

# 대 전력 후진파 발진기의 설계를 위한 마크스 발생기의 제작 및 검증

論 文  
48B-8-1

## Fabrication and Identification of a Marx Generator for the Design of High Power Backward Wave Oscillator

金元變\* · 黃樂璵\*\*  
(Won-Sop Kim · Lak-Hoon Hwang)

**Abstract** - We have designed the backward wave oscillator, a power-pulsed generator oscillated 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 ( $D/\lambda=4.8$ ) of the slow wave structure was adopted to prevent the breakdown brought about by the increase of power density. We have fabricated a marx generator, pulse forming line and diode. And the development of a compact pulsed power generator with short period and low amplitude is expected.

**Key Words** : Pulse Generator, Backward Wave Oscillator, Slow Wave Structure, High Frequency, Dispersion Relation

### 1. 서 론

전자 빔을 이용한 마이크로파원의 개발은 펄스 파워 기술의 발달에 따라 현저한 진보를 가져왔는데 대 전력 마이크로파 발생장치는 전자사이크로트론메이저, 자이로트론, 크라이스트론, 후진파발진기, 가상음극관 등이 있으며 플라즈마 가열장치, 입자 가속시스템 장치, 마이크로파 전송장치, 고체 물질상태 진단장치, 물질화학 반응장치 등에 이용되어 왔다 [1-5]. 그 중에서도 후진파 발진기는 대 전력 펄스 발생기와 전력전송 기기 및 에너지 변환기기로 구성되어 있으며, 강한 자장이 필요없고 지파 도파관 안으로 전자 빔을 발생시켜 통과시킬 수 만 있다면 고 효율의 발진을 얻을 수 있는 장점이 있어 많이 연구되고 있다[6-9]. 종래 후진파발진기의 실험적 연구 결과를 보면 주로 8GHz대의 주파수 범위 내에서 이루어졌는데 그 결과를 보면 아직 발진의 안정화

및 긴 펄스화가 미흡하며, 특히 높은 주파수에 의한 고 효율화와 출력 증대등의 연구가 필요하다[10-12].

따라서 본연구에서는 지금까지의 연구 결과보다 높은 주파수인 20GHz대에서 발진하는 대구경 후진파 발진기를 설계·제작하였으며[13-14] 그 결과를 표 1에 나타냈다. 에너지 변환장치인 지파 도파관의 설계에는 절대 불안정성의 선형해석을 이용하였고 직경과 파장의 관계를  $D/\lambda=4.8$ 로 결정하였다.

표 1 설계한 대구경 후진파 발진기와 X-band 후진파 발진기  
Table 1 Designed large diameter BWO vs. X-band BWO

		X-band BWO	Large Diameter BWO
Size of the slow wave structure (cm)		$R_0 = 1.445$ $h = 0.445$ $Z_0 = 1.67$	$R_0 = 3.0$ $h = 0.17$ $Z_0 = 0.34$
BEAM	radius (cm)	$R_b = 0.8$	$R_b = 2.63$
	current (kA)	$I_b = 2.3$	$I_b = 0.5$
	energy (keV)	660	100
Frequency (GHz)		8.49	24

\* 正 會 員 : 長興大學 電氣科 · 工博  
\*\* 正 會 員 : 世明大學校 電氣電子工學部 · 工博  
接受日字 : 1998年 6月 30日  
最終完了 : 1999年 7月 1日

또 수백 A의 대 전력 전자 빔 발생 장치를 위한 마르크스 발생기와 에너지 전송 기기인 펄스 파형 형성 선로(PFL)와 다이오드의 제작 및 솔레노이드 코일을 이용한 일정장계 분포의 형성과 진공용기를 제작하였다. 한편 작은 주기, 진폭, 피치를 이용한 보다 콤팩트한 대구경 후진파 발진기를 처음으로 제작하였으며 실제 이용하게 되면 장래에 세라믹 소결 등의 재료 가공과 레이더 및 교통의 원격 감시 제어 시스템, 구내 무선 LAN등 통신 시스템의 전자기기 장치등 여러 분야에 걸쳐 유용하게 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2절에서는 에너지 변환 기기의 계산 모델과 방법에 대하여 논하였고, 제 3절에서는 기본장치의 제작과 측정, 제 4절에서는 마이크로파 측정 장치의 제작, 그리고 마지막으로 5절에서는 결론을 기술했다.

2. 에너지 변환 기기의 계산 모델과 해석

후진파발진기(Backward Wave Oscillator : BWO)에서 에너지 변환 기기인 파형 도파관의 내벽 (Slow Wave Oscillator : SWS)의 반경은  $R(z)=R_0+h\cos K_0z$ ( $R_0$ :지파 도파관의 평균 반경,  $h$ :진폭,  $K_0$ :파형의 파수,  $K_0=2\pi/z_0$ ,  $z_0$ :축방향 주기)로 표현하며, 그림 1에 그 형상을 나타냈다. 후진파 발진기에서 파형 도파관을 설계·제작하기 위해서 무엇보다도 중요시해야 할 것은 보다 높은 주파수에서 발진하는 것과 고 효율에서 대 출력의 발진기를 제작하는 것이다.

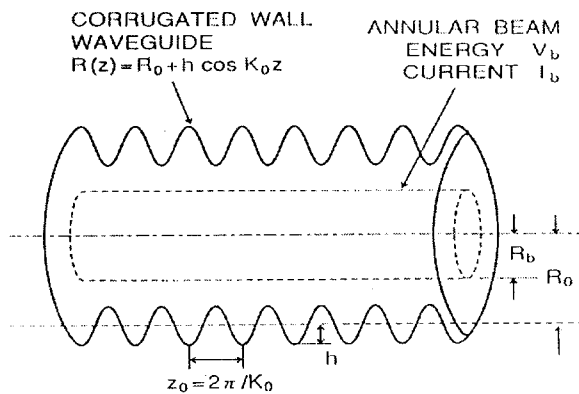


그림 1 지파 도파관의 단면 형상  
Fig 1 Cross sectional view of the slow wave structure

현재까지 실험적으로 후진파발진기의 발진이 확인 된 것은 미국의 Maryland 대학등의 것으로서 발진 주파수는 8GHz대이다[10-12]. 여기서 후진파발진기의 기본 발진 모드인  $TM_{01}$  모드를 이용하여 가능한 한 높은 주파수를 목표로 하여 20GHz대에서 발진하는 후진파발진기를 설계·제작하였다. 또 대 출력의 발생에 따른 대 전류에 의한 절연

파괴를 막기 위하여 도파관의 구경을 대 구경화 하였다. 설계에 대한 구체적인 방법은 다음과 같은 분산식을 이용하여 절대 불안정성의 선형 해석 방법을 이용하였다[6-7].

먼저, Floquet의 정리에 의하여 RF 전계는 다음식과 같이 나타낸다

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

$$E_r = \sum_{-\infty}^{\infty} E_{rn} \exp[i(k_n z - \omega t)], \quad k_n = k + n K_0 \quad (1)$$

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

$$E_{zn} = A_n J_0\left(\frac{y_n r}{R_0}\right) \quad 0 \leq r \leq R_0$$

$$= B_n J_0\left(\frac{y_n r}{R_0}\right) + C_n N_0\left(\frac{y_n r}{R_0}\right) \quad R_b \leq r \leq R(z)$$

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

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

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.

$$B_n = [1 - b J_0(Y_n \delta) N_0(y_n \delta)] A_n b = \frac{\omega^2 - c^2 k_n^2}{(\omega - k_n v)^2} I \quad (3)$$

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

$$I = \frac{\pi I_b}{I_A \beta \gamma^3}, \quad I_b = 2\pi \int_{R_b}^{R_0} e n_b v r dr \quad (5)$$

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

$$\beta = \frac{v}{c}, \quad \gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}, \quad \delta = \frac{R_b}{R_0}$$

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

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

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

$$C_{mn}^I = \int_{-\pi/K_0}^{\pi/K_0} \exp[i(n-m) K_0 z] J_0[y_n(1 + a \cos K_0 z)] dz \quad (7)$$

$$= \sum_{q=0}^{\infty} \frac{(y_n a)^{2q+i n-m}}{2^{2q+|n-m|} q! (q+|n-m|)!} J_0^{(2q+|n-m|)}(y_n), \quad a = h/R_0 \quad (8)$$

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

$$D(k, \omega) = \det[D_{mn}] = 0 \quad (9)$$

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 작게하지 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  $\exp[i(n-m)K_0z] I_0[y_n'(1 + \alpha \cos K_0z)]$ 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  $I_\nu(z)$ 를 다음과 같이 점근 전개한다.

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

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

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

$$G_n = A_n \exp(y_n), \quad D(\omega, k) = \det[D_{mn}] = 0 \quad (10)$$

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

최종적으로 얻어진 도파관의 분산 관계는 그림 2와 같이 나타낼 수 있으며, 그림에서 보면  $TM_{01}$  모드에서 가능한 높은 주파수에서 발진을 일으키기 위하여 빔 에너지 65keV와 100keV를 이용한 결과 100keV의 직선이 분산 곡선의 정점에서 만나는 것을 알 수 있고, 이것은 후진파 발진기에서 빔 모드인  $TM_{01}$ 에서 공간 전하 효과에 의한 빔 에너지와 전자파와의 상호 작용이 빔에너지의 증대에 의하여 강해지므로 마이크로파 출력 증대에 활용될 수 있다. 이 교차점의 값에 의해 20 GHz대에서 발진이 가능한 것을 알 수 있으며 보다 높은 주파수에서 높은 효율로 대 출력을 발생시킬 수 있을 것으로 기대된다.

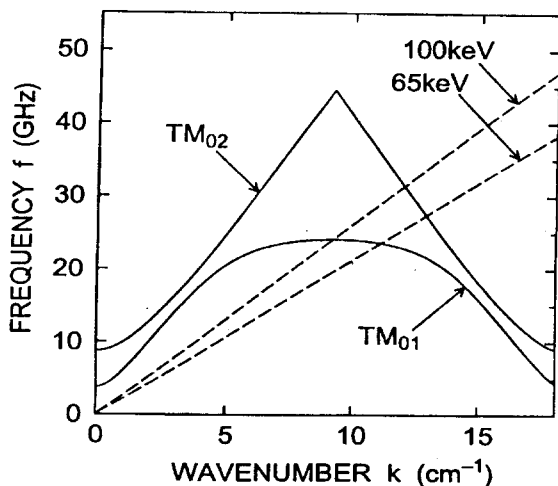


그림 2 지파 도파관의 분산곡선  
Fig. 2 Dispersion curves of the slow wave structure

### 3. 실험 장치의 제작과 특성

#### 3.1 후진파 발진기의 개요

후진파 발진기는 상대론적인 전자 빔을 이용하여 전자파 모드와의 상호 작용에 의하여 마이크로파 출력을 발생시키는 장치이며 일반적인 구조는 그림 3과 같이 되어 있으며 설계 제작한 후진파 발진기의 실험장치 사진을 그림 4에 나타냈다. 동작은 마르크스(Marx) 발생기에서 고 전압을 발생시켜 펄스 형성 선로(PFL)를 이용하여 대 전류 펄스를 만든 후 전자총에서 전자 빔을 발생시킨다. 스텐레스 파이프의 진공 용기안에 놓여 있는 파형 모양의 지파 도파관은 축 방향으로 위치한 자계 발생용 코일에 의해 만들어진 균일한 자계안에 위치하고 있으며, 이 지파 도파관 내에서 발생된 전자 빔과 전자파 모드와의 상호 작용에 의하여 마이크로파를 발생시킨다.

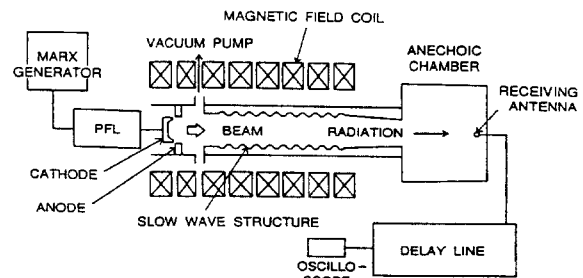


그림 3 후진파 발진기의 개요  
Fig. 3 Diagram of the BWO

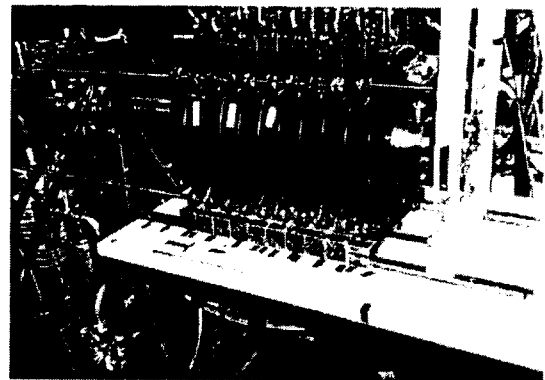


그림 4 실험장치 사진  
Fig. 4 Photo of experimental apparatus

도파관의 끝에는 빔을 회수하기 위한 역 테이퍼 모양의 금속 호른이 부착되어 있으며 스텐레스 파이프의 끝에는 유리 창 모양의 플랜지를 부착하여 마이크로파를 출력시킨다. 출력부 전체는 전파 흡수체에 의하여 감싸 있고 그 안에 마

이크로파 수신용 안테나와 동축 도파관 변환기가 놓여 있으며 수신된 마이크로파 출력 파형은 오실로스코프를 이용하여 관찰한다. 진공 용기는 2대의 진공 펌프에 의해 고 진공도를 유지하도록 한다. 또 발생된 마이크로파 출력의 주파수 분석을 위하여 도파관 지연 선로를 제작하여 전파 속도의 차에 의하여 분석을 한다.

3.2 실험 장치와 기본적 특성

마르크스 발생기는 그림 5에 나타난 것과 같이 저항을 이용하여 몇 개의 콘덴서를 병렬로 나열한 후 전부 충전한 다음 갭 스위치를 닫는것에 의해 고전압을 발생시켜 전송시킨다.

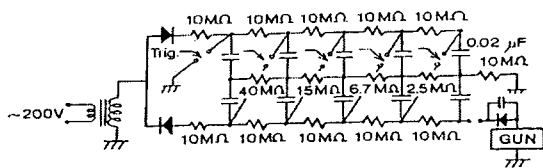


그림 5 마이크로 발생기 회로도

Fig. 5 Equivalent circuit of the MARX generator

제작한 마르크스 발생기는 1개당 20keV까지 충전할 수 있는 정전 용량 0.02 μF의 오일 콘덴서를 10개 나열하여 이론 최대 출력이 200keV가 되도록 하였으며 최대 발생 에너지는 100J이다. 또 갭 스위치는 자폭형을 이용하였으며, 각 콘덴서의 충전 시간이 같도록 하기 위하여 저항을 삽입하였다. 마르크스 발생기의 동작은 시퀀스 제어 콘트롤러를 이용하였으며, 출력 전압의 측정에는 저항 분압과 로고스키 코일의 두가지 방법을 이용하여 측정하여 확인하였다. 첫째로, 저항 분압을 이용한 측정은 소저항( $R_1=0.3718\Omega$ )과 대저항( $R_2=1122\Omega$ )을 이용하여  $R_1$ 에 걸리는 전압을 오실로스코프로 관찰하여 얻어진 값( $V_{sco}$ )을 이용하여 실제의 출력 전압( $V_{out}$ )을 식  $V_{out}=V_{sco} \times (R_2/R_1)$ 에서 직접 산출할 수가 있다. 저항 분압에 의하여 얻어진 출력 파형을 그림 6에 나타냈으며 또 위와 같이 얻어진 출력 파형을 읽어 얻어진 마르크스의 입·출력 전압 특성을 그림 7에 나타냈다. 그림 7에서 보면 충전 전압이 14kV까지 충전 전압에 대하여 거의 일정한 값이 출력되므로 이 범위내에서는 사용 가능한 값으로 되었다. 다음에는 로고스키 코일을 이용하여 측정하였으며 적분기를 통하여 출력되는 파형을 오실로스코프에서 관찰하였고, 그 결과 얻어진 마르크스의 입·출력 전압 특성을 그림 8에 나타냈다. 그림의 결과를 보면 14kV까지는 충전 전압에 대하여 거의 일정한 값이 출력되었으며, 저항 분압에 의한 측정 결과와 함께 제작한 마르크스의 입·출력 특성을 확인했다.

마르크스 발생기 출력의 시정수는 얻어진 출력 파형으로부터 평균  $2.42\mu s$ 가 얻어졌다. 한편 이론적으로 계산하면 시정수  $\tau$ 는  $\tau=RC=1.1k\Omega \times (0.02(\mu F)/10)=2.42\mu s$ 가 되어 출력 파형으로부터 얻어진 값과 일치하여 신뢰성 있는 출력값으로 생각할 수 있다.

후진파발전기에서는 상대론적인 전자빔을 발생시켜 사용하기 위하여 되도록이면 음극 전류로서 짧은 펄스 발생 장치가 필요하므로 펄스 형성 선로를 제작하였다. 제작한 펄스형성선로는 폴리에틸렌을 이용한 250kV 고 내압의 동축선을 이용하였으며 길이 18m, 직경 3.4cm, 임피던스 50Ω의 특성을 가지고 있다. 또 PFL의 펄스 폭을 이론적으로 계산하면 길이 l 및 유전율  $\epsilon_s$  일 때 식  $\eta=(2\sqrt{\epsilon_s}l)/c$ 에 의하여  $0.18\mu s$ 가 얻어진다.

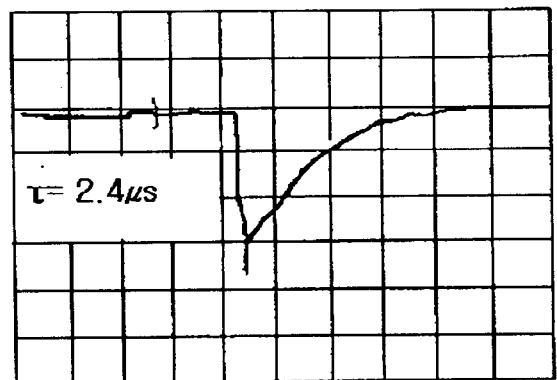


그림 6 마르크스 발생 출력

Fig. 6 MARX output

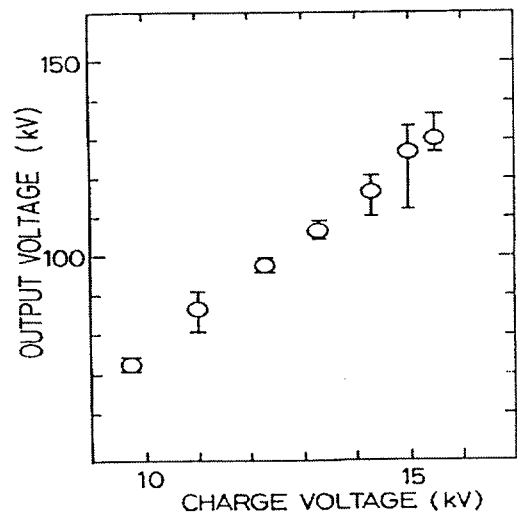


그림 7 저항 분압기에 의한 마르크스 출력

Fig. 7 Charge vs. MARX output for resistance potential divider

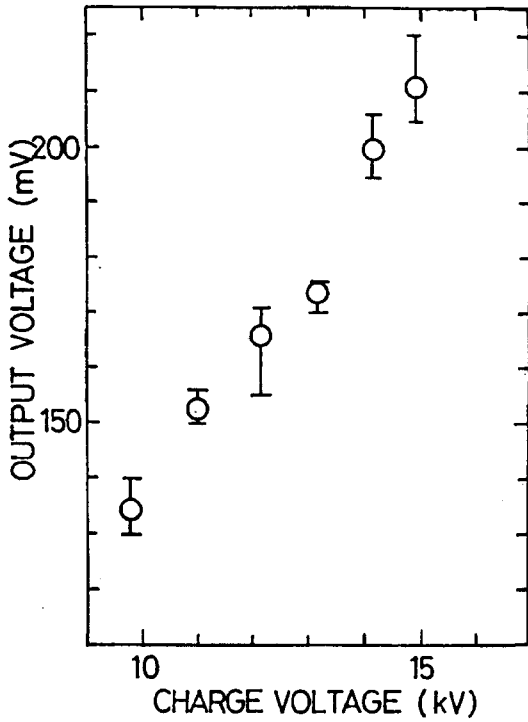


그림 8 로고스키 코일에 의한 마르크스 출력  
 Fig. 8 Charge voltage vs. MARX output for rogowski coil

다이오드는 양극과 음극으로 구성되며 고 전압을 인가하여 음극 표면상의 미세한 돌기로 부터 전자가 방출되는데 이 전자는 축 방향의 자계에 의하여 음극에 도달하기 전에 원 궤도를 그리면서 방출된다. 설계에는 전자 빔의 반경  $R_b=2.63\text{cm}$ 의 원통 곡형 빔을 얻기 위하여 양·음극의 위치 및 크기를 결정하였으며 전자 빔의 사이크로트론 반경을 산출했다. 실제로 음극 전류 65kV, 축방향 자장 0.39T로 가정했을 때 전자의 속도  $v$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$v = c\sqrt{1-1/\gamma} \quad (\text{단, } \gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}) \quad (11)$$

$\gamma$  식을 Taylor 전개하면

$$\begin{aligned} \gamma &= 1 + \frac{v^2}{c^2} + \dots \\ &= 1 + \frac{m_0 v^2}{2 m_0 c^2} \\ &= 1 + \frac{(1/2) m_0 v^2}{m_0 c^2} \end{aligned}$$

$(1/2)m_0v^2 = eV$ 이므로  $\gamma = 1 + \frac{eV}{m_0 c^2}$ 가 되는데, 각 정수값  $m_0, c, e$ 등을 대입하면  $\gamma = 1.127$ 이 된다. 여기서  $v$ 값에 대한 수직 성분  $v_{\perp}$ 과 수평 성분  $v_{\parallel}$ 에서 전자 빔의 상대론적인 운동을 고려하면  $v_{\parallel}$ 이 아주 크므로  $v_{\perp} = 0.1v$ 로 생각하여 사이크로트론 반경을 산출하면  $r_c = 0.2\text{cm}$ 가 되어

양·음극의 위치관계에 따른 수치를 결정했는데 음극의 반경은 2.63cm, 양극의 반경은 2.93cm로 결정했으며 그림 9에 다이오드의 단면 형상을 나타냈다.

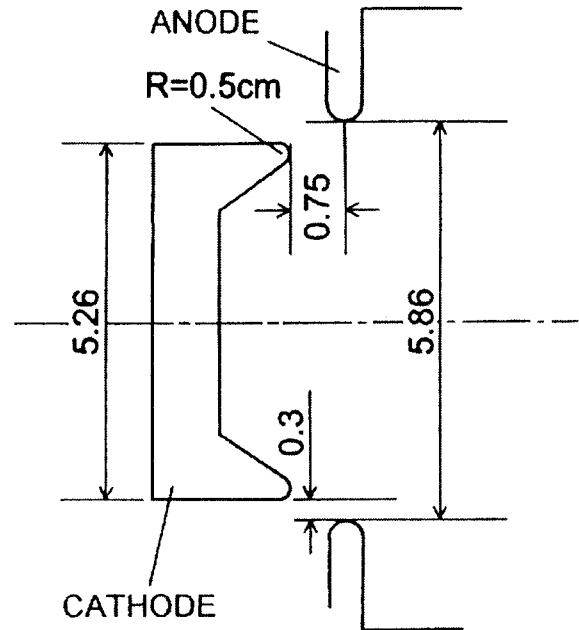


그림 9 다이오드의 단면 형상  
 Fig. 9 Cross sectional view of the diode

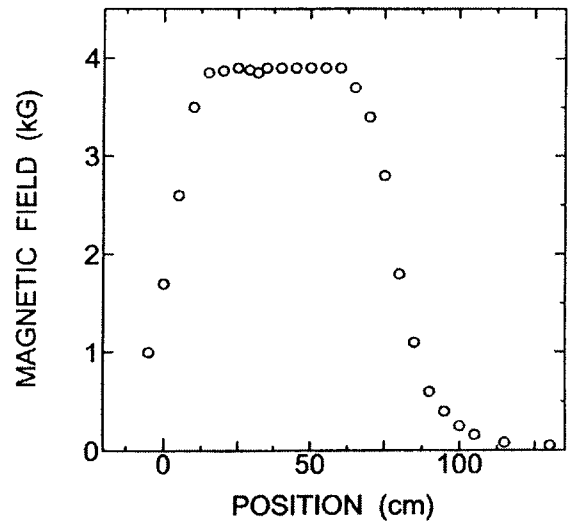


그림 10 축 방향 자계의 크기  
 Fig. 10 Magnetic field vs. axial position

축방향 자계는 음극에서 발생한 전자가 양극에 도달하지 않고 도파관에 입사되는 것과 도파관에 입사한 전자 빔이 관벽에 닿지 않고 도파관의 종단까지 도달하도록 하기 위한 작용을 한다. 축방향 자계 발생용 솔레노이드 코일을 이용하였으며 내경 15cm, 폭 5.2cm의 코일을 10개 사용하였다. 코일 한 개씩 자계 특성을 계산과 실측에 의하여 구하여 음

극부터 도파관 종단부까지 약 50cm를 균일 자장으로 하기 위하여 세밀한 배열을 하여 조절했다. 또 솔레노이드 코일을 결정된 배열에 대하여 전류치 340A를 흘려 자계를 만든 후, 가우스 메타에 의하여 자계를 측정하였는데 그림 10와 같이 약 50cm의 균일한 자장을 얻었으며 그 값은 약 0.39T가 되었다. 한편 전자빔의 발생을 위하여는 고 진공 상태가 요구되므로 스텐레스 진공 용기를 제작하여 수냉식 확산 펌프와 터보 분자 펌프를 이용하여 항상  $5 \times 10^{-5}$ Torr의 진공 상태를 유지 하도록 하였다.

이와 같이 제작된 실험 장치를 이용하여 대 전류 전자 빔 발생과 에너지의 크기에 따른 빔 전류치의 변화, 그리고 전자 빔과 전자파 에너지의 상호 작용에 의한 마이크로파 출력 발생과 압력 및 자장 크기의 변화에 따른 마이크로파 출력 크기 변화를 실험한다.

#### 4. 마이크로파 출력 주파수 측정 설비 제작

##### 4.1 도파관 지연선로의 제작

지연 도파관으로 부터 출력된 마이크로파는 여러 가지 모드 및 주파수가 포함되어 있다고 생각되므로 그것을 각 주파수 스펙트럼으로 해석할 필요가 있다. 따라서 출력 파형으로부터 필요로 하는 20GHz대를 확인하기 위하여 도파관 지연선로를 설계·제작하였다. 도파관 지연선로는 마이크로파 전송 선로로서 주파수에 따라 전송 시간이 다른 특징을 이용하여 분석을 한다.

설계한 도파관의 치수는 직사각형으로서  $a \times b = 8.436 \times 4.318\text{mm}$ 이며, 차단 주파수  $f_c (= c/\lambda_c)$ 는 차단 파장  $\lambda_c = 2a$ 를 이용하여 구하면  $f_c = 17.769\text{GHz}$ 가 된다. 총 길이는 대 출력 후진파 발진기를 고려하여 100m를 제작하였는데 직선로와 180도 밴드를 이용하여 접속하였고 그림 11에 나타낸 것과 같이 각 부품의 직선로는 길이 2m, 180도 밴드의 평균 반경은 32.5mm이다.

지연 시간의 이론적 계산은 여러 가지 주파수의 마이크로파가 100m의 선로를 통하여 이론적으로 어느 정도 지연되는가를 계산에 의하여 구하였다. 지연시간을 T, 군속도  $v_g$ , 길이를 L이라고 하면,

$$T = L / v_g = L / [c\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c)^2}] \quad (12)$$

가 된다. 위의 식을 이용하여 L=100m에 대한 지연 시간을 계산하면, 실제의 길이는 180도 밴드의 길이도 고려해야 되므로 L=105.003m가 된다. 따라서 이 길이에 대한 지연 특성을 계산하면 그림12와 같은 결과가 얻어졌다. 그림에서 보

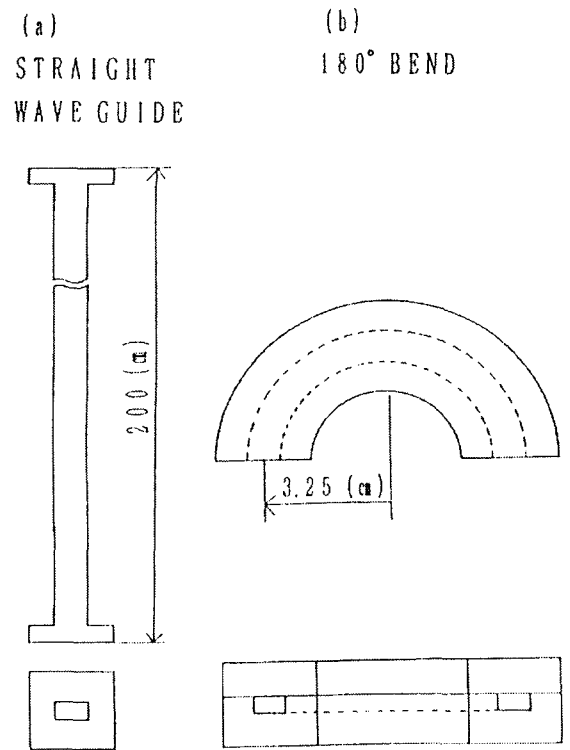


그림 11 지연 선로와 180도 밴드

Fig. 11 Delay line and 180 ° band

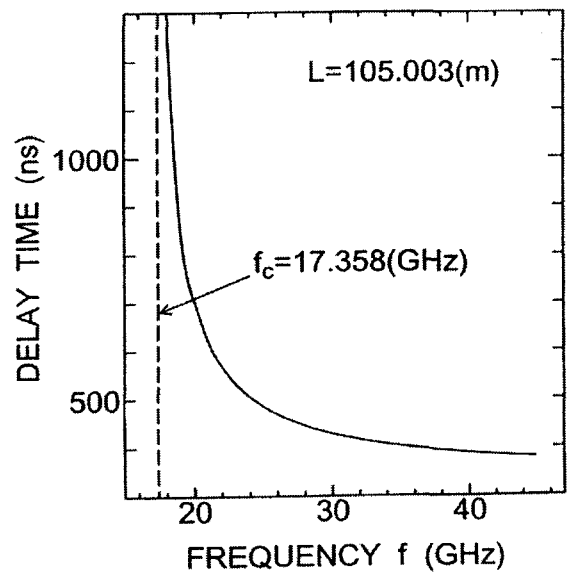


그림 12 지연 선로와 주파수의 관계

Fig. 12 Delay time vs. frequency

면 제작한 대출력 후진파 발진기로 부터 예상되는 20GHz의 마이크로파 출력은 약 500ns가 지연되는 것을 알 수 있다. 또 직접 실험에서는 출력되는 마이크로파의 크기에 따라 길이를 조절할 수 있도록 하였다.

4.2 입·출력 특성시험

지연 선로의 입·출력 특성 시험은 실제 지연 선로에 20GHz의 마이크로파를 입력시켜 각 길이에 대한 지연 시간의 차이를 측정했다. 측정에는 그림 13와 같은 회로를 이용하여 소 출력 발전기와 변조기용 펄스 발생기를 이용하여 마이크로파 주파수와 선로의 길이에 대한 지연 시간의 차에 의한 결과를 오실로스코프에 입력 파형과 출력 파형으로 나타내어 비교하였으며 그 파형 펄스의 크기 변화로부터 지연 시간을 측정하였다. 먼저 직선로와 180도 밴드의 각 부품에 대하여 측정한 후 그에 대한 감쇄치를 얻은 결과 직선로에서 약 3.5dB, 180도 밴드에서 약 0.97dB가 얻어졌는데 이것은 같은 길이로 환산했을 때 180도 밴드가 직선로 보다 약 5배의 감쇄치가 있다. 다음에는 직선로와 180도 밴드를 이용하여 4m 및 10m의 입·출력 파형을 측정하였는데 그림 14와 같이 나타났으며 이것에서 보면 길이에 따라 지연시간과 감쇄치가 변한 것을 쉽게 알 수 있었다.

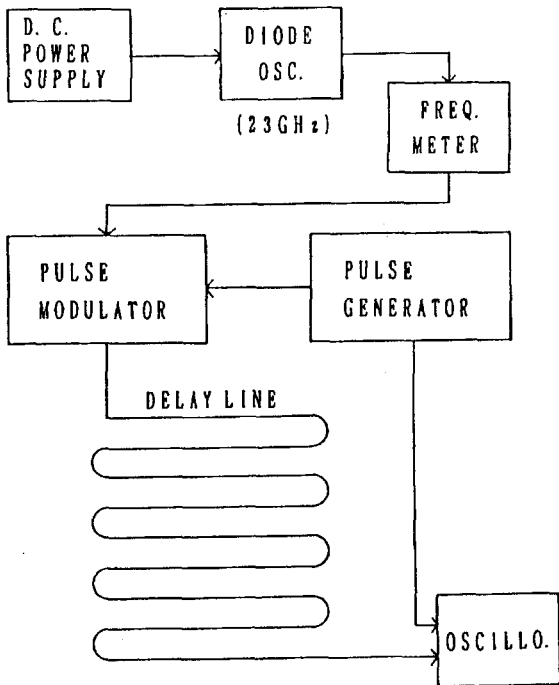
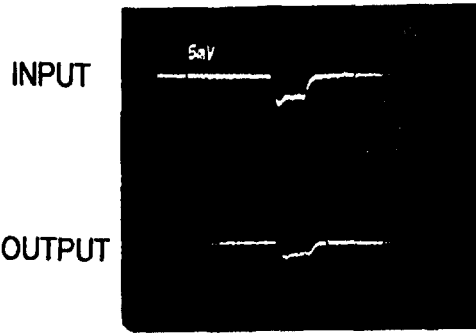


그림 13 지연 선로의 특성 실험도  
Fig. 13 Experimental schematic of delay line

지연 시간의 측정 결과를 그림 15에 나타냈으며 이론적인 값과 비교하기 위하여 계산에 의해 구한 값도 함께 나타냈으며 또 180도 밴드의 영향을 알아보기 위하여 직선로만을 연결하여 측정한 결과도 그림에 함께 나타냈다. 이 결과를 보면 선로를 길게 하면 할수록 그에 대해 지연 시간도 직선적으로 변화하고 있다. 따라서 14m 이상의 길이도 이 값의 연장선상에 있다고 생각할 수 있다. 또 측정 오차를 생각해

STRAIGHT LINE



180° BEND

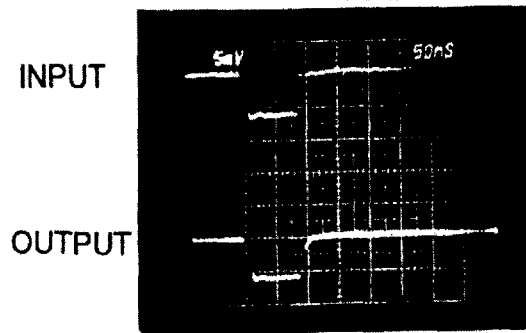


그림 14 지연 선로 4m 및 10m의 파형  
Fig. 14 Delay time pulse 4m and 10m

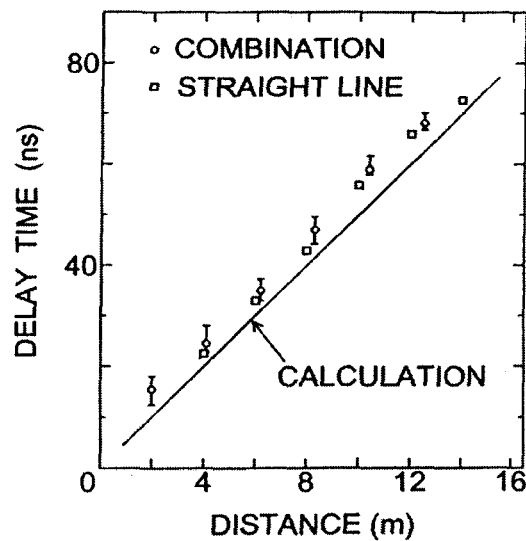


그림 15 지연 회로의 길이와 지연시간  
Fig. 15 Delay line length vs. delay time

도 지연 시간에 대한 180도 밴드의 영향은 거의 없는 결과가 얻어졌다.

그림에서 측정치가 계산치보다 전반적으로 위에 있는 것은 각 접합부가 정확히 맞지 않는 것과 오실로스코프에 나

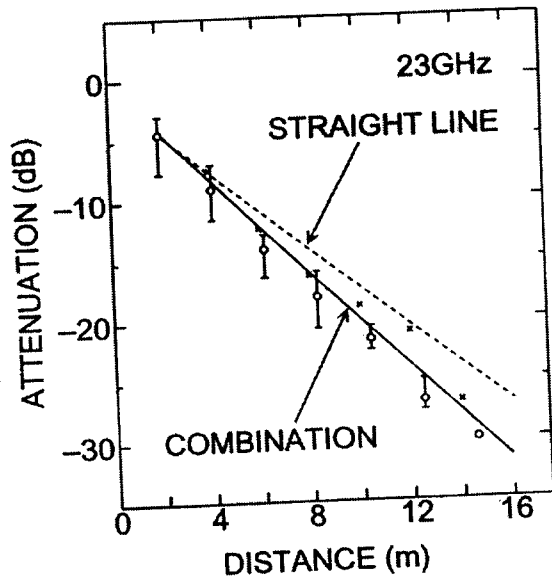


그림 16 지연 선로 길이와 감쇄치  
 Fig. 16 Delay line vs. attenuation

타난 파형을 읽을 때의 착오 등을 생각할 수 있으나 실험에 이용할 때의 문제는 없는 것으로 판단된다. 다음에는 각 길이에 대한 감쇄치의 값을 직선로만을 이용한 것과 직선로와 180도를 이용하여 얻어진 결과를 그림 16에 나타냈다.

이 그림에서 보면 직선로와 180도 밴드를 이용한 것이 직선로만의 감쇄치보다 큰 결과가 나온 것은 180도 밴드의 영향이 큰 것으로 판단되는데, 이것은 앞서서도 언급했듯이 180도 밴드가 직선로보다 감쇄치가 크므로 사용한 180도 밴드 수에 따른 감쇄치도 크게 되었다고 할 수 있다. 감쇄치가 너무 크면 실험에 이용하는데 어려움이 예상되나 실제 실험에 이용되는 크리스탈 검파기의 용량은 100mV이므로 설계한 대 출력 후진파 발진기로 부터 출력은 지금까지의 실험 결과[12]와 비슷한 효율이라고 가정하면 약 10MW의 값이 예상되므로 실제 검파기에 입력시킬 때는 약 80dB로 낮추어야 한다. 따라서 제작한 마이크로파 지연 전송선로가 출력의 크기에 대한 마이크로파 전송 선로로서 역할을 충분히 할 것으로 생각되며 실험에 이용함으로써의 대 출력 고 효율의 결과가 기대된다.

### 5. 결 론

저자는, 대 전력 펄스 파워 기기 개발의 일환으로 후진파 발진기를 설계·제작하였다. 지금까지의 BWO의 실험결과보다 높은 주파수인 20GHz대에서 발진하며 고 효율과 대 전력 발생으로 인한 절연 파괴를 방지하기 위하여 대 구경

화 하였다. 선형 이론에 의한 절대 불안정성의 계산 결과를 이용하여 에너지 변환장치인 지파 구조의 반경을 크게 하여 출력 증대에 따른 과도한 전력 밀도를 갖지 않으면서 높은 주파수에서 발진이 가능하도록 파형 도파관의 큰 직경( $D/\lambda$ )을 유지 하면서 파형의 주기  $z_0=0.34\text{mm}$ , 진폭  $h=0.17\text{mm}$ 를 선택하였으며, 대 전류 전자 빔의 발생장치인 수백 kV의 마르크스 발생기와 18m의 펄스 전송 선로 및 다이오드, 그리고 출력 측정장치도 제작하였다.

이상과 같이 대 구경 후진파 발진기를 제작함으로써 높은 주파수에서 출력 증대를 기함은 물론 짧은 주기와 진폭을 이용한 콤팩트한 BWO를 개발함으로써 후진파 발진기의 성능 향상에 기여하였으며, 차세대 에너지원 개발 기기인 핵융합 발전 장치의 개발과 재료 가공 및 통신 시스템 등 많은 분야에 응용할 수 있을 것으로 기대되며 현재 실험중에 있어 다음 기회에 그 결과를 발표할 예정이다.

### 참 고 문 헌

- [1] V.L.Granatstein and I.Alexeff "High-Power Microwave Sources" Aretch House, Boston 1987.
- [2] W.Hartmann "Long Pulse Switching Properties of Pseudospark Switches" 7th IEEE Pulsed Power Conf. 89CH2687-2, 5, 1989.
- [3] "Special Issue on High Power Microwave Generation" IEEE Trans. Plasma Sci. PS-18, 3, 1990.
- [4] E.Hotta and K.Minami, "Development of Pulsed Power Technology and its Application to the Generation of High Power" JIEE Vol. 111, No. 6, 1991.
- [5] K.Minami, "A Recent Development of High Power Microwave Pulse Sources" J. of Plasma & Fusion Research Jpn., 69, 210, 1993.
- [6] 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 Oscillator" Phys. of Fluid B, 4, 1023, 1992.
- [7] K.Ogura, M.M.Ali, K.Minami, S.Watanabe, Y.Kan, Y.Aiba, A.Sugawara and T.Watanabe, "Absolute Instability of Low-Frequency Electromagnetic Waves in a Plasma Waveguide with Periodic Boundaries" J. Phys. Soc. Jpn. 61, 4022, 1992.
- [8] S.P.Bugaev, V.A.Cherepenin, V.I.Kanavets, V.I.Koshelev, V.A.Popov and A.N.Vlasov, "Investigation of a



Millimeter-Wavelength Range Relativistic Diffraction Generator" IEEE Trans. Plasma Sci. Vol.18, No.3, 518, 1990.

- [9] Y.Carmel, K.Minami, R.A.Kehs, W.W.Destler, V.L. Granatstein and W.L.Lou, "Demonstration of Efficiency Enhancement in a High-Power Backward Wave Oscillator by Plasma Injection" Phys. Rev. Lett. 62, 2389, 1989.
- [10] R.A.Kehs, A.Bromborsky, B.G.Ruth, S.E.Graybill, W.W.Destler, Y.Carmel and M.C.Wang, "A High Power Backward Wave Oscillator Driven by a Relativistic Electron Beam" IEEE Trans. Plasma Sci. PS-13, 559, 1985.
- [11] X.Zhai, E.Garate, R.Prohaska, G.Benford, "Study of a plasma-filled X-band backward wave oscillator" Appl. Phys. Lett. 60, 2332, 1992.
- [12] D.K.Abe, "Experimental Study of overmoded power microwave generators" Ph. D. Dissertation, University of Maryland, 1992(unpublished).
- [13] M.R.Amin, K.Minami, K.Ogura, X.D.Zheng, T.Watanabe, "Resonant enhancement of radiation from a backward wave oscillator utilizing large diameter corrugated metal structure" J. Phys. Soc. Jpn. Vol.64, 4473, 1995.
- [14] W.S.Kim, K.Minami, K.Ogura, H.Inada, T.Watanabe, "Design study of a Large Diameter Backward Wave Oscillator Operating at 24 GHz" J. of Plasma & Fusion Research Jpn. Vol.72, No.4, 338, 1996.

저 자 소 개



**김 원 섭 (金元燮)**

1959년 4월 22일생. 1982년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 원광대 대학원 졸업(석사). 1996년 일본 니이가타대학대 학원졸업(공학). 1996년-1998년 기초과학 지원연구소 핵융합연구개발사업단 근무

현재 장흥대학 전기과 전임강사

Tel : 0665-860-8722

E-mail : wskim@changheung.re.kr



**황 낙 훈 (黃樂燾)**

1958년 7월 4일생. 1981년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 명지대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 명지대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1988년-1991년 충남 전문대 조교수. 1991년-현재 세명대

학교 전기전자공학부 부교수(전기전자공학부장)

Tel : 0443-649-1302

E-mail : lhhwang@hanmail.net