

대 전력 전자빔 발생 초기 전류에 대한 연구

(A Study of Starting Current High Power Electron Beam Production)

김원섭

Won-Sop KIM

(Jeonnam Provincial College Dept. Electricity Applied Computer)

Abstract

We have studied the backward wave oscillator, a power-pulsed generator oscillator at 20 GHz has higher frequency than current one. An absolute instability linear analysis was used for the purpose of designing the slow wave structure. A large diameter of the slow wave structure was adopted to prevent the breakdown brought about by the increase of power density.

1. 서 론

전자 빔을 이용한 대 전력 마이크로파 발생 장치는 펄스 파워 기술의 개발에 따라 현저한 진보를 가져 왔는데 대 전력 마이크로파 장치는 전자 사이크로트론메이저, 자이로트론, 크라이스트론, 후진파발전기, 가상음극관 등이 있으며 플라즈마 가열장치, 입자 가속시스템장치, 마이크로파전송장치, 고체 물질상태 진단장치, 물질화학 반응장치 등이 이용되어 왔다. 20여년전에 고 출력 미리파원으로서 개발된 자이로트론은 전자 사이크로트론 메이저를 이용하는 데[1], MWCG에서는 자이로트론보다 강한 자장이 필요없고 구조가 간단하므로 보다 편리하게 이용할 수 있는 장점이 있다. 한편, 자이로트론에서의 평균 출력의 한계는 약 1MW인데, 이때 이용하는 미리파 에너지원은 열 음극을 이용한 마그네트론 입사총(MIG)에 의해 만들어진 전자 빔이 자계에 대하여 수직인 성분에서 의하여 만들어 진다. MWCG에서는 MIG보다 구조가 간단한 냉음극을 이용하여 수평 성분이 수직 성분보다 큰 전자 빔을 이용하므로 자이로트론보다 큰 마이크로파 출력을 얻을 수 있다. 대구경 후진파 발전기는 지파 구조를 이용하는 점에서 MWCG와 밀접한 관련이 있는데[2], MWCG에서는 지파 구조가 2개 나열되어 있어 그 사이에서 회절 현상에 의한 물리적인 현상을 일으키지만, 대구경 SWS에서는 직경을 작게하지 않으면서 밀리파 영역에서 고 출력의 발전이 가능하다.

후진파 발전기(Backward Wave Oscillator : BWO)는 기본적으로 TM_{01} 모-드에 의해 동작하

며, SWS의 금속 표면의 내경은 $R(z)=R_0+h\cos K_0z$, $K_0=2\pi/z_0$ (z_0, h : 축 방향 주기 및 진폭)와 같이 정현파 곡선으로 변화한다. 또한 보통의 X-band BWO[3]에서는 직경과 파장과의 관계가 $D/\lambda \sim 1$ 이지만, 대구경 BWO에서는 $D/\lambda \gg 1$ 이다. 특히 대구경 BWO에서는 발전 주파수를 저하시키지 않기 위하여 작은 z_0 와 h 를 선택하는 것이 중요한데, 이것은 MWCG에서 지파 구조의 설계와 비슷하다 [4-5].

지금까지의 BWO 실험에서는 주로 $D/\lambda \sim 1$ 인 X-band BWO에 의해 실험이 진행되어 왔으나, 결과를 보면 아직 롱 펄스화 및 대 출력과 높은 주파수에서의 발전등이 미흡한 과제로 되어 있다. 따라서 본 논문에서는 지금까지보다 높은 출력 밀도에서 절연 파괴가 일어나지 않으면서도 고 주파수인 24 GHz에서 발전하는 대구경 BWO를 설계하여, $D/\lambda=4.8$ 로 결정하였고, 설계 방법은 절대 불안정성의 선형 해석을 이용하였다.

2. 본 론

그림에 설계에 이용한 지파 도파관의 모델을 표현하였다. 완전 도체 금속의 내경은 $R(z)=R_0+h\cos K_0z$ 으로 변화한다. 축 방향으로 동일 크기의 강한 자장이 주어질 때, 전자는 축 방향으로만 이동하며 여기된 마이크로파의 모-드는 축 대칭인 TM_{0s} 모-드만 가정한다.

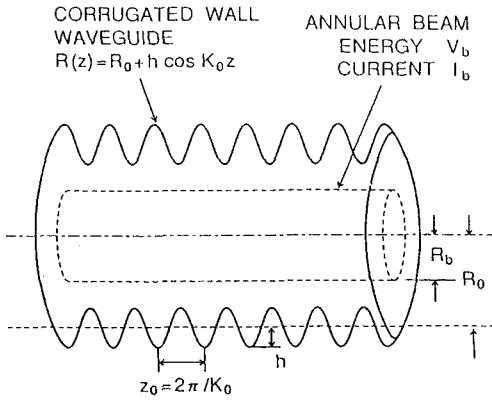


그림 1. 지파 도파관의 기본 모델 및 빔 에너지, 빔의 형태. 도파관 파형의 주기와 진폭

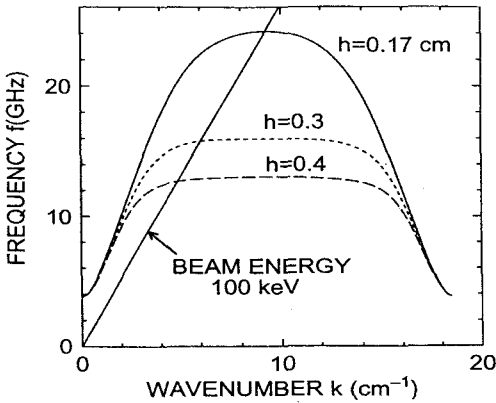


그림 2. $R_0=3.0\text{cm}$ 및 $z_0=0.34\text{cm}$ 일 때 $h=0.17, 0.3, 0.4\text{cm}$ 에 대한 TM_{01} 모-드의 분산 관계

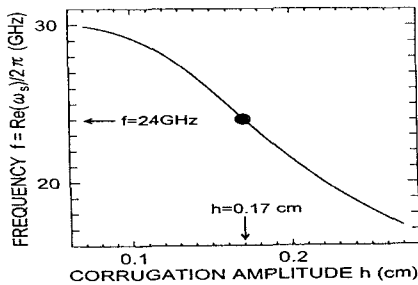


그림 3. $R_0=3.0\text{cm}$, $I=0.5\text{kA}$, $v/c=0.548$, $R_b=2.63\text{cm}$, $z_0=0.34\text{cm}$ 일 때 파형의 진폭 h 의 변화에 대한 발진 주파수의 변화

또 마이크로파를 여기하는 전자 빔은 무한히 얇은 원통 곡형 빔으로 가정하여 반경 R_b 로 하고, 빔 에너지는 V_b , 전류 I_b , 밀도 n_b 로 한다. 그림과 같은 형태의 분산 관계는 다음과 같이 나타낸다.

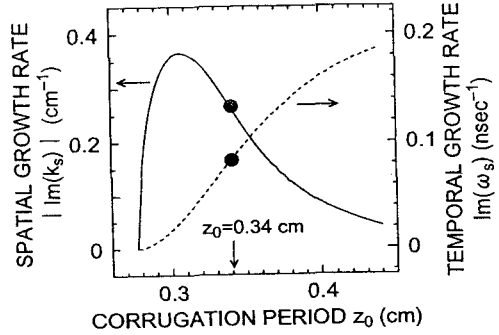


그림 4. $R_0=3.0\text{cm}$, $I=0.5\text{kA}$, $v/c=0.548$, $R_b=2.63\text{cm}$, $h=0.17\text{cm}$ 일 때 파형의 주기 z_0 의 변화에 대한 시간적 성장률 및 공간적 성장률

먼저, Floquet의 정리에 의하여 RF 전계는 다음 식과 같이 나타낸다.

$$E_z = \sum_{-\infty}^{\infty} E_{zn} \exp[i(k_n z - \omega t)]$$

$$E_r = \sum_{-\infty}^{\infty} E_{rn} \exp[i(k_n z - \omega t)]$$

$r \neq R_b$ 의 경우, RF 전계 성분 E_{zn} , E_{rn} 을 Maxwell 방정식을 이용하여 해를 구하면 다음과 같다.

$$E_{zn} = A_n J_0\left(\frac{y_n r}{R_0}\right) = B_n J_0\left(\frac{y_n r}{R_0}\right) + C_n N_0\left(\frac{y_n r}{R_0}\right)$$

$$E_{rn} = \frac{i k_n}{\frac{\omega^2}{c^2} - k_n^2} \frac{\partial E_{zn}}{\partial r}$$

$$y_n^2 = R_0^2 \left(-\frac{\omega^2}{c^2} - k_n^2 \right)$$

또한, $r=R_b$ 에서 전자 빔의 축방향 운동을 연속 방정식과 운동 방정식을 이용하여 해를 구하면 계수 B_n, C_n 은 다음과 같이 A_n 으로 표시된다.

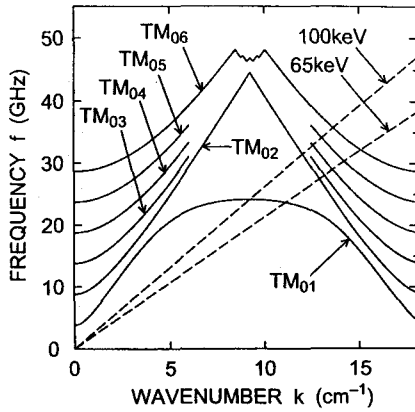


그림 5. 대구경 후진파 발진기에서 $TM_{01} \sim TM_{06}$ 모드에 대한 분산 곡선

$r=R(z)$ 에 대하여 급속 표면의 경계 조건에서 A_n 은 다음과 같이 표시된다.

$$\sum_{m,n=-\infty}^{\infty} [1+(n-m) Q_n] (B_n C_{mn}^I + C_n C_{mn}^N)$$

$$Q_n = \frac{K_0 k_n}{\frac{\omega^2}{c^2} - k_n^2}$$

$$C_{mn}^I = \int_{-\pi/K_0}^{\pi/K_0} \exp[i(n-m) K_0 z] J_0$$

$$= \sum_{q=0}^{\infty} \frac{(y_n q)^{2q+|n-m|} J_0^{(2q+|n-m|)}(y_n)}{2^{2q+|n-m|} q! (q+|n-m|)!}$$

한편, $A_n=0$ 이 필수 조건이므로 위식의 분산 관계는 다음과 같이 표시된다.

$$D(k, \omega) = \det[D_{mn}] = 0$$

여기서 대구경 SWS의 특이한 성질에 대하여 고찰한다. 빔이 없을 때, 즉 위의 식에서 $I_b=0, A_n=0,$

$C_n=0$ 에 대하여 생각하면 SWS에서 빔 에너지가 0이므로 발진은 일어나지 않고 위식에서 ω 와 k 는 실수가 된다. R_0 을 작게하지 않으며 높은 발진 주파수 $f=\omega/2\pi$ 를 얻기 위하여는 그림에서 z_0 을 작게하지 않으면 안된다. 이때 K_0 은 크게 되어 앞식에서 y_n^2 이 되어 $E_{zn}=A_n I_n(y_n' r/R_0)$ 및 $y_n^2=-y_n'^2$ 이 된다. 또한 식의 피적분 함수는 $\exp[i(n-m)K_0 z] I_0[y_n' (1+\cos K_0 z)]$ 가 되어, y_n' 가 크게 되면 수정 Vessel의 함수 I_0 은 갑자기 커져서 식에서 Over-flow가 일어난다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 $I_v(z)$ 를 다음과 같이 점근 전개한다.

$$I_v(z) = \frac{e^{-z}}{(2\pi z)^{1/2}} \left[1 - \frac{\mu-1}{8z} + \frac{(\mu-1)(\mu-9)}{2!(8z)^2} - \dots \right],$$

$$|\arg(z)| < \frac{\pi}{2}, \quad \mu = 4\nu^2$$

$$\sum_{m,n=-\infty}^{\infty} [1-(n-m) Q_n] \frac{C_{mn}^I}{\exp(y_n)} G_n = D_{mn} \cdot G_n = 0$$

$$G_n = A_n \exp(y_n), \quad D'(k, \omega) = \det[D_{mn}] = 0$$

위와 같이 점근 전개를 이용하면 Over-flow도 일어나지 않는다.

3. 결론

총래의 X-band BWO와 비교하여 높은 주파수인 24GHz 부근에서 발진하는 BWO를 설계할 경우, 먼저 지파 구조의 평균 반경 R_0 을 작게하는 경우가 생기는데, 이 경우 단면적이 작아진다. 단면적이 작아지면 마이크로파의 전력 밀도가 커지는데 이 때는 지파 구조 내에서 RF 절연 파괴가 일어난다. 여기서 과도한 전력 밀도를 갖지 않으면서 출력을 크게 하기 위해서는 평균 반경을 작게하지 않고 발진 주파수를 높일 필요가 있다. 따라서 도파관의 큰 직경을 유지하면서 파형의 주기와 진폭을 선택하여, 대 구경 BWO를 설계·제작하여 실험함으로써 보다 높은 주파수에서의 발진 및 대 출력 발생되었다.

[참 고 문 헌]

- [1] W.S.Kim, J.S.Hwang, J.N.Kim, Y.M.Kim, A Study on the Formation of Reserved Field configuration stability with Radio Rotating Field, Proceeding of the 36th KIEE Conference 2005
- [2] V.L.Granatstein and P.L.Colestock, Wave Heating and Current Drive in Plasmas, Gordon and Breach. New York, 2002.
- [3] V.L.Granatstein and I.Alexeff, High Power Microwave sources, Boston : Artech, 2001.
- [4] J.N.Benford and J.A.Swagle, High Power Microwaves, Boston : Artech, 2002.
- [5] S.P.Bugaev, V.A.Cherepein, V.I.Kanavets, V.I.Koshelev, V.A.Popov and A.N.Vlasov, Investigation of a milimeter wavelength range relativistic deffraction generator, IEEE Trans. Plasma Sci. PS-18.