

論文95-32A-10-3

원형 패치 안테나의 시간영역 해석

(Time Domain Analysis of Circular Patch Antennas)

李 直 烈 *

(Jick-Yeul Lee)

요 약

FDTD 해석은 대부분 개방공간을 대상으로 하므로 계산공간의 경계면에서 전자파를 적절히 종단시켜야 한다. 특히 진행하는 전자파를 충분한 시간동안 해석하기 위해서는 경계면에서 반사파가 발생되지 않도록 처리해야 한다. 이를 위하여, 본 논문에서는 계산시 간략하게 적용시킬 수 있는 새로운 방법을 제시하고자 한다. 전자파의 자유공간 전파특성을 이용한 이 방법은 수직 또는 임의의 각도로 경계면에 입사하는 전자파에 대해서도 반사파를 발생시키지 않으며, 계산량이 적은 장점을 갖는다. 제시된 방법을 이용하여 원형 패치 안테나의 급전 선로상의 반사전압, 표면전하밀도 및 원거리장의 전파특성을 파악하였다.

Abstract

The majority of problems to which FDTD is being applied involve open structure which require the appropriate scheme to terminate the computational domain. In particular, for the propagation problem of the outgoing waves, a certain type of boundary condition needs to be applied on outer boundaries of the computational domain to generate no reflected waves. In this paper, a new simple technique is presented, which allows the reduced computation time and excellent absorbing characteristics for normal and oblique incident waves on outer boundaries. To illustrate the validity of this method, a numerical calculation for monopole antenna is carried out and the results are compared to measured data. The time-domain properties for circular patch antennas are investigated.

I. 서 론

임의의 물체에 의한 전자파 산란과 안테나등에 대한 시간영역(time-domain) 해석은 1966년 Yee^[1]에 의해 FDTD(finite-difference time-domain) 해석방법이 제시된 이후 여러 분야에서 활발하게 연구되고 있다.

FDTD 방법은 처음에는 자유공간내 완전도체에 의한 전자파 산란해석에 이용되었으나, 복잡한 구조에 의

한 산란, 방사 및 집적회로 소자의 모델링등으로 이용 범위가 넓혀지고 있다.

FDTD 해석은 대부분 개방된 공간을 대상으로 하므로, 이 영역을 계산이 가능한 영역으로 축소시켜야 하며, 축소된 계산영역의 경계면에서 진행하는 파에 대해 반사파를 발생시키지 않도록 처리하여야 충분히 긴 시간동안 전자파 해석이 가능하게 된다.

이 연구는 projection 연산자에 의한 방법^[2], 진행하는 파를 평균치로 근사화시키는 방법^[3], 계산영역의 경계면에서 파를 흡수시키는 방식^[4] 등이 제시되었으나, 단방향 진행파를 근사화시키는 조건으로부터 얻은 ABC(absorbing boundary condition) 방법^[5,6]이 가장 널리 사용된다. 이 외에도 여러가지 방식에

* 正會員, 韓國技術教育大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Korea Institute of Technology and Education)

接受日字: 1995年4月29日, 수정완료일: 1995年10月10日

대한 연구^[7-9]가 진행되며, 비교논문^[10,11]이 발표되고 있다.

본 논문에서는 계산영역의 경계면에 수직 또는 임의의 각도로 입사하는 파에 대해 반사파를 전혀 발생시키지 않는 간단한 조건식을 유도하도록 한다. 이 결과식은 전자파의 자유공간 전파특성을 나타내며, 감쇄율을 고려하면 손실이 있는 공간으로의 적용도 가능하다.

제시된 조건식을 이용하여 Gaussian 펄스에 대한 monopole 안테나의 특성을 해석하여 그 결과를 측정치와 비교하였으며, 원형 패치 안테나의 시간영역 특성을 분석하였다.

II. 원형 패치 안테나의 유한차분 수식화

그림 1에 동축선로에 의하여 급전되는 패치 안테나, 이를 해석하기 위한 계산영역, 또한 경계조건을 만족시키기 위한 전자파 성분의 위치를 나타내었다. 동축선로에 의해 급전되는 신호가 선로에서 TEM 모드의 분포를 갖는다면 패치 안테나에는 안테나의 축대칭성에 의하여 TM 모드 성분, E_r , E_z , H_ϕ 가 여기된다. Maxwell 방정식을 그림 1의 구조에 대해 유한차분방정식으로 변환하면 아래 식을 얻는다. ^[12]

$$\begin{aligned} H_\phi^{n+\frac{1}{2}}(i, j) = & H_\phi^{n-\frac{1}{2}}(i, j) + \frac{\Delta t}{\mu \Delta r} [E_z^n(i + \frac{1}{2}, j) \\ & - E_z^n(i - \frac{1}{2}, j)] - \frac{\Delta t}{\mu \Delta z} [E_r^n(i, j + \frac{1}{2}) \\ & - E_r^n(i, j - \frac{1}{2})] \end{aligned} \quad (1a)$$

$$\begin{aligned} E_r^{n+1}(i, j - \frac{1}{2}) = & E_r^n(i, j - \frac{1}{2}) - \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta z} \\ & [H_\phi^{n+\frac{1}{2}}(i, j) - H_\phi^{n+\frac{1}{2}}(i, j-1)] \end{aligned} \quad (1b)$$

$$\begin{aligned} E_z^{n+1}(i + \frac{1}{2}, j) = & E_z^n(i + \frac{1}{2}, j) + \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta r} \frac{1}{r_{i+\frac{1}{2}}} \\ & [r_{i+1} H_\phi^{n+\frac{1}{2}}(i+1, j) - r_i H_\phi^{n+\frac{1}{2}}(i, j)] \end{aligned} \quad (1c)$$

윗식은 아래의 방법에 따라 표현하였다.

$$U^m(i, j) = U(i \Delta r, j \Delta z, n \Delta t) \quad (2)$$

여기서 Δr , Δz 는 원통좌표계 각방향의 증가분을, Δt 는 시간축의 증가분을 나타내며, 아래의 안정조건식을 만족한다.

$$\Delta t \leq \frac{1}{c} \sqrt{\frac{1}{1/\Delta r^2 + 1/\Delta z^2}} \quad (3)$$

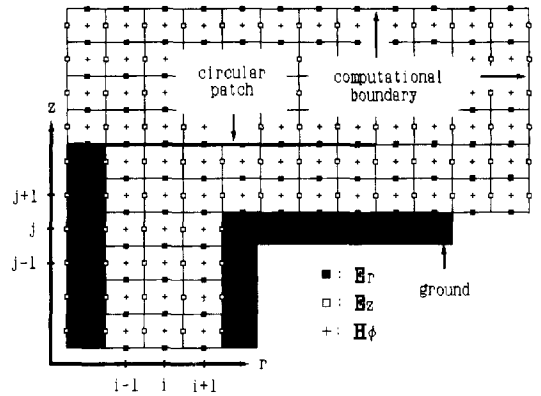


그림 1. 그리드와 필드 성분의 위치

Fig. 1. Spatial grid and the positions of various field components.

III. 간략한 방사경계조건(radiating boundary condition)의 유도

속도 c 로 진행하는 전자파 U 는 아래의 파동방정식을 만족한다.

$$L U = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) U = 0 \quad (4)$$

연산자 L 는 단일방향(one-way) 파동방정식 연산자인 L^+ , L^- 로서 다음과 같이 분리할 수 있다.

$$L = L^+ L^- \quad (5)$$

$$L^+ = \left(\frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \right)$$

$$L^- = \left(\frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \right)$$

여기서, 단일방향 파동방정식 $L^+ U = 0$ 는 r 방향으로 진행하는 전자파를, $L^- U = 0$ 는 그 반대방향으로 진행하는 전자파를 나타내는 식이다. 단일 방향으로 진행하는 전자파의 방사경계조건을 구하기 위하여 단일방향 파동방정식에 유한차분법을 아래 그림의 노드에 대해 적용한다. 여기서 원형 및 사각 점들은 거리 및 시간에 관한 미분 노드점을 나타낸 것이다.

여기서 시간 및 거리 영역의 미소구간 증가분은 Δt , Δr 이며, 이들은 식 (3)의 조건을 만족시키는 아래의 관계를 갖는다. 여기서 m 은 문제의 차원을 나타내는

정수이다.

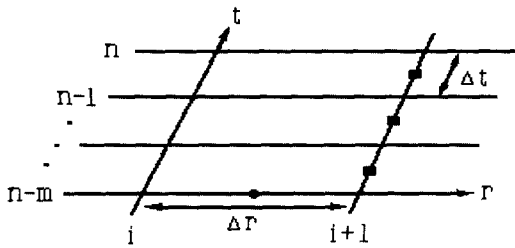


그림 2. 유한차분을 위한 노드 점
Fig. 2. The positions of nodes for FDTD analysis.

$$\Delta t = \frac{\Delta r}{mc} \quad (6)$$

r 방향으로 진행하는 단일방향 파동방정식은 유한차분법으로 아래 식과 같이 나타내진다. 여기서 m은 t 축상의 평균미분값을 얻기위한 정수로 이용하였다.

$$L^+ U = \frac{U^{m-m}(i+1) - U^{m-m}(i)}{\Delta r} + \frac{1}{mc} [\frac{U^m(i+1) - U^{m-1}(i+1)}{\Delta t} + \frac{U^{m-1}(i+1) - U^{m-2}(i+1)}{\Delta t} + \dots + \frac{U^{m-m+1}(i+1) - U^{m-m}(i+1)}{\Delta t}] = 0 \quad (7)$$

이를 정리하면 다음과 같은 간략한 방사경계조건식을 얻게된다.

$$U^m(i+1) = U^{m-m}(i) \quad (8)$$

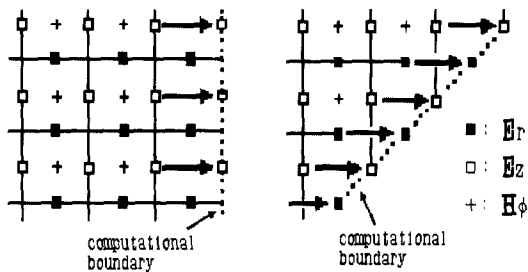


그림 3. 간략한 방사경계조건의 적용방법
(a) 입사각 = 0° (b) 입사각 = 45°
Fig. 3. Applying the simple RBC on the computational boundary
(a) incident angle = 0°
(b) incident angle = 45°

즉, 위 식을 계산영역의 경계면에 적용시킴으로서 경계면에서 단일방향으로 전자파를 진행시켜 반사파를

전혀 발생시키지 않고 해석할 수 있다. 그림 3은 계산시 식 (8)을 적용시키는 '방법을 나타낸 것으로서, (a)는 경계면에 수직으로 입사하는 파를, (b)는 45°의 입사각의 경우를 예로 나타낸 것이다. 이 그림은 2차원 문제로서 식 (8)에서 m=2의 경우이며, 계산시 경계면 상의 전자파 성분의 값은 인접 노드점의 값을 시간증가에 대해 2Δt 지연시킨 값이 된다.

이 방법에 의하면 경계면에서 반사파가 전혀 발생되지 않으므로, 이 결과는 여러가지 방식의 분석논문^{10,11}의 결과와 비교할 때 특성상의 우위를 갖는다.

IV. 계산결과 및 고찰

1. 원통형 monopole 안테나의 해석

본 논문에서 기술한 방법을 검증하기 위하여 원통형 monopole 안테나를 해석한다. 그림 4에 이 안테나 구조를 대칭성을 고려하여 원통좌표계로 그 일부를 나타내었다.

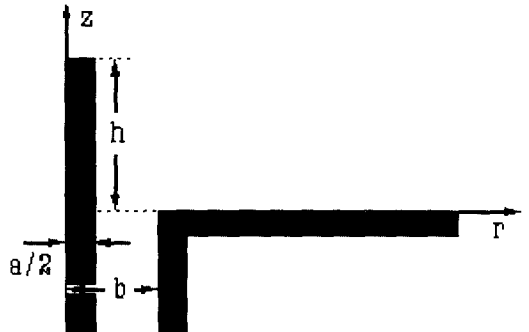


그림 4. 원통형 monopole 안테나
Fig. 4. Cylindrical monopole antenna.

여기서, 원통형 monopole 안테나는 무한히 넓은 접지면 위에 위치하며, 식 (9)로 표현되는 TEM모드 신호가 식 (10)의 Gaussian 펄스의 크기로 내,외부 도체의 반경이 a, b인 동축선로를 통하여 안테나에 급전된다.

$$E_z(r, t) = \frac{V(t)}{\ln(b/a)r} \quad (9)$$

$$V(t) = V_0 \exp(-t^2/2\tau_0^2) \quad (10)$$

본 논문에서는 동축선로상의 반사전압을 구하여, 그 결과를 다른 논문의 측정치와 비교하도록 하였다. 동축선로상의 반사전압은 반사파 자계의 θ 성분으로 부터

아래의 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$V^R = -\eta H_0^2 \ln(b/a)r \quad (11)$$

컴퓨터 처리시 사용된 변수는 다음과 같다. 즉, $V' = V_0 = 1$ [V], $b/a = 2.3$, $h/a = 32.8$, $\tau_p/\tau_a = 0.161$, $\tau_a = h/c$ 이다. 계산결과는 그림 5와 같다. 이 결과를 보면 측정치와 다른 방법에 의한 계산값^[12,13]과 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

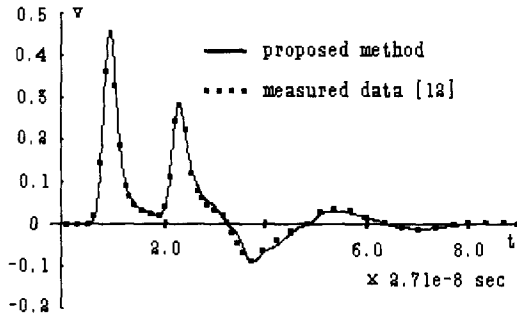


그림 5. 원통형 monopole 안테나에 의한 동축 선로상의 반사전압

Fig. 5. The reflected voltage in the coaxial line for a cylindrical monopole antenna.

2. center-fed 원형 패치 안테나의 해석

그림6에 동축선로로 급전되는 center-fed 원형 패치 안테나를 도시하였다. 동축선로의 내부 유전율은 $\epsilon_r = 2.06$, 내외부 도체의 반경은 각각 $a = 0.89$ mm, $b = 2.95$ mm인 50Ω 선로이며, 반경의 크기가 $r_0 = 68.0$ mm인 원형 패치는 무한히 넓은 접지된 완전도체 기판과 간격 $t_0 = 1.5$ mm를 유지하고 있으며, 이 간격 사이의 유전체는 동축선로와 동일하다.

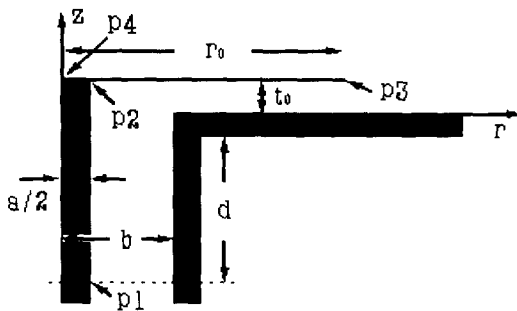


그림 6. 원형 패치안테나
Fig. 6. Circular patch antenna

식 (9),(10)의 Gaussian 펄스가 동축선로에 입사

되며, Gaussian 펄스 최대값의 -40dB 되는 점이 그림 6의 p1에 위치하도록 d의 위치를 선정함으로써 입력 신호의 TEM모드를 유지하도록 하였다.

그림 7은 이 펄스에 의하여 유기되는 표면전하밀도의 절대값을 나타낸 것이다. 여기서 입력 신호인 Gaussian 펄스의 τ_p 는 1.4305×10^{-8} 이며 $V' = V_0 = 1$ [V] 이다. 이 결과에 의하면 p1을 통하여 입사된 펄스는 패치 안테나의 중심부분 p2에서 반사되어 동축선로로 진행하며, 진행과는 패치의 가장자리인 p3를 향하여 진행한다. 이와 같은 현상이 경계면 p3와 p4에서도 반복적으로 발생되며, 이는 예견할 수 있는 결과이다.

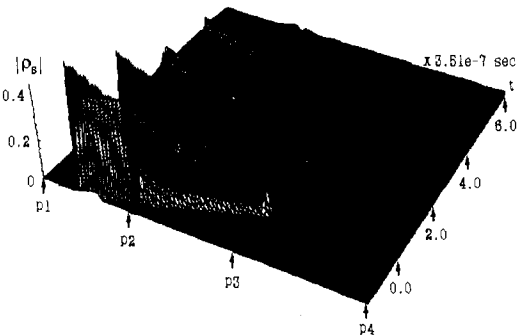


그림 7. 원형 패치 안테나상의 표면전하밀도
Fig. 7. The surface charge density on circular patch antenna.

그림 8은 경계면 p1에서 반사전압을 구한 결과이다. 이 결과는 그림 7의 p1 위치에서의 표면전하밀도와 밀접한 관계를 가짐을 확인할 수 있다.

그림 9는 원형 패치 안테나에 의한 원거리장의 E_θ 성분을 θ 에 따라 나타낸 결과이다. 여기서, $\theta = 0^\circ$ 에서의 최대값은 0.1969 volt, $\theta = 15^\circ$ 에서는 0.0027 volt로서 스케일을 달리하였으며, 그 외의 각도에서의 크기는 $\theta = 15^\circ$ 의 스케일에 따라 나타내었다.

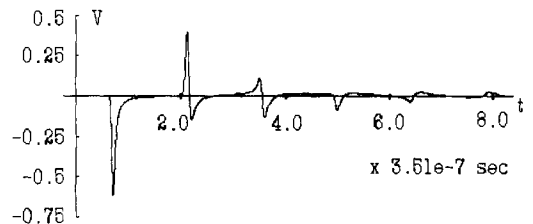


그림 8. 원형 패치 안테나에 의한 동축선로상의 반사전압

Fig. 8. The reflected voltage in the coaxial line for a circular patch antenna

한편, 시간축상의 변화는 θ 가 작아짐에 따라 신호의 초기위치가 지연되어짐을 확인할 수 있으며, 이는 전자파의 진행경로의 차이에 기인함을 알 수 있다.

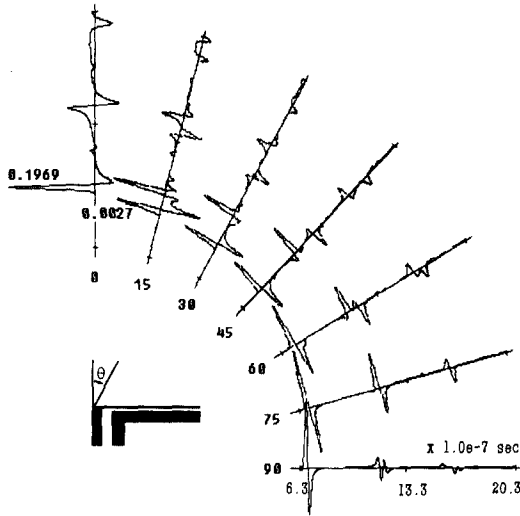


그림 9. 원형 패치 안테나에 의한 원거리장의 E_{θ} 성분
 Fig. 9. The radiation of a far-zone electric field E_{θ} for a circular patch antenna.

V. 결론

전자파의 FDTD 해석은 대부분 개방구조를 대상으로 하므로 계산처리가 가능한 계산영역으로 축소시켜야하며, 축소된 구간의 경계면에서 반사파가 발생하지 않도록 처리하여야 원하는 시간동안의 전자파 해석이 가능하다.

본 논문에서는 이에 이용될 수 있는 간단한 방사경계조건식을 단일방향 파동방정식을 이용하여 제시하였다. 이 방법은 직각 또는 임의의 각도로 입사하는 경우에도 반사파를 전혀 발생시키지 않는 특징을 갖는다. 이 식의 타당성은 동축선로를 통하여 급전되는 원통형 monopole 안테나의 특성을 측정값과 비교함으로써 확인하였다.

또한, 동축선로에 의하여 급전되는 원형 패치 안테나의 시간영역 특성을 해석하였다. 여기서 다룬 대상으로는, Gaussian pulse에 의한 안테나 상의 표면전하밀도, 안테나에 의한 동축선로의 반사전압 및 원거리장 전개성분의 변화해석들이다.

참고 문헌

- [1] K. S. Yee, "Numerical solution of initial value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-14, pp. 302-307, May, 1966
- [2] E. L. Lindman, "Free space boundary conditions for the time dependent wave equations," *J. Comp. Physics*, vol. 18, pp. 66-78, 1975
- [3] 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. MTT-23, pp. 623-630, Aug., 1975
- [4] A. Taflove, "Application of the finite-difference time-domain method to sinusoidal steady-state electromagnetic penetration problems," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-22, pp. 191-202, 1980
- [5] B. Engquist and A. Majda, "Absorbing boundary conditions for the numerical simulation of waves," *Math. Comp.*, vol. 31 pp. 629-651, July, 1977
- [6] G. Mur, "Absorbing boundary conditions for the finite difference approximation of the time-domain electromagnetic field equations," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-23, pp. 377-382, Nov., 1981
- [7] K. K. Mei and J. Fang, "Superabsorption- a method to improve absorbing boundary conditions," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-40, pp. 1001-1010, Sept., 1992
- [8] Z. Bi, K. Wu, C. Wu and J. Litva, "A dispersive boundary conditions for microstrip component analysis using the

- FDTD method." *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, MTT-40, pp. 774-777, April, 1992.
- [9] C. J. Railton, E. M. Denial, D. L. Paul and J. P. McGeehan, "Optimised absorbing boundary conditions for the analysis of planar circuits using the finite difference time domain method." *IEEE Trans., Microwave Theory Tech.*, MTT-41, pp. 290-297, Feb., 1993.
- [10] J. G. Blaschak and G. A. Kriegsmann, "A comparative study of absorbing boundary conditions." *J. Comput. Physics*, vol. 77, pp. 109-139, July, 1988
- [11] C. J. Railton and E. M. Daniel, "A comparison of the properties of radiating boundary conditions in the FDTD method for finite discretisation and non-planar waves." *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, APP-42, pp. 276-281, Feb., 1994.
- [12] J. G. Maloney, G. S. Smith and W. R. Scott, "Accurate computation of the radiation from simple antennas using the finite-difference time-domain method." *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, APP-38, pp. 1059-1068, July, 1990.
- [13] H. O. Ali and G. Costache, "Finite-element time-domain analysis of axisymmetrical radiators." *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, APP-42, pp. 272-275, Feb., 1994.

— 저 자 소 개 —



李直烈(正會員)

1953年 12月 22日生. 1980年 2月 중앙대학교 전자공학과(공학사). 1982年 2月 중앙대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1986年 2月 중앙대학교 대학원 전자공학과(공학박사). 1984年 4月 ~ 1991年 10月 한국전자통신연구소실장.

1992年 3月 ~ 현재 한국기술교육대학교 전자공학과 부교수