

## 고전압 펄스 발생 장치의 회로에 관한 이론적 연구

(Theoretical Study of the Circuits for Device of the High Voltage Pulse Generator)

김영주\*

(Young-Ju Kim)

### Abstract

The high-voltage pulse generator is consist of transformers of fundamental wave and harmonic waves, and shunt capacitances. The pulse has the fundamental wave and the harmonic waves that have been increased as a series circuit by the transformers to make high voltage pulse. This paper shows that pulse generator circuit is analyzed using Miller's theorem and network theory(ABCD Matrix) and simulated in frequency and time domain using Matlab program. The output voltage of pulse were obtained to 2.5kHz, 1.8kV. Output pulse voltage increases as  $L_m$  increases in low voltage circuit. In high voltage circuit, outer capacitors are related to frequency band pass characteristics.

Key Words : Transformer, Harmonic Frequency, High Voltage, Inductance, Capacitance, Miller'S Theorem, Network Theory

### 1. 서 론

고전압 펄스를 만드는 연구가 많이 진행되어 있으며 현재는 고전압에서 높은 주파수의 펄스를 만드는 연구가 진행되고 있다. 이러한 고전압 펄스의 응용분야로는 음이온 공기 청정기[1], 펄스방전에 의하여 발생되는 플라즈마에 의한 자동차 연소효율 증가[2], 이온 물질 표면처리[3], 음식물 부패방지[4], 살균소독[5],

여러 환경정화 분야에 적용되고 있다.

고전압 펄스 발생 방법으로는 IGBT switch 와 step-up 트랜스포머를 사용하는 방식[3], 진공관(HT) 회로 방식[6], RCD 회로를 이용한 방식[7], 트랜스포머와 병렬로 역방향 다이오드를 사용한 방식[8] 등 여러 가지 방법이 있으며 1-40kV 고전압 펄스를 발생시키고 있다.

본 연구에서는 실험한 자료[9]들을 참고하여 기본파 및 고조파들의 회로를 재구성하여 Miller 정리와 회로망 이론을 적용하여 회로들의 전달함수를 구하여 고전압 펄스 발생 장치의 특성을 구하였다.

\* 주저자 : 홍익대학교 과학기술대 전자전기공학과 부교수  
\* Main author : Hongik University Science Technology  
College Department of Electronic &  
Electrical Engineering Associate Professor  
Tel : 041-860-2483, Fax : 041-862-2740

E-mail : jykim5712@hotmail.com  
접수일자 : 2012년 11월 22일  
1차심사 : 2012년 11월 27일  
심사완료 : 2012년 12월 18일

### 2. 본 론

고전압 펄스 발생 장치를 트랜스 포머로 구성하여

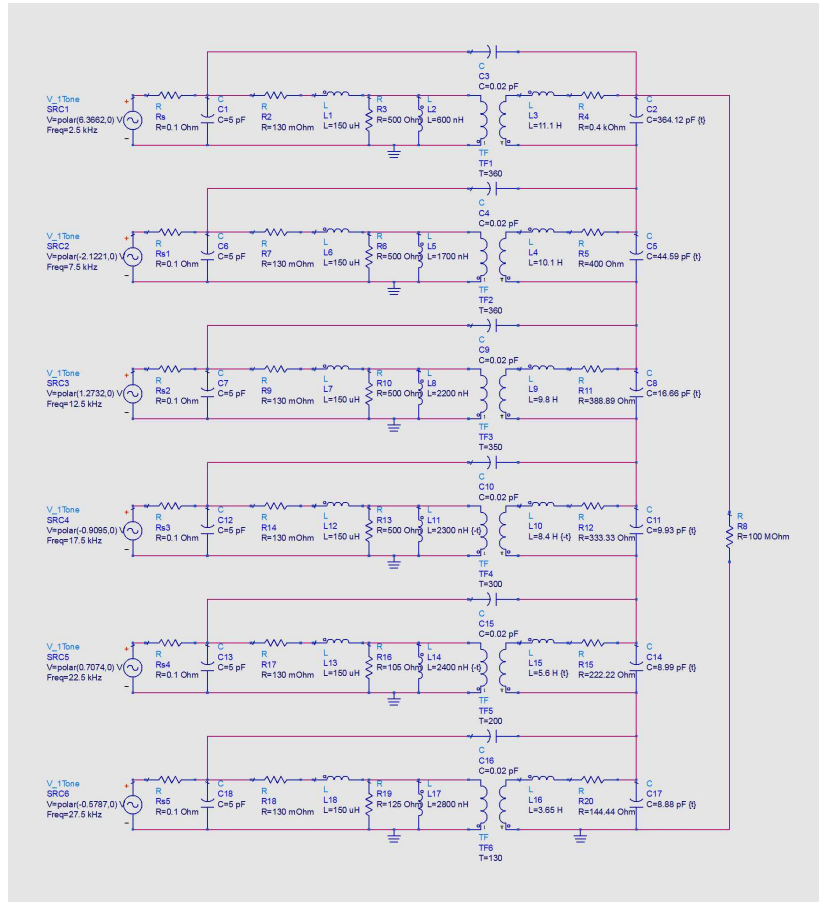


그림 1. 고전압 펄스 발생 회로도  
Fig. 1. The Circuit of High-Voltage Pulse Generator

실험을 하였으며[9], 실험한 자료들로 고전압 펄스 발생장치에 관한 특성을 얻기 위해 시뮬레이션을 하였고[10], 본 연구에서는 이론적으로 회로의 특성을 분석하여 고전압 펄스 발생을 확인하였다.

전체 회로도에는 그림 1과 같으며, 입력 전압 파형은 펄스 입력으로써 Fourier Series로 풀어서 각각의 트랜스포머에 병렬로 인가하였다. 출력단은 기본파와 고조파 성분들인 고전압들이 직렬로 합쳐져 고전압 펄스를 형성한다.

저전압 펄스파형은 기본파인 2.5kHz와 홀수 고조파 성분들인 7.5kHz, 12.5kHz, 17.5kHz, 22.5kHz, 그리고 27.5kHz로 구성되어 있다. 이러한 성분들을 출력단에서 직렬로 합쳐서 2.5kHz, 1.8kV의 고전압 펄스가 형성된다.

## 2.1 고전압 펄스 발생 회로 이론적 분석

고전압 펄스 발생기에 사용되는 트랜스포머의 기본파 등가회로는 그림 2와 같다.

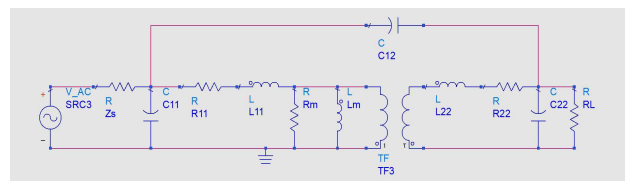


그림 2. 고전압 펄스 트랜스포머의 기본파 등가회로  
Fig. 2. Fundamental Wave Circuit of High-Voltage Pulse Transformer

그림 2의 기본파 등가회로의 입력단과 출력단 사이

의 커패시터( $C_{12}$ )를 Miller공식[11]을 이용하면 입력단의 인덕터( $L_0$ )와 출력단의 커패시터( $C_1$ )로 변환되며 다음 식으로 주어진다.

$$L_0 = \frac{1}{-\omega^2 C_{12}(1-k)} \quad (1)$$

$$C_1 = C_{12}\left(1 - \frac{1}{k}\right)$$

단  $k$ 는 입력단과 출력단의 전압비이다. 변환된 회로도 는 그림 3과 같다.

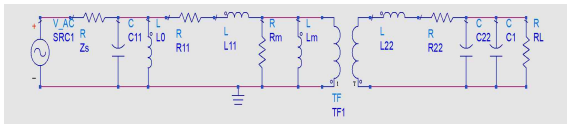
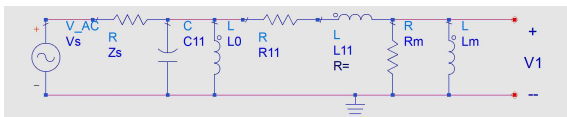


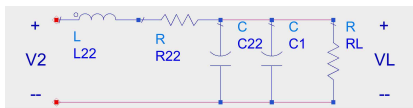
그림 3. 고전압 펄스 트랜스포머의 Miller의 기본파 등가회로  
Fig. 3. Miller's Fundamental Wave Equivalent Circuit of High-Voltage Pulse Transformer

2.1.1 입력단 분석

기본파 및 고조파들의 등가 회로도들은 각각 입력단과 출력단으로 나누어 해석하며 기본파와 고조파 등가회로의 구조는 같으므로 기본파 등가회로의 출력단과 입력단은 그림 4와 같다.



(a) 입력단



(b) 출력단

그림 4. Miller의 기본파 등가회로의 입력단과 출력단  
Fig. 4. Miller's Fundamental Wave Equivalent Circuit of Input and Output

입력단에서 전압비  $\left| \frac{V_1}{V_s} \right|$ 는 수식 (2)와 같다.

$$\left| \frac{V_1}{V_s} \right| = \left| \frac{f_2(\omega)}{f_2(\omega) + Z_s} \times \frac{j\omega L_m R_m}{f_1(\omega)} \right| \quad (2)$$

여기서

$$f_1(\omega) = (R_{11}R_m - \omega^2 L_{11}L_m) + j\omega(L_m R_m + L_m R_{11} + L_{11}R_m)$$

$$f_2(\omega) = \frac{j\omega L_0 f_1(\omega)}{j\omega L_0(R_m + j\omega L_m) + (1 - \omega^2 L_0 C_{11})f_1(\omega)}$$

2.1.2 출력단 분석

출력단에서 전압비  $\left| \frac{V_L}{V_2} \right|$ 은 그림 1에서 직렬로 연결되어진 고조파 성분들의 공진회로를 고려하여야 한다.

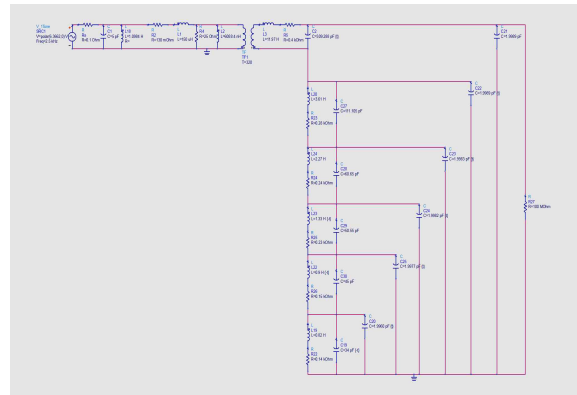


그림 5. 출력단 기본파 Miller의 등가회로  
Fig. 5. Output Miller's Fundamental Equivalent Circuit

기본파의 등가회로는 그림 5와 같으며 기본파의 출력단 해석을 위해서는 직렬로 연결된 3, 5, 7, 9,와 11 고조파의 공진회로들을 고려하여야 하며 공진 회로들의 합성 임피던스를 구하여야 한다.

먼저 그림 6에서 11 고조파의 공진 회로의 합성 임피던스( $Z_6$ )를 구하면

$$Z_6 = \frac{R_6 + j\omega L_6}{(1 - \omega^2 L_6 C_6 - \omega^2 L_6 C_{36}) + j(\omega R_6 C_6 + \omega R_6 C_{36})} \quad (3)$$

이다. 여기서  $R_6$ 와  $L_6$ 는 고압측 11 고조파 공진회로의

$R_{22}$ 와  $L_{22}$ 이고  $C_6$ 는  $C_{22}$ 이고  $C_{36}$ 는  $C_1$ 이다.

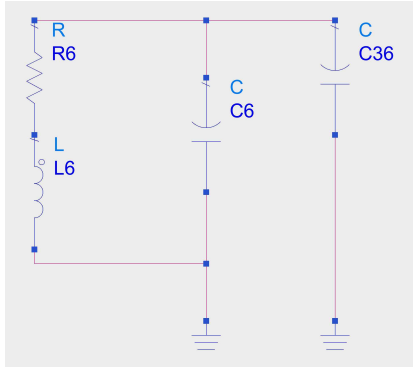


그림 6. 11차 고조파의 임피던스  
Fig. 6. Impedance of 11th Harmonic

9 고조파와 11고조파의 합성 임피던스를  $Z_5$ 라고 하면 회로도는 그림 7과 같다.

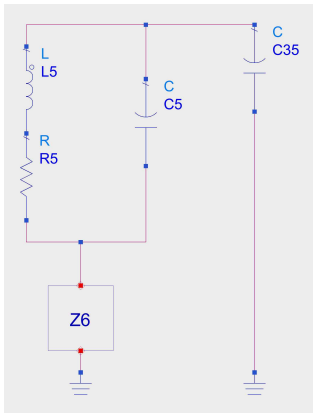


그림 7. 9차 고조파의 임피던스  
Fig. 7. Impedances of 9th Harmonic

$$Z_5 = \frac{R_5 + j\omega L_5 + Z_6 f_5(\omega)}{(1 - \omega^2 L_5 C_5 - \omega^2 L_5 C_{35}) + j(\omega R_5 C_5 + \omega R_5 C_{35}) + j\omega C_{35} Z_6 f_5(\omega)} \quad (4)$$

여기서

$$f_5(\omega) = 1 - \omega^2 L_5 C_5 + j\omega R_5 C_5 \text{이다.}$$

수식 (4)와 같은 방법으로 7, 5, 3 고조파를 합성 임피던스인  $Z_4, Z_3, Z_2$ 는 수식 (5), (6), (7)과 같이 구할 수 있다.

$$Z_4 = \frac{R_4 + j\omega L_4 + Z_5 \{(1 - \omega^2 L_4 C_4) + j\omega R_4 C_4\}}{(1 - \omega^2 L_4 C_4 - \omega^2 L_4 C_{34}) + j\omega R_4 C_4 + j\omega R_4 C_{34}} + j\omega C_{34} Z_5 \{(1 - \omega^2 L_4 C_4) + j\omega R_4 C_4\} \quad (5)$$

$$Z_3 = \frac{R_3 + j\omega L_3 + Z_4 \{(1 - \omega^2 L_3 C_3) + j\omega R_3 C_3\}}{(1 - \omega^2 L_3 C_3 - \omega^2 L_3 C_{33}) + j\omega R_3 C_3 + j\omega R_3 C_{33}} + j\omega C_{33} Z_4 \{(1 - \omega^2 L_3 C_3) + j\omega R_3 C_3\} \quad (6)$$

$$Z_2 = \frac{R_2 + j\omega L_2 + Z_3 \{(1 - \omega^2 L_2 C_2) + j\omega R_2 C_2\}}{(1 - \omega^2 L_2 C_2 - \omega^2 L_2 C_{32}) + j\omega R_2 C_2 + j\omega R_2 C_{32}} + j\omega C_{32} Z_3 \{(1 - \omega^2 L_2 C_2) + j\omega R_2 C_2\} \quad (7)$$

기본파의 출력 등가회로도는 그림 8과 같이 되며 전

압비  $\left| \frac{V_L}{V_2} \right|$ 를 수식 (8)으로 구한다.

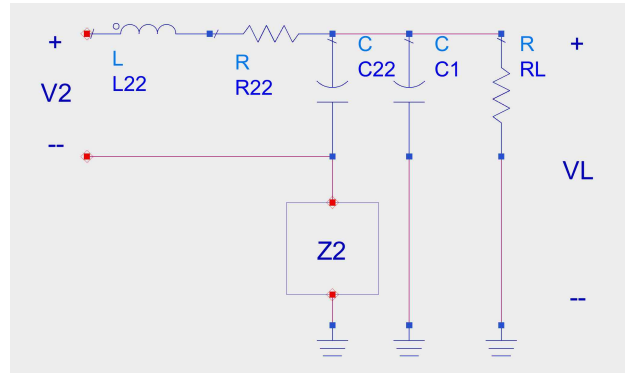


그림 8. 기본파 출력단 등가회로  
Fig. 8. Output Level Equivalent Circuit of Fundamental Wave

$$\left| \frac{V_L}{V_2} \right| = \frac{R_L}{(1 - j\omega C_1 R_L) \left[ g_0(\omega) - \frac{1}{j\omega C_{22}} \right]} \quad (8)$$

$$g_0(\omega) = \left( Z_2 + \frac{1}{j\omega C_{22}} + \frac{R_L}{1 + j\omega C_1 R_L} \right) (1 - \omega^2 L_{22} C_{22} + j\omega R_{22} C_{22})$$

3차 고조파의 등가회로는 그림 9와 같으며 3차 고조파의 출력 해석을 위해서 기본파의 공진 회로와 5, 7, 9와 11의 공진회로들을 고려하여야 한다. 5, 7, 9와 11 고조파의 공진회로는 수식 (6)과 같이  $Z_3$ 가 된다.

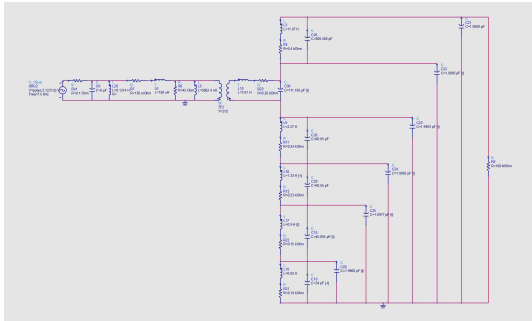


그림 9. 출력단 Miller의 3차 고조파 등가회로  
Fig. 9. Output Level Miller's 3rd Harmonic Equivalent Circuit

3차 고조파 등가회로의 출력을 간략히 나타내어 보면 그림 10과 같다.

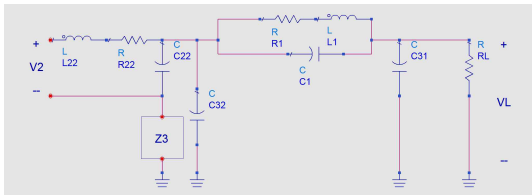


그림 10. 출력단 3차 고조파 등가회로  
Fig. 10. Output Level 3rd Harmonic Equivalent Circuit

여기서 기본파의 공진회로는 전달(ABCD) 파라미터를 이용하여 구할 수 있다.

그림 10에서

$$Y_1 = j\omega C_{32}, Y_2 = j\omega C_{31}, Y_3 = \frac{1}{R_1 + j\omega L_1} + j\omega C_1 \quad \text{라고}$$

하면 이는  $\Pi$ 형 회로가 되고 전달(ABCD) 파라미터로 나타내면 수식 (9)와 같다.

$$A = 1 + \frac{Y_2}{Y_3} = 1 + \frac{j\omega C_{31}(R_1 + j\omega L_1)}{(1 - \omega^2 L_1 C_1) + j\omega R_1 C_1} \quad (9)$$

$$B = \frac{1}{Y_3} = \frac{R_1 + j\omega L_1}{(1 - \omega^2 L_1 C_1) + j\omega R_1 C_1}$$

$$C = Y_1 + Y_2 + \frac{Y_1 Y_2}{Y_3} = j\omega C_{21} + j\omega C_{31}$$

$$- \frac{\omega^2 C_{31} C_{32} (R_1 + j\omega L_1)}{(1 - \omega^2 L_1 C_1) + j\omega R_1 C_1}$$

$$D = 1 + \frac{Y_1}{Y_3} = 1 + \frac{j\omega C_{32}(R_1 + j\omega L_1)}{(1 - \omega^2 L_1 C_1) + j\omega R_1 C_1}$$

전달(ABCD) 파라미터를 이용하여 전압비  $\left| \frac{V_L}{V_2} \right|$ 를 구하면 수식 (10)과 같다.

$$\left| \frac{V_L}{V_2} \right| = \frac{1}{[(1 - \omega^2 L_{22} C_{22} + j\omega R_{22} C_{22})(A + \frac{B}{R_L}) + (R_{22} + j\omega L_{22})(1 + j\omega C_{22} Z_3)(C + \frac{D}{R_L})]} \quad (10)$$

5 고조파의 등가회로는 그림 11과 같으며 위쪽의 기본파, 3고조파 임피던스와 아래쪽의 7, 9, 11 고조파 합성 임피던스를 고려하여야 한다.

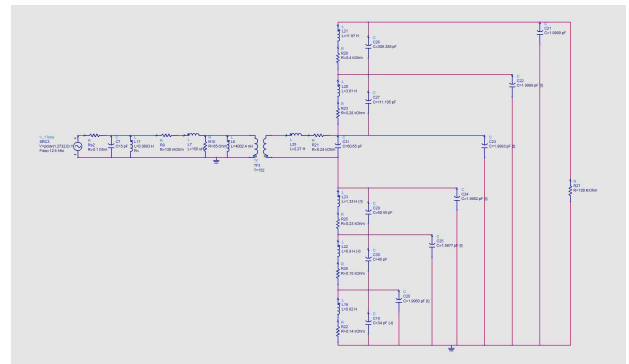


그림 11. 출력단 Miller의 5차 고조파 등가회로  
Fig. 11. Output Level Miller's 5th Harmonic Equivalent Circuit

5고조파의 등가 회로를 간략히 나타내어 보면 그림 12와 같다.

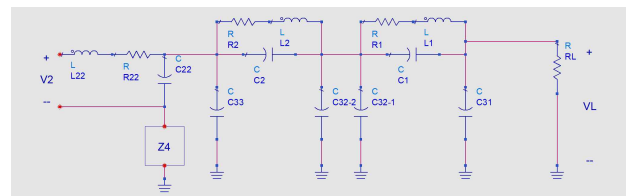


그림 12. 출력단 5차 고조파 개략적인 등가회로  
Fig. 12. Output Level 5th Harmonic Equivalent Circuit

아래쪽의 합성 임피던스( $Z_4$ )는 수식 (5)에서 주어진다. 위쪽의 기본과와 3고조파 합성 임피던스를 구하기 위해서  $\Pi$ 형 전달(ABCD) 파라미터를 이용하여 구한다. 이때  $C_{32} = \frac{1}{2} C_{32-1} = \frac{1}{2} C_{32-2}$ 와 같이 만들어 2단의  $\Pi$ 형 전달(ABCD) 파라미터를 수식 (11), (12)와 같이 만들 수 있다.

$$A_1 = 1 + \frac{j\omega C_{32}/2(R_2 + j\omega L_2)}{(1 - \omega^2 L_2 C_2) + j\omega R_2 C_2} \quad (11)$$

$$B_1 = \frac{R_2 + j\omega L_2}{(1 - \omega^2 L_2 C_2) + j\omega R_2 C_2}$$

$$C_1 = j\omega C_{33} + \frac{1}{2} j\omega C_{32} - \frac{\frac{1}{2} \omega^2 C_{32} C_{33} (R_2 + j\omega L_2)}{(1 - \omega^2 L_2 C_2) + j\omega R_2 C_2}$$

$$D_1 = 1 + \frac{j\omega C_{33} (R_2 + j\omega L_2)}{(1 - \omega^2 L_2 C_2) + j\omega R_2 C_2}$$

$$A_2 = 1 + \frac{j\omega C_{31} (R_1 + j\omega L_1)}{(1 - \omega^2 L_1 C_1) + j\omega R_1 C_1} \quad (12)$$

$$B_2 = \frac{R_1 + j\omega L_1}{(1 - \omega^2 L_1 C_1) + j\omega R_1 C_1}$$

$$C_2 = \frac{1}{2} j\omega C_{32} + j\omega C_{31} - \frac{\frac{1}{2} \omega^2 C_{32} C_{31} (R_1 + j\omega L_1)}{(1 - \omega^2 L_1 C_1) + j\omega R_1 C_1}$$

$$D_2 = 1 + \frac{j\omega C_{32}/2(R_1 + j\omega L_1)}{(1 - \omega^2 L_1 C_1) + j\omega R_1 C_1}$$

전달(ABCD) 파라미터의 행렬 계산을 하면 식 (13)와 같이 전달(ABCD) 행렬을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

출력단의 전압비는 수식 (14)에 주어진다.

$$\left| \frac{V_L}{V_2} \right| = \frac{1}{(1 - \omega^2 L_{22} C_{22} + j\omega R_{22} C_{22})(A' + \frac{B'}{R_L}) + (R_{22} + j\omega L_{22})(1 + j\omega C_{22} Z_4)(C' + \frac{D'}{R_L})} \quad (14)$$

7 고조파는 전달(ABCD) 파라미터가 3단계이고 여기서  $A_3 = A_2^5, B_3 = B_2^5, C_3 = C_2^5, D_3 = D_2^5$ 이다. 윗첨자는 고조파 성분을 말한다. 수식 (4)에서  $Z_5$ 를 구하면 출력단의 전압비는 식 (18)과 같이 구해진다.

$$A_1 = 1 + \frac{\frac{1}{2} j\omega C_{33} (R_3 + j\omega L_3)}{(1 - \omega^2 L_3 C_3) + j\omega R_3 C_3} \quad (15)$$

$$B_1 = \frac{R_3 + j\omega L_3}{(1 - \omega^2 L_3 C_3) + j\omega R_3 C_3}$$

$$C_1 = j\omega C_{34} + \frac{1}{2} j\omega C_{33} - \frac{\frac{1}{2} \omega^2 C_{33} C_{34} (R_3 + j\omega L_3)}{(1 - \omega^2 L_3 C_3) + j\omega R_3 C_3}$$

$$D_1 = 1 + \frac{j\omega C_{34} (R_3 + j\omega L_3)}{(1 - \omega^2 L_3 C_3) + j\omega R_3 C_3}$$

$$A_2 = 1 + \frac{j\omega C_{32}/2(R_2 + j\omega L_2)}{(1 - \omega^2 L_2 C_2) + j\omega R_2 C_2} \quad (16)$$

$$B_2 = \frac{R_2 + j\omega L_2}{(1 - \omega^2 L_2 C_2) + j\omega R_2 C_2}$$

$$C_2 = \frac{1}{2} j\omega C_{33} + j\omega C_{32} - \frac{\frac{1}{4} \omega^2 C_{33} C_{32} (R_2 + j\omega L_2)}{(1 - \omega^2 L_2 C_2) + j\omega R_2 C_2}$$

$$D_2 = 1 + \frac{j\omega C_{33} (R_2 + j\omega L_2)}{2(1 - \omega^2 L_2 C_2) + j\omega R_2 C_2}$$

$$\begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\left| \frac{V_L}{V_2} \right| = \frac{1}{(1 - \omega^2 L_{22} C_{22} + j\omega R_{22} C_{22})(A' + \frac{B'}{R_L}) + (R_{22} + j\omega L_{22})(1 + j\omega C_{22} Z_5)(C' + \frac{D'}{R_L})} \quad (18)$$

9 고조파는 전달(ABCD) 파라미터가 4단계이고 여기서

$$A_4 = A_3^7, B_4 = B_3^7, C_4 = C_3^7, D_4 = D_3^7$$

$$A_3 = A_2^7, B_3 = B_2^7, C_3 = C_2^7, D_3 = D_2^7$$

이며 수식은 다음과 같다.

$$A_1 = 1 + \frac{\frac{1}{2}j\omega C_{34}(R_4 + j\omega L_4)}{(1 - \omega^2 L_4 C_4) + j\omega R_4 C_4} \quad (19)$$

$$B_1 = \frac{R_4 + j\omega L_4}{(1 - \omega^2 L_4 C_4) + j\omega R_4 C_4}$$

$$C_1 = j\omega C_{35} + \frac{1}{2}j\omega C_{34} - \frac{\frac{1}{2}\omega^2 C_{35} C_{34}(R_4 + j\omega L_4)}{(1 - \omega^2 L_4 C_4) + j\omega R_4 C_4}$$

$$D_1 = 1 + \frac{j\omega C_{35}(R_4 + j\omega L_4)}{(1 - \omega^2 L_4 C_4) + j\omega R_4 C_4}$$

$$A_2 = 1 + \frac{j\omega C_{33}/2(R_3 + j\omega L_3)}{(1 - \omega^2 L_3 C_3) + j\omega R_3 C_3} \quad (20)$$

$$B_2 = \frac{R_3 + j\omega L_3}{(1 - \omega^2 L_3 C_3) + j\omega R_3 C_3}$$

$$C_2 = \frac{1}{2}j\omega C_{34} + j\omega C_{33} - \frac{\frac{1}{4}\omega^2 C_{33} C_{34}(R_3 + j\omega L_3)}{(1 - \omega^2 L_3 C_3) + j\omega R_3 C_3}$$

$$D_2 = 1 + \frac{j\omega C_{34}(R_3 + j\omega L_3)}{2(1 - \omega^2 L_3 C_3) + j\omega R_3 C_3}$$

$$\begin{bmatrix} A'' & B'' \\ C'' & D'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 B_1 \\ C_1 D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 B_2 \\ C_2 D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_3 B_3 \\ C_3 D_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_4 B_4 \\ C_4 D_4 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\left| \frac{V_L}{V_2} \right| = \frac{1}{(1 - \omega^2 L_{22} C_{22} + j\omega R_{22} C_{22})(A'' + \frac{B''}{R_L}) + (R_{22} + j\omega L_{22})(1 + j\omega C_{22} Z_6)(C'' + \frac{D''}{R_L})} \quad (22)$$

11 고조파는 전달(ABCD) 파라미터가 5단계이고 여기서

$$A_5 = A_4^T, B_5 = B_4^T, C_5 = C_4^T, D_5 = D_4^T$$

$$A_4 = A_3^T, B_4 = B_3^T, C_4 = C_3^T, D_4 = D_3^T$$

$$A_3 = A_2^T, B_3 = B_2^T, C_3 = C_2^T, D_3 = D_2^T$$

이고 수식은 다음과 같다.

$$A_1 = 1 + \frac{j\omega C_{35}/2(R_5 + j\omega L_5)}{(1 - \omega^2 L_5 C_5) + j\omega R_5 C_5} \quad (23)$$

$$B_1 = \frac{R_5 + j\omega L_5}{(1 - \omega^2 L_5 C_5) + j\omega R_5 C_5}$$

$$C_1 = j\omega C_{36} + \frac{1}{2}j\omega C_{35} - \frac{\frac{1}{2}\omega^2 C_{35} C_{36}(R_5 + j\omega L_5)}{(1 - \omega^2 L_5 C_5) + j\omega R_5 C_5}$$

$$D_1 = 1 + \frac{j\omega C_{36}(R_5 + j\omega L_5)}{(1 - \omega^2 L_5 C_5) + j\omega R_5 C_5}$$

$$A_2 = 1 + \frac{j\omega C_{34}(R_4 + j\omega L_4)}{2(1 - \omega^2 L_4 C_4) + j\omega R_4 C_4} \quad (24)$$

$$B_2 = \frac{R_4 + j\omega L_4}{(1 - \omega^2 L_4 C_4) + j\omega R_4 C_4}$$

$$C_2 = \frac{1}{2}j\omega C_{36} + j\omega C_{35} - \frac{\frac{1}{4}\omega^2 C_{33} C_{34}(R_4 + j\omega L_4)}{(1 - \omega^2 L_4 C_4) + j\omega R_4 C_4}$$

$$D_2 = 1 + \frac{j\omega C_{35}(R_4 + j\omega L_4)}{2(1 - \omega^2 L_4 C_4) + j\omega R_4 C_4}$$

$$\begin{bmatrix} A^{(4)} & B^{(4)} \\ C^{(4)} & D^{(4)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 B_1 \\ C_1 D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 B_2 \\ C_2 D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_3 B_3 \\ C_3 D_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_4 B_4 \\ C_4 D_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_5 B_5 \\ C_5 D_5 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\left| \frac{V_L}{V_2} \right| = \frac{1}{(1 - \omega^2 L_{22} C_{22} + j\omega R_{22} C_{22})(A^{(4)} + \frac{B^{(4)}}{R_L}) + (R_{22} + j\omega L_{22})(C^{(4)} + \frac{D^{(4)}}{R_L})} \quad (26)$$

### 2.1.3 입력단과 출력단 해석

입력과 출력의 전압이득은  $V_2 = nV_1$ 이므로 입력단의 전달함수, 출력단의 전달함수와 n의 곱으로 표시되어 수식 (27)과 같다.

$$\frac{V_L}{V_S} = \left| \frac{V_1}{V_S} \right| \left| \frac{V_L}{V_2} \right| \times n \quad (27)$$

## 2.2 고전압 펄스 발생 회로 시뮬레이션 결과

기본파와 5개의 고조파로 이루어진 고전압 펄스 발생 회로에서 저전압 기본파와 각 고조파들을 인가하였을 경우 Matlab을 이용한 결과는 그림 13과 같으며 고전압 기본파와 각 고조파들의 성분은 표 1에서 주어진다.

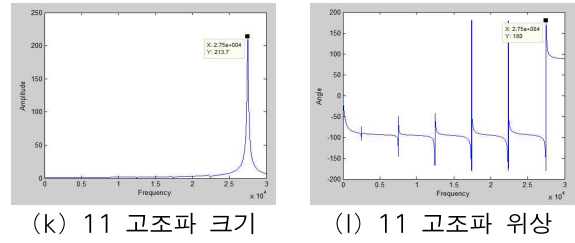
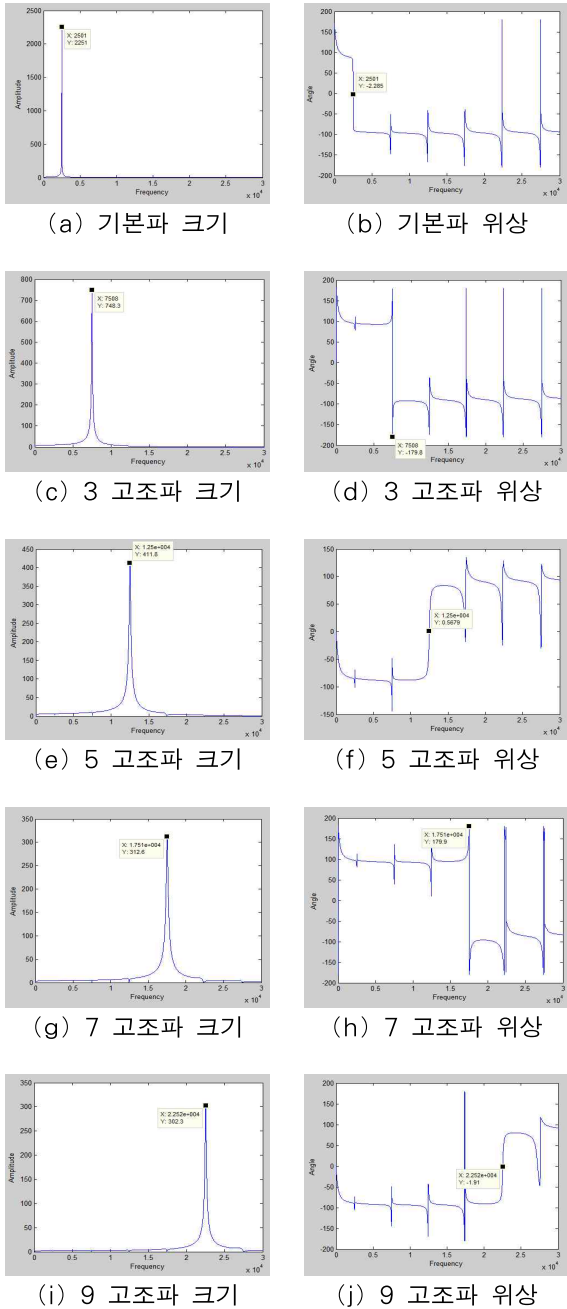


그림 13. 주파수 영역에서의 시뮬레이션 결과  
Fig. 13. Simulation Results at Frequency Domain

표 1. 주파수 영역에서 출력 크기와 위상  
Table 1. Output Amplitude and Phase at Frequency Domain

기본파 (2.501kHz)		3 고조파 (7.508kHz)		5 고조파 (12.5kHz)	
크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)
2251.0	-2.3	748.3	-179.8	411.8	0.6
7 고조파 (17.51kHz)		9 고조파 (22.52kHz)		11 고조파 (27.5kHz)	
크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)
312.6	179.9	302.3	-2.0	213.7	180.0

그림 13에서 고전압 펄스를 만들기 위해서 기본파와 각 고조파들의 크기는 푸리에 계수와 동일하며 위상은 180° 차이를 보인다. 180°의 위상차를 만들기 위해 입력파형의 위상을 조절 하였으며 그 성분들은 표 2와 같다.

표 2. 주파수 영역에서 입력 크기와 위상  
Table 2. Input Amplitude and Phase at Frequency Domain

기본파 (2.5kHz)		3 고조파 (7.5kHz)		5 고조파 (12.5kHz)	
크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)
6.366	83.03	2.122	89.93	1.273	-90.04
7 고조파 (17.5kHz)		9 고조파 (22.5kHz)		11 고조파 (27.5kHz)	
크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)	크기(V)	위상(°)
0.909	91.92	0.699	-93.95	0.571	-95.34



기본파 입력단에서  $L_m$ 에 따라서 출력 파형은 많은 영향을 받으며 그 영향은 그림 14와 같다.

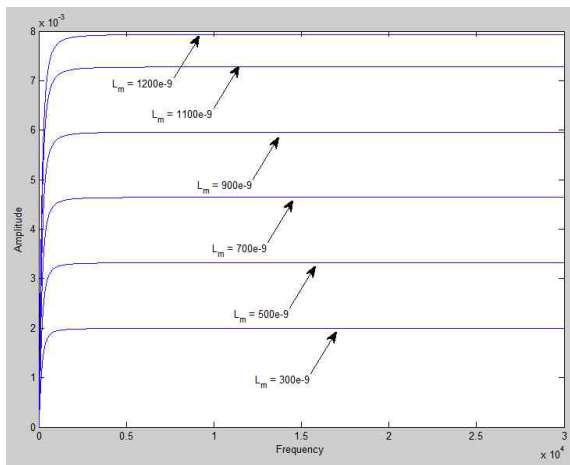


그림 14.  $L_m$ 값에 따른 기본파 입력단 크기 변화  
Fig. 14. Fundamental Wave Input Amplitude of  $L_m$  values

그림 14에서  $L_m$ 을 300nH부터 1200nH까지 변화시켰으며  $L_m$ 값이 커지면  $\left| \frac{V_1}{V_S} \right|$ 의 크기가 커진다.

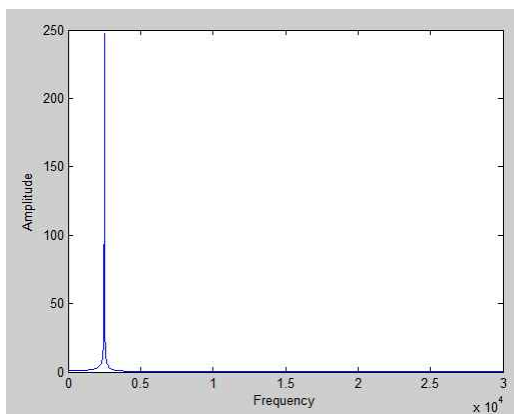


그림 15. 기본파 출력단의 스펙트럼  
Fig. 15. Fundamental Wave output of spectrum

출력단에서 외부 커패시터( $C_{22}$ )와 고압측 인덕턴스( $L_{22}$ )의 공진주파수 특성( $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{22}C_{22}}}$ )에 의하여 기본파 스펙트럼이 그림 15에 보여지며 표 3과 같다.

표 3. 고압측 공진 주파수

Table 3. Resonance Frequency at High-Voltage

	기본파	3고조파	5고조파
$C_{22}$ (pF)	368.4	44.6	16.5
$L_{22}$ (H)	11	10.1	9.8
공진 주파수(kH)	2.5	7.5	1.25
	7고조파	9고조파	11고조파
$C_{22}$ (pF)	9.8	8.9	8.5
$L_{22}$ (H)	8.4	5.6	3.9
공진 주파수(kH)	1.75	22.5	27.6

그림 13의 결과를 이용하여 시간 영역에서 수식 28을 이용하여 출력전압을 구해 보면 그림 16과 같은 펄스(약 1.8kV)를 얻을 수 있다.

$$v(t) = Re [2249 \times e^{j2\pi \times 2501t} - 752 \times e^{j2\pi \times 7508t} + 409.1 \times e^{j2\pi \times 12500t} - 307.2 \times e^{j2\pi \times 17510t} + 279.4 \times e^{j2\pi \times 22520t} - 214.7 \times e^{j2\pi \times 27600t}] \quad (28)$$

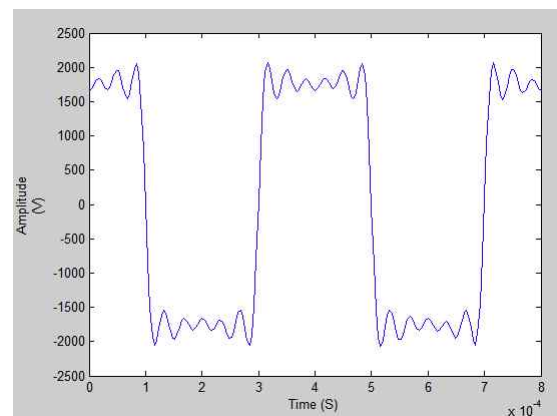


그림 16. 시간 영역에서 출력 파형  
Fig. 16. Output Wave at Time Domain

### 3. 결 론

본 논문에서는 펄스의 기본파와 고조파 성분들을 각각 트랜스포머들로 승압시키고 이를 직렬로 합하여 고전압 펄스를 얻는 장치의 특성을 얻기 위하여 회로 분석을 하여 이를 입증하였다. 자기화에 의한 인덕턴

스( $L_m$ )와 손실저항( $R_m$ )은 출력전압의 크기에 영향을 주었으며 출력에서는 외부 커패시터( $C_{22}$ )와 인덕턴스( $L_{22}$ )에 의해서 고주파 성분 별로 대역통과 특성을 나타내었다. 고전압 펄스 발생 장치의 출력은 2.5kHz, Peak-to-Peak 1.8kV 고전압 펄스의 파형을 회로분석과 프로그램을 통해 구할 수 있었다.

이는 실험결과와 일치하였으며 앞으로 회로분석에 의한 고전압 펄스 발생 장치의 부하특성, 트랜스포머 설계, 입력전압의 크기 및 위상 변화 등에 관한 연구가 필요하리라고 생각한다.

### References

[1] A. Mizuno. et al, "Indoor Air Cleaning using a Pulsed Discharge Plasma," IEEE trans. Industry application, Vol.35, No.6, pp.1284-1287, Nov. 1999.  
 [2] Fei Wang et al, "Transient plasma Ignition of Quiescent and Flowing Air/Fuel Mixtures," IEEE Trans. Plasma Sci., Vol.33, No.2, pp.844-849, Aprl. 2005.  
 [3] Jose' O. Rossi et al, "A 4-kV/2-A/5-kHz Compact Modulation for Nitrogen Plasma Ion Implantation," IEEE Trans. Plasma Sci., Vol.34, No.5, pp.1757-1765, Oct. 2006.  
 [4] K.H. Schoenbach et al, "Bio electrics-New applications for pulsed power technology," IEEE Trans. Plasma Sci.. Vol.30, No.1, pp.293-300, Feb. 2002.  
 [5] S.B. Dev. et al, "Medical applications of electroporation," IEEE Trans. Plasma Sci., Vol.28, No.1, pp.206-223, Feb. 2000.  
 [6] K. Yukimura et al, "Two switch high voltage modulator for plasma based ion implantation," Surf. coat. Technol, Vol.156, No.1-3, pp-66-70, Jul. 2002.

[7] L.M Redondo et al, "A new method to build a high-voltage pulse using only semiconductor Switches for plasma-immersion ion implatation," Surf. Coat. Technol., Vol.136, No.1-3, pp.51-54, Feb. 2001.  
 [8] X. Tian et al, "Special modulator for high frequency, low-voltage plasma immersion implantation," Rev. Sci. Instrans., Vol.70, No.3, pp.1824-1827, Mar. 1999.  
 [9] Y. Kim, "Study for the Design and Measurement of the High Voltage Pulse Generator Using Transformers," The Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 26(1), pp. 82 - 86, 2012.  
 [10] Y. Kim and J. Shin "Simulation Study of Characteristics for Device of the High Voltage Pulse Generator," The Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 2012. 12 will be published.  
 [11] Sedra/Smith "Microelectronic Circuits," pp. 613-615 OXFORD.  
 [12] David. M. Pozar "Microwave Engineering" pp. 231-234 ADDISON WESLEY.

### ◇ 저자소개 ◇



**김영주 (金榮珠)**

1957년 3월 12일생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 Polytechnic University 졸업(박사). 1988~1993년 Polytechnic Univ. Research Assistance. 1993~1996년 Polytechnic Univ. Research Fellow.

현재 홍익대학교 과학기술대 전자전기공학과 부교수.

주관심분야 : Design of the microwave system, De