

마이크로스트립 패치 안테나의 다중 분해능 웨이블릿 산란해석법

A Multiresolution Wavelet Scattering Analysis of Microstrip Patch Antennas

강병용 · 주세훈* · 빈영부* · 김형훈** · 김형동*

Byoung-yong Kang · Sae-hoon Ju* · Young-boo Vin*
· Hyung-hoon Kim** · Hyeong-dong Kim*

요 약

다중 분해능 웨이블릿 해석법을 마이크로스트립 패치 안테나의 산란해석에 적용하였다. 다중구조에 대한 스펙트럼 영역 그린 함수(spectral domain Green's dyad)의 특성을 공간-스펙트럼 영역 표현법을 이용하여 살펴보고, 스펙트럼 영역 웨이블릿을 주어진 문제에 적용하는 것이 유용함을 관찰하였다. 적분방정식에 모멘트법을 이용하여 행렬방정식을 얻고, 그 풀이에 CG(conjugate gradient)법과 스펙트럼 영역 웨이블릿을 결합하여 효율적으로 문제를 풀이할 수 있다. 단층구조 위에 놓인 정방형 패치에 대하여 기존의 모멘트법 결과와 다중 분해능 웨이블릿 해석법을 적용한 결과를 비교하였다.

Abstract

Microstrip patch antennas are analyzed by a multiresolution wavelet method. The spectral Green's dyad of the structure is obtained and its joint spatial-spectral domain representations are presented. Based on the joint spatial-spectral domain representation, we show that the spectral-domain wavelets are useful in the analysis of this problem. We obtain the matrix equations of the integral equations of this Green's dyad by using the method of moment(MoM), and efficiently solve the problem using the spectral domain wavelet transform concepts in conjunction with the conjugate gradient method. The results for a single-layered square patch are compared with those of conventional MoM and CG-FFT.

I. 서 론

마이크로스트립 구조를 갖는 패치 안테나는 저온 광선성(low-profile) 및 제작의 용이성 등과 같은 많은 장점으로 인해 그 응용범위가 넓으며 이동통신용 안테나로 많은 관심을 끌고 있다. 초기에는 출력이 낮고 좁은 대역폭을 갖는 안테나로 그 응용범

위가 매우 제한되어 사용되었으나, 많은 연구 결과로 인해 이동통신뿐만 아니라 위성통신 등으로 응용범위가 널리 확장되면서, 최근에는 가장 널리 사용되는 안테나 중의 하나이다.

마이크로스트립 패치 안테나의 정확한 해석은 무엇보다 중요하지만 해석 영역이 비균질 물질로 이루어져 있어 그 동안 많은 연구에도 불구하고 아직 해결해야 하는 많은 문제가 남아있다. 지금까지 사

「본 연구는 정보통신부 대학기초연구지원사업(과제번호 AB-97-G-0046)에 의해 수행된 것입니다.」

한양대학교 전자통신공학과(Dept. of Electronic Communication Eng., Hanyang Univ.)

* 한양대학교 전파공학과(Dept. of Radio Science and Eng., Hanyang Univ.)

** 광주여자대학교 컴퓨터공학과(Dept. of Computer Science, Kwangju Women's Univ.)

· 논 문 번 호 : 980511-048

· 수정완료일자 : 1998년 8월 8일

용되어온 마이크로스트립 패치 안테나의 해석에는 크게 근사 모델링과 수치해석법을 들 수 있다. 정사각형의 패치 안테나에 대한 근사 모델링중 이중 슬롯(double slot) 모델, 또는 전송선 모델(Transmission line model method)^{[1],[2]} 등이 있는데, 이러한 방법은 복잡한 모양의 패치에 대하여는 사용할 수 없는 단점이 있다. 또 다른 근사 모델링으로는 공동 모델(Cavity model)을 들 수 있으며^[3], 단층구조에 대하여 좋은 결과를 얻을 수 있다. 일반적인 경우에는 안테나를 와이어 그리드 모델링하고 모멘트법을 적용하거나^[4], 전류분포를 기저함수의 합으로 나타내고 모멘트법에 의해 해석하는 적분방정식 해법이 널리 사용되고 있다^[5].

얻어진 다층구조의 그린 함수^{[6]~[8]}를 이차원 자유공간 그린 함수의 공간-스펙트럼 영역 표현과 같이^{[9]~[11]}, 스펙트럼 영역 웨이블릿 개념을 사용하여 표현하였다. 그리고 주어진 적분방정식에 모멘트법을 적용하여 행렬방정식을 얻고, 그 풀이에는 기존의 공간 영역 및 스펙트럼 영역 해석법과는 개념이 다른 CG법을 결합한 스펙트럼 영역 웨이블릿을 이용한 방법을 사용하였다. 이 방법은 모멘트법에서 나타나는 임피던스 행렬의 요소를 구할 필요가 없고 스펙트럼 영역 그린 함수의 특성상 전기적으로 큰 구조의 해석에 유리하다. 이를 통하여 평면파가 입사되었을 때 마이크로스트립 패치에 유기되는 전류분포를 구하여 일반적인 행렬방정식 풀이로 구한 결과와 함께 비교하여 나타내었다. 그리고 해석 영역을 늘렸을 때 소요되는 계산시간을 측정하여 각각의 방법에 대해 비교하여 보았다.

II. 본 론

2-1 그린 함수의 공간-스펙트럼 영역 표현

마이크로스트립 패치의 해석에 사용되는 모멘트법은 다층구조의 그린 함수를 이용하여 임피던스 행렬의 요소를 구하게 되며, 이러한 다층구조의 그린 함수는 파동방정식에 경계조건을 적용하여 스펙트럼 영역에서 다음과 같이 표현된다^[6,8].

$$\begin{bmatrix} \tilde{E}_x \\ \tilde{E}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{G}_{xx} & \tilde{G}_{xy} \\ \tilde{G}_{yx} & \tilde{G}_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{J}_x \\ \tilde{J}_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 킬드는 공간에 대한 푸리에 변환값을 의미하며, \tilde{G} 행렬의 원소인 스펙트럼 영역 그린함수는 다음과 같다.

$$\tilde{G}_{xx} = \frac{-1}{k_x^2 + k_y^2} [\tilde{Z}^e k_x^2 + \tilde{Z}^h k_y^2] \quad (2.a)$$

$$\tilde{G}_{xy} = \frac{k_x k_y}{k_x^2 + k_y^2} [\tilde{Z}^h - \tilde{Z}^e] \quad (2.b)$$

$$\tilde{G}_{yx} = \tilde{G}_{xy} \quad (2.c)$$

$$\tilde{G}_{yy} = \frac{-1}{k_x^2 + k_y^2} [\tilde{Z}^h k_x^2 + \tilde{Z}^e k_y^2] \quad (2.d)$$

$$\tilde{Z}^h(k_x, k_y) = j k_0 \eta_0 \frac{\tan(\gamma_2 d)}{\gamma_2 + j \gamma_1 \tan(\gamma_2 d)} \quad (2.e)$$

$$\tilde{Z}^e(k_x, k_y) = j \frac{\eta_0}{k_0} \frac{\gamma_1 \gamma_2 \tan(\gamma_2 d)}{\epsilon_r \gamma_1 + j \gamma_2 \tan(\gamma_2 d)} \quad (2.f)$$

여기서 k_x, k_y 는 각각 x방향과 y방향의 전파상수를 나타내며, \tilde{Z}^h, \tilde{Z}^e 는 각각 TE 모드와 TM 모드의 그린함수로 생각할 수 있다. 또한 \tilde{Z}^h, \tilde{Z}^e 는 i 번째 층에 대하여 각각 $\gamma_i = \sqrt{k_i^2 - k_x^2 - k_y^2}$, $k_i = k_0 \sqrt{\epsilon_i}$, $k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ 의 값을 사용하게 된다. 식 (2)와 같이 표현되는 다층구조 그린함수는 공간영역이나 스펙트럼 영역에서의 관찰이 일반적이나 공간-스펙트럼 영역에서 그린함수를 표현함으로써 스펙트럼영역에서의 다중 분해능 특성을 관찰할 수 있다: 공간 영역에 대해 국부적이나 스펙트럼 영역에서 넓게 퍼져 있는 근거리 성분과 스펙트럼 영역에서 국부적이나 공간 영역에서는 원거리까지 남아있게 되는 진파되는 성분. 공간-스펙트럼 영역 표현법으로는 이미 제안된 여러 방법중 스펙트럼 영역 웨이블릿을 이용하여 표현하였다. 스펙트럼 영역 그린함수 $\tilde{G}(k_x, k_y)$ 에 대한 스펙트럼 영역 웨이블릿은 다음과 같다^[11].

$$CWT(\rho, k_\rho, \phi) = \int \tilde{G}(\chi, \phi) \Psi(\rho(\chi - k_\rho)) d\chi \quad (3)$$

위 식에서 $k_\rho = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$, $\phi = \tan^{-1} \frac{k_y}{k_x}$ 이다. 식 (3)에서와 같이 CWT(Continuous Wavelet Transform)는 스펙트럼 영역 그린함수 $\tilde{G}(\chi, \phi)$ 를 확장(dilation) 및 천이(shift)되는 웨이블릿 기저함수 $\Psi(\chi)$ 에 의해서 분해하는 것이다. 스펙트럼 영역 웨이블릿은 공간적으로 가변되는 윈도우를 사용함으

로써 그린함수의 공간과 스펙트럼에서 국부적인 성분을 동시에 관찰할 수 있는 장점을 갖게 된다. 식 (3)의 실제구현은 공간영역에서 가능하며^[9] 사용되는 $\Psi(x)$ 의 공간영역 형태 $\Psi(\rho)$ 는 Hamming윈도우를 사용하였다^[12].

그림 1은 접지된 면의 위에 상대유전율이 3이고

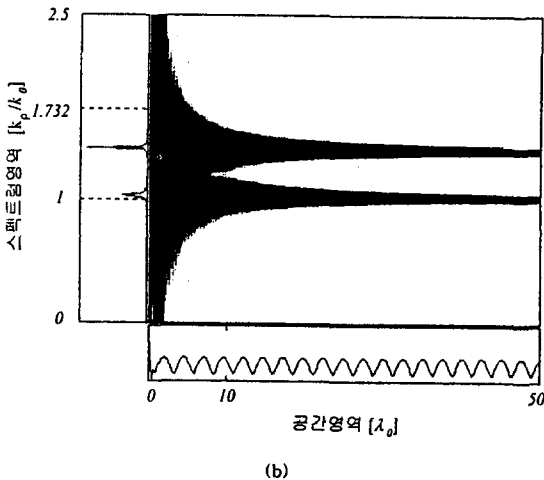
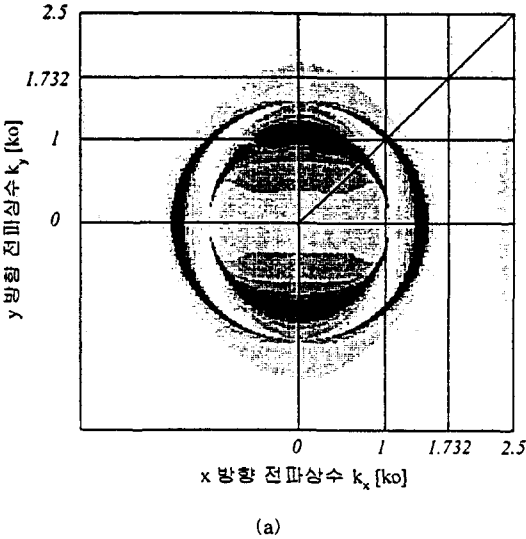


그림 1. 스펙트럼 영역 다층 구조 그린 함수의 표현 상대유전율 3, $h/\lambda_0=0.2$
 (a) 스펙트럼영역에서의 이차원 그린함수
 (b) 공간-스펙트럼 영역에서의 웨이블릿 스펙트럼-공간 표현, dynamic range = 30 dB

표 1. 상대유전율 3, $h/\lambda_0=0.2$ 의 마이크로스트립 구조에서 전파되는 표면파모드의 전파상수

표면파 (surface wave modes)	TE	1.0309 k_0
	TM	1.4171 k_0

파장으로 정규화한 두께가 0.2인 단층구조의 그린 함수를 표현한 것이다. 그림 1(a)는 스펙트럼 영역에서의 그린함수를 이차원으로 나타낸 그림으로 ϕ 가 0일 때는 TM 모드, $\pi/2$ 일 때는 TE 모드만을 갖게 됨을 알 수 있다. 그림 1(b)는 ϕ 가 $\pi/4$ 일 때의 다층구조의 그린함수를 스펙트럼 영역 웨이블릿을 이용하여 공간-스펙트럼영역에서 나타낸 그림으로 하측에는 공간 영역 그린함수를, 좌측에는 스펙트럼 영역 그린함수를 함께 나타내었다. ϕ 가 $\pi/4$ 이므로 전파모드인 TE와 TM의 표면파를 모두 관찰할 수 있으며 표면파모드 각각의 전파상수는 표 1에 표시하였다. 그림 1(b)에서 볼 수 있듯이 원거리로 갈수록 그린함수의 성분이 특정 부분, 즉 주어진 구조의 표면파 모드의 전파상수로 집중되는 것을 알 수 있으며 이러한 특성으로 인해서 스펙트럼 영역에서의 웨이블릿 개념을 적용하는 것이 다층구조의 그린함수의 표현에 있어서 매우 효율적임을 알 수 있다.

2-2 웨이블릿을 이용한 적분방정식 풀이

그림 2와 같은 마이크로스트립 패치 안테나에 대하여 다음과 같은 적분방정식이 주어진다.

$$\hat{z} \times E^i(\vec{r}) = \hat{z} \times \int_{S_p} G(\vec{r}-\vec{r}') \vec{J}(\vec{r}') ds', \text{ for } \vec{r} \in S_p \quad (4)$$

E^i : 입력필드, S_p : 도체표면, G : 그린함수

위의 식 (4)에 모멘트법을 적용하여 주어진 적분방정식을 행렬 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$[G]J = -E \quad (5)$$

위의 식 (5)로 표현된 행렬방정식의 풀이에는 G 를 구한 후에 가우스(Gauss) 소거법을 이용하는 직접법과 전류 J 를 가정하여 GJ 를 구한 후 오차를 구하여 정확한 해에 접근해 가는 간접반복법이 있다. 본 연구에서는 간접반복법 중 하나인 CG(Con-

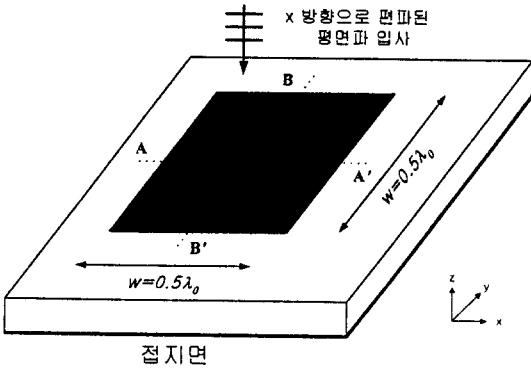


그림 2. 마이크로스트립 패치 안테나 구조와 입사파

jugate Gradient) 엘거리즘을 사용하여 문제를 해석하였다. 또한 적분방정식이 컨벌루션 적분이므로 CG 엘거리즘을 적용하는 과정에서 나타나는 적분을 전류원과 관측점사이가 멀수록 전파모드인 표면파의 전파상수 부근으로 집중되는 값을 갖는 그린함수 특성을 이용하여 계산하였다.

스펙트럼 영역 웨이블릿을 이용하여 컨벌루션 적분을 계산하는 과정은 그린함수의 다중 분해능 특성을 이용하기 위하여 멀리 떨어진 부분은 큰 집단으로 계산하고 가까운 부분은 작은 집단으로 계산하여 더해줌으로써 적분식을 계산하게 된다. 이러한 방식은 그린함수가 좁은 영역에만 집중되는 특성을 갖기 때문에 스펙트럼 영역의 집중된 값만의 계산으로 근사 계산을 하는 것이다.

그림 1(b)와 같이 그린 함수는 공간적으로 멀어질수록 표면파 모드를 나타내는 전파상수의 부근에 좁은 띠 모양으로 나타나게 되며, 적분방정식을 푸는데 필요한 컨벌루션 계산은 컨벌루션 정리에 의해 스펙트럼 영역에서 곱셈으로 된다. 그린함수의 특성에 맞는 웨이블릿 개념을 이용하여 가까운 곳에서는 작은 크기의 집단으로, 그리고 먼 영역에서는 큰 크기의 집단으로 나누어서 스펙트럼 영역에서 웨이블릿을 적용한 것과 같이 하면 거리가 멀어질수록 집단의 크기는 증가하지만 컨벌루션 계산에 필요한 요소(element)의 수는 거의 일정한 수준으로 유지할 수 있다.

그림 3과 같이 각각 x방향으로 $4\lambda_0$ (λ_0 : 자유공간에서의 파장) 만큼 떨어진 크기가 $2\lambda_0$ 의 정방형의

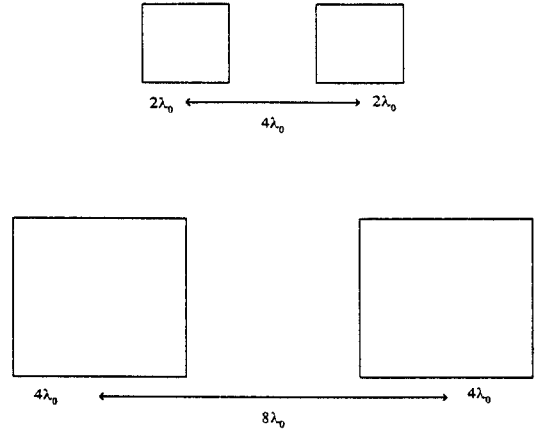
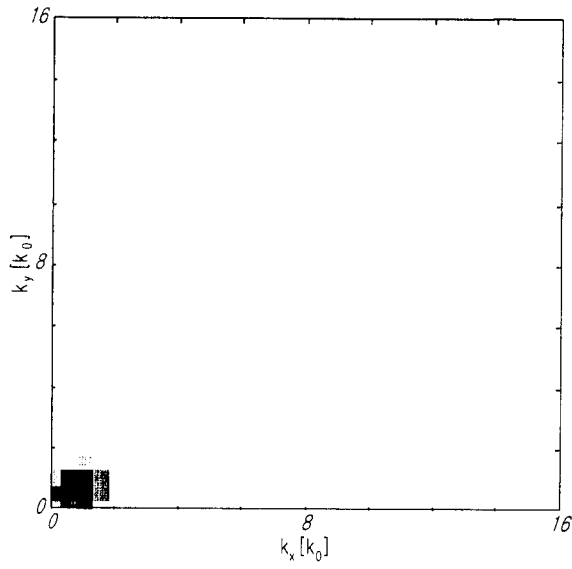


그림 3. 거리가 가까울수록 작은 집단, 거리가 멀수록 큰 집단을 사용하는 다중분해능 엘거리즘

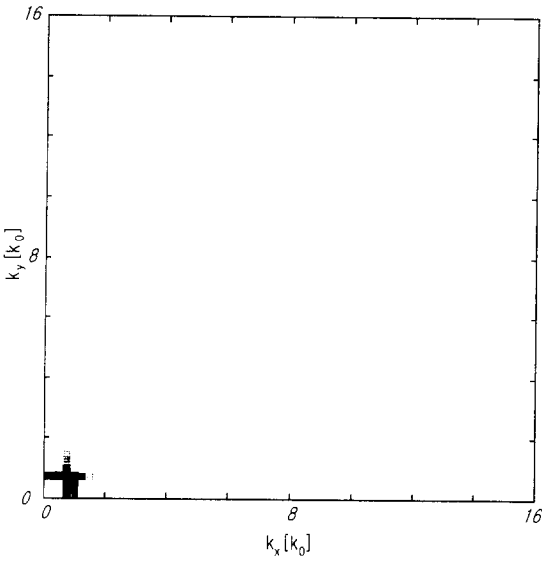
집단과 $8\lambda_0$ 만큼 떨어진 크기가 $4\lambda_0$ 인 정방형의 집단간의 영향을 나타내는 그린 함수의 스펙트럼 영역 값을 그림 4에 나타내었다. 이 집단들은 상대유전율 3, 두께가 $h/\lambda_0 = 0.1$ 인 접지된 유전체 위에 있는 경우이다. 그림 4는 스펙트럼 영역 그린함수의 최대값으로 정규화 했을 때 크기가 $1/1000$ 이상인 요소들을 나타낸 것이며, 같은 방법으로 y방향과 x-y방향으로 계산한 결과를 표 2에 나타내었다. 표 2에서 알 수 있듯이 전체 요소의 개수는 4배로 늘게 되었지만 실제 계산에 필요로 하는 그린함수는 더욱 적은 부분에 집중되기 때문에 집단간의 컨벌루션 계산에 필요한 그린함수 요소들의 수는 거의 일정한 수준으로 유지되는 것을 확인할 수 있다.

표 2. 실제 계산에 사용되는 스펙트럼 영역 그린 함수의 요소 수

	최대값의 1/1000 이상인 요소	총 요소수
x방향 $4\lambda_0$	1117	4096
y방향 $4\lambda_0$	1392	4096
x-y방향 $4\lambda_0$	1749	4096
x방향 $8\lambda_0$	1444	16384
y방향 $8\lambda_0$	1359	16384
x-y방향 $8\lambda_0$	1675	16384



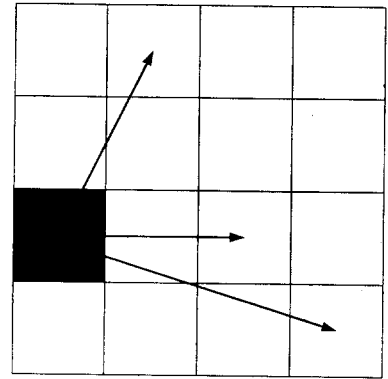
(a)



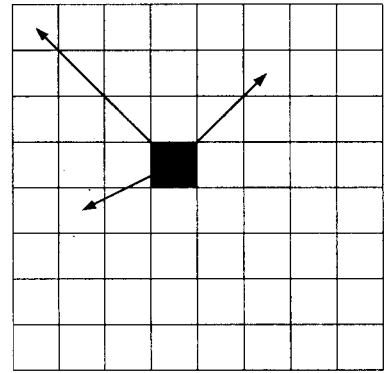
(b)

그림 4. 스펙트럼 영역 그린 함수 표현

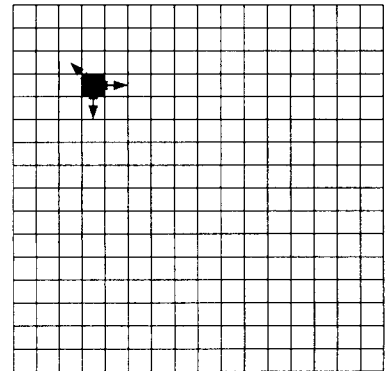
- (a) x방향으로 4파장 떨어진 2파장 크기의 패치간 상호작용 스펙트럼
- (b) x방향으로 8파장 떨어진 4파장 크기의 패치간 상호작용 스펙트럼



(a)



(b)



(c)

그림 5. 정방형 패치에 대한 스펙트럼 영역 웨이블릿 적용 알고리즘

- (a) 첫 번째 단계에서의 패치 분할
- (b) 두 번째 단계에서의 패치 분할
- (c) 마지막 단계에서의 패치 분할

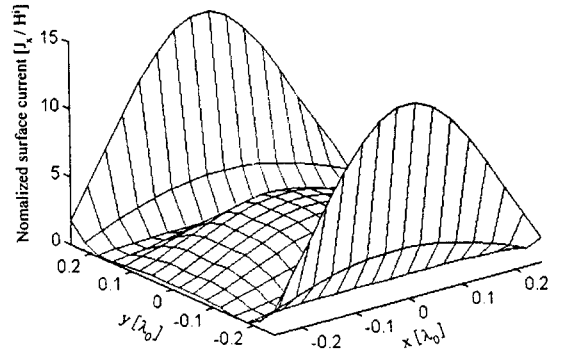
정방형의 패치에 대하여 스펙트럼 영역 웨이블릿을 적용하는 과정은 다음과 같이 요약 할 수 있다.

- (i) 그림 5(a)와 같이 정방형의 패치를 x, y방향으로 각각 4개씩으로 나누고 16개의 집단들 중에 서로 이웃하지 않은 집단 사이의 컨벌루션을 스펙트럼 영역에서 계산하여 더한다.
- (ii) (i)과 같이 나누어진 집단들을 그림 5(b)처럼 다시 x, y방향으로 각각 절반씩으로 나누어 준 후에 바로 이웃하지 않고 또한 전 단계에서 계산된 영역에 포함되지 않았던 집단들 사이의 컨벌루션을 스펙트럼 영역에서 계산하여 더해준다.
- (iii) (ii)를 계속 반복하다가 집단의 크기가 x, y 방향으로 각각 4개의 샘플만을 포함하는 크기가 되었을 때, 즉 한 조각에 포함된 샘플의 수가 16개가 되었을 때에는 더 이상 패치를 나누지 않고 그림 5(c)에 표시된 것과 같은 어두운 부분과 빛금 부분같이 서로 이웃하는 요소와 컨벌루션을 계산해 더하고, 그 요소 스스로의 컨벌루션을 계산하여 더해줌으로써 전체 컨벌루션을 계산한다.

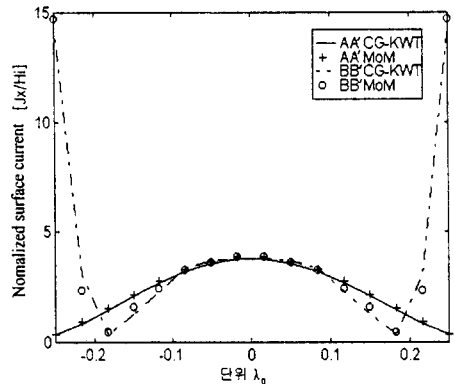
공간적으로 분할된 집단들의 컨벌루션 계산에 필요한 스펙트럼 영역 그린함수는 거리가 먼 집단들에 대해서는 공간적으로 큰 분포를 갖지만 스펙트럼 영역에서 국부적인 값을 갖고, 거리가 가까운 집단들에 대해서는 공간영역에서 작은 분포를 갖지만 스펙트럼 영역 넓은 부분에서 값을 가지게 된다. 그림 4에서 스펙트럼 영역에서 웨이블릿을 적용한 스펙트럼 영역 그린함수의 값으로부터 이러한 특성을 볼 수 있다.

III. 계산 결과 및 고찰

그림 2와 같은 구조의 정방형의 마이크로스트립 패치 안테나에 대하여 산란 해석을 하였다. 유전체의 상대유전율은 3, 정규화된 두께는 $h/\lambda_0 = 0.2$ 인 유전체 위에 패치가 있을 때 x방향으로 편파된 평면파가 수직으로 입사하는 경우에 대하여 패치에 유기되는 전류분포를 구하였다. 모멘트법을 이용하여 행렬 방정식을 얻고 CG 법과 위에서 설명한 웨이블



(a)



(b)

그림 6. 마이크로스트립 패치에 유기되는 전류
 (a) 패치에 유기되는 표면전류의 x성분의 크기 (상대유전율 3, $h/\lambda_0 = 0.2$)
 (b) CG-KWT와 모멘트 방법에 의한 AA'과 BB'의 표면전류 결과의 비교 (상대유전율 3, $h/\lambda_0 = 0.2$)

릿을 이용한 컨벌루션 계산법을 이용하였다. 공간 영역에서의 샘플링 간격은 $\lambda_0/32$ 이며 x, y 각 전류원은 각각 256개의 샘플로 표현된다. 컨벌루션 계산을 위한 공간적으로 떨어진 부분의 스펙트럼 영역에서의 그린 함수는 식 (1)에 주어진 스펙트럼 영역 그린 함수를 역푸리에 변환하여 공간 영역값을 얻

표 3. 각 방법간 계산시간의 비교

방법 \ 요소수	512	2048
MoM	39.16s	53m 57.86s
CG-KWT	1m 16.40s	4m 52.09s

은후 필요한 부분을 취하여 푸리에 변환하여 얻을 수 있다.

그리고 CG법에서 허용되는 상대오차를 1/1000로 했고 각 단계에서 컨벌루션 계산시 그린 함수의 스펙트럼 영역 표현에서 최대값을 갖는 스펙트럼 성분의 1/1000까지만을 이용하여 계산을 하였다. 두께가 $h/\lambda_0 = 0.2$ 인 경우에 대한 해석 결과를 그림 6(a)와 6(b)에 나타내었다. CG법과 웨이블릿을 이용하여 얻은 패치 위의 전류밀도의 x성분을 그림 6(a)에 나타내었고 그림 6(b)에는 그림 2에 표시된 A-A'와 B-B' 두 단면에 대한 전류밀도의 x 성분값을 각각의 방법에 대하여 일반적인 모멘트법으로 구한 결과와 비교하여 표시하였다. 표시된 값들은 모두 입사장계의 세기로 정규화된 값들이다.

그리고 표 3에는 위에서 해석한 경우인 전류를 512개로 표현했을 때 전류분포를 구하는데 걸리는 시간과 x, y방향으로 각각 크기가 2배가 되었을 때, 즉 전류를 2048개로 표현했을 때 걸리는 시간을 각각의 방법에 대하여 표시하였다. 표에 나타난 결과를 볼 때 미리 예상한 바와 같이 문제의 크기가 커졌을 때 웨이블릿을 이용하여 계산하는 방법이 매우 효율적임을 알 수 있다.

IV. 결 론

다층구조의 그린 함수를 공간-스펙트럼영역 표현법을 이용하여 나타내는데 스펙트럼 영역 웨이블릿 표현법이 그린 함수의 특성을 매우 잘 나타내는 효율적인 수단임을 알 수 있었다. 그리고 CG 엘저리즘과 웨이블릿을 결합하여 주어진 적분방정식을 풀이하였으며 기존의 방법들을 이용하여 얻은 결과와 비교하여 좋은 결과를 얻을 수 있음을 보았다. 또한 본 연구에서 공간-스펙트럼 영역 표현법을 이용하여 살펴 본 바와 같은 다층구조의 그린 함수의 특성상 다층구조에 놓인 전기적으로 큰 크기의 문제에

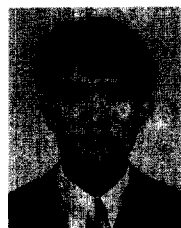
적용되었을 때에 좋은 결과를 보일 것으로 기대된다. 그리고 나아가 마이크로스트립 패치 어레이 안테나 해석에도 적용이 가능하고, 구조에 대한 전파상수를 미리 예측하여 값이 집중되는 부위만을 찾아서 더욱 더 효과적인 계산 루틴을 작성할 수 있을 것이며 이에 대한 연구 및 고찰이 뒤따라야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] A. G. Derneryd, "Linearly polarized microstrip antennas," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-24, no. 6, pp. 846-851, Nov. 1976.
- [2] J. Q. Howell, "Microstrip antennas," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-23, no. 1, pp. 90-93, Jan. 1975.
- [3] W. F. Richards, Y. T. Lo, and D. D. Harrison, "An improved theory for microstrip antennas and applications," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-27, no. 1, pp. 38-46, Jan. 1979.
- [4] P. K. Agrawal and M. C. Bailey, "An analysis for microstrip antennas," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-25, no. 6, pp. 756-759, Nov. 1977.
- [5] E. H. Newman and P. Tulyathan, "Analysis of microstrip antennas using moment methods," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-29, no. 1, pp. 47-53, Jan. 1981.
- [6] L. B. Felsen and N. Marcuvitz, *Radiation and Scattering of Waves*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1973.
- [7] T. Itoh, "Spectral-domain immittance approach for dispersion characteristics of generalized printed transmission lines," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-28, pp. 733-736, July 1980.
- [8] P. Bhartia, K. V. S. Rao and R. S. Tomar, *Millimeter-Wave Microstrip and Printed Circuit Antennas*, Artech House, 1991.

- [9] H. Kim and H. Ling, "Wavelet analysis of radar echo from finite-size targets," *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, vol. 41, no. 2, Feb. 1993.
- [10] H. Kim and H. Ling, "On the efficient representation of electrodynamic Green's function using multiresolution wavelet concepts," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 9, no. 4, pp. 183-187, July 1995.
- [11] S. Kahng, S. Ju, and H. Kim, "Continuous wavelet representation of Green's functions in layered media," *Electronics Letters*, vol. 34, no. 4, Feb. 1998.
- [12] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-time signal processing*. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall, 1989.

강 병 용



1996년 2월 : 한양대학교 전파공학과 (학사)
 1998년 2월 : 한양대학교 전파공학과 대학원(석사)
 1998년 3월~현재 : 한화정보통신 무선 가입자망 연구그룹 연구원
 [주 관심분야] 안테나 및 마이크로파

회로설계, 전자파 수치해석

주 세 훈

1997년 2월 : 한양대학교 전파공학과 (학사)
 1997년 3월~현재 : 한양대학교 전파공학과 대학원 석사과정
 [주 관심분야] 안테나 및 마이크로파 회로설계, 전자파 수치 해석

빈 영 부

1998년 2월 : 한양대학교 전파공학과(학사)
 1998년 3월~현재 : 한양대학교 전파공학과 대학원 석사과정
 [주 관심분야] 안테나 및 마이크로파 회로설계, 전자파 수치 해석

김 형 훈

1986년 2월 : 전남대학교 계산통계학과(학사)
 1988년 2월 : 한국과학기술원 전산학과(석사)
 1988년 3월~1990년 9월 : 기아자동차 기술센터 연구원
 1990년 9월~1994년 7월 : 휴먼컴퓨터 선임연구원
 1995년 3월~현재 : 전남대학교 계산통계학과 박사과정
 1994년 9월~현재 : 광주여자대학교 컴퓨터과학과
 [주 관심분야] 컴퓨터 프로그래밍

김 형 동



1984년 2월 : 서울대학교 공과대학 전자공학과(학사)
 1986년 2월 : 서울대학교 공과대학 전자공학과(석사)
 1992년 5월 : The University of Texas at Austin(Ph. D.)안테나 및 電波傳播, 마이크로파공학 전공
 1989년 5월~1992년 5월 : Microwave Research Lab., Dept. of Electrical and Computer Engineering, The University of Texas at Austin : Research Assistant
 1992년 6월~1993년 1월 : Microwave Research Lab., Dept. of Electrical and Computer Engineering, The University of Texas at Austin : Postdoctoral Fellow
 1993년 3월~1996년 2월 : 한양대학교 전파공학과 전임강사
 1996년 3월~현재 : 한양대학교 전파공학과 조교수
 [주 관심분야] 이동통신용 안테나, 마이크로파 회로, 초음파 공학 전자파 수치해석, 웨이블릿 변환의 수치해석 응용