

---

# 복합형 구조에서의 전자파전파 특성

윤광렬\*

Wave Propagation characteristic from Composite structures

Kwang-Yeol Yoon\*

요 약

이동통신의 급속한 보급과 발전에 의하여, 시가지에서의 전자파전파의 특성을 해명해야할 뿐만 아니라, 산림, 계곡 등의 외부 공간과 실내 공간 등의 전파난청 지역으로 불려오던 공간에 있어서도 안정적으로 통신을 이용할 수 있는 무선통신환경 개선의 중요성이 높게 요구 되고 있다. 더욱이, 이동통신의 디지털화와 더불어 건물 등에 의한 반사에 의해서 생기는 멀티패스에 기인하는 수신펄스의 시간지연이 고속디지털통신의 장애가 되고 있다. 이러한 도심 시가지에 대한 전자파전파의 특성을 보다 정밀하게 추정하기 위해서는 건물 벽면의 구조 등의 영향도 고려 대상으로 포함 시킬 필요성이 있다. 따라서 본 논문에서는 FVTD(finite volume time domain)법을 적용하여, 기초적인 자료 보완을 위하여, 즉 주기적 구조에 의한 산란 특성과 불규칙적 표면을 포함하는 복합형 구조에 의한 2차원 전파환경 모델들에 대한 산란 특성을 조사 하였다.

## ABSTRACT

With the rapid and wide-spread use of mobile communications much attention has been focussed on propagation in the urban area crowded with buildings. It is often surrounded by hills, forests, and mountains. The importance of surface scattering interference between transmitters and receivers on the rough surfaces has been interested and investigated. Therefore, a prediction method is necessary to estimate the influence of rough surfaces on microwave radio propagation. Moreover, most of the mobile communications are performed based on the digital communication system rather than the analog one. In this case, we must pay more careful attention to the signal delay caused by the phase delay due to the multi-path propagation. In this paper we have analyzed numerically scattering of electromagnetic waves from Composite structures by using FVTD (Finite Volume Time Domain) method. We consider two different types of rough surfaces such as periodic and composite structures.

## 키워드

electromagnetic wave scattering, composite surface, Bragg reflection, FVTD, NRCS.

## 1. 서 론

최근 이동단말기의 급속한 보급과 발전에 의하여, 통상의 시가지에서의 전자파전파 특성을 해명해야할 뿐만 아니라, 빌딩으로 둘러싸인 시가지 및 실내 공간

등의 전파난청 지대로 불려오던 공간에 있어서도 안정적으로 통신을 이용할 수 있는 무선통신환경 개선의 중요성이 높게 요구 되고 있다. 더욱이, 이동통신의 디지털화와 더불어 건물 등에 의한 반사에 의해서 생기는 멀티패스에 기인하는 수신펄스의 시간지연이

---

\* 계명대학교 전자공학과(yoonky@kmu.ac.kr)

접수일자 : 2011. 03. 23

심사(수정)일자 : 2011. 04. 20

게재확정일자 : 2011. 06. 15

고속디지털통신의 장애가 되고 있다. 이러한 도심 시가지에 대한 전자파전파의 특성을 보다 정도 높게 추정하기 위해서는 건물 벽면의 구조 및 간판 등의 영향도 고려 대상으로 포함 시킬 필요성이 있다. 향후의 이동통신의 신기술은, 복잡하고 다양화 되어 가는 건축물의 어떠한 공간에 있어서도, 빈약한 전파를 사용하여, 다양하고도 고도한 사용자의 통신수요에 응할 수 있도록 기술적으로 매우 가파른 장벽을 넘어 가야만 한다. 이러한 문제들을 극복하기 위해서는, 지금까지의 실험과 통계적 데이터해석 위주의 시가지 전자파전파의 연구개발에 전자파의 기초이론인 전자계(electromagnetic field)의 해석적 요소를 포함시키는 새로운 관점에 입각한 기술혁신이 필요하다고 생각된다. 이러한 관점에서 볼 때, 본 연구에서 다루고자 하는 무선통신환경에서의 시가지, 산림, 해면, 빌딩 벽면 등의 문제를 불규칙조면(random rough surface)으로 모델링하여 전자파 산란문제의 그 특성을 상세히 파악 하는 것과 2차원 전파환경(傳播環境)모델들에 대한 전자파전파특성의 기초적 개념들을 설명할 수 있는 연구를 주된 목표로 두고 있다.

지금까지 개발된 시가지내의 전파추정 시스템 구축에 있어서는 통상의 표면은 평면으로 가정하여 처리하고 있다 [1]. 이 문제는 시스템의 소형화와 처리 시간의 단축화에 있어서도 필요한 요건이기도 하다. 그러나 실제 문제에 있어서는 간판과 같은 빌딩의 부착물, 창, 테라스 등과 같은 규칙적 또는 불규칙적 표면 구조를 가지고 있는 경우가 일반화 되어 있는 실정이다. 본 논문에 있어서는 FVTD(finite volume time domain)법을 적용하여 기초적인 산란 특성 평가를 위하여 2분류에 의한, 즉 주기적 구조에 의한 산란 특성과 불규칙적 표면을 포함하는 복합형 구조에 의한 2차원 전파환경 모델들에 대한 산란 특성을 조사 하였다.

## II. FVTD 관계식 및 산란문제

### 2.1 2차원 FVTD 관계식

계산의 편리를 위해 자유공간의 고유임피던스로 정규화된 자계를 이용하며, 수평편파의 FVTD 관계식을

정리하면 다음과 같이 주어진다[2].

$$H_x^{n+1}(i, j) = \Xi^{i,j} H_x^n(i, j) - \Gamma_y^{i,j} A^{i,j} [E_z^n(i, j+1) - E_z^n(i, j-1)] \quad (1)$$

$$H_y^{n+1}(i, j) = \Xi^{i,j} H_y^n(i, j) - \Gamma_x^{i,j} A^{i,j} [E_z^n(i+1, j) - E_z^n(i-1, j)] \quad (2)$$

$$E_z^{n+1}(i, j) = \Omega^{i,j} E_z^n(i, j) - \Gamma_y^{i,j} B^{i,j} [H_x^{n+1}(i, j+1) - H_x^{n+1}(i, j-1)] + \Gamma_x^{i,j} B^{i,j} [H_y^{n+1}(i+1, j) - H_y^{n+1}(i-1, j)] \quad (3)$$

수직편파의 FVTD 관계식은

$$H_z^{n+1}(i, j) = \Xi^{i,j} H_z^n(i, j) - \Lambda_y^{i,j} A^{i,j} [E_x^n(i, j+1) - E_x^n(i, j-1)] + \Lambda_x^{i,j} A^{i,j} [E_y^n(i+1, j) - E_y^n(i-1, j)] \quad (4)$$

$$E_x^{n+1}(i, j) = \Omega^{i,j} E_x^n(i, j) + \Gamma_y^{i,j} B^{i,j} [H_z^{n+1}(i, j+1) - H_z^{n+1}(i, j-1)] \quad (5)$$

$$E_y^{n+1}(i, j) = \Omega^{i,j} E_y^n(i, j) + \Gamma_x^{i,j} B^{i,j} [H_z^{n+1}(i+1, j) - H_z^{n+1}(i-1, j)] \quad (6)$$

으로 표현되며, 위의 관계식들에 포함된 step parameters 는 다음과 같이 정의 된다.

$$\Xi^{i,j} = \exp(-\alpha_{mi,j}) \quad (7)$$

$$\Lambda_{x,y}^{i,j} = \frac{c\Delta t}{2\mu_{ri,j}\Delta x,y} \quad (8)$$

$$A^{i,j} = \frac{1 - \exp(-\alpha_{mi,j})}{\alpha_{mi,j}} \quad (9)$$

$$\Omega^{i,j} = \exp(-\alpha_{i,j}) \quad (10)$$

$$\Gamma_{x,y}^{i,j} = \frac{c\Delta t}{2\epsilon_{ri,j}\Delta x,y} \quad (11)$$

$$B^{i,j} = \frac{1 - \exp(-\alpha_{i,j})}{\alpha_{i,j}} \quad (12)$$

$$\alpha_{mi,j} = \frac{\sigma_{mi,j}\Delta t}{\mu_0\mu_{ri,j}} \quad (13)$$

$$\alpha_{i,j} = \frac{\sigma_{i,j}\Delta t}{\epsilon_0\epsilon_{ri,j}} \quad (14)$$

여기서  $\Delta x$ 와  $\Delta y$ 는 spatial increment 이며,  $\Delta t$  는 time difference를 표시한다. 또한,  $c$ 는 자유공간의 전 파속도를 나타낸다.

유한한 구조의 해석을 위한 흡수경계조건은 PML (perfectly matched layer)의 흡수경계 조건을 적용하였다[3].

## 2-2 Scattering Problem

본 수치계산에서 사용되는 입사파는 다음과 같이 수정된 Gaussian beam pattern 으로 가정 한다[4].

$$F_z^i(x,y) = \exp\{-jk(x\sin\theta_i - y\cos\theta_i)[1+w(x,y)]\} \cdot \exp\{-(x+y\tan\theta_i)^2/g^2\} \quad (15)$$

여기서  $F_z^i$  는 사용편파에 따라  $E_z^i$  또는  $H_z^i$  로 사용된다. 식 (15)의  $\theta_i$ 는 입사파의 입사각을 나타내며,  $k = 2\pi/\lambda$  는 파수이며,  $\lambda$ 는 자유공간의 파장 (electromagnetic wavelength)을 의미한다.

또한, 식(15)의

$$w(x,y) = \frac{2(x+y\tan\theta_i)^2/g^2 - 1}{(kg\cos\theta_i)^2} \quad (16)$$

로 정의되며, 여기서  $g$ 는 tapering을 조정하는 계수로

$g=L/N$  ( $L$  is the finite surface length,  $N=4$ )로 사용한다.

2차원 FVTD법을 이용하는 경우, 수평 및 수직편 파에 대한 원방계(far field)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_z^s = -jk \frac{e^{-j\pi/4}}{2\sqrt{2\pi k}} \frac{e^{-jkr}}{\sqrt{r}} \int_{-x}^x [-E_z(x,y)\sin\theta_s - H_x(x,y)] dx \times \exp(jk(x\cos\theta_s + y\sin\theta_s)) \quad (17)$$

$$H_z^s = -jk \frac{e^{-j\pi/4}}{2\sqrt{2\pi k}} \frac{e^{-jkr}}{\sqrt{r}} \int_{-x}^x [-H_z(x,y)\sin\theta_s + E_x(x,y)] dx \times \exp(jk(x\cos\theta_s + y\sin\theta_s)) \quad (18)$$

산란특성을 평가하기 위하여 NRCS(bistatic normalized radar cross section)를 다음과 같이 정의하며 [5],

$$\sigma^0(\theta_i, \theta_s) = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{2\pi |F^s|^2}{\int |F^i(x,0)|^2 dx} \quad (19)$$

여기서,  $\mathbf{F}_s$  는 식(17), (18)에 의해 수평편파일 경우는  $\mathbf{F}_s = \mathbf{E}_s$ , 수직편파일 경우는  $\mathbf{F}_s = \mathbf{H}_s$ 로 이용되며, 불규칙조면의 경우에는, 25개의 샘플을 이용하여 NRCS를 계산하였다.

## III. 수치계산 결과 및 분석

수치해석에 있어서 사용된 주파수는 1.0GHz 이며, 표면의 재질은 콘크리트로 가정하여 유전율( $\epsilon_r$ )을 6.76으로, 도전율( $\sigma$ )을 0.0023(S/m)으로 설정 하였다. 전체 해석영역은  $8000\Delta x \times 2000\Delta y$ 로 모델링 하여, 셀 사이즈를  $\Delta x = \Delta y = \lambda/40$ 으로 설정하였다. Tapered incident wave를 사용하여 표면에 대한 입사각을 45도로 설정하였다. 각 모델들에 대한 산란 특성은 식(19)을 이용하여, 수평 또는 수직 편파에 대하여 NRCS를 계산하였다.

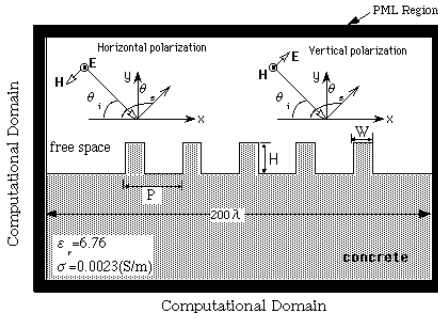
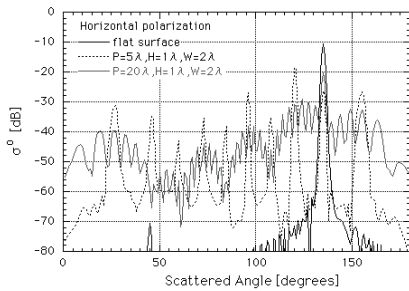


그림 1. 주기적 표면의 시뮬레이션 구조  
Fig. 1 Geometry of problem for a simulation of periodic surface.

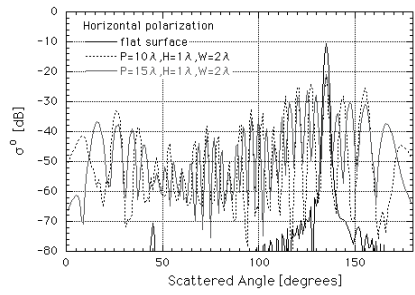
먼저 주기적 표면의 산란 특성 파악을 위한 FVTD 시뮬레이션 구조를 그림 1에 표시 하였다. 규칙적 표면 구조의 주기장(periodic length)을 P, 높이를 H, 폭을 W로 표시한다. 특히, 주기적 구조의 표면에 대해서는 Bragg reflection의 조건을 조사해야하며, 다음과 같은 관계를 만족한다.

$$\Theta_n = \pi - \cos^{-1}(\cos\theta_i + \frac{\lambda}{P}n) \quad (20)$$

여기서,  $\theta_i$ 는 입사각이며,  $\lambda$ 는 파장, P는 표면의 공간적 주기장을 나타내며, 이때의  $n=0,-1,-2,\dots$  이다.  $n=0$ 일 경우,  $\Theta_0=\pi-\Theta$ 는 일반적인 광학적 반사각을 의미한다.



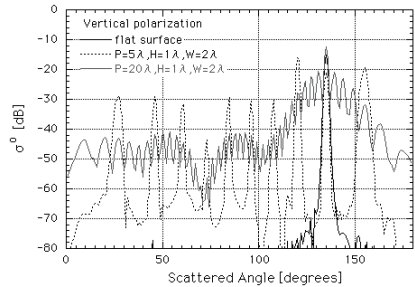
(a) 주기장의 영향(5λ,20λ)  
(a) Effect of periodic length(5λ,20λ)



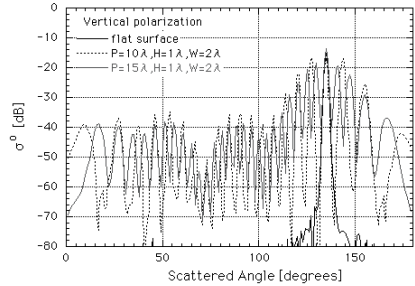
(b) 주기장의 영향(10λ,15λ)  
(b) Effect of periodic length(10λ,15λ)

그림 2. 수평편파를 사용한 주기적 구조에서의 산란 특성.

Fig. 2 Characteristic of scattering from periodic structure in case of horizontal polarization.



(a) 주기장의 영향(5λ,20λ)  
(a) Effect of periodic length(5λ,20λ)



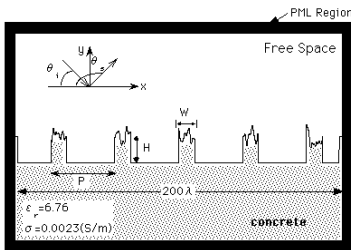
(b) 주기장의 영향(10λ,15λ)  
(b) Effect of periodic length(10λ,15λ)

그림 3. 수직편파를 사용한 주기적 구조에서의 산란 특성.

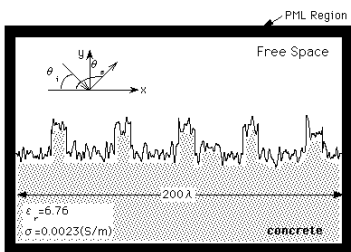
Fig. 3 Characteristic of scattering from periodic structure in case of vertical polarization.

그림 2에서는 수평편파를 사용한 규칙적 구조의 경우, 높이(H)와 폭(W)을 각각 1λ와 2λ로 고정하고, 주

기장(P)을 5, 10, 15, 20λ로 변화 시켰을 경우의 산란 특성과 평면구조에서 일어나는 산란 특성을 비교한 결과이다. 그림 3은 수직편파를 사용한 경우의 결과이다. 규칙적 표면 구조에서는 주기적 형상을 결정하는 주기장의 영향이 강하게 작용하고 있으며, 그 주기장(P)이 20λ 이하의 조건에서는 Bragg reflection의 영향이 강하게 나타나고 있음을 보여 주고 있다. 그러나 주기장(P)이 20λ 이상에서는 Bragg reflection의 영향이 감소되어 있는 것을 확인할 수 있다.



(a) 복합형 구조 a  
(a) Composite structure a



(b) 복합형구조 b  
(b) Composite structure b

그림 4. 복합형 구조에서의 시뮬레이션 구조  
Fig. 4 Geometry of problem for an example of composite structure.

그림 4는 복합형 구조로서 앞에서 언급한 규칙적 구조와 불규칙적 구조를 조합하여 모델링한 경우의 NRCS의 특성을 파악하기 위한 구조도를 나타낸다. 그림 4의 (a)는 규칙적 구조(P=10λ, H=1λ, W=5λ)의 상단 표면의 폭(W)에만 불규칙조면을 생성 시킨 경우이며, 불규칙 구조 생성에는 Gaussian spectrum 을 이용하여 25개의 불규칙조면을 생성해서 얻어진 샘플에 의해서 계산하였다. 불규칙조면의 rms surface

height(h)는 0.2λ로, correlation length(cl)은 0.5λ로 모델링 하였다. 그림 4의 (b)는 표면 전체에 불규칙 조면을 포함하는 규칙적 구조를 가정하여 모델링 하였다.

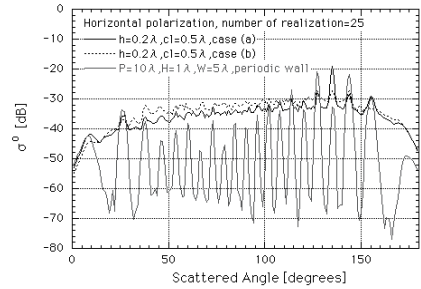


그림 5. 수평편파를 사용한 복합형 구조에서의 산란 특성.

Fig. 5 Characteristic of scattering from composite structure in case of horizontal polarization.

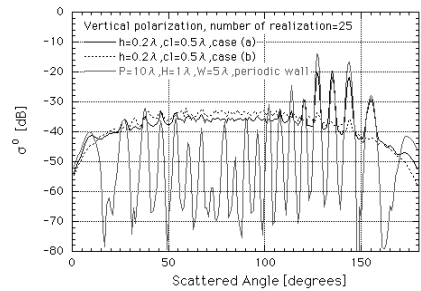


그림 6. 수직편파를 사용한 복합형 구조에서의 산란 특성.

Fig. 6 Characteristic of scattering from composite structure in case of vertical polarization.

그림 5와 6은 각각 수평 및 수직편파를 사용한 경우의 수치 결과를 나타낸다. 위에서 언급한 그림 1과 같은 주기적 구조만을 가지는 경우와 비교하였을 경우, 그림 4의 (a)와 (b) 구조에서는 규칙적 구조에서 발생하는 Bragg reflection 보다는 불규칙조면에 의한 난반사의 성질이 높게 나타나고 있다. 또한 그림 4의 (a) 구조가 (b) 구조 보다 Bragg reflection의 특성이 전방산란 (forward-scattering) 방향에서 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

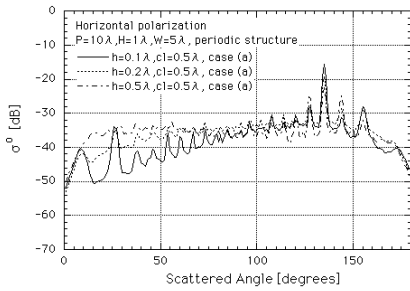


그림 7. 수평편파를 사용한 복합형 구조에서의 불규칙표면 높이에 대한 영향.  
Fig. 7 Effect for rms surface height in case of composite surface.

그림 7은 그림 4의 (a)의 구조에서 불규칙조면을 형성하는  $h$ 를  $0.1 \sim 0.5\lambda$ 까지 변화하여 산란특성을 비교하였다. 규칙적 구조 안에서 불규칙조면의 높이가 높아질수록 후방산란방향에서 Bragg reflection 보다는 난반사의 성질이 커지는 것을 확인할 수가 있다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 시간적 변화를 갖는 맥스웰 방정식을 체적적분에 기초하여 이산화한 FDTD법을 이용하여, 복합형 구조에 의한 전자파전파의 특성을 분석하였다. 실제 문제와 관련하여 빌딩 외벽에 부착된 창, 테라스 등과 같이 주기적 또는 불규칙적으로 배열되어 있는 경우, 그 주기의 요소와 파장의 관계를 이용하여 부착물이 없는 평면구조에서 일어나는 산란 특성과 비교하였다. 주기적 구조에서는 높이가  $2\lambda$  이하, 길이가  $20\lambda$  이상에서는 Bragg reflection의 영향을 무시할 수 있지만, 그 외의 경우에는 Bragg reflection의 영향이 예측 이상으로 강한 점을 고려하면, 후방산란의 강한 난반사에 의해 무선통신환경에 나쁜 영향을 미칠 수 있다고 볼 수 있다. 본 연구 결과를 기초로 하여 향후 2차원 전파환경모델들에 대한 전파특성을 추정하는 수치 시뮬레이션을 개발하는데 효과적으로 이용할 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

본 과제(결과물)는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도산업 인재양성사업의 연구결과입니다

#### 참고 문헌

- [1] 윤광렬, "불규칙 조면의 전파 특성 해석을 위한 이산 광선 추적법", 한국전자통신학회, 5권, 3호, pp. 233-238, 2010.
- [2] K. Uchida, T. Matunaga, T. Noda and K.K. Han, "FDTD algorithm and its application procedure," Res. Bull. Fukuoka Inst. Tech., Vol. 29, No. 1, pp. 121-130, Oct. 1996.
- [3] J. P. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," J.Comp. Phys., Vol. 114, No. 2, pp. 185-200, October 1994.
- [4] E.I. Thoros, "The validity of the Kirchhoff approximation for rough surface scattering using a Gaussian roughness spectrum," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 83, No. 1, pp. 78-92, Jan. 1988.
- [5] A. Ishimaru, Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering, Prentice-Hall, Inc. 1991.

#### 저자 소개



#### 윤광렬(Kwang-Yeol Yoon)

1994년 3월 후쿠오카공업대학교 졸업 (공학사)

1996년 3월 후쿠오카공업대학교 대학원 정보공학과 졸업(공학석사)

2001년 3월 큐슈대학교 대학원 시스템정보과학 연구과 졸업(공학박사)

현재 계명대학교 전자공학과 교수

※ 주 관심분야 : 전자파 전파, 전자파 수치해석, 전파통신