

대전력 펄스파워의 개발을 위한 전자빔 발생장치 연구

김원섭
전남도립 남도대학

A Study of Electron Beam Production for High Pulse Power Generator

Wonsop KIM
Jeonnam Provincial College

Abstract - 대전력 펄스 파워를 발생시키기 위한 마이크로파 발전기는 수GW의 대출력이 발생되고 있는데 발전특성, 높은 주파수, 발전출력향상등에 대한 여러 가지 연구가 진행되고 있다, 마이크로파는 지파회로를 이용하면 광속보다도 낮은 주파수를 갖게되며 전자빔과 속도가 일치될 때 에너지의 증대가 일어나 대전력 펄스파워를 발생시킬수 있다. 본 연구에서는 회로파의 군속도가 부의 영역에서 동작하는 후진파 발전기를 이론적인 계산에 의하여 연구하였다. 연구는 수십GHz의 주파수를 이용하여 보다 높은 출력, 효율이 발생되도록 하였고 분산특성을 이용하였다.

1. 서 론

수백 MW의 출력의 마이크로파 펄스를 얻기 위해서는 대출력 후진파 발전기에서 상대론적인 전자빔을 이용하는데 전자빔은 전계와 자계에 의하여 확산되므로 전류가 흐르지 못하게된다. 이런 이유 때문에 진공중에서 도파관을 이용하면 전류증화, 하전중화등으로 인하여 밀도저는 높은 대전류를 흐를수 있다. 이것을 이용한 자계 밀폐방식의 의한 RF 가열 또는 전류 구동을 위하여 수 10MW급의 고 출력 마이크로파원이 필요하다[1]. 전자빔을 이용한 고 출력 마이크로파 발전기는 최근 폭넓게 연구되고 있다. 그중에서도 러시아의 공학연구소에서 Bugacv 등에 의하여 연구 개발된 다중파동 체렌코프 발전기는 발전 파장 λ보다 큰 직경 D를 갖는 지파 구조를 이용하여 기록적인 출력을 발생시켰다. 이와 같은 D>λ의 경우 대구경 SWS라고 하는데[2], 이것은 RF 전연 파괴가 일어나지 않는 범위의 고 에너지 밀도에서 큰 마이크로파 출력을 얻을 수 있다.

오래전에 고 출력 미러파원으로서 개발된 자이로트론은 전자 싸이크로트론 메이저를 이용하는데, 이것은 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 임시충에 의해 만들어진 전자 빔이 자계에 대하여 수직인 성분에 의하여 만들어 진다. 체렌코프 발전기에서는 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 이용하는 점에서 체렌코프 발전기와 밀접한 관련이 있는데, 체렌코프 발전기에서는 지파 구조가 2개 나열되어 있어 그 사이에서 회절 현상

에 의한 물리적인 현상을 일으키지만, 대 구경 SWS에서는 직경을 작게하지 않으면서 밀리파 영역에서 고 출력의 발전이 가능하다.

후진파 발전기(BWO)는 기본적으로 TM₀₁ 모드에 의해 동작하며, SWS의 금속 표면의 내경은 R(z)=R₀+hcosK₀z, K₀=2π/z₀ (z₀, h : 축 방향 주기 및 진폭)와 같이 정현파 곡선으로 변화한다. 또한 보통의 X-band BWO에서는 직경과 파장과의 관계가 D/λ~1이지만, 대구경 BWO에서는 D/λ>1이다. 특히 대구경 BWO에서는 발전 주파수를 저하시키지 않기 위하여 작은 z₀와 h를 선택하는 것이 중요한데, 이것은 체렌코프 발전기에서 지파 구조의 설계와 비슷하다.

지금까지의 BWO 실험에서는 주로 D/λ~1인 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/λ=4.8로 결정하였고, 설계 방법은 절대 불안정성의 선형 해석을 이용하였다.

2. 본 론

그림 1에 설계에 이용한 지파 도파관의 모델을 표현하였다. 완전 도체 금속의 내경은 R(z)=R₀+hcosK₀z로 변화한다.

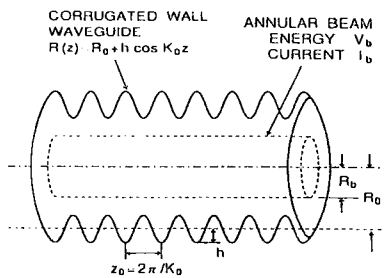


그림 1. 지파 도파관의 기본 모델 및 파형

축 방향으로 동일 크기의 강한 자장이 주어질 때, 전자는 축 방향으로만 이동하며 여기된 마이크로파의 모-드

는 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.

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

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

여기서 대구경 SWS의 특이한 성질에 대하여 고찰한다. 빔이 없을 때, $I_b=0$, $A_n=0$, $C_n=0$ 에 대하여 생각하면 SWS에서 빔 에너지가 0이므로 발진은 일어나지 않고

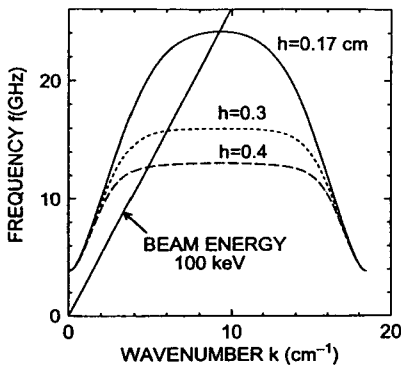


그림 2. $R_0=3.0\text{cm}$ 및 $z_0=0.34\text{cm}$ 일 때 $h=0.17, 0.3, 0.4\text{cm}$ 에 대한 TM_{01} 모-드의 분산 관계

ω 와 k 는 실수가 된다. R_0 를 작게하지 않으며 높은 발진 주파수 $f=\omega/2\pi$ 를 얻기 위하여는 그림 1에서 z_0 를 작게하지 않으면 안된다. 이때 K_0 은 크게 되어 $y_n'^2$ 이 되어 $E_{zn}=A_n I_n(y_n' r/R_0)$ 및 $y_n'^2=-y_n'^2$ 이 된다. 피 적분 함수는 $\exp[i(n-m)K_0 z] \text{lo}[y_n' (1+\text{acos}K_0 z)]$ 가 되어, y_n' 가 크게 되면 수직 Vessel의 함수 I_0 은 갑자기 커져서 Over-flow가 일어난다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 $I_v(z)$ 를 다음과 같이 접근 전개한다.

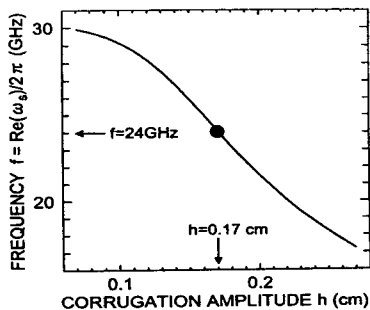


그림 3. 파형의 진폭과 발진 주파수 변화

위와 같이 접근 전개를 이용하면 Over-flow도 일어나지 않는다.

빔 에너지 $V_b=100\text{keV}$, 65keV 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 고정된 후, 파형의 진폭 h 와 빗치 z_0 의 크기 변화에 따른 분산 관계를 조사하였다. 그림 2에서 $R_0=3.0\text{cm}$ 및 $z_0=0.34\text{cm}$ 일 때 $h=0.17\text{cm}, 0.3\text{cm}, 0.4\text{cm}$ 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 24GHz 부근에서 발진이 일어나는 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 나타냈다. z_0 가 커지면 커질수록 발진 주파수는 저하하며, 빔 에너지 $V_b=100\text{keV}$ 일 때 24GHz 부근에서 발진이 일어나는 주기의 값은 $z_0=0.34\text{cm}$ 이다.

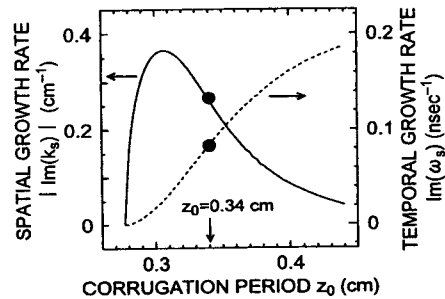


그림 4. 파형의 주기에 대한 시간적 성장률 및 공간적 성장률

그림 4에는 지금까지의 결과를 정리했다. SWS의 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 발진 주파수의 변화를 곡선으로 나타냈다. 곡선은 K_0 와 h 에 대하여 도파관 모-드와 100keV , $I_b=0$ 의 빔 공간 전파파와의 교점의 주파수를 표시하고 있다. 직선은 $V_b=100\text{keV}$ 일 때 π 모-드의 동작을 나타내고 BWO와 TWT의 영역으로 나누며, 마이크로파의 발진은 직선의 왼편에서 일어난다. 그림에서 검은 원 표시는 대구경 BWO에서 최적 설계치의 파라미터이며 $K_0=18.5\text{cm}^{-1}$ 및 $h=0.17\text{cm}$ 에서 $f=24\text{GHz}$ 이다.

두 성장률 중에서 어느 한쪽이라도 0이되면 설계치로서 부적당하며 가능한 범위내에서의 큰 성장률로서 $h=0.17\text{cm}$ 을 선택했다. 또 진폭 h 에 대하여 발진 주파수 f 의 변화를 표시하였는데 h 가 커짐에 따라 f 는 작아지지만 0.17cm 에서 $f=24\text{GHz}$ 가 되었다. 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.

이에 대한 결과로서 $R_0=3.0\text{cm}$, $I_b=0.5\text{kA}$, $v/c=0.548$, $R_b=2.63\text{cm}$, $h=0.17\text{cm}$ 일 때 파형의 주기 z_0 를 변화시킨 경우 안부점 해석의 결과이다. 먼저 z_0 에 대하여 시간적 성장률과 공간적 성장률을 나타냈다. 두 성장률중에서 어느 한쪽이라도 0이되면 부적절하므로 반드시 0이 되어서는 안된다. 실선으로 표시한 공간적 성장률은 z_0 이 작

아짐에 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 그림에서는 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.

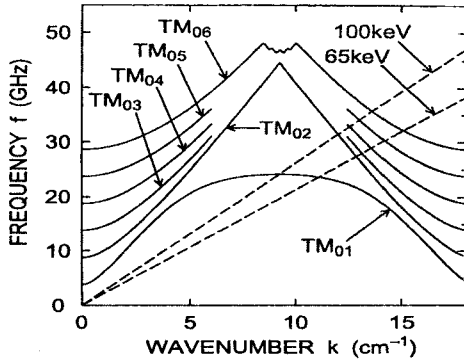


그림 5. 후진파 발진기에서 분산 곡선

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

이상과 같이 24GHz 대의 대구경 후진파 발진기의 설계 결과물을 지파 도파관의 파라메타와 성장률로 표현하였다. X-band BWO는 지금까지 Maryland 대학 등에서 연구되어지고 있다. 설계결과에서 $R_0=3.0\text{cm}$ 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.

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 파대한 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 이론적인 계산에 의해 연구하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] K.Minami, Y.Carmel, V.L.Granatstein, W.W.Destler, W.R.Lou, D.K.Abe, R.A.Kehe, M.M.Ali, T.Hosokawa, K.Ogura and T.Watanabe, Linear theory of electromagnetic wave generation in a plasma loaded corrugated wall resonator, IEEE Trans. Plasma Sci. PS-18, 537,1999.
- [2] X.Zhai, E.Garate, R.Prohaska and G.Benford, Observation of Trivelpiece Gould modes in a plasma filled backward oscillator, Phys. Rev. A, 45, R8336,1998.
- [3] M.M.Ali, K.Ogura, K.Minami, T.Watanabe, W.W.Destler and V.L.Granatstein, Linear analysis of a finite length plasma filled backward wave oscillators, Phys. Fluids B4, 1023,1992.
- [4] J.A.Swagle, R.A.Anderson, J.F.Camacho, B.R.Poole, M.A.Rhodes, E.T.Rosenbury and D.L.Shaffer, Scaling studies and time resolved microwave measurement on a relativistic backward wave oscillator, IEEE Trans. Plasma Sci. PS-20, 714,1998.
- [5] J.N.Benford and J.A.Swagle, High Power Microwaves, Boston : Artech, 2001.
- [6] W.S.KIM, A Study on Producing Electron Beam for the Illustration of Future Energy, KIIIE Annual Spring Conference, 374.2004