

K-band 도파관을 이용한 대전력 마이크로파 출력장치 연구

논문
58P-4-42

A Study of High Power Microwave Output by K-band Waveguide

김 원 섭[†]
(Won-Sop Kim)

Abstract - We had experimental studies of microwave output generator. We experimented with a corrugate-shaped K-band slow wave guide in the backward wave oscillator. It generated output by interaction between electron beam's generation and magnetic field. We estimated oscillation frequency at 24GHz by changing propagation velocity and group velocity. We identified movement by second harmonic of Cherenkov interaction and slow cyclotron mode. In our study we achieved oscillation stabilization, generation of long pulse, improvement of oscillation efficiency and output.

Key Words : Microwave, Frequency, K-Band Waveguide, High Power, Group Velocity

1. 서 론

주파수가 300MHz~300GHz의 전자파를 마이크로파라고 하는데 그 중에서도 30GHz~300GHz의 마이크로파는 파장이 mm단위에서 미리파라고 한다^{1,2}. 최근 마이크로파의 특성을 활용해서 휴대전화, 위성방송등의 통신분야와 전자레인지를 비롯한 물질 가열등 폭 넓은 분야에서 이용되고 있다. 미리파 발진기는 Gun발진기와 마이크로파 집적회로가 있는데 반도체를 이용한 발진기는 콤팩트하고 사용이 간편하지만 출력은 1W 정도로 낮다. 이와 달리 대전력 마이크로파원으로서 전자빔을 이용한 전자관이 있는데 이것은 대형으로서 1GHz 이상의 주파수에서 1MW 이상의 대전력 발진이 가능하다.

대전력 마이크로파 발생장치중 지파(slow-wave)를 이용하여 출력을 얻는 장치는 크라이스트론(klystron), 진행파관(Traveling Wave Tube), 후진파발진기(Backward Wave Oscillator)등이 있는데 본 연구에서는 후진파 발진기를 이용하여 실험적으로 연구하였다^{3,4} 지금까지 후진파 발진기의 연구결과는 낮은 주파수(8GHz) 대역에서 발진이 일어난 결과가 있으나 본 연구에서는 높은 주파수 대역(20GHz이상)에서 발진하며 보다 콤팩트하고 가벼운 장치로써 대전력 마이크로파 출력을 얻을 목적으로 상대론적 전자빔을 이용한 대구경 후진파발진기를 개발하였다. 인가전압 100kV이하의 낮은 전압과 수백 kW급 대전력 마이크로파 출력을 관측하였다. 특히 마이크로파 출력 증대를 위하여 K-band형의 톱니모양의 도파관을 이용한 지파 전자파의 동작 특성을 연구하였다. 음극에 의한 전자빔의 발생과 지파 도파관의 공진점 평가에 의한 연구결과를 기술하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 실험장치와 기본특성에 대하여 논하였으며 제3장에서는 전자빔과 마이크로

파 출력등 실험결과와 분석, 제4장에서는 결론을 기술하였다.

2. 본 론

2.1 실험장치 구성

실험장치의 전체도를 그림 1에 나타냈다.

마르크스(Marx) 발생기에서 고전압을 발생시켜 펄스발생선로(PFL)을 이용하여 대전류 펄스를 만든후 다이오드를 통하여 전자빔을 발생시킨다. 진공 용기 안에는 음극과 양극으로 이루어진 전자빔을 다이오드와 마이크로파 발진을 일으키는 톱니 모양의 지파도파관이 놓여있다. 또 측정 장치로서 전자빔을 수집하기위한 장치와 빔 전류를 측정하기 위하여 로코스키코일을 장착하였다. 이러한 진공용기는 축 방향으로 위치한 10개의 자계 발생용 코일에 의해 만들어진 균일한 자장 안에 위치하고 있으며 발생된 전자빔과 전자파 모드와의 상호작용에 의하여 마이크로파를 발생시킨다. 발생된 마이크로파는 진공용기 끝에 유리창 모양의 플렌지를 부착하여 마이크로파를 출력시키며 출력된 마이크로파는 수신용 안테나와 검파기를 통하여 전압신호로 변환되어 오실로스코프에서 관찰된다. 진공용기는 진공펌프에 의해 고 진공도를 유지하며 이와 같은 모든 동작은 원격 조정 장치에 의하여 이루어졌다.

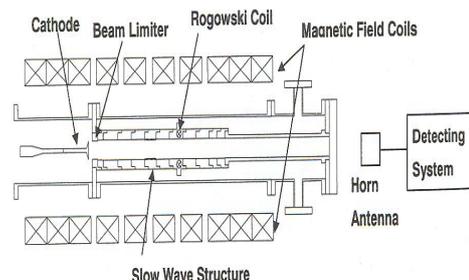


그림 1 실험장치 전체도

Fig. 1 Schematic of experimental setup

[†] 교신저자, 정희원 : 전남도립대학 전기에너지시스템과 교수·공박
E-mail: wskim@dorip.ac.kr

접수일자 : 2009년 11월 12일

최종완료 : 2009년 11월 14일

2.2 실험장치 기본특성

마크스 발생기는 정전용량 0.5[μ F]의 오일콘덴서를 10개 나열하여 병렬접속 한후 전자식 구동방식인 갭 스위치의 순간동작에 의한 방전에 의하여 고전압을 방전시킨다. 한편 콘트롤러에 의한 마크스 발생기의 출력은 정전전압계를 이용하여 나타나는 콘덴서의 개당 충전전압 최고치는 약 20kv가 얻어졌으며 펄스 출력 전압은 분압저항의 분압비율 1:100000을 이용하여 측정 할 수 있었다.

본 실험에서는 여러 모드와 주파수가 포함된 마이크로파를 출력시키기 위하여 짧은 시간 안에 강한 전자빔을 발생시켜야 한다. 이를 위해 펄스 발생선로(PFL)를 이용하여 다이오드에 인가하여 펄스를 발생시킨다. 제작한 PFL은 길이 1m, 직경 261mm, 특성 임피던스 7 Ω 으로서 200kV의 스텐레스관으로 제작된 제품을 이용하였다. 전자빔이 진공 용기내에 입사되어 전파할 때 산란 및 확산 방지를 막고 또한 빔을 지파 도파관에 입사시키기 위하여 자장 코일을 제작하여 전자계를 형성하였다. 자계발생용 솔레노이드 코일을 10개 제작하여 자계분포를 도파관 끝까지 약 500mm의 균일한 자장을 형성하도록 배치하였으며 코일에 전류 500A를 흘려 최대 0.9[T]의 자계분포가 얻어졌으며 그 위치내에 지파 도파관을 위치시켜 실험하였다. 음극과 양극으로 구성된 다이오드에서 안정된 전자빔을 방출시키기 위해서는 높은 진공상태를 유지해야 하는데 지파도파관을 진공 용기안에 놓고 유냉식 확산 펌프와 터보 펌프 등 2대의 진공펌프를 이용하여 진공도 약 1×10^{-3} [Pa] 상태를 유지하여 실험하였다. 실험 중에는 실험장치 전체에 고전압이 걸리고 전류가 흐르므로 안전을 위하여 실험장치의 조작은 원거리에서 하기위하여 시퀀스 콘트롤러를 이용하여 원격 조종하였다. 시퀀스 콘트롤러는 타이밍 제어부와 고전압 제어부로 나누어 실험하였으며 타이밍 제어부는 방전간격과 트리거 타이밍의 설정, 자장코일의 신호 입력 등의 조작을 하였으며 충전시켜 방전시킴으로써 충분한 전압을 얻을 수 있었다. 전자빔의 전류 크기를 측정하기 위하여 로고스키코일을 제작하여 이용하였다. 저항 1[k Ω] 콘덴서 1[nF]를 이용하여 적분회로를 구성하여 구성되며 BNS 케이블과 병렬 저항 접속에 의하여 PFL 저항 48[Ω]과 펄스폭 50~100[ns] 최대 전류밀도가 1[kA/cm²]의 전자빔을 측정 할 수 있었다. 지파도파관을 이용하여 발생하는 마이크로파는 여러 가지모드를 포함하고 있으며 이러한 마이크로파는 출력창을 지나 혼안테나에서 수신한다. 실험에서는 출력창과 혼안테나를 600[mm] 떨어져 수신하였으며 출력창과 혼안테나의 마이크로파 발전출력의 결합도를 고려 한 것으로서 송신되는 전자파의 전력과 안테나에서 수신하는 전자파의 전력으로 표현된다. 실제 실험에서는 정확한 측정을 위하여 네트워크 아날라이저에 의한 측정으로 결합도를 결정하도록 하여 정확도를 유지하여 노력하였다. 마이크로파가 도파관내에서 전파할 때 군속도, 즉 주파수에 의한 전파속도가 달라지는 성질을 이용하여 발전 주파는 측정을 하였다. 본 실험에서는 혼안테나에서 마이크로파를 두 방향으로 나누어 수신하여 하나는 도파관 지연선로를 통과시켜 수신하고 다른 하나는 그대로 수신하여 지연시간의 차에 의하여 발전주파수 측정을 하였다. 사용한 도파관 지연선로는 기본파인 TM₀₁ 모드의 차단 주파수는 $f_c=17.369$ GHz에 의하여 결정하였으며 그 이하의 차단된다. 따라서 본 연구에서 목표로 하는 24GHz 내의 주파수 해석이 가능하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 2에 발생된 전자 빔을 측정하기 위한 실험 장치를 나타냈다.

빔 콜렉터에 감열지를 이용하여 다이오드에서 축방향으로 거리를 변화시키기 위하여 거리 19~228mm의 사이에 빔콜렉터를 위치하여 전자빔의 형상을 측정하였다. 전자빔에 의하여 측정된 모습을 그림3에 나타냈다. 그림에서 (a)는 자장 B=0.8이 T일때의 전자빔의 형상이고 그림(b)는 자장 0.433T 일때의 형상이다. 이때 모두 인가전압은 92kv이고 전류는 452A이다. 그림에서 보면 자계 0.801T에서 다이오드와 빔 콜렉터간 거리가 19mm일때 발생된 전자빔의 직경이 25mm이었고 또 다른 거리가 228mm일때는 발생된 전자빔의 직경이 26mm가 얻어졌다. 한편 자계 0.433T에서 다이오드와 빔콜렉터는 거리가 19mm 일때는 발생된 전자빔의 직경이 25.5mm 이고 또 다른 거리가 228mm일때는 발생된 전자빔의 직경이 26mm가 얻어졌다. 이것을 보면 자장이 강할수록 전자빔은 확산이 억제되어 반경이 작아져 축방향으로의 전파가 잘 진행될 수 있음을 알 수 있으며 또 전과거리가 커지면 전자빔의 확산이 일어나는 것을 알 수 있었다.

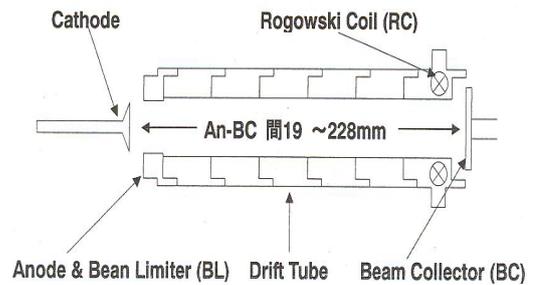


그림 2 전자빔 측정장치
Fig. 2 Measurement of electron beam output



그림 3 측정된 전자 빔의 단면 형상
Fig. 3 Cross section thermal damage patterns of the electron beam

마이크로파 출력 측정은 수신용 혼안테나를 이용하였으며 이때 발생된 출력파형의 모양을 그림 4에 나타내었다. 1번이 마이크로파 출력파형이고 2번은 음극 전류, 3번은 전자빔 전류이고 4번은 PFL전압을 나타내었다. 인가전압은 30kv 정도의 낮은 전압에서 톱니파형모양 10주기를 이용하였다. 이 그래프에 나온 출력을 보면 검파출력은 2W정도이고 음극전류는 320A 빔전류는 214A이며 발전 피크전압은 32kV가 되었다.

그림 5은 10주기의 도파관을 이용하여 자계의존성 실험을 한 결과를 나타냈다. 자계를 0.2T에서 0.9T까지 변화시켜 가면서 측정한 결과이다. 빔 전압은 30kV 정도이며 빔 전류는

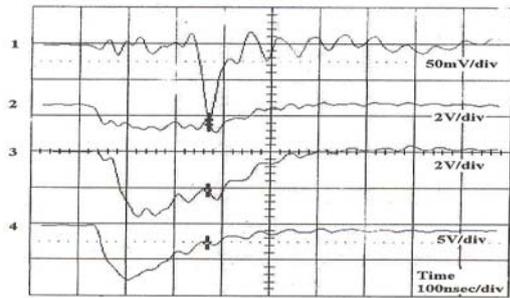


그림 4 측정된 마이크로파 출력
Fig. 4 Output of microwave

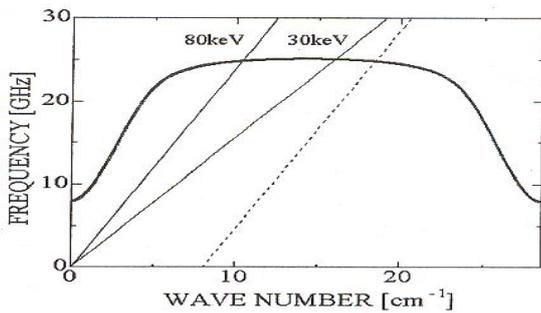


그림 5 분산관계와 자계 의존성
Fig. 5 Magnetic field and dispersion relation

100~250A이며 음극전류는 200~500A 정도이다. 자계 0.65T 부근에서 마이크로파 출력이 급격히 공명하여 증폭하는 결과가 얻어졌는데 이런 현상은 24.8GHz 부근에서 주기를 20주기로 변화시켜도 같은 결과가 얻어졌다. 이것은 체렌코프 상호작용과 지파 사이크로트론 상호작용에 의한 공명작용이라고 생각 된다.

이것에 대한 분석을 위해 주파수 24.8GHz의 톱니파형지파 도파관의 분산관계를 그림 6에 나타냈다. 실험치와 이론치를 정확히 비교하기 위하여 빔의 공간전하효과를 포함한 분산관계를 이용 하였다. 그림에서 위부분의 횡선은 공명에 의한 동작점의 주파수를 나타내고 있다. 그림으로 보면 1.35T에서 체렌코프 상호작용과 지파사이클로트론 상호 작용의 공명이 일어났는데 실험에서는 공명이 일어난 자장이 약 인 0.65T 부근에서 출력 증폭이 일어났다. 따라서 0.65T에서의 출력 증폭은 체렌코프 상호작용과 두 번째 조화에 의한 지파사이클로트론 상호작용의 공명동작이라고 생각할 수 있다.

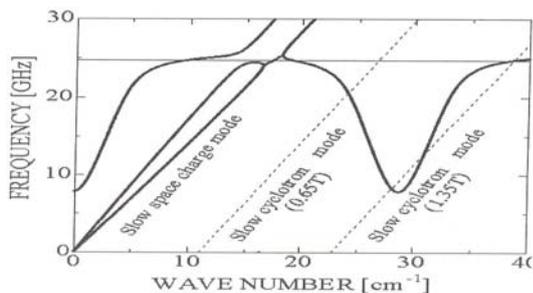


그림 6 톱니파형 지파 도파관의 분산관계
Fig. 6 Dispersion relation of slow wave waveguide

다음은 도파관에서 방사된 마이크로파는 발진모드에 의한 고유의 방사각이 형성되므로 본 실험에서는 마이크로파 발진 모드를 결정하기위하여 그림 7에 방사 좌표계에 의한 분석을 하였다. 출력창을 원점으로 하고 혼 안테나까지의 거리를 600mm를 유지하면서 출력창에 대하여 수평전계성분을 회전 방향의 전계성분을 나타낸다. 혼안테나의 편파면의 방향을 변화시키면서 전계성분을 측정하면 방사각의 측정은 원점을 중심으로 해서 $-40^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 의 범위내 결과를 얻었다. 이에 대한 분석은 다음과 같이 설명할 수 있다.

다음은 도파관에서 방사된 마이크로파는 발진모드에 의한 고유의 방사각이 형성되므로 본 실험에서는 마이크로파 발진 모드를 결정하기위하여 그림 7에 방사 좌표계에 의한 분석을 하였다. 출력창을 원점으로 하고 혼 안테나까지의 거리를 600mm를 유지하면서 출력창에 대하여 수평전계성분을 회전 방향의 전계성분을 나타낸다. 혼안테나의 편파면의 방향을 변화시키면서 전계성분을 측정하면 방사각의 측정은 원점을 중심으로 해서 $-40^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 의 범위내 결과를 얻었다. 이에 대한 분석은 다음과 같이 설명할 수 있다.

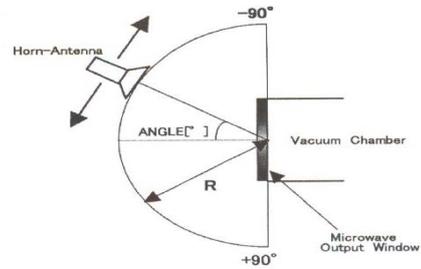


그림 7 방사 좌표계에 의한 분석
Fig. 7 Analysis of radiation coordinate

4. 결 론

본 연구는 냉음극에 의한 전자빔이 발생되었으며 빔의 형상과 전류치를 측정하였다. 발생한 전자빔을 전자계내에 있는 톱니파형 지파도파관에 전파 함으로서 마이크로파출력을 얻을 수있었다. 발생한 마이크로파 출력은 인가전압 32kv 부근에서 24.8GHz의 발진주파수가 얻어졌으며 체렌코프 상호작용과 지파 사이크로트론 모-드의 제 2 조화에 의한 동작을 확인하였다. 또 지파사이크로트론 동작에 대하여 직원통형의 길이와 도파관의 길이를 조절함으로써 축대칭모-드와 비축대칭모-드등 여러 가지 모드의 제어가 가능하였다.

위와 같은 실험결과 보다 간단하고 콤팩트한 대구경 후진 파발진기를 개발하여 고주파수에서 발진이 일어남으로서 앞으로 마이크로파 발진에너지를 이용한 여러 가지 장치에 이용할 수 있을 것으로 기대되며^{5,6} 보다 세밀하고 정확한 발진 이론에 의한 연구가 앞으로의 과제이다.

참 고 문 헌

[1] Alexander Shpilman, "Disign Considerations, Implementation, and testing of Transformer-Powered Pulsa Generator" IEEE,

2002.

- [2] K.Hahn, M.Hail, I.Fuks, E.Schamiloglu, "Initial Studies of a Long Pulse Relativistic Backward Wave Oscillator Utilizing a Disk Cathode" IEEE Trans. on Plasma Sci. vol. 30, p.303, 2002.
- [3] K.Ogura, K.Komiyama, M.Sakai, D.Yamada, H.Saito and H.yamazaki, "Performance of Weakly Relativistic Oversized Backward Wave Oscillators" J. Phys. Soc. Jpn. vol.72, p.2437, 2003.
- [4] K.Ogura, Y.Miyazawa, H.Tanaka, Y.Kiuchi, S.Aoyama and A.Sugawara, "Weakly Relativistic K-band Oversized Backward Wave Oscillator with Bragg Reflector at Beam Entrance of Slow Wave Structure" Plasma Fusion Res. 2. vol. 1041, 2007
- [5] H. Oe, K. Ogura, K. Bansho, H. Iizukaname, A. Sugarawa, W.S.Kim, "Experimental Study on Disk Type Cold cathode in Weakly relativistic Energy Region", International Congress on Plasma Physics p. 233, 2008.
- [6] W.S.KIM, "Implementation of a High Power Backward Wave Oscillator on Electron Beam Diode Structure Improvement " J. of the Korean Ins. of Electrical and Electronic Material eng. vol. 22, no. 10, p. 897. 2009

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 니이가타대학 대학원 졸업(공학). 1996년~1998년 기초과학지원연구소 핵융합연구개발사업단 연구원. 1999년~현재 전남도립대학 전기에너지시스템과 부교수.

Tel : 061-380-8635

Fax : 061-381-9100

E-mail : wskim@dorip.ac.kr