

# 규칙적 또는 불규칙적 구조를 가지는 빌딩벽면에서의 전자파 산란 특성

## Scattering Characteristic from Building Walls with Periodic and Random Surface

윤 광 렬

Kwang-Yeol Yoon

요 약

최근 이동단말기의 급속한 보급과 발전에 의하여, 통상의 시가지에서의 전자파전파의 특성을 해명해야할 뿐만 아니라, 시가지, 산림, 계곡 등의 외부 공간과 실내 공간 등의 종래에는 電波不感地帶로 불려오던 공간에 있어서도 안정적으로 통신을 이용할 수 있는 무선통신환경 개선의 중요성이 높게 요구되고 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 정도 높게 추정하기 위해서는 건물 벽면의 구조 및 간판 등의 영향도 고려 대상으로 포함시킬 필요성이 있다. 본 연구에서는, 먼저 무선통신환경에서의 시가지, 산림, 해면, 빌딩 벽면 등의 문제를 규칙적 및 불규칙조면(random rough surface)에 의한 산란문제로 취급하여 그 특성을 상세히 파악하고자 한다. 실제 문제에 있어서도 간판과 같은 빌딩의 부착물, 창, 테라스 등과 같은 규칙적 벽면 구조 또는 불규칙적 벽면 구조를 가지고 있는 경우가 일반화되어 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 FVTD(finite volume time domain)법을 적용하여 기초적인 자료 보안을 위하여 3분류에 의한, 즉 주기적 구조에 의한 산란 특성, 불규칙적 구조에 의한 산란 특성, 주기적 및 불규칙의 복합형 구조에 의한 2차원 전파환경 모델들에 대한 산란 특성을 조사하였다. 특히 주기적 벽면구조에 대한 Bragg reflection의 영향을 조사하였다.

### Abstract

With the rapid and wide-spread use of cellular telephones much attention has been focussed on propagation in the urban area crowded with buildings and houses. 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 building walls by using FVTD(Finite Volume Time Domain) method. We consider three different types of rough surfaces such as periodic, random, and composite structures. We calculate the bistatic normalized radar cross section (NRCS) for horizontal and vertical polarization, and we take account of the conventional optical reflection which corresponds to the n-th Bragg reflection for periodic structures. In addition, we investigated what conditions are needed in order to be able to ignore the higher order Bragg reflection for the periodic structures.

Key words : Electromagnetic Wave Scattering, Periodic and Random Surface, Bragg Reflection, FVTD Method, NRCS

「이 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2003-000-10866-0)지원으로 수행되었음.」

계명대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Keimyung University)

· 논문 번호 : 20040205-016

· 수정완료일자 : 2004년 3월 9일

## I. 서 론

최근 이동단말기의 급속한 보급과 발전에 의하여, 통상의 시가지에서의 전자파전파 특성을 해명해야 할 뿐만 아니라, 빌딩으로 둘러싸인 시가지 및 실내 공간 등의 종래에는 電波不感地帶로 불려오던 공간에 있어서도 안정적으로 통신을 이용할 수 있는 무선통신환경 개선의 중요성이 높게 요구되고 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 정도 높게 추정하기 위해서는 건물벽면의 구조 및 간판 등의 영향도 고려 대상으로 포함시킬 필요성이 있다. 향후의 이동통신의 신기술은, 복잡하고 다양화되어 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 파악하는 것과 2차원 전파환경(傳播環境) 모델들에 대한 전자파전파 특성의 기초적 개념들을 설명할 수 있는 연구를 주된 목표로 두고 있다.

또한, 시가지 전체의 傳播特性을 파악한다든지, 시가지를 둘러싼 산림, 구릉지 및 빌딩 벽면의 구조에 의한 영향을 해석하는 것은, 실험결과의 본질을 밝혀내기 위해서도, 전자파 산란문제의 결과에 대한 통계적 처리가 필요하게 된다. 불규칙조면에 의한 산란문제를 다룰 때에는 어떤 확률조건의 아래에서 불규칙조면을 생성해서, 다수의 샘플에 의해서 얻어진 계산결과의 평균값으로 그 특성을 평가하고 있다. 이러한, 불규칙조면에서의 전자파 산란문제를

해석하는 방법으로는, 이전부터 Perturbation Method, Kirchhoff Approximation, Integral Equation Method 등이 대표적 해석 방법으로 이용되고 있다<sup>[1]-[5]</sup>. 최근에는 입사각 및 산란각보다 작은 slope angle을 가진 표면에 대해서는 비교적 정확한 해(解)를 구할 수 있다는 Small-Slope Approximation법이 이용되고 있기도 하다<sup>[6]</sup>. 그렇지만, 적분 방정식법을 제외한 이러한 해석적 방법들에는 적용 가능한 조면(rough surface)에 다음과 같은 제약이 따르고 있다. Perturbation Method에 적용 가능한 조면의 조건은 평균 높이가  $1\lambda$  이하의 조건을 만족해야 하고, Kirchhoff Approximation은 조면의 곡률반경이  $1\lambda$  보다 클 경우에만 적용이 가능하다. 특히, 산란체 또는 입사면에 대해 입사각이 낮은 경우(low-grazing angle)의 문제에 있어서 보다 정도 높은 결과를 얻기 위해서는, 위와 같은 이론적 방법으로는 적용이 불가능하며, 수치해석적 방법에 기대할 수밖에 없다.

지금까지 개발된 시가지내의 전파추정 시스템 구축에 있어서는 통상의 빌딩벽면은 평면으로 가정하여 처리하고 있다. 이 문제는 시스템의 소형화와 처리 시간의 단축화에 있어서도 필요한 요건이기도 하다. 그러나 실제 문제에 있어서는 간판과 같은 빌딩의 부착물, 창, 테라스 등과 같은 규칙적 벽면 구조, 또는 불규칙적 벽면 구조를 가지고 있는 경우가 일반화되어 있는 실정이다. 본 논문에서 있어서는 FVTD (finite volume time domain)법을 적용하여 기초적인 산란 특성 평가를 위하여 3분류에 의한, 즉 주기적 구조에 의한 산란 특성, 불규칙적 구조에 의한 산란 특성, 주기적 및 불규칙의 복합형 구조에 의한 산란 특성을 분석하고, 특히 주기적 표면을 가지고 있는 구조에서는 수신펄스의 시간지연의 원인을 제공하는 Bragg reflection의 영향을 조사하여, 그 영향을 무시할 수 있는 조건을 검토한다.

## 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<sup>[7]</sup>.

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

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

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

수직편파의 FVTD 관계식은

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

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

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

으로 표현되며, 위의 관계식들에 포함된 step parameters는 다음과 같이 정의된다.

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

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

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

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

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

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

$$\alpha_{m,i,j} = \frac{\sigma_{m,i,j}\Delta t}{\mu_0\mu_{r,i,j}} \quad (13)$$

$$\alpha_{i,j} = \frac{\sigma_{i,j}\Delta t}{\varepsilon_0\varepsilon_{r,i,j}} \quad (14)$$

여기서  $\Delta x$ 와  $\Delta y$ 는 spatial increment 이며,  $\Delta t$ 는 time difference를 표시한다. 또한,  $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ 는 자유공간의 전파속도를 나타낸다.

유한한 구조의 해석을 위한 흡수경계조건은 PML (perfectly matched layer)의 흡수경계 조건을 적용하였다<sup>[8]</sup>.

### 2-2 Scattering Problem

본 수치계산에서 사용되는 입사파는 다음과 같이 수정된 Gaussian beam pattern으로 가정한다<sup>[3]</sup>.

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

여기서  $F_z^i$ 는 사용편파에 따라  $E_z^i$  또는  $H_z^i$ 로 사용된다. 식 (12)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 수직편파에 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<sup>[9]</sup>,

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

여기서,  $F^s$ 는 식 (17), (18)에 의해 수평편파일 경우는  $F^s = E^s$ , 수직편파일 경우는  $F^s = H^s$ 로 이용되며, 불규칙조면의 경우에는, 50개의 조면 샘플을 이용하

여 NRCS를 계산하였다.

### III. 수치 계산 결과 및 분석

FVTD 시뮬레이션에 있어서 사용된 주파수는 1.0 GHz이며, 빌딩벽면의 재질은 콘크리트로 가정하여 유전율(permittivity:  $\epsilon_r$ )을 6.76으로, 도전율(conductivity:  $\sigma$ )을 0.0023(S/m)으로 설정하였다. 전체 해석영역은  $8,000 \Delta x \times 2,000 \Delta y$ 로 모델링하여, 셀 사이즈를  $\Delta x = \Delta y = \lambda/40$ 로 설정하였다. Tapered incident wave를 사용하여 유한영역의 시뮬레이션을 이용하는 경우, 입사각이 10도 이하에서는 유한영역의 edge 영향을 피하기 위해서 충분한 surface length를 고려해야 하지만<sup>[10]</sup>, 계산영역 및 처리시간의 절약을 위해서, 본 수치계산에 있어서는 벽면에 대한 입사각을 45도로 설정하였다. 각 모델들에 대한 산란 특성은 식 (19)를 이용하여, 수평 또는 수직 편파에 대하여 NRCS를 계산하였다.

먼저 주기적 벽면의 산란 특성 파악을 위한 FVTD 시뮬레이션 구조를 그림 1에 표시하였다. 규칙적 벽면 구조의 주기장(periodic length)을  $P$ , 높이를  $H$ , 폭을  $W$ 로 표시한다. 특히, 주기적 구조의 표면에 대해서는 Bragg reflection의 조건을 조사해야 하며, 다음과 같은 관계를 만족한다.

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

여기서,  $\theta_i$ 는 입사각이며,  $\lambda$ 는 파장,  $P$ 는 벽면의 공간적 주기장을 나타내며, 이때의  $n=0, -1, -2, \dots$ 이

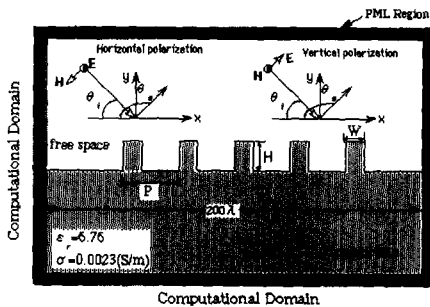


그림 1. 주기적 벽면의 산란 특성 파악을 위한 FVTD 시뮬레이션 구조  
Fig. 1. Geometry of problem for an example of periodic surface.

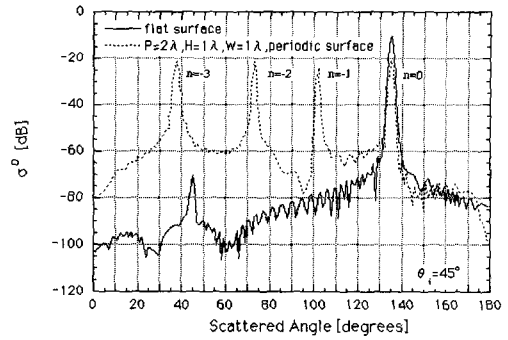
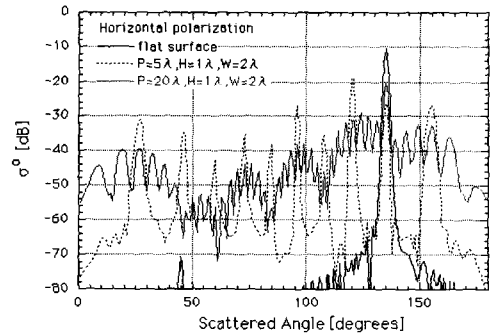


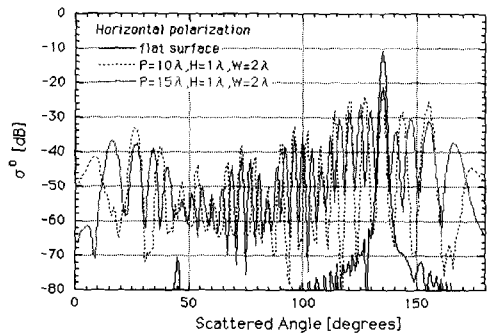
그림 2. Bragg reflection의 특성  
Fig. 2. Characteristic of bragg reflection.

다.  $n=0$ 일 경우,  $\theta_s = \pi - \theta_i$ 는 일반적인 광학적 반사각을 의미한다. 그림 2는 주기장( $P$ )이  $2 \lambda$ 일 경우의 수치 결과를 평면 구조와 비교하였다.

그림 3에서는 수평편파를 사용한 규칙적 벽면구



(a) 주기장의 영향( $5 \lambda, 20 \lambda$ )  
(a) Effect of periodic length( $5 \lambda, 20 \lambda$ )

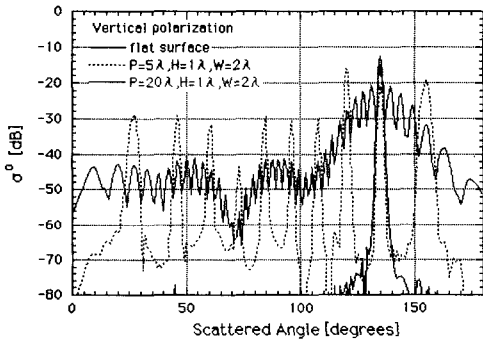


(b) 주기장의 영향( $10 \lambda, 15 \lambda$ )  
(b) Effect of periodic length( $10 \lambda, 15 \lambda$ )

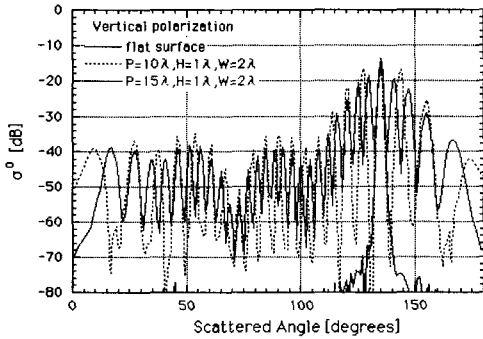
그림 3. 수평편파를 사용한 주기적 벽면 구조에서의 산란 특성  
Fig. 3. Characteristic of scattering from periodic wall in case of horizontal polarization.

조의 경우, 높이( $H$ )와 폭( $W$ )을 각각  $1\lambda$  와  $2\lambda$  로 고정하고, 주기장( $P$ )을 5, 10, 15, 20  $\lambda$  로 변화시켰을 경우의 산란 특성과 일률적인 평면구조에서 일어나는 산란 특성을 비교한 결과이다. 그림 4는 수직편파를 사용한 경우의 수치결과이다. 규칙적 벽면 구조에서는 주기적 형상을 결정하는 주기장의 영향이 강하게 작용하고 있으며, 그 주기장( $P$ )이 20  $\lambda$  이하의 조건에서는 Bragg reflection의 영향이 강하게 나타나고 있음을 보여 주고 있다. 그러나 주기장( $P$ )이 20  $\lambda$  이상에서는 Bragg reflection의 영향이 감소되어 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 불규칙 벽면에서 일어나는 전자파산란 특성을 파악하기 위한 시뮬레이션 구조도를 표시하고 있다. 시가지 전체의 전파특성을 파악한다든지, 시가지를 둘러싼 산림, 구릉지 및 빌딩 벽면의 구조



(a) 주기장의 영향( $5\lambda$ ,  $20\lambda$ )  
(a) Effect of periodic length( $5\lambda$ ,  $20\lambda$ )



(b) 주기장의 영향( $10\lambda$ ,  $15\lambda$ )  
(b) Effect of periodic length( $10\lambda$ ,  $15\lambda$ )

그림 4. 수직편파를 사용한 주기적 벽면 구조에서의 산란 특성

Fig. 4. Characteristic of scattering from periodic wall in case of vertical polarization.

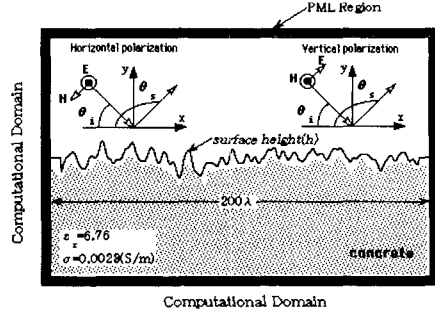


그림 5. 주기적 벽면의 산란 특성 파악을 위한 FDTD 시뮬레이션 구조

Fig. 5. Geometry of problem for an example of random rough surface.

에 의한 영향을 해석하는 것은, 실험결과의 본질을 밝혀내기 위해서도, 전자파 산란문제의 결과에 대한 통계적 처리가 필요하게 된다. 불규칙 구조의 벽면 생성에는 Gaussian spectrum을 이용하여 50개의 불규칙 조면을 생성해서 얻어진 샘플에 의해서 계산된 NRCS의 평균값을 이용하여 산란특성을 평가하였다.

조면의 rms surface height( $h$ )는  $0.2\lambda$  과  $1.0\lambda$  으로, correlation length( $cl$ )은  $1.0\lambda$  로 모델링하였다. 또한 평면에서 일어나는 원방계의 산란 패턴(far field scattering pattern)과도 비교하였다. 그림 6과 7은 각각 수평 및 수직편파를 사용한 경우,  $cl$ 을  $1\lambda$  로 고정하여  $h$ 를  $0.2\lambda$  와  $1\lambda$  로 변화시켜, 조면의 높이가 산란특성에 미치는 영향을 조사하였다. FDTD 시뮬레이션 결과를 보면 조면의 높이( $h$ )가  $1\lambda$  정도로

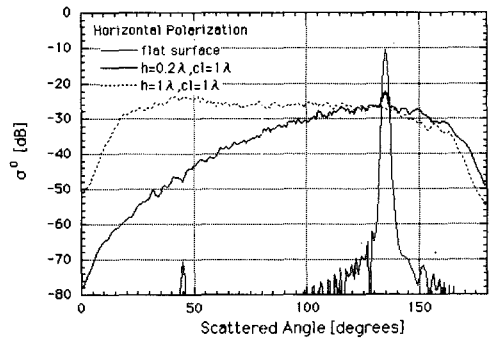


그림 6. 수평편파를 사용한 불규칙적 표면 구조에서의 산란 특성

Fig. 6. Characteristic of scattering from random rough surface with Gaussian spectrum in case of horizontal polarization.

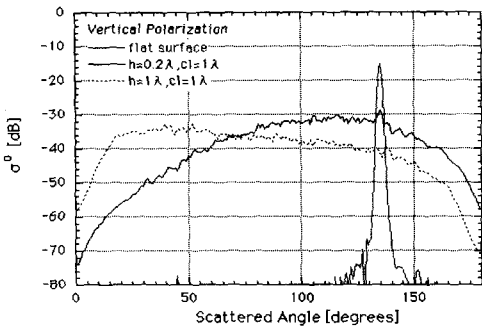
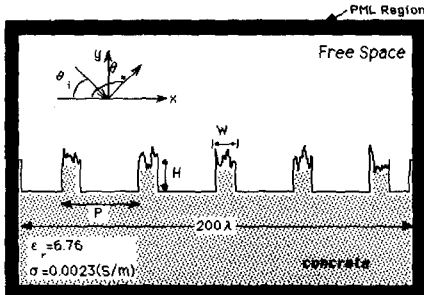


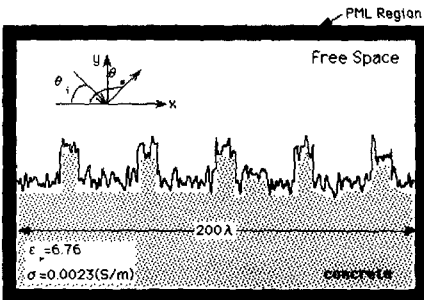
그림 7. 수직편파를 사용한 불규칙적 표면 구조에서의 산란 특성

Fig. 7. Characteristic of scattering from random rough surface with Gaussian spectrum in case of vertical polarization.

높아지면 난반사(diffuse scattering)의 영향이 증가하여 후방산란(backscattering)의 NRCS 값이 커지는 것을 확인할 수 있다.



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



(b) 복합형구조 b  
(b) Composite structure b

그림 8. 복합형 구조를 가진 벽면에서의 산란 특성 파악을 위한 FVTD 시뮬레이션 구조

Fig. 8. Geometry of problem for an example of composite wall.

그림 8은 복합형 표면 구조로서 앞에서 언급한 규칙적 구조와 불규칙적 구조를 조합하여 모델링한 경우의 NRCS의 특성을 파악하기 위한 구조도를 나타낸다. 그림 8의 (a)는 규칙적 구조의 상단 벽면의 폭(W)에만 불규칙조건을 생성시킨 경우이며, (b)는 벽면 전체가 불규칙조건으로 형성된 규칙적 구조를 모델링 하였다. 그림 9와 10은 각각 수평 및 수직편파를 사용한 경우의 수치 결과를 나타낸다. 위에서 언급한 그림 1과 같은 주기적 구조만을 가지는 경우와 비교하였을 경우, (a)와 (b)에서는 규칙적 구조에서 발생하는 Bragg reflection 보다는 불규칙조건에 의한 난반사의 성질이 높게 나타나고 있다.

또한 (a)가 (b)보다 Bragg reflection의 특성이 전방 산란(forward-scattering) 방향에서 발생하고 있음을

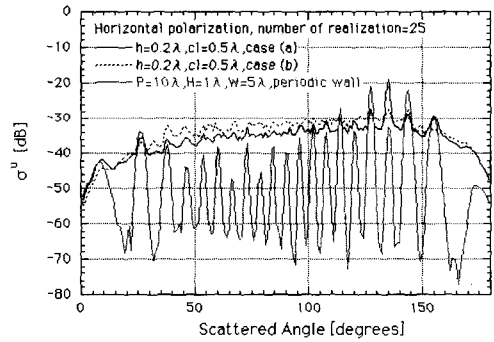


그림 9. 수평편파를 사용한 복합형 구조의 벽면에서의 산란 특성

Fig. 9. Characteristic of scattering from composite wall in case of horizontal polarization.

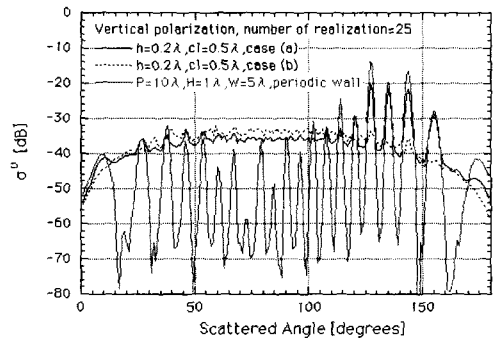


그림 10. 수직편파를 사용한 복합형 구조의 벽면에서의 산란 특성

Fig. 10. Characteristic of scattering from composite wall in case of vertical polarization.

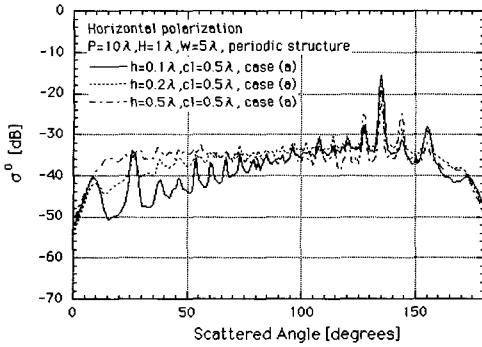


그림 11. 수평편파를 사용한 복합형 구조에서의 불규칙표면 높이에 대한 영향  
 Fig. 11. Effect for rms surface height in case of composite surface.

확인할 수 있다.

그림 11은 그림 8의 (a)의 구조에서 불규칙조면을 형성하는  $h$ 를 0.1~0.5  $\lambda$  까지 변화하여 산란특성을 비교하였다. 규칙적 구조 안에서 불규칙조면의 높이가 높아질수록 후방산란방향에서 Bragg reflection 보다는 난반사의 성질이 커지는 것을 확인할 수가 있다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 시간적 변화를 갖는 맥스웰 방정식을 체적적분에 기초하여 이산화한 FVTD법을 이용하여, 규칙적 및 불규칙적 벽면구조에 의한 전자파산란의 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 벽면구조에서는 높이가 2  $\lambda$  이하, 길이가 20  $\lambda$  이상에서는 Bragg reflection의 영향을 무시할 수 있지만, 그 외의 경우에는 Bragg reflection의 영향이 예측 이상으로 강한 점을 고려해야만 한다. 불규칙적인 벽면 구조에서 일어나는 산란 특성 조사에서는 조면을 형성하는 평균 높이가 1  $\lambda$  이상에서는 후방산란의 강한 난반사에 의해 무선통신환경에 나쁜 영향을 미칠 수 있으나, 그 이하의 조건이라면, 그 영향을 무시할 수 있다고 볼 수 있다. 본 연구 결과를 기초로 하여 향후 2차원 전파환경모델들에 대한 전파특성을 추정하는 수치 시물

레이션을 개발하는데 효과적으로 이용할 수 있을 것이다.

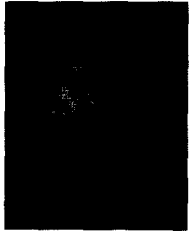
#### 참 고 문 헌

- [1] S. O. Rice, "Reflection of electromagnetic wave from slightly rough surfaces", *Commun. Pure Appl. Math.*, vol. 4, pp. 351-378, 1951.
- [2] G. R. Valenzuela, J. W. Wright and J. C. Leader, "Comments on 'The relationship between the Kirchoff approach and small perturbation analysis in rough surface scattering theory'", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-20, pp. 536-539, Jul. 1972.
- [3] E. I. Thoros, "The validity of the Kirchoff approximation for rough surface scattering using a Gaussian roughness spectrum", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 83, no. 1, pp. 78-92, Jan. 1988.
- [4] C. H. Chan, L. Tsang and Q. Li, "Monte Carlo simulations of large-scale one-dimensional random-rough surface scattering at near-grazing incidence: penetrable case", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 46, no. 1, pp. 142-149, Jan. 1998.
- [5] J. V. Toporkov, R. T. Marchand and G. S. Brown, "On the discretization of integral equation describing scattering by rough conducting surface", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 46, no. 1, pp. 150-161, Jan. 1998.
- [6] Alexander G. Voronovich, *Wave Scattering from Rough Surfaces (Springer series on Wave Phenomena)*, 2nd edition Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1999.
- [7] K. Uchida, T. Matunaga, T. Noda and K. K. Han, "FVTD algorithm and its application procedure", *Res. Bull. Fukuoka Inst. Tech.*, vol. 29, no. 1, pp. 121-130, Oct. 1996.
- [8] J. P. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves", *J. Comp. Phys.*, vol. 114, no. 2, pp. 185-200, Oct. 1994.
- [9] A. Ishimaru, *Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering*, Prentice-Hall, Inc. 1991.
- [10] K. Y. Yoon, M. Tateiba and K. Uchida, "A nu-

merical study of low-grazing-angle scattering from random rough surface with Gaussian roughness spectrum", *Proceedings of 3rd Asia-Pacific Engi-*

*neering Research Forum on Microwaves and Electromagnetic Theory*, pp. 138-147, Dec. 2000.

## 윤 광 렬



1994년 3월: 후쿠오카공업대학교 정보공학과 (공학사)

1996년 3월: 후쿠오카공업대학교 정보공학과 (공학석사)

1991년 2월: 큐슈대학교 시스템 정보과학연구과 (공학박사)

2001년 4월~2001년 8월: 큐슈대학

교 시스템정보과학연구원 연구원

2001년 9월~현재: 계명대학교 전자공학과 전임강사

[주 관심분야] 전파전파, 전자파이론, 전자파산란