

유한한 마이크로스트립 안테나구조에서 CG-FFT 방법을 이용한 복사 해석

°손창우*, 이철훈*, 김종규*, 조영기*
경북대학교 전자·전기 공학부*
대구광역시 북구 산격동 1370번지
sk0148@palgong.kyungpook.ac.kr

Radiation Analysis of a Finite Microstrip Antenna Structure Using the CG-FFT Method : Volume Formulation

°C. W. Son*, C. H. Lee*, J. K. Kim*, and Y. K. Cho*
School of Electronic and Electrical Eng., Kyungpook National University*

Abstract

In this paper a radiation problem for a finite microstrip antenna structure is analyzed. For the analysis of finite structures we utilize the *equivalent volume current*. Integral equation for the unknown equivalent volume current induced on a finite microstrip structure is derived and solved by the use of *conjugate gradient-fast fourier transform* (CG-FFT) method. Some numerical examples are radiation patterns derived by the equivalent volume current solved by the conjugate gradient-fast fourier transform.

I. 서론

마이크로스트립 구조는 소형, 경량, 평면성의 장점 때문에 초고주파 및 밀리미터 대역에서도 안테나, 공진기(resonator)등 광범위하게 응용되어 사용되고 있다. 마이크로스트립 구조에 대한 해석은 전송선 모델(transmission-line model), 공진기 모델(cavity model)등을 이용하는 방법과 적분방정식을 유도한 후 근사적인 수치 해석을 적용하는 방법등으로 구분할 수 있으며, 다양한 연구가 진행되어 왔다. 대부분의 경우에 접지면과 유전체 영역이 무한하다고 가정한다. 수치 해석 방법을 적용할 경우에는 대부분 접지면과 유전체 영역이 무한하다고 가정하고 해석 구조를 단순화 시키

게 되며, 수치해석방법을 이용하여 유한한 구조에 대한 해석을 할 경우에는 전 영역에서의 모든 미지 전류를 알아야 하는데, 해석 구조의 크기가 파장에 비해 매우 큰 경우나 구조가 복잡한 경우에 모멘트 법은 행렬방정식을 풀 때 행렬의 차수가 커지게 되어 많은 메모리의 용량과 계산 시간을 소비한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 최근에는 CG-FFT 방법[3]을 이용한 연구가 활발하게 진행되어 오고 있다.

본 논문에서는 그림 1에서와 같이 유한한 마이크로스트립 안테나 구조에 대하여 접지면은 직사각형으로, 접지면 위의 유전체 층은 직육면체의 구조로, 그리고 유전체 위에는 사각형의 패치와 전송선이 있는 것으로 가정한다. 본 연구 구조에서는 전송선의 끝 부분에 전원을 인가하여 이에 대한 복사특성을 계산하였다. 전송선에서 인가한 전원이 이러한 구조 전체에 전류를 인가하며, 이로부터 복사파가 유기 된다. 이를 해석하기 위해서 전체의 구조를 등가 체적 전류(equivalent volume current)로 대체하는 방법으로 근사화하고 전개 적분방정식(EFIE)을 사용하기로 한다. 또한 자유공간에서의 Green 함수를 이용하여 등가 체적 전류에 대해서 지붕(rooftop) 기저 함수로 전개하고 razor blade 시험 함수를 사용하여 선행행렬식이 유도된다. 이로부터 CG-FFT 방법을 이용하여 미지의 등가 체적 전류를 구하고 또한 복사패턴을 얻는다.

II. 적분 방정식

유한한 크기를 가지는 직사각형의 접지면과 같은 크

기의 직육면체인 유전체층 위에 사각패치와 전송선로가 놓여있는 구조에서 전송선로의 끝으로부터 급전하는 것으로 가정한 구조를 그림 1에서 도시하였다.

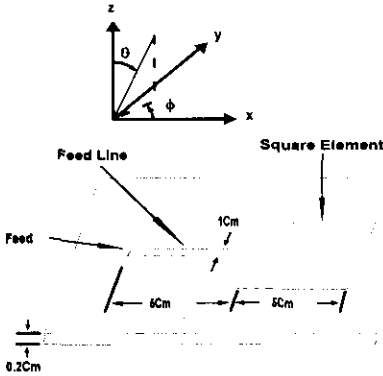


그림 1. 유한한 마이크로스트립 안테나 구조

전송선로의 끝에서 급전하게 되면 이는 그림 1의 구조에 등가 체적 전류 분포를 유기하게 되며, 등가 원리(equivalence principle)를 적용하여 등가 체적 전류(equivalent volume current)로 대체한다. 이 전류는 자유공간에 위치하게 되므로 전계를 계산할 때 자유공간에서의 Green 함수를 이용한다.

등가 체적 전류로 대체한 구조의 영역을 V_d 라고 정의하면 이 영역에서 전체 전계는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\underline{E}^{total}(\underline{r}) = \underline{E}^i(\underline{r}) + \underline{E}^s(\underline{r}), \quad \text{on } \underline{r} \in V_d \quad (1)$$

여기서 $\underline{E}^{total}(\underline{r})$ 는 관측점 \underline{r} 에서의 전체 전계이고 $\underline{E}^i(\underline{r})$ 는 급전으로 인해 생겨난 입사 전계이며, $\underline{E}^s(\underline{r})$ 는 그로 인해 유기되는 산란 전계이다.

등가 원리를 적용하게 되면 위의 구조를 자유공간과 등가 체적 전류로 대체하게 되고 이로부터 전계를 얻을 수 있다. 즉, 등가 체적 전류를

$$\underline{J}_d(\underline{r}) = j\omega\epsilon_0[(\epsilon_r(\underline{r}) - 1) + \sigma(\underline{r})] \underline{E}^{total}(\underline{r}), \quad \text{on } \underline{r} \in V_d \quad (2)$$

로 정의하고[1], 식 (2)를 식 (1)에 대입하면

$$\underline{E}^i(\underline{r}) = \frac{\underline{J}_d(\underline{r})}{j\omega\epsilon_0[(\epsilon_r(\underline{r}) - 1) + \sigma(\underline{r})]} - \underline{E}^s(\underline{r}), \quad \text{on } \underline{r} \in V_d \quad (3)$$

와 같이 표현할 수 있다.

식 (3)에서 $\underline{E}^s(\underline{r})$ 는 등가 체적 전류에 의해서 얻어지는 산란 전계이므로 등가 체적 전류와 자유공간에서의 Green 함수로 표현할 수 있다.

$$\underline{E}^s(\underline{r}) = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \left[k_0^2 \int_{V_d} \underline{J}_d(\underline{r}') G(\underline{r}; \underline{r}') dV' + \nabla \int_{V_d} \nabla' \cdot \underline{J}_d(\underline{r}') G(\underline{r}; \underline{r}') dV' \right] \quad \text{on } \underline{r} \in V_d \quad (4)$$

여기서,

$$G(\underline{r}; \underline{r}') = \exp(-jk_0 R) / 4\pi R$$

$$R = |\underline{r} - \underline{r}'| = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

x', y', z' : source coordinate

x, y, z : field coordinate

ω : angular frequency

ϵ_0 : permittivity of free space

식 (4)를 식 (3)에 대입하여 미지의 등가 체적 전류를 미지수로 하는 적분방정식을 얻을 수 있다.

위의 식 (3)과 (4)를 결합하여 다음과 같은 행렬의 형태로 나타내면,

$$\begin{bmatrix} E_x^i \\ E_y^i \\ E_z^i \end{bmatrix} = k^M \begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{bmatrix} + k^c \begin{bmatrix} L_{xx}^c J_x \\ L_{yy}^c J_y \\ L_{zz}^c J_z \end{bmatrix} + k^q \begin{bmatrix} L_{xx}^q L_{xy}^q L_{xz}^q \\ L_{yx}^q L_{yy}^q L_{yz}^q \\ L_{zx}^q L_{zy}^q L_{zz}^q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{bmatrix}$$

$$k^c = j\omega\mu_0$$

$$k^q = -\frac{1}{j\omega\epsilon_0}$$

$$k^M = \frac{1}{j\omega\epsilon_0[(\epsilon_r(\underline{r}) - 1) + \sigma(\underline{r})]} \quad \text{on } \underline{r} \in V_d \quad (5)$$

로 표현된다.

식 (5)에 주어진 각각의 행렬 성분들을 일반화시키면

$$L_{aa}^c \underline{A} = \int_{V'} \underline{A}(\underline{r}') G(\underline{r}; \underline{r}') dV'$$

$$L_{a\beta}^q \underline{A} = \frac{\partial}{\partial \alpha} \int_{V'} \frac{\partial \underline{A}(\underline{r}')}{\partial \beta} G(\underline{r}; \underline{r}') dV'$$

와 같이 표현할 수 있다. 위의 식에서 Δ 는 등가 체적 전류를 나타내고 α, β 는 식 (5)에서 주어지는 미분 인자인 x, y 그리고 z 를 의미한다.

위의 식 (5)를 CG-FFT 방법[3,7]에 적용하기 위해서 전류를

$$J_x(x, y, z) = \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_x+1} \sum_{k=1}^{N_z+1} J_x^{Dr}[m, n, k] T_{mnk}^x(x, y, z)$$

$$J_y(x, y, z) = \sum_{m=1}^{N_x+1} \sum_{n=1}^{N_x} \sum_{k=1}^{N_z+1} J_y^{Dr}[m, n, k] T_{mnk}^y(x, y, z)$$

$$J_z(x, y, z) = \sum_{m=1}^{N_x+1} \sum_{n=1}^{N_x+1} \sum_{k=1}^{N_z} J_z^{Dr}[m, n, k] T_{mnk}^z(x, y, z)$$

$$T_{mnk}^x = \begin{cases} 1 - \frac{|x - \Delta mx|}{\Delta x} & \text{over } D_{mnk}^x \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}$$

$$D_{mnk}^x = \begin{cases} (m-1)\Delta x < x < (m+1)\Delta x \\ (n-1)\Delta y < y < n\Delta y \\ (k-1)\Delta z < z < k\Delta z \end{cases} \quad (6)$$

와 같이 지붕(rooftop) 기저 함수로 전개한다. 여기서 T_{mnk}^x 는 3차원의 지붕 함수이며, D_{mnk}^x 는 지붕 함수의 값이 존재하는 영역이다.

위의 식 (6)에서 주어진 것과 같이 전류는 J_x, J_y 그리고 J_z 의 성분으로 나누고 접지면과 유전체 층위의 도체에서는 J_z 성분은 영이다.

시험 함수로서 3차원의 razor blade 함수를 사용하였다.

IV. 계산결과 및 고찰

3차원 Green 함수의 적분은 Gaussian 구적법을 이용하여 계산하였다. 위의 계산 과정을 이용하여 접지면의 크기가 20cm × 15cm, 유전체 층의 크기가 20cm × 15cm × 0.2 cm, 그리고 유전체 층위의 중심에 5cm × 5cm인 도체가 있으며 유전체의 비유전율 $\epsilon_r = 2.56 + j0.0$ 일 때의 구조에 대하여 산란 해석을 하였다.[10] 또한 그림 1에서 주어진 구조에 대해서 파장을 16cm로 가정하여 전송선로의 끝에서 1V로 급전시켰을 때에 복사패턴을 구하였다. 그림 2는 그림 1에서 주어진 구조에서의 θ 에 대한 E-plane과 H-plane의 far field 패턴으로 그림 2-1과 2-2는 각각 $\phi = 0^\circ$ 일 때의 E_θ 성분과 $\phi = 90^\circ$ 일 때의 E_ϕ 성

분에 대한 정규화된 far field 패턴을 나타낸다. 또한 MoM(Moment of Method)와 비교하였다. 접지면과 직육면체의 크기는 20×15cm이다. 전체 마이크로스트립 구조를 x 와 y 방향에 대해서 16 × 16 그리고 z 방향에 대해서 8개의 cell로 나누었다.

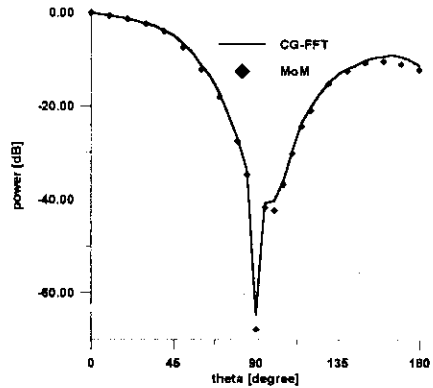


그림 2-1. E-plane far-field pattern ($20 \log_{10} |E_\theta|$)

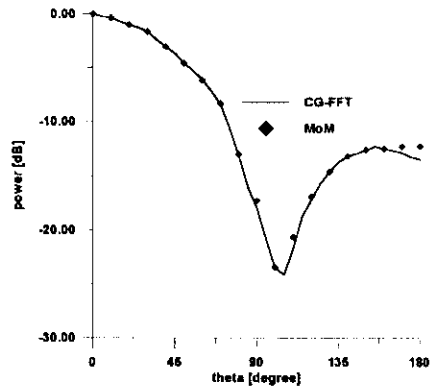


그림 2-2. H-plane far-field pattern ($20 \log_{10} |E_\phi|$)

V. 결론 및 적용

유한한 마이크로스트립 안테나 구조에서 유전체 위의 사각 패치와 전송선로에서 전송선로의 끝 부분으로 급전할 때, 유한한 마이크로스트립 안테나 구조를 등가 체적 전류로 대체하여, 적분방정식을 유도한 다음 등

가 체적 전류에 대해서 rooftop 기저 함수로 전개하고 razor blade 함수로 시험하여 이를 CG-FFT 방법으로 미지의 등가 체적 전류를 구하였다. 이를 통해 복사패턴을 비교하여 계산방법의 타당성을 확인하였다.

앞으로의 과제는 본 논문에서 제시한 방법을 이용하여 전송선 및 탐침(probe)으로 급전되는 유한한 마이크로스트립 어레이 안테나의 해석과 전송선로에 급전시켜 이를 마이크로스트립 안테나와 결합된 aperture 를 이용한 복사에 대하여 적용하는 것이다.

참고문헌

- [1] T. K. Sarkar, E. Arvas, "An Integral Equation Approach to the Analysis of Finite Microstrip Antenna : Volume/Surface Formulation," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-38, pp. 305-312, March. 1990.
- [2] J. R. Mosig, and F. E. Gardiol, "General Integral Equation Formulation for Microstrip Antennas and Scatterers," *IEE Proceedings, Vol. 132, Pt. II, No. 7, pp. 424-432, Dec. 1985.*
- [3] T. K. Sakar, E. Arvas, and S. M. Rao, "Application of FFT and the CGM for the solution of electromagnetic radiation from electrically large and small conducting bodies," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-34, pp. 635-640, May 1986.
- [5] 전재민, 윤리호, 조영기, "CG-FFT 방법을 이용한 임의 형태의 산란체에 대한 산란특성 해석," *한국전자과학회 영남지부 학술발표회 논문집*, pp. 83-86, 6월, 1997.
- [6] M. C. Bailey, M. D. Deshpande, "Integral Equation Formulation of Microstrip Antennas," *IEEE Trans. Antenna Propagat.*, vol. AP-30, No. 4, pp. 651-656, July 1982.
- [7] M. F. Catedra, R. P. Torres, J. Basterrechea, E. Gago, *The CG-FFT Method : Application of Signal Processing Techniques to Electromagnetics*. TK: Artech House, Inc., 1994 ch. 6.
- [8] T. K. Sarkar, E. Arvas, "On a Class of Finite Step Iterative Methods (Conjugate Direction) for the Solution of an Operator Equation Arising in Electromagnetics," *IEEE Trans. Antenna Propagat.*, vol. AP-33, pp. 1058-1066, Oct. 1985.
- [9] Y. Zhuang, K. L. Wu, C. Wu, J. Litva, "A Combined Full-Wave CG-FFT Method for Rigorous Analysis of Large Microstrip Antenna Arrays," *IEEE Trans. Antenna Propagat.*, vol. AP-44, pp. 102-109, Jan. 1996.
- [10] 손창우, 이철준, 김종규, 조영기, "유한한 마이크로스트립 구조에서 CG-FFT 방법을 이용한 해석," *마이크로파 및 전파 학술대회 논문집* vol. 21, No. 1, pp. 401-404, 5월 1998년.