

## 대전력 전자 빔의 개발 및 응용에 관한 연구

김원섭, 김종만, 김경식\*

남도대학 전자제어과, 경북전문대학\*

### A Study of Development and Application with High Power Electron Beam

Wonsop KIM, Jongman KIM, Kyung-Sik Kim\*

Namdo Provincial College of Jeonnam, Kyungbuk College\*

#### Abstract

In this paper, we present a design and experiment study of high power large diameter backward wave oscillator. Analysis is made within the scope of linear theory of absolute instability. The Electron beam generator may be attractive source of high power millimeter microwaves which has simpler structure.

**Key Words** : High Power, Electron Beam, Backward Wave Oscillator, Marx Generator, Diode

#### 1. 서 론

상대론적 전자빔(IREB)을 이용한 대전력 발생장치는 자유전자 레이저(FEL), 자이로트론, 자기공명 사이크로트론 메이저(CARM), 후진파 발진기(BWO)등이 있어 출력 1GW 이상의 대전력을 얻고 있다. 그중에서도 후진파 발진기는 전자 사이크로트론 공명을 이용하지 않기 때문에 강한 자기장이 필요없고 전자 빔의 확산을 방지할 수 있는 자기장을 얻으면 되므로 구조가 간단하고 조작성이 용이하며 수십GHz대의 높은 주파수에서 고 효율의 발전을 일으킬 수 있으며 펄스를 이용한 마이크로파원의 발달에 따라 더욱 더 활발하게 연구가 진행되고 있다.

그러나 후진파 발진기에서 고 주파수에

서 대출력의 발전이 일어나도록 하기 위해서 무엇보다도 중요한 것은 양질의 전자빔을 만드는 것이다. 이것은 수백 A의 높은 전류치의 발생과 함께 전자 빔이 확산되는 것을 방지하는 장치의 개발을 해야만 가능하다. 그렇기 때문에 지금까지의 연구는 주파수의 크기와 전자 빔의 전류치, 밀도등을 고려하여 진공용기와 음극관 및 빔수집관등에 많은 비중을 두어 연구되어 왔지만 아직도 미흡한 점이 많아 새로운 기술을 요구하게 되었다. 본 연구에서는 전자빔 발생 장치의 개발을 위하여 펄스 파워 기술을 이용하여 안정된 펄스 발생을 위하여 고전압 펄스형성회로와 다이오드의 개발, 그리고 전자 빔의 확산을 방지하기 위한 자기장의 정렬등을 이론적인 계산에 의한 수치 해석을 하고 그에 따른 설계·제

작을 통한 실험과 정확한 측정을 하여 대전력 전자 빔 발생 장치를 개발한다.

## 2. 본 론

### 2.1 실험 장치와 특성

후진과 발전기는 상대론적인 전자 빔을 이용하여 전자파 모-드와의 상호 작용에 의하여 마이크로파 출력을 발생시키는 장치이다. 동작은 마르크스(Marx) 발생기에서 고 전압을 발생시켜 펄스 형성 선로(PFL)를 이용하여 대전류 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 모-드와의 상호 작용에 의하여 마이크로파를 발생시킨다. 그림 1에 대전력 전자 빔 발생 장치를 나타냈다. 도파관의 끝에는 빔을 회수하기 위한 역 테이퍼 모양의 금속 호른이 부착되어 있으며 스텐레스 파이프의 끝에는 유리 창 모양의 플랜지를 부착하여 마이크로파를 출력시킨다.

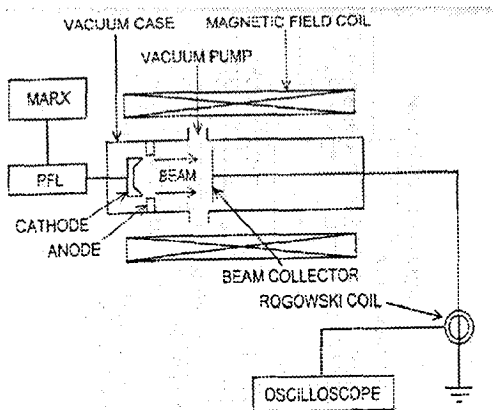


그림 1. 대전력 전자빔 발생장치

출력부 전체는 전자 흡수체에 의하여 감싸 있고 그 안에 마이크로파 수신용 안테나와 동축 도파관 변환기가 놓여 있으며 수신된 마이크로파 출력은 오실로스코프를 이용하여 관찰한다. 진공 용기는 2대의 진공 펌프에 의해 고 진공도를 유지하도록 한다. 또 발생된 마이크로파 출력의 주파수 분석을 위하여 도파관 지연 선로를 제작하여 전자 속도의 차에 의하여 분석을 한다.

### 2.2 펄스 발생장치의 제작

마르크스 발생기는 저항을 이용하여 몇 개의 콘덴서를 병렬로 나열한 후 전부 충전한 다음 갭 스위치를 닫는것에 의해 고 전압을 발생시켜 전송시킨다. 설계·제작할 마르크스 발생기는 1개당 20keV까지 충전할 수 있도록 정전 용량을 가진 오일 콘덴서를 10개 나열하여 이론최대 출력이 200keV가 되도록 하며 최대 발생 에너지는 100J 이상이 되도록 한다. 또 갭 스위치는 자폭형을 이용하고, 각 콘덴서의 충전 시간이 같도록 하기 위하여 저항을 삽입한다. 마르크스 발생기의 동작은 시퀀스 제어 콘트롤러를 이용하며, 출력 전압의 측정은 저항 분압과 로고스키 코일의 두가지 방법을 이용하여 측정하여 확인하여 정확한 분석을 한다.그림 2에 마르크스 발생 출력을 나타냈다.

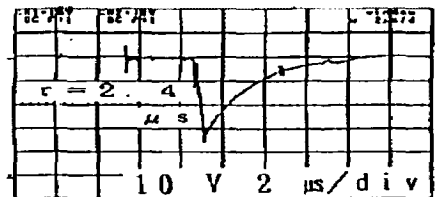


그림 2. 마르크스 발생 파형

첫째로, 저항 분압을 이용한 측정은 소저항( $R_1$ )과 대저항( $R_2$ )을 이용하여 소저항에 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 읽어 얻어진 마르크스의 입·출력 전압 특성을 파악하면 충전 전압과 방전 전압을 알 수 있으므로 성능을 파악한다. 다음에는 로고스키 코일을 이용하여 측정하며 적분기를 통하여 출력되는 파형을 오실로스코프에서 관찰하고, 그 결과 얻어진 마르크스의 입·출력 전압 특성을 파악하여 충전 전압과 방전 전압을 파악한다. 그 결과를 그림 3에 나타냈다. 따라서 일정한 값이 출력되면, 저항 분압에 의한 측정 결과와 로고스키에 의한 결과를 비교하여 마르크스의 입·출력 특성을 확인한다.

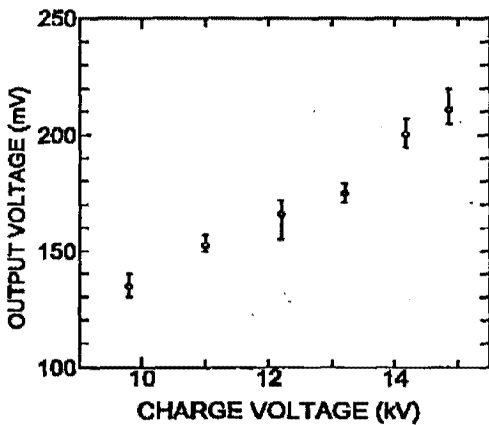


그림 3. 충전 전압과 마르크스 출력

마르크스 발생기 출력의 시정수는 얻어진 출력 파형으로 얻어질 수가 있으며, 이론적으로 계산한 시정수  $\tau$ 는  $\tau=RC$ 의 식이 되므로 출력 파형으로 부터 얻어진 값과

일치하면 신뢰성 있는 출력값으로 생각할 수 있다.

후진파발전기에서는 상대론적인 전자빔을 발생시켜 이용하기 위하여 되도록이면 음극 전류로서 짧은 펄스 발생 장치가 필요하므로 펄스 형성 선로를 제작하여 측정한다. 제작할 펄스 형성 선로는 수백 kV에서도 견딜 수 있는 고 내압의 동축선을 이용하여 길이와 직경, 임피던스의 특성은 계산에 의하여 정한다. 또 펄스 형성 회로의 펄스 폭은 이론적으로 계산하면 길이  $l$ 과 유전률  $\epsilon_s$ 에 의한 식  $\eta=(2\sqrt{\epsilon_s}l)/c$ 으로 구해진다.

### 2.3 다이오드의 제작

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. 설계·제작에는 원통 곡형 전자 빔을 얻기 위한 양·음극의 위치 및 크기를 결정하며 전자 빔의 사이크로트론 반경을 산출한다. 또 많은 전자 빔의 발생을 위한 음극 표면의 형태를 원형, 튕날형, 사각형등 여러 가지를 제작하여 측정하여 가장최상의 것을 선택하여 실험한다. 음극 전류가 있고 축방향 자장이 있을 때 전자의 속도  $v$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$v = c\sqrt{1-1/\gamma}$$

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

$\gamma$  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 대입하고 전압의 값이 주어졌을 때  $\gamma$ 를 구할 수 있다. 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 산출할 수 있으며 양·음극의 위치관계에 따른 수치를 결정하게 되어 음극의 반경과 양극의 반경을 구할 수 있다. 제작한 다이오드는 끝이 둥그런 형태를 가졌으며 면이 매끄러운 모양으로 빔이 잘 방출되도록 하였다.

#### 2.4 축방향 자계 코일 제작

축방향 자계는 음극에서 발생한 전자가 양극에 도달하지 않고 도파관에 입사되는 것과 도파관에 입사한 전자 빔이 확산되는 것을 방지하여 관벽에 닿지 않고 도파관의 종단까지 도달하도록 하기 위한 작용을 한다. 축방향 자계 발생용 솔레노이드 코일을 제작하여 이용하며 크기와 코일의 수 등은 계산에 의한다. 코일 한 개씩 자계 특성을 계산과 실측에 의하여 구하며 음극부터 도파관 종단부까지를 균일 자장으로 하여 세밀한 배열을 하여 조절한다. 또 솔레노이드 코일을 결정된 배열에 대하여 일정 전류치를 흘려 자계를 만든 후, 가우스 메타에 의

하여 자계를 측정하여 균일한 자장을 얻도록 한다. 그림 4에 그 결과를 나타내었다. 한편 전자빔의 발생을 위하여는 고 진공 상태가 요구되므로 스텐레스 진공 용기를 제작하여 수냉식 확산 펌프와 터보 분자 펌프를 이용하여 항상  $10^{-5}$ Torr이하의 진공 상태를 유지 하도록 하여 실험하여 신뢰성을 높인다.

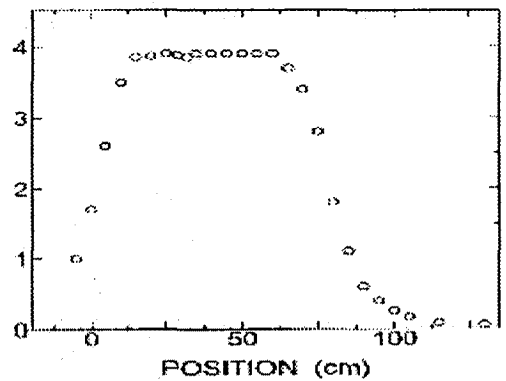


그림 4. 축방향 자계코일

이와 같이 제작된 실험 장치를 이용하여 대 전류 전자 빔 발생과 에너지의 크기에 따른 빔 전류치의 변화, 그리고 자장 크기 변화에 따른 전자 빔의 확산 정도와 전자 빔의 밀도의 측정은 그림1과 같은 전자 빔 컬렉터를 이용하여 측정하며 결과는 레이토 방정식과 비교하여 분석함으로써 양질의 전자 빔 발생을 확인한다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 보다 높은 발진 효과를 얻기 위하여 전자 빔 발생장치를 개선 하였다. 펄스 발생장치를 개선하였으며 전자총의 개발과 에너지 변환 장치를 위한 자장 코일도 일정크기로 개선하였으며 이를

이용하여 전자빔의 개선에 의한 후진파 발전기를 제작함으로써 높은 주파수에서 출력 증대는 물론 콤팩트한 마이크로파 발생 장치의 개발이 용이하게 되었다. 또한 이러한 기기를 이용함으로써 차세대 에너지원 개발기기인 핵융합 장치와 재료 가공 및 통신 시스템등 여러 분야에 이용할수 있으리라 여겨진다.

Jpn. Vol.72, No.4, 338 (1996).

6. Won-Sop KIM, Lak-Hoon Hwang  
 "Fabrication and Identification of a Marx Generator for the Design of High Power Backward Wave Oscillator" KIEE, vol.48, No.8, 391(1999).

### 참 고 문 헌

1. Y.Carmel, K.Minami, R.A.Kehe, 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).
2. R.A.Kehe, 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).
3. X.Zhai, E.Garate, R.Prohaska, G.Benford, "Study of a plasma-filled X-band backward wave oscillator" Appl. Phys. Lett. 60, 2332 (1992).
4. 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, (1995).
5. 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