

충전선로를 이용한 Damped Sinusoidal 전자기펄스 발생장치

A Damped Sinusoidal Electromagnetic Pulse Generator using a Charged Line

류지현*

Ryu, Ji Heon

ABSTRACT

A damped sinusoidal electromagnetic pulse generator was designed, fabricated and tested. The pulse generator consisted of an oscillator(a spark gap switch and an initially charged low impedance line) and a high impedance antenna. This generator was capable of producing damped sinusoidal pulses at closure of the spark gap switch. A Marx generator was employed to supply the pulse generator with high voltage pulses. While the pulse generator was provided with the high voltage pulses of 200kV from the Marx generator, its output power was maximized by controlling the pressure of the gas contained in the spark gap switch. The output power of the damped sinusoidal electromagnetic pulse oscillator was 1.3GW and the amplitude of electric field radiated from the pulse generator was 4kV/m at the range of 25m.

주요기술용어(주제어) : Damped Sinusoidal Pulse(감쇠 정현파 펄스), Electromagnetic Pulse(전자기 펄스), High Power Electromagnetics(고출력 전자기학), Mesoband(메조밴드)

1. 머리말

전자기 펄스는 전자기적 진동을 만들어 내는 LC회로에 의해 쉽게 만들어 질 수 있다. 저항을 가지고 있는 LC회로 즉 RLC 회로가 underdamped response를 가지고 있을 경우 이 회로는 damped sinusoidal pulse를 만들어 낸다. 그림 1과 같이 RLC 회로의 각 소자값들이 underdamped response를 만족시키고 에너지 저장소자인 캐패시터가 초기 저장된 에너지를 다른 소자들로 방전한다면 에너지를 소모하는 저항 양단에는 damped sinusoidal pulse 형태의 전위가

나타난다. transient radar나 원격 탐지와 같은 많은 분야에 응용잠재력을 가지고 있는 본 논문의 감쇠 정현파 전자기펄스 발생장치의 동작원리 역시 이와 같은 간단한 회로이론으로부터 출발한다.

수 백 kV의 전압과 수 백 MHz 주파수의 펄스 신호를 만들어 내는 고출력 전자기 펄스 발생장치를 앞에서 설명한 캐패시터나 인덕터를 이용해 구현하는 것은 현실적으로 불가능하다. 고전압의 집중소자는 상대적으로 큰 크기를 가지고 있고 파장에 비해 상대적으로 큰 집중소자들의 크기는 높은 주파수의 회로구현에 방해요소가 되기 때문이다. 캐패시터나 인덕터와 같은 집중소자를 전송선로로 대체하여 회로를 구현한다면 높은 전압과 높은 주파수를 모두 만족시키는 고출력 damped sinusoidal 전자기펄스 발생장치를 구현할 수 있다. 이 때 캐패시터는 낮은 임

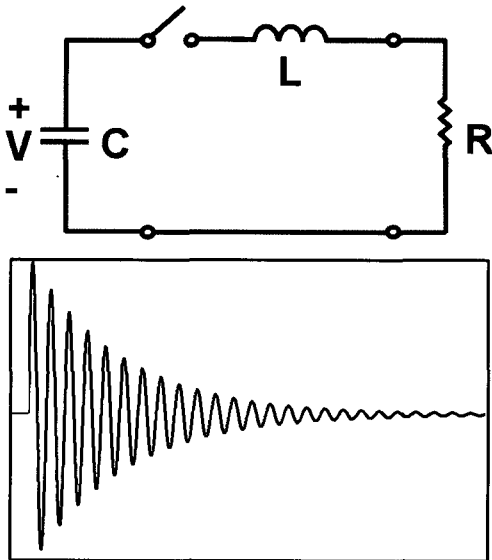
† 2006년 2월 9일 접수~2006년 5월 17일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : rjh@add.re.kr

피턴스의 전송선로로 인덕터는 높은 임피던스의 전송선로로 대체되어 구현된다. 이런 기본원리와 맥락을 같이 하여 미국 Air Force Research Laboratory의 Carl E. Baum은 DISPATCHER라는 광대역 고효율 펄스 발생장치의 동작원리를 소개하였다^[1]. 또한 오스트레일리아의 Defence Science and Technology Organization의 K. Hong과 S. Braidwood도 Biconical 안테나에 용량성으로 충전된 에너지를 스파크 갭 스위치에 의해 방전하는 원리로 15m 거리에 1.8kV/m 크기의 펄스를 방사시키는 damped sinusoidal 펄스 발생장치를 제작하여 그 결과를 논문으로 발표하였다^[2].

본 논문에서는 이와 같은 원리를 바탕으로 설계된 damped sinusoidal 전자기펄스 발생장치의 동작원리와 설계방법을 소개하고 출력특성을 분석하기 위한 시험 결과를 정리하였다.

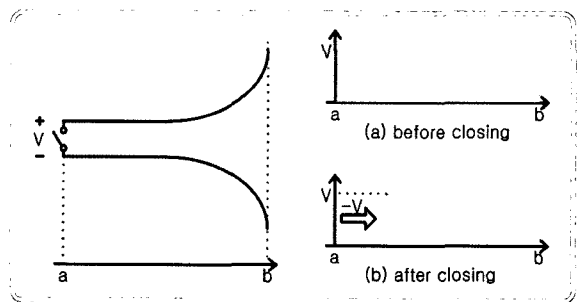


[그림 1] RLC 회로와 damped sinusoidal 펄스

로에 결합된 스위치가 turn-on되면 스위치 양단의 전위차는 없어지고 $-V$ 의 크기를 갖는 voltage step pulse 발생하여 안테나 방향으로 전파하게 된다^[3]. 이때 발생한 펄스의 상승시간은 스위치의 turn-on 시간에 의해 결정되고 안테나로 도달한 펄스는 안테나를 통해 공간상으로 전파된다. 부하인 안테나로 방출되는 에너지를 증가시키기 위해서는 초기에 저장되는 에너지를 높여야 하고 이를 위해서는 전송선로의 임피던스를 낮추는 것이 유리하다. 전송선로에 초기 저장된 에너지는 전송선로가 가지는 등가적인 캐패시턴스를 C 라고 할 때 식 (1)과 같이 표현된다. 전송선로의 단위 길이 당 인덕턴스와 캐패시턴스를 각각 L' 과 C' 이라 할 때 전송선로의 특성임피던스(Z_0)는 식 (2)와 같이 나타남으로 동일한 인덕턴스에 대해 전송선로의 특성임피던스를 낮추는 것이 식 (1)과 같이 표현되는 전송선로에 저장된 초기에너지(E_i)를 높이는 방법이 된다.

$$E_i = \frac{1}{2} CV^2 \quad (1)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (2)$$



[그림 2] 펄스 발생장치(좌)와 전위분포(우)

2. 설계 및 시뮬레이션

가. 동작원리

그림 2는 본 논문의 광대역 damped sinusoidal 전자기펄스 발생장치의 동작원리를 설명하기 위한 그림이다. 그림 2에서와 같이 V 의 크기로 충전된 전송선

안테나의 임피던스가 Z_0 이고 전송선로의 특성 임피던스가 안테나의 임피던스에 비해 아주 작다면 안테나에 전달되는 펄스의 세기는 초기 충전된 전압의 두 배가 된다. 이것은 전송선로에서 발생한 펄스가 안테나로 전달될 때의 전달계수 T_0 가 식 (4)와 같이

2가 되기 때문이다. 또한 안테나에 대한 전송선로의 반사계수 Γ_a 는 1에 가까워 대부분의 에너지는 스위치 방향으로 반사된다. 스위치의 임피던스 Z_s 는 전송선로의 특성임피던스에 비해 매우 작으므로 스위치에 도달한 펄스는 식 (6)과 같이 반사계수 -1의 값으로 다시 반사된다.

$$Z_t \ll Z_a \tag{3}$$

$$T_a = \frac{2Z_a}{Z_a + Z_t} \approx 2 \tag{4}$$

$$\Gamma_a = \frac{Z_a - Z_t}{Z_a + Z_t} \approx 1 \tag{5}$$

$$\Gamma_s = \frac{Z_s - Z_t}{Z_s + Z_t} \approx -1 \tag{6}$$

위의 원리를 적용하여 전송선로의 길이가 l 이고 전송선로를 통과하는 펄스의 속도가 v_p 일 때, 안테나로 전달되는 펄스의 주파수 f 를 계산하면 다음과 같다.

$$f = \frac{v_p}{4l} \tag{7}$$

나. 설계

Damped sinusoidal 전자기펄스 발생장치의 설계에서 가장 먼저 결정을 해야 할 사항은 전송선로부의 유전체 재질이다. 전송선로부의 유전체는 수 백 kV의 고전압과 수 백 MHz의 고주파 신호를 전송하기에 적합해야 하며 유전율이 상대적으로 낮은 것이 유리하다. 유전율이 높아지면 공진부의 길이가 짧아져서 높은 주파수의 고전압 공진기를 만드는 데 한계가 있기 때문이다. 본 설계에서는 이와 같은 목적으로 쉽게 쓸 수 있는 폴리에틸렌을 유전체로 선정하였다.

공진기의 부하에 해당하는 안테나의 임피던스는 100Ω으로 결정하였다. 절연을 위해 필요한 유전체의 최소 두께를 경험적인 고찰을 통해 12mm로 결정하였을 때 유전체 폴리에틸렌의 비유전율을 2.25로 가정하면 표 1과 같은 설계 변수가 얻어진다. 여기서 r_i

는 동축선로 공진기의 중심도체 반지름을 나타내고 r_o 는 공진기 유전체의 외곽 반지름을 나타낸다.

$$r_o - r_i = 12 \tag{8}$$

[표 1] 공진기 임피던스에 따른 여러 가지 변수들

공진기 임피던스(Ω)	$\frac{r_o}{r_i}$	r_o (mm)	단위길이 당 용량(nF/m)
10.0	1.28	54	0.5
7.5	1.21	70	0.7
5.0	1.13	102	1.0
4.0	1.11	126	1.3
3.0	1.08	166	1.7
2.0	1.05	246	2.5
1.0	1.03	486	5.0

표 1을 살펴보면 공진기의 임피던스가 줄어들수록 공진기의 용량이 증가되고 이 값에 비례한 더 많은 에너지를 공진기에 저장할 수 있음을 알 수 있다. 이것은 공진기의 임피던스를 낮추는 것으로 더 큰 quality factor를 가진 damped sinusoidal 펄스 발생 장치가 설계 가능함을 의미한다. 그러나 공진기의 임피던스가 너무 작아지면 절연을 고려할 때 유전체의 외곽 반지름이 급격히 증가되어야 한다. 위 표 1에 나타나 있듯이 1Ω을 가진 공진기는 10Ω을 가진 공진기에 비해 같은 길이로 10배의 에너지를 저장할 수 있지만 유전체의 외곽 반지름이 486mm는 되어야 절연에 문제가 없는 고전압 공진기가 된다.

표 1에 정리된 계산결과와 현실적으로 제작 가능한 유전체 폴리에틸렌의 최대지름 등을 고려하여 공진기의 임피던스를 4Ω으로 결정하였다. 부하인 안테나의 임피던스가 100Ω일 때 참고문헌^[1]에 나타나 있는 이론식 (9)를 참고하여 계산한 본 공진기의 quality factor는 약 20이다.

$$Q = \frac{\pi Z_a}{4Z_t} \tag{9}$$

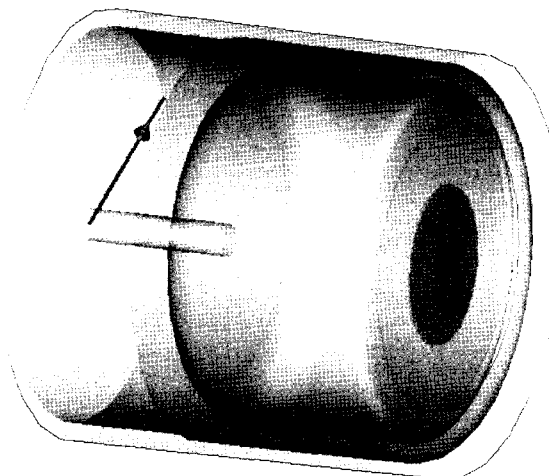
공진기의 길이는 공진주파수를 결정하는 역할을 한다. 공진주파수를 180MHz로 결정하고 공진기의 길이를 계산하면 다음 식 (10)을 참고할 때 약 278mm가 된다. 공진기의 한 쪽 끝 중심에 스위치가 위치한다는 것을 고려할 때 공진기의 반지름 126mm도 공진부의 길이에 포함됨으로 실제 공진기의 동축선로 길이는 이 값을 뺀 152mm가 된다.

$$l = \frac{c}{4f_c \sqrt{\epsilon_r}} \quad (10)$$

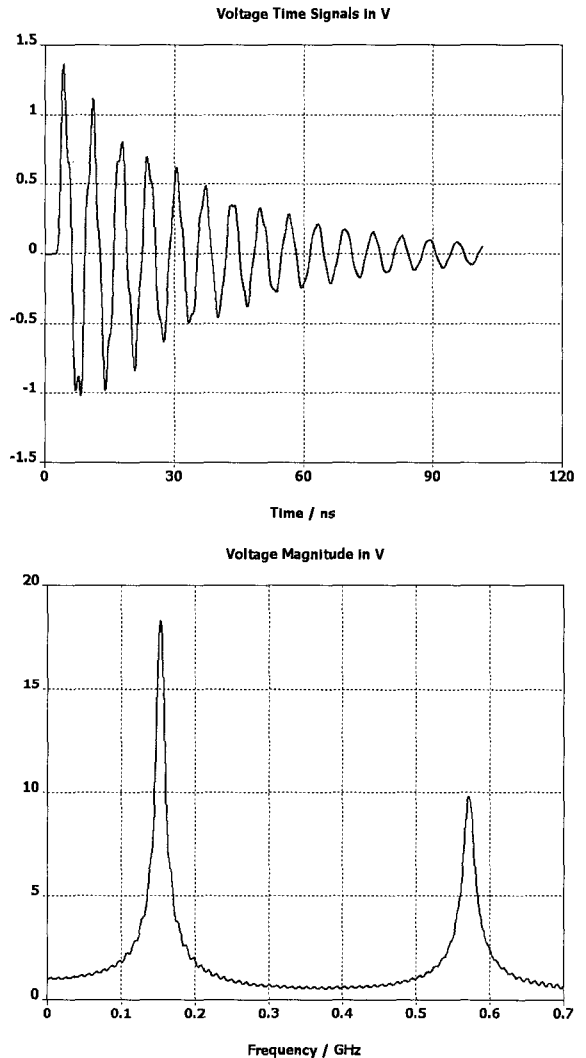
다. 시뮬레이션

이론적으로 계산된 값과 실제 제작 후 얻어진 결과값의 차이를 줄이기 위해 제작에 앞서 전자기 해석프로그램으로 장치를 미리 시뮬레이션 해 볼 필요가 있다. 이론적으로 계산된 파라미터를 바탕으로 실제 제작을 고려한 3차원 공진기를 설계하여 출력펄스를 예측하여 보았다. 본 시뮬레이션은 독일 CST사의 Microwave Studio라는 3차원 전자기 해석 프로그램을 이용해 수행되었다.

그림 4의 시뮬레이션 결과에서 공진기의 공진주파수는 147MHz가 됨을 확인할 수 있다. 스위치에서 동축선로가 시작되는 구간까지는 온전한 균일 전송선로로 간주될 수 없는 RTL(Radial Transmission Line) 구간임으로 시뮬레이션 결과에서 출력주파수가



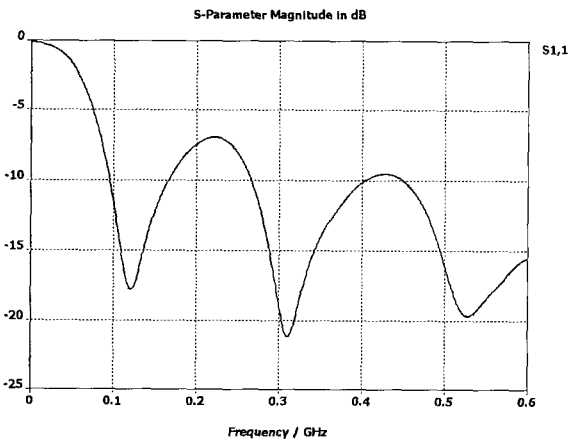
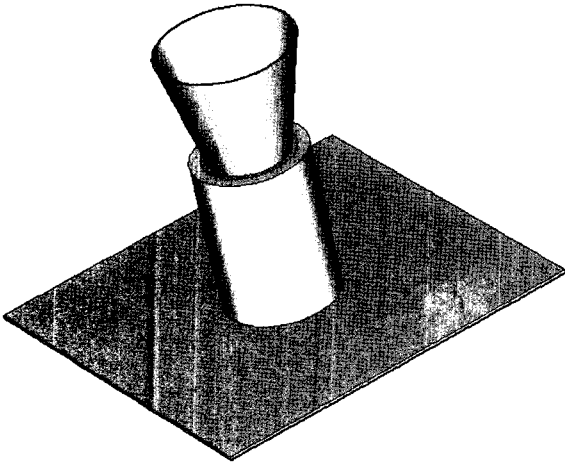
[그림 3] 시뮬레이션을 위한 공진기의 구조



[그림 4] 시뮬레이션 결과(시간축(상)과 주파수축(하))

이론적인 예측치보다 낮아진 것으로 판단된다. 또한 공진주파수 이 외 높은 주파수의 spurious가 발생함을 주목하여 볼 필요가 있다.

공진기의 부하역할을 담당하는 안테나 역시 전자기 해석 프로그램을 이용해 설계되었다. 동축 구조의 공진기와 결합이 용이하고 광대역의 동작특성을 갖는 Conical Monopole 안테나를 부하 안테나로 결정하였으며 이 안테나의 시뮬레이션 결과를 아래 그림 5에 나타내었다. 이 안테나는 98MHz에서 167MHz 사이에서 10dB 이하의 반사계수를 가지고 있는 것으로



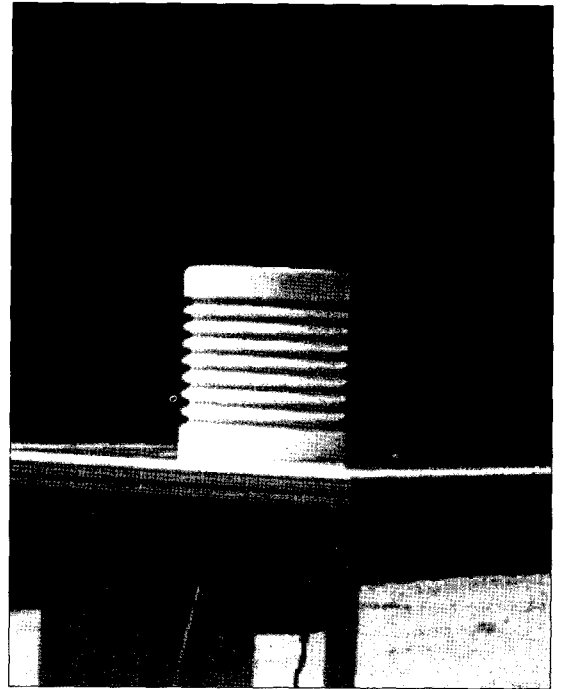
[그림 5] 부하 안테나의 구조(상)와 반사계수 특성(하)

예측되었다. 이와 같은 특성은 공진기의 시뮬레이션에서 예측한 출력 damped sinusoidal 펄스를 방사하기에 적절할 것으로 보인다.

3. 시험과 결과

가. 제작 및 시험

실제 제작된 damped sinusoidal 전자기펄스 발생장치는 스파크 갭 스위치, 공진기, 안테나 급전선, 용량성 분압기 그리고 부하 안테나 등으로 이루어져 있다. 스파크 갭 스위치와 공진기는 전자기펄스를 발생시키는 역할을 하며 안테나 급전선은 공진기와 안테



[그림 6] 실제 제작된 damped sinusoidal 펄스 발생장치

나를 연결하는 역할을 담당한다. 급전선은 100Ω의 안테나 임피던스와 동일한 임피던스를 가지고 있으며 중간에 삽입된 용량성 분압기에 의해 안테나로 전달되는 펄스의 출력측정을 가능하게 한다. 실제 제작된 damped sinusoidal 펄스 발생장치가 그림 6에 나타나 있다.

제작된 장치를 시험하기 위해서는 여러 가지 부가장비가 필요하다. 우선 damped sinusoidal 전자기펄스 발생장치에 펄스 전원을 공급할 막스 발전기가 있어야 하고 출력을 측정할 고성능의 오실로스코프가 필요하다. 본 시험에 사용된 막스 발전기는 전자기펄스 발생장치로 200kV급 이상의 펄스전원을 80ns 이하의 상승시간으로 공급하는 것이 가능하다. 그림 7은 damped sinusoidal 전자기펄스 발생장치의 성능 분석을 위한 시험장치 setup을 나타낸다. 부하 안테나를 통해 방사된 전자파는 26MHz에서 2GHz의 동작주파수 대역을 가지는 초광대역 안테나와 20Gs/s의 sampling 성능을 가지는 오실로스코프에 의해 측정된다.

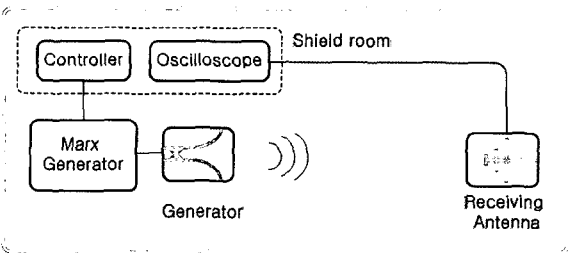
나. 결과

그림 7과 같은 시험 setup을 구성하여 damped sinusoidal 전자기펄스 발생장치의 성능분석 시험을 실시하였다. 막스 발전기가 장치로 공급하는 펄스의 세기를 200kV급으로 고정하고 펄스 발생장치를 구성하는 스파크 갭 스위치의 가스압력을 조절하여 출력이 최대가 되는 압력조건을 찾았다.

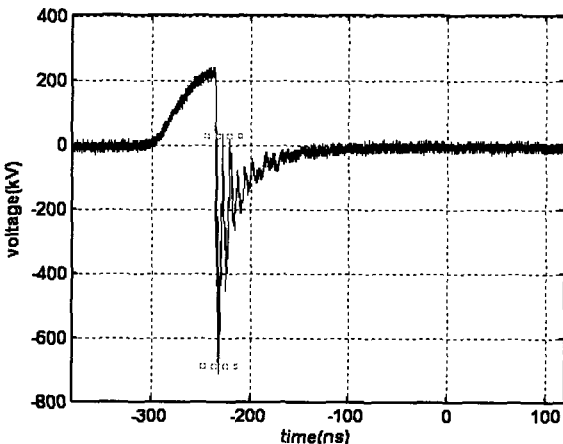
스위치의 매질로 이용된 SF₆ 가스의 압력이 15기압일 때 펄스 출력이 최대가 되었고 이 때 급전선에 설치된 용량성 분압기를 통해 측정된 펄스의 출력파형이 그림 8에 나타나 있다. 이 신호는 막스 발전기가 펄스 발생장치에 펄스전원을 공급하는 신호파형과 공진기의 damped sinusoidal 출력파형이 함께 나타난 신호임으로 이 신호에서 펄스의 시간적인 크기 변화가 빨라져서 damped sinusoidal형을 나타내는 부분만이 실제 공진기의 출력신호에 해당된다. 그림 8에서 파형이 damped sinusoidal 형태를 나타내는 부

분의 앞부분에서 peak-to-peak 값을 읽어내면 공진기에서 발생한 펄스의 최대 peak 전압을 알아낼 수 있다. 이 때 용량성 분압기의 분압비는 별도로 제작된 보정장치와 네트워크 분석기에 의해 측정되었는데 공진주파수에서 약 75dB의 값을 가진다. 측정된 공진기의 펄스 Peak 전압은 360kV이었다. 급전선의 특성 임피던스가 100Ω임을 고려할 때 이 값으로부터 공진기의 damped sinusoidal 펄스 출력이 1.3GW임을 확인할 수 있다.

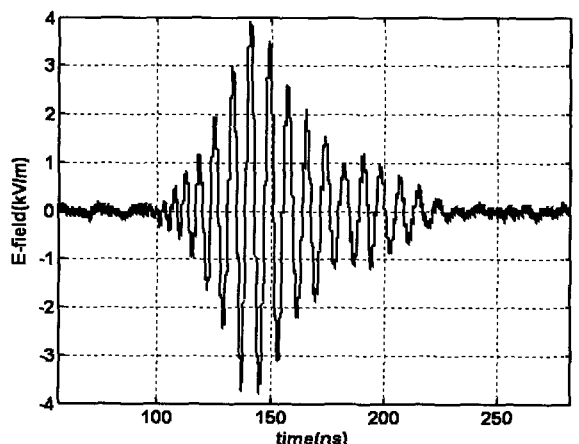
그림 9는 거리 25m에 설치된 광대역 안테나로부터 측정된 전계세기를 나타낸다. Peak 전계의 세기는 4kV/m이며 이로부터 제작된 damped sinusoidal 전자기펄스 발생장치의 far voltage는 100kV로 계산된다. 시간 축에서 얻어진 그림 9의 전계신호를 푸리에 변화하여 그림 10과 같은 주파수 축의 출력신호를 얻을 수 있다. 신호의 중심주파수는 127MHz로 확인되었고 3dB 주파수 대역은 약 20MHz인 것으로 나타났다. 중심주파수에 대한 주파수 대역의 비로 계산된 percent bandwidth(PBW)가 약 16%인 것을 볼 때 제작된 전자기펄스 발생장치는 mesoband source로 분류될 수 있다^[4]. 방사된 펄스의 중심주파수가 127MHz임으로 전자기 해석 프로그램의 시뮬레이션 결과와 약 20MHz의 오차를 나타낸다. 이것은 중심주파수의 형성에 결정적인 영향을 미치는 스파크 갭 스위치부의 구조가 실제 고압구조의 설계에서 약간 달리진 것에서 기인한 것으로 보인다.



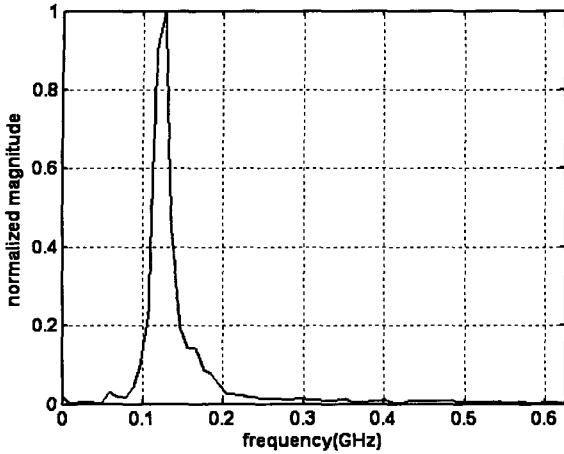
[그림 7] 고출력 전자기펄스 발생장치 시험 setup



[그림 8] 용량성 분압기에 의해 측정된 펄스 출력



[그림 9] 안테나에서 측정된 전계세기



[그림 10] 측정된 전계의 주파수 스펙트럼

4. 맺음말

본 논문에서는 낮은 임피던스를 갖는 충전된 선로와 높은 임피던스를 갖는 안테나 부하로 damped sinusoidal 펄스를 발생시킬 수 있다는 원리를 적용해 고출력 전자기펄스 발생장치를 설계 제작하여 시험한 결과를 정리하였다. 기본 동작원리로부터 출발하여 전자기 해석 프로그램으로 실제 제작될 damped sinusoidal 전자기펄스 발생장치의 공진기와 부하 안테나를 설계하였다. 설계, 제작 후 수행된 시험을 통해 얻어진 전자기펄스 발생장치의 출력은 1.3GW이었고 이 때 얻어진 장치의 far voltage는 100kV로 나타났다. 안테나를 통해 방사된 damped sinusoidal 펄스의 중심주파수는 127MHz이었고 mesoband source의 범주에 해당하는 약 16%의 percent bandwidth를 가진 고출력 전자기펄스 발생장치가 구현되었다.

200kV의 80ns 상승시간을 가지는 막스 발전기의 펄스전원이 고출력 damped sinusoidal 전자기펄스 발생장치에 공급되었으며 장치에 삽입된 스파크 갭 스위치의 가스 압력을 조절하여 최대 출력이 얻어지는 전자기펄스 발생장치의 동작조건을 찾아내었다.

전자기펄스 발생장치의 출력을 증대시키기 위해서는 막스 발전기의 출력전압을 높여야 하지만 이 경우 안테나 개구부에서 절연파괴 현상이 나타날 수 있으므로 안테나의 개구부에 절연내력을 증가시키기 위한 추가적인 장치가 필요하다. 막스 발전기의 출력 전압을 높이고 공진기 및 안테나부의 절연내력을 높여 이 조건에서 공진기의 최대출력을 나타내는 스파크 갭 스위치의 동작조건을 찾아낸다면 더 높은 출력을 가진 damped sinusoidal 전자기펄스 발생장치의 설계가 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] C. E. Baum, "The Dispatcher: a New Mesoband High Power Radiator", in Proceeding of URSI General Assembly, Maastricht, The Netherlands, 2002.
- [2] K. Hong and S. Braidwood, "Development of Antenna-Source System for Generation of High-Power Electromagnetic Pulses", IEEE Transaction on Plasma Science, Vol. 30, pp. 1705~1711, 2002.
- [3] J. W. Ahn, S. Song, J. Ryu, M. Jung, "A Marx Type Electromagnetic Pulse Generator", EUROEM, Magdeburg, Germany, 2004.
- [4] D. V. Giri, T. M. Tesche, "Classification of Intentional Electromagnetic Environments", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 46, NO. 3, 2004.
- [5] D. M. Pozar, Microwave Engineering, Jone Wiley & Sons, Inc., 2nd edition, 1998, pp.300~313.
- [6] 류지현, 이수훈, 임동우, 안재운, "충전된 선로를 이용한 광대역 DS 펄스 발생장치", 유도무기 학술대회 논문집, 탄두분야, 2005, pp.483~486.