

A Study of Slow Wave Microwave Waveguide on Period Boundary

김원섭[†]
(Won-Sop Kim)

Abstract - The characteristics of slow wave structure employed for backward wave oscillators expected to be a high power microwave source are studied analytically. The slow wave structure is a sinusoidally corrugated wall waveguide. The waveguide is designed and fabricated by cast aluminum. The dispersion relation and transmitted characteristics for microwaves are measured in the air. There exist literatures on high efficiency of enhanced radiation from backward wave oscillators involving plasma studied experimentally.

Key Words : Microwave, Dispersion Relation, Backward Wave Oscillator, Waveguide

1. 서론

전자빔을 지파 회로에 입사하면 에너지의 상호작용에 의하여 마이크로파 발진이 일어난다. 마이크로파는 지파회로를 지나면서 광속보다 높은 위상속도를 갖게된다. 이때 전자빔의 속도가 일치할 때 서로 에너지의 주고받는 상호작용 결과 마이크로파를 발생시키거나 증폭이 일어난다. 마이크로파의 군속도가 부(-)의 영역인 후진파 영역에서 동작하는 것을 후진파발진기(Backward Wave Oscillator:BWO)^{1,2}라고 한다. 수백MW급의 출력을 얻을 수 있는 마이크로파 펄스를 얻기 위해서는 대 전류의 상대론적 전자빔(Intense Relativistic Electron Beam:IREB)³을 이용해야 한다. 후진파발진기는 자이로트론과 달리 전자 사이클로트론 공명을 사용하지 않기 때문에 열 확산 등 전자빔에 대한 높은 질적인 요구를 하지 않는다. 또 전자빔을 발생시킬 수 있다면 고 효율의 발진이 일어나므로 조작성 용이한 점이 있고, 곡면 모양의 지파 모양을 갖는 것에서 절연과피의 염려도 적으므로 대출력 마이크로파 발진기로서 기대가 된다.

BWO에 대해서 세계적으로 연구가 진행되고 있지만 발진 출력 향상에 관한 이론적 계산과 마이크로파 발진을 발생시키는 실험 등이 아직 미흡한 상태에 있다. 따라서 본 연구에서는 자파구조의 분산특성에 의해 결정 되는 이론적 해석을 하였다. 이것은 막스웰 방정식을 이용한 계산코드를 사용하여 TM모드⁴의 기본적인 마이크로파 분산관계, 고주파 전계 분포 등을 계산하였다. 주기 경계⁵를 갖는 도파관의 분산곡선은 도파관의 평균반경을 갖는 직 원통 도파관의 분산곡선을 주기에 따라 연결시켜 파형진폭에 대하여 곡선을 나타내는 결과를 얻었다. 한편 분산곡선을 갖는 여러 가지 형태의 파

라메타에 대하여 계산을 하여 그 주기이상의 구조에서 1% 이내의 정확도를 갖는 파형 도파관에 관한 연구를 하여 본 논문에 발표하였다.

2. 본론

2.1 분산식의 이론 및 계산

그림 1에 z축 방향의 무한히 긴 축대칭 완전도체의 지파도파관 모델을 나타냈다.

도파관의 반경은 정현파형으로 변화하기 때문에 다음과 같이 (1)식으로 표현된다.

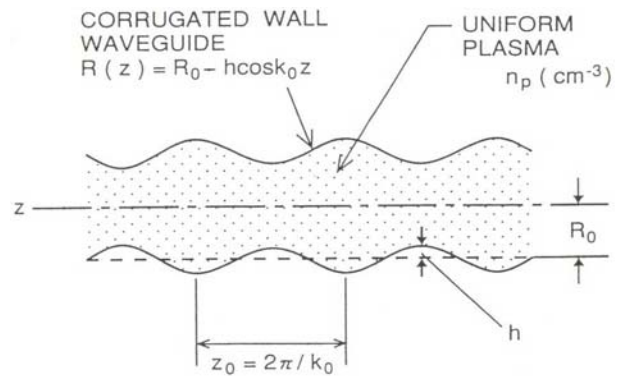


그림 1 지파도파관의 모형

Fig. 1 Schematic of the model for the slow wave structure

$$R(z) = R_0 - h \cos(k_0 z) \quad (1)$$

여기서 R_0 은 평균반경이고 h 는 진폭 k_0 는 1 주기의 길이, z_0 는 파수로 나타낸다. 원통 좌표계에서 직류과장 B_0 은

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

접수일자 : 2009년 11월 12일
최종완료 : 2009년 11월 14일

원통 축 방향으로 전자빔의 진행 방향과 같은 방 방향의 자계이다. 이때 비 유전율은 다음의 식으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{11} = \epsilon_{22} &= 1 - \frac{\varphi^2}{w^2 - w_c^2} - \frac{w_b^2 r (w - Rv_b)^2}{w^2 r^2 (w - Rv_b)^2 - w_c^2} \\ \epsilon_{33} &= 1 - \frac{w_p^2}{w^2} - \frac{w_b^2}{r^3 (w - Rv_b)^2} \\ \epsilon_{12} = \epsilon_{21} &= \frac{w^2 v_b w_c}{w (w^2 - w_c^2)} + \frac{w^2 v_b w_c (w - Rv_b)}{w^2 (r^2 (w - Rv_b)^2 - w_c^2)} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 w 는 마이크로파의 각 주파수, w_c 는 사이크 로트론 주파수이며 플라즈마 주파수는 w_p , 상대론적인자 $r = 1 - (Vb - /)^2^{-1/2}$ 이다 .따라서

$$r : -R_n C^2 B_{\theta n} + w \epsilon_{11} E_{rn} = 0 \quad (3)$$

$$\theta : i R_n E_{rn} - \frac{\partial E_{zn}}{\partial r} - i w B_{\theta n} = 0 \quad (4)$$

$$z : C^2 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r B_o) + i w \epsilon_{33} E_{zn} = 0 \quad (5)$$

단, $\frac{\partial}{\partial t} = -i w$, $\frac{\partial}{\partial z} = i R n$, $R n = R + n R_o$

위 식을 이용하여 전개 r,z. 성분을 구하면,

$$E_n = \frac{i R n}{\frac{w^2}{c^2} \epsilon_{11} - R_n^2} \frac{\partial E_{zn}}{\partial r} \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 E_{zn}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_{zn}}{\partial r} + \frac{x_n^2}{R_o^2} E_{zn} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{x_n^2}{R_o^2} = \epsilon_{33} \frac{w^2}{c^2} - \frac{\epsilon_{33}}{\epsilon u} R_n^2 \text{이다.}$$

(7)식을 베셀 미분방정식을 이용하면

$$E_{zn} = A_n J_o \left(\frac{x_n}{R_o} r \right) \quad (8)$$

위 식을 이용하여 z축 방향의 주기적 성질에서 floguet 정리에 의하여

$$E_z = \sum_{N=-\infty}^{\infty} A_n J_o \left(\frac{X_n}{R_o} r \right) \exp(i k m Z - w t) \quad (9)$$

$$E_r = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \frac{i k n \exp(i (k n Z - w t))}{\frac{w^2}{c^2} \epsilon u - k n^2} \frac{d}{dr} J_o \left(\frac{x_n}{r_o} r \right) \quad (10)$$

가 된다. 이에 의하여 얻어진 분산관계는 다음과 같이 선형방정식으로 표현된다

$$D(k, w) = \det \square D_{mn} \square = 0 \quad (11)$$

위 식을 이용하여 점근 전개를 이용하여 계산에 의한 결과를 얻었다.

2.2 계산결과

도파관의 진공중의 TM모드⁴의 분산곡선은 그림 2에 나타났다.

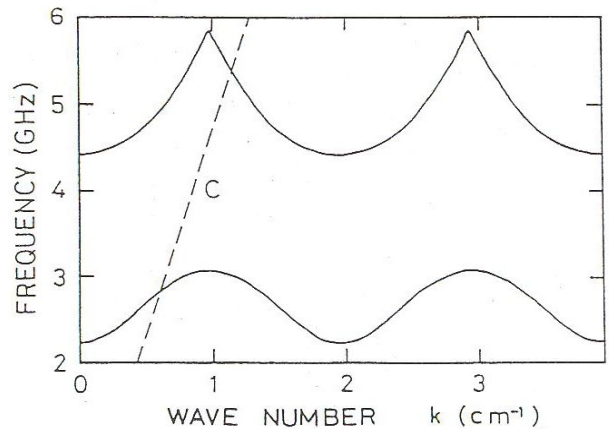


그림 2 TM모드의 분산곡선
Fig. 2 Dispersion curve of TM mode

수직에는 주파수 2.0~6.0GHz, 횡축에는 파수 2주기분의 브릴리언 그림^{6,7}이다. 이것을 보면 주파수에 대한 파수를 갖는 파수영역이 존재하는 것을 알 수 있으며, 광속도선을 중심으로 좌측은 위상속도가 광속보다 빠른 속파 영역이고 우측은 지파 영역을 나타냈다. 이와 같은 경계조건을 갖는 도파관은 지파 성분을 갖게 되어 지파도파관으로 생각 할 수 있다.

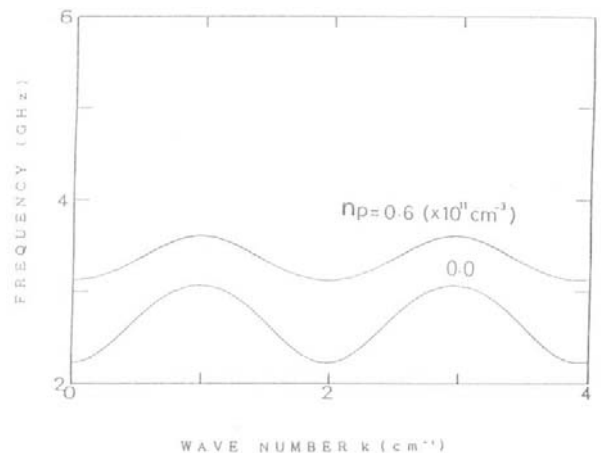


그림 3 플라즈마를 입사한 축방향 분산관계
Fig. 3 Theoretical dispersion curve for plasma loaded slow wave structure

고주파 전계 분포에 대한 결과는 그림 4에 나타났다. 도파관 파형 주기 6 주기를 이용하였으며, 공진주파수의 TM_{01} 모드에 대하여 볼 때 $\pi/2$ 모드에서 공진 모드가 얻어진 것을 알 수 있다. 이것은 1개 파형에 대한 위상차를 나타내고 있고, 이것에 대한 경계조건은 완전 도체의 도파관 벽면에 대하여 전기력선이 직각이 되는 것을 알 수 있었다.

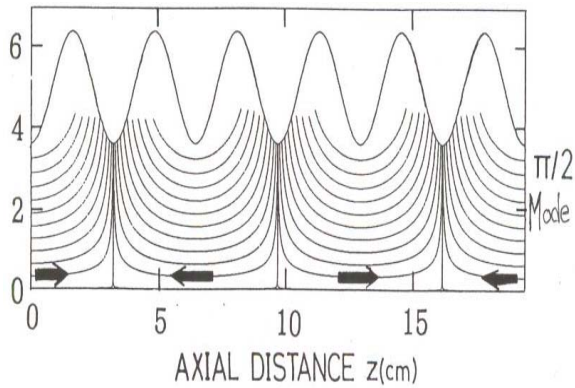


그림 4 축 방향 자계 분산관계
Fig. 4 Dispersion relation of axial magnetic field

그림 5는 속파영역과 지파영역에 대한 전계분포를 나타내고 있다. 앞에 기술한 전계분포 계산코드를 이용하였다. 그림에서 보면 공진모드 이외의 임의의 파수와 주파수에 대하여 나타내었는데 이것은 계산에서 얻어진 결과이며, 전기력선은 도파관 관벽 부근에서 높은 밀도이고, 전계분포에 대해서는 중심 부근보다 관벽에서 전계가 강하게 되어 표면파인 것을 알 수 있다.

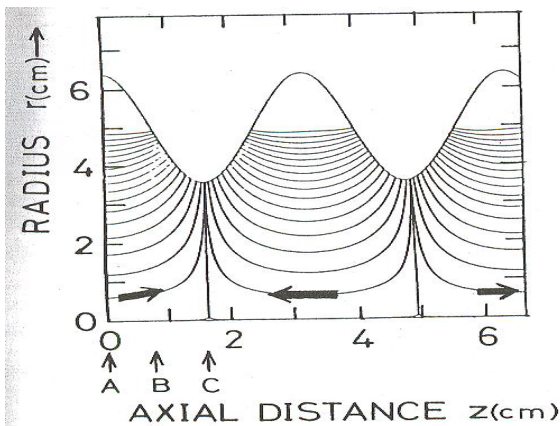


그림 5 고주파 전계 분포
Fig. 5 High frequency electric field

그림 6은 포인팅 벡터에 대하여 나타났다. 주파수 2.86GHz 이고 6 주기파형에 대한 이용하며 계산하였다. 그림 7에 TG 모드의 분산곡선을 나타냈다. 축 방향 직류전류는 무한대이고 원통형 플라즈마 선밀도 $N_p = 1.23 \times 10^{10} \text{ cm}^{-1}$, 플라즈마, 반경 $R_p = 0.9 \text{ cm}$ 로서 계산하였다. 그림에서 보면 적당한 속도의 전자빔과의 상호작용에 의해 발진기 또는 증폭기로서 이용할 수 있는 것을 알았다.

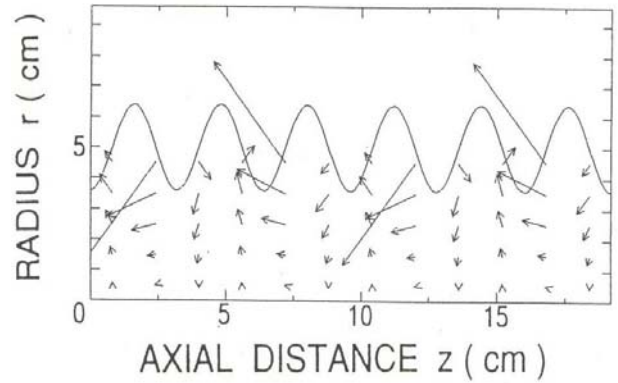


그림 6 포인팅 벡터
Fig. 6 The schematic of pointing vector

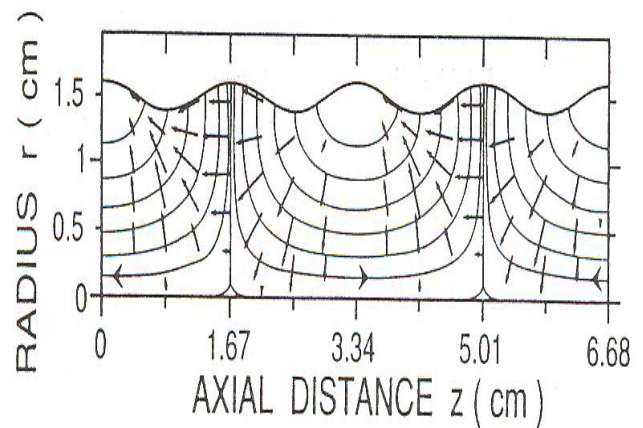


그림 7 TG 모드의 분산곡선
Fig. 7 Dispersion Curve of TG mode

3. 결 론

맥스웰 방정식을 이용한 분산식을 도출하여 계산한 결과 분산곡선을 얻었다. 도파관에서 고주파전계분포에 의하여 표면파가 여진하는 것을 알았는데 이것은 지파 구조에 의한 결과이다. 또 포인팅 벡터의 계산에서 도파관 내의 에너지의 흐름을 알 수 있었다. TG모드는 넓은 대역의 주파수에서 BWO와 TWT에 사용되어 전자파의 발진과 진폭에 이용할 수 있는 가능성이 있는 것을 발견하였다. TM_{01} 모드는 대 출력의 마이크로파 발진을 일으킬 수 있었다. 이를 이용한 후진파발진기의 개발에는 분산특성과 플라즈마를 이용한 상태에서 마이크로파 입사 실험이 이루어져 논문 II에 그 결과를 발표하였다.

참 고 문 헌

[1] M.R.Amin, K.Minami, K.Ogura, X.Z.Zheng, and T.Watanabe, "Resonance Enhancement of Radiation from a Backward Wave Oscillator Utilizing Large Diameter Corrugated Metal Structure" J. Phys. Soc. Jpn. vol.64, p.4473, 1995.
[2] K. Ogura, R. Yoshida, Y. Yamashita, H. Yamazaki, K. Komiyama and M. Sakai, "Study on Oscillation Starting

Condition of K-band Oversized Backward Wave Oscillator Driven by a Weakly Relativistic Electron Beam", J. Plasma Fusion Res. vol. 6, p. 703, 2004.

- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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