

지파도파관에 의한 상대론적 전자빔 발생장치의 연구

김원섭

남도대학 컴퓨터응용전기과

A Study of Intense Relativistic Electron Beam Production by slowwave structure

Won-Sop KIM

Jeonnam Provincial College Dept. of Electricity Applied Computer

**Abstract** - 전자빔 발생장치를 이용한 마이크로파 출력을 증대시키기 위하여 주기구조를 갖는 지파도파관을 이용하였다. 이것은 공명적인 현상에 의하여 마이크로파 발진을 일으켜 출력 증대를 가져온다. 중심 축상의 고주파 전계 분포와 전자 빔 밀도의 상호작용에 의한 에너지 증대가 이루어 지면서 이에 따라 대 출력이 얻어진다. 본 연구는 지금까지 연구되어 왔던 것보다 더 많은 출력을 얻기 위하여 지파도파관을 이용한 실험을 하여 연구하였다.

1. 서 론

자계 밀폐방식에 의한 핵융합·플라즈마 장치에서 RF 가열 또는 진류 구동을 위하여 수 10MW급의 고 출력 마이크로파원이 필요하다[1]. IREB(Intense Relativistic Electron Beam)를 이용한 고 출력 마이크로파 발진기는 최근 폭넓게 연구되고 있다. 그중에서도 러시아의 THOMSK 공학연구소에서 Bugaev등에 의하여 연구 개발된 다중파동 체렌코프 발진기(Multiwave Cherenkov Generator;MWCG)는 발진 파장  $\lambda$ 보다 큰 직경  $D(D/\lambda=3\sim 13)$ 를 갖는 지파 구조를 이용하여 기록적인 출력을 발생시켰다. 이와 같은  $D/\lambda$ 의 경우 대구경 SWS (Slow Wave Structure)라고 하는데[6], 이것은 RF 절연 파괴가 일어나지 않는 범위의 고 에너지 밀도에서 큰 마이크로파 출력을 얻을 수 있다.

20여년전에 고 출력 미러파원으로서 개발된 자이로트론은 전자 싸이크로트론 메이저를 이용하는데[2,3], MWCG에서는 자이로트론보다 강한 자장이 필요없고 구조가 간단하므로 보다 편리하게 이용할 수 있는 장점이 있다. 한편, 자이로트론에서의 평균 출력의 한계는 약 1MW인데, 이때 이용하는 미러파 에너지원은 열 음극을 이용한 마그네트론 입사총(MIG)에 의해 만들어진 전자빔이 자계에 대하여 수직인 성분에 의하여 만들어진다. MWCG에서는 MIG보다 구조가 간단한 냉 음극을 이용하여 수평 성분이 수직 성분보다 큰 전자 빔을 이용하므로 자이로트론보다 큰 마이크로파 출력을 얻을 수 있다. 대구경 후진파 발진기는 지파 구조를 이용하는 점에서 MWCG와 밀접한 관련이 있는데[7-15], MWCG에서는 지파 구조가 2개 나열되어 있어 그 사이에서 회절 현상에 의한 물리적인 현상을 일으키지만, 대구경 SWS에서는 직경을 작게하지 않으면서 밀리파 영역에서 고 출력

의 발진이 가능하다.

후진파 발진기(Backward Wave Oscillator : BWO)는 기본적으로  $TM_{01}$  모-드에 의해 동작하며, SWS의 금속 표면의 내경은  $R(z)=R_0+h\cos K_0z$ ,  $K_0=2\pi/\lambda_0$  ( $z_0, h$  : 축 방향 주기 및 진폭)와 같이 정현파 곡선으로 변화한다. 또한 보통의 X-band BWO[7-15]에서는 직경과 파장과의 관계가  $D/\lambda \sim 1$ 이지만, 대구경 BWO에서는  $D/\lambda \gg 1$ 이다. 특히 대구경 BWO에서는 발진 주파수를 저하시키지 않기 위하여 작은  $z_0$ 와  $h$ 를 선택하는 것이 중요한데, 이것은 MWCG에서 지파 구조의 설계와 비슷하다[4-6].

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 발진등이 미흡한 과제로 되어 있다. 따라서 본 논문에서는 지금까지보다 높은 출력 밀도에서 절연 파괴가 일어나지 않으면서도 고 주파수인 24 GHz에서 발진하는 대구경 BWO를 설계하여,  $D/\lambda=4.8$ 로 결정하였고, 설계 방법은 절대 불안정성의 선형 해석을 이용하였다.

본 논문의 구성은, 제 2절에서는 절대 불안정에 대한 계산 모델 및 선형 해석 방법에 대하여 논하였고, 제 3절은 최적 설계의 계산 결과를 나타냈으며, 마지막으로 제 4절에서는 결론을 기술하였다.

2. 본 론

그림 1에 설계에 이용한 지파 도파관의 모델을 표현하였다. 완전 도체 금속의 내경은  $R(z)=R_0+h\cos K_0z$ 으로 변화한다.

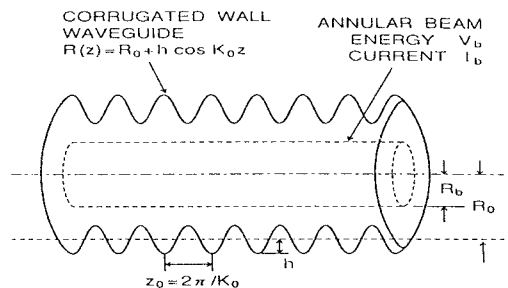


그림 1. 지파 도파관의 기본 모델 및 빔 에너지, 빔의 형태, 도파관 파형의 주기와 진폭

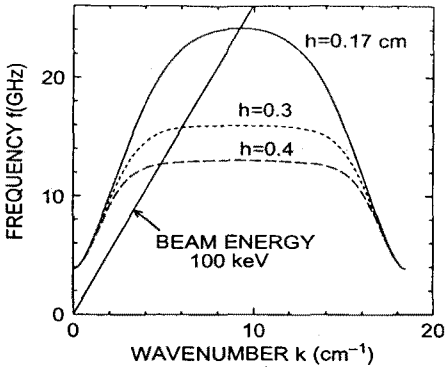


그림 2.  $R_0=3.0\text{cm}$  및  $z_0=0.34\text{cm}$ 일때  $h=0.17, 0.3, 0.4\text{cm}$ 에 대한  $\text{TM}_{01}$ 모드의 분산 관계

추 방향으로 동일 크기의 강한 자장이 주어질 때, 전자는 추 방향으로만 이동하며 여기된 마이크로파의 모드

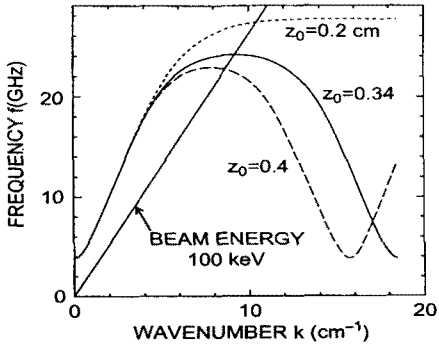


그림 3.  $R_0=3.0\text{cm}$  및  $h=0.17\text{cm}$ 일때  $z_0=0.2, 0.3, 0.4\text{cm}$ 에 대한  $\text{TM}_{0s}$  모드의 분산 관계

는 추 대칭인  $\text{TM}_{0s}$  모드만 가정한다. 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. 그림 2과 같은 형태의 분산 관계는 다음과 같이 나타낸다.

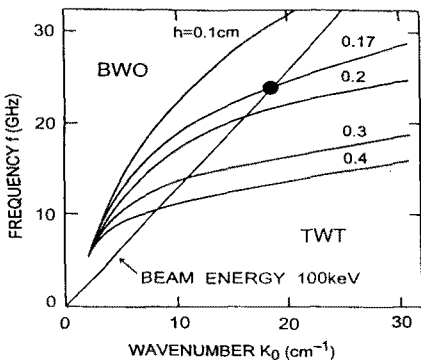


그림 4.  $R_0=3.0\text{cm}$ 으로 고정된 후 진폭  $h$ 의 변화에 따른 파수  $K_0$ 와 발진 주파수의 변화

먼저, Floquet의 정리에 의하여 RF 전계는 다음식과 같이 나타낸다.

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

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

$r=R_b$ 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.

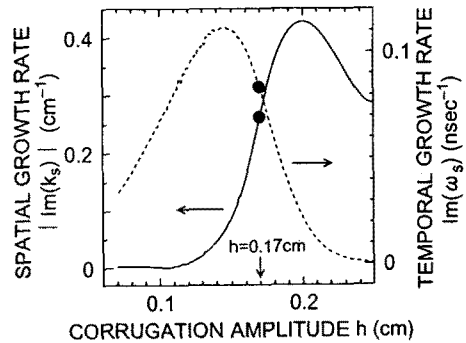


그림 5(a).  $R_0=3.0\text{cm}, I=0.5\text{kA}, v/c=0.548, R_b=2.63\text{cm}, z_0=0.34\text{cm}$ 일 때 파형의 진폭  $h$ 의 변화

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

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

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

$$C_{mn}^J = \int_{-\pi/K_0}^{\pi/K_0} \exp[i(n-m)K_0z] J_0 \\ = \sum_{q=0}^{\infty} \frac{(y_n a)^{2q+|n-m|} J_0^{(2q+|n-m|)}(y_n)}{2^{2q+|n-m|} q! (q+|n-m|)!}$$

한편,  $A_n=0$ 이 필수 조건이므로 (6)식의 분산 관계는 다음과 같이 표시된다.

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

여기서 대구경 SWS의 특이한 성질에 대하여 고찰한다. 빔이 없을 때, 즉 (3)-(5)식에서  $I_b=0$ ,  $A_n=0$ ,  $C_n=0$ 에 대하여 생각하면 SWS에서 빔 에너지가 0이므로 발진은 일어나지 않고 (9)식에서  $\omega$ 와  $k$ 는 실수가 된다.  $R_0$ 을 작게 하지 않으며 높은 발진 주파수  $f=\omega/2\pi$ 를 얻기 위하여는

그림 1에서  $z_0$ 을 작게하지 않으면 안된다. 이때  $K_0$ 은 크게 되어 (2)식에서  $y_n'^2$ 이 되어  $E_{zn}=A_n I_n(y_n' r/R_0)$  및  $y_n'^2=-y_n''^2$ 이 된다. 또한 (7)식의 피 적분 함수는  $\exp[i(n-m)K_0z] I_0[y_n'(1+\cos K_0z)]$ 가 되어,  $y_n'$ 가 크게 되면 수정 Vessel의 함수  $I_0$ 은 갑자기 커져서 (9)식에서 Over-flow가 일어난다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여  $I(z)$ 를 다음과 같이 접근 전개한다.

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

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

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

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

위와 같이 접근 전개를 이용하여 (9)식 대신 (10)식을 이용하면 Over-flow도 일어나지 않는다.

### 3. 결 론

종래의 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 작게 하지 않고 발진 주파수를 높일 필요가 있다. 따라서 도파관의 큰 직경을 유지하면서 파형의 주기와 진폭을 선택하여, 대구경 BWO를 설계·제작하여 실험함으로써 보다 높은 주파수에서의 발진 및 대 출력 발생되었다.

[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.Swagale, '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 millimeter wavelength range relativistic defraction generator,' IEEE Trans. Plasma Sci. PS-18.