수 있도록 하였다. 실험을 위한 유전체(Al₂O₃)는 전극과 같은 사이즈로 제작하였으며 1 mm의 두께를 가진다. 제작된 지그의 사진은 그림 3과 같다.

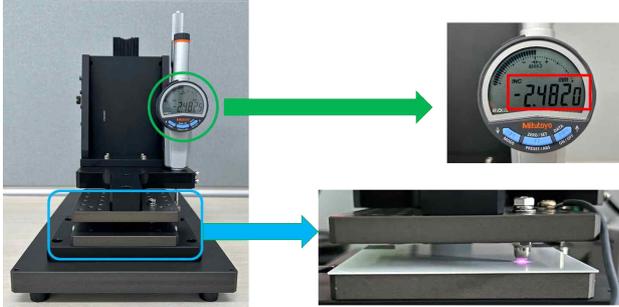


그림 3 제작된 플라즈마 실험용 지그

Fig. 3 Manufactured plasma experiment jig

2.2 실험결과

실험은 공기 중에서 진행한 실험과 유전체를 이용한 실험 두 가지로 진행하였으며, 전원은 상용 신호발생기 및 증폭기를 이용한 DC, AC(Square), AC(Sinewave), Pulse(펄스폭 50 μs) 그리고 개발된 펄스전원(펄스폭 500 ns)를 사용하였다.

공기 중에서 진행된 실험은 출력전압의 피크값을 기준으로 1~5 kV, 10 kHz 조건으로 진행하였으며 각 전압에 따른 플라즈마 발생 전극거리를 측정하였다. 그 결과는 그림 4와 같다. 그래프에서 확인 할 수 있듯이, 제작된 짧은 펄스폭(500 ns)의 전원을 제외한 모든 전원은 유사한 거리에서 플라즈마가 발생한 것을 확인 할 수 있었으며, 이는 파셴커브 공식과도 일치함을 확인하였다. 이를 통해 짧은 펄스폭의 전원을 사용하였을 경우, 플라즈마 생성 시 공기 중에서는 다른 전원들에 비해 더 높은 전압이 요구됨을 확인 할 수 있었다. [2]

유전체를 이용한 실험의 경우, DC 전압은 플라즈마가 발생하지 않았으며, 출력전압의 피크-피크 값에 의해 발생거리가 결정되는 것을 확인하였으므로, 출력전압의 피크-피크값을 기준으로 4~10 kV, 10 kHz 조건으로 실험을 진행하였다. 그 결과는 그림 5와 같다. 이 때의 결과는 제작된 펄스전원(500 ns)을 제외한 나머지 전원은 유사한 결과를 보였으며, 제작된 전원을 사용하였을 때 같은 전극 거리 기준에서 비교적 낮은 전압에서 플라즈마가 발생함을 확인하였다.

3. 결론

본 논문에서는 플라즈마 발생용 전원(AC, DC, Pulse)에 따른 플라즈마 발생 전압의 차이에 대한 실험을 진행하였다. 사용 전원은 1 ~ 10 kV, 5 kHz로 진행하였으며, 짧은 폭의 출력을 만드는 펄스전원을 개발하여 함께 실험을 진행하였다. 실험은 공기중과 유전체(Al₂O₃)를 이용한 두 가지로 진행하였으며 짧은 펄스폭의 전원에 대해 각각 다른 결과를 확인하였다. 향후 연구 내용으로는 플라즈마 전원에 따른 플라즈마의 특성(발생 활성중, 오존 발생량 등)에 대해 추가 연구를 진행 할 예정이다.

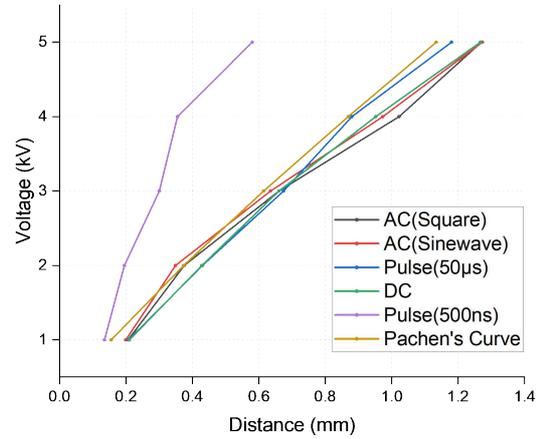


그림 4 플라즈마 발생전압 비교 그래프 (Air)

Fig. 4 Plasma generation voltage comparison graph (Air)

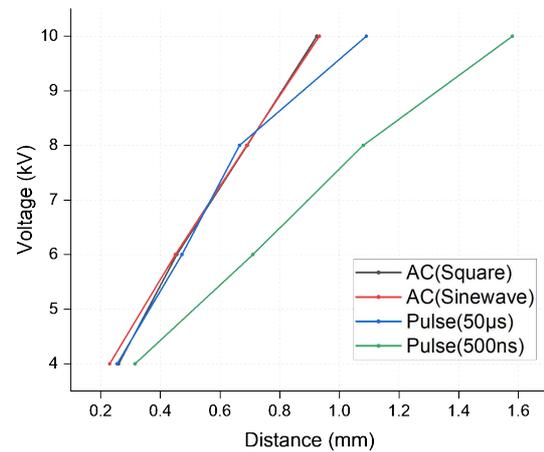


그림 5 플라즈마 발생전압 비교 그래프 (With Al₂O₃)

Fig. 5 Plasma generation voltage comparison graph (With Al₂O₃)

본 연구는 2024년도 한국생산기술연구원의 지원을 받아 수행된 한국생산기술연구원의 자체연구사업임.
(No. UR240007)

참고 문헌

- [1] S. Kim et al., "Design of Trigger Circuit for High-Power Gas Switch Based on Flyback Circuit," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 47, no. 10, pp. 4481-4487, Oct. 2019.
- [2] Dmitry Levko, Robert R. Arslanbekov, Vladimir I. Kolobov, " Modified Paschen curves for pulsed breakdown, " in Phys. Plasmas 1 June 2019; 26(6) 064502.