

원형 도파관 정합기의 FDTD에 의한 해석 (Analysis of circular waveguide transformer using FDTD)

이 동 국*, 홍 재 표**
(Dong-Kuk Lee, Jae-Pyo Hong)

요약 본 논문에서는 시간영역 유한차분법(FDTD)을 이용하여 서로 다른 두 원형 도파관의 정합을 위한 원형도파관 정합기를 해석하였다. 축대칭 구조이므로 3차원 문제를 2차원 문제로 변환한 2차원 FDTD 알고리즘을 사용하였고, 상대적으로 반경의 차이가 큰 불연속 도파관에 적용되는 두종류의 정합기를 제안하였다. 하나는 유전체가 부분적으로 채워진 정합기이고, 다른 하나는 테이퍼된 유전체봉이 삽입된 정합기이다. 제안된 정합기에서 정합기의 길이와 직경 및 유전체의 직경 등의 파라미터 변화에 따른 특성을 수치해석하여 비교하였다.

Abstract The finite-difference time-domain (FDTD) method is used to analyze circular waveguide transformer in order to match different two waveguides. 2-dimensional cylindrical FDTD algorithm is applied for rotationally symmetric structure. The transformer is inserted at a circular-to-circular waveguide junction and two type transformers are proposed. One is a partially dielectric filled circular waveguide type and the other is filled a tapered circular dielectric rod. The numerical results are derived for various structure parameters, such as transformer length, dielectric diameter and waveguide diameter.

1. 서 론

마이크로파와 밀리미터파 영역에서 도파관 정합기는 혼 안테나와 유전체 봉 안테나, 공진기의 급전 및 여러가지 도파관 소자들의 집합 등에 널리 사용되고 있다. 이러한 정합기의 해석과 설계에 시간영역 유한차분법(FDTD : Finite Difference Time Domain)을 이용한 많은 연구가 진행[1-3]되고 있으며, 특정한 문제에 대한 진보된 형태의 정합기 개발이 요구되고 있다.

편미분 방정식을 이용한 시간영역 해석인 시간영역 유한차분법인 FDTD 방법은 1966년 K. Yee[4]에 의해 처음으로 제시되었다. 이 방법은 컴퓨터 성능의 발전으로 인해 계산속도가 빨라지고, 적용범위가 광범위해지면서 다양한 전자기 문제에 적용되고 있다.

FDTD 방법은 맥스웰 편미분 방정식을 공간과 시

간에 직접 적용하므로 수치해석 방법 자체가 매우 단순하고, 시간영역 편미분 방정식을 사용하여 해를 구하므로 행렬 계산이 필요없는 장점이 있다. (모멘트방법이나 주파수 영역의 편미분 방정식을 사용하는 경우에는 행렬계산이 필수적이다.) 또 FDTD방법은 볼륨내에서 모든 시간에 필드의 변화를 볼 수 있기 때문에 전자기파를 물리적으로 이해하는데 도움이 되는 방법이다. 그외의 장점으로 한번의 전원인가로 광대역 응답을 얻을 수 있으며, 임의의 3차원으로 구성된 기하학적 모형의 해석에도 용이하게 사용된다. 또 완전도체에서부터 일반 도체 및 전도도가 낮은 물체와의 상호작용에 관한 해석에도 사용 가능하며, 손실 유전체와 자화 물질 등 주파수에 따라 특성이 변하는 물질에 대한 해석에도 적용가능하다. 그러므로 근거리 전계로부터 유도된 원거리 전계를 포함한 산란파문제, 안테나패턴문제, 전류분포문제 및 레이더크로스섹션(RCS) 등의 전자기파의 복사와 산란 및 간섭 문제에

* 경북대학교 대학원

** 경일대학교 전자정보공학과

널리 적용이 가능하다[5-13].

본 논문에서 FDTD 방법을 이용하여 서로 다른 두 원형 도파관의 정합을 위해 사용되는 원형도파관 정합기를 해석하였다. 일반적으로 도파관 문제를 해석하는데 FDTD 방법은 기존에 주로 사용되고 있는 모멘트법에 비해 계산시간과 메모리 측면에서 비효율성을 지니고 있다. 그러나 축대칭 구조의 경우에는 3차원 문제를 2차원 문제로 변환할 수 있으므로 단점으로 지적된 계산시간과 메모리 문제를 극복할 수 있다. 또 FDTD 방법은 다른 해석방법으로 해결하기 어려운 복잡한 구조에 대하여 쉽게 접근할 수 있는 큰 장점을 지니고 있다. 따라서 본 논문에서는 축대칭 구조인 원형도파관에서 3차원 문제를 2차원 문제로 변환한 2차원 FDTD 알고리즘을 사용하여 상대적으로 반경의 차이가 큰 불연속 도파관 정합기를 해석하였으며, 두 종류의 정합기를 제안하였다. 하나는 유전체가 부분적으로 채워진 정합기이고, 다른 하나는 테이퍼(taper)된 유전체봉이 삽입된 정합기를 제안하였으며, 제안된 정합기에서 도파관의 길이와 직경, 유전체의 직경 및 유전체봉의 각도에 따른 주파수 특성을 비교하여 분석하였다.

2. 이론

2-1. FDTD의 기본 이론

FDTD 방법은 편미분 방정식 형태의 맥스웰 방정식을 시간과 공간영역에 대해 유한차분법(FDM : Finite Difference Method)을 적용하여 전계와 자계의 값을 구하는 수치해석 방법이다.

이 방법에서는 전계와 자계의 위치가 그림 1과 같이 공간과 시간 영역에서 각각 반 스텝($\Delta k/2$, $\Delta t/2$)만큼 어긋나도록 가정하였고, 어느 한시간 스텝(n)에서 구해진 자계(또는 전계) 성분에 의해 $\Delta t/2$ 후의 전계(또는 자계) 성분을 갱신하도록 되어 있다. 즉, 자계의 각 성분의 값을 계산한 뒤 컴퓨터 메모리에 저장하고, 저장된 자계의 값에 의해 $\Delta t/2$ 시간 후에 전계의 각 성분의 값을 계산한다. 과도현상이 사라질 때까지 위 과정을 반복하여 수행하면 된다.

FDTD 방법은 시간영역에서의 모든 해석공간을 단위격자로 나누기 때문에 어느 시간 스텝의 공간 영역

의 점에 대한 전자계를 표현할 수 있는 기호가 있어야 한다.

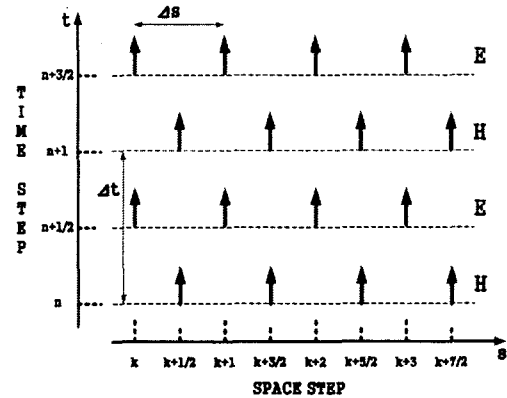


그림 1. 공간과 시간 영역에서 전계와 자계의 위치

일반적으로 전계와 자계의 함수는 시간과 공간에 대한 함수로서 $U(s, t)$ 으로 표현 가능하다. FDTD 방법을 적용시키기 위하여 공간과 시간에 대해 단위 길이로 나누었다. $n\Delta t$ 시간에서의 어느 한점 $k\Delta s$ 에서 함수 U 의 표현은 다음과 같다.

$$U^n(k) = U(k\Delta s, n\Delta t) \quad (1)$$

함수 U 를 $U^n(k+1/2)$ 과 $U^n(k-1/2)$ 에 대해 테일러 급수로 전개하여 두식을 빼면 다음과 같은 공간에 대한 미분 연산자에 대한 유한차분 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial s} U^n(k) = \frac{U^n(k+1/2) - U^n(k-1/2)}{\Delta s} \quad (2)$$

시간 미분 연산자에 대한 유한차분 방정식 역시 유사한 방법으로 구할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} U^n(k) = \frac{U^{n+1/2}(k) - U^{n-1/2}(k)}{\Delta t} \quad (3)$$

그리고 주어진 시간에 대한 평균은 다음 식 (4)의 평균적 근사법을 사용한다.

$$U^n(k) = \frac{U^{n+1/2}(k) + U^{n-1/2}(k)}{2} \quad (4)$$

손실이 없는 매질에 대한 시간적 변화를 갖는 맥스웰 전계 및 자계 편미분 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (5.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (5.2)$$

식 (5)에서 \mathbf{E} 와 \mathbf{H} 는 전계[V/m]과 자계[A/m]이고, ϵ 과 μ 는 매질의 유전율과 투자율이다. \mathbf{E} 와 \mathbf{H} 는 3차원 벡터이므로, 각각 3개의 방향성분의 대한 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \quad (6.3)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \quad (6.4)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (6.5)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \quad (6.6)$$

식 (6)의 6개의 결합된 편미분 방정식이 일반적인 3차원 매질에 대한 전자파 문제를 해석하기 위한 FDTD 방법의 기초가 된다. Yee[4]는 그림 2와 같이 단위격자의 모서리에 전계성분을 두었고, 격자의 면에 자계 분을 두었다.

Yee의 단위격자는 내부의 전계와 자계의 위치가 각각 벡터성분의 curl 연산을 수행할 수 있도록 설계되어 있을 뿐만 아니라 동시에 Gauss 법칙을 내재적으로 만족할 수 있도록 설계되어 있다.

6개의 편미분 방정식의 시간과 공간에 대한 미분 연산자에 유한 차분법을 적용하여 나타내면 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} H_x^{n+1/2} \left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) &= H_x^{n-1/2} \left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) \\ &+ \frac{\Delta t}{\mu \Delta z} [E_y^n \left(i, j + \frac{1}{2}, k + 1 \right) - E_y^n \left(i, j + \frac{1}{2}, k \right)] \\ &- \frac{\Delta t}{\mu \Delta y} [E_z^n \left(i, j + 1, k + \frac{1}{2} \right) - E_z^n \left(i, j, k + \frac{1}{2} \right)] \end{aligned} \quad (7.1)$$

$$\begin{aligned} H_y^{n+1/2} \left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) &= H_y^{n-1/2} \left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) \\ &+ \frac{\Delta t}{\mu \Delta x} [E_z^n \left(i + 1, j, k + \frac{1}{2} \right) - E_z^n \left(i, j, k + \frac{1}{2} \right)] \\ &- \frac{\Delta t}{\mu \Delta z} [E_x^n \left(i + \frac{1}{2}, j, k + 1 \right) - E_x^n \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right)] \end{aligned} \quad (7.2)$$

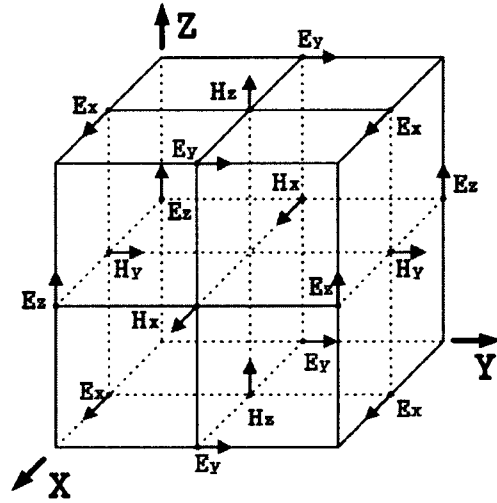


그림 2. Yee 단위격자

$$\begin{aligned} H_z^{n+1/2} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) &= H_z^{n-1/2} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) \\ &+ \frac{\Delta t}{\mu \Delta y} [E_x^n \left(i + \frac{1}{2}, j + 1, k \right) - E_x^n \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right)] \\ &- \frac{\Delta t}{\mu \Delta x} [E_y^n \left(i + 1, j + \frac{1}{2}, k \right) - E_y^n \left(i, j + \frac{1}{2}, k \right)] \end{aligned} \quad (7.3)$$

$$\begin{aligned} E_x^{n+1} \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) &= E_x^n \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) \\ &+ \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta y} [H_z^{n+1/2} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) \\ &- H_z^{n+1/2} \left(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k \right)] \\ &- \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta z} [H_y^{n+1/2} \left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) \\ &- H_y^{n+1/2} \left(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2} \right)] \end{aligned} \quad (7.4)$$

$$\begin{aligned}
E_y^{n+1}(i, j + \frac{1}{2}, k) &= E_y^n(i, j + \frac{1}{2}, k) \\
&+ \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta z} [H_x^{n+1/2}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) \\
&- H_x^{n+1/2}(i, j + \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2})] \\
&- \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta x} [H_z^{n+1/2}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k) \\
&- H_z^{n+1/2}(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k)]
\end{aligned} \tag{7.5}$$

$$\begin{aligned}
E_z^{n+1}(i, j, k + \frac{1}{2}) &= E_z^n(i, j, k + \frac{1}{2}) \\
&+ \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta x} [H_y^{n+1/2}(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}) \\
&- H_y^{n+1/2}(i - \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2})] \\
&- \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta y} [H_x^{n+1/2}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) \\
&- H_x^{n+1/2}(i, j - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2})]
\end{aligned} \tag{7.6}$$

2-2. 원통형 FDTD 방법

일반적인 축대칭 구조에 대하여 3차원 문제를 2차원 문제로 환원하여 주어진 문제에 대해 2차원 FDTD 방법을 적용하기 위한 과정을 나타내면 다음과 같다.

그림 3에서와 같이 대칭축을 z 축으로 잡으면 원통좌표계에서 전자계의 ϕ 방향 함수를 식 (8)에서와 같이 Fourier 급수로 전개할 수 있으므로 ϕ 방향은 단위셀로 나누지 않아도 된다. 따라서 전체 계산 영역은 3차원에서 $r-z$ 반평면상의 2차원으로 축소될 수 있다[1].

$$E = \sum_{m=0}^{\infty} (\underline{e}_u \cos m\phi + \underline{e}_v \sin m\phi) \tag{8.1}$$

$$H = \sum_{m=0}^{\infty} (\underline{h}_u \cos m\phi + \underline{h}_v \sin m\phi) \tag{8.2}$$

단위격자를 그림 3 및 4와 같이 정의하고 맥스웰 방정식의 적분형을 식 (8)에 적용하면 전자계 성분들의 유한차분식을 얻을 수 있다. 이는 cosine과 sine함수로 나누어진 독립적인 두 개의 수식 조합으로 표현된다. 그 중 하나에 대해서만 계산하며 식 (9)에서는 전계에 관한 식만을 나타내었다.

$$\begin{aligned}
e_{rv}(i, k, n+1) &= e_{rv}(i, k, n) \\
&+ \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta z} [h_{\phi v}(i, k + \frac{1}{2}, n + \frac{1}{2}) \\
&- h_{\phi v}(i, k - \frac{1}{2}, n + \frac{1}{2})]
\end{aligned} \tag{9.1}$$

$$\begin{aligned}
e_{\phi u}(i, k, n+1) &= e_{\phi u}(i, k, n) \\
&- \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta r} [h_{zu}(i + \frac{1}{2}, k, n + \frac{1}{2}) \\
&- h_{zu}(i - \frac{1}{2}, k, n + \frac{1}{2})] \\
&+ \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta z} [h_{ru}(i, k + \frac{1}{2}, n + \frac{1}{2}) \\
&- h_{ru}(i, k - \frac{1}{2}, n + \frac{1}{2})]
\end{aligned} \tag{9.2}$$

$$\begin{aligned}
e_{zv}(i, k, n+1) &= e_{zv}(i, k, n) \\
&+ \frac{(i+1/2)\Delta t}{\epsilon i \Delta r} h_{\phi v}(i + \frac{1}{2}, k, n + \frac{1}{2}) \\
&- \frac{(i-1/2)\Delta t}{\epsilon i \Delta r} h_{\phi v}(i - \frac{1}{2}, k, n + \frac{1}{2}) \\
&+ \frac{m\Delta t}{\epsilon i \Delta r} h_{ru}(i, k, n + \frac{1}{2})
\end{aligned} \tag{9.3}$$

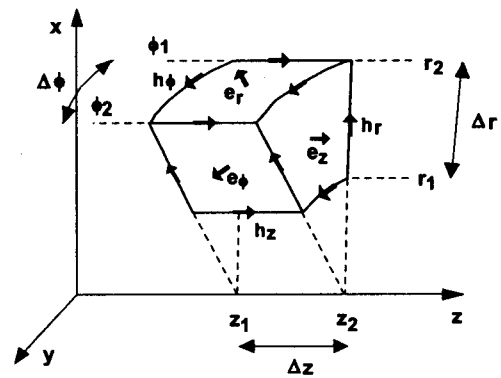


그림 3. 회전대칭구조에서 원통좌표계의 단위격자

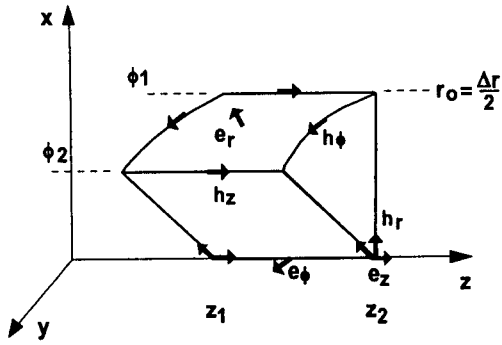


그림 4. z축상에 위치하는 단위격자

여기서 i, k 는 각각 r, z 방향의 공간스텝의 첨자이다.

z 축상에 위치하는 성분들은 위의 방법으로 유한차분식을 구할 수 없으므로 특별히 고려되어야 하는데 계산과정에서는 e_z 성분만 필요하다. z 축상의 e_z 성분은 그림 4에서 $\Delta r/2$ 떨어진 h_ϕ 의 적분 경로를 통해 유한차분식으로 나타낼 수 있다.

$$e_{zv}(0, k, n+1) = e_{zv}(0, k, n) + \frac{4\Delta t}{\epsilon\Delta r} h_{\phi v}\left(\frac{1}{2}, k, n + \frac{1}{2}\right) \quad (10)$$

알고리즘이 안정화될 시간스텝의 조건은 다음과 같다.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{sc}, \quad s \approx m+1 : m > 0 \\ s = \sqrt{2} \quad : m = 0 \\ c \text{는 광속} \quad (11)$$

흡수경계조건으로는 임의의 좌표계에 대해 효율적으로 적용이 가능한 UPML 방법[2]을 적용하였다. Stretched coordinate 방법에서 유도된 uniaxial tensor 매질을 이용한 UPML 흡수경계조건을 원통형 좌표계에 대해서 다음과 같이 적용하였다.

$$j\omega\epsilon_0 \overline{s_c} \mathbf{E} = \nabla \times \mathbf{H} \quad (12.1)$$

$$j\omega\mu_0 \overline{s_c} \mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{E} \quad (12.2)$$

이때 흡수체로 사용되어지는 uniaxial tensor는 stretched coordinate 방법에 의해 유도되며 다음 식과 같다.

$$\overline{s_c} = \begin{bmatrix} s_z \hat{r} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{s_z s_r \hat{r}}{\hat{r}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{s_r \hat{r}}{s_z \hat{r}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서

$$s_r = 1 - j \frac{\sigma_r(r)}{\omega\epsilon_0}$$

$$s_z = 1 - j \frac{\sigma_z(z)}{\omega\epsilon_0}$$

$$\hat{r} = \begin{cases} r & r < r_0 \\ r - j \frac{1}{\omega\epsilon_0} \int_{r_0}^r \sigma_r(r') dr & r > r_0 \end{cases}$$

이다.

전원인가 방법은 입사면에서 원형도파관의 기본모드인 TE_{11} 형태를 인가하였으며, 입사면을 기준으로 입사파와 반사파가 모두 존재하는 전영역과 반사파만 존재하는 영역으로 분리하여 한쪽 방향으로만 파가 진행하도록 하는 전영역/반사영역 전원인가법을 사용하였다. 이 방법은 단일주파수에 대해서 반사계수를 쉽게 구할 수 있는 장점이 있다.

2-3. 정합기 해석

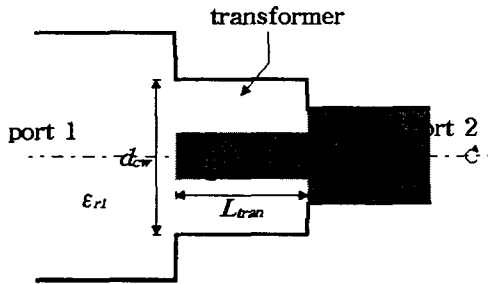
일반적으로 도파관내에서 유전체가 동일하고, 크기가 비슷한 두 도파관을 정합하기 위해서는 같은 종류의 도파관에 크기만 약간 다른 도파관을 삽입하여 정합기로 사용한다. 이때 도파관내에서는 기본모드의 임피던스만 정합시키는 관점에서 정합 도파관의 모든 치수가 결정된다.

그러나 두 도파관 규격의 차이가 크고 도파관내에 채워지는 유전체의 유전율이 서로 다를 경우에는 위

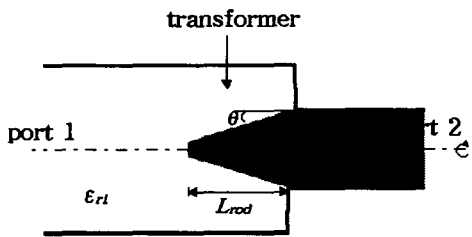
에서 설명한 도파관 정합기를 적용하게 되면 정합단의 차단(cutoff)현상으로 인하여 정합기의 주파수 특성이 현저히 떨어지게 된다. 또 상대적으로 고차모드들의 기여도가 커지므로 기본모드의 임피던스 정합만으로는 정확한 정합기의 설계가 불가능하게 된다.

그러므로 본 논문에서는 두 도파관 규격의 차이가 크고 도파관내에 채워지는 유전체의 유전율이 서로 다를 경우에 최적의 정합기 특성을 갖기 위해 그림 5에서와 같이 두 종류의 정합기 모델들을 제시하여 각 모델의 특성과 설계방법을 제시하였다.

먼저 그림 5(a)에서는 원형 정합도파관내에 유전체가 부분적으로 채워진 정합기를 나타내고, 이를 모델 A라고 이름하였다. 그림 5(b)에서는 테이퍼된 유전체 봉으로 구성된 정합기를 나타내며, 이를 모델 B라고 하였다.



(a) 부분적으로 유전체가 채워진 정합기:모델 A



(b) 테이퍼된 유전체 봉으로 구성된 정합기:모델 B

그림 5. 제안된 두종류의 정합기

3. 수치해석 결과 및 검토

그림 5에서와 같이 유전체가 부분적으로 채워진 정합기인 모델 A와 테이퍼된 유전체 봉이 삽입된 정합기인 모델 B인 두 가지 모델에 대하여 정합기의 여러 가지 파라미터의 변화에 따른 특성들을 FDTD 방법으로 수치해석을 하였다.

그림 5에서와 같이 원형도파관의 입력단(port 1)과 출력단(port 2)의 도파관 직경을 각각 28mm와 14mm로 하였다. 이때 원형도파관에는 기본모드만 전파하게 된다. 그리고 각 원형도파관내의 비유전율 ϵ_{r1} 과 ϵ_{r2} 는 각각 1과 4 으로 두었다.

그림 6에서는 부분적으로 유전체가 채워진 모델 A 정합기에 대하여 본 논문에서 제시한 FDTD 방법으로 구한 수치결과와 상용 Package인 HFSS를 사용하여 시뮬레이션한 결과를 비교하였다. 여기서 정합기의 원형도파관의 직경 d_{cw} 는 24mm이며, 정합기내의 유전체 직경 d_{tran} 은 12mm이고, 정합기의 길이 L_{tran} 는 7mm로 하였다. 그림 6에서 실선은 본 논문에서의 FDTD 방법에 의한 결과이고, 점(dot)은 HFSS를 사용한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 본 논문에서 제시한 결과와 기존의 상용 프로그램에 의한 결과가 거의 일치함을 확인할 수 있다.

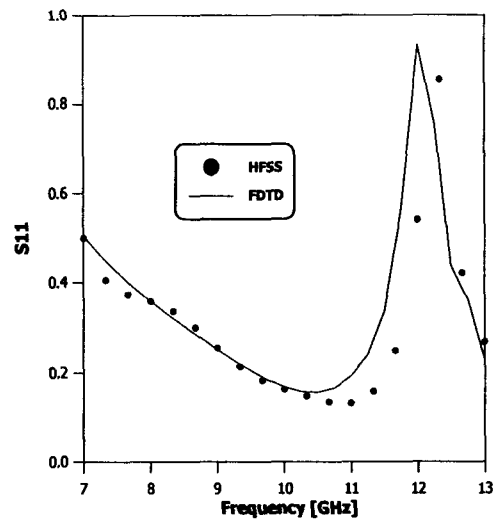


그림 6. 정합기 모델 A에 대한 FDTD 방법과 HFSS를 사용한 수치결과

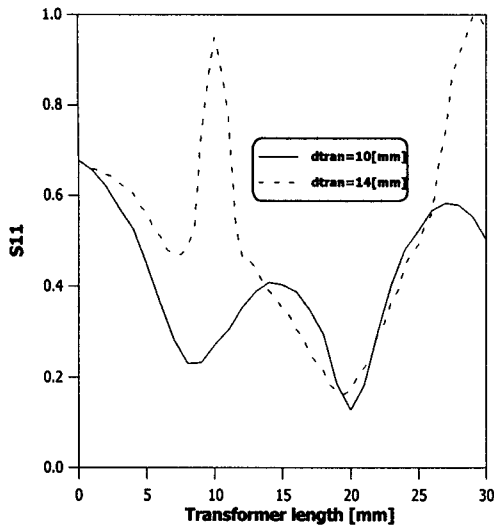


그림 7. 정합기 길이의 변화에 대한 S_{11}

다음으로 정합기 모델 A에서 정합기의 길이 L_{tran} 의 변화에 따른 특성을 해석하였다. 주파수는 10GHz 이고, 정합기의 도파관 직경 d_{tran} 은 28mm로 고정하였다. 입력단과 출력단 도파관의 직경과 유전율은 그림 6에서와 동일하게 하였다. 그리고 정합기내의 유전체의 직경 d_{tran} 은 10mm와 14mm 두 경우에 대해 정합기의 길이에 따른 S_{11} 을 수치해석하여 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서와 같이 정합기 길이의 변화에 따라 각 반사파들의 중첩이나 상쇄가 결정되고 이에 따라 반사계수도 변하게 됨을 알 수 있다.

그림 8과 9에서는 각각 모델 A 정합기의 내부 유전체 직경 d_{tran} 과 도파관 직경 d_{cw} 의 변화에 따른 S_{11} 을 수치해석하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 정합단의 내부 유전체 직경과 도파관 직경에 따라 정합단 내의 모드 수와 모드의 성질이 결정됨을 알 수 있다. 그러므로 정합기 도파관의 직경과 유전체의 직경 등의 변수들에 의해 정합기의 특성이 결정되므로 이러한 변수들을 적절히 조절하여 특성과 목적에 맞는 정합기를 설계할 수 있음을 확인하였다.

또 하나의 정합기인 테이퍼된 유전체 봉의 구조를 갖는 모델 B에 대해서 정합특성을 해석하였다. 그림 10에는 여러 가지의 유전체 봉의 길이 L_{rod} 에 대해 테이퍼 각도 θ 에 따른 S_{11} 의 특성을 수치해석하여 그 결과를 나타내었다. 여기서 유전체 봉의 길이는 각

각 4mm, 8mm, 15mm 및 20mm인 4가지에 대해 고려하였고, 입력단과 출력단의 직경과 유전율은 그림 6의 경우와 동일하게 두었다. 그림에서 보는 바와 같이 유전체 봉의 길이와 각도에 따라 반사계수가 변화하므로 이 변수들을 적절히 조절하여 목적에 맞는 정합기에 적용될 수 있음을 확인하였다.

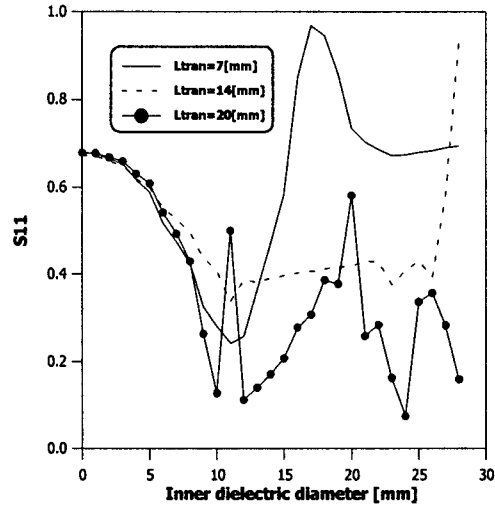


그림 8. 정합기 내부 유전체의 지름의 변화에 대한 S_{11}

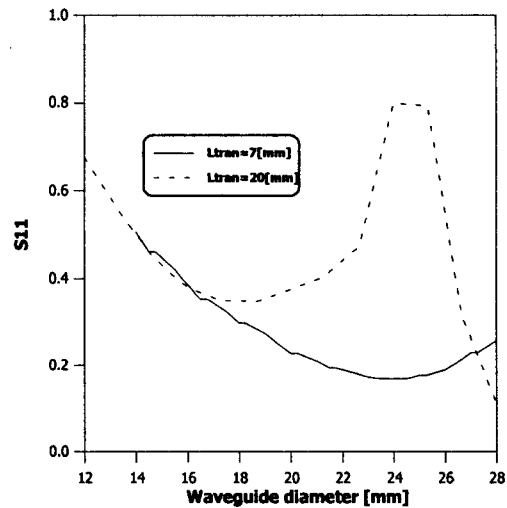


그림 9. 정합기의 도파관 직경의 변화에 대한 S_{11}

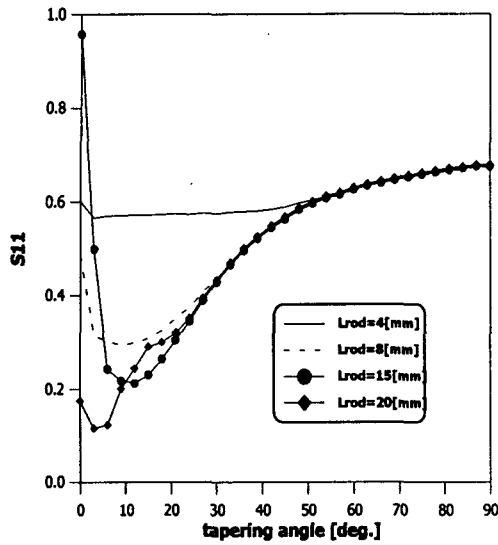


그림 10. 정합기 모델 A의 정합 특성

4. 결 론

본 논문에서는 시간영역 유한차분법(FDTD)을 이용하여 서로 다른 두 원형도파관을 정합하기 위한 도파관 정합기를 제시하였으며, 이를 해석하였다. 임의의 구조에 대해 쉽게 적용할 수 있는 FDTD 방법을 이용하여 복잡한 도파관의 불연속 문제를 해석하였으며, 또 원형도파관은 축대칭 구조이므로 3차원 문제를 2차원 문제로 변환한 2차원 FDTD 알고리즘을 제안된 두 종류의 정합기에 적용하였다. 제안된 정합기는 부분적으로 유전체가 채워진 형태와 유전체봉으로 구성된 형태이다.

제안된 정합기에서 유전체의 직경과 정합기의 길이와 직경, 유전체봉의 길이와 각도에 따른 정합기의 특성을 해석하였고, 이를 이용하여 주어진 조건에 맞는 적합한 정합기를 설계할 수 있음을 확인하였다. 또한 특정한 정합기 구조에 대해서도 위에서 제시한 방법으로 해석과 설계가 가능하며 다른 도파관 소자에 대해서도 제시한 FDTD 방법이 효과적으로 사용될 수 있다.

참 고 문 헌

[1] Y. Chen, R. Mittra, P. Harms, "Finite-Difference Time-Domain Algorithm for Solving Maxwell's

Equations in Rotationally Symmetric Geometries," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 44, no. 6, pp. 832-838, June 1996.

- [2] Stephen D. Gedney, "An Anisotropic Perfectly Matched Layer-Absorbing Medium for the Truncation of FDTD Lattices," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 44, no. 12, Dec. 1996.
- [3] Raj. Mitra and P. H Harms, "A New Finite-Difference Time-Domain(FDTD) Algorithm for Efficient Field Computation in Resonator Narrow-Band Structures," IEEE Trans. Microwave Guided Wave Lett., vol. 3, no. 9, pp. 316-318, Sept. 1993.
- [4] K. S. Yee, "Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 14, pp. 302-307, May 1966.
- [5] A. Taflove and M. E. Brodwin, "Numerical Solution of Steady-State Electromagnetic Scattering Problems Using the Time-Dependent Maxwell's Equations," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 23, pp. 623-630, Aug. 1975.
- [6] R. Holland, "Threde: A Free-Field EMP Coupling and Scattering Code," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 24, pp. 2416-2421, Dec. 1977.
- [7] K. Kunz and K. M. Lee, "A Three-Dimensional Finite-Difference Solution of the External Response of an Aircraft to a Complex Transient EM Environment: Part I-the Method and its Implementation," IEEE Trans. Electromagnet. Compat., vol. 20, pp. 328-333, May 1978.
- [8] E. A. Navarro, T. M. Bordallo, J. N. Miralles, "FDTD Characterization of Evanescent Modes-Multimode Analysis of Waveguide Discontinuities," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 48, no. 4, pp. 606-610, April 2000.
- [9] M. Bingle, D. B. Davidson, J. H. Cloete, "Scattering and Absorption by Thin Metal Wires in Rectangular Waveguide-FDTD Simulation and Physical Experiments," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 50, no. 6, pp. 1621-1627, June 2002.
- [10] 이동국의 2인, "원형 도파관 정합기의 FDTD방법을 이용한 해석 및 설계", 대한전자공학회 추계 마

이크로파 및 전파학술대회 논문집, 2000년 9월.

- [11] 이대현외 4인, "시간 영역 유한 차분법을 이용한 원형 유전체 봉 안테나의 해석", 대한전자공학회 춘계 마이크로파 및 전파학술대회 논문집, 2000년 4월.
- [12] 이동국, 조영기, "일반적인 축대칭 안테나의 FDTD 방법을 이용한 해석 및 설계", 대한전자공학회 춘계 마이크로파 및 전파학술대회 논문집, pp. 401-404, 2001년 5월
- [13] 허유강, 홍재표, 조영기, "FDTD 방법을 이용한 slotted-PIPA의 해석", 대한전자공학회 춘계 마이크로파 및 전파학술대회 논문집, pp.315-318, 2001년 5월



이 동 국(Dong-Kuk Lee)

1998년 경북대학교 전자공학과
2000년 경북대학교 대학원
전자공학과 (공학석사)
2000년~현재: 경북대학교 전자공학과(박사과정)

2002년 ~현재 국방과학연구소 연구원
관심분야 : 전자장 수치해석, 안테나, 도파관소자,
페라이트 위상변위기



홍 재 표 (Jae-Pyo Hong)

1981년 경북대학교 전자공학과
1983년 경북대학교 대학원
전자공학과(공학석사)
1989년 경북대학교 대학원

전자공학과(공학박사)
1990년 3월-현재: 경일대학교 전자정보공학과 교수
관심분야 : 마이크로파소자, 안테나, 전파전파