

큰 규모의 불규칙 조면에 의한 전자파 전파 특성

Electromagnetic Wave Propagation Characteristics from Large Scale Random Rough Surfaces

윤 광 열 · 채 용 응

Kwang-Yeol Yoon · Yong-Yoong Chai

요 약

본 논문에서는 비교적 큰 규모의 불규칙 조면에 의한 산란 특성을 예측하기 위해 ray tracing 기법을 적용하였다. 전자계를 평가하기 위하여, 회절 레이(ray)에 대해서 knife edge 회절에 의한 회절 계수를 사용하였고, 반사 레이에 관해서는 Fresnel의 반사 계수를 사용하였다. 또한 레이 추적 방법에는 수신기에 도달하는 모든 레이의 경로를 정확히 찾아주는 image method를 채용하였으며, 불규칙 조면에 회절계를 고려하였다. 파도 모양의 조면에 의한 산란 특성과 빌딩 모양의 표면에 의한 지연 확산(delay spread) 특성에 대해 수치 계산하였다. 불규칙 조면에 의한 산란 특성을 수치적으로 해석하는데 ray tracing 기법을 적용하여 그 유효성을 입증하였다.

Abstract

In this paper we applied a ray tracing method to estimate the scattering characteristics from large scale random rough surfaces. For the electromagnetic field evaluation, we have used the diffracted coefficient of the knife edge diffraction for the diffracted rays and Fresnel's reflection coefficients in connection with reflected rays. In addition, we examine to search for the traced rays using the imaging method which can be obtained all rays to arrived at receivers accurately and the diffracted field from rough surfaces is considered. Numerical examples have been carried out for the scattering characteristics of an ocean wave-like rough surface and delay spread characteristics of a building-like surface. In the present work we have demonstrated that the ray tracing method is effective to numerical analysis of a rough surface scattering.

Key words : Ray Tracing Method, Reflection, Diffraction, Rough Surface Scattering, Image Method

I. 서 론

최근 이동 단말기의 급속한 보급과 발전에 의하여, 통상의 시가지에서의 전자파 전파 특성을 해명해야할 뿐만 아니라, 빌딩으로 둘러싸인 시가지 및 실내 공간 등의 종래에는 음영 지역으로 불려오던 공간에 있어서도 안정적으로 통신을 이용할 수 있는 무선 통신 환경 개선의 중요성이 높게 요구되고 있다. 더욱이, 이동 통신의 디지털화와 더불어 건물 등

에 의한 반사에 의해서 생기는 멀티패스에 기인하는 수신 펄스의 시간 지연이 고속 디지털 통신의 장애가 되고 있다. 이러한 도심 시가지에 대한 전자파 전파의 특성을 보다 정도 높게 추정하기 위해서는 건물 벽면의 구조 및 간판 등의 영향도 고려 대상으로 포함시킬 필요성이 있다^[1]. 또한, 시가지 전체의 전파 특성(propagation characteristic)을 파악한다든지, 시가지 둘러싼 산림, 구릉지 등에 의한 영향을 해석하는 것은, 실험 결과의 본질을 밝혀내기 위해서도, 전

「이 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2003-000-10866-0) 지원으로 연구되었음.
계명대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Keimyung University)

· 논문 번호 : 20060329-031

· 수정완료일자 : 2006년 4월 18일

자파 산란 문제의 결과에 대한 통계적 처리가 필요하게 된다. 이러한 연구의 문제들을 불규칙 조면(random rough surface)에 의한 전자파의 산란 문제로서 다루고 있으며, 어떤 확률 조건의 아래에서 불규칙 조면을 생성해서, 다수의 샘플에 의해서 얻어진 수치 계산 결과의 평균값으로 산란 특성을 평가하고 있다. 특히, 불규칙 조면에서의 전자파 산란 문제를 해석하는 방법으로는, 이전부터 Perturbation Method, Kirchhoff Approximation, Integral Equation, FDTD, FVTD 법 등이 해석 방법으로 이용되고 있다^{[2]~[5]}.

본 논문에서는 산란체의 크기가 사용 주파수 대역의 파장보다 충분히 큰 경우의 불규칙 조면에 의한 산란 특성 해석에 ray tracing 기법을 적용하였다. 레이(ray) 추적 방법에는 수신기에 도달하는 모든 신호의 경로를 정확히 찾아주는 image method와 수많은 신호가 송신기에서 방사된 후 수신기에 도달한 신호를 합하여 결과를 구하는 ray-launching method가 있다. 본 논문에서는 전자의 image method를 채용하여 불규칙 조면에 의한 산란 특성 해석에 회절계(diffracted field)를 고려하였다. 특히 시가지, 산림, 해면과 같은 실외 공간에 존재하는 2차원 전파 환경 모델에 의한 전자파 전파 현상의 복잡성은 다양한 산란체의 형태 및 그 배치의 다양화에 기인한다. 이러한 문제들은 결정론적으로 단정하기는 매우 어려우며, 통계적 수법을 이용하여 전파 특성을 평균적 의미로 취급하여야 한다. 본 논문에서 다루는 실외공간에 의한 전자파 전파 특성을 불규칙 조면으로 모델링하여 산란 특성을 고찰하였다. 불규칙 조면에 대해서는 산림이나 해면과 같은 파도 모양의 표면(wave-like-surface)과 시가지의 빌딩 모양의 표면(building-like-surface)으로 취급하여, 수치 시뮬레이션을 통한 반사 레이(ray), 회절 레이(ray) 및 산란 특성에 대해서 고찰하였다.

II. Ray Tracing Method

송수신단간의 전파 경로에서 각각의 레이(ray)는 여러 전파 현상을 나타내게 된다. Ray tracing 기법은 송신점에서 방사되는 전파를 레이로 가정하여 그 레이가 전파 도중의 산란체에서 기하학적으로 반사, 투과 및 회절을 반복해서 수신점에 도달하는 경

로를 추적(trace)하는 것으로 전자계(electromagnetic field)는 수신점에 도달하는 모든 레이를 가산하는 것으로 구할 수 있다. 전파 경로를 따라 N 번의 레이가 결정되면 반사 계수와 회절 계수를 이용하여 식 (1)과 같이 전자계를 계산할 수 있다.

$$E_v, E_h = \sum_{n=1}^N \prod_{k=1}^K D_{n,k}^{v,h} \prod_{m=1}^M R_{n,m}^{v,h} \frac{e^{-jkr_n}}{r_n} \quad (1)$$

이때, k 는 자유공간의 파수(wavenumber)를 의미하며, 다음 식으로 정의된다.

$$k = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \quad (2)$$

또한, r_n 은 n 번째 레이의 송신점에서 수신점까지의 거리이며, $R_{n,m}^{v,h}$ 는 m 회의 반사 계수, $D_{n,k}^{v,h}$ 는 k 회의 회절 계수를 의미한다. 여기서 v, h 는 각각 수평 편파(horizontal polarization) 및 수직 편파(vertical polarization)를 표시한다.

식 (1)에서 사용하는 프레넬(Fresnel)의 반사계수는 다음과 같이 정의된다.

$$R^v = \frac{\epsilon_c \cos \theta - \sqrt{\epsilon_c - \sin^2 \theta}}{\epsilon_c \cos \theta + \sqrt{\epsilon_c - \sin^2 \theta}} \quad (3)$$

$$R^h = \frac{\cos \theta - \sqrt{\epsilon_c - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\epsilon_c - \sin^2 \theta}} \quad (4)$$

이때 θ 는 입사 각도이고, ϵ_c 는 조면을 구성하는 매질의 복소 유전율을 의미하며, 다음 식 (5)로 표현된다.

$$\epsilon_c = \epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \quad (5)$$

여기서 ϵ_r 은 상대 유전율(dielectric constant)이며, σ 는 도전율(conductivity)을 표시한다.

한편, 다음 식 (6)에는 knife edge에 의한 회절 계수를 개선한 형태로 프레넬 함수로서 주어진다.

$$D = \begin{cases} RF(X) & (\text{in reflection region}) \\ -F(X) & (\text{in shadow region}) \end{cases} \quad (6)$$

이때, R 은 반사 계수이며, $F(X)$ 는 복소수형 프레넬 함수로서 식 (7)과 같이 정의된다.

$$F(X) = \frac{e^{j\pi/4}}{\sqrt{\pi}} \int_X^\infty e^{-ju^2} du \quad (7)$$

또한, 회절 계수의 인수를 프레넬 함수의 점근식(漸近式)으로부터 역산하여 다음과 같이 주어진다.

$$X = \sqrt{k(r_1 + r_2 + r_0)} \quad (8)$$

여기서 r_0 는 송신점에서 수신점까지의 거리이고, r_1 은 송신점에서 edge까지의 거리이며, r_2 는 edge에서 수신점까지의 거리를 의미한다.

우선 이 방법의 정확도를 조사하기 위해 Wiener-Hopf 법에 의한 엄밀해(rigorous solution)^[6]와 비교하였다. 폭이 40 파장인 유한한 얇은 스트립 도체판과 같은 간단한 산란 구조체에 대해 선형파(linearly wave)가 수직 입사하는 경우, 반사 영역의 산란계(scattered field)를 구하였다. 파원의 위치는 도체판의 중심에서 100 파장 떨어진 지점에 두었으며, 관측점의 거리도 100 파장 떨어진 지점에 설정하였다. 입사파의 진폭은 도체판의 중심에서 1이 되도록 하였다. 실선(WH)은 엄밀해인 Wiener-Hopf 법에 의한 결과, 점선(RTM)은 회절계를 고려한 ray tracing 기법에 의한 결과, 중심선(GO)은 회절계를 고려하지 않은 geometrical optics method에 의한 결과를 그림 1에 표시하였다. 그림 1에서 보듯이 회절계를 무시한 경우, 반사 영역과 그 밖의 영역에서 산란계 분포의 불연속이 발생하지만 회절 계수를 사용한 ray tracing 기법에서는 정확한 결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

III. 수치 계산 결과

불규칙 조면에 대해서는 산림이나 해면과 같은

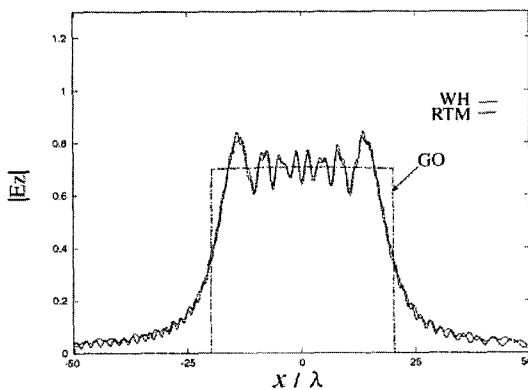


그림 1. 산란계의 분포(반사 영역)
Fig. 1. Scattered field distribution in reflection region.

파도 모양의 표면(wave-like-surface)과 시가지와 같은 빌딩 모양의 표면(building-like-surface)으로 모델링 하였다. 본 논문에서 취급하는 파도 모양의 조면에 대해서는 각 선 스펙트럼(line spectrum)에 대응하는 성분파의 중첩 성분으로 표시할 수가 있다.

$$Y(x) = \sum_{n=1}^N A_n \cos(K_n x + \phi_n) \quad (9)$$

N 은 성분파의 수, A_n 은 진폭이며, $K_n(=2\pi/\lambda)$ 은 파수를 의미하며, ϕ_n 은 파의 위상을 표시한다. 여기서 불규칙 조면의 생성에는 기본 공간 파장을 18 m로 하여 해양파(ocean-like-wave)의 주파수 스펙트럼인 Pierson-Moskowitz spectrum을 이용하였으며, 11개의 선 스펙트럼으로 근사시켜 조면의 각 파라미터를 결정하였다^[7]. 각 성분의 확률 분포는 Monte Carlo 법을 사용하였다. 진폭의 최대값은 5 m로 하였으며, 진폭과 위상은 랜덤 변수로 사용하였다.

우선 파도 모양의 불규칙 조면에 의한 전자파의 산란 현상을 자세히 고찰하기 위하여 불규칙 조면에서의 반사 레이, 회절 레이, 회절 레이에서 반사 레이, 반사 레이에서 회절 레이로 변환한 수치 시뮬레이션 결과를 그림 2에서 그림 5까지 표시하였다. 수치 시뮬레이션에 있어서 식 (1)의 $m=5$ 로 설정한 경우의 반사 계수와 $k=2$ 로 설정한 경우의 회절 계수를 사용하였으며, 송신점은 (-200, 200)에 두고, 수신점은 (0, 200)에서 (200, 200)까지 x축을 20 m 간격으로 설정하였다.

그림 2에 반사 레이를 표시하였다. 관측점에 따라서는 레이가 존재하지 않는 점이 있다는 것과, 폐쇄된 공간과는 다르게 다수의 반사를 반복하는 경우가 적다는 것을 알 수 있다. 그림 3에 회절 레이에 관한 수치 결과를 제시하였다. 특히 그림 3의 시뮬레이션에서는 식 (1)의 $k=2$ 인 회절 계수를 사용하였음에도 불구하고 모든 수신점에서 많은 회절 레이가 도착되었다는 것을 알 수 있다. 그림 4에서는 회절 레이에서 시작하여 반사 레이로 변환한 결과를 표시하였다. 그림 5는 반사 레이에서 회절 레이로 변환한 결과이다. 이러한 수치 계산 결과에서 보듯이 불규칙 조면에 의한 산란 특성에서는 회절 레이를 고려할 경우, 탐색하는 레이의 수가 극단적으로 증가한다는 것을 알 수 있다.

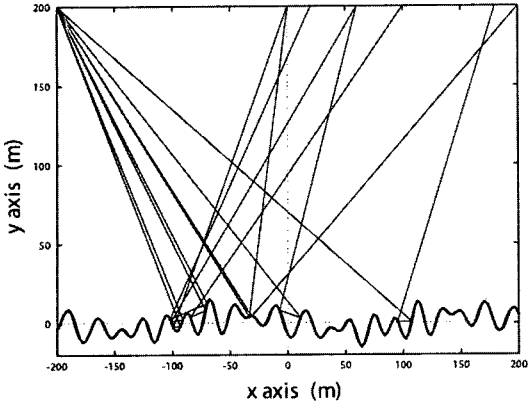


그림 2. 반사 레이
Fig. 2. Reflected rays.

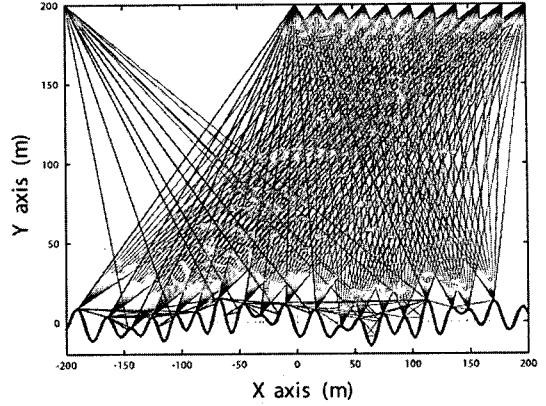


그림 5. 반사 레이에서 회절 레이로 변환한 레이
Fig. 5. Reflected rays plus converted rays from reflected to diffracted rays.

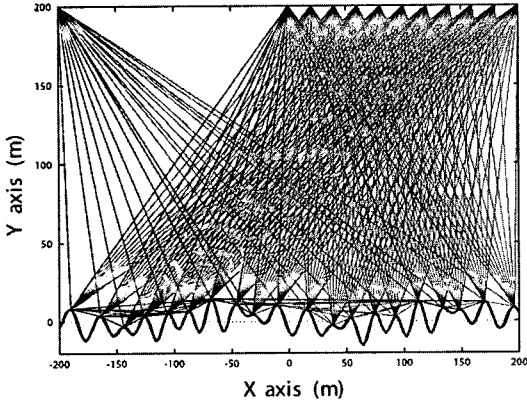


그림 3. 회절 레이
Fig. 3. Diffracted rays.

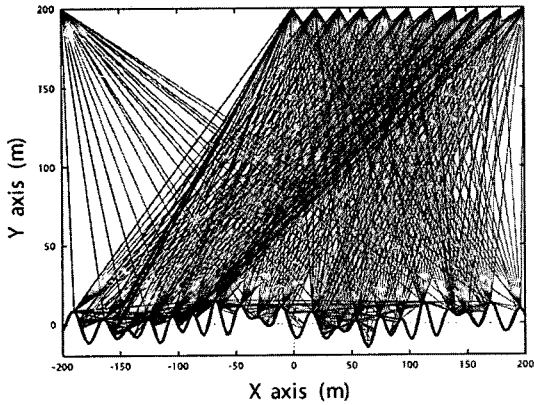


그림 4. 회절 레이에서 반사 레이로 변환한 레이
Fig. 4. Diffracted rays plus converted rays from diffracted to reflected rays.

다음으로 시가지의 빌딩 군(群)을 가상하는 불규칙 조면을 모델링하여 각 레이의 특성에 대한 수치 계산 결과를 그림 6에서 그림 9에 표시하였다. 빌딩의 높이와 도로의 폭을 랜덤 변수로 사용하였다. 빌딩의 높이는 최대 50 m에서 최소 10 m로 하였으며, 도로의 폭은 5 m에서 50 m 사이로 설정하였다. 송·수신점의 위치 및 좌표계는 앞에서 설명한 것과 동일하게 두었다. 회절 레이 발생하는 정점을 비교하면 앞의 그림 2에서 5까지의 경우에는 산의 정점 1개소에서 발생하였으나, 빌딩의 경우 윗면 2개소에서 회절 현상이 발생하고 있다. 그 외의 현상은 산림 형태의 불규칙 조면과 동일한 결과를 보여주고 있다.

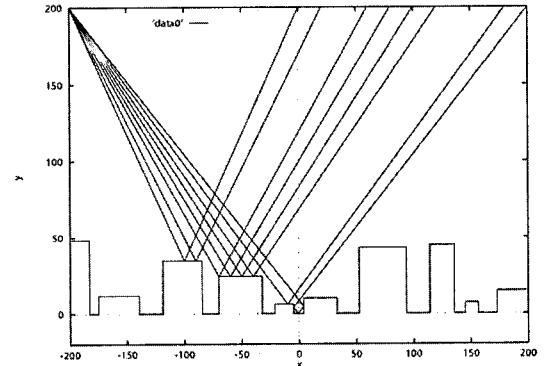


그림 6. 빌딩 표면에 의한 반사 레이
Fig. 6. Reflected rays in case of building like rough surface.

IV. Delay Spread

시가지의 빌딩 군(群)을 가상하여 빌딩 모양의 불규칙 조면에 관하여, 수신점을 폭 50 m의 도로 위에 설정하여, 좌우 폭 5 km의 빌딩 모양의 불규칙 조면을 생성하였다. 그 때의 수신점의 높이를 지상 1 m 지점에서 200 m까지 변화시켰을 경우의 지연 확산(delay spread)의 변화를 조사하였다. 지연 확산은 생성된 하나의 불규칙 조면에 대하여 최대 반사 회수 5회, 회절 회수 2회의 조건으로 구해지는 모든 경로의 레이에 대해서 지연 시간과 수신 전력을 이용하여 다음 식 (10)과 같이 계산한다.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N r_n^2 |e_n|^2 / c^2}{\sum_{n=1}^N |e_n|^2}} \quad (10)$$

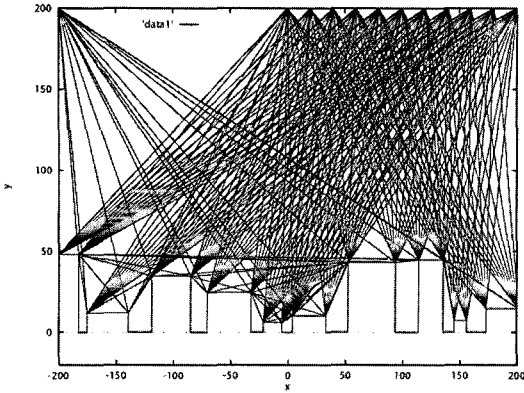


그림 7. 빌딩 표면에 의한 회절 레이
Fig. 7. Diffracted rays in case of building like rough surface.

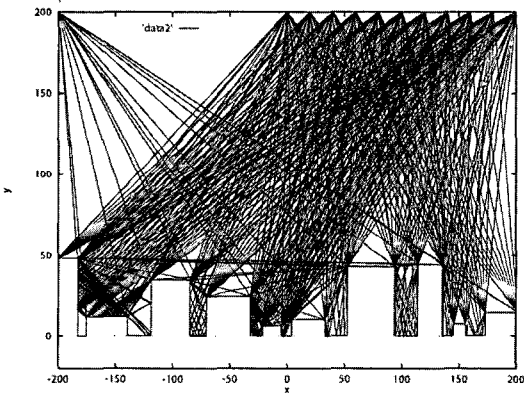


그림 8. 회절 레이에서 반사 레이로 변환한 레이
Fig. 8. Diffracted rays plus converted rays from diffracted to reflected rays.

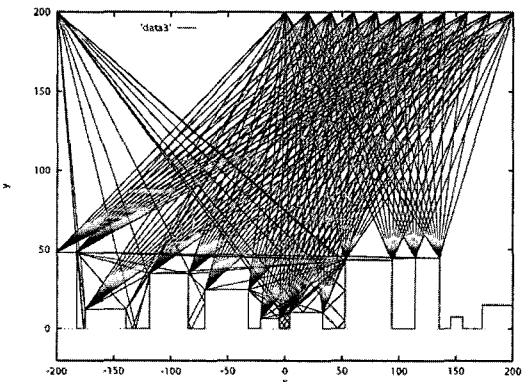
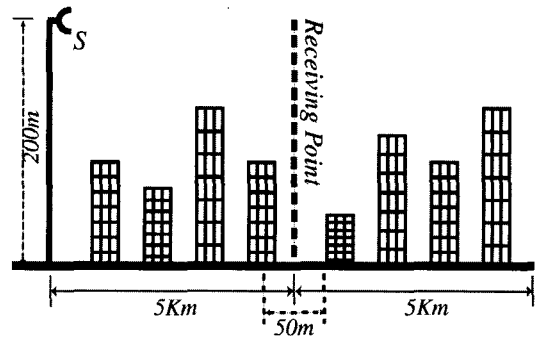
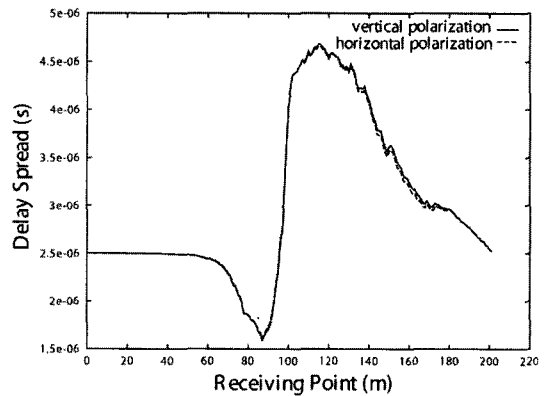


그림 9. 반사 레이에서 회절 레이로 변환한 레이
Fig. 9. Reflected rays plus converted rays from reflected to diffracted rays.



(a) 문제의 구조
(a) Geometry of problem



(b) 전·후방 산란의 영향
(b) An effect of backward and forward scattering

그림 10. 수신 안테나 높이에 대한 지연 확산
Fig. 10. Delay spread with respect to received antenna height.

여기서 c 는 빛의 속도이며, 수치 계산에는 100개의 불규칙 조면에 대한 평균값을 이용한다. 식 (10)에 포함되는 각 레이의 전자계는 다음과 같이 주어진다.

$$e_n = \prod_{k=1}^K D_{n,k}^{v,h} \prod_{m=1}^M R_{n,m}^{v,h} \frac{e^{-jkr_n}}{r_n} \quad (11)$$

수치 시뮬레이션에 있어서 사용된 주파수는 1.0 GHz이며, 불규칙 조면의 매질은 상대 유전율(ϵ_r)을 7.0으로, 도전율(σ)을 0.0023(S/m)으로 설정하였다.

그림 10은 전방 산란의 원인이 되는 송수신점 간의 폭 5 km의 빌딩 군(群)과 후방 산란의 원인이 되는 폭 5 km의 우측 빌딩 군(群)에 의한 모든 반사계(reflected field) 및 회절계(diffracted field)를 고려한 경우이다. 그 결과 수신점 100 m 부근에서 지연 확

산이 크게 변화하였고, 수신점이 낮은 지점에서는 산란에 의한 회절계의 영향이 주요한 요인으로 작용하여 지연 확산이 일정하다. 또한 수신점이 높아질수록 빌딩 벽면으로부터의 난반사(incoherent field)의 영향이 점차 감소되고 있음을 표시하고 있다.

그림 11은 후방 산란의 원인이 되는 산란체를 수신점이 위치하고 있는 도로의 우측에 1개의 빌딩만을 두고 지연 확산의 특성을 조사한 결과를 표시하였다. 그림 10의 결과와 비교할 경우, 지연 확산이 후방 산란에 강하게 의존하고 있음을 알 수 있다. 이 경우, 수신점 우측의 반사 영향이 강하게 나타나며 그림 10과 비교해서 편파의 차이가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 수치 결과는 수신 안테나의 지향성을 높여 후방 산란의 영향을 줄인다면 지연 확산을 줄일 수 있다는 것을 보여주고 있다.

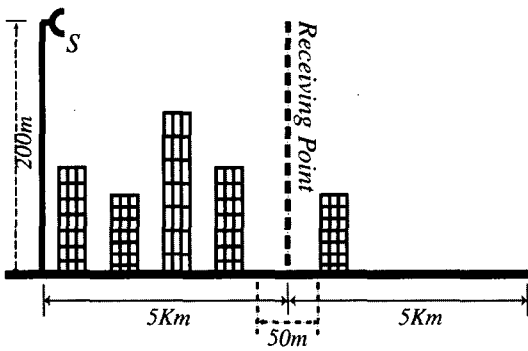
V. 결 론

본 논문에서는 사용 주파수 대역의 파장보다 규모가 큰 불규칙 조면과 같은 외부 공간에 의한 전자파 산란 특성을 조사하는데 ray tracing 기법을 적용하였다. 불규칙 조면을 전파 환경 모델로 하여 파도 모양의 표면과 빌딩 모양의 표면에 의한 산란 특성을 수치적으로 계산하였다. 또한 프레넬의 회절 계수와 반사 계수를 사용하여 전자계를 계산하여, 각 전파 경로에 대한 모든 레이를 image method를 이용하여 정확하게 조사하였으며, 빌딩과 같은 불규칙 조면의 산란 특성 및 지연 확산 특성에 대해서도 수치 계산 결과를 제시하였다. 따라서 외부 공간에 의한 산란 특성을 수치적으로 해석하는데 ray tracing 기법의 유효성을 입증하였다.

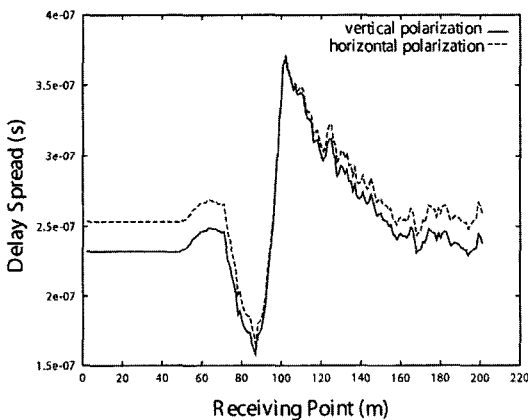
본 연구 결과를 기초로 하여 향후 2차원 전파 환경 모델들에 대한 전파 특성을 추정하는 수치 시뮬레이션을 개발하는데 효과적으로 이용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] 윤광렬, "규칙적 또는 불규칙적 구조를 가지는 빌딩벽면에서의 전자파 산란 특성", 한국전자파 학회논문지, 5(4), pp. 428-435, 2004년 4월.
 [2] E. I. Thoros, "The validity of the Kirchhoff approx-



(a) 문제의 구조
 (a) Geometry of problem



(b) 전방 산란의 영향
 (b) An effect of forward scattering

그림 11. 수신 안테나 높이에 대한 지연 확산
 Fig. 11. Delay spread with respect to received antenna height.

- ximation for rough surface scattering using a Gaussian roughness spectrum", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 83, no. 1, pp. 78-92, Jan. 1988.
- [3] 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.
- [4] F. D. Hastings, J. B. Schneider, and S. L. Broschat, "A Monte-Carlo FDTD technique for rough surface scattering", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 43, no. 11, pp. 1183-1191, Nov. 1995.
- [5] K. Y. Yoon, M. Tateiba, and K. Uchida, "FDTD simulation for random rough dielectric surface-scattering at low grazing angle", *IEICE Trans. Electron.*, vol. E83-C, no. 12, pp. 23-32, Dec. 2000.
- [6] K. Uchida, H. Maeda, T. Imai, T. Fujii, and M. Hata, "Analysis of electromagnetic wave scattering by a conducting thin plate image coefficient for ray tracing method", *IEICE Trans. Electron.*, vol. E81-C, no. 6, pp. 993-999, Jun. 1998.
- [7] H. Mitsuyasu, *Physics of ocean wave* (Iwanami Shoten, Publishers.) 1995.

윤 광 렬



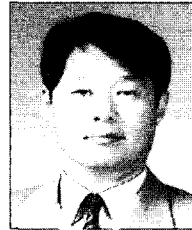
1994년 3월: 후쿠오카공업대학교
정보공학과 (공학사)
1996년 3월: 후쿠오카공업대학교
정보공학과 (공학석사)
2001년 2월: 큐슈대학교 시스템정
보과학연구과 (공학박사)
2001년 4월~2001년 8월: 큐슈대학

교 시스템정보과학연구원 연구원

2001년 9월~현재: 계명대학교 전자공학과 조교수

[주 관심분야] 전자파전파, 전자파이론, 전자장 수치해석

채 용 응



1985년 8월: 서강대학교 전자공학
과 (공학사)
1991년 5월: Oklahoma State Univ.
전자공학과 (공학석사)
1994년 12월: Oklahoma State Univ.
전자공학과(회로) (공학박사)
1998년 3월~현재: 계명대학교 전

자공학과 부교수

[주 관심분야] 직접회로, 마이크로파 소자, EMC/EMI