

동축선에 의한 초광대역임폴스형성에 대한 연구

박주성, 리영명, 정원철

초광대역기술의 응용분야가 넓어지는데 따라 최근에 초광대역임폴스복사체계에 대한 연구[1-4]가 광범히 진행되고있다.

초광대역임폴스형성선은 주파수분산특성을 가지지 않는 TEM파의 전송을 위하여 그리고 유도도를 작게 하기 위하여 동축선을 리용하여 구성하였다.

선행연구에서는 초광대역신호를 얻기 위한 임폴스형성선의 구조와 동작원리에 대하여 설명하였지만 임폴스형성선의 설계방법에 대하여서는 구체적으로 주지 못하였다.

초광대역임폴스형성선의 설계는 임폴스형성선과 뿔축화회로를 구성하는 동축선의 기하학적치수를 결정하는 과정이다. 형성선설계에서는 또한 코로나방전이 일어나지 않도록 최대충전전압을 적당히 설정해주어야 한다.

논문에서는 초광대역임폴스형성선을 설계하기 위한 연구를 진행하고 설계의 정확성을 실험적으로 입증하였다.

1. 임폴스형성선의 구조정수설계

동축선의 기본전송파는 TEM파이며 TEM파는 차단주파수를 가지지 않는다. 그러나 동축선에는 역시 보다 높은 차단주파수를 가진 TE파와 TM파가 존재하며 동축선의 외부도체와 내부도체의 반경을 적당히 선택하지 못하면 기본파외에 고차파가 발생하여 효율이 떨어지므로 고차파가 발생하지 않도록 동축선의 치수를 결정해야 한다.

가장 낮은 TE₁₁파의 차단파장과 주파수는

$$\lambda_c = 1.873(\pi/2)(a+b) \quad (1)$$

$$f_c = c/\lambda_c \quad (2)$$

이다.

식 (1)을 근사화하면

$$\lambda_c = \pi/(a+b) \quad (3)$$

로 된다.

한편 동축선을 통하여 전송되는 TEM파의 주파수는 f_c 보다 작아지게 하여야 한다.

만일 임폴스발생기에서 얻으려고 하는 임폴스의 윗한계주파수가 주어지면 식 (2)와 (3)에 의하여 $a+b$ 를 구할수 있다.

우리는 임폴스의 윗한계주파수를 $f_c = 2.6\text{GHz}$ 로 하였다. 따라서

$$a+b \approx 3.67\text{cm}$$

이다. 그런데 동축선에서 전송효율과 최대출력에 대한 요구를 만족시키는데 가장 합리적인 50Ω 특성저항을 보장하는 내부도체의 반경에 대한 외부도체의 반경의 비는 동축선의 특성저항계산공식

$$z_0 \approx 60(\mu_r / \epsilon_r)^{1/2} \ln(b/a) \quad (4)$$

로부터

$$b/a \approx e^{(z_0/60)(\epsilon_r)^{1/2}} \quad (5)$$

이며 동축선의 내부매질이 공기 또는 질소인 경우 다음과 같다.

$$b/a \approx e^{(z_0/60)} \approx e^{0.016 \cdot 67 \cdot z_0} \approx 2.3$$

따라서 $a = 1.11\text{cm}$, $b = 2.56\text{cm}$ 이다.

다음으로 중요한것은 임펄스형성선의 길이를 결정하는것이다.

임펄스형성회로를 구성하는 동축선의 길이는 얻으려는 임펄스의 지속시간과 임펄스오름시간에 의하여 결정한다.

임펄스오름시간에 의하여 뽕족화회로를 구성하는 동축선의 길이가 결정되며 임펄스지속시간에 의하여 임펄스형성회로를 구성하는 동축선의 전체 길이가 결정된다.

우리가 얻으려는 임펄스는 지속시간이 8ns 이고 오름시간이 0.4ns 인 임펄스이다.

먼저 뽕족화회로를 구성하는 동축선의 길이를 계산하자.

뽕족화회로에 의하여 얻어지는 임펄스오름시간은 다음식에 의하여 계산된다.

$$t_r = 2.3 \frac{L_p}{R_l} \quad (6)$$

여기서 L_p 는 뽕족화방전회로의 유도도, R_l 은 방전회로의 전체 부하저항이다.

따라서 임펄스오름시간 t_r 를 보장하려면 뽕족화방전회로의 유도도를

$$L_p = t_r R_l / 2.3 \quad (7)$$

이하로 보장하여야 한다.

$R_l = 377\Omega$, $t_r = 0.4\text{ns}$ 이므로 식 (7)에 의하여 $L_p = 65.6\text{nH}$ 이다.

뽕족화방전회로의 유도도는 뽕족화회로의 동축선과 뽕족화회로출구에 연결된 동축-평행판선로이행부에 의해 생긴다.

먼저 동축-평행판선로이행부에서 평행판선로의 유도도를 계산하자.

평행판선로의 단위길이당 유도도는

$$L'_{\text{평}} = 4\pi \times 10^{-7} \mu_r (h_{\text{평}} / W_{\text{평}}) \quad (8)$$

이다. 여기서 $h_{\text{평}}$, $W_{\text{평}}$ 은 각각 평행판선로의 높이와 너비이며 μ_r 는 평행판선로내부매질의 상대투자률이다. 제작된 동축-평행판선로이행부에서 $h_{\text{평}} = 1.5\text{cm}$, $W_{\text{평}} = 8.3\text{cm}$, $\mu_r = 1$ 이라고 하면 식 (8)에 의하여

$$L'_{\text{평}} = 4\pi \times 10^{-7} (1.5/8.3) = 0.227\mu\text{H/m}$$

이며 평행판선로의 길이는 $l_{\text{평}} = 12.5\text{cm}$ 이므로 안테나입구까지의 평행판선로의 유도도는 다음과 같다.

$$L_{\text{평}} = 0.227 \times l_p = 28.4\text{nH}$$

그러므로 뽕족화회로를 구성하는 동축선과 뽕족화회로출구와 연결된 동축-평행판선로이행부의 이행동축선의 유도도는

$$L_{\text{호}} + L_{\text{이행}} = L_p - L_{\text{평}} = 65.6 - 28.4 = 37.2\text{nH}$$

로 된다.

한편 뽕족화회로를 구성하는 동축선과 뽕족화회로출구와 연결된 동축-평행판선로이행부의 이행동축선의 내부매질은 $\epsilon_r = 2.2$ 인 테플론수지이다.

이때 50Ω 특성저항을 보장하는 내부도체의 반경에 대한 외부도체의 내부반경의 비는 식 (5)로부터

$$b/a = e^{0.02472 \cdot z_0} \approx 3.44$$

이며 여기로부터 동축선의 단위길이당 유도도는

$$L'_{\text{동축}} = 0.2\mu_r \ln(b/a) = 2.47 \text{ nH/cm} \quad (9)$$

이므로 제작된 동축-평행판선로이행부의 이행동축선의 길이 $l_{\text{이행}} = 5 \text{ cm}$ 에 해당하는 유도도는

$$L_{\text{이행}} = 0.247 \times l_{\text{이행}} = 12.4 \text{ nH}$$

로 된다.

따라서 뽕족화회로를 구성하는 동축선의 유도도는

$$L_{\text{뽕}} = 37.2 - 12.4 = 24.8 \text{ nH}$$

이며 여기로부터 뽕족화회로를 구성하는 동축선의 길이는 다음과 같다.

$$l_{\text{뽕}} = L_{\text{뽕}} / L'_{\text{동축}} = 24.8 / 2.47 \approx 10.1 \text{ m}$$

한편 임펄스형성회로에서 임펄스의 지속시간은

$$T = 2l / v = 2l\epsilon_r^{1/2} / c \quad (10)$$

에 의하여 결정되며 결국 뽕족화회로부분에 의한 지속시간은

$$T_{\text{뽕}} = 2l_{\text{뽕}}\epsilon_r^{1/2} / c \approx 1 \text{ ns}$$

로 된다.

그러므로 기본임펄스형성회로부분에 의한 지속시간은

$$T_{\text{기본}} = T - T_{\text{뽕}} = 7 \text{ ns}$$

이고 여기로부터 기본임펄스형성회로를 구성하는 동축선의 길이는 다음과 같다.

$$l = T_{\text{기본}} \cdot c / 2 = 1.05 \text{ m} \quad (11)$$

2. 임펄스형성선최대전압의 결정

임펄스형성회로에서는 충전전압의 절반에 대응되는 전압진폭이 얻어진다. 따라서 충전전압은 얻으려는 출구전압의 두배로 정한다. 그런데 충전전압은 방전구절연과피전압에 의하여 결정되므로 방전구절연과피전압은 출구전압의 두배로 설정하여야 한다.

$$V_{\text{과}} = 2V_{\text{출}}$$

한편 가스방전구에서 방전구절연과피전압은 가스압력과 간극너비에 따라 달라진다. 따라서 방전구절연과피전압의 설정문제는 요구되는 방전구절연과피전압을 보장하기 위한 간극너비와 가스압력의 결정문제이다.

가스압력과 간극너비에 따르는 절연과피전압의 계산공식은 다음과 같다.

$$V_{\text{과}} = 6.72(p \cdot d)^{1/2} + 24.36(p \cdot d) \quad (12)$$

표에 간극너비가 $d=1 \text{ mm}$ 일 때 방전구절연과피전압과 가스압력사이의 관계를 제시하였다.

표. 방전구간극거리 $d=1\text{mm}$ 일 때 압력에 따르는 파괴전압

압력/($10^5 \cdot \text{Pa}$)	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$V_{\text{파}}/\text{kV}$	4.56	16.9	31.1	44.8	58.2	71.5	84.7	97.8	110.9	123.9	135.3	149.7	162.6

우리는 방전구가스압력을 $3 \cdot 10^6 \text{ Pa}$ 로 설정하여 $V_{\text{출}} = 40\text{kV}$ 의 출구전압을 얻었다.

한편 전송선을 통하여 큰 전류가 흐르는 경우 도선둘레에서 코로나방전이 일어나면 에너지손실이 생길수 있기때문에 전송선에서의 최대전압을 코로나방전이 일어나지 않도록 설정해야 한다.

특히 동축선구조의 전송선에서는 내부도체겉면에 전기마당이 집중되므로 내부도체둘레에서 코로나가 생기지 않도록 형성선의 충전전압을 제한해야 한다.

도선겉면으로부터 기체속으로 방전되는 코로나는 도선겉면에 형성되는 전기마당의 세기에 관계된다. 이 전기마당의 세기는 도선에 흐르는 전류로부터 계산한다.

자유공간에서 전기마당과 자기마당사이의 관계는 다음과 같다.

$$E = 120\pi H \quad (13)$$

한편 도선겉면에서의 자기마당은 완전전류법칙에 따라 도선에 흐르는 전류와 다음과 같은 관계가 있다.

$$\pi DH = I \quad (14)$$

여기서 D 는 도선의 직경이다.

따라서 도선겉면에서의 전기마당의 세기는 식 (13)과 (14)에

$$E = 120I / D \quad (15)$$

이다.

도선으로 흐르는 전류의 최대값은

$$I_{\text{최대}} = U_{\text{최대}} / z_0 \quad (16)$$

이므로 도선겉면에서의 전기마당의 세기는

$$E = 120U_{\text{최대}} / z_0 D \quad (17)$$

로 된다. 이 값이 기체의 절연과피세기를 넘지 않으면 기체속에서 코로나가 생기지 않는다. 따라서 주어진 압력조건에서 기체의 절연과피마당세기를 $E_{\text{절과}}$ 라고 하면 전송선에서 코로나가 생기지 않도록 하는 최대허용전압은 다음과 같다.

$$U_{\text{최허}} = E_{\text{절과}} z_0 D / 120 \quad (18)$$

우리가 설계한 동축형성선의 내부도체직경은 $D=22.2\text{mm}$, $z_0=50 \Omega$ 이므로 가스압력을 $3 \cdot 10^6 \text{ Pa}$ 로 하였을 때 $U_{\text{최허}} = 800\text{kV}$ 로서 최대충전전압 84kV 에서는 코로나가 생기지 않는다.

3. 실험 및 결과분석

복사마당이 축선방향에서 집초되는 경우에 먼마당구역에서 초광대역임펄스복사안테나의 축방향복사마당은 다음과 같이 표시된다.

$$\vec{E}(r, t) \cong \frac{\tau_t h_t}{2\pi r f_g} \frac{\Delta V_{\text{max}}}{\Delta t} \quad (19)$$

우리는 고리형안테나를 초광대역임펄스복사마당을 측정하기 위한 수감부로 리용하였다.

이때 고리형안테나에 유기되는 측정전압으로부터 환산되는 전기마당세기는 다음과 같다.

$$E(t) = \frac{c}{S} \int_0^t U(\tau) d\tau \quad (20)$$

이 식들을 리용하여 측정실험자료로부터 마당세기를 평가하여 우리가 연구한 임펄스형성선설계의 정확성을 확증하였다.

측정실험에 리용된 초광대역임펄스복사체계는 1차에네르기원천과 임펄스출력발생기, 초광대역임펄스형성선, 초광대역임펄스복사안테나로 이루어졌다. 복사안테나는 우리가 설계제작한 임펄스형성선에서 발생하는 400ps의 임펄스오름시간을 가진 40kV의 임펄스전압에 의하여 급전된다.

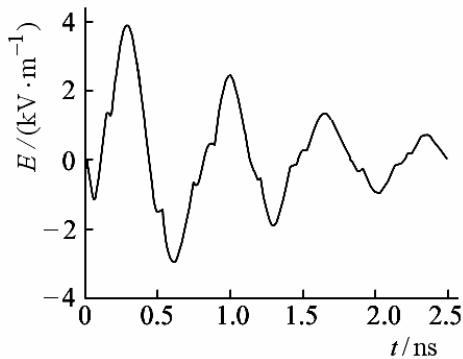


그림. 송신안테나로부터 10m거리에서 측정된 전기마당파형

안테나특성정수들에 기초하여 축방향의 10m거리에서 복사전기마당세기가 계산되었으며 그 값은 $E_r=4\text{kV/m}$ 이다.

복사마당측정실험은 반사대상들로부터 먼 열린 공간에서 진행하였다.

그림은 송신안테나로부터 10m거리에서 측정된 전기마당파형을 보여준다. 그림에서 잔류파형들은 임펄스형성선과 복사안테나의 비정합에 의한 다중 반사로부터 생기는 파형들이다. 측정된 복사마당파형과 복사마당의 최대값으로부터 초광대역임펄스형성선설계가 정확하다는것을 알수 있다.

맺는 말

동축선구조를 리용한 초광대역임펄스형성선설계방법을 제안하고 형성선내부에서 코로나방전이 일어나지 않도록 하기 위한 최대충전전압결정문제를 논의하였다. 그리고 측정실험을 통하여 제안한 초광대역임펄스형성선설계방법의 정확성을 확증하였다.

참고 문헌

- [1] Partha Sarkar et al.; IEEE Trans. Plasma Sci., 34, 5, 1832, 2006.
- [2] John Mankowski et al.; IEEE Trans. Plasma Sci., 28, 1, 102, 2000.
- [3] Laurent Pécastaing et al.; IEEE Trans. Plasma Sci., 34, 5, 1822, 2006.
- [4] Jonathan D. Zuegel et al.; IEEE Journal of Solid-State Circuits, 44, 3, 808, 2009.

Study on Ultra-wideband Pulse Forming Using Coaxial Line

Pak Ju Song, Ri Yong Myong and Jong Won Chol

We studied the design method of ultra-wideband pulse forming line using coaxial line structure and determination problem of the maximum charging voltage so that corona must not occur in the inside of forming line. The exactness of the design method of ultra-wideband pulse forming line that we studied was verified by means of experimental measurement.

Key words: ultra-wideband, coaxial line, pulse forming line