

# 차세대 에너지 이용을 위한 전자빔 발생장치에 관한 연구

A Study on Producing Electron Beam  
For the Installation of Future Energy

김원섭

(Won-Sop KIM)

남도대학 전기전자과

**Abstract** - We present a detailed design study of high power large diameter backward wave oscillator operating at 24 GHz for a beam energy of 100 keV. The ratio of the mean diameter of the slow wave structure to the wavelength of output microwaves is increased to be 4.8. Analysis is made within the scope of linear theory of absolute instability.

## 1. 서 론

자계 밀폐방식에 의한 핵융합·플라즈마 장치에서 RF 가열 또는 전류 구동을 위하여 수 10MW 급의 고 출력 마이크로파원이 필요하다. IREB(Intense Relativistic Electron Beam)를 이용한 고 출력 마이크로파 발전기는 최근 폭넓게 연구되고 있다. 그중에서도 러시아의 THOMSK 공학연구소에서 Bugaev등에 의하여 연구 개발된 다중파동 체렌코프 발전기(Multiwave Cherenkov Generator;MWCG)는 발전 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, 이것은 RF 절연 파괴가 일어나지 않는 범위의 고 에너지 밀도에서 큰 마이크로파 출력을 얻을 수 있다.

20여년전에 고 출력 마이크로파원으로서 개발된 자이로트론은 전자 싸이크로트론 메이저를 이용하는데, MWCG에서는 자이로트론보다 강한 자장이 필요 없고 구조가 간단하므로 보다 편리하게 이용할 수 있는 장점이 있다. 한편, 자이로트론에서의 평균 출력의 한계는 약 1MW인데, 이때 이용하는 마이크로파 에너지원은 열 음극을 이용한 마그네트론 입사총(MIG)에 의해 만들어진 전자 빔이 자계에 대하여 수직인 성분에 의하여 만들어 진다. MWCG에서는 MIG보다 구조가 간단한 냉 음극을 이용하여 수평 성분이 수직 성분보다 큰 전자 빔을 이용하므로 자이로트론보다 큰 마이크로파 출력을 얻을 수 있다. 대구경 후진파 발전기는 지파 구조를 이

용하는 점에서 MWCG와 밀접한 관련이 있는데, 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  $TM_{01}$  모드에 의해 동작하며, 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[7-15]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.

지금까지의 BWO 실험에서는 주로  $D/\lambda \sim 1$ 인 X-band BWO에 의해 실험이 진행되어 왔으나, 결과를 보면 아직 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.

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. 계산 모델과 해석 방법

그림 1에 설계에 이용한 지파 도파관의 모델을 표현하였다. 완전 도체 금속의 내경은  $R(z)=R_0+h\cos K_0 z$ 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. 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 1과 같은 형태의 분산 관계는 다음과 같이 나타낸다.

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

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

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

$$INT k_n = k + n K_0 \quad (1)$$

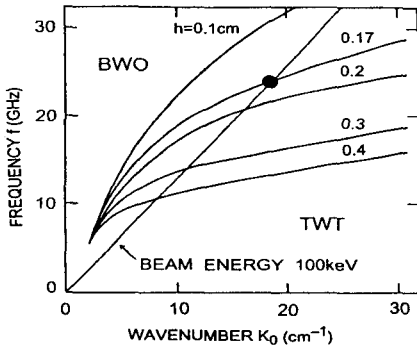


그림 1.  $R_0=3.0\text{cm}$ 으로 고정된 후 진폭  $h$ 의 변화에 따른 파수  $K_0$ 와 발진 주파수의 변화

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

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.

$$B_n = [1 - b J_0(Y_n \delta) N_0(y_n \delta)] A_n,$$

$$b = \frac{\omega^2 - c^2 k_n^2}{(\omega - k_n v)^2} I \quad (3)$$

$$C_n = b [J_0(y_n \delta)]^2 A_n \quad (4)$$

$$I = \frac{\pi I_b}{I_A \beta \gamma^3},$$

$$I_b = 2\pi \int_{R_b, -0}^{R_b, +0} e n_b v r dr \quad (5)$$

$$I_A = \frac{4\pi \epsilon_0 m c^2}{e} = 17.1(\text{kA})$$

$$\beta = \frac{v}{c}, \quad \gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2},$$

$$\delta = \frac{R_b}{R_0}$$

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

$$\sum_{m, n=-\infty}^{\infty} [1 + (n-m) Q_n] (B_n C_{mn}^J + C_n C_{mn}^N) = D_{mn} \cdot A_n = 0 \quad (6)$$

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

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

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.

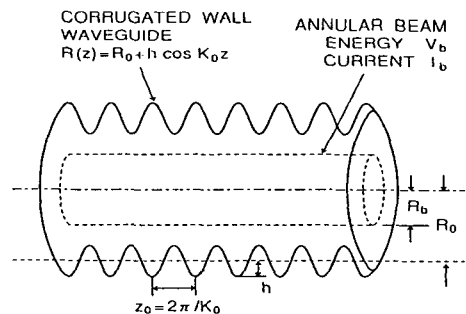


그림 2. 지파 도파관의 기본 모델 및 빔 에너지, 빔의 형태, 도파관 파형의 주기와 진폭을 작게하지 않으며 높은 발진 주파수  $f=\omega/2\pi$ 를

얻기 위하여는 그림 1에서  $z_0$ 을 작게하지 않으면  
 않된다. 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.

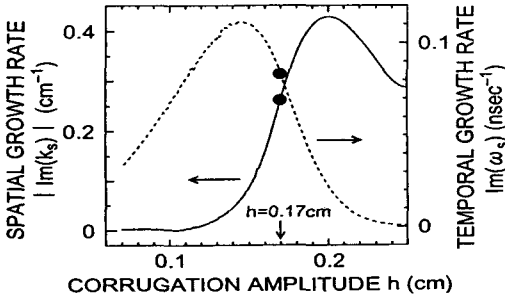


그림 3(a).  $R_0=3.0\text{cm}$ ,  $I=0.5\text{kA}$ ,  $v/c=0.548$ ,  
 $R_b=2.63\text{cm}$ ,  $z_0=0.34\text{cm}$ 일 때 파형의 진폭  $h$ 의 변  
 화에 대한 시간적 성장률 및 공간적 성장률

또한 (7)식의 피 적분 함수는  $\exp[i(n-m)K_0z]I_0[y_n'(1+a\cos K_0z)]$ 가 되어,  $y_n'$ 가 크게 되면 수정  
 Vessel의 함수  $I_0$ 는 갑자기 커져서 (9)식에서  
 Over-flow가 일어난다. 이와 같은 문제를 해결하  
 기 위하여  $I_v(z)$ 를 다음과 같이 접근 전개한다.

### 3. 계산 결과

빔 에너지  $V_b=100\text{keV}$ ,  $65\text{keV}$ 과 빔 전류  
 $I_b=0.5\text{kA}$ 를 가정하여 계산한 결과, 대구경 SWS의  
 크기는  $R_0=3.0\text{cm}$ ,  $h=0.17\text{cm}$ ,  $z_0=0.34\text{cm}$ ,  
 $R_b=2.63\text{cm}$ 가 얻어졌다.

먼저  $I_b=0$ 에서 도파관의 직경을  $R_0=3.0\text{cm}$ 에 고  
 정한 후, 파형의 진폭  $h$ 와 피치  $z_0$ 의 크기 변화에  
 따른 분산 관계를 조사하였다.

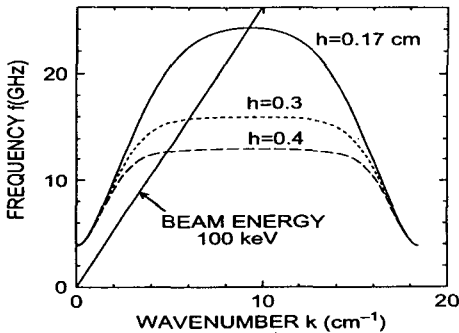


그림 4.  $R_0=3.0\text{cm}$  및  $z_0=0.34\text{cm}$ 일때  $h=0.17$ ,  
 $0.4\text{cm}$ 에 대한  $TM_{01}$ 모-드의 분산 관계

그림 2에서  $R_0=3.0\text{cm}$  및  $z_0=0.34\text{cm}$ 일때

$h=0.17\text{cm}$ ,  $0.3\text{cm}$ ,  $0.4\text{cm}$ 의 세가지 크기 변화에  
 대한  $TM_{01}$  모-드의 분산 관계를 나타냈다.  $h$ 가  
 점점 커지면 주파수는 작아지지만, 빔 에너지  
 $V_b=100\text{keV}$ 일 때  $24\text{GHz}$  부근에서 발진이 일어나  
 는 진폭의 값은  $h=0.17\text{cm}$ 이다. 그림 3에서  
 $R_0=3.0\text{cm}$  및  $h=0.17\text{cm}$ 일 때  $z_0=0.2\text{cm}$ ,  $0.34\text{cm}$ ,  
 $0.4\text{cm}$ 에 대하여  $TM_{01}$  모-드의 분산 관계를 나타  
 냈다.  $z_0$ 가 커지면 커질수록 발진 주파수는 저하하  
 며, 빔 에너지  $V_b=100\text{keV}$ 일 때  $24\text{GHz}$  부근에서  
 발진이 일어나는 주기의 값은  $z_0=0.34\text{cm}$ 이다.

그림 4에는 지금까지의 결과를 정리했다. SWS  
 의 평균 반경을  $R_0=3.0\text{cm}$ 으로 고정하고 진폭  $h$ 를  
 변화시켰을 때 파형의 파수  $K_0=2\pi/z_0$ 에 대하여 발  
 진 주파수의 변화를 곡선으로 나타냈다. 곡선은  
 $K_0$ 와  $h$ 에 대하여 도파관 모-드와  $100\text{keV}$ ,  $I_b=0$ 의  
 빔 공간 전하파와의 교점의 주파수를 표시하고 있  
 다. 직선은  $V_b=100\text{keV}$  일 때  $\pi$  모-드의 동작을  
 나타내고 BWO 와 TWT의 영역으로 나누며, 마  
 이크로파의 발진은 직선의 왼편에서 일어난다. 그  
 림에서 검은 원 표시는 대구경 BWO에서 최적 설  
 계치의 파라미터이며  $K_0=18.5\text{cm}^{-1}$  및  $h=0.17\text{cm}$ 에  
 서  $f=24\text{GHz}$ 이다.

그림 5 (a)(b)에,  $R_0=3.0\text{cm}$ ,  $z_0=0.34\text{cm}$ ,  $I=0.5\text{kA}$ ,  
 $v/c=0.548$ ,  $R_b=2.63\text{cm}$ 에 대하여 파형의 진폭  $h$ 를  
 변화시켰을 때 안부점 해석의 결과를 나타냈다. 먼  
 저 (a)는  $h$ 에 대한 시간적 성장률과 공간적 성장  
 률을 표시하였다. 두 성장률 중에서 어느 한쪽이라  
 도 0이되면 설계치로서 부적당하며 가능한 범위내  
 에서의 큰 성장률로서  $h=0.17\text{cm}$ 을 선택했다. 또  
 그림 (b)는 진폭  $h$ 에 대하여 발진 주파수  $f$ 의 변  
 화를 표시하였는데  $h$ 가 커짐에 따라  $f$ 는 작아지지만  
 $0.17\text{cm}$ 에서  $f=24\text{GHz}$ 가 되었다.

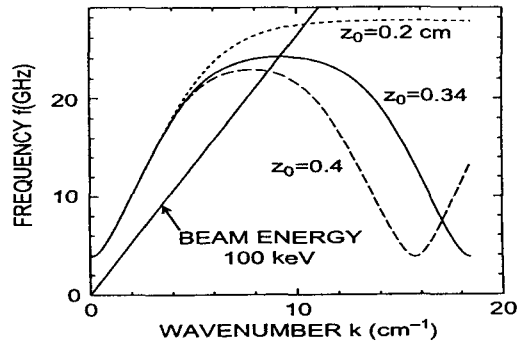


그림 5.  $R_0=3.0\text{cm}$  및  $h=0.17\text{cm}$ 일때  $z_0=0.2$ ,  $0.34$ ,  
 $0.4\text{cm}$ 에 대한  $TM_{01}$  모-드의 분산 관계

이와 같이 그림 5에서 알 수 있듯이 파형의 진폭은 너무 작거나 너무커도 대구경 BWO로서 적합하지 않으므로  $h=0.17\text{cm}$  정도가 최적치인 것을 알았다.

그림에는,  $R_0=3.0\text{cm}$ ,  $I=0.5\text{kA}$ ,  $v/c=0.548$ ,  $R_b=2.63\text{cm}$ ,  $h=0.17\text{cm}$ 일 때 파형의 주기  $z_0$ 를 변화시킨 경우 안부점 해석의 결과이다. 먼저 (a)는  $z_0$ 에 대하여 시간적 성장률과 공간적 성장률을 나타냈다. 두 성장률중에서 어느 한쪽이라도 0이되면 부적절하므로 반드시 0이 되어서는 않된다. 실선으로 표시한 공간적 성장률은  $z_0$ 이 작아짐에 따라 점차 커지지만 어느 값 이하에서는 급격히 작아지는데, 그 값이 TWT 영역이다. 또 점선으로 표시한 시간적 성장률은  $z_0$ 의 감소와 함께 작아진다. 여기서 두 성장률이 큰 값을 얻은 결과  $z_0=0.34\text{cm}$ 가 되었다. 또 그림 (b)에서는  $z_0$ 에 대한 발진 주파수  $f$ 의 변화를 표시하였다.  $z_0$ 이 커짐에 따라  $f$ 는 작아지지만  $z_0=0.34\text{cm}$ 에서  $f=24\text{GHz}$ 가 되었다.

대구경 BWO에서는 도파관의 직경이 파장보다 5배 정도 크기 때문에 기본파 이외의 고차 모드가 포함될 가능성이 있는데 이것을 확인하기 위하여 설계한 지파 도파관의  $TM_{01} \sim TM_{06}$  모드에 대한 분산 곡선을 그림 7에 나타냈다. 빔 에너지는  $V_b=100\text{keV}$  및  $65\text{keV}$ 를 이용하였다. 그림에서 보듯이  $TM_{02} \sim TM_{06}$ 의 고차 모드는  $28\text{GHz}$  이상에서 발진하고 있으므로 각 모드-의 혼합은 일어나지 않는다. 또한 각 교점은 곡선의 군속도가 (-)영역에서 0에 가까울 때 BWO로서 강한 발진이 일어나는데, 고차 모드에서는 교점과 군속도의 절대치가 기본파보다 크기 때문에 빔과의 상호 작용이 약하게 된다.

이상과 같이  $24\text{GHz}$ 대의 대구경 후진파 발진기의 설계 결과를 표 1에 지파 도파관의 파라메타와 성장률로 표현하였다. X-band BWO의 열은 지금까지 Maryland 대학 등에서 연구되어진 X-band BWO의 파라메타이고, 대구경 BWO의 열은 이번에 설계한 파라메타이다. 표 중에서  $R_0=3.0\text{cm}$ 이라고 하는 값은 한층 더 크게 하면 대 출력 마이크로파를 얻을 수 있지만 실험 장치 크기의 제약 때문에 그 값으로 정했다. X-band BWO와 비교할 때 빔 에너지는 작지만 유한한 크기의 도파관에서 발진 조건을 결정하는 공간적 성장률의 크기가 작지 않다는 것에서 콤팩트한 대구경 BWO가 기대된다.

#### 4. 결 론

종래의 X-band BWO와 비교하여 높은 주파수

인  $24\text{GHz}$  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, 대 구경 BWO를 설계하였다.

이상과 같이 대 구경 BWO를 설계·제작하여 실험함으로써 보다 높은 주파수에서의 발진 및 대 출력 발생이 기대되며 현재 실험중에 있어 다음 기회에 그 결과를 발표할 예정이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] V.L.Granatstein and P.L.Colestock, "Wave Heating and Current Drive in Plasmas," Gordon and Breach. New York, 2002.
- [2] V.L.Granatstein and I.Alexeff, "High Power Microwave sources," Boston : Artech, 2001.
- [3] J.N.Benford and J.A.Swagle, "High Power Microwaves," Boston : Artech, 2002.
- [4] 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.
- [5] S.P.Bugaev, V.A.Cherepein, V.I.Kanavets, A.I.Klimov, A.D.Kopenkin, V.I.Koshelov, V.A.Popov and A.I.Slepov, "Relativistic multiwave Chrenkov generators," IEEE Trans. Plasma Sci. PS-18.