

도파관 구조의 FDTD 해석을 위한 새로운 흡수경계조건

正會員 朴 勉 周*, 南 相 郁**

A New Absorbing Boundary Condition for the FDTD Simulation of Waveguides

Myun-Joo Park*, Sangwook Nam** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 도파관 문제의 FDTD 해석에 쓰일 수 있는 새로운 흡수경계조건을 제안하였다. 이 흡수경계조건은 도파관 내에서의 시간영역 전자파 전파에 대한 정확한 해석적 표현식에 바탕을 두고 있다. 이로부터 유도된 흡수경계조건은 convolution 형태이며, 이 convolution의 kernel에 해당하는 이산그린함수가 매우 간단한 해석적인 식으로 표현된다. 또한 이 흡수경계조건은 복잡한 단면을 가지는 여러 가지 형태의 도파관 구조의 해석에 널리 사용될 수 있다.

ABSTRACT

This paper proposes a new absorbing boundary condition(ABC) for the FDTD simulation of waveguide problems. It is based on the exact analytic expression for the time domain EM wave propagation in the waveguide. The ABC derived from the expression has a convolution form whose kernel (the discrete Green's function) has a simple, closed form formula. Also, it is applicable to the wide variety of waveguide types with conducting boundaries and complex cross-sectional shapes.

I. 서 론

FDTD방법으로 전자파 문제를 해석하고자 할 때, 계

산영역을 줄이면서 오차가 적은 결과를 얻기 위해서는 효율적이고 정확한 흡수경계조건(absorbing boundary condition, ABC)이 필요하게 된다. 따라서 이에 대해서는 FDTD 응용의 초기단계에서부터 많은 연구가 이루어져, Mur[1]의 흡수경계조건 등 여러 가지 다양한 방법들이 제안되고, 실제의 FDTD 프로그램에도 적용되었다.

*서울대학교 박사과정 재학중

**서울대학교 공과대학 전기공학부 교수

論文番號:96314-1002

接受日字:1996年 10月 2日

그러나 지금까지 제안된 대부분의 흡수경계조건들은 자유공간에서의 평면파전파를 대상으로 하여 유도된 것들이기 때문에, 이를 도파관 문제에 그대로 적용할 수 없는 경우가 많다. 도파관 문제에 있어서는 자유공간에서와는 달리 전자파의 전파속도가 주파수에 따라 크게 달라지는 분산(dispersion)특성이 나타나기 때문에, 여기에 단순한 평면파 흡수경계조건만을 적용할 경우 그 흡수성능이 크게 떨어지게 된다. 따라서, 도파관 문제에 적합한 새로운 흡수경계조건이 필요하게 되어, 이에 대해 많은 연구가 이루어져 왔다. 이런 연구들을 통해 지금까지 제안된 여러 도파관 흡수경계조건들 중 그 성능이 가장 우수한 것으로는 PML[2]과 diakoptics에 기반한 convolution 형태의 흡수경계조건[3, 4, 5]을 들 수 있다.

PML은 원래 자유공간에서의 전자파 흡수에 이용되었으나, Reuter[2] 등에 의한 연구결과 도파관 구조에서도 매우 우수한 흡수성능을 보이는 것으로 나타났다. 그러나, 이 방법의 한가지 단점은 원래의 FDTD 계산영역 외에 PML을 위한 별도의 영역이 추가되어야 하기 때문에 상당한 양의 컴퓨터 메모리와 계산시간이 부가적으로 필요하게 된다는 점이다.

Diakoptics에 기반한 흡수경계조건에서는 이산그린함수(discrete Green's function)라고 하는 일종의 임펄스 응답함수에 경계로 입사되는 전자파를 convolution 함으로써 경계에서의 전자파를 계산한다[3, 4, 5]. 이때 사용되는 이산그린함수를 얻어내는 방법에는 크게 나누어 수치적인 방법과 해석적인 방법이 있다.

수치적인 방법은 실제의 도파관 구조에 임펄스 함수를 소스로 사용한 FDTD 해석을 통해 직접 그린함수를 계산해 내는 방법이다[3]. 이런 방법으로 계산된 그린함수에는 FDTD 알고리즘 자체에서 발생하게 되는 격자 분산(grid dispersion) 등 여러 가지 부차적인 효과들도 자연스럽게 고려되어 있기 때문에 수치적인 의미에서 가장 정확한 그린함수라고 할 수 있다. 따라서 이를 이용한 흡수경계조건은 성능도 매우 우수하다. 그러나 단지 그린함수만을 구하기 위한 별도의 FDTD 해석이 필요하며, FDTD의 해석조건이 달라질 경우 매번 새로운 수치계산을 통해 그린함수를 다시 계산해야 하는 번거로움이 있다.

이런 수치적인 방법의 불편함을 해소한 해석적인 그린함수의 예로서 Moglie[4], Tentzeris[5] 등의 방법

을 들 수 있다. Moglie[4]의 방법에서는 각 도파관 모드들의 특성임피던스에 Laplace 변환을 이용하였으며, Tentzeris[5] 등은 주파수영역의 그린함수에 Fourier 변환과 적당한 이산화기법을 적용하여 해석적인 이산 그린함수를 유도하였다.

본 논문에서는 새로운 해석적 그린함수를 이용한 도파관 흡수경계조건을 제안하였다. 최근 도파관 내에서의 시간영역 전자파 전파에 대한 해석적 연구로부터 몇 가지 유용한 결과들이 발표된 바 있으며[6, 7], 본 논문에서 제안된 흡수경계조건은 이들의 연구결과에 바탕을 두고 유도되었다. 그 최종 결과는 diakoptics ABC와 같은 convolution 형태로 표현되며, 여기에 사용된 이산그린함수가 매우 간단한 해석적인 형태를 가지고 있어서 실제의 수치계산시 매우 편리하다. 또한 여러 가지 다양한 형태의 단면을 가진 도파관 구조에 대해 두루 적용될 수 있고, 수치해석 결과 매우 넓은 주파수범위에서 우수한 흡수성능을 보이는 것으로 나타났다.

일반적으로 FDTD를 이용한 도파관 불연속 해석에서는 소스를 여기시키거나 불연속구조의 산란계수(S parameter) 등을 구하기 위해 모드에 대한 지식이 필요하다. 특히 diakoptics에 기반한 흡수경계조건에서는 경계조건을 각 모드별로 나누어 적용하기 때문에 각 모드에 대한 정확한 모드분포를 알아야 한다. 도파관의 단면이 직사각형이나 원형 등 단순한 형태일 경우 해석적인 모드해를 이용할 수 있지만, 복잡한 단면구조를 가지는 보다 일반적인 도파관 구조에서는 수치적인 방법을 이용한 모드해석을 하게 된다. 이와 관련한 연구로서 참고문헌 [8]에서는 FDTD 해석에 필요한 도파관 모드해석에 주파수영역 유한차분방법(Frequency Domain Finite Difference Method)이 이용되었다. FDTD도 유한차분방법에 기반을 두고 있다는 점을 고려하면, FDTD에 이용하기 위한 모드해석법으로 유한차분법이 가장 적합하다고 할 수 있다. 그러나 주파수 영역의 유한차분법은 궁극적으로 eigenvalue방정식을 푸는 문제로 귀착되며 이는 수치적으로 상당한 계산을 요하는 문제이다. 따라서 본 논문에서는 2차원 FDTD를 이용한 시간영역 해석을 통해 모드를 계산한다. 2차원 FDTD 방법을 이용하면 유한근사방법의 장점을 살리면서 주파수 영역방법에 비해 보다 단순한 모드해석을 할 수 있다.

II. 이 론

1. 도파관 구조에 대한 새로운 FDTD 흡수경계조건

일반적으로 내부가 균일(homogeneous)한 매질로 채워지고 외곽이 도체로 둘러싸인 도파관에서의 시간영역 모드 표현식은 다음과 같은 형태로 표시할 수 있다.

$$\Psi_{mn}(x, y, z, t) = u(z, t) \phi_{mn}(x, y) \quad (1)$$

위의 식에서 도파관의 축방향을 z축으로 잡았을 때, ϕ_{mn} 는 mn번째 모드의 단면분포, 그리고 $u(z, t)$ 는 그 크기를 표시하는 모드 계수이다.

최근, 도파관 내의 시간영역 전자파 전파에 대해서도 많은 연구가 이루어져, 그 해석적 표현식이 몇몇 연구자들에 의해 발표되었다[6, 7]. 이들의 연구결과에 따르면 도파관 내의 $z=0$ 인 지점에서 특정한 모드를 임펄스 함수로 여기(excite)시켰을 때, 이에 의해 도파관 내부에서 전파되는 전자파는 다음과 같은 임펄스 응답으로 표시할 수 있다.

$$h(x, y, z, t) = \phi_{mn}(x, y) \left\{ \delta(t - |z|/v) - H(t - |z|/v) \frac{|z|\omega_c}{v} \frac{J_1(\omega_c \sqrt{t^2 - (z/v)^2})}{\sqrt{t^2 - (z/v)^2}} \right\} \quad (2)$$

이 때, ω_c 는 해당모드의 차단(cutoff) 각주파수, v 는 도파관 내부 매질에서의 광속, δ , H , J_1 은 각각 Dirac delta, Heaviside unit step 및 제1차 1종 Bessel 함수를 나타낸다.

이 도파관에 어떤 모드가 +z 방향으로 진행하고 있을 때, $z > 0$ 인 임의의 지점에서의 모드계수는 $z=0$ 에서의 모드계수를 사용하여 계산할 수 있다. 이 관계식은 위의 식 (2)에 주어진 임펄스 응답함수를 이용한 다음의 convolution 적분으로 나타내어진다[6, 7].

$$u(z, t) = u(0, t - z/v) - \frac{z\omega_c}{v} \int_0^{t-z/v} \frac{J_1(\omega_c \sqrt{(t-t')^2 - (z/v)^2})}{\sqrt{(t-t')^2 - (z/v)^2}} u(0, t') dt' \quad (3)$$

위의 식에서 causality 조건($u(0, t') = 0$ for $t' < 0$)을

적용하여 적분의 아래 끝을 0으로 놓았다. 이 식을 사용하면 한 위치에서의 모드정보를 기초로 하여 다른 임의의 위치에서의 모드를 계산해 낼 수 있다. 따라서 이를 이용하여 FDTD의 흡수경계조건을 유도해 낼 수 있다. 이때 식 (3)은 연속 시간/공간 영역의 표현식이므로 이를 FDTD에 이용하려면 적당한 이산화 과정을 거쳐야 한다. 이산화 과정은 우선 시간, 공간 영역 변수들을 FDTD의 이산화된 변수들로 바꾸는 변수 이산화 과정과, 수치계산기법을 적용하여 적분을 이산합으로 변환하는 적분 이산화 과정으로 크게 나누어 볼 수 있다.

FDTD의 시간 스텝을 Δt , z방향 공간 스텝을 Δz 라고 하고, FDTD 계산영역이 $z = N\Delta z$ 에서 끝나게 된다고 가정한다. 본 논문에서 제안하는 흡수경계조건에서는 경계에서 한 공간스텝 안쪽($z = (N-1)\Delta z$)의 필드 분포로부터 경계($z = N\Delta z$)의 필드를 계산하게 된다. FDTD의 각 시간 $t = n\Delta t$ 에서 이 둘 사이의 관계는 식 (3)을 이용하여 다음과 같이 나타내어진다.

$$u(N\Delta z, n\Delta t) = u((N-1)\Delta z, n\Delta t - \Delta z/v) - \frac{\Delta z\omega_c}{v} \int_0^{n\Delta t - \Delta z/v} \frac{J_1(\omega_c \sqrt{(n\Delta t - t')^2 - (\Delta z/v)^2})}{\sqrt{(n\Delta t - t')^2 - (\Delta z/v)^2}} u((N-1)\Delta z, t') dt' \quad (4)$$

이 식 (4)를 보면 우변의 시간 영역 변수($n\Delta t - \Delta z/v$)가 FDTD의 이산화된 시간과 일치하지 않는 것을 볼 수 있다. 이를 그대로 사용하려면 적당한 외삽/내삽을 통해 FDTD의 시간에 해당하는 순간의 모드계수 값들을 계산해 내어야 한다. 그러나 이런 외삽/내삽을 이용하게 되면 이를 위한 별도의 계산이 필요할 뿐만 아니라 그 과정에서 생기는 오차가 전체적인 흡수경계조건에 성능에 악영향을 끼치게 되는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 외삽/내삽법을 사용하지 않아도 되는 다른 방법을 고안하였다. 그것은 Δz 나 Δt 를 조절하여 그 비가 v 의 정수배가 되도록 하는 것이다.

$$\Delta z/v = k\Delta t, k: \text{정수} \quad (5)$$

예를 들어 FDTD에서 $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ 인 경우를 생각

하면 Courant 안정화 조건에 의해 시간스텝 Δt 가 다음의 식으로 제한된다.

$$\Delta t \leq \Delta z / \sqrt{3} v \quad (6)$$

이에 따르면 위 식 (5)에서 정수 k 는 다음 조건을 만족시켜야 한다.

$$k = \Delta z / v \Delta t \geq \sqrt{3} v \quad (7)$$

따라서 이 경우 위의 조건을 만족시키는 값으로 $k=2$ 를 택해 주면 된다.

이 방법을 사용하면 식 (4)는 다음과 같이 바뀌어지게 되어 시간 변수가 FDTD 시간스텝 Δt 의 정수배가 되므로 앞에서 언급한 외삽/내삽을 할 필요가 없어지게 된다.

$$u(N\Delta z, n\Delta t) = u(N-1)\Delta z, (n-k)\Delta t$$

$$- \frac{\Delta z \omega_c}{v} \int_0^{(n-k)\Delta t} \frac{J_1(\omega_c \sqrt{(n\Delta t - t')^2 - (k\Delta t)^2})}{\sqrt{(n\Delta t - t')^2 - (k\Delta t)^2}} dt'$$

$$u((N-1)\Delta z, t') dt' \quad (8)$$

한편 식 (5)의 방법을 적용한 결과 식 (8)의 적분영역도 Δt 의 정수배로 바뀌었음을 알 수가 있다. 이에 따라 다음과 같은 단순한 방법으로 적분을 이산화할 수 있다.

우선 적분영역을 Δt 간격의 소구간으로 나눈다. 그리고 각 소구간에서의 적분을 다음과 같이 trapezoidal 법칙을 사용하여 이산화한다.

$$\int_0^{(n-k)\Delta t} f(t') dt' = \sum_{i=1}^{n-k} \int_{(i-1)\Delta t}^{i\Delta t} f(t') dt'$$

$$\doteq \sum_{i=1}^{n-k} \frac{1}{2} (f((i-1)\Delta t) + f(i\Delta t)) \Delta t \quad (9)$$

trapezoidal 법칙에 의한 수치적분은 이산화 구간 Δt 에 대해 3차의 정확도를 가진다. Yee의 표준 FDTD 알고리즘의 정확도가 Δt 에 대해 2차 정도인 점을 고려할 때, 이는 충분히 정확한 이산화라고 할 수 있다.

끝으로 지금까지의 이산화 과정에서 얻어진 식에서 항의 재배열 등 몇 가지 단순한 처리과정을 거치

면 최종적으로 다음과 같은 형태의 FDTD 흡수경계 조건을 얻을 수 있다.

$$u(N\Delta z, n\Delta t) = \sum_{i=k}^n g(i\Delta t) u(N-1)\Delta z, (n-i)\Delta t, k, n \quad (10)$$

$$g(i\Delta t) = \begin{cases} 1 - \frac{\omega_c^2 \Delta z \Delta t}{4v}, & i = k \\ - \frac{\omega_c \Delta z J_1(\omega_c \Delta t \sqrt{n^2 - k^2})}{2v \sqrt{n^2 - k^2}}, & i = n \\ - \frac{\omega_c \Delta z J_1(\omega_c \Delta t \sqrt{i^2 - k^2})}{v \sqrt{i^2 - k^2}}, & i \neq k, n \end{cases}$$

위의 식은 convolution 함으로 주어지는 diatoptics 흡수경계조건의 형태를 가지고 있으며, 여기서 g 가 이산 그린함수에 해당한다.

참고문헌 [6, 7]의 유도과정을 보면, 위의 식 (2)와 (3)은 다음과 같은 분산관계식을 만족시키는 모든 전자파 전파문제에 두루 적용될 수 있다는 것을 알 수 있다.

$$k_z = \frac{\omega}{v} \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2} \quad (11)$$

이런 분산관계식은 내부가 균일한 매질로 채워지고, 도체로 둘러싸인 모든 도파관 구조에 두루 성립하는 일반적인 관계식이므로, 본 연구에서 제안된 흡수경계조건도 이와 같은 여러 경우에 모두 다 적용될 수 있다.

2.2차원 FDTD를 이용한 도파관 모드해석

본 논문에서 다루는 도파관 구조는 모두 그 축방향 (z 축으로 가정)에 대한 TE와 TM의 두가지 모드 set을 가지고 있다. 이 두 가지 set에 대한 모드해석과정은 거의 동일하기 때문에 본 논문에서는 TE모드의 경우만을 다루기로 한다.

모드해석으로 얻고자 하는 결과는 모드의 차단주파수와 그 단면 분포이므로, 차단주파수상태에 있는 TE_z 모드를 생각한다. 이 경우 Maxwell의 방정식은 다음과 같이 단순화된다.

$$\epsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial y}$$

$$\begin{aligned} \epsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} &= -\frac{\partial H_z}{\partial x} \\ \mu \frac{\partial H_z}{\partial t} &= \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \end{aligned} \quad (12)$$

위의 식에서 모드가 차단주파수 상태에 있기 때문에 z방향 미분항을 모두 0으로 놓았다. 식 (12)를 Yee의 방법[10]에 따라 이산화하면 FDTD 계산식을 얻을 수 있다. FDTD의 방법에 따라 해석하고자 하는 도파관의 단면을 작은 grid를 사용하여 분해하고, 위에서 얻어진 식들을 사용하여 FDTD 계산을 수행한다. 얼마의 시간이 경과하면 FDTD 격자상의 전자파가 정상상태(steady state)에 이르게 되는데, 이 정상상태의 시간영역 파형을 푸리에 변환하여 그 공진 주파수를 계산하면 이것이 모드의 차단주파수가 된다. 또 정상상태에 도달하였을 때의 전자파 분포로부터 그에 해당하는 모드의 단면분포를 구할 수 있다.

2차원 FDTD에 의한 모드해석의 장점은 주파수 영역 방법과는 달리 eigenvalue 방정식 등 다소 복잡한 계산이 불필요하다는 점과, 이를 3차원 FDTD에 이용할 경우, FDTD 격자에 의한 수치적인 효과 등이 모드계산에 이미 고려되어 있기 때문에 FDTD 계산에 가장 적합한 모드결과를 줄 수 있다는 점이다.

III. 결과 및 검토

본 논문에서 제안된 방법을 적용하여 구형도파관과 ridge 도파관에 대해 흡수경계조건의 성능을 테스트하였다. 그리고, 이 흡수경계조건을 실제의 경우에 적용한 예로서, 도파관 필터구조를 FDTD로 수치해석하여 본 연구결과의 유용성을 검증하였다.

먼저 그림 1과 그림 2는 구형 도파관의 예로서 WR-187 표준 도파관(47.55mm × 22.15mm)의 TE₁₀ 모드에 대해 본 연구에서 제안한 흡수경계조건을 적용한 결과를 보여주고 있다. FDTD해석에 사용된 파라미터는 Δx = Δy = Δz = 4.755mm, Δt = Δz/2v이며, 이때 그 이산 그린함수(식 (10))를 그림 1에 도시하였다. 그림 2a는 흡수경계조건의 성능을 시험하기 위해 사용된 FDTD 해석구조를 보여주고 있다. 도파관의 한쪽 경계면에 본 연구의 흡수경계조건을 적용하고 그 경계에서의 모드 계수를 시간에 따라 기록하였다. 이때 기록된 수치는 입사파와 경계조건에 의한 반사파가

합해진 값이므로, 매우 긴 도파관 구조의 FDTD 해석을 통해 반사파가 배제된 순수한 입사파 성분만을 얻은 뒤, 이 두 결과의 차로부터 반사파를 계산하였다. 이런 과정을 거쳐 계산된 반사계수를 그림 2b에 나타내었다. 그림 1을 보면 그린함수는 무한대의 지속시간을 가지고 있기는 하지만 그 함수가 증가함에 따라서 급격히 감소하는 특성을 나타내기 때문에, 실제의 흡수경계조건에서는 계산상의 효율을 위해 적당한 길이로 절삭된(truncated) 그린함수를 사용하는 것이 좋다. 그림 2b에는 45, 125, 1505항에서 절삭된 그린함수를 사용한 세 가지 경우의 흡수경계조건에 대해 그 흡수성능을 보여주고 있다. 45항까지의 비교적 적은 수의 항만 그린함수에 사용한 경우에도 그 흡수경계성능이 그다지 크게 악화되지 않음을 볼 수 있다. 전체적으로 본 연구에서 제안한 흡수경계조건의 성능은 모든 주파수 범위에서 -30 ~ -40dB 정도이다.

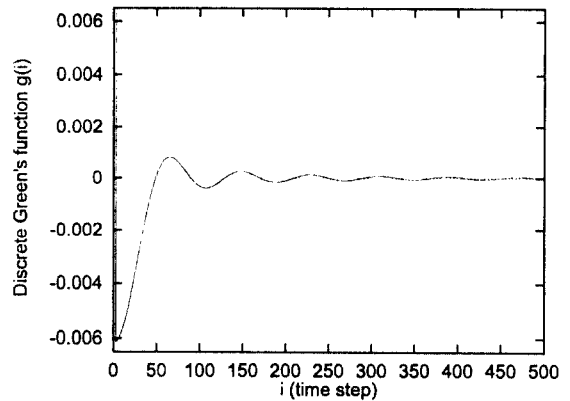
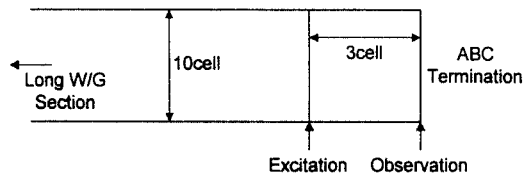


그림 1. 제안된 이산그린함수
Fig. 1. Proposed discrete Green's function



(a)

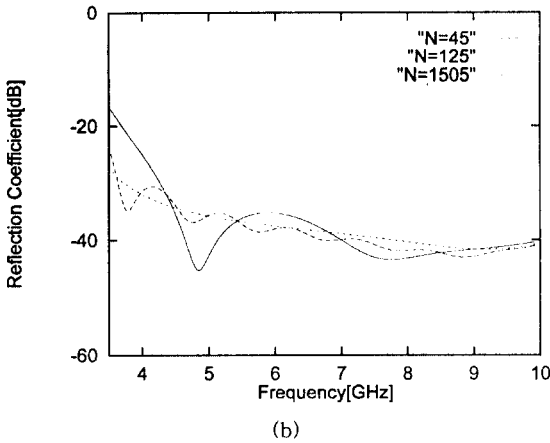


그림 2. 구형도파관에서의 흡수경계조건
 (a) 흡수경계조건을 시험하기 위한 FDTD 해석 구조
 (b) 제안된 흡수경계조건에 의한 반사계수
 Fig. 2. Absorbing boundary condition in the rectangular waveguide
 (a) FDTD analysis condition to test the absorbing boundary condition
 (b) Reflection coefficient from the proposed absorbing boundary condition

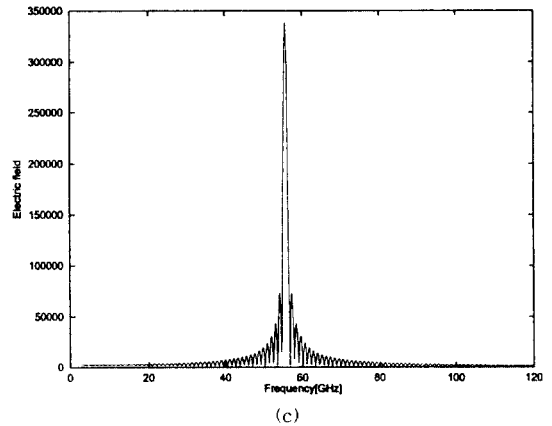
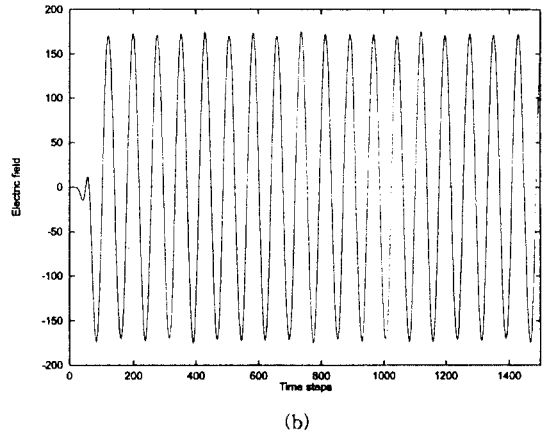
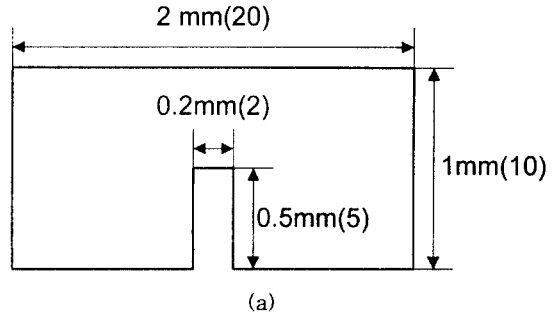


그림 3. 2차원 FDTD에 의한 Ridge 도파관 모드해석
 (a) 해석에 사용된 도파관 구조
 (b) 시간영역 파형
 (c) 주파수 영역 파형

Fig. 3. Modal analysis of a ridged waveguide using 2 dimensional FDTD
 (a) Structure of the waveguide used in the analysis
 (b) Time domain waveform
 (c) Frequency domain waveform

다음 그림 3과 그림 4는 ridge 도파관에 대한 결과이다. 먼저 그림 3은 해석에 사용된 도파관의 구조(그림 3a)와 2차원 FDTD를 이용한 모드해석 결과를 보여주고 있다. 그림 3a에서 괄호 안의 숫자들은 FDTD에서 사용된 셀의 개수를 표시한다. 그림 3b, 3c는 한 특정한 셀에서의 전장을 시간 및 주파수 영역에서도 시한 그림이다. 시간영역 파형을 보면 약 100Δt 이후에 정상상태에 도달한 것을 볼 수 있으며, 이를 푸리에 변환한 결과로부터 그 차단주파수가 55.9GHz 정도임을 알 수 있는데 이는 이 도파관의 TE₁₀ 모드에 해당한다. 이와 동일한 구조에 대해 주파수영역 유한차분법을 적용하여 계산된 차단주파수는 56.43GHz [8]로서 본 연구의 결과와 비교적 잘 일치한다. 다음으로는 이 모드해석결과를 이용하여 ridge 도파관에 대한 흡수경계조건을 구현하고 그 성능을 FDTD 수치해석을 통해 확인하였다. 그림 4에 그 결과가 나타나 있다. 일반적으로 그리함수에 사용되는 항의 개수(N)가 많아짐에 따라 흡수경계조건 성능이 더욱 더 좋아지는 경향을 볼 수 있다.

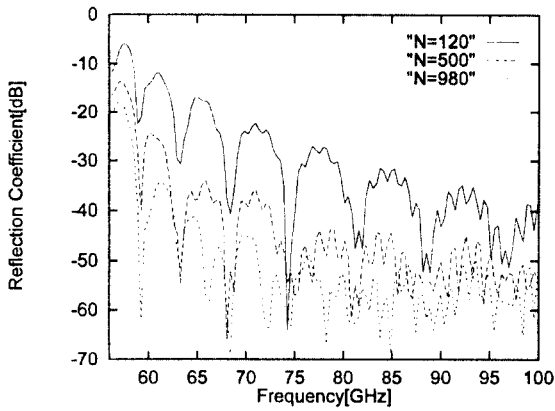


그림 4. Ridge 도파관에서 본 연구의 흡수경계조건에 의한 반사계수

Fig. 4. Reflection coefficient from the proposed absorbing boundary condition for the ridged waveguide case

끝으로 본 연구에서 제안된 흡수경계조건을 실제 도파관 불연속 구조의 FDTD 해석에 적용한 결과가 그림 5에 나타나 있다. 이때 해석에 사용된 구조는 그림 5a에 나타난 것과 같은 도파관 대역통과필터이다. 그림에서 괄호 안의 숫자는 FDTD 셀의 개수를 나타낸다. FDTD를 사용하여 계산된 이 필터의 투과특성 (S_{21})을 그림 5b에 나타내고, 이를 모드정합법으로 계산한 결과와 비교하였다. 이 그림에서 본 연구의 흡수경계조건을 사용한 FDTD 해석 결과가 모드정합법에 의한 해석결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 도파관 불연속 구조의 FDTD 해석에 효과적으로 사용될 수 있는 새로운 형태의 도파관

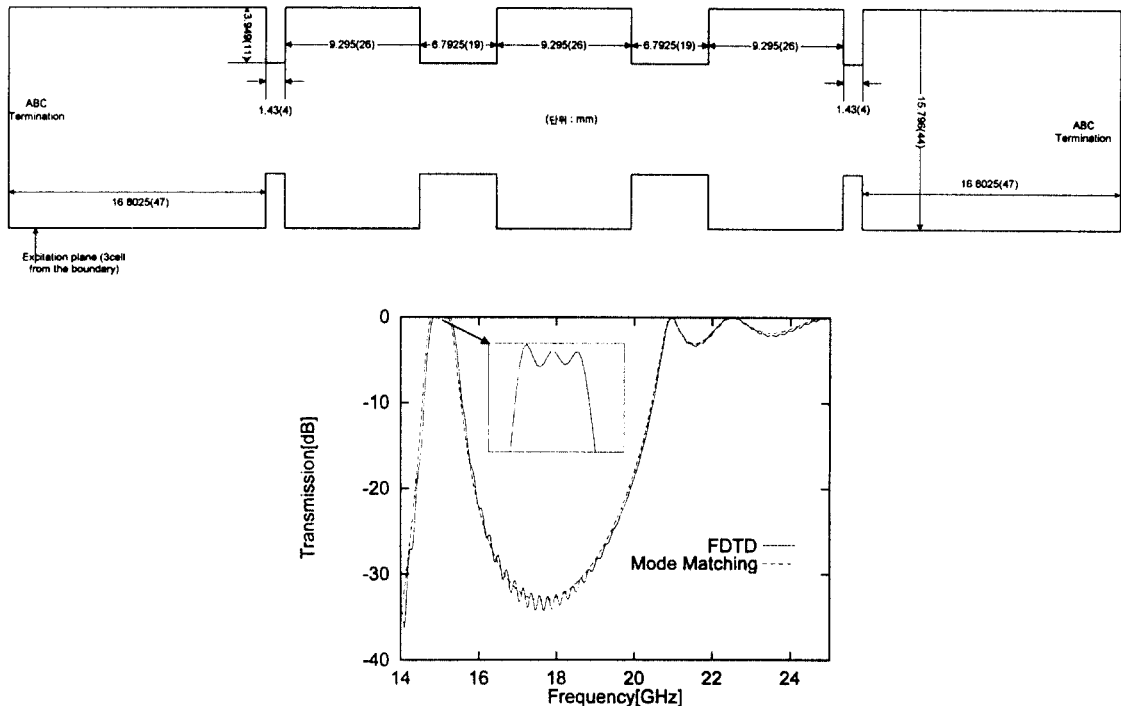


그림 5. 도파관 대역통과필터의 FDTD 해석
(a) 해석에 사용된 도파관 필터구조
(b) 필터의 S_{21} 특성

Fig. 5. FDTD analysis of a waveguide bandpass filter
(a) Filter structure used in the analysis
(b) S_{21} characteristic of the filter

