

거친 도체 표면 후방 산란 계산을 위한 모서리 효과 저감 기법

Edge-Effect Reduction Technique to Compute the Backscattering from Randomly Rough Conducting Surfaces

황 지 환 · 권 순 구 · 오 이 석

Ji-Hwan Hwang · Soon-Koo Kweon · Yisok Oh

요 약

본 연구에서는 roof-top 기저함수와 모서리 효과(edge-effect)를 저감시키기 위해 개선된 윈도우 함수를 적용한 2차원 모멘트법의 수치 해석 기법과 그 결과들을 제시한다. 모멘트법을 이용한 2차원 수치 산란 모델은 roof-top 기저함수를 적용하여 임의의 방향 표면 전류 성분 표현과 계산 효율을 높였으며, 수치적으로 생성된 표면 양 끝단의 모서리에서 발생하는 산란 특성을 제거하기 위해 입사각별 가중치를 둔 개선된 윈도우 함수를 제안한다. 또한, 거칠기가 있는 표면의 산란 특성 분석을 위한 개선된 2차원 수치 해석 기법의 정확도를 검증하기 위해서 SPM(Small Perturbation Model)의 계산 결과와 비교/분석하였다.

Abstract

An improved numerical scattering model with the 2-dimensional moment method including roof-top basis and a modified window-function to reduce edge-effect is presented in this study. The roof-top basis function is used to depict randomly positioned surface currents and increase an efficiency of the moment method. To reduce the edge-effect which occurs at the end of numerically generated surfaces, an enhanced window-function which is weighted by incident angle variable is proposed. To validate an proposed 2-dimensional scattering model and numerical analysis techniques for randomly rough surfaces, computational results are compared and analyzed to SPM(Small Perturbation Model) as well.

Key words: Rough Surface, Moment Method, Roof-Top Basis, Edge-Effect Reduction, Small Perturbation Model

I. 서 론

마이크로파 원격탐사 분야에서 지표면 산란 특성 연구를 위해 다양한 이론적/수치적/실험적 접근법들이 폭넓게 활용되고 있다. 이들 중 수치해석적 접근 방법은 보다 다양한 조건의 산란 특성 연구를 위한 그 편리성으로 지속적인 기법 연구가 이루어져 왔다. 특히, 전자파 산란의 원

역장(far-field) 해석이 용이한 모멘트법은 다양한 수치 해석 기법과 그 해석 정확도가 검증된 알고리즘으로 2차원, 3차원 및 이미지이론을 적용한 반 공간의 산란 특성 해석이 모두 가능하다^{[1][4]}. 3차원 자유공간 내의 수치 해석 모델은 일반적으로 점 목표물(point target)의 레이더 후방 산란 해석을 위해 이용된다^{[5][6]}. 반면에, 거칠기가 있는 지표면의 이론적/실험적 산란 특성 비교분석을 위해서는

「본 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음(No. 2013-005336).」
홍익대학교 전자정보통신공학과 (Department of Electronic Information and Communication Engineering, Hongik University)
· Manuscript received December 20, 2013 ; Revised February 20, 2014 ; Accepted February 24, 2014. (ID No. 20131220-129)
· Corresponding Author: Yisok Oh (e-mail: yisokoh@hongik.ac.kr)

2차원의 수치 해석 기법을 활용한 모멘트법의 적용이 지 표면 거칠기와 상관 길이에 따른 산란 특성 분석의 효율을 높일 수 있는 이점을 갖는다^{[7],[8]}.

본 연구에서는 효율적인 2차원 자유공간에서의 수치 해석을 위해 roof-top 기저함수를 적용한 모멘트법과 특정 거칠기(유효 높이, 상관 길이)를 갖는 임의의 표면의 산란 특성 해석을 위해 개선된 모서리 효과(edge-effect) 저감 기법을 선보인다. 또한, roof-top 기저함수와 제안된 모서리 효과 저감 기법을 적용한 2차원 수치 해석 기법의 정확도를 검증하기 위해서 SPM(Small Perturbation Model) 산란모델과 그 계산 결과를 비교/검증하였다. 이때, 수치 해석 모델의 입력은 거칠기와 상관 길이에 의해 수치적으로 생성된 임의의 표면 좌표를 이용하며, 몬테카를로(Monte-Carlo) 기법을 적용해 거칠기가 있는 표면으로부터 산란 특성을 분석하였다.

II. 모멘트법과 적분방정식

그림 1(a)는 거칠기가 있는 유한한 길이의 금속 표면과 이것으로부터의 후방 산란 계수를 계산하기 위한 2차원 수치 해석 모델의 기하 구조를 나타낸다. 이때, 임의의 거칠기가 있는 표면의 접선 방향 표면전류(\bar{J})를 기존의 펄스 기저 함수보다 효과적으로 표현하기 위해 roof-top 기저함수를 적용하였으며, 이는 접선 방향의 단위 벡터로 표현되는 기저함수의 고유한 특성으로 인해 모멘트법의 임피던스 행렬[Z]의 크기를 줄이는 효과 또한 갖게 되어 수치해석의 계산 효율 개선에도 기여하게 된다^[5].

Roof-top 기저함수를 활용한 2차원 모멘트법의 구성과 계산 정확도를 검증하기 위해 그림 1(b)의 원형 단면은 갖는 금속봉의 이론적 RCS(Radar Cross Section)와 계산 결과를 비교분석한다.

2-1 전계 적분방정식(EFIE)

모멘트법을 이용한 산란체 표면 전류 해석은 전계 적분방정식(electric field integral equation) 또는 자계 적분방정식(magnetic-field integral equation)을 수치적으로 계산함으로써 편파별 산란 특성을 얻어낼 수 있게 된다. 전계 적분방정식을 이용한 금속체 산란 특성은 식 (1)과 같이 정

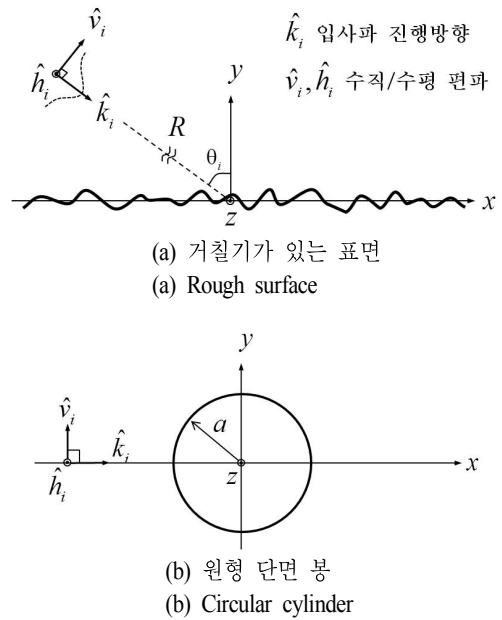


그림 1. 2차원 모멘트법 기하 구조
Fig. 1. Geometry of 2-dimensional moment method.

리된 전계 적분방정식을 이용할 수 있다(단, 아래 식 (1)과 (2)는 산란체 표면의 접선 방향의 벡터성분으로 표현된 것이다).

$$\frac{-j}{\omega\mu} \bar{E}^i(\bar{r}) = \int_{l'} \left(1 - \frac{1}{k^2} \nabla \nabla' \cdot \right) \bar{J}(\bar{r}') G_0(\bar{r}, \bar{r}') dl' \quad (1)$$

식 (1)의 좌변은 산란체 표면의 입사파이며, 우변은 표면 전류와 2차원 Green 함수($G_0(\bar{r}, \bar{r}')$)로 표현된 산란파를 나타낸 것이다. 이때, 2차원 Green 함수는 Hankel 함수 $\left(\frac{-j}{4} H_0^{(2)}(k_0 R) \right)$ 로 표현된다^[5].

2-2 자계 적분방정식(MFIE)

자계 적분방정식은 전계 적분방정식과 더불어 모멘트법 활용을 위해 다양하게 적용될 수 있으며, 펄스 기저 함수를 적용한 기존 연구에서는 표면 전류를 계산하기 위한 미지수의 개수를 줄이고, 그에 따른 계산 효율을 높이기 위해 특별히 수직 편파(v-pol./TEz-pol.)의 입사파 산란 특성을 해석하는 경우에 전계 적분방정식과 혼용되었다.

$$\hat{n} \times \overline{H^i} = \frac{\overline{J(\bar{r})}}{2} - \hat{n} \times \frac{j}{4} \int_{l'} \overline{J(\bar{r}')} \times \nabla G_0(\bar{r}, \bar{r}') dl' \quad (2)$$

자계 적분방정식 식 (2)의 좌변과 우변은 식 (1)과 동일한 접평면 상의 입사파와 산란파를 경계면 조건으로부터 정리한 것이다. 여기서, 우변의 첫 번째 항은 self-cell(전원점과 관측점이 동일한 경우)을 위한 항이며, 두 번째 항은 인접한 셀을 포함한 모든 셀을 위한 항이 된다.

2-3 Roof-Top 기저함수와 행렬식

위 식 (1)과 (2)로부터 모멘트법의 행렬식을 유도하기 위해서 미소 표면 전류를 roof-top 기저함수로 표현하고, 동일한 시험함수(testing function)를 이용한 갤러킨(Galerkin) 기법을 적용해 아래와 같이 식 (3)~(5)로 각각 정리할 수 있다.

$$\overline{J(\bar{r}')} = \sum_{n=1}^M a_n \overline{f_n} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{4}{\omega\mu} \int_{l_m} \overline{f_m} \cdot \overline{E^i(\bar{r})} dl \\ &= \int_{l_m} \overline{f_m} \cdot \left\{ \int_{l_n} \left(1 - \frac{1}{k^2} \nabla \nabla \cdot \right) \overline{J(\bar{r}')} H_0^{(2)}(k_0 R) dl' \right\} dl \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \int_{l'} \overline{f_m} \cdot [\hat{n} \times \overline{H^i(\bar{r})}] dl = \int_{l_m} \overline{f_m} \cdot \frac{\overline{J(\bar{r})}}{2} dl \\ & - \frac{j}{4} \int_{l_m} \overline{f_m} \cdot \hat{n} \times \int_{l_n} \overline{J(\bar{r}')} \times \nabla H_0^{(2)}(k_0 R) dl' dl \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $\overline{f_m}$ 은 roof-top 기저함수와 동일한 시험함수를 나타내며, 갤러킨 기법을 적용함으로써 전원점과 관측점 영역 모두에서 적분이 이루어지는 형태가 된다. 또한, roof-top 기저함수는 식 (6)과 같이 정의되며, 이는 2차원 공간 상의 임의 방향으로 놓인 세 점의 좌표 정보에 의해서 표현된다. l 은 두 점(l_{n-1} 과 l_n 또는 l_n 과 l_{n+1}) 사이 영역 내 좌표값을 나타내며, \hat{t}_n^\pm 는 접선 방향의 단위 벡터이다^[5].

$$\overline{f_n} = \begin{cases} \left(\frac{l-l_{n-1}}{l_n-l_{n-1}} \right) \hat{t}_n^+, & (l_{n-1} \leq l \leq l_n) \\ \left(\frac{l_{n+1}-l}{l_{n+1}-l_n} \right) \hat{t}_n^-, & (l_n \leq l \leq l_{n+1}) \end{cases} \quad (6)$$

위 식을 이용하여 식 (7)과 같은 모멘트법의 행렬식을 구성할 수 있으며, 입사파[B] 행렬과 임피던스[Z] 행렬의 m-번째 또는 m,n-번째 원소는 각각 식 (8a,b)와 (9a,b)로 정리된다. 여기서, 수평 편파의 산란 특성은 전개 적분방정식으로부터 정리된 식 (8)에 의해 계산되고, 수직 편파는 자계 적분방정식으로부터 유도된 식 (9)에 의해 각각 계산된다.

$$[B] = [Z][I] \quad (7)$$

$$b_{mh} = \frac{-j}{\omega\mu} \int_{l_m} \overline{f_m} \cdot \overline{E^i(\bar{r})} dl \quad (8a)$$

$$z_{mnh} = \int_{l_m} \int_{l_n} \overline{f_m} \overline{f_n} \left(\frac{-j}{4} H_0^{(2)}(k_0 R) \right) dl' dl \quad (8b)$$

$$b_{mv} = \int_{l_m} \frac{f_m}{z_0} E_z^i(\bar{r}) dl \quad (9a)$$

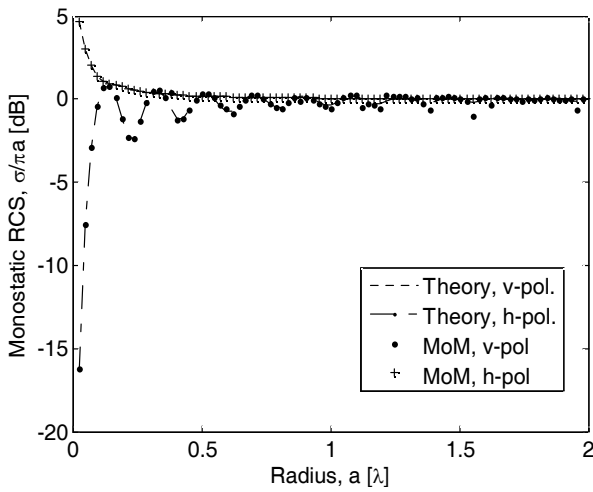
$$\begin{aligned} z_{mrv} &= \frac{1}{2} \int_{l_m} \overline{f_m} \cdot \overline{f_m} dl \\ & - \frac{j}{4} \int_{l_m} \overline{f_m} \cdot \hat{n} \times \int_{l_n} \overline{f_n} \times \nabla H_0^{(2)}(k_0 R) dl' dl \end{aligned} \quad (9b)$$

2-4 원형 단면 금속봉의 산란 특성

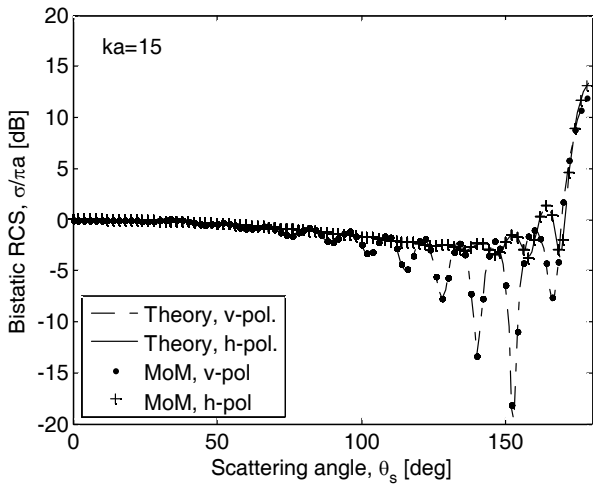
앞서 설명된 전개/자계 적분방정식과 roof-top 기저함수를 적용한 수치 해석 모델의 정확도 검증에 위해 그림 1(b)와 같은 z-축으로 무한히 긴 원형 단면 금속봉의 산란 특성을 이론값과 비교할 수 있다. 이때, 이론값은 금속봉 표면 산란과 성분의 무한 합으로 표현되는 series-solution^[6]을 이용하였으며, 그 결과, 해석 영역 내 오차범위 최대 0.5 dB 이내의 정확도를 확인할 수 있다. 그림 2는 원형 단면 금속봉의 mono/bi-static RCS 이론값과 계산값을 나타낸다.

III. 모서리 효과 저감 기법

앞서 검증된 2차원 모멘트법을 적용한 수치 해석 기법을 거칠기가 있는 금속 표면의 산란 특성 해석에 활용하기 위해 수평 편파(h-pol.)의 모서리 효과를 저감시키는 수치 해석 기법 적용이 추가적으로 요구되어진다. 이를



(a) 단방향 산란
(a) Monostatic-scattering



(b) 양방향 산란
(b) Bistatic-scattering

그림 2. 금속봉의 산란 특성
Fig. 2. Scattering property of circular conducting cylinder.

위해, 본 장에서는 기존 윈도우 함수에 입사각 별 가중치를 적용한 source-tapering 기법^[7]의 개선된 형태를 제안하며, 이를 거칠기가 없는 도체 평면에 적용해 저장된 모서리 효과의 계산 결과를 PO(Physical Optics) 이론값과 비교/분석하였다.

3-1 Source-Tapering 기법과 윈도우 함수

2차원 수치 해석 모델은 기본적으로 유한한 길이의 표

면을 이용하여 그 응답 특성을 해석하게 되는데, 이는 측정시스템(예, scatterometer)을 이용한 실제 산란 특성 측정 결과와는 상이한 부분을 내포하게 된다. 유한한 길이의 표면 생성은 수치해석 시 양 끝단의 모서리를 그대로 계산하기 때문에 모서리로부터의 산란 특성이 반영된 모서리 효과가 해석정확도에 영향을 미치게 된다. 이와 같은 모서리 효과를 최소화하기 위해 입사파에 Gaussian 함수와 같은 윈도우 함수를 적용함으로써 모서리로 인가되는 입사파의 크기를 조절할 수 있게 된다.

입사파[B] 행렬에 윈도우 함수를 적용하는 수치 해석 기법을 source-tapering이라 하며, 일반적으로 식 (10)과 같은 함수식을 곱해 그림 1(a)의 입사파와 같이 평면파의 양 끝 크기를 조절하게 된다. 이때, σ 는 윈도우 함수 폭을 조절하기 위한 표준편차를 나타내며, 4차의 지수승은 함수의 양단 기울기를 조절하는 역할을 한다^[6].

$$g(x) = \exp\left(-\left\{\frac{x}{\sigma}\right\}^4\right) \tag{10}$$

$$g(x) = \begin{cases} 1, & (x < x_c) \\ \exp\left(-\left\{\frac{(x-x_c)}{\sigma \cos(\theta_i + \theta_d)}\right\}^4\right), & (x_c < x < 1) \\ \approx \exp\left(-\left\{\frac{(x-x_c)}{1.6 \cos(\theta_i + 0.4014)}\right\}^4\right) \end{cases} \tag{11}$$

본 연구에서 제안한 윈도우 함수 식 (11)은 여러 입사각에 따른 산란 특성을 분석하고, 이를 최적화시키는 방법으로 얻어진 경험식으로 모서리 양단에 모두 작용하는 기존 대칭 구조의 함수식을 모서리 효과가 상대적으로 크게 일어나는 한쪽 모서리에 제한하여 불필요한 입사파의 필터링 효과를 줄였다. 또한, 이 비대칭 구조의 윈도우 함수를 특정입사각(θ_d) 이후부터 그 동작 특성이 극대화될 수 있도록 가중치를 적용하였다.

그림 3은 제안된 비대칭 구조와 입사각별 가중치를 적용한 윈도우 함수를 나타낸다. 입사각이 클수록 상대적으로 모서리 효과가 크게 나타남으로 그에 따른 가중치가 작용한 윈도우 함수의 변화를 보여준다. 본 연구에서 제안된 윈도우 함수 식 (11)은 $\sigma=1.6$ 과 $\theta_d=0.4014$ rad (약 23°)으로 최적화되어 다음 연구 결과들에 반영되었다.

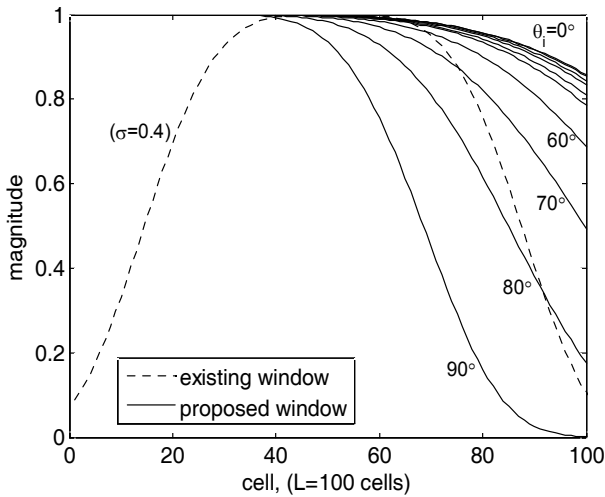


그림 3. 모서리 효과 개선을 위한 윈도우 함수
Fig. 3. Window function to reduce edge-effect.

3-2 개선된 모서리 효과 저감 기법

식 (11)의 윈도우 함수를 이용한 모서리 효과 저감 기법의 개선 효과를 검증하기 위해 평평한 금속면의 후방 산란을 제안된 2차원 수치 해석 모델과 PO 이론식을 이용해 비교/분석하였다.

그림 4는 길이 10λ 의 금속평면의 편파화된 후방 산란 특성을 나타낸 것이다. 대칭 구조의 기존 함수의 경우, 모서리에서의 산란 특성을 저감시키기 위해서 상대적으로 큰 σ 의 입력값을 사용할 경우, 입사파의 전력 손실이 발생할 수 있어 수치 해석 정확도에 오차 요인으로 작용되므로 약 $0.3 \leq \sigma \leq 0.7$ 이내의 수치를 입사파와 모서리 효과를 고려해 적용할 수 있으며, 본 연구의 비교 분석을 위해 $0.5 \leq \sigma \leq 0.7$ 범위의 수치를 30° 이상의 입사각 범위에서 5단계로 구분하여 적용하였다.

반면에 제안된 윈도우 함수는 기존 함수의 제한된 동작 특성을 최적화시켜 그 효과를 극대화한 것으로 모서리에서의 산란 특성이 전체 산란파에서 무시될 수 없는 범위($\theta_i > 30^\circ$ 이상) 내에서 그 효과가 반영되도록 설계되었다(식 (11) 참조). 그림 4에서 ‘•’으로 표현된 기법은 70° 이상의 높은 입사각에서도 그 계산 결과가 매우 안정적이며, 특히 수직에 가까운 입사각에서 이론값과 같이 후방 산란 특성이 -60 dB 이하로 충분히 소멸되는 특성을 확인할 수 있었다.

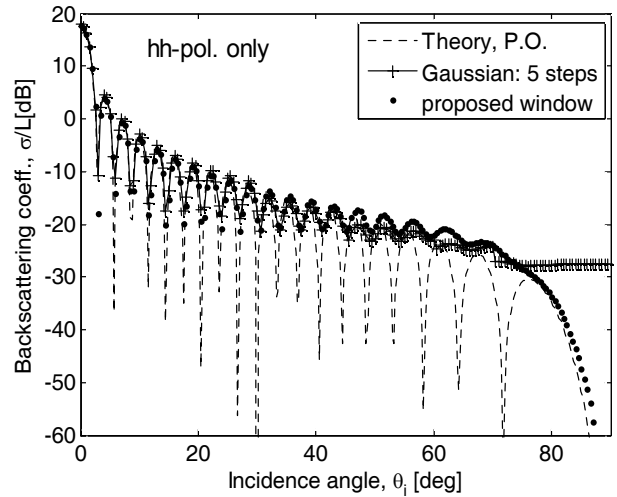


그림 4. 개선된 모서리 효과 저감 기법
Fig. 4. Improved edge-effect reduction technique.

IV. 거칠기가 있는 표면의 후방 산란 특성

Roof-top 기저함수와 개선된 윈도우 함수를 적용한 2차원 수치 해석 모델은 거칠기가 있는 유한한 길이의 표면을 해석하기 위한 연구 목적에 부합되기 위해 기존의 이론적 산란모델과 비교가 필요하며, 그 정확도 검증을 위해 이론적 산란모델인 SPM^[8]을 이용해 유효 높이와 상관 길이로 표현되는 임의의 표면에 대한 산란 특성을 비교 검증하였다.

4-1 후방 산란 계수 계산법

거칠기와 상관 길이를 입력 변수로 생성된 유한한 길이(L)의 임의의 표면의 후방 산란 계수(σ^o)를 앞서 설계된 수치 산란 모델을 적용해 해석하기 위해서 몬테 카를로 기법을 활용할 수 있다. 수치적으로 독립된 다수의 임의의 표면(N: 생성된 표면 샘플 개수)으로부터의 후방 산란 데이터를 통계분석함으로써 후방 산란 계수의 비간섭성(incoherent) 산란 성분을 SPM(일반적으로 유효 높이 0.4 이하, 상관 길이 4.0 이하의 범위 내 유효)의 이론값과 비교할 수 있다^{[2],[7]}.

식 (12)는 몬테카를로 기법을 통해 획득된 N개의 계산 결과를 전체(total)/간섭성(coherent) 산란 성분으로 구분하여 각각의 앙상블 평균(ensemble average)으로부터 비간섭

성 산란 성분을 얻는 과정을 나타낸 식이다.

$$\sigma^o = \frac{2\pi r}{NL} \left\{ \sum_{i=1}^N |\overline{E^s}|^2 - \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \overline{E^s} \right|^2 \right\} \quad (12)$$

여기서, $\overline{E^s}$ 는 N 개의 표면으로부터 계산된 후방 산란 전계이며, N 과 L 은 각각 생성된 표면의 개수와 표면 길이를 나타낸다. 또한, σ^o 은 거칠기가 있는 표면의 후방 산란 계수이다.

참고로 수치 모델의 입력 좌표는 임의의 수 생성 함수를 통해 거칠기와 상관 길이를 이용해 통계적으로 독립된 지표샘플을 생성해 활용하였다. 이때, 거칠기가 있는 임의의 표면의 스펙트럼 생성을 위해서 Gaussian auto-covariance 함수를 적용하였다.

4.2 2차원 수치해석과 산란모델 비교

특정 거칠기가 있는 임의의 표면으로부터 후방 산란 계수를 계산하고, 그 정확도를 분석하기 위해서는 앞서 원형 단면의 금속봉을 이용한 수치해석 정확도 분석 방법과는 달리 몬테카를로 기법을 활용한 통계분석법을 활용하게 된다. 제안된 수치해석 기법을 이용해 N 개의 표면으로부터 후방 산란 전계를 계산하고, 그 계산 결과를 식 (12)에 대입해 특정 유효 높이와 상관 길이를 갖는 임의의 거친 표면의 비간섭성 산란 특성을 확인한다.

그림 5는 전체길이 100 λ의 거칠기(유효 높이=0.15, 상관 길이=2.0)가 있는 표면의 산란 특성을 이론값과 비교

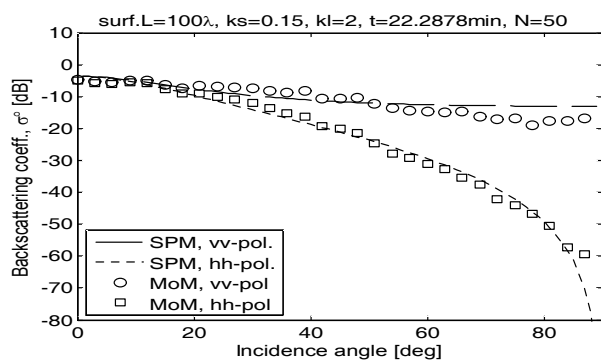


그림 5. 제안된 2차원 수치 산란 모델 성능 검증
Fig. 5. Verification of the proposed 2D numerical scattering model.

표 1. 2차원 수치해석 정확도

Table 1. Accuracy of 2D numerical analysis.

구 분	정확도 (편차)		기 준 (이론값)
	수직편파	수평 편파	
원형단면 금속봉	¹⁾ 0.7 dB	¹⁾ 0.5 dB	Series solution ^[6]
	²⁾ 0.1 dB 이하	²⁾ 0.1 dB 이하	
거칠기가 있는 표면	2.2 dB	1.4 dB	SPM ^[8]

*¹⁾ Monostatic RCS, ²⁾ Bistatic RCS.

표 2. 제안된 2차원 수치해석의 구성

Table 2. Configuration of the proposed 2D numerical analysis.

구성 및 적용기법	내용	비고
모멘트법 (적분방정식)	전계적분방정식	EFIE(v,h-pol)
	자기적분방정식	MFIE(v,h-pol)
기저함수 / 시험함수	Roof-top기저함수	갤러킨 기법
수치적분법	10-points Gaussian quadrature, center point interpolation	상대거리 지수 적용 ^[4]
Source-tapering 기법	입사각 별 가중치 둔 윈도우 함수	식 (11) 참조
모의실험방법	몬테카를로 기법	거칠기가 있는 표면

한 결과이다. 이때, 총 50개의 거칠기가 있는 표면을 계산 하였으며, 계산 시간은 약 22분(3.4 GHz CPU, 4GB RAM 기준)이 소요되었다. 계산정확도는 이론값 대비 모든 입사각 범위 내에서 수직 편파 약 2.2 dB, 수평 편파 약 1.4 dB의 편차를 확인하였다. 특히, 수평 편파의 경우 제안된 윈도우 함수의 적용으로 70° 이상의 높은 입사각에서도 그 정확도가 매우 높음을 확인할 수 있었다.

표 1과 2는 앞서 제시된 수치 해석 기법의 정확도와 이를 수행하기 위한 수치 해석의 구성을 요약한 것이다.

V. 결 론

본 논문에서는 거칠기가 있는 표면의 후방 산란 특성을 해석하기 위해 roof-top 기저함수와 개선된 윈도우 함수를 적용한 2차원 수치 해석 기법을 제안하였으며, 수치

해석의 정확도는 거칠기가 있는 임의의 표면에서 이론값 대비 약 2.2 dB 이내의 편차를 확인할 수 있었다. 특히, 수평 편파는 제안된 윈도우 함수 적용으로 70° 이상의 입사각에서도 높은 계산 정확도가 유지됨을 확인할 수 있었다. 이와 같은 해석 결과는 지표면 산란 특성 연구를 위한 분석 도구로서 활용이 가능함을 보여준다.

References

[1] Yisok Oh, Young-Mi Jang, and Kamal Sarabandi, "Full-wave analysis of microwave scattering from short vegetation: an investigation on the effect of multiple scattering", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 40, no. 11, pp. 2522-2526, Nov. 2002.

[2] Yisok Oh, Kamal Sarabandi, "Improved numerical simulation of electromagnetic wave scattering from perfectly conducting random surface", *IEE Proc.-Microw. Antennas Propag.*, vol. 144, no. 4, pp. 256-260, Aug. 1997.

[3] Ji-Hwan Hwang, Yisok Oh, "Investigation of the effect of boundary edges placed on an infinite conducting surface and effective treatment using virtual vertices", *Antenna and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 913-916, 2012.

[4] 황지환, 권순구, 오이석, "전자파 수치 해석을 위해 겔러킨 기법과 보간법을 혼용하여 개선시킨 모멘트법", *한국전자과학회논문지*, 23(4), 2012년 4월.

[5] W. C. Gibson, *The Method of Moments in Electromagnetics*, Chapman & Hall/CRC, 2008.

[6] G. T. Ruck, et al, *Radar Cross Section Handbook*, Plenum press, New York, 1970.

[7] A. K. Fung, K. S. Chen, *Microwave Scattering and Emission Models for Users*, Artech House, USA, 2010.

[8] F. T. Ulaby, C. Elachi, *Radar Polarimetry for Geoscience Applications*, Artech House, USA, 1990.

황 지 환



2001년 2월: 홍익대학교 전파공학과 (공학사)
 2003년 2월: 홍익대학교 전파통신공학과 (공학석사)
 2009년 3월~2013년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학박사)
 [주 관심분야] 전자파수치해석, GB-SAR 시스템, 마이크로파 원격탐사

오 이 석



1982년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)
 1988년 12월: University of Missouri-Rolla, 전기 및 컴퓨터공학과 (공학석사)
 1993년 12월: University of Michigan, Ann Arbor, 전기공학 및 컴퓨터과학과 (공학박사)
 1997년~2001년: 대한원격탐사학회 상임이사
 2001년~2008년: 한국전자과학회 상임이사
 2006년~2008년: Chair, IEEE GRS Korea Chapter
 2009년~2010년: Stanford University 방문교수
 1994년~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수
 2009년~현재: IEEE Fellow
 [주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격탐사, 레이더, 안테나

권 순 구



2007년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2009년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
 2009년 3월~현재: 홍익대학교 전자정보통신공학과 박사과정
 [주 관심분야] 전파 산란, 마이크로파 원격탐사, SAR 영상분석