

# X-밴드 導波管内 支持棒의 임피던스 (Impedance of a Post Mount Structure in the X-band Waveguide)

朴 東 徹\*, 羅 正 雄\*\*

(Park Dong Chul *and* Ra Jung-Woong)

## 要 約

마이크로파 帶域의 半導體 素子인 Impatt 혹은 Gunn 다이오드를 導波管内에서 發振 혹은 增幅素子로 使用하기 위하여는 다이오드를 導波管内에 機械的으로 支枝하고, 다이오드에 DC bias를 공급하는 經路가 되는 支持棒이 必要하다.

斷面이 圓形인 支持棒에 關하여 다이오드 兩端에서 본 支持棒의 入力 임피던스의 計算 方法을 소개하고 이를 X-밴드(8-12GHz)에서 實驗的으로 確認하였다.

## Abstract

Impedance of a post mount structure supporting a microwave diode in the X-band rectangular waveguide is calculated by using the induced EMF method. Probe measurement of the driving point impedance of the post mounu shows a close agreement with the theoretical calculation when the gap of the post mount is near the bottom wall of the waveguide.

## 1. 序 論

導波管(waveguide)內에 다이오드를 설치할 수 있도록 하는 金屬 支持막대의 다이오드 連結端에서 본 임피던스의 計算方法과 測定 方法은 각종 能動 素子를 利用한 마이크로파 裝置設計의 基本이며 必須的이다. Eisenhart와 Khan<sup>1)</sup>에 의해 圓筒形 金屬 支持막대의 임피던스가 計算되었으며 測定에 의해 그 方法이 確認되었다.

C-밴드(4-6GHz) 導波管을 利用하여 測定 確認된 以上の 方法을 좀더 높은 周波數 범위의 X-밴드(8-12 GHz) 導波管을 利用하여 實驗的으로 再現해 보고, 그 測定限界를 理解할 때, 理論的으로 計算이 어려운 다른 형태의 支指棒 임피던스를 測定할 수 있는 測定施

設 및 方法을 강구할 수 있다. 일반적으로 마이크로파 다이오드 發振器의 動作은 다이오드 連結端에서 본 受動回路의 임피던스에 依存하므로 이 임피던스를 淸明하는 것은 무엇보다도 重要하다고 할 수 있다.<sup>2)</sup>

## 2. 理 論

導波管內의 支持棒을 일종의 안테나로 생각할 수 있으며, 다이오드의 連結端을 안테나의 入力端으로 생각하면 이 支持棒의 分析 問題는 결국 안테나의 入力端 임피던스를 구하는 問題와 同一시될 수 있다. 이 임피던스를 구하기 위하여 그린 함수(Green's function)와 induced EMF 方法이 利用되며 導波管內에서 存在할 수 있는 모든 mode가 考慮되어야 한다.

導波管內의 電磁界는 Maxwell 方程式을 만족하며 단진동을 가정하여 時間 依存量  $e^{j\omega t}$ 를 省略하면 電流源이 存在할 때 電界  $\vec{E}$ 는 一般的으로 source 領域에서 식(1)을 만족시킨다.

\* 忠南大學校 工科學 電子工學科

\*\* 韓國科學院 電氣 및 電子工學科

接受日字 : 1977年 3月 26日

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} - k^2 \vec{E} = -j\omega\mu_0 \vec{J} \quad (1)$$

여기서  $\vec{E}$ 는電界 벡터,  $\vec{J}$ 는電流 벡터,  $\mu_0$ 는自由空間의 투자율,  $k$ 는媒質의波數(wave number),  $\omega$ 는角周波數이다.

斷面이 직사각형인導波管의境界條件과微分方程式(1)을點電流源에對하여만족시키는解가 dyadic Green 함수  $\vec{G}(\vec{r}/\vec{r}')$ 로서(2)식과같이 쓸수 있다.

$$\nabla \times \nabla \times \vec{G}(\vec{r}/\vec{r}') - k^2 \vec{G}(\vec{r}/\vec{r}') = \vec{I} \delta(\vec{r} - \vec{r}') \quad (2)$$

여기서  $\vec{I}$ 는 unit dyadic이며  $\delta(\vec{r} - \vec{r}')$ 은 delta함수,  $\vec{r}$ 은觀測點,  $\vec{r}'$ 은電源點을 나타낸다.  $\vec{G}$ 는 주어진境界條件을 만족시키는 모든 mode, 卽 相互直交하는 모든固有函數의 중첩으로表示할수 있다.<sup>3)</sup> 따라서電流源  $\vec{J}(\vec{r}')$ 에依한導波管内 임의의點에서의電界  $\vec{E}(\vec{r})$ 는

$$\vec{E}(\vec{r}) = -j\omega\mu_0 \int_V \vec{G}(\vec{r}/\vec{r}') \cdot \vec{J}(\vec{r}') d\vec{r}' \quad (3)$$

으로求해진다. 여기서  $v$ 는電流源의體積이다.

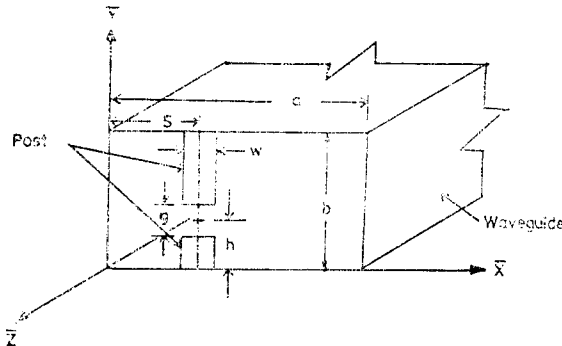


그림 1. 導波管内의 支持棒

Fig. 1. A post mount in the rectangular waveguide

그림 1에서 支持棒이  $\vec{Y}$ 축 방향으로存在한다면, 支持棒에 흐르는電流  $\vec{J}$ 는  $\vec{Y}$ 軸 方向成分만으로서 가정할수 있다. 또한 支持棒의間隔(그림 1의  $g$ 부분)에는 다이오드 또는 probe가 연결되므로 支持棒 兩端에서 전하의連續性이 보장되어 導波管内의電界는  $\vec{Y}$ 成分만을 갖게 된다. 따라서(3)식의  $\vec{G}$ 는 9個成分中  $\vec{Y}_0\vec{Y}_0$ 成分만이必要하며, 이成分의  $\vec{G}$ 를  $G_{yy}$ 라 할 때

$$G_{yy} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)(k^2 - k_y^2)e^{-\Gamma_{mn}|z-z'|}}{abk^2\Gamma_{mn}} (\sin k_x x)(\sin k_x x')(\cos k_y y)(\cos k_y y') \quad (4)$$

로 주어진다.<sup>3)</sup> 여기서  $k_x = \frac{m\pi}{a}$ ,  $k_y = \frac{n\pi}{b}$ ,  $m$  및  $n$ 는 양의 정수이며,  $\Gamma_{mn} = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k^2}$ ,

$$\delta_0 = \begin{cases} 1, & n=0 \\ 0, & n \neq 0 \end{cases}$$

이고  $a$  및  $b$ 는 導波管의  $\vec{X}$ 軸 및  $\vec{Y}$ 軸의 內長이다.

支持棒의 入力端 임피던스를 구하기 爲하여 入力端

間隔에 加해주는電界를  $\vec{E}_A$ 라 가정한다. 즉 그림 1에서 圓柱 支持棒을  $Z=0$ 平面에 놓인 폭이  $W$ 인 等價平板<sup>1)</sup>으로 취급하면 인가된電界  $\vec{E}_A$ 는

$$\vec{E}_A = \begin{cases} \vec{Y}_0 \frac{V}{g}, & S - \frac{W}{2} < x < S + \frac{W}{2}, & h - \frac{g}{2} \\ < y < h + \frac{g}{2}, & Z=0 \\ 0, & \text{기타 부분} \end{cases} \quad (5)$$

로 쓸수 있다. 여기서  $g$ 는 支持棒의 兩端 간격,  $V$ 는 그 兩端에 인가한電壓이며  $S$  및  $h$ 는 그림 1에서 보인 바와 같이 支持棒의 位置를表示한다. 實際로 支持棒 兩端에는 다이오드나 probe가 連結되어 이 間隔에 흐르는電流는 支持棒에 흐르는電流와 같다. 따라서 支持棒 間隔에 加한電力은 支持棒 表面으로 복사되는電力 및 支持棒 損失의 總과 같을 것이며, 이는 induced EMF 方法에 依해 다음과 같이表示할수 있다.<sup>4)</sup>

$$\int_V \vec{E}(\vec{r}') \cdot \vec{J}^*(\vec{r}') d\vec{r}' = \int_V \vec{E}_A(\vec{r}') \cdot \vec{J}^{*-1}(\vec{r}') d\vec{r}' \quad (6)$$

여기서  $\int_V$ 는 공액 복소수를意味하며,  $v$ 는 支持棒 및 間隔部分의體積이지만,  $\vec{E}$ ,  $\vec{J}$  및  $\vec{E}_A$ 를 導波管의 모든 mode로 展開하여 그들 mode間的 直交性을 利用 하려면  $v$ 는 導波管 全斷面에 걸친體積을意味한다.

(6)식의  $\vec{E}$ ,  $\vec{J}$  및  $\vec{E}_A$ 를 導波管의 mode로 展開한 후 mode의 直交性을 利用하면  $(m,n)$ mode에 관한(6)식의 관계를 쓸수 있다. 支持棒이 항상  $x=\text{const}$ 인 위치에 존재하고 그 斷面이 一定하다면  $x$ 축에 의존하는 導波管 mode函數는(6)식의 양편에 같은 계수 및 항수로 나타난다. (6)식의 左邊은 全복사전력으로서  $\vec{J}$ 와(3) 및(4)식으로부터 유도된다. (6)식의 右邊은 支持棒 兩端에 加해진電力으로서  $\vec{J}$  및(5)식으로부터 유도되며, 兩端 間의電壓  $V$ 와 모든 mode 勵起電流의 곱으로表示된다. 따라서 支持棒의 入力端 임피던스는 이 모든 mode 임피던스의 總으로 다음과 같이表示될수 있다.<sup>1)</sup>

$$Z_R = \frac{1}{\sum_{n=0}^{N_1} \left\{ \frac{1}{\sum_{m=1}^{M_1} Z_{mn}} \left( \frac{\omega \rho_{mn}}{\omega \epsilon_{gn}} \right)^2 \right\}} \quad (7)$$

여기서  $M_1$ ,  $N_1$ 는 무한대 즉 무한대의 可能한 mode에 대해 생각해 주어야 하나 수렴 效果에 의하여  $M_1 = \frac{a}{W}$ ,  $N_1 = \frac{b}{g}$ 로 놓아도 무한대까지 생각한 實際 理論值의 1.5% 이내의 誤差를 갖는다.<sup>1)</sup>

$Z_{mn}$ 은  $TE_{mn}$ ,  $TM_{mn}$  mode의 영향을 모두 생각하여 준 mode pair 임피던스

$$Z_{mn} = \frac{j\eta b}{ak} \cdot \frac{(k^2 - k_y^2)}{(2 - \delta_0)\Gamma_{mn}} \quad (8)$$

이며  $\eta$ 는 공기의 intrinsic 임피던스, 그리고 기타

記號의 意味은 (4)식에서와 같다. (7)식의  $\alpha_{pm}$ 은

$$\alpha_{pm} = \sin k_x S \left( \frac{\sin \theta_m}{\theta_m}, \theta_m = \right) \frac{m\pi w}{2a} \quad (9)$$

이며  $W$ 값은 等價 平面 쪽으로 支持棒의 단면 직경을  $d$ 라 할 때  $W=1.8d$ 로써 使用할 수 있다.<sup>1),5)</sup> 또한  $\alpha_{gn}$ 은

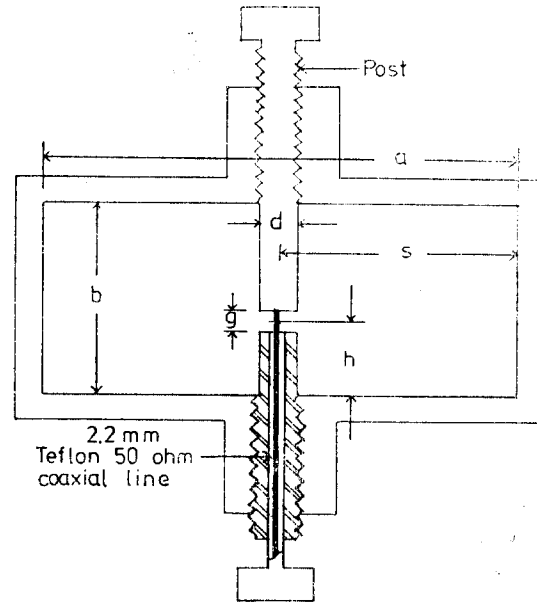
$$\alpha_{gn} = \cos k_y h \left( \frac{\sin \phi_n}{\phi_n} \right), \phi_n = \frac{n\pi g}{2b} \quad (10)$$

이며,  $\alpha_{pm}$ 을 支持棒에 의한 相關係數,  $\alpha_{gn}$ 은 支持棒 間隔에 의한 相關係數로 볼 수 있다.

3. 測定 結果의 考察

X-밴드(8-12.4GHz) 導波管의 위와 아래에 구멍을 뚫어 支持棒이 밖에서 들어갈 수 있게 해놓고 支持棒이 흔들리지 않도록 導波管 위와 아래에 支持臺를 남뎌서 붙였다. 다음에 brass(傳導度面에서는 구리가 약 5배 程度 좋으나 선반으로 加工時 brass가 더 용이함)로 직경이 2.2, 2.5, 2.8mm 되게 支持棒을 깎고 이 支持棒에 나사를 만들어 導波管 속에 돌려 넣을 수 있게 했다. 또 導波管 內의 電磁界에 影響을 주지 않고 gap 端子에 접근하기 위해 rigid miniature coaxial cable을 使用하였다.

이 實驗에서 支持棒의  $x$ 方向 位置  $S'$ 은  $S' = \frac{S}{a} = 0.5$  되게 中央에 位置시키고 gap의  $y$ 方向 位置  $h'$ 은  $h' = \frac{h}{b} = 0.027$ 에 대해 測定하였다. 그림 2는 本 實驗에 使用한 支持棒 構造의 斷面圖이다.



To slotted line and source

- $a=22.866\text{mm}$        $b=10.160\text{mm}$
- $d=2.2, 2.5, 2.8\text{mm}$
- $g=0.55\text{mm}$        $h'=h/b=0.027$
- $S'=S/a=0.500$
- 同軸心線直徑: 0.55mm

그림 2. 測定用 支持棒 構造

Fig 2. Test jig and its dimension

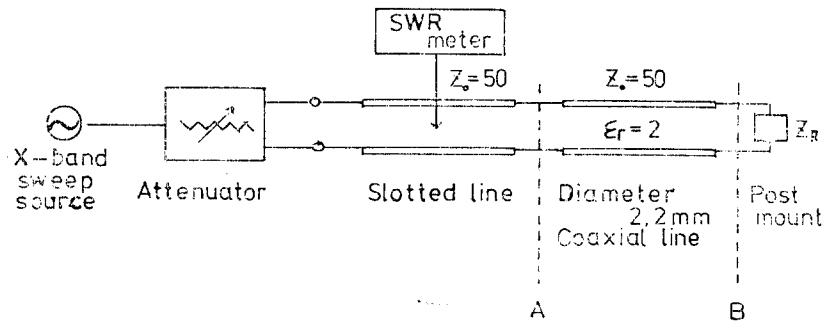


그림 3 測 定 裝 置

Fig. 3. Impedance measurement of the post mount

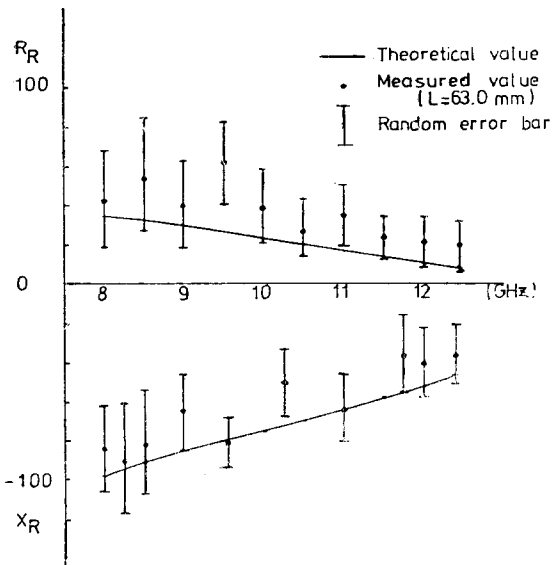
導波管內 支持棒 入力端 임피던스를 測定하기 爲하여 그림 3과 같은 slotted line을 利用한 回路를 構成하였다

Slotted line은 그림 2의 Teflon 同軸線을 통해 支持棒 兩端을 연결해 주는 probe에 연결되어 있다. 實際 임피던스의 測定은 그림 3의 A점에서 이루어졌다. Teflon 同軸線의 길이를 Time Domain Reflectometry

(TDR) 方法으로 正確히 測定하여 A점의 임피던스 값으로부터 支持棒의 入力端 임피던스 값(그림 3의 B점)을 計算하였다.

그림 4에서 6까지 支持棒의 直徑이 各各 2.2, 2.5, 2.8mm일 때 임피던스의 理論値와 測定値를 比較하였다. 즉 8.0GHz부터 12.4GHz까지 0.1GHz 間隔으로 測定한 VSWR과 反射係數의 位相을 데이터로 하여

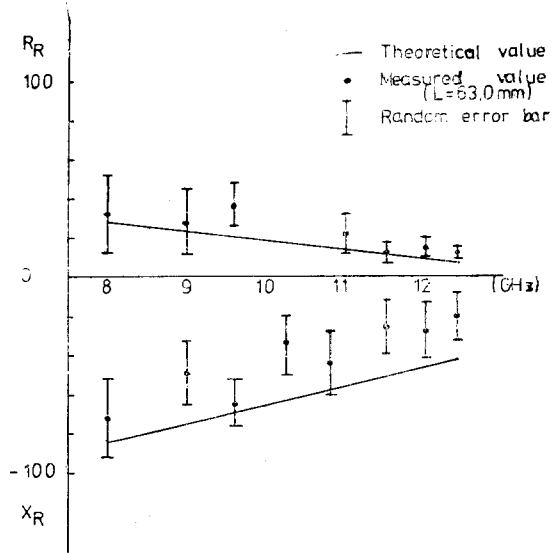
컴퓨터 計算을 통하여 gap 入力端 임피던스를 求하였다.



$d=2.2\text{mm}$        $g=0.55\text{mm}$   
 $h'=0.027$        $S'=0.500$

그림 4. Gap 入力 임피던스

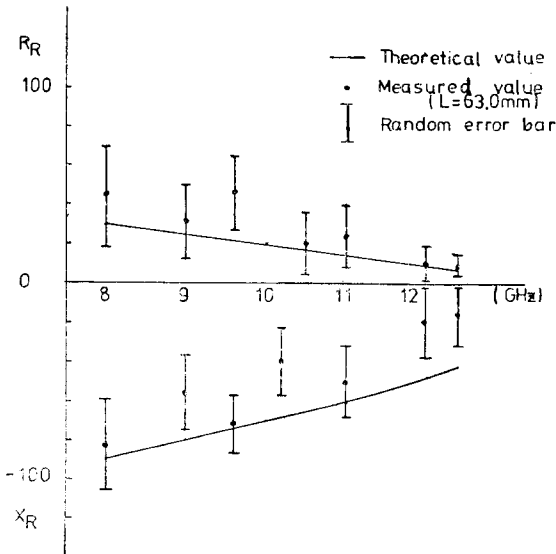
Fig. 4. Gap driving point impedance



$d=2.8\text{mm}$        $g=0.55\text{mm}$   
 $h'=0.027$        $S'=0.500$

그림 6. Gap 入力 임피던스

Fig. 6. Gap driving point impedance



$d=2.5\text{mm}$        $g=0.55\text{mm}$   
 $h'=0.027$        $S'=0.500$

그림 5. Gap 入力 임피던스

Fig. 5. Gap driving point impedance

測定値의 誤差범위는 slotted line의 正確度 등을 포함한 測定器機誤差, 測定裝置의 加工, 조립誤差 ( $g \pm 0.1\text{mm}$ ,  $S \pm 1\text{mm}$ ,  $d \pm 0.1\text{mm}$ ) 등이 고려되었다. 특히 그림 3의 A 점과 B 점間의 同軸線길이 測定은 전체 誤差 범위에 가장 큰 영향을 미쳤으며 測定에 使用된 TDR의 測定誤差는  $\pm 2\text{psec}$ 로, 길이로 환산하면  $\pm 0.4\text{mm}$ 이었다. 그림 4~6의 誤差 bar는 同軸線의 長이가 63.0mm라 놓았을 때  $\pm 0.4\text{mm}$ 의 길이 誤差를 제외한 나머지 모든 誤差를 누산하여 表示한 것이다. 그림 4~6에서 볼 수 있듯이 gap이 導波管의 端面에 있을 때 測定誤差범위 내에서 測定値와 理論値가 比較的 잘 맞음을 알 수 있다. 理論値 임피던스 式의 誘導時 probe와 支持棒의 直徑을 같다고 놓고 計算하였으나 實際로 probe의 直徑은 상당히 작으므로 gap內에 radial line이 存在하는 것으로 간주하여 리액턴스의 理論値가 보상되어야 할 必要가 있다. 그러나 이 radial line을 끝이 open된 비균일 전송선으로 等價化하여 gap 쪽에서 본 入力 임피던스를 求해 보면 8~12.4GHz 帶域에서 平均的으로  $j10\Omega$  程度로 된다.<sup>6)</sup> 그림 4~6의 리액턴스 曲線에 이  $j10\Omega$ 을 보상에 주면 아주 잘 맞음을 알 수 있다.

그러나 測定値 曲線에서 1.5GHz 程度의 週期로 생기는 임피던스의 變化 趨勢는 그 原因이 確實히 糾

明되지 못했다.

#### 4. 結 論

矩形 導波管內의 圓筒形 支持棒에 대한 入力端 임피던스가 理論적으로 誘導됨을 確認해 보고 實驗을 통하여 이 理論이 適當함을 보였다. 이 測定 方法은 임피던스를 理論적으로 誘導하기 힘든 任意의 形態를 가진 支持棒의 入力端 임피던스를 測定하는데 利用될 수 있으며, 測定誤差限界는 각종 加工 및 기기 精밀도로부터 計算할 수 있다.

#### 參 考 文 獻

1. Robert L. Eisenhart and Peter J. Khan, "Theoretical and Experimental Analysis of a Waveguide Mounting Structure," IEEE Trans. MTT, Vol. MTT-19, No. 8, Aug. 1971, 706-719.
2. Kurokawa, An Introduction to the Theory of Microwave Circuits, New York, Academic Press, 1969, 380-386.
3. Y. Rahmat-Samii, "On the Question of Computation of the Dyadic Green's Function at the Source Region in Waveguides and Cavities," IEEE Trans. MTT, Vol. MTT-23, No. 9, Sept. 1975, 762-765.
4. R. Harrington, Time Harmonic Electromagnetic Fields, New York, McGraw-Hill, 1961, p. 349.
5. H. Jasik, Antenna Engineering Handbook, New York, McGraw-Hill, 1961, chapter 3, p. 7.
6. N. Marcuvitz, Waveguide Handbook, New York, Dover, 1965, 90-91.
7. M. Sucher and J. Fox, Handbook of Microwave Measurements, Polytechnic Institute of Brooklyn, 1963, Vol. 1, chapter 2.
8. E.C. Jordan and K.G. Balmain, Electromagnetic Waves and Radiating Systems, Prentice-Hall, 1968, chapter 14, 535-554.