

나선형 블룸라인 PFL을 이용한 50 ns 펄스폭의 고전압 펄스 발생

Generation of a High Voltage Pulse of 50 ns Pulse Duration using a Helical Blumlein Pulse Forming Line

노영수^{*} · 진윤식^{*}
(Youngsu Roh · Yun-Sik Jin)

Abstract - A high voltage pulse generator based on the Blumlein pulse forming line (PFL) was fabricated to produce a voltage pulse whose peak value is ~ 300 kV and pulse duration is ~ 50 ns. Three cylindrical electrodes, such as inner, middle, and outer electrodes, are concentrically placed to make a compact PFL. To increase the pulse duration of the output pulse without any change of the size of the generator, the middle electrode is replaced by a helical strip electrode. To determine the radius of the helical electrode, the impedance of the helical Blumlein PFL is calculated using an approximate formula where the dispersive property of the helical Blumlein PFL is not considered. The dependence of the impedance on the frequency is computed by a commercial program. The number of turns in the helical electrode is decided to provide a demanded pulse duration. The experimental result shows that the helical Blumlein PFL is capable of making a high voltage pulse of ~ 50 ns pulse duration.

Key Words : High voltage, Pulse generator, Blumlein pulse forming line, Helical electrode, Pulse duration

1. 서 론

이상적인 블룸라인(Blumlein) 펄스 형성 라인(PFL : Pulse Forming Line)에서 출력 펄스의 모양은 사각형이며 펄스 폭은 블룸라인 PFL의 길이와 유전체의 유전상수에 의하여 정해진다[1]. 이런 장점 때문에 블룸라인 PFL을 이용한 고전압 펄스 발생기는 레이저, 전자빔 가속기, 대전력 마이크로파 발생 장치 등과 같은 여러 가지 고전압 펄스 파워(Power) 응용 분야에서 광범위하게 이용되어왔다[2-4]. 고전압 출력 펄스의 폭은 펄스 발생기의 성능을 좌우하는 핵심적인 인자 중의 하나이며 최근 대전력 펄스 발생기를 개발하는 추세에 따라 긴 펄스 폭에 대한 관심이 고조되고 있다[5-6]. 그러나 전통적인 동축 블룸라인 PFL의 경우 펄스 폭은 PFL의 길이에 비례하므로 긴 펄스 폭을 얻기 위해서는 펄스 발생기의 규모가 커질 수밖에 없다. 이것은 동축 블룸라인 PFL의 활용을 제한하는 인자가 될 수 있다. 왜냐하면 긴 펄스를 이용하는 많은 분야에서 펄스 발생기의 소형화 및 경량화가 요구되고 있기 때문이다[7]. 종래의 동축 블룸라인 PFL과 다르게 나선형 블룸라인 PFL의 경우 나선형 전극의 길이가 펄스 폭을 결정하는 핵심적인 인자이기 때문에 일반적으로 소형화된 블룸라인 PFL에서 펄스 폭을 증가시키기 위하여 나선형 전극이 많이 이용되고 있다[5-9].

본 논문에서는 참고문헌[4]에서 보고된 원통형 블룸라인 고전압 펄스 발생기(이하, 원통형 펄스 발생기)의 출력 펄스

폭을 증가시키기 위하여 제작된 나선형 전극에 대하여 논의한다. 원통형 펄스 발생기에서 이용되는 블룸라인 PFL은 세 개의 동축 원통형 전극들로 구성되어 있으며 출력 전압 파형의 펄스 폭은 5 ns이 되도록 설계되었다. 세 개의 전극 중에서 원통형 중간 전극을 나선형 전극으로 대체함으로써 원통형 펄스 발생기를 동일한 크기로 유지한 상태에서 출력 펄스 폭을 나선형 전극의 유효길이에 비례하여 증가시킬 수 있다. 본 논문의 나머지 부분은 다음과 같이 구성된다. 나선형 블룸라인 고전압 펄스 발생기는 나선형 전극을 제외하면 원통형 펄스 발생기와 구조적으로 동일하다. 그러므로 우선 2장에서 원통형 펄스 발생기의 구조와 출력 펄스의 특성에 대하여 간략히 설명한다. 3장에서 나선형 전극의 설계에 대하여 상술하고 이것을 이용하여 취득한 실험 결과를 제시한다. 마지막으로 4장에서 결론을 도출한다.

2. 원통형 블룸라인 펄스 발생기

그림 1은 전압 300 kV, 펄스 폭 5 ns의 펄스를 발생시킬 수 있는 원통형 펄스 발생기의 개략도이다. 원통형 펄스 발생기는 충전 회로, 펄스 변압기, 스파크 갭 스위치, 블룸라인 PFL, 충전용 인덕터, 그리고 피킹 스위치 등을 포함한 많은 부품들로 구성되어 있다. 각 부품의 구조 및 성능은 이미 참고문헌[4]에 상술되어 있다.

기생 임피던스를 고려하지 않는 경우, 원통형 펄스 발생기의 동작 원리는 그림 2에 도시된 등가 회로에 의하여 설명될 수 있다. 여기서 내부 전송 선로(T_{inner_middle})는 내부와 중간 도체에 의하여 만들어진 전송 선로고 외부 전송 선로(T_{middle_outer})는 중간과 외부 도체에 의하여 형성된 전송 선로다. 내부 및 외부 전송 선로의 특성 임피던스는 각각 23.7 Ω 과 27.8 Ω 이다. 충전 회로의 출력 전압의 크기는

[†] Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea

E-mail : yroh@ssu.ac.kr

* Korea Electrotechnology Research Institute

Received : February 23, 2013; Accepted : May 28, 2013

충전용 커패시터(커패시턴스 120 nF)의 충전 전압에 의하여 정해진다. 이 출력 전압은 펄스 변압기를 통하여 승압되어 내부 및 외부 전송 선로에 순차적으로 인가된다. 따라서 전송 선로의 충전 전압은 커패시터의 충전 전압과 펄스 변압기의 승압비(설계된 승압비=18)의 곱으로 결정된다. 커패시터의 최대 충전 전압이 20 kV이므로 블룸라인 PFL에서 나오는 출력 펄스의 크기는 최대 360 kV까지 될 수가 있다.

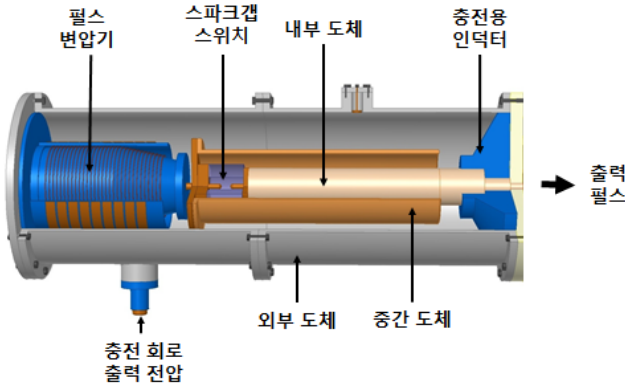


그림 1 원통형 블룸라인 고전압 펄스 발생기의 구조 [4]
 Fig. 1 Structure of the cylindrical Blumlein high voltage pulse generator [4]

한번 통과하는데 소요되는 시간(T_d)의 두 배와 같다. (즉, $T_w = 2T_d$) 전송 선로의 길이가 l 인 경우, $T_d = l\sqrt{\epsilon_r}/c$ 이며 여기서 ϵ_r 은 블룸라인 PFL 매질의 비유전율, c 는 진공 중에서의 빛의 속도다. 원통형 펄스 발생기의 경우, $l=50$ cm, $\epsilon_r=2.23$ 이므로 $T_w=5$ ns이다.

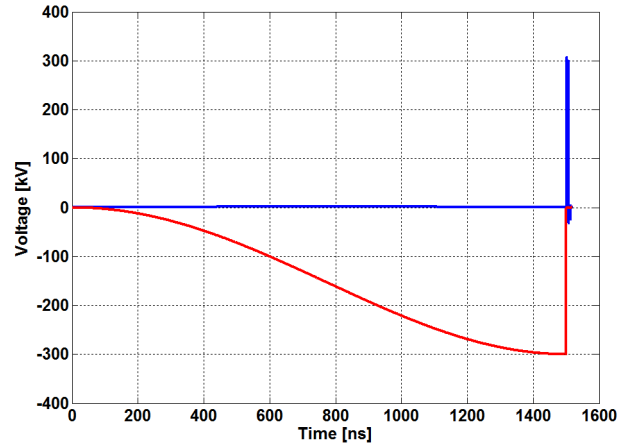


그림 3 PSPICE 등가 회로의 전압 파형: 적색 선은 내부 전송 선로의 충전 전압, 청색 선은 블룸라인 PFL의 출력 전압

Fig. 3 Voltage waveforms of the PSPICE equivalent circuit

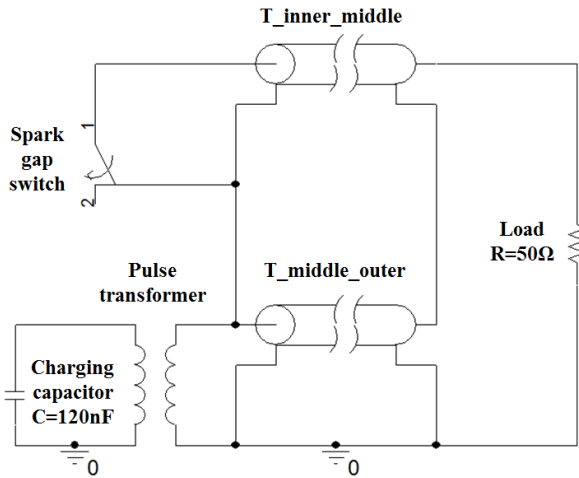


그림 2 펄스 발생기의 PSPICE 등가회로
 Fig. 2 PSPICE equivalent circuit for the pulse generator

그림 3은 커패시터를 -17 kV로 충전하였을 때 나타나는 등가 회로의 전압 파형이다. 여기서 적색 선은 내부 전송 선로의 충전 전압, 청색 선은 블룸라인 PFL의 출력 전압이다. 외부 전송 선로는 내부 전송 선로의 충전 전압과 반대의 극성으로 충전된다. 충전 전압의 주기는 6 μ s이므로 내부 및 외부 전송 선로의 충전 전압은 시간(t)=1.5 μ s에서 최고치에 도달한다. 이 때 스파크 갭 스위치가 닫히고 내부 전송 선로의 왼쪽에서부터 전압 펄스가 만들어지고 내부 및 외부 전송 선로를 순차적으로 진행하는 전압 펄스의 진행과 반사파의 작용으로 내부 및 외부 전송 선로 사이에 사각형 펄스가 생성된다[1]. 이 사각형 펄스가 블룸라인 PFL의 출력 전압이며 그 펄스 폭(T_w)은 전압 펄스가 전송 선로를

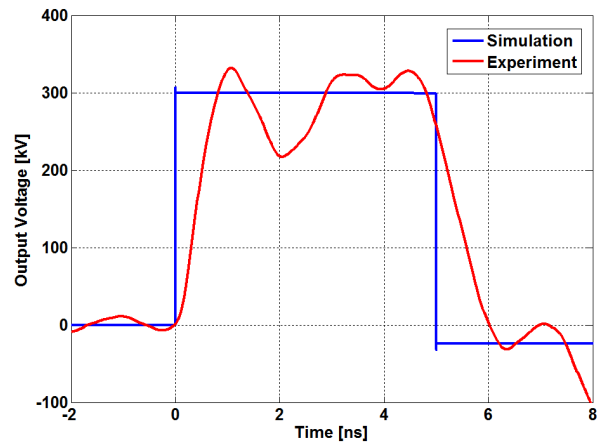


그림 4 원통형 블룸라인 고전압 펄스 발생기의 출력 전압 파형

Fig. 4 Output pulse waveform of the cylindrical Blumlein high voltage pulse generator

그림 4은 원통형 펄스 발생기의 출력 펄스의 파형을 나타낸다. 여기서 청색 선은 그림 3과 동일한 시뮬레이션 파형이고 적색 선은 실험에서 취득한 실제 파형이다. 실험 파형은 약 300 kV로 충전된 블룸라인 PFL의 출력 펄스를 피크 스위치의 입력 전극에 인가한 후 출력 전극에 연결된 50 Ω 의 순수 저항에서 측정된 펄스 파형이다[4,10]. 예상대로 시뮬레이션 펄스는 직사각형이지만 $t=5$ ns 후 약간의 부극성 전압이 나타난다. 이것은 블룸라인 PFL의 출력 임피던스와 부하 임피던스(50 Ω)의 부정합 때문에 생기는 반사파이다.

블룸라인 PFL의 출력이 완벽한 사각형 펄스가 되기 위해서는 내부 및 외부 전송 선로의 특성 임피던스는 동일해야 하고 부하 임피던스는 특성 임피던스의 2배가 되어야 한다. 그러나 두 전송 선로의 특성 임피던스는 조금 다르기 때문에 블룸라인 PFL의 출력 임피던스는 부하 임피던스와 완전히 정합되지 못한다. 한편, 실제 펄스의 폭은 약 5 ns가 되지만 파형은 직사각형 모양이 되지 못한다. 시뮬레이션과 다르게 원통형 펄스 발생기의 부품과 선로에는 기생 임피던스가 존재할 수 있으며 이것으로 인하여 펄스 파형은 심각하게 변형된다. 예를 들면, 스파크 갭 스위치의 기생 인덕턴스로 인하여 파형의 상승 시간은 느려진다[11]. 또한 부품과 부품 사이의 구조적인 불균형으로 인하여 생기는 급격한 임피던스 변화도 출력 파형을 변형시키는 인자가 될 수 있다.

3. 나선형 블룸라인 펄스 발생기

3.1 나선형 전극의 구조

이 절에서 취급하는 나선형 블룸라인 PFL의 구조가 그림 5에 도시되어 있다. (나선형 중간 전극을 강조하기 위하여 외부 전극은 생략되어 있다.) 원통형 중간 전극 대신에 사용되는 나선형 전극을 제외하면 이 구조는 그림 1과 동일하므로 내부 전극의 반경은 $R_1=5$ cm, 외부 전극의 반경은 $R_3=20$ cm, PFL의 길이는 $l=50$ cm, 그리고 PFL 매질의 유전상수는 $\epsilon_r=2.23$ 이다. 나선형 전극은 내부 및 외부 전극과 함께 내부 및 외부 전송 선로를 형성하기 때문에 나선형 전극의 구조가 두 전송 선로의 전기적 성질을 결정하는 핵심적인 인자가 된다.

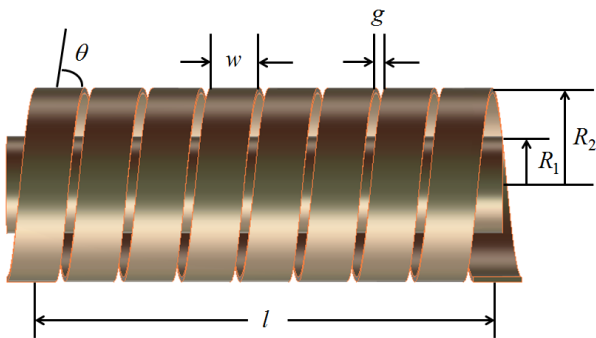


그림 5 나선형 전극의 구조
Fig. 5 Structure of the helical electrode

그림 5에서 볼 수 있듯이, 나선형 전극의 구조와 관련된 기하학적 변수는 반경(R_2), 피치각(θ), 전극 폭(w), 전극 사이의 간격(g) 등이다. 이와 같은 변수의 설계값은 다음 두 가지 조건을 만족할 수 있도록 정해진다. (1) 내부 전송 선로의 특성 임피던스(Z_{inner})와 외부 전송 선로의 특성 임피던스(Z_{outer})는 같다. (2) 블룸라인 PFL 출력의 펄스 폭은 $T_w=50$ ns이다.

3.2 전송 선로의 특성 임피던스

첫 번째 조건은 블룸라인 PFL이 정상적으로 동작하기 위한 필요조건이다. 전송 선로의 특성 임피던스를 구하기 위해서는 인덕턴스와 커패시턴스와 같은 전기적 매개 변수를 알아야 한다. 나선형 블룸라인 PFL 영역에서 나선형 전극의 경계 조건을 적용하여 맥스웰(Maxwell) 방정식을 풀어서 전계와 자계의 해석적인 해를 구하고 이것으로부터 특성 임피던스를 구할 수 있다[12]. 이 방법은 나선형 전송선로의 분산관계(즉, 전기적 매개 변수와 주파수의 관계)를 구할 수 있는 장점은 있지만 분산 관계는 베셀(Bessel) 함수들의 매우 복잡한 조합으로 표현되어 특성 임피던스를 쉽게 구할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 전기적 매개변수를 보다 용이하게 계산하기 위하여 참고문헌[13]에서 제안된 아래의 근사식을 이용한다. 이 근사식은 나선형 전극은 축 대칭이고 $w \gg g, l \gg R_2$ 인 조건하에서 유도되며 다음과 같이 표현된다.

$$L_{inner} = \frac{\mu\pi}{l} (R_2^2 - R_1^2) N^2 \sin\theta + \frac{\mu \cos\theta}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (1)$$

$$C_{inner} = \frac{2\pi\epsilon l}{\sin\theta \ln(R_2/R_1)} \quad (2)$$

$$L_{outer} = \frac{\mu\pi R_2^2}{l} \left(1 - \frac{R_2^2}{R_3^2}\right) N^2 \sin\theta + \frac{\mu \cos\theta}{2\pi} \ln \frac{R_3}{R_2} \quad (3)$$

$$C_{outer} = \frac{2\pi\epsilon l}{\sin\theta \ln(R_3/R_2)} \quad (4)$$

여기서 L_{inner} 와 L_{outer} 는 내부와 외부 전송 선로의 인덕턴스, C_{inner} 와 C_{outer} 는 내부와 외부 전송선로의 커패시턴스이다. ϵ 과 μ 는 블룸라인 PFL 매질의 유전율과 투자율, N 은 나선형 전극의 턴수(number of turns)이다. 내부 및 외부 전송 선로의 특성 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_{inner} = \sqrt{\frac{L_{inner}}{C_{inner}}}, \quad Z_{outer} = \sqrt{\frac{L_{outer}}{C_{outer}}} \quad (5)$$

식(1)과 식(3), 식(2)와 식(4)을 비교하면 $Z_{inner} = Z_{outer}$ 을 성립시킬 수 있는 조건은 명백히 다음과 같다.

$$R_2/R_1 = R_3/R_2 \quad \text{또는} \quad R_2 = \sqrt{R_1 R_3} \quad (6)$$

따라서 N 과 관계없이 $R_2=10$ cm가 되어야 한다. R_2 가 상수로 정해졌으므로 θ 는 유일한 변수 N 의 함수로서 다음과 표현된다.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{l}{2\pi R_2 N} \quad (7)$$

그러므로 식(7)을 식(1)과 식(2)에 대입하면, N 의 함수로서 단일 전송 선로의 인덕턴스와 커패시턴스를 그림 6과 그림 7과 같이 구할 수 있다. 또한 식(5)을 이용하여 특성 임피던스(Z)를 그림 8과 같이 구할 수 있으며 턴수와 특성 임피던스의 관계는 다음 근사식으로 표현된다.

$$Z = 25.76N - 1.01 [\Omega] \quad (8)$$

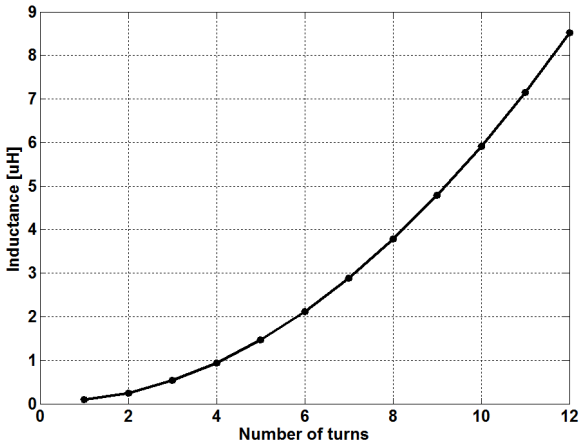


그림 6 턴수와 인덕턴스의 관계
Fig. 6 Relation of number of turns to inductance

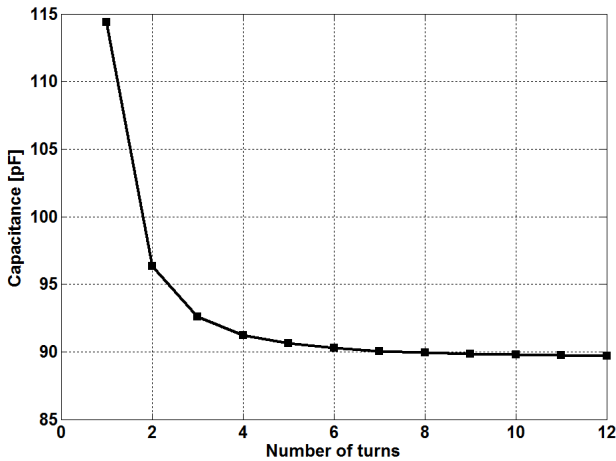


그림 7 턴수와 커패시턴스의 관계
Fig. 7 Relation of number of turns to capacitance

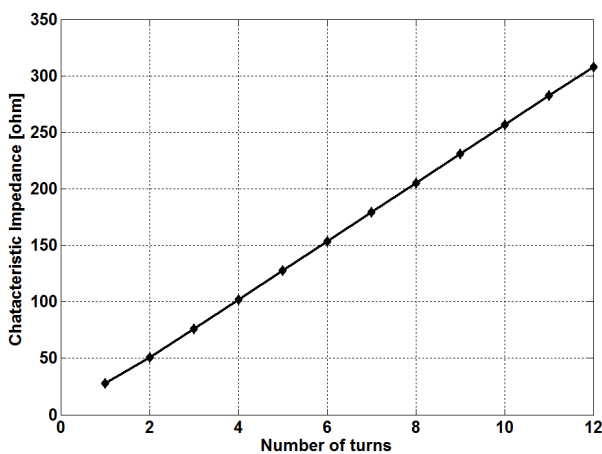


그림 8 턴수와 특성 임피던스의 관계
Fig. 8 Relation of number of turns to characteristic impedance

3.3 나선형 블룸라인 PFL의 출력 펄스 폭

나선형 블룸라인 PFL의 펄스 형성 과정은 원통형 블룸라인 PFL과 동일하다. 따라서 전압 펄스가 나선형 전송 선로를 한번 통과하는데 소요되는 시간은 다음과 같다.

$$T_d = \frac{l_h \sqrt{\epsilon_r}}{c} = \frac{\sqrt{(2\pi R_2 N)^2 + l^2} \sqrt{\epsilon_r}}{c} \quad (9)$$

여기서 $l_h = \sqrt{(2\pi R_2 N)^2 + l^2}$ 는 나선형 전극의 유효길이로서 나선형 전극을 펼칠 때 전극 양단의 최단 거리를 의미한다. 식(9)로부터 턴수를 구하면,

$$N = \frac{1}{2\pi R_2} \sqrt{\frac{c^2 T_d^2}{\epsilon_r} - l^2} \quad (10)$$

나선형 블룸라인 PFL의 출력 펄스의 펄스 폭은 $T_w = 2T_d$ 이므로 $T_w = 50$ ns의 출력펄스를 얻기 위해서 식(11)에 $T_d = 25$ ns을 대입하고 턴수가 정수가 되도록 선택하면 $N=8$ 이다. 이 값과 더불어 나선형 전극의 반경($R_2=10$ cm)을 이용하면 위에 언급한 나선형 전극과 관련된 매개 변수들을 표 1과 같이 계산할 수 있다. 여기서 피치 거리(P)는 전극 폭과 전극 사이 간격의 합으로서 l 을 N 으로 나눈 값이다.

표 1 나선형 전극과 관련된 매개 변수의 계산치
Table 1 Calculated values of the parameters related to the spiral electrode

매개 변수	계산치
반경(R_2)	10 cm
턴수(N)	8
내부 전송 선로의 인덕턴스(L_{inner})	3.78 μH
외부 전송 선로의 인덕턴스(L_{outer})	3.78 μH
내부 전송 선로의 커패시턴스(C_{inner})	89.9 pF
외부 전송 선로의 커패시턴스(C_{outer})	89.9 pF
내부 전송 선로의 임피던스(Z_{inner})	205 Ω
외부 전송 선로의 임피던스(Z_{outer})	205 Ω
피치각(θ)	84.3°
전송 선로 통과 시간(T_d)	25.14 ns
출력 펄스 폭(T_w)	50.28 ns
피치 거리(P)	6.25 cm

그림 9는 표 1에 근거하여 제작된 나선형 전극의 사진이다. 나선형 전극은 아크릴 원통형 지지대 위에 부착된 구리 테이프로 만들어진다. 전기적 매개 변수에 대한 방정식(식(1)~식(4))에서 가정한 조건($w \gg g$)이 충족될 수 있도록 g 는 가능한 작은 값이 되어야 한다. 그러나 이 값이 너무 작으면 연면방전이 발생할 수 있다는 점에 주의해야 한다. 많은 연면 절연 시험을 수행한 후 $g=0.5$ cm이면 전송 선로의 충전 전압이 300 kV일 때에도 연면 절연이 잘 유지되는 것을 확인하였다. 따라서 전극 폭은 $w=5.75$ cm으로 정하였다.



그림 9 나선형 전극 사진
Fig. 9 Photograph of the helical electrode

3.4 시뮬레이션 및 실험 결과

내부 및 외부 전송 선로의 특성 임피던스는 동일하며 그 값은 식(8)로부터 구하면 205 Ω이 된다. 따라서 블룸라인 PFL의 출력 임피던스는 410 Ω인 된다. 그러나 위에서 언급한 바와 같이, 식(8)은 분산 관계가 고려되지 않은 근사식으로부터 유도되었기 때문에 주파수와 무관하다. 실제로 출력 펄스는 상승시간과 펄스 폭에 따라 다양한 주파수 스펙트럼을 나타낸다. 예를 들면, 그림 4에 도시된 실제 출력 펄스의 경우 대부분의 주파수 성분은 200~600 MHz 범위에 포함되어 있다[4]. 본 논문에서는 출력 임피던스와 주파수의 관계를 조사하기 위하여 전자기 시뮬레이션 소프트웨어(CST Microwave Studio)를 이용하여 나선형 블룸라인 PFL을 시뮬레이션 하였다. 그림 10은 시뮬레이션 결과로서, 주파수에 대한 출력 임피던스의 변화를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이, 400 MHz 이하의 저주파수 영역에서 출력 임피던스는 주파수와 거의 무관하게 410 Ω을 유지한다. 한편, 400 MHz 이상의 고주파수 영역에서는 주파수에 따라 출력 임피던스는 410 Ω을 중심으로 변동하지만 변동 폭은 최대 3 Ω 정도로 주파수의 영향은 별로 크지 않다.

그림 11은 실험에서 취득한 나선형 블룸라인 PFL의 출력 펄스 파형을 나타낸다. 나선형 전극의 효과로 펄스 폭이 증가한 것은 분명히 볼 수 있지만 상대적으로 느린 하강 시간 때문에 펄스 폭은 설계치보다 다소 길어져서 약 60 ns 정도이다. 앞에서 언급한 것처럼, 펄스의 상승 및 하강 시간은 스파크 갭 스위치와 같은 부품에 존재하는 기생 인덕턴스에 의하여 길어질 수 있다. 일반적으로 상승 시간이 짧을수록 고주파수 성분이 증가하게 되므로 광대역의 펄스를 얻기 위해서는 피킹 스위치를 이용하여 기생 인덕턴스에 의하여 길어진 상승 시간을 단축해야 한다. 그림 11에서 하강 시간과 비교하면, 피킹 스위치에 의하여 상승 시간은 매우 짧아졌다는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 피킹 스위치가 동작할 때 발생하는 스위칭 잡음 신호 때문에 펄스 파형이 왜곡되는 점은 피할 수 없다.

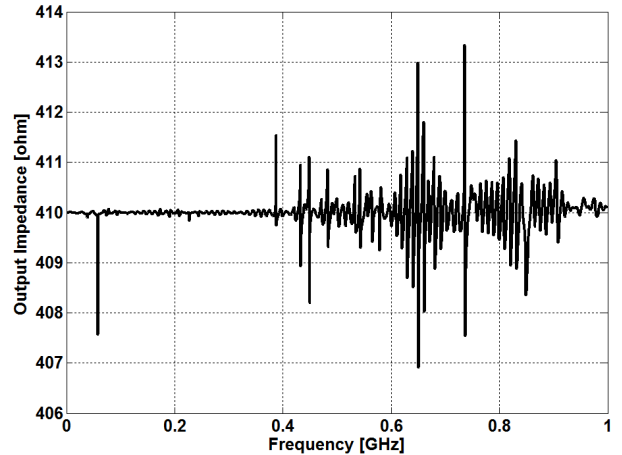


그림 10 출력 임피던스에 대한 시뮬레이션 결과
Fig. 10 Simulation result for the output impedance

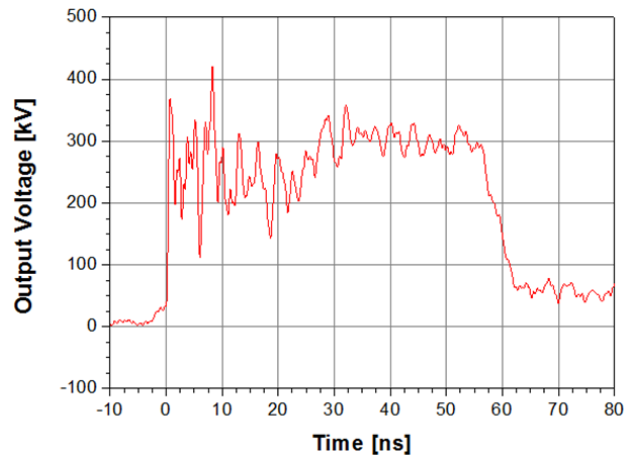


그림 11 나선형 블룸라인 PFL의 출력 펄스 파형
Fig. 11 Output pulse waveform of the helical Blumlein PFL

4. 결 론

원통형 펄스 발생기의 출력 펄스 폭을 증가시키기 위하여 중간 전극을 나선형 전극으로 대체하였다. 분산관계를 고려하지 않은 근사식을 이용하여 내부 및 외부 전송 선로의 특성 임피던스를 나선형 전극의 구조적 매개 변수로 표현하였다. 두 전송 선로의 특성 임피던스의 값은 같다는 조건으로부터 나선형 전극의 반경을 $R_2=10$ cm, 출력 펄스 폭과 턴수의 관계식으로부터 50 ns 펄스 폭에 대응하는 턴수를 $N=8$ 로 결정하였다. 근사식의 타당성을 조사하기 위하여 특성 임피던스의 주파수 특성을 전자기 시뮬레이션 소프트웨어를 이용하여 모의 실험하였다. 그 결과, 주파수에 대한 특성 임피던스의 변동 폭은 미미하였고 그 값은 ± 0.73 % 오차 범위 내에서 근사식으로 구한 값과 일치하였다. 실제 출력 펄스의 폭은 기생 인덕턴스로 인하여 예상보다 다소 늘어나지만 나선형 전극의 활용은 원통형 펄스 발생기를 소규모로 유지한 상태에서 출력 펄스 폭을 증가시키는데 매우 양호한 방법으로 판단된다.

References

- [1] A. D. Blumlein, "Improvements in or relating to apparatus for generating electrical impulses," GB Patent 589 127, 1947.
- [2] D. V. Giri, High Power Electromagnetic Radiators, London: Harvard University, 2004.
- [3] J. O. Rossi, J. J. Barroso, and M. Ueda, "Modeling of Wound Coaxial Blumlein Pulsers," IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 34, pp. 1846-1852, 2006.
- [4] Y. S. Jin, S. W. Lim, C. H. Cho, J. S. Kim, S. H. Lee, and Y. Roh, "High voltage ultrawide band pulse generator using Blumlein pulse forming line," Rev. Sci. Instrum., Vol. 83, pp. 044704-1-044704-5, 2012.
- [5] J. Liu, Y. Yin, B. Ge, X. Cheng, J. Feng, J. Zhang, and X. Wang, "A compact high power pulsed modulator based on spiral Blumlein line," Rev. Sci. Instrum., Vol. 78, 103302-1-103302-5, 2007.
- [6] Y. Zhang, J. Liu, X. Cheng, H. Zhang, and G. Bai, "A Way for High-Voltage μ s-Range Square Pulse Generation," IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 39, pp. 1125-1130, 2011.
- [7] S. K. Sharma, P. Deb, A. Sharma, R. Shukla, T. Prabaharan, B. Adhikary, and A. Shyam, "Note: Compact helical pulse forming line for the generation of longer duration rectangular pulse," Rev. Sci. Instrum., Vol. 83, pp. 066103-1-066103-3, 2012.
- [8] V. P. Singal and B. S. Narayana, K. Nanu and P. H. Ron, "Development of a Blumlein based on helical line storage elements," Rev. Sci. Instrum., Vol. 72, pp. 1862-1868, 2001.
- [9] J. L. Liu, C. L. Li, and J. D. Zhang, "A spiral strip transformer type electron-beam accelerator," Laser Part. Beams, Vol. 24, pp. 355 - 358, 2006.
- [10] Y. Roh, Y. S. Jin, C. Cho and S. Lim, "A Peaking Switch to Generate a High Voltage Pulse of Sub-nanosecond Rise time," Trans. KIEE. Vol. 61, No. 9, pp. 1300 - 1305, 2012.
- [11] Y. Roh and Y. S. Jin, "Analysis of output pulse of high voltage and nanosecond Blumlein pulse generator," J. Electr. Eng. Technol., vol. 8, pp. 150 - 155, 2013.
- [12] Y. Zhang, J. Liu, X. Fan, H. Zhang, S. Wang, and J. Feng, "Characteristic impedance and capacitance analysis of Blumlein type pulse forming line of accelerator based on tape helix," Rev. Sci. Instrum., vol. 82, pp. 104701-1-104701-13, 2011.
- [13] J. L. Liu, X. B. Cheng, B. L. Qian, B. Ge, J. D. Zhang, and X. X. Wang, "Study on strip spiral Blumlein line for the pulsed forming line of intense electron-beam accelerators," Laser Part. Beams, vol. 27, pp. 95 - 102, 2009.

저 자 소 개



노영수 (盧永秀)

1984년 서울대 전기공학과 졸업, 1986년 서울대 전기공학과 졸업(석사), 2001년 UCD 응용과학과 졸업(박사), 2003-현재 숭실대 전기공학과 부교수

Tel : (02) 820-0663

E-mail : yroh@ssu.ac.kr



진윤식 (陳潤植)

1986년 서울대 원자핵공학과 졸업, 1990년 서울대 원자핵공학과 졸업(석사), 1999년 Nagasaki대 전자정보공학 (박사), 1990-현재 한국전기연구원 책임연구원

Tel : (055) 280-1458

E-mail : ysjin@keri.re.kr