

Blumlein 펄스파워 전원개발 및 방전특성 평가

(Evaluation of Discharge Characteristics Followed by the Development of Blumlein Pulsed Power Source)

한상보* · 박상현**

(Sang-Bo Han · Sang-Hyun Park)

Abstract

This paper discussed the theoretical simulation results for developing the blumlein pulsed power source and showed the circuit configuration and the discharge characteristics of the realistic manufactured pulsed power system. In the simulation, the output voltage characteristics at a load resistor showed the general impulse shape when the impedance of a single coaxial cable is matched with the that of a load resistor. In addition, it is confirmed that output values of the pulsed power can be easily controlled by the duplication of coaxial cables and the pulsed waveform showed the general impulse characteristics.

Specifically, the inception discharge voltage in the gap distance of 5[mm] between needle and plane electrodes is about 20[kV] and which is lower than about 29[kV] in 9[mm] due to the difference of the reaching time of the inception voltage. Therefore, this paper showed that the output voltage of the blumlein pulsed power source can be easily controlled.

Key Words : Blumlein, Discharge, Impedance Matching, Inception Voltage, Pulsed Power

1. 서 론

펄스파워 기술이란 커패시터와 같은 에너지 저장매체에 일정시간(수초~수십초) 동안에 저장된 전자기적 에너지를 시공간적으로 압축 및 중첩하여 극히 짧은 시간에 대전력을 발생시킴으로서 에너지를 공급하

는 기술을 의미한다. 이러한 펄스파워 기술은 1940년대 마이크로파 발생 및 핵융합 연구에서부터 시작되었으며, 그 이외에도 X선 발생장치[1], 레이저발전[2-4], 전력기기의 대전류 시험전원, 전자력 추진, 지구탐사기술, 기계가공기술 등의 다양한 분야에 응용되고 있다[5, 12-14]. 하지만 스위칭 소자의 개발, 절연기술, 펄스 성형기술, 에너지 저장장치의 소형화(고밀도화) 등 요소기술 개발에 있어서 많은 과제가 남아 있다.

펄스 대전류를 발생시키는 방법으로 용량성 에너지, 유도성 에너지, 관성 에너지, 화학에너지 등이 사용되

* 주저자 : 경남대학교 전기공학과 교수
** 교신저자 : 경남대학교 전기공학과 교수
Tel : 055-249-2635, Fax : 0505-999-2161
E-mail : hansangbo@kyungnam.ac.kr
접수일자 : 2010년 7월 27일
1차심사 : 2010년 7월 30일
심사완료 : 2010년 8월 19일

고 있으며, 화학에너지의 한 종류인 폭약이 에너지 밀도($\sim 600[\text{MJ}/\text{cm}^3]$)와 에너지 방출 시간에 있어서 타 방법에 비해 우수하지만, 단발성 응용 분야에 제한되는 단점이 있다. 전기적 특성으로 볼 때 용량성 에너지를 저장하는 커패시터가 가장 우수하지만, 에너지 저장밀도가 낮은 단점이 있으며, 유도성 에너지 저장 방법은 에너지 밀도도 높고 전기적 방전 특성도 우수하지만, 유도성 에너지를 펄스 파워에 이용하려면 부하에 에너지 전달을 위한 부가적인 회로차단 개방 스위치가 필요하다. 이러한 다양한 펄스파워 발생기술들이 지난 20여년간 많은 연구들이 진행되어 왔지만, 리액터와 콘덴서에 에너지를 저장하는 두 가지 범주로 크게 분류할 수 있다. 또한 에너지를 저장 및 방출하는 이론들은 집중정수 및 분포정수 이론을 도입하여 해석하고 있으며, 집중정수 회로를 이용하는 경우에는 R, L, C와 같은 단위소자들의 전기적 특징들이 그대로 이용되고, 분포정수 회로인 경우는 마이크로스트립과 같이 폭과 길이가 분포정수의 의미를 가지는 전송선로 이론에 기초하여 해석된다[6-9].

본 연구에서는 분포정수 이론에 기초한 Blumlein 펄스파워 전원 개발을 위한 이론 및 시뮬레이션 결과를 통하여 임피던스 매칭의 필요성 및 케이블 중첩에 의한 n배 고전압 펄스파워 출력 가능성을 보였다. 아울러, 실 제작된 펄스파워의 출력특성이 이론과 일치됨을 보였다. 본 연구에서 제작된 펄스파워 전원은 코일 건 또는 레일 건과 같은 전자력 추진장치, 레이저 발진, 나노분말 합성 등에 이용될 뿐만 아니라, 펄스 공간내의 방전현상을 연구하는데 효율적으로 활용될 수 있다.

2. 본 론

2.1 Blumlein 펄스파워 발생이론

본 연구에서의 Blumlein 펄스파워 발생장치의 원리는 그림 1에서 나타낸 것과 같이 두 전송선로 사이에 전송선로의 특성임피던스 두 배에 해당하는 부하저항이 직렬 연결되어 임피던스가 매칭되었을 때($R=2Z_0$),

전송선로를 초기에 충분히 V_0 전압을 충전하고 오른 쪽 끝단에서 스위치를 사용하여 접지측과 단락시키면, 스위치가 있는 곳의 충전전압 V_0 가 접지로 연결되면서 0 전압으로 되고, 부하 저항을 향하여 $-V_0$ 입사파가 진전하게 된다. 전송선로 라인을 따라서 진전하는 펄스가 $\tau = l/v[\text{s}]$ 시점에 부하저항으로 도달되고, 부하저항과 오른쪽 전송라인 연결지점에서의 투과 및 반사계수는 식 (1)에 의하여 각각 1.5 및 0.5가 되며, 투과신호 $-1.5V_0$ 는 부하저항과 왼쪽 선로의 임피던스에 의해 전압 분배되고, 왼쪽 전송선로로 $-\frac{1}{2}V_0$ ($= -1.5V_0 \cdot \left\{ \frac{Z_0}{2Z_0+Z_0} \right\}$) 크기가 투과된다.

이때 전송선로 왼쪽 개방단으로 전파되는 신호의 크기는 초기충전전압(V_0)에서 투과전압($-\frac{1}{2}V_0$)과의 차의 값으로 $\frac{1}{2}V_0$ 가 된다. 또한 저항 오른쪽 끝단에서 입사파의 반인 $-\frac{1}{2}V_0$ 가 오른쪽 전송선로측(단락측)으로 반사된다. 이때 저항에는 두 전송선로의 전위차에 의하여 V_0 의 전압강하가 발생하게 되고, 전송선로의 개방단 및 단락단으로 전파되는 신호는 양쪽 개방단 및 단락단에서 2τ 시점에 다시 반사되어 부하저항 측에 3τ 시점에 도달된다. 따라서 중앙부의 부하저항에는 τ 에서 3τ 에 이르기까지 V_0 가 유지되어 펄스폭은 $2\tau[\text{s}]$ 가 된다. 즉 그림 1 (b)에서 단계 s5에서 s7까지에 해당된다.

$$T = \frac{2Z_t}{Z_t + Z_0} \tag{1}$$

$$R = \frac{Z_t - Z_0}{Z_t + Z_0}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \text{ [m/s]}$$

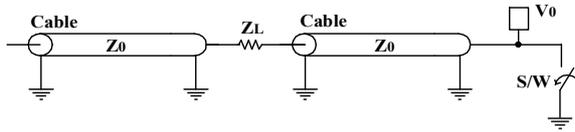
여기서,

T : 투과계수, R : 반사계수

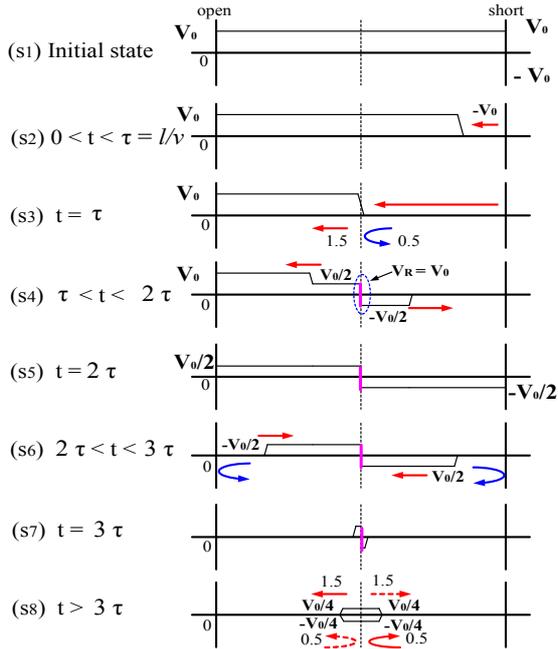
Z_0 : 입사 임피던스, Z_t : 종단 선로 임피던스

v : 매질내의 속도[m/s], c : 빛의 속도[m/s]

l : 선로의 길이[m]



(a) 간략적인 blumlein 펄스파워 회로



(b) 시간에 따른 펄스 형성단계

그림 1. 간략적인 blumlein 펄스파워 회로 및 시간에 따른 펄스 형성 도식도

Fig. 1. The simple circuit of the blumlein pulsed power and its temporal schemes of the pulsed formation

2.2 시뮬레이션 방법 및 결과

Blumlein 펄스파워 전원을 개발하기 위하여 아래의 그림 2에서와 같이 PSpice 시뮬레이션을 실시하여 부하저항에 인가되는 전압의 크기를 조사하였다.

시뮬레이션 조건으로는 콘덴서 6[nF]에 초기충전전압으로서 15[kV]를 인가하여 동축 케이블에 동일 전압이 충전되어 있을 때, 스위치(S/W)를 동작시킴에 의하여 8[m] 병렬 동축케이블 2단을 통해 부하 50[Ω]인 R1과 R2 양단 각각에 15[kV]를 발생시켜 2단 전체에 걸쳐 30[kV]가 인가되도록 구성하였다. 그리고 동축 케이블(전송 라인, Lossy)을 이용하여 시뮬레이션

을 행할 경우에는 선로의 임피던스는 $Z_0 = \sqrt{L/C}$ 으로 식 2에서와 같이 계산되며[9], 케이블의 특성 임피던스를 부하저항 50[Ω]과 일치시키기 위하여 표 1에서와 같이 각 소자들의 값들을 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 그 외의 시뮬레이션 조건은 아래의 표 1과 같다.

$$Z_0 = \sqrt{L/C} = \frac{377}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_r}{\mu_r}} \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) [\Omega] \quad (2)$$

여기서,

ϵ_r, μ_r : 선로 매질의 비유전율 및 투자율

r_i, r_o : 동축원통케이블의 내부 및 외부도체 반경[m]

표 1. 시뮬레이션 설정값

Table 1. Parameter values for the theoretical simulation

소자	파라메타		설정값
		단위	
동축 케이블 (Lossy)	직렬 저항 (R)	[μΩ/m]	1
	직렬 인덕턴스 (L)	[nH/m]	250
	병렬 컨덕턴스 (G)	[mS/m]	0.005
	병렬 커패시턴스 (C)	[pF/m]	100
	길이	[m]	8
부하저항	R1, R2	[Ω]	50
스위치 (S/W)	동작시간	[μs]	0.012
직렬 저항	R	[Ω]	0.001
직렬 인덕턴스	L	[nH]	5

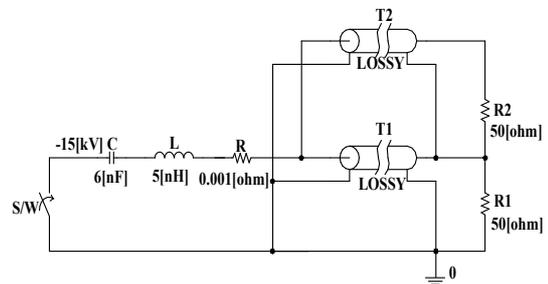
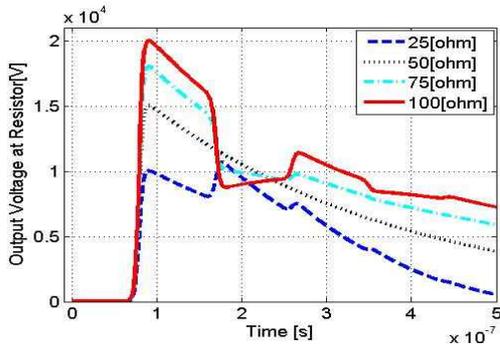
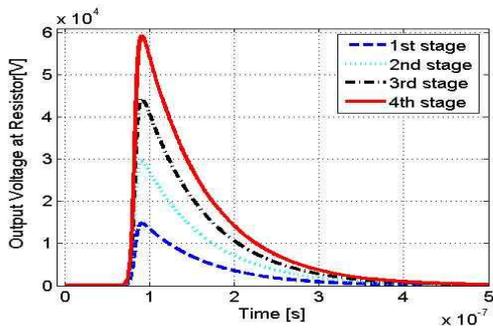


그림 2. 동축케이블 2단 시뮬레이션 회로

Fig. 2. The Simulation circuit using 2-stage coaxial cables



(a) 단일 동축케이블에서 부하저항 변화에 따른 출력특성



(b) 부하저항 4단 구성시의 각 단계에서의 출력특성 변화

그림 3. 시뮬레이션에 의한 부하 저항값 변화 및 4단 구성에 따른 출력특성 변화 결과

Fig. 3. The results of output voltages according to the change of a load resistor's value and 4-stage configuration by the simulation

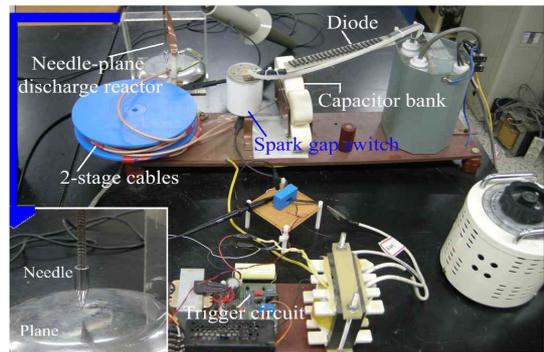
그림 3 (a)는 단일 동축케이블을 이용하여 케이블의 임피던스를 50[Ω]으로 설정한 후, 부하저항 값을 25 [Ω]에서 100[Ω]까지 25[Ω]씩 증가시키기에 따른 부하 저항 양단에 걸리는 전압의 변화를 나타낸 시뮬레이션 결과로서, 부하저항이 25[Ω]인 경우에 약 10[kV] 전압이 발생되고, 0.1[μs] 이후에 약간 높은 전압의 펄스가 다시 발생되었다. 그리고 부하저항이 50[Ω]으로 케이블과 임피던스 매칭이 된 경우에는 15[kV] 피크 값에서 서서히 감소되는 펄스 파형을 얻을 수 있었다. 하지만, 75[Ω] 및 100[Ω]에서는 임피던스가 매칭되지 않음에 의하여 펄스가 감소 및 증가를 반복하는 경향을 나타내었다.

그림 3 (b)는 부하저항을 케이블의 임피던스와 50 [Ω]으로 동일하게 하고, 부하저항을 4단으로 구성했

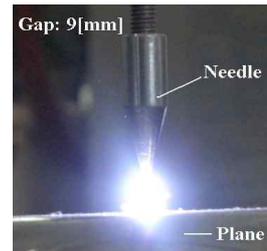
을 때, 1단에서 4단까지의 각각에 대한 출력전압 특성을 나타낸 것이다.

1단인 경우에는 약 15[kV]의 펄스 전압이 발생되고, 4단인 경우에는 각 단 전압이 합성되어 약 60[kV]가 발생되고 있음을 알 수 있다. 이로부터 케이블을 여러 단으로 병렬 중첩시키기에 의하여 고전압 펄스파워를 쉽게 조절가능하다는 것을 알 수 있다.

3. 실험 결과 및 고찰



(a) 제작된 blumlein 펄스파워 전원장치



(b) 방전 사진(갭 9[mm]인 경우, 상용 카메라로 촬영)

사 진 1. 제작된 blumlein 펄스파워 전원장치 및 방전 사진
Photo 1. The manufactured blumlein pulsed power source and picture of discharge

아래의 사진 1 (a) 및 그림 4에서와 같이 슬라이더스를 이용하여 고전압 변압기의 출력 교류 고전압을 제어하고, 출력된 고전압은 전력용 다이오드 단을 거쳐서 반파정류된 후 전류 제한용 저항(400[kΩ], 2개)을 통해 콘덴서 뱅크(6[nF])에 충전되도록 구성하였다. 3 전극 스위치(Spark gap switch, GXG-200)에 트리거 신호를 인가하여 연면방전을 일으킴과 동시에 3전극

스위치의 주 전극 사이에 방전을 발생시켜 콘덴서에 충전된 직류 고전압이 시뮬레이션에서와 같이 케이블 1, 2(50[Ω], RG-400 케이블, 8[m])를 통하여 부하저항 50[Ω] 양단에 펄스상으로 공급되도록 제작하였다. 이때 부하저항에 병렬로 연결된 방전 리액터로 고전압 펄스 에너지가 순간적으로 사진 1 (b)에서와 같이 방전되며, 케이블을 2단으로 병렬 구성시킴에 의하여 한 개의 케이블 단에서 발생하는 고전압의 2배에 해당되는 펄스 전압이 인가되도록 구성하였다. 이때 케이블을 n단으로 병렬 연결하면 n배의 고전압 펄스를 제작하는 것이 가능하다.

펄스 고전압 파형은 고전압 프로브(Tektronix, P6015A, 1000:1)를 이용하고, 방전전류는 로고우스키 코일(Pearson, 2878)을 이용하여 오실로스코프(Tektronix, TDS2014)로 측정하였다.

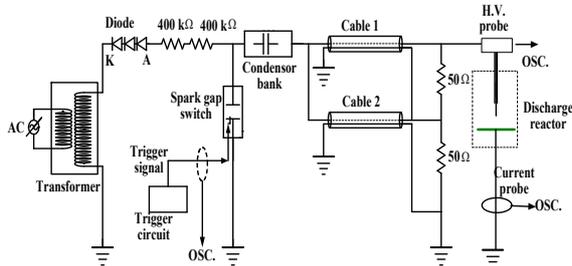


그림 4. 제작된 blumlein 펄스파워 전원장치의 회로구성
Fig. 4. The circuit configuration of the manufactured blumlein pulsed power source

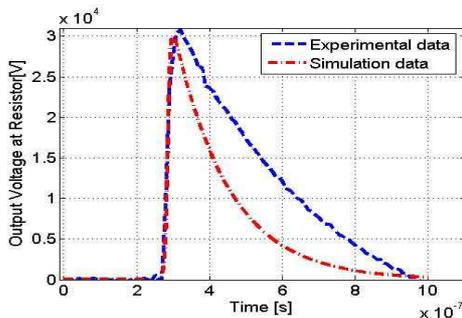


그림 5. 시뮬레이션 및 실 제작품의 출력전압 비교 (2단, 30[kV])
Fig. 5. The comparison of output voltage between simulation and the manufactured pulsed power source(2-stage, 30[kV])

그림 5는 케이블을 2단으로 구성한 경우에 대한 실 제품의 출력특성과 시뮬레이션 결과를 비교한 것으로서, 시뮬레이션 결과가 실 제작품보다는 펄스 폭이 좁고 감쇠시간이 짧은 우수한 특성을 나타내었다. 하지만, 실제제품인 경우에는 시뮬레이션에서와 같이 이론적으로 고려할 수 없는 선로의 저항 및 인덕턴스 성분과 같은 부유용량, 그리고 3전극 스위칭 시간 및 동작특성에 따라서 정확히 일치되지는 않았다.

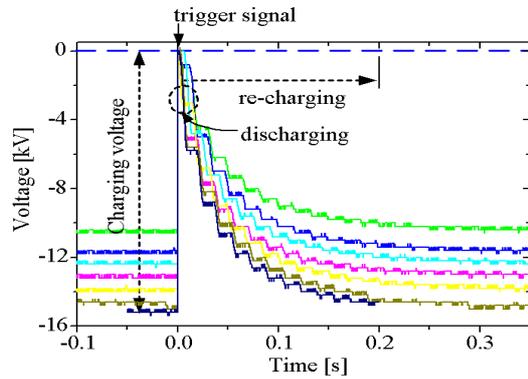


그림 6. 콘덴서 뱅크의 충전방전 특성
Fig. 6. The charging and discharging characteristics of capacitor bank

그림 6은 제작된 펄스파워 발생장치에 있어서 콘덴서 뱅크의 충전방전 전압 특성을 나타낸 것이다. 고압 트랜스 2차측 출력전압을 변경시킴에 따라 콘덴서 뱅크에 반파정류된 (-) 직류 고전압이 충전되고, -10~-15.5[kV]까지 쉽게 조절됨을 보이고 있다. 3전극 스위치에 트리거 신호를 인가하여 보조전극을 방전시킴에 따라 수십 나노초 [ns]의 매우 짧은 시간동안에 3전극 스위치의 주전극 사이에 방전이 발생하여 콘덴서 충전에너지($\frac{1}{2}CV^2[J]$)가 부하측으로 방전되고, 약 200[ms] 사이에 콘덴서에 재충전됨을 알 수 있다. 하지만, 본 장치에 있어서 콘덴서 충전전압이 약 -10[kV]이하인 경우에는 3전극 스위치의 주전극 사이에 방전이 발생되지 않으므로 최소 -10[kV] 이상을 인가해야 하는 단점이 있다. 이를 개선하기 위해서는 3전극 스위치의 전극 간격을 조절할 수 있도록 직접 제작해야만 한다.

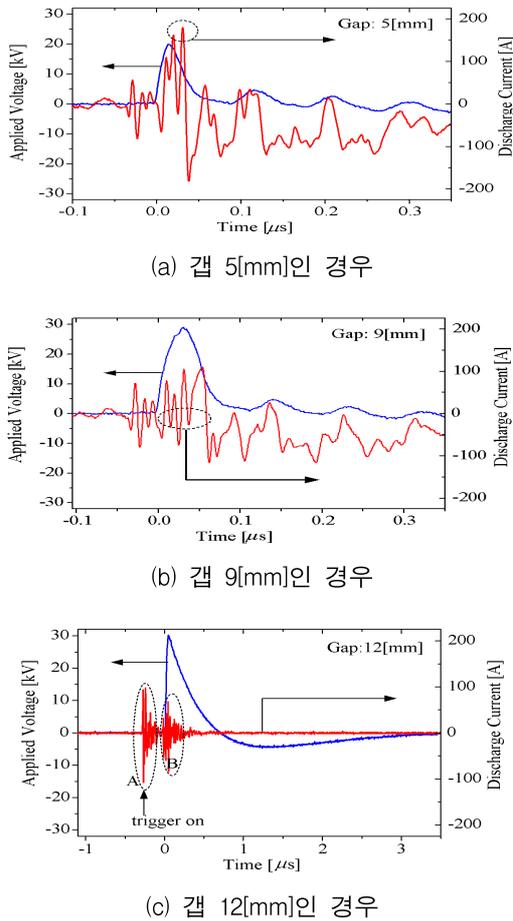


그림 7. 갭 길이 변화에 따른 침대 평판 리액터의 방전특성
 Fig. 7. The discharge characteristics of needle-plane electrode reactor according to the change of the gap distance

침대 평판 방전 리액터의 방전 갭을 변화시킴에 따른 인가전압 및 방전전류의 변화를 그림 7에 나타내었다. 콘덴서 뱅크의 충전전압 15[kV], 케이블을 2단으로 구성하였으므로 방전리액터에 인가되는 고전압은 이론적으로 30[kV] 해당된다. 하지만 그림 7 (a)에서와 같이 갭 길이가 5[mm]인 경우에는 인가전압이 30[kV]임에도 불구하고, 약 20[kV]에서 방전이 개시되어 인가전압까지 도달되기 이전에 방전이 발생되었으며, 갭이 9[mm]인 그림 7 (b)에 있어서는 29[kV]에서 주 전극사이에 강한 아크가 발생하였다. 침대 평판 사이의 갭을 12[mm]로 증가시킨 그림 7 (c)인 경우에는 방전이 발생되지 않았으며, 전형적인 저항부하에서

나타나는 특성을 보였다. 갭이 5[mm]인 경우는 방전 전류가 최대 180[A]로서 갭 9[mm]에서의 피크치인 약 100[A] (피크)에 비해서 매우 크며 방전시간이 37[ns]의 반치폭(FWHM, Full Width Half Maximum)으로서 갭 9[mm]인 48[ns]에 비교해서 짧음을 알 수 있다. 이것은 방전이 개시되어 아크로 전이되고 방전이 종료될 때까지의 반치폭을 의미하는 것으로서, 갭이 짧은 5[mm]인 경우에는 방전이 약 20[kV]에서 개시되고, 9[mm]인 경우는 약 29[kV]로서 방전개시전압에 도달하는 시간이 다르기 때문에 차이가 발생하는 것으로 사료된다. 또한 갭이 짧은 경우에는 콘덴서 충전에너지가 짧은시간에 방전시키기 위해 방전전류가 크고, 갭이 길어짐에 따라 인가전압의 폭은 넓어지고 전류는 다소 감소되는 것을 알 수 있다.

그리고 그림 7 (c)로부터 펄스전압의 상승시간(T_r)은 약 25[ns]이며, 하강시간(T_f)은 0.48[μs], 펄스폭은 약 255[ns]으로 제작된 펄스파형의 특성을 파악할 수 있다. 이때 펄스 상승이전에 나타나는 전류파형부분(A)는 트리거 신호에 의한 3전극 스위치의 주전극 방전에 의한 전류를 의미한다.

4. 결 론

Blumlein 펄스파워 전원을 개발하기 위하여 시뮬레이션을 실시하고, 실 제작품의 출력특성 평가를 통하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

시뮬레이션에 있어서 단일 동축케이블을 이용하여 부하저항 값을 변화시킴에 따른 펄스전압의 출력특성을 조사한 결과, 부하저항이 케이블과 임피던스 매칭이 된 경우에만 15[kV] 피크값에서 서서히 감소되는 임펄스 파형을 얻을 수 있었으며, 케이블을 여러 단으로 병렬 중첩시킴에 의하여 n배 고전압 펄스파워 전원을 제작하는 것이 가능함을 보였다.

실 제작된 펄스파워 전원의 출력특성에 있어서, 케이블을 2단으로 구성시킴에 의하여 콘덴서 뱅크 충전전압의 2배에 해당되는 고전압이 침대 평판 전극 구조 (갭 9[mm]인 경우)에서 출력됨을 보였다.

본 연구에서와 같이 Blumlein 펄스파워 전원의 출력전압을 케이블 병렬 중첩에 의하여 비교적 쉽게 제어

가능함을 알 수 있으며, 향후에는 본 연구에서 제작된 펄스파워 전원을 이용하여 전자력 추진, 나노분말 합성, 펄스방전 특성평가 등에 활용하고자 한다.

감사의 글

본 연구결과물은 2010학년도 경남대학교 학술진흥연구비 지원에 의하여 이루어졌음.

References

[1] Farzin Davanloo, Carl B. Collins and Forrest J. Agee, "Ultra-fast flash X-ray pulses produced by Blumlein devices", Nuclear Instru. and Methods in Phy. Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol. 241, Issues 1-4, 2005, 276-280.

[2] Mohamed O. Twati, A. Ben Otman, "Distributed parameter analysis of a blumlein-line N2 laser", Optics Commu., Vol. 99, Issues 5 - 6, 1993, 405-412.

[3] Hideki Ninomiya, Kenshi Nakamura, "Ar2* excimer emission from a pulsed electric discharge in pure Ar gas", Optics Commu., Vol. 134, Issues 1-6, 1997, 521-528.

[4] Li Chen, Bailiang Pan, Ya Juan Wang, Krassimir A. Temelkov, Nikolay K. Vuchkov, "He-SrCl2 vapor laser excited by Blumlein discharge circuit", Optics Commu., Vol. 282, Issue 19, 2009, 3953-3956.

[5] J. O. Rossi, I. H. Tan, M. Ueda, "Plasma implantation using high-energy ions and short high voltage pulses", Nuclear Instru. and Methods in Phy. Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol. 242, Issues 1-2, 2006, 328-331.

[6] M. J. Rhee and T. A. Fine, "Circuit Description of Pulsed Power Systems", CH2669-0/89/0000-1954, IEEE, PAC 1989, 1954-1956.

[7] Hansjoachim Bluhm, "Pulsed Power Systems - Principles and Applications", Springer, 2006, 135-155.

[8] Gennady A. Mesyats, "Pulsed Power", Springer, 3-12.

[9] 柳父悟, "펄스파워기술과 그 응용(일서)", 오음사, 71-77.

[10] 임근희, 조주현, "펄스파워 기술", 대한전기학회, 전기의 세계, Vol. 49 No. 1, 2000, 32-37.

[11] 이형호, 제환영, "고전압·대전류 펄스파워기술의 현황과 전망", 대한전기학회, 전기의세계, Vol. 46, No. 8, 1997, 53-58.

[12] 송병문, "펄스파워시스템의 핵심부품 기술", 전력전자학회지, Vol. 9, No. 1, 2004, 26-30.

[13] 진윤식, 이홍식, 김중수, 김진성, "커패시터를 이용한 대출력 펄스파워 시스템", 전력전자학회지, Vol. 9, No. 1, 2004, 32-39.

[14] 한상보, "레이저 유기형광법을 이용한 펄스 배리어 방전공간에서의 NO분자에 대한 시공간적 밀도변화측정", 한국조명전기설비학회, Vol. 24, No. 5, 2010, 160-168.

◇ 저자소개 ◇



한상보(韓尙甫)

1972년 9월 22일생. 1998년 경남대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동경대학교 전자공학과 졸업(박사). 2005~2008년 한국전기연구원 선임연구원. 현재 경남대학교 전기공학과 교수.



박상현(朴相鉉)

1950년 1월 27일생. 1973년 경북대학교 물리학과 졸업. 1984년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003~2004년 미국 휴스턴 대학 방문교수. 현재 경남대학교 전기공학과 교수.