濟州大學校 産業技術硏究所 論文集, 第11卷, 1號, pp.54-62, 2000. 6
Cheju Nat'l Univ. Res. Insti. Ind. Tech. Jour., Vol.11, No.1, pp.54-62, 2000. 6

원형도파관과 구형도파관간의 T-접합 분기회로 해석

문 성 익* · 김 윤 영* · 허 광 삼* · 양 두 영**

Analysis of the T-junction Branch Network Between Cylindrical and Rectangular Waveguide

Seong-Ig Moon*, Yun-Young Kim*, Kwang-Sam Heo* and Doo-Yeong Yang**

ABSTRACT

In this paper, the T-junction branch network of the orthomode transducer is analyzed. The T-junction branch network consists of the cylindrical common waveguide and the rectangular sub-waveguide. Using the vector potential of each region, the hybrid mode is considered. Based on the derived electromagnetic components, scattering parameters of the T-junction branch network are calculated. The cylindrical waveguide size and the rectangular waveguide size are WR62 and WC55. In order to analyze the discontinuity of the T-junction branch network, high order mode of the branch region is considered the 15th. From the results, the transmission coefficient, S_{31} and S_{21} show -3dB, the reflection coefficient, S_{11} and S_{33} are -10dB, -8dB in the range of 13.3GHz~16GHz.

Key words : Orthomode transducer, T-junction, hybrid mode

Ⅰ. 서 론

위성통신은 국제 통신뿐만 아니라 국내 통신 및 방송, 이동통신 등에서 그 적용 범위가 점차 확대되고 있다. 이와 같이 위성통신이 각 방면에서 적극적으로 이용될 수 있는 가장 중요한 이유중의 하나는 위성통신 기술의 발달을 꼽을 수 있다. 그러나 반도체 및 회로 기술의 발전에 따른 위성 중계기와 송수신 단말장치의 소형화 추진속에서도 안테나를 비롯한 급전부 기술은 아직 미흡한 실정이다. 그 중 위성통신용 급전 장치중 T-접합(T-junction) 분기회로는 송·수신 신호를 분리시키기 위해 송·수신 여파기를 결합시킨 다이플렉서, 다중모드 원형 도파관 결합기, 하이브리드 T 접합, 십자형 접합, 직교모드 변환기(OMT)등 많은 응용에 있어서 중요하다[1-5]. T-접합 분기회로를 구성하는 방법에는 구형-구형 도파관과 원형-구형도파관, 원형-원형 도파관, 구형-원형도파관을 이용하는 방법이 있다. 분기회로를 해석하는 방법에는 여러 가지가 있는데 그 중 가장 흔히 사용하는 방법에는 *TE*모드 해석법과 *TM*모드 해석법이 있다. *TE*모

* 제주대학교 대학원
Graduate School, Cheju Nat'l Univ.
** 제주대학교 통신컴퓨터공학부, 산업기술연구소
Faculty of Telecommunication & Computer Eng., Res. Insti. Ind. Tech., Cheju Nat'l Univ.

드 해석법은 전파의 진행방향에 전계의 성분이 없다고 가정한 방법이고, *TM*모드 해석법은 전파의 진행방향에 자계의 성분이 없다고 가정하여 전자계 성분을 해석하는 방법이다[6),7)]. T-접합 분기회로를 구성하는 방법중 구형-구형 도파관을 이용한 T-접합 분기회로는 구형도파관의 기본모드인 TE_{10}모드가 입사되면 E_x성분은 E_y, E_z성분에 비해 매우 작은 값을 갖기 때문에 단지 *TE*모드 해석법으로도 분석할 수 있지만 그 이외의 T-접합 분기회로인 경우는 *TE*모드와 *TM*모드를 동시에 고려해야만이 정확한 전자계를 해석할 수 있다.

본 논문에서는 T-접합 분기회로를 구성하는 방법중 공통도파관인 원형 도파관에 구형도파관을 분기시킨 T-접합 분기회로를 해석한다. 각 영역에 대한 벡터 포텐셜에 의해 계산된 *TE*모드와 *TM*모드를 종합모드 표현식에 적용하여 T-접합부의 불연속 영역의 전자계 성분을 구하고, 이를 토대로 결합계수를 이용하여 T-접합 분기회로의 산란특성을 살펴본다.

II. 설계이론

2.1. 원형 도파관의 전자계 해석

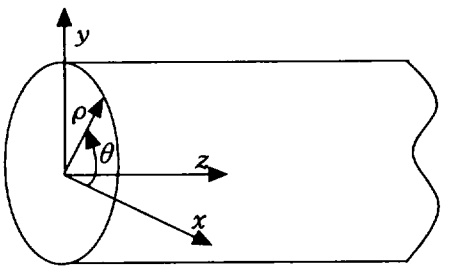


Fig. 1 Coordiates system of the cylindrical waveguide

Fig. 1은 원형 도파관의 좌표계를 나타내었다. *z*방향으로 파가 진행한다고 가정하면 원형 도파관의 전자계 성분은 파동 방정식을 만족해야 한다. 스칼라 파동함수를 ψ라 하면

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial\rho}\left(\rho\frac{\partial\psi}{\partial\rho}\right)+\frac{1}{\rho^2}\frac{\partial^2\psi}{\partial\phi^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}+k^2\psi=0 \quad (1)$$

이다. 변수 분리법을 이용하여 해를

$$\psi = R(\rho)\,\Phi(\phi)\,Z(z) \quad (2)$$

라고 가정한다. 여기서 $R(\rho)$, $\Phi(\phi)$, $Z(z)$는 각각 ρ, θ, z만의 함수이다. 식(2)를 식(1)에 대입하고, 양변에 $R\Phi Z$를 곱하면

$$\frac{d^2R}{d\rho^2}+\frac{1}{\rho}\frac{dR}{d\rho}+\left[(k_\rho)^2-(\frac{n}{\rho})^2\right]R=0 \quad (3)$$

이다. 식(3)에서 R, Φ, Z에 대한 해를 구하고 식(2)에 대입하면 원통 좌표계의 일반해를 구할 수 있다.

$$\psi = J_n(k_\rho\rho)\left\{\begin{matrix}\cos n\phi\\ \sin n\phi\end{matrix}\right\}e^{-jk_zz} \quad (4)$$

여기서 $k_z^2+k^2=k_\rho^2$, $k_\rho=\frac{k_{xp}}{a}$이고, a는 원형 도파관의 반지름, $n=0,1,2,\cdots$, $p=1,2,\cdots$이다.

2.2. 구형 도파관의 전자계 해석

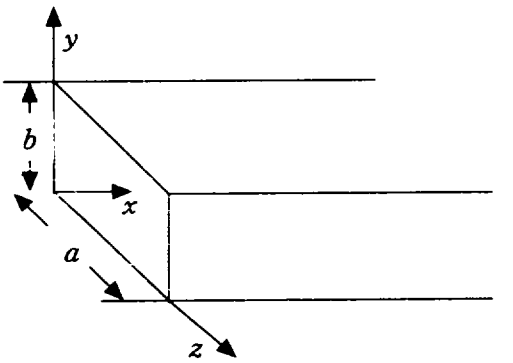


Fig. 2 Coordinates system of the rectangular waveguide

Fig. 2는 구형도파관의 좌표계를 나타낸 것이다. Fig. 2에서 *x*방향으로 파가 진행한다고 가정하면 구형도파관의 파동방정식은 각 전자계 성분에 대하여 다음과 같은 미분 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}=0 \quad (5)$$

식(5)의 방정식을 풀기 위해 변수 분리법을 이용한

다. 우선 전위함수

$$\phi = X(x)\ Y(y)\ Z(z) \tag{6}$$

라고 가정한다. 여기서 $X(x)$, $Y(y)$, $Z(z)$는 각각 x, y, z의 함수이다. 식(6)을 식(5)에 대입하고, 양변에 XYZ를 곱하면

$$\frac{1}{X}\frac{d^2X}{dx^2}+\frac{1}{Y}\frac{d^2Y}{dy^2}+\frac{1}{Z}\frac{d^2Z}{dz^2}+k^2 = 0 \tag{7}$$

된다. 식(7)에서 R, Φ, Z에 대한 해를 구하고, 식(6)에 대입하면 구형 도파관의 전자계에 대한 일반해를 구할 수 있다.

$$\phi = [B_1\cos(jk_yy)+B_2\sin(jk_yy)][C_1\cos(jk_zz)+C_2\sin(jk_zz)] \cdot [D_1e^{-jk_xx}+D_2e^{jk_xx}] \tag{8}$$

여기서 k_z, k_y는 z, y방향에 대한 전파상수로서 각각 $\left(\frac{m\pi}{a}\right)$, $\left(\frac{n\pi}{b}\right)$이고, a와 b는 구형도파관의 장축과 단축의 크기이다. k_x는 $\sqrt{k^2-(k_z)^2-(k_y)^2}$이고, m, n은 모드의 수로서 $m=0,1,2,3,\cdots$, $n=1,2,3,\cdots$이다.

2.3. T-접합분기회로 해석

Fig. 3은 공통 도파관인 원형도파관에 구형도파관을 삽입시킨 T-접합 분기회로를 나타낸 그림이다. 도파관내에 존재하는 TE모드와 TM모드에 대한 전위함수를 각각 ϕ^{TE}, ϕ^{TM}두면, 각 영역에 대한 전위함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_I^{TM} = \sum_{m,n} G_{mnI}^{TM}\cdot J_n\left(\frac{x_{mn}}{R}\rho\right) \cdot \sin n\phi\cdot\left(F_{mnI}^{TM}e^{-jk_{mnI}^{TM}z}-B_{mnI}^{TM}e^{jk_{mnI}^{TM}z}\right) \tag{9}$$

$$\phi_{II}^{TM} = \sum_{p,q} G_{pqII}^{TM}\cdot J_q\left(\frac{x_{pq}}{R}\rho\right) \cdot \sin q\phi\cdot\left(F_{pqII}^{TM}e^{-jk_{pqII}^{TM}(z-a)}-B_{mnII}^{TM}e^{jk_{mnII}^{TM}(z-a)}\right) \tag{10}$$

$$\phi_{III}^{TM} = \sum_{i,l} G_{iIII}^{TM}\sin\frac{i\pi}{b}\cos\frac{l\pi}{a} \left(F_{iIII}^{TM}e^{-jk_{iIII}^{TM}(x-R)}-B_{iIII}^{TM}e^{jk_{iIII}^{TM}(x-R)}\right) \tag{11}$$

$$\phi_{IV}^{TM} = \sum_{m,n} C_{mnI}^{TM}\cdot J_n\left(\frac{x_{mn}}{R}\rho\right)\cdot\sin n\phi \cdot\cos\left[k_{mnI}^{TM}(a-z)\right] + \sum_{p,q} C_{pqII}\cdot J_q\left(\frac{x_{pq}}{R}\rho\right)\cdot\sin q\phi\cdot\cos(k_{pqII}^{TM}z) + \sum_{il} C_{iIII}^{TM}\cdot J_l(k_{il}\rho)\cdot\sin l\phi\cdot\cos\frac{i\pi}{R}z \tag{12}$$

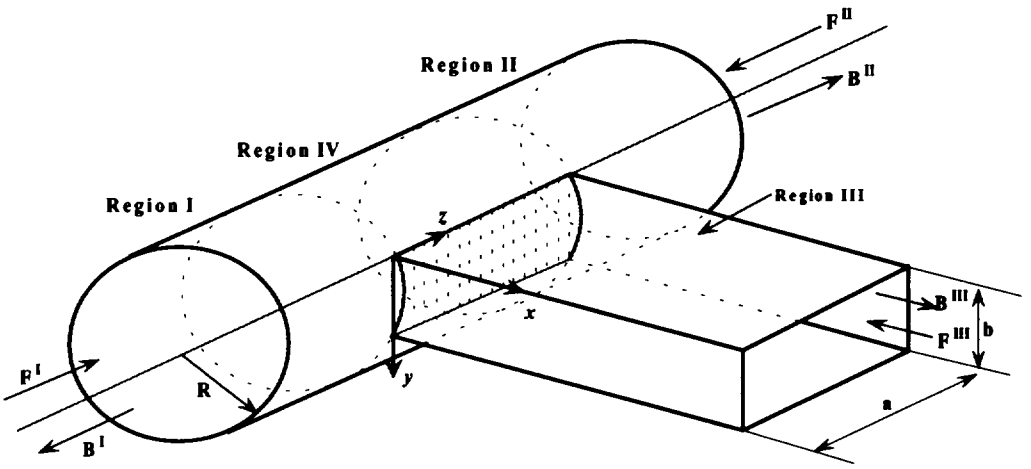
$$\phi_I^{TE} = \sum_{m,n} G_{mnI}^{TE}\cdot J_n\left(\frac{x_{mn}'}{R}\rho\right) \cdot\cos n\phi\cdot\left(F_{mnI}^{TE}e^{-jk_{mnI}^{TE}z}+B_{mnI}^{TE}e^{jk_{mnI}^{TE}z}\right) \tag{13}$$

$$\phi_{II}^{TE} = \sum_{p,q} G_{pqII}^{TE}\cdot J_q\left(\frac{x_{pq}'}{R}\rho\right) \cdot\cos q\phi\cdot\left(F_{pqII}^{TE}e^{-jk_{pqII}^{TE}(z-a)}+B_{pqII}^{TE}e^{jk_{pqII}^{TE}(z-a)}\right) \tag{14}$$

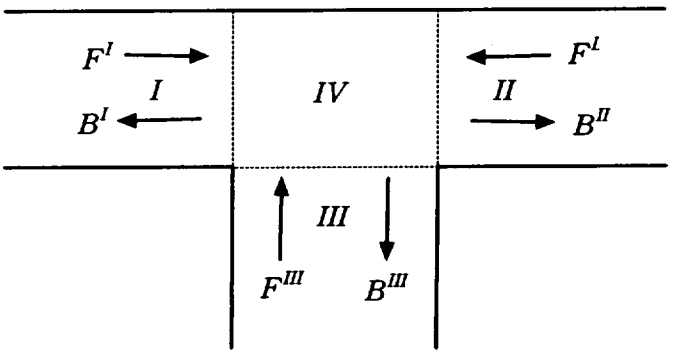
$$\phi_{III}^{TE} = \sum_{i,l} G_{iIII}^{TE}\cos\frac{i\pi}{b}\sin\frac{l\pi}{a}\left(F_{iIII}^{TE}e^{-jk_{iIII}^{TE}(x-R)} + B_{iIII}^{TE}e^{jk_{iIII}^{TE}(x-R)}\right) \tag{15}$$

$$\phi_{IV}^{TE} = \sum_{m,n} C_{mnI}^{TE}\cdot J_n\left(\frac{x_{mn}'}{R}\rho\right)\cdot\cos n\phi \cdot\sin\left[k_{mnI}^{TE}(a-z)\right] + \sum_{p,q} C_{pqII}^{TE}\cdot J_q\left(\frac{x_{pq}'}{R}\rho\right)\cdot\cos q\phi\cdot\sin(k_{pqII}^{TE}z) + \sum_{il} C_{iIII}^{TE}\cdot J_l(k_{il}\rho)\cdot\cos l\phi\cdot\sin\frac{i\pi}{R}z \tag{16}$$

여기서 R는 원형 도파관의 반지름이고, $m=p=i=0,1,2,3\cdots$, $n=q=l=1,2,3,\cdots$, $F_{I,II,III}^{TM,TE}$, $B_{I,II,III}^{TM,TE}$는 각 영역에 대한 TM모드와 TE모드의 진행파와 반사파의 크기이다. $k_{I,II,III}^{TM,TE}$는 각 영역에 대한 전파상수이고, $x_{mn,pq,il}'$, $x_{mn,pq,il}$는 각각 원형 도파관의 TE모드와 TM모드의 고유치(eigenvalue)이다. 그리고 a와 b는 구형도파관의 장축과 단축의 크기, $G_{\mathrm{I},\mathrm{II},\mathrm{III}}^{TE,TM}$는 각 영역에 대한 TE모드와 TM모드의 도파관의 전송전력 계수, $C_{\mathrm{I},\mathrm{II},\mathrm{III}}^{TE,TM}$는 각 영역에



(a) Side view of the T-junction



(b) Amplitude for the traveling wave and reflection wave in T-junction

Fig. 3 T-junction branch network of the cylindrical and rectangular waveguide

대한 *TE*모드와 *TM*모드의 정규화 계수이다. 그리고 영역 *IV*에서 전위 함수는 영역 *I,II,III*의 전자계가 공존하는 영역이므로, 세 개의 단락회로 도파관에 대응하는 함수의 중첩으로 계산한다. 이렇게 산출한 전위함수를 종합모드 표현식에 적용하면

$$\vec{E}=-\vec{\nabla}\times\vec{F}-\hat{z}\vec{A}+\frac{1}{\hat{y}}\vec{\nabla}(\vec{\nabla}\cdot\vec{A}) \qquad (17a)$$

$$H=\vec{\nabla}\times\vec{A}-\hat{y}\vec{F}+\frac{1}{\hat{z}}\vec{\nabla}(\vec{\nabla}\cdot\vec{A}) \qquad (17b)$$

이다. 여기서 $\hat{y}=jw\varepsilon$, $\hat{z}=jw\mu$이고, $\vec{F},\vec{A}$는 각각 *TE*모드와 *TM*모드에 의해 계산된 전자계 성분이다. 원형도파관과 구형도파관의 *TE*모드와 *TM*모드에 대한 전자계 벡터 포텐셜을 각각 $\vec{F}=u_z\phi^{TE}$, $\vec{A}=u_z\phi^{TM}$라 두면 직각 원통·직각 좌표계를 이용함으로써 두 모드에 대한 전자계 성분을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
E_\rho^{TM} &= \frac{1}{jw\varepsilon}\partial^2\phi^{TM} &&, H_\rho^{TM}=\frac{1}{\rho}\frac{\partial\phi^{TM}}{\partial\phi}\\
E_\phi^{TM} &= \frac{1}{jw\varepsilon\rho}\frac{\partial^2\phi^{TM}}{\partial\phi\partial z} &&, H_\phi^{TM}=-\frac{\partial\phi^{TM}}{\partial\rho}\\
E_z^{TM} &= \frac{1}{jw\varepsilon}\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2}+k^2\right)\phi^{TM} &&, H_z^{TM}=0
\end{aligned} \qquad (18)$$

$$
\begin{aligned}
E_\rho^{TE} &= -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \psi^{TE}}{\partial \phi}, & H_\rho^{TE} &= \frac{1}{jw\mu}\frac{\partial^2 \psi^{TE}}{\partial \rho \partial z} \\
E_\phi^{TE} &= \frac{\partial \psi^{TE}}{\partial \rho}, & H_\phi^{TE} &= \frac{1}{jw\mu\rho}\frac{\partial^2 \psi^{TE}}{\partial \phi \partial z} \\
E_z^{TE} &= 0, & H_z^{TE} &= \frac{1}{jw\mu}\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2}+k^2\right)\psi^{TE}
\end{aligned}
\tag{19}
$$

원형도파관과 구형도파관의 전자계 성분을 TE모드와 TM모드가 합성된 종합모드 표현식에 적용하면, 각 영역에 대한 접선성분인 ρ, ϕ의 전자계 성분은

$$
\begin{aligned}
E_\phi^I &= \sum_{m,n}\left(\frac{k_{mn}^I \cdot m}{w\varepsilon\rho}\right)G_{mn}^I \cdot J_n\left(\frac{x_{mn}}{R}\rho\right) \\
&\cdot \cos n\phi\left[F_{mn}^I e^{-jk_{mn}^I z} + B_{mn}^I e^{jk_{mn}^I z}\right] \\
&+ \sum_{m,n}\frac{j}{w\mu}\left(\frac{x_{mn}'}{R}\right)G_{mn}^I \cdot J_n\left(\frac{x_{mn}'}{R}\rho\right) \\
&\cdot \cos n\phi\left[F_{mn}^I e^{-jk_{mn}^I z} + B_{mn}^I e^{jk_{mn}^I z}\right]
\end{aligned}
\tag{20}
$$

$$
\begin{aligned}
E_\phi^{II} &= \sum_{p,q}\left(\frac{j\mu k_{pq}^{II} q}{\varepsilon}\right)\cdot G_{pq}^{II} \cdot J_q\left(\frac{x_{pq}}{R}\rho\right) \\
&\cdot \cos q\phi\left[F_{pq}^{II} e^{-jk_{mn}^{II}(z-a)} + B_{pq}^{II} e^{jk_{mn}^{II}(z-a)}\right] \\
&+ \sum_{pq}\left(-\frac{x_{pq}'}{R}\right)\cdot G_{pq}^{II} \cdot J_q\left(\frac{x_{pq}'}{R}\rho\right) \\
&\cdot \cos q\phi\left[F_{pq}^{II} e^{-jk_{mn}^{II}(z-a)} + B_{pq}^{II} e^{jk_{mn}^{II}(z-a)}\right]
\end{aligned}
\tag{21}
$$

$$
\begin{aligned}
E_z^{III} &= \sum_{i,l} G_{il}^{III}\left(-\frac{\mu}{\varepsilon}\right)\cdot\left[k^2-\left(\frac{l\pi}{a}\right)^2\right] \\
&\cdot \sin\frac{i\pi}{b}y \cdot \cos\frac{l\pi}{a}z \\
&\cdot \left[F_{il}^{III} e^{-jk_{il}^{III}(x-R)} + B_{il}^{III} e^{jk_{il}^{III}(x-R)}\right]
\end{aligned}
\tag{22}
$$

$$
\begin{aligned}
E_\phi^{IV} &= \sum_{m,n} C_{mn}^I\left(-\frac{x_{mn}'}{R}\right)\cdot J_n'\left(\frac{x_{mn}'}{R}\rho\right) \\
&\cdot \cos n\phi \cdot \sin\{k_{mn}^I(a-z)\} \\
&+ \sum_{p,q} C_{pq}^{II}\left(-\frac{x_{pq}'}{R}\right)\cdot J_q'\left(\frac{x_{pq}'}{R}\rho\right)\cdot \cos q\phi \cdot \sin\{k_{pq}^{II} z\} \\
&+ \sum_{i,l} C_{il}^{III}(-k_{il})\cdot J_l'(k_{il}\rho)\cdot \cos l\phi \cdot \sin\frac{l\pi}{a}z \\
&+ \sum_{mn}^{I} C_{mn}^I\left(\frac{-\mu k_{mn}^I}{\varepsilon\rho}\right)\cdot J_n\left(\frac{x_{mn}}{R}\right)\cdot \cos n\phi \cdot \sin\{k_{mn}^I(a-z)\} \\
&+ \sum_{pq}^{I} C_{pq}^{II}\left(\frac{-\mu k_{pq}^{II}}{\varepsilon\rho}\right)\cdot J_q\left(\frac{x_{pq}}{R}\right)\cdot \cos q\phi \cdot \sin\{k_{pq}^{II} z\} \\
&+ \sum_{i,l} C_{il}^{III}\left(\frac{\mu l}{\varepsilon\rho}\right)\left(\frac{l\pi}{a}\right)\cdot j J_l(k_{il}\rho)\cdot \cos l\phi \cdot \sin\frac{l\pi}{a}z
\end{aligned}
\tag{23}
$$

$$
\begin{aligned}
E_z^{IV} &= \sum_{m,n} C_{mn}^I\left(-\frac{\mu}{\varepsilon}\right)\left[k^2-(k_{mn}^I)^2\right]\cdot J_n\left(\frac{x_{mn}}{R}\rho\right) \\
&\cdot \sin n\phi \cdot \sin\{k_{mn}^I(a-z)\} \\
&+ \sum_{p,q} C_{pq}^{II}\left(-\frac{\mu}{\varepsilon}\right)\left[k^2-(k_{pq}^{II})^2\right]\cdot J_q\left(\frac{x_{pq}}{R}\rho\right) \\
&\cdot \sin q\phi \cdot \sin\{k_{pq}^{II} z\} \\
&+ \sum_{i,l} C_{il}^{III}\left(-\frac{\mu}{\varepsilon}\right)\left[k^2-(k_{il}^{III})^2\right]\cdot J_l(k_{il}\rho) \\
&\cdot \sin l\phi \cdot \sin\{\frac{n\pi}{a}z\}
\end{aligned}
\tag{24}
$$

$$
\begin{aligned}
H_\rho^I &= \sum_{m,n} G_{mn}^I\left(\frac{m}{\rho}\right)\cdot J_n\left(\frac{x_{mn}}{R}\rho\right) \\
&\cdot \cos n\phi\left[F_{mn}^I e^{-jk_{mn}^I z} - B_{mn}^I e^{jk_{mn}^I z}\right] \\
&+ \sum_{m,n} G_{mn}^I\left(\frac{\varepsilon k_{mn}^I}{\mu}\right)\cdot J_n\left(\frac{x_{mn}'}{R}\rho\right) \\
&\cdot \cos n\phi\left[F_{mn}^I e^{-jk_{mn}^I z} - B_{mn}^I e^{jk_{mn}^I z}\right]
\end{aligned}
\tag{25}
$$

$$
\begin{aligned}
H_\rho^{II} &= \sum_{p,q} G_{pq}^{II}\left(\frac{q}{\rho}\right)\cdot J_q\left(\frac{x_{pq}}{R}\rho\right) \\
&\cdot \cos q\phi\left[F_{pq}^{II} e^{-jk_{mn}^{II}(z-a)} - B_{pq}^{II} e^{jk_{mn}^{II}(z-a)}\right] \\
&+ \sum_{p,q} G_{pq}^{II}\left(\frac{\varepsilon k_{pq}^{II}}{\mu}\right)\cdot\left(\frac{x_{pq}'}{R}\rho\right) \\
&\cdot \cos q\phi\left[F_{pq}^{II} e^{-jk_{mn}^{II}(z-a)} - B_{pq}^{II} e^{jk_{mn}^{II}(z-a)}\right]
\end{aligned}
\tag{26}
$$

$$
\begin{aligned}
H_z^{III} &= \sum_{i,l} G_{il}^{III}\left(-\frac{\varepsilon}{\mu}\right) \\
&\cdot \left[k^2-\left(\frac{l\pi}{a}\right)^2\right]\cos\frac{i\pi}{b}y \cdot \sin\frac{l\pi}{a}z \\
&\cdot \left[F_{il}^{III} e^{-jk_{il}^{III}(x-R)} - B_{il}^{III} e^{jk_{il}^{III}(x-R)}\right]
\end{aligned}
\tag{27}
$$

$$
\begin{aligned}
H_z^{IV} &= \sum_{m,n} C_{mn}^I\left(-\frac{\varepsilon}{\mu}\right)\left[k^2-(k_{mn}^I)^2\right]\cdot J_n\left(\frac{x_{mn}'}{R}\rho\right) \\
&\cdot \cos n\phi \cdot \sin\{k_{mn}^I(a-z)\} \\
&+ \sum_{p,q} C_{pq}^{II}\left(-\frac{\varepsilon}{\mu}\right)\left[k^2-(k_{pq}^{II})^2\right]\cdot J_q\left(\frac{x_{pq}'}{R}\rho\right) \\
&\cdot \cos q\phi \cdot \sin\{k_{pq}^{II} z\} \\
&+ \sum_{p,q} C_{pq}^{II}\left(-\frac{\varepsilon}{\mu}\right)\left[k^2-\left(\frac{l\pi}{a}\right)^2\right]\cdot J_l(k_{il}\rho) \\
&\cdot \cos l\phi \cdot \sin\{\frac{l\pi}{a}z\}
\end{aligned}
\tag{28}
$$

$$
\begin{aligned}
H_{\rho}^{IV} &= \sum_{m,n} C_{mn}^{I}\left(\frac{k_{mn}^{I}\varepsilon}{\mu}\right)\left(\frac{x_{mn}'}{R}\right)\cdot J_n'\left(\frac{x_{mn}'}{R}\rho\right) \\
&\quad\cdot \sin n\phi\cdot\cos\{k_{mn}^{I}(a-z)\} \\
&\quad+\sum_{p,q} C_{pq}^{II}\left(-\frac{k_{pq}^{II}\varepsilon}{\mu}\right)\cdot\left(\frac{x_{pq}'}{R}\right)\cdot J_q'\left(\frac{x_{pq}'}{R}\rho\right) \\
&\quad\cdot \sin q\phi\cdot\cos\{k_{pq}^{II}z\} \\
&\quad+\sum_{i,l} C_{il}^{III}\left(-\frac{\varepsilon k_{il}^{III}}{\mu}\right)\cdot\left(\frac{l\pi}{a}\right)\cdot J_l'(k_{il}\rho) \\
&\quad\cdot \sin l\phi\cdot\cos\frac{l\pi}{a}z \\
&\quad+\sum_{m,n} C_{mn}^{I}\left(-\frac{x_{mn}}{R}\right)\cdot J_n'\left(\frac{x_{mn}}{R}\right) \\
&\quad\cdot \sin n\phi\cdot\cos\{k_{mn}^{I}(a-z)\} \\
&\quad+\sum_{p,q} C_{pq}^{II}\left(-\frac{x_{pq}}{R}\right)\cdot J_q'\left(\frac{x_{pq}}{R}\right) \\
&\quad\cdot \sin q\phi\cdot\cos\{k_{pq}^{II}z\} \\
&\quad+\sum_{i,l} C_{il}^{III}(-k_{il})\cdot J_l'(k_{il}\rho)\cdot\sin l\phi\cdot\cos\frac{l\pi}{a}z
\end{aligned}
\tag{29}
$$

이 된다.

III. 결합계수

종합모드 표현식에 의해 구한 전자계식을 토대로 각 경계면에서의 전계와 자계의 정합조건을 적용한다. 경계면에서 전계의 경계조건을 적용하여 정규화 계수 C_{mn}^{I}, C_{pq}^{II}, C_{il}^{III}을 구하고, 자계의 정합조건을 적용하여 $L^{I}, L^{II}, L^{III}, L^{IV}$을 산출한다. 먼저 $z=0$ ($E_{\rho}^{I}, E_{\rho}^{IV}$)에서 전계의 경계조건을 적용하면 정규화 계수 C_{mn}^{I}는

$$
C_{mn}^{I}=\frac{G_{mn}^{I}}{\sin(k_{mn}^{I}\cdot d)}\ (F_{mn}^{I}+B_{mn}^{I}) \tag{30}
$$

이 되고, $z=a$($E_{\rho}^{II}, E_{\rho}^{IV}$)에서 경계조건을 적용하면 C_{pq}^{II}는

$$
C_{pq}^{II}=\frac{G_{pq}^{II}}{\sin(k_{pq}^{II}\cdot a)}\ (F_{pq}^{II}+B_{pq}^{II}) \tag{31}
$$

된다. $x=R$인 경계조건을 적용하면 계수 C_{il}^{III}를 구할 수 있다.

$$
C_{il}^{III}=\frac{G_{il}^{III}}{\sin(k_{il}^{III}\cdot R)}\ (F_{il}^{III}+B_{il}^{III}) \tag{32}
$$

여기서

$$
\begin{aligned}
G_{mn}^{I} &= \frac{2}{\sqrt{\pi[(k_{mn}^{I}\rho)^2-(n)^2]J_n^2(k_{mn}^{I}\rho)}} \\
&\quad, k_{mn}^{I}=\sqrt{k^2-\left(\frac{x_{mn}}{R}\right)^2} \\
G_{pq}^{II} &= \frac{2}{\sqrt{\pi[(k_{pq}^{II}\rho)^2-(n)^2]J_n^2(k_{pq}^{II}\rho)}} \\
&\quad, k_{pq}^{II}=\sqrt{k^2-\left(\frac{x_{pq}}{R}\right)^2} \\
G_{il}^{III} &= 2\sqrt{\frac{w\mu}{abk_{il}^{III}\left[k_0-\left(\frac{i\pi}{a}\right)^2\right]}} \\
&\quad, k_{il}^{III}=\sqrt{k_0^2-\left(\frac{i\pi}{a}\right)^2-\left(\frac{l\pi}{b}\right)^2}
\end{aligned}
\tag{33}
$$

이다.

식(38)을 식(35)~(37)에 대입한 후 같은 방법으로 자계의 정합조건을 적용하면 각 경계면에서의 진행파와 반사파간의 관계식을 구할 수 있다. 따라서 이를 산란행렬로 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$
\begin{aligned}
\begin{bmatrix} B^{I} \\ F^{II} \\ F^{III} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} F^{I} \\ B^{II} \\ B^{III} \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} -(I+D_T) & D_s & L^{I} \\ D_s & I-D_T & L^{III} \\ -L^{III} & L^{IV} & I-D_c \end{bmatrix} \\
&\quad \begin{bmatrix} D_T-I & -D_s & -L^{I} \\ -D_s & I+D_T & L^{II} \\ L^{III} & L^{IV} & I+D_c \end{bmatrix}\begin{bmatrix} F^{I} \\ B^{II} \\ B^{III} \end{bmatrix}
\end{aligned}
\tag{34}
$$

여기서 각각의 결합계수들은 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
D_T &= Diag\left\{\frac{j}{\tan(k_{mn}^{I}\cdot a)}\right\} \\
&= Diag\left\{\frac{j}{\tan(k_{pq}^{II}\cdot a)}\right\}
\end{aligned}
\tag{35}
$$

$$D_s = Diag\left\{\frac{j}{\sin(k_{mn}^{I}\cdot a)}\right\} = Diag\left\{\frac{j}{\sin(k_{pq}^{II}\cdot a)}\right\} \quad (36)$$

$$D_c = Diag\left\{\frac{j}{\tan(k_{il}^{III}\cdot R)}\right\} \quad (37)$$

$$L^{I} = \frac{G_{il}^{III}}{G_{mn}^{I}}\cdot\left(\frac{k_{il}^{III}}{k_{mn}^{I}}\right)\cdot\left(\frac{n\pi}{R}\right)\cdot\left[\frac{J_i'(k_{il}\rho)}{J_n(\frac{x_{mn}}{R}\rho)}\right]\cdot\frac{j}{\sin(k_{pq}^{II}\cdot d)} \quad (38)$$

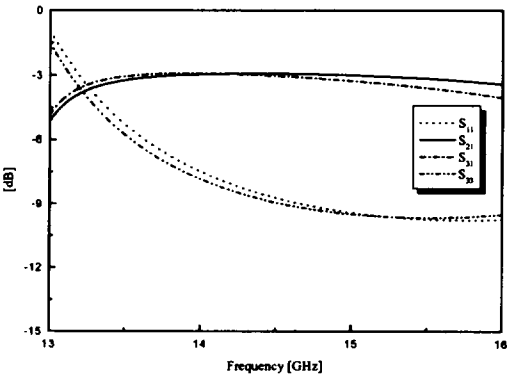
$$L^{II} = \frac{G_{il}^{III}}{G_{pq}^{II}}\cdot\left(\frac{k_{il}^{III}}{k_{pq}^{II}}\right)\cdot\left(\frac{n\pi}{R}\right)\cdot\left[\frac{J_i'(k_{il}\rho)}{J_n(\frac{x_{pq}}{R}\rho)}\right]\cdot\frac{(-1)^i j}{\sin(k_{il}^{II}\cdot d)} \quad (39)$$

$$L^{III} = \frac{G_{mn}^{I}}{G_{il}^{III}}\cdot\left(\frac{k_{mn}^{I}}{k_{il}^{III}}\right)\cdot\left[\frac{J_n(\frac{x_{mn}}{R}\rho)}{J_i(k_{il}\rho)}\right]\cdot\frac{-j}{\sin(k_{il}^{II}\cdot d)} \quad (40)$$

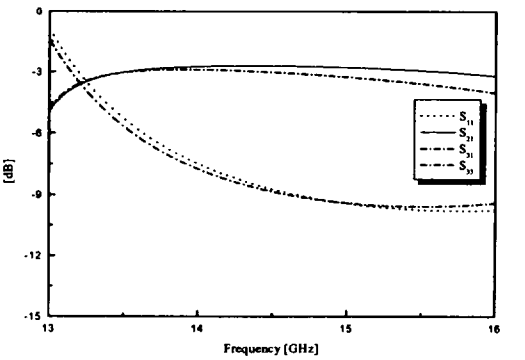
$$L^{III} = \frac{G_{pq}^{II}}{G_{il}^{III}}\cdot\left(\frac{k_{pq}^{II}}{k_{il}^{III}}\right)\cdot\left[\frac{J_q(\frac{x_{pq}'}{R}\rho)}{J_i(k_{il}\rho)}\right]\cdot\frac{-j}{\sin(k_{il}^{II}\cdot R)} \quad (41)$$

IV. 결과 및 고찰

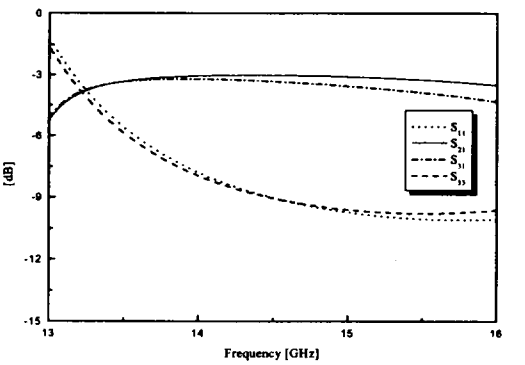
본 논문에서는 위성통신을 수행하기 위한 급전 장치 중 T-접합 분기회로를 해석하였다. T-접합 분기회로의 *TE*모드와 *TM*모드를 해석하였고, 이 두 모드를 종합 모드 표현식에 적용하여 정확한 T-접합 분기부의 전자계 특성을 산출하였다. 종합 모드 표현식에 의한 전자계 성분을 각 영역의 경계조건을 적용하여 T-접합 분기회로의 산란특성 살펴보았다. 본 논문에서 사용한 구형도파관과 원형도파관의 크기는 각각 WR62(a =15.799mm, b=7.899mm), WC55(R=6.985mm)이다. 원형도파관과 구형도파관의 T-분기 회로의 산란특성을 해석하기 위하여 15개의 고차모드를 고려하였다.



(a) Characteristics of the scattering parameter for the dominant mode



(b) Characteristics of the scattering parameter for high order mode of the 5th



(c) Characteristics of the scattering parameter for high order mode of the 10th

Fig. 4 Characteristic of the scattering parameter for the T-junction branch network by high order mode

Fig. 4는 고차모드에 따른 T-접합 분기회로의 산란 특성을 보인 것이다. Fig. 4(a), (b), (c)에 나타낸 것처럼 고차모드의 영향으로 인한 산란특성이 변화됨을 알 수 있었고, 고차모드 수가 증가할수록 T-접합 분기회로의 산란특성을 정확히 분석할 수 있었다.

Fig. 5는 본 논문에서 설계한 원형도파관에 구형도파관을 분기시킨 T-접합 분기회로의 산란특성을 나타낸 그림이다. Fig. 4의 고차모드에 따른 산란특성의 변화를 토대로 본 논문에서는 Fig. 5에 나타낸 것처럼 15개의 고차모드를 고려하여 T-접합 분기회로의 산란 특성을 살펴보았다. Fig. 5에 보여진 것처럼 포트 1과 2에서의 반사계수 S_{11}는 최대 -10dB정도 떨어진 반면 구형도파관에서의 반사계수 S_{33}는 -8dB정도로 나타났다.

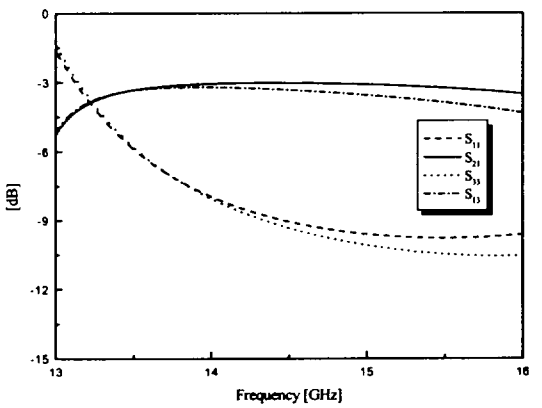


Fig. 5 Characteristic of the scattering parameter for the T-junction branch network

V. 결 론

본 논문에서는 직교모드 변환기에 사용되는 T-접합 분기회로를 해석하였다. T-접합 분기회로의 형태는 공통도파관인 원형 도파관에 구형도파관을 분기시켰다. 각 영역의 벡터 포텐셜을 이용하여 *TE*모드와 *TM*모드를 해석하고, 이를 종합모드 표현식에 적용하여 T-접합부의 불연속 영역의 전자계 성분을 산출하였다. 유도된 전자계 성분을 토대로 결합계수에 적용하여 원형-구형도파관 T-접합 분기회로의 산란특성을 고찰하였고, 15개의 고차모드를 고려하여 원형도파관과 구형도파관의 T-접합 분기회로의 산란 행렬특성을 분석하였다. 그 결과 13.3Ghz~16Ghz에서 통과대역 특성을 보였지만 그다지 양호한 산란특성을 얻을 수 없었다. 이는 공통 도파관인 원형도파관과 구형도파관간에 접합으로 인하여 불연속 경계면이 존재하게 되고, 이러한 부정합 조건으로 인하여 산란특성이 나빠진 것으로 보인다. 이러한 부정합 조건을 제거하기 위해서는 원형 도파관과 구형도파관사이의 경계면에 유도성 창이나 용량성 창을 삽입하여 통과대역내 양호한 산란특성을 갖는 T-접합 분기회로를 설계하는 것이 중요하다.

참고 문헌

1) A. C. Beck, 1955, Measurement techniques for multimode waveguides, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-3, pp.35-41.

2) P. Krauss, F. Arndt, 1995, Rigorous mode-matching method for the modal analysis of the T-junction circular to sidecoupled rectangular waveguide, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-S, pp.1355-1358.

3) A. K. Jain, and G. P. Srivastava, 1973, "A Circular waveguide hybrid-T and its applications", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-21, pp.482-483.

4) G.L. Matthaei, L. Young, and E.M.T. Jones, 1948, *Microwave filters, Impedance-matching networks and coupling structures*, New York : McGraw Hill.

5) A. Melloni, M. Politi, G. G. Gentili, and G. Macchiarella, 1992, "Field design of TE mode waveguide passband filters", in *Proc. 22nd European Microwave Conf.*, Espoo, pp.553-538.

6) T. Sieverding, and F. Arndt, 1992, "Field theoretic CAD of open or aperture matched T-junction coupled rectangular waveguide structures",

IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-40, pp.353-362.

7) J. M. Reiter, and F. Arndt, 1992, "A boundary contour mode-matching method for the rigorous analysis of cascaded arbitary shaped H-plane discontinuities in rectangular waveguide", *IEEE Microwave and Guided wave Letters*, Vol. 2, pp.403-405.