

3전극 트리거 갭 스위치 동작특성에 관한 연구

A Study on Operation Characteristics of Three Electrode Trigger Gap Switch

홍 태 윤* · 한 상 보†
(Tae-Yun Hong · Sang-Bo Han)

Abstract - The applications of the pulse power technology are expanding and the necessity of a large current switch as a core component of pulsed power is increasing. A trigger gap switch composed of three electrodes was fabricated and the discharge characteristics were studied according to the change of the pressure, the shape of the main electrode, and the gap distance when the trigger pulse was applied.

As a main result, the stable operation range was confirmed through the discharge inception voltage according to the gap distance and electric field analysis was performed in the same structure to confirm the electric field value of the discharge inception voltage.

Key Words : Discharge, Inception voltage, Pulsed power, Trigger gap switch, Trigratron

1. 서 론

펄스파워는 에너지를 저장한 후 압축하여 짧은 시간에 방출함으로써 높은 출력의 파워를 발생시킨다[1]. 이러한 기술은 군사, 항공우주, 플라즈마, 의료 분야에서 많은 연구가 이루어지고 있다[2-4]. 펄스파워 시스템은 전원장치, 에너지저장 장치, 스위치, 부하로 구성되고 축적된 에너지를 효율적으로 부하에 전달하는 스위칭 기술은 매우 중요하다. 대전류 스위치의 종류로는 이그니트론, 트리거 갭 스위치, 사이라트론 등이 있다[5]. 트리거 갭 스위치는 구조가 간단하고 비교적 저비용으로 구성할 수 있어 경제적인 측면이 우수한 것이 장점이다. 대전류 스위치의 동작 안정성을 위해 트리거 펄스 인가 여부에 따른 방전 특성을 파악하는 것은 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 3전극 트리거 갭 스위치의 갭 간격, 전극형상, 압력조건이 변화됨에 따라 방전 개시전압에 미치는 영향을 조사하였다.

실험조건과 동일한 구조에서 유한요소기법을 이용한 전계해석을 통해 방전개시전압에서의 전계 분포를 파악하였다[6]. 또한, 트리거 펄스 인가에 따른 방전 전압과 전류의 파형 및 방전지연 시간을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 트리거 갭 스위치의 구조

트리거 갭 스위치는 수 kV 이상의 고전압에 널리 사용되는 스위칭 소자로서 주 방전이 발생하기 전, 트리거 펄스를 인가하여 방전을 발생시킴으로써 방전개시전압이 낮아지기 때문에 동작 범위가 넓고 안정적으로 동작하여 널리 사용되어왔다[7-9]. 본 연구에서는 그림 1과 같은 3전극 트리거 갭 스위치를 제작하였다.

스테인리스 재질의 구 전극(지름 70 mm)과 평판 전극(지름 32 mm) 구조에서 평판 전극 사이에 홀을 뚫어 트리거 전극(지름

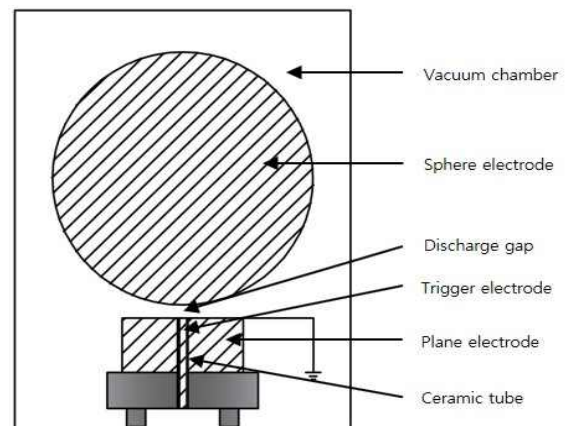


그림 1 3전극 트리거 갭 스위치의 구조

Fig. 1 The structure of three electrode trigger gap switch

† Corresponding Author : Professor, Department of Electrical Engineering, Kyungnam University, South Korea.
E-mail: hansangbo@uok.ac.kr

* Master of Engineering, Electrical Engineering, Kyungnam University, South Korea.

Received : December 9, 2017; Accepted : March 16, 2018

2 mm)을 삽입하고 세라믹 관(지름 2.2 mm)을 이용하여 주 전극과 절연을 하였다.

트리거 전극에 전기적 트리거 펄스 발생장치를 사용하여 1회 동작 시-2.3 kV 전압을 방전 갭 사이에 인가하는 구조를 제작하였다[10].

2.2 실험 장치 및 동작 특성

그림 2는 본 연구의 실험 회로도를 나타내었다. 실험 장비는 30 kV 0.25 mA 정격의 직류 전압원, 스테인레스 스틸재질의 구/평판 전극, 1.3nF 용량의 콘덴서 3개를 병렬로 연결하여 3.9nF 용량의 커패시터 뱅크, 로터리 펌프, 트리거 발생 장치, Vacuum chamber, 방전 리액터로 구성되며, LEM PR30(100mV/A) Current probe, Tektronix P6015A (1000:1) High voltage probe를 통해 실시간으로 전압, 전류 데이터를 수집하였다.

실험장치의 동작 특성으로는 트리거 갭 스위치에서의 방전 현상을 확인하기 위해 직류 전압원을 통해 전압을 서서히 증가시키면 커패시터뱅크에 에너지가 충전 되고 주 전극에 전압이 가해지는 구조이다. 트리거 발생 장치를 이용하여 순간적으로 트리거 갭 스위치의 갭 사이에 전기적 펄스를 가해주면 커패시터에 충전된 전류가 ns 단위의 시간으로 방출된다.

고압용 다이오드 및 저항은 방전 전류가 전압원으로 들어가는 것을 차단하고 회로 보호 및 접지를 통해 주 방전이 일어나기 전 전류가 방전되는 것을 차단했으며, 방전 리액터를 설치하여 주 전극에서 방전이 일어나지 않았을 경우 방전 리액터를 통해 방전이 일어날 수 있도록 구성하였다.

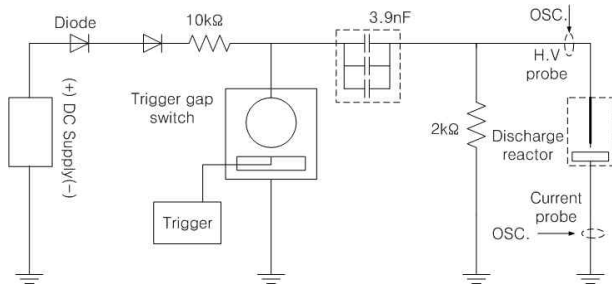


그림 2 실험 장치의 개략도

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

2.3 실험 방법

본 실험에서는 전극의 형상을 구 또는 침 전극, 압력 조건을 100 torr에서 600 torr 사이 압력에서 갭 간격을 1mm에서 9 mm까지 직류 전압을 서서히 올리며 트리거 인가 유무에 따른 방전개시전압을 조사하였다. 부성효과 방지를 위해 각 실험 전 갭 간격이 4 mm 이상인 상태에서 방전개시전압 이상의 전압을 인가하여 여러 차례 방전을 시행 후 실험을 진행하였다. 또한, 동일 전압에서 방전을 3회 이상 실시하는 경우의 전압을 방전개시 전압으로 기록하였다. 실험은 총 3회 실시하였으며, 전극 표면이

방전개시전압에 미치는 영향을 줄이기 위해 1 mm 간격마다 전극 표면을 알코올로 닦고 진행하였다. 주 전극을 통해 방전되는 전류와 콘덴서에서 방출되는 전압 값을 계측기를 통해 실시간으로 오실로스코프를 통해 확인하였다.

3. 결론 및 고찰

3.1 트리거 갭 스위치의 구 전극에서의 방전 특성

3전극 갭 스위치의 상부 전극의 형상을 전계가 집중되는 침 전극과 평등 전계를 형성하는 구 전극의 경우로 나누어 트리거 펄스가 가해지는 경우와 가해지지 않는 경우로 실험을 진행하여 그림 3과 그림 4의 결과를 얻었다.

그림 3은 상부 전극이 구 전극인 경우를 나타내었다. 트리거 펄스가 가해지는 경우의 방전개시전압은 트리거 펄스가 가해지지 않은 경우와 비교하여 1 mm에서 5 mm까지 감소비율이 각 52 %, 55 %, 50 %, 51 %, 39 % 감소하였다. 구 전극 구조는 고전압에서 동작 범위가 넓고 대략 50 % 방전개시전압이 감소함을 나타내었다.

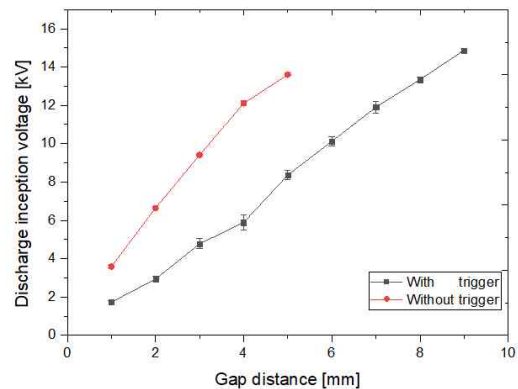


그림 3 구-평판 3전극 트리거 갭 스위치의 트리거 여부에 따른 방전 개시전압의 변화

Fig. 3 The change of the discharge inception voltage according to trigger of the sphere-plane electrode three trigger gap switch

3.2 트리거 갭 스위치의 침 전극에서의 방전 특성

그림 4는 침 전극에서의 방전개시전압의 특성을 나타내었다. 트리거 펄스가 가해지는 경우의 방전개시전압은 트리거 펄스가 가해지지 않은 경우와 비교하여 1 mm에서 5 mm까지 감소비율이 각 45 %, 46 %, 31 %, 19 %, 4.6 % 감소하였고 6 mm 이상 갭 간격에서는 트리거 펄스의 유무와 상관없이 방전을 시작하였다.

침 전극은 방전개시전압이 낮지만 고전압으로 갈수록 트리거 펄스의 영향을 감소하여 고전압 대전류 스위칭소자의 전극구조로

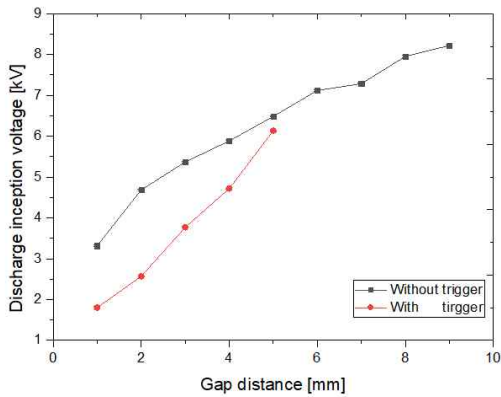


그림 4 침-평판 3전극 트리거 갭 스위치의 트리거 여부에 따른 방전 개시전압의 변화

Fig. 4 The discharge inception voltage according to trigger of the needle-plane three electrode trigger gap switch

적합하지 않다.

3.3 트리거 갭 스위치의 구 전극에서의 방전 특성

그림 5와 그림 6은 3전극 트리거 갭 스위치의 구 전극에서의 10 torr에서 600 torr 사이 압력에서 공기 중의 방전 특성을 나타내었다. 트리거 여부와 상관없이 갭 간격이 증가함에 따라 모든 압력에서 방전개시전압이 증가하였고 트리거 펄스가 인가 될 때 방전개시전압이 대체로 감소하였다.

압력 구간에 따라 트리거 펄스에 따른 방전개시전압의 감소폭이 달랐으며, 1 mm에서 3 mm의 갭 간격에서는 500, 600 torr 사이에서 감소폭이 50에서 60 %로 가장 크고 5 mm에서 9 mm의 갭 간격에서는 300, 400 torr 사이에서 감소폭이 50에서 60 %로 가장 높았다.

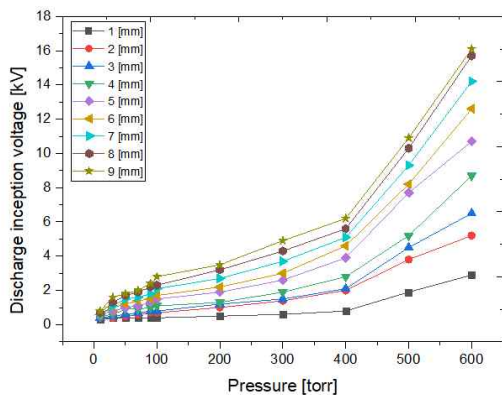


그림 5 트리거 갭 스위치의 압력 변화에 따른 방전 개시전압(트리거)

Fig. 5 The discharge inception voltage (trigger) according to the pressure change of the trigger gap switch

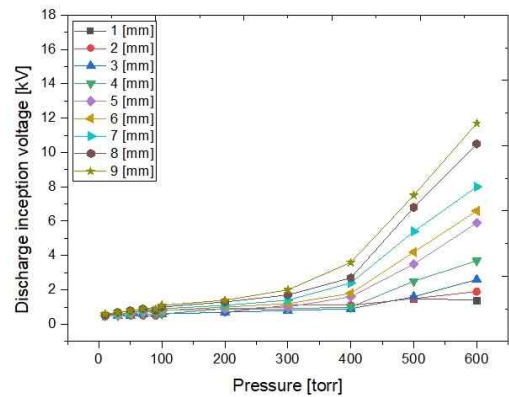


그림 6 트리거 갭 스위치의 압력 변화에 따른 방전 개시전압

Fig. 6 The discharge inception voltage according to the pressure change of the trigger gap switch

3.4 실험결과에 따른 트리거 갭 스위치의 전계 분석

실험 결과를 바탕으로 동일구조에서 유한요소기법을 사용하여 전계 분석을 하였다. 전계해석을 위해 사용한 물성치로는 Air 20 °C: 유전율 1.066, Stainless steel: 유전율 1.000, Ceramic5: 유전율 1.886을 사용하였다. 그림 7과 그림 8에서는 평판 전극과 구 전극 사이(갭 간격)에 임의의 선을 그어 거리에 따른 전계 값을 확인하였다.

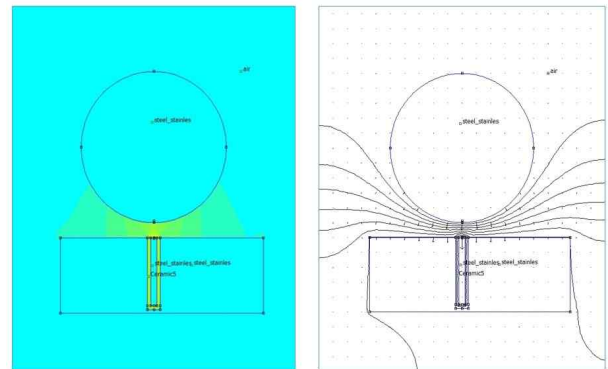


그림 7 3전극 트리거 스위치의 전계해석

Fig. 7 Electric field analysis of three electrode trigger gap switch

그림 8은 3전극 트리거 갭 스위치의 실험을 통해 얻은 갭 간격에 따른 방전개시전압을 이용하여 방전이 발생할 때의 전계분포를 트리거 여부에 따라 비교하여 나타내었다. 트리거 펄스 인가 시 하부 평판 전극의 표면 근처에서 트리거 펄스의 영향으로 순간적으로 높은 전계분포가 나타나고 상부 구 전극까지의 전계분포는 구 전극의 영향으로 대체로 고르게 나타났다. 또한, 갭 간격이 증가 할수록 전계의 세기가 약해지고 트리거 펄스를 인가한 경우가 갭 사이에서 더 낮은 전계분포를 형성하였다.

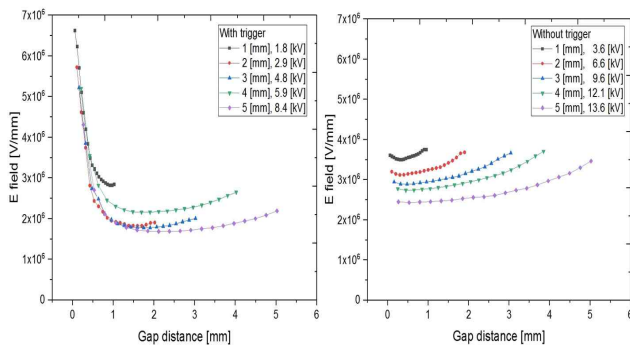


그림 8 3전극 트리거 스위치의 갭 간격에 따른 전계 분포
Fig. 8 The electric field distribution according to with(left) and without(right) trigger of the 3 electrode trigger gap switch

3.5 3전극 트리거 갭 스위치의 방전 전압 및 전류 파형 분석

전압, 전류 센서를 이용하여 1, 3, 5, 7 mm의 갭 간격에서의 방전이 발생할 때의 인가전압과 방전 전류의 파형을 측정하였다.

그림 9에서는 트리거 펄스가 가해질 때, 콘덴서에서 방출되는 전압의 시간지연을 나타내었다. 시간이 짧고 전압이 가파른 트리거 펄스의 영향으로 방전 지연 현상이 나타남을 확인하였다. 1 mm에서 7.9 μ s, 3 mm에서 16.8 μ s, 5 mm에서 34.1 μ s, 8 mm에서 53.2 μ s의 방전 지연시간을 확인하였다.

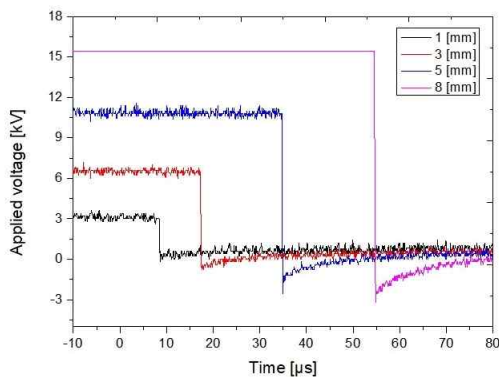


그림 9 트리거 펄스의 영향에 따른 방전 전압의 지연시간
Fig. 9 The delay time of the discharge voltage due to the influence of the trigger pulse

그림 10에서는 전압, 전류 센서를 이용하여 측정된 방전 전압과 전류 파형을 나타내었다. 트리거 펄스에 의한 전류 및 콘덴서에서 방출되는 전류 파형을 확인하였고 방전 전압과 전류의 지연시간을 확인할 수 있었다.

표 3과 그림 11에서는 계측기를 통해 측정된 데이터를 정리하여 방전 전압과 전류를 갭 간격에 따른 방전 지연시간을 나타내었다. 방전 전압과 전류 사이에는 지연 시간이 나타나며, 갭 간격

이 증가하면 방전개시전압이 증가하기 때문에 지연시간도 증가하였다. 이것은 트리거의 영향으로 발생한 공간상의 전하 및 빛에 의해 주 전극 간에 방전이 발생할 때까지의 시간으로 갭 간격이 큰 경우는 공간상의 전자 및 빛이 주 전극에 도달하는 시간과 주 전극 사이에 방전이 개시되어 주 전극이 단락될 때까지의 시간이 증가함에 따른 것으로 판단된다.

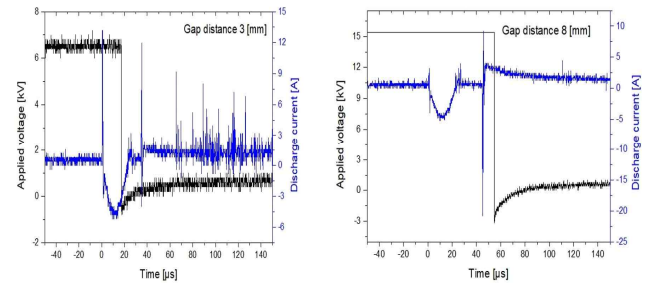


그림 10 3전극 트리거 갭 스위치의 5, 8 mm 갭 간격에서 전압 및 전류 파형
Fig. 10 Voltage and current waveforms at 5, 8 mm gap of the three electrode trigger gap switch

표 1 3전극 트리거 갭 스위치의 갭 간격에 따른 방전 지연시간
Table 1 Discharge delay time according to gap distance of the three electrode trigger gap switch

간격 [mm]	지연시간 [μ s]	오차 [μ s]	전압 [kV]
1	7.1	± 0.7	3.0
3	16.8	± 5.1	6.4
5	34.1	± 6.3	10.6
7	37.6	± 7.3	14.2
8	53.2	± 8.82	15.4

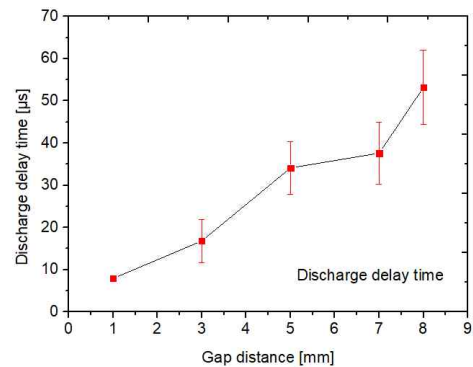


그림 11 트리거 인가 시 구-평판 전극의 갭 간격에 따른 방전 지연 시간
Fig. 11 The discharge delay time according to the gap distance of sphere-plane electrode with trigger

3. 결 론

본 실험은 새로운 형태의 트리거 갭 스위치 개발을 위한 기초 연구로 구-평판, 침-평판 전극에서 갭 간격, 인가전압, 트리거펄스 전압, 압력 조건을 변화시켜가며 동작 특성을 확인하였다.

- (1) 구-평판 전극에서 트리거 펄스 여부에 따른 방전개시전압의 특성을 확인한 결과 트리거 펄스를 인가하는 경우 인가하지 않는 경우와 비교하여 약 50 [%] 낮은 전압에서 방전개시가 시작됨을 파악하였다.
- (2) 대기압 조건에서 트리거 펄스 여부에 따른 방전개시전압을 비교한 결과 침-평판 구조는 5 mm에서 9 mm 갭 간격 사이에서 트리거 펄스 영향과 관계없이 방전이 발생하므로 고전압 대전류용 스위치는 구 전극 구조가 적합하였다.
- (3) 10 torr에서 600 torr의 압력조건에서 트리거 여부에 따른 방전개시전압을 조사한 결과 1 mm에서 3 mm의 갭 간격에서는 500, 600 torr 사이에서 감소폭이 가장 크고 5 mm에서 9 mm의 갭 간격에서는 300, 400 torr 사이에서 방전개시전압의 감소폭이 가장 높았다.
- (4) 실험결과를 바탕으로 갭 간격에 따른 방전개시전압에서의 전계 분포를 확인한 결과 갭 간격이 증가할수록 전계 값이 점차 감소하였고 트리거를 인가한 경우 트리거 펄스를 인가하지 않은 경우보다 전체적으로 전계분포가 낮아짐을 파악하였다.
- (5) 주 전극에서 방전이 발생할 때 전압과 전류 파형을 분석한 결과 방전 전압과 전류의 μs 방전지연시간을 확인하였고 갭 간격이 증가함에 방전지연이 증가함을 파악하였다.

위와 같은 연구를 바탕으로 추가적인 구조 설계 및 실험을 통해 저비용의 고전압 대전류 고속 스위칭 기술 개발이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

“이 연구결과물은 2017학년도 경남대학교 특화연구비 지원에 의한 것임”

References

- [1] Geun-Hie Rim, Chu-Hyun Cho, “Pulsed power technology,” The Korean institute of Electrical Engineers, Vol. 49, No. 1, pp. 32-37, 2000.
- [2] Suramoni Borthakur et al, “200 kJ Pulsed Power System for Pulsed Plasma Device,” IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. 45, No. 7, pp. 1769-1775, 2017.
- [3] Byungha Lee et al, “Operation of a 2.4-MJ Pulsed Power System for Railgun,” IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. 42, No. 10, pp. 2886-2890, 2014.
- [4] Kook-Hee Cho et al, “Performance of gas-puffing

inverse pinch switch for pulsed power system,” IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 39, No. 1, pp. 410-2413, 2003.

- [5] Ankur Chowdhury et al, “Ignitron-Based Switching Scheme for Multiple Ignitron Triggering in Pulsed Power Applications,” IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. 45, No. 12, pp. 3258-3264, 2017.
- [6] A.J. MacPhee et al, “Electrostatic modelling of a trigatron spark gap,” Digest of Technical Papers. Tenth IEEE international Pulsed Power Conference, Vol. 2, pp. 781-786, 1995.
- [7] A. M. Sletten, T. J. Lewis, “Characteristics of the Trigatron Spark-Gap,” Proceedings of the IEE-Part C: Monographs, Vol. 104, No. 5, pp. 54-61, 1957.
- [8] Li Cai et al, “Discussion of Breakdown Mechanism in Trigatron Spark,” 2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), pp. 132-135, 2012.
- [9] Li Cai et al, “Analysis of breakdown mechanism in trigatron switches,” IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 20, No. 4, pp. 1069-1075, 2013.
- [10] Lee Li et al, “Development of a Long-Lifetime Spark Gap Switch and Its Trigger Generator for 2.0-MJ Capacitive Pulsed Power Supply Module,” IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. 41, No. 5 pp. 1260-1266, 2013.

저 자 소 개



홍 태 윤 (Hong Tae Yun)

2016년 경남대학교 전기공학과 졸업. 2018년 동 대학원 첨단공학과 졸업(공학석사). 2015년~현재 한국전기연구원 HVDC. 연구본부 전력기기연구센터 위촉연구원



한 상 보 (Han Sang Bo)

1998년 경남대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2004년 동경대학교 전자공학과 졸업(공학박사). 현재 경남대학교 전기공학과 교수