

기름이 유출된 바다 표면의 L-밴드 전파 산란에 대한 수치해석적 연구

박성민^{*,**} · 양찬수^{*†} · 오이석^{**}

*한국해양연구원 해양위성센터, **홍익대학교 전자정보통신공학과

Numerical Simulation of Radar Backscattering from Oil Spills on Sea Surface for L-band SAR

Seong-Min Park^{*,**}, Chan-Su Yang^{*†}, and Yisok Oh^{**}

*Korea Ocean Satellite Center, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan, Korea

**Department of Electronics, Information and Communication Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

Abstract : This paper presents a numerical simulation of the radar backscattering from oil spills on ocean surface. At first, a one-dimensionally rough sea surface is numerically generated for a given wind speed at HEBEI SPIRIT accident. Then, an oil-spilled sea surface is represented with a two-layered medium, which is generated by adding a thin low-dielectric oil layer on the randomly-rough high-dielectric sea surface. The backscattering coefficients of various oil-spilled sea surfaces are obtained using the Method of Moments and Monte Carlo technique for various surface roughness, oil-layer thicknesses, frequencies, polarizations and incidence angles. The numerical method is verified with theoretical models for simple structures. The reduction of the backscattering coefficients due to the low-dielectric oil-layers on sea surfaces has been analyzed. These numerical results will help to detect any oil spills on sea surfaces, and consequently, to classify SAR images.

Key Words : Oil-spilled sea surface, backscattering coefficients, method of moments, Monte Carlo technique.

요약 : 본 논문에서는 기름이 유출된 바다 표면의 레이더 산란에 대한 수치해석적 연구를 보여준다. 우선, 풍속에 따라서 불규칙적인 거칠기를 갖는 바다 표면을 생성한 다음에, 유전율이 높은 거친 바닷물 표면 위에 유전율이 낮은 기름층을 두어 기름이 유출된 바다 표면을 생성한다. 서로 다른 표면 거칠기, 기름층의 두께와 유전율, 주파수, 편파, 입사각의 조합으로 이루어진 다양한 형태의 기름 유출 바다에 대한 레이더 후방산란계수를 모멘트 법(Method of Moments)/ 몬테카를로(Monte-Carlo) 방법을 이용하여 계산한다. 이 수치해석적 방법은 이론적인 산란 모델로 계산 가능한 간단한 구조에 대해서 이론 모델 결과와 비교함으로써 그 정확성을 검증한다. 이 수치해석적 방법으로 기름이 유출된 바다 표면에서의 후방산란계수의 감소를 분석하며, 이 분석 결과는 결과적으로 SAR 영상에서의 기름층의 발견 및 식별에 도움을 줄 것이다.

접수일(2010년 1월 13일), 수정일(1차: 2010년 2월 27일), 게재확정일(2010년 2월 28일).

† 교신저자: 양찬수(yangcs@kordi.re.kr)

1. 서론

해양 기름 유출 사고는 해양 생태계의 심각한 영향을 초래하므로, 기름 유출에 대한 감시는 해양 생태계의 감시 및 보존의 필수적인 요소가 되었다. 합성 개구 레이더(SAR: Synthetic aperture radar)를 이용한 원격 탐사는 바다에 유출된 기름층을 찾기 위한 방법으로 널리 이용 되어졌다(Adamo *et al.*, 2006; Bentz *et al.*, 2007). SAR 영상에서 기름 유출에 의해 검게 나타나는 지역('slick')을 탐지하고, 유사('look-alikes') slick에 의한 오보(false alarm)를 줄이는 알고리즘 개발 연구가 진행되어 왔다(Espedal, 1999; Brekke and Solberg, 2005). 이들 연구들은 (1) SAR 영상과 현장 데이터들을 이용한 실험적 연구로만 수행되었으며, (2) 유출된 기름에 의해서 바다표면의 거칠기 줄어드는 damping 효과만을 고려하였다. 그러나 실험적 연구는 기름 유출이 있는 경우를 찾거나 기다려야만 연구 결과를 얻을 수 있는 단점이 있다. 따라서 이론적이나 수치해석적으로 데이터를 얻을 수 있는 알고리즘 개발에 대한 연구가 필요하다. 유출된 기름에 의해 바다 표면의 잔 파도(capillary wave) 높이가 줄어들어 레이더의 산란계수가 줄어드는 효과가 있는 게 사실이지만, 기름의 유전율이 낮기 때문에(대략적으로 바닷물의 10분의 1 정도) 산란계수가 줄어드는 효과는 무시할 수 없고, 이 효과에 대한 연구도 필요하다.

본 연구에서는 바닷물 위에 기름 층이 있을 경우에 유효 유전율이 줄어들게 되어 발생하는 레이더 산란계수 감소를 수치해석적으로 계산하는 알고리즘을 개발하고, 이 알고리즘의 정확성을 검증하며, 이 알고리즘으로 다양한 기름 유출 현상들에 대해 계산하여 기름 유출 정보 체계 개발에 발판을 만들고자 한다. 기름이 유출된 바다 표면의 정확한 후방산란의 계산은 SAR영상에서 기름층을 발견하고 또한 식별하는데 유용하게 이용할 수 있지만, 바다 표면의 거칠기는 매우 복잡하며 기름층의 특성 역시 복잡하기(Cox and Munk, 1954; Ulaby *et al.*, 1986) 때문에 기름이 유출된 바다 표면의 정확한 후방 산란의 계산은 매우 복잡하다.

본 논문에서는 유출된 기름의 다양한 형태에 대하여 정확하게 후방산란계수를 계산할 수 있는 수치 해석적 방법을 제시한다. 우선 풍속에 따른 바다 표면의 상태와

유사한 이중 거칠기를 가지는 거친 표면을 수치해석적으로 생성한다. 그리고 바다 표면의 위에 얇은 두께의 기름층이 있는 2층으로 된 매질 구조를 생성한다(Morchin, 1993; Oh, 1996b). 2층으로 된 매질 구조에 모멘트 법을 적용하여 각각의 기름이 유출된 바다 표면 조각에서의 산란 전계를 수치해석적으로 계산한다(Oh, 1998). 다음에 주어진 표면 거칠기, 기름층의 두께, 레이더 주파수, 레이더 편파, 입사각에 따른 표면에서의 후방산란계수를 몬테카를로 방법으로 계산한다. 수치해석 결과를 이론적인 모델과 비교하여 수치해석적 방법의 정확성을 검증하고, 나아가 측정 데이터와 비교한다. 마지막으로 기름이 유출된 바다 표면에서의 후방산란계수의 감소를 여러 가지 다양한 상황에 따라 계산하고 그 데이터들을 분석한다.

2. 이론식 전개

바다 표면의 거칠기는 대개 큰 거칠기의 표면과 작은 거칠기의 표면을 중첩하는(superposition) 방법을 이용한다(Ulaby *et al.*, 1986). 즉, 바다 표면을 큰 파도와 그 위에 잔잔한 파도가 중첩된 형태로 본다. 거친 바다 표면에서의 기름 유출은 Fig. 1과 같이 작은 유전율을 갖는 기름층이 위에 큰 유전율을 갖는 바다 표면이 밑에 위치한 2층으로 된 매질로 이루어진다.

이 때 Region 0, 1, 과 2는 각각 대기, 기름층, 바닷물 층을 나타내고, k, ϵ, μ 는 전파상수, 유전율, 투자율을 나타낸다. 전파상수, 유전율, 투자율은 다음과 같은 관

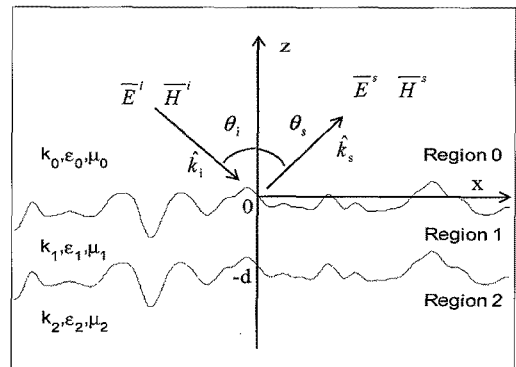


Fig. 1. Geometry of the two-layered medium.

계식을 가지며, $k = \omega \varepsilon \mu$, $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, $\mu = \mu_0 \mu_r$, 이 때 $\varepsilon_{r0} = 1$, $\mu_{r0} = \mu_{r1} = \mu_{r2} = 1$ 이다. ε_{r1} , ε_{r2} 는 각각 기름의 유전율과 바닷물의 유전율이다.

전파 방정식과 경계 조건을 이용하여 산란 전계를 계산하기 위한 적분 방정식(EFIE: electric field integral equation)이 유도된다. 공기와 기름층 사이의 C_0 표면의 적분 방정식은 식 (1a)–(1b)와 같고, 기름층과 바닷물 사이의 C_1 표면의 적분 방정식은 식 (1c)–(1d)와 같다.

$$-ik_0 Z_0 \int_{C_0} J_{0y}(\vec{\rho}') G_0(\vec{\rho}, \vec{\rho}') d\vec{l}' + \int_{C_0} M_{0l}(\vec{\rho}') \hat{n}_0 \cdot \nabla' G_0(\vec{\rho}, \vec{\rho}') d\vec{l}' - \frac{1}{2} M_{0l}(\vec{\rho}) = -E_{0y}^i(\vec{\rho}), \vec{\rho} \in C_0 \quad (1a)$$

$$ik_1 Z_1 \int_{C_0} J_{0y}(\vec{\rho}') G_1(\vec{\rho}, \vec{\rho}') d\vec{l}' - \int_{C_0} M_{0l}(\vec{\rho}') \hat{n}_0 \cdot \nabla' G_1(\vec{\rho}, \vec{\rho}') d\vec{l}' - ik_1 Z_1 \int_{C_1} J_{1y}(\vec{\rho}') G_1(\vec{\rho}, \vec{\rho}') d\vec{l}' + \int_{C_1} M_{1l}(\vec{\rho}') \hat{n}_1 \cdot \nabla' G_1(\vec{\rho}, \vec{\rho}') d\vec{l}' - \frac{1}{2} M_{0l}(\vec{\rho}) = 0, \vec{\rho} \in C_0 \quad (1b)$$

$$ik_1 Z_1 \int_{C_0} J_{0y}(\vec{\rho}') G_1(\vec{\rho}, \vec{\rho}') d\vec{l}' - \int_{C_0} M_{0l}(\vec{\rho}') \hat{n}_0 \cdot \nabla' G_1(\vec{\rho}, \vec{\rho}') d\vec{l}' - ik_1 Z_1 \int_{C_1} J_{1y}(\vec{\rho}') G_1(\vec{\rho}, \vec{\rho}') d\vec{l}' + \int_{C_1} M_{1l}(\vec{\rho}') \hat{n}_1 \cdot \nabla' G_1(\vec{\rho}, \vec{\rho}') d\vec{l}' - \frac{1}{2} M_{1l}(\vec{\rho}) = 0, \vec{\rho} \in C_1 \quad (1c)$$

$$ik_2 Z_2 \int_{C_1} J_{1y}(\vec{\rho}') G_2(\vec{\rho}, \vec{\rho}') d\vec{l}' - \int_{C_0} M_{0l}(\vec{\rho}') \hat{n}_0 \cdot \nabla' G_1(\vec{\rho}, \vec{\rho}') d\vec{l}' - \frac{1}{2} M_{1l}(\vec{\rho}) = 0, \vec{\rho} \in C_1 \quad (1d)$$

위 식에서 그린 함수(Green's function)는 $G_n(\vec{\rho}, \vec{\rho}') = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_n |\vec{\rho} - \vec{\rho}'|)$ 이고, 여기에서 $H_0^{(1)}$ 는 first kind, 0th order Hankel 함수이다. $\vec{\rho}$, $\vec{\rho}'$ 은 각각 관측 점(observation point)과 전원점(source point)이다. J_{0y} , J_{1y} , M_{0l} , M_{1l} 는 C_0 , C_1 , 경계에서의 등가 표면 전류(equivalent surface currents)들로, 수치해석 방법을 이용하여 알아내야 하는 모르는 값들이다.

얻어야 하는 등가 표면 전류들이 적분식 안에 있으므로 variational 수치해석방법을 사용해야 하고, 여기서는 대표적인 수치해석 방법인 모멘트 방법을 이용하여 등가 표면전류들을 펄스 기저 함수(Pulse basis

function)들의 합으로 표현하였다. 이 합으로 표현된 적분식에 점 매칭 기술(point matching technique)을 이용하여 적분 방정식 (1a)–(1d)을 다음의 식 (2)와 같이 행렬식으로 변환하였다.

$$\begin{bmatrix} [Z_{11}^{nm}] & [Z_{12}^{nm}] & 0 & 0 \\ [Z_{21}^{nm}] & [Z_{22}^{nm}] & [Z_{23}^{nm}] & [Z_{24}^{nm}] \\ [Z_{31}^{nm}] & [Z_{32}^{nm}] & [Z_{33}^{nm}] & [Z_{34}^{nm}] \\ 0 & 0 & [Z_{43}^{nm}] & [Z_{44}^{nm}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I_1^m] \\ [I_2^m] \\ [I_3^m] \\ [I_4^m] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [V_1^m] \\ [0] \\ [0] \\ [0] \end{bmatrix} \quad (2)$$

임피던스 행렬 $[Z]$ 성분은 0차 또는 1차 Hankel 함수에 대한 적분 형태이며, 그린 함수와 그린 함수의 미분 값을 이용하여 수치해석적으로 구할 수 있다. 그리고 적분이 불가능한 지점(singularity)은 해석적 적분(analytical integration)을 이용하여 해결한다. 값을 모르는 전류 행렬 $[I]$ 는 식 (2)에서 주어진 여기(excitation) 벡터 $[V]$ 를 이용하여 선형 식들을 풀어 구한다. 전류행렬 $[I]$ 의 값과 펄스기저함수를 이용하여 등가 표면 전류들을 계산하고, 이들을 이용하여 식 (3)을 통해 산란 전계를 계산한다.

$$E_{0y}^s = -ik_0 Z_0 \int_{C_0} J_{0y}(\vec{\rho}') G_0(\vec{\rho}, \vec{\rho}') d\vec{l}' + \int_{C_0} M_{0l}(\vec{\rho}') \hat{n}_0 \cdot \nabla' G_0(\vec{\rho}, \vec{\rho}') d\vec{l}' \quad (3)$$

바다 표면은 불규칙성을 갖는 거친 표면이기 때문에 여러 표면 조각들에 대해 산란 전계를 계산한 다음에 통계적으로 레이더 산란계수를 계산해야 한다. 각각의 표면조각에 대해 모멘트 법으로 계산한 전계를 이용하여 레이더 산란계수를 계산하기 위해 몬테카를로 방법을 이용하였으며, 독립적으로 불규칙적인 바다표면을 생성하여 수치해석을 적용하였다. 많은 수의 독립된 거친 표면 조각에서의 산란 전계를 계산한 후 레이더 산란계수를 식 (4)와 같이 구하였다.

$$\sigma_{pp}^0 = \lim_{\rho \rightarrow \infty} \frac{2\pi\rho}{D} \left\{ \left| \langle E_{pp}^s \rangle \right|^2 - \left\langle \left| E_{pp}^s \right|^2 \right\rangle \right\}, pp = vv, hh \quad (4)$$

3. 수치해석 결과

우선, 본 연구에서 개발한 수치해석 알고리즘의 정확성을 검증하기 위하여 이론모델의 결과와 비교하였다. 이론 모델들은 단일 층에서만 가능하므로, 기름층이 존재 하지 않는 1층으로 된 매질 구조에서 산란계수를 계

산하였다. 즉, $d=0$, 혹은 $k_1=k_2$ 이다. 수치해석을 적용하기 위해 우선 불규칙적인 거칠기를 갖는 바다 표면을 수치적으로 생성하였고, 이 표면이 Gaussian 표면 높이 분포와 Gaussian correlation을 갖는다고 가정하였다. New Physical Optics(New PO) 모델(Oh, 1996a) 적용이 가능한 표면 거칠기 변수인 $ks=1.23$, $kl=23.38$ ($k=2\pi/\lambda$, s =표면 RMS(root-mean-square) 높이, l =표면 상관(correlation) 길이)을 선택하였고, 바닷물의 유전율이 $\epsilon_2=73.2+64.9i$ 라고 가정하였다. 이 거친 표면에 대해 모멘트 법/몬테카를로 방법으로 계산된 산란계수를 이론적 산란모델인 New PO 모델로 계산한 산란계수와 비교하여 Fig. 2에 보여준다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 VV편파와 HH편파 모두에서 수치해석 계산 결과가 New PO 모델과 비교적으로 잘 일치한다. 거칠기가 작은 표면에서는 다른 이론 모델인 small perturbation method (SPM)과 잘 일치한다.

위 결과로 모멘트 법과 몬테카를로 방식의 수치해석 알고리즘에 대한 확신을 갖고, 이번에는 이론적 모델로는 계산하기 어려운 거칠기를 갖는 바다표면과 기름층이 있는 바다 표면에 대한 레이더 산란계수를 계산하여 그 데이터들을 해석하였다. 우선, 풍속에 따른 파고의 관계(Morchin, 1993)와 풍속에 따른 상관길이의 관계(Cox and Munk, 1954)를 이용하여 큰 거칠기의 표면을 생성하였다. 다음에는 Gaussian 높이 분포와 Gaussian correlation을 갖는 작은 거칠기의 표면을 생성하여, 큰 거칠기의 표면 위에 작은 거칠기를 중첩시키는 composite 방법을 이용하여 1차원적으로 거친 바다 표면을 생성 하였다.

우선, 거칠기가 중첩된 표면에서 작은 거칠기 표면의 영향을 설명하기 위하여, composite 표면에 대한 레이더 후방산란계수를 계산하여 큰 거칠기만 갖는 표면에서의 후방산란계수와 비교 하였다. 이 경우에는 기름층을 고려하지 않았고 ($d=0$), 풍속은 1.5m/s를 가정하였고, 1.27GHz의 주파수를 이용하였으며, 작은 거칠기는 ($s=0.4$ cm, $l=4.4$ cm), 큰 거칠기는 ($s=4.7$ cm, $l=89.3$ cm)를 가정하였다. Fig. 3은 작은 거칠기(ripple)가 없이 큰 거칠기만 있는 경우와 작은 거칠기가 중첩된 경우의 산란계수를 VV와 HH편파 모두에 대해 비교한 그림이다. Fig 3에서 알 수 있듯이 낮은 입사 각도에서는 두 표면에서의 후방산란계수의 차이가 없지만 높은 입사각

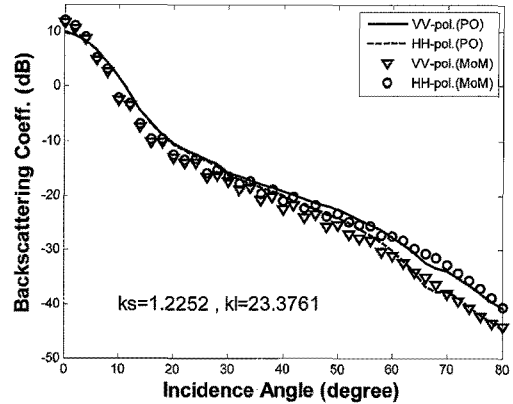


Fig. 2. Comparison between the numerical results of this study and the PO model for a homogeneous surface with the roughness in the validity region of the PO model.

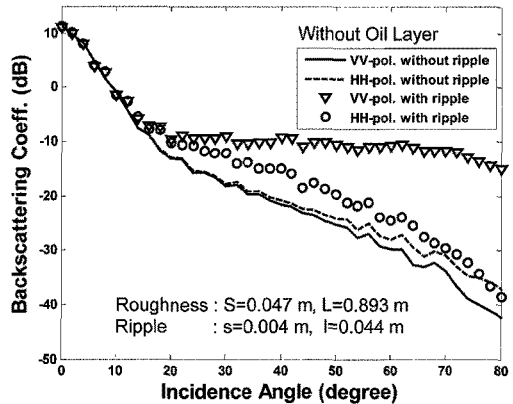


Fig. 3. Comparison of the numerical results between the composite surface with ripples and the large-scaled surface without ripples.

에서는 VV편파에서 큰 변화가 있음을 확인 할 수 있다. 이 결과는 작은 거칠기만 있는 표면에 대해 SPM (또는 수치적 계산)으로 계산하면, 높은 입사각에서 VV편파가 HH편파보다 훨씬 더 높은 레이더 후방산란계수를 갖는 결과와 일치한다.

1) 기름 두께의 효과

이론적인 산란 모델들과 비교하여 수치해석 알고리즘의 정확성을 검증하였으며, 이에 따라 이 수치해석 알고리즘을 이용하여 기름과 바닷물의 2층으로 이루어진 매질 구조의 전자파 산란에 대하여 계산 하였다. 바닷물의 유전율은 주파수와 온도, 염도의 함수로 계산되었다 (Ulaby, et al., 1986). 여러 종류의 기름에 대한 유전율

을 아직 이용하지 못하여서, 1.25GHz에서 링 공진기 타입의 유전 프로브를 이용하여 측정된 등유의 유전율 $\epsilon_{r1}=2.39 + 0.29i$ 을 이용하였다(Sarabandi and Li, 1997).

같은 거칠기를 갖는 바다표면에서, 기름층이 있을 경우에 후방산란계수 값의 감소를 보이기 위해 기름층이 있는 경우와 기름층이 없는 경우의 후방산란계수를 계산하여 비교하였다. 이 계산에서 기름층의 두께를 0.15λ 로 설정하였다. Fig. 3은 기름이 유출된 바다 표면에서의 후방산란계수의 값은 기름이 없는 경우보다 낮아지는 것을 보여 준다. 입사각에 따라 다르지만, 예를 들어 20도 부근에서는 대략적으로 3 ~ 5 dB 정도의 감소를 볼 수 있다.

이번에는 다양한 기름층 두께에 대해 후방산란계수 감소의 정도를 알아보기 위해 기름층 두께가 0.0λ , 0.05λ , 0.1λ 와 0.15λ 인 경우에 대하여 VV편파와 HH편파의 후방산란계수를 계산하여 비교하였다. Fig. 5 (a)와 (b)는 각각 VV편파와 HH편파의 후방산란계수 감소 추이를 입사각 0도부터 80도 사이에서 보여준다. 예상했듯이 기름층의 두께가 증가함에 따라 산란계수 감소의 크기가 증가함을 알 수 있다. 예를 들어, VV편파에서 기름층의 두께가 0.05λ 일 때에는 1 dB 이내로 감소하지만, 0.1λ 일 때에는 대략 2.5 dB 정도의 감소를 보이고, 0.15λ 일 때에는 대략적으로 5 dB 정도의 감소를 보인다. 65도와 80도 사이에서 기름층의 경우가 오히려 높게 나오는 경우는 수치해석에서는 유한 길이의

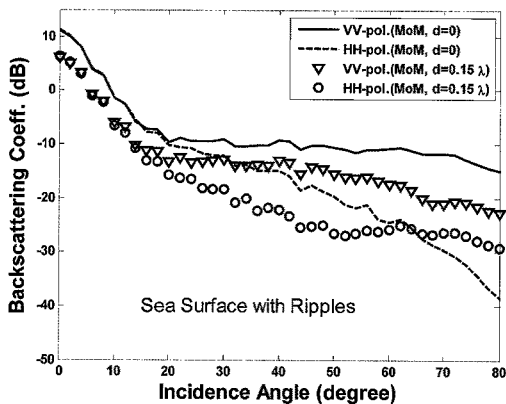
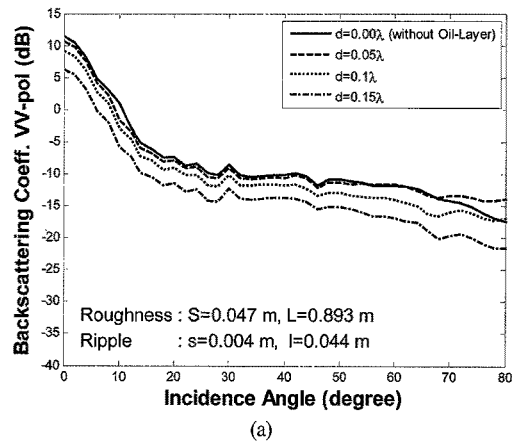


Fig. 4. Comparison of the backscattering coefficients between the composite surface with an oil layer and the surface without the oil layer.

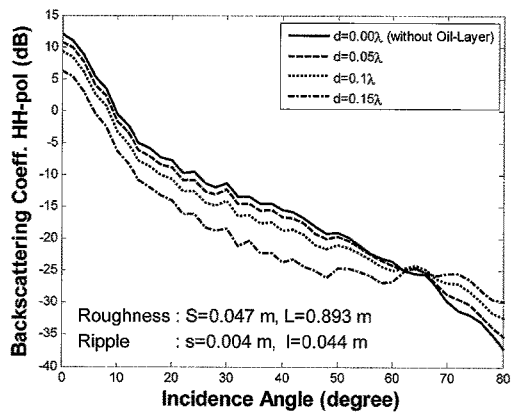
표면 조각에 대해서만 계산하므로 표면 끝 영향에 의한 오차가 발생한 것으로 보인다.

2) 측정 데이터와의 비교

2007년 12월 7일 태안 반도 부근 해상에서 허베이 스피릿호(HEBEI SPIRIT)의 오일 유출 사고가 발생했다. 이 사고로 총 12,547kl의 기름이 유출된 것으로 최종 집계 되었다. 유출 사고 발생으로부터 4일이 지난 12월 11일에 사고 지역인 태안 반도의 해안가를 촬영한 JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) ALOS (Advanced Land Observing Satellite) PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) FBS (Fine Beam Single) mode 영상을 획득 하였다. 픽셀 해상도 12.5m인 1.5레벨 영상이다. 1.5레벨 영상의 각 픽셀의 값과 후방산란계수와의 관계는 다



(a)



(b)

Fig. 5. Reduction of the backscattering coefficients by the oil layer for (a) VV- and (b) HH-polarizations.

음과 같다(Rosenqvist and Shimada, 2007).

$$\sigma = 10 \times \log_{10}[A^2] + CF \quad (5)$$

여기서 A 는 1.5레벨 영상의 각 픽셀의 값이고, CF 는 상수 값으로 -83.0dB 이고 이 상수의 표준편차는 0.64dB 이다.

SAR 영상으로부터 유출된 기름의 후방산란계수 값을 각각의 VV와 HH편파로 나누어 추출하였다. 바다 표면의 표면 RMS 높이와 상관깊이는 촬영 당시의 풍속으로부터 계산되었다. 사고 당시의 기름층의 정확한 두께에 대한 정보의 부재로 인하여 다양한 두께 층의 기름에 대한 수치해석 계산 결과와 SAR영상으로부터 추출된 측정 결과를 비교하였다. Fig. 6 (a)와 (b)는 수치해석 결과와 SAR영상에서 입사각에 따른 측정 데이터를 비교한 것이다. 기름층 두께가 $0.1 \lambda \sim 0.15 \lambda$ 일 때의

수치해석적 계산 결과가 PALSAR 영상 데이터와 비교적 일치하지만, 측정 결과가 대략적으로 -2 dB 에서 -10 dB 까지 넓게 분포해 있음을 볼 수 있다. 이 이유는 유출된 기름층의 두께가 일정하지 않고, 이 기름층에 의한 거칠기 감소도 일정하지 않기 때문으로 생각된다. 또한 이 수치해석의 결과에서는 낮은 기름층의 유전율에 의한 산란계수 감소만을 고려하였고, 기름층에 의한 거칠기 감소 효과가 반영 되지 못하였으며, 기름층에 의한 거칠기 감소 영향에 대한 이론적, 수치해석적 연구도 가까운 미래에 수행되어야 할 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 기름이 유출된 바다 표면에서의 전자파 산란을 모멘트 법과 몬테카를로 방법을 이용하여 계산하는 수치해석 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 기존의 이론적 모델을 이용하여 검증되었고, 이 알고리즘을 이용하여 유출된 기름에 의한 후방산란계수의 감소를 분석하였다. 기름층의 두께가 두꺼워 질수록 후방산란계수의 감소 정도는 증가하였다. 수치해석 결과는 ALOS PALSAR의 측정값과 비교하였고, 비교적 일치함을 확인하였다. 향후 기름에 의한 거칠기 감소 영향을 고려하면 측정값과 수치해석의 결과가 좀 더 잘 일치할 것으로 예상된다. 이는 SAR 영상에서 기름층을 발견하고 SAR 영상에서 기름층의 분류 하는데 도움이 될 것으로 기대 된다.

감사의 글

SAR 데이터를 제공해 준 일본 JAXA에 감사하고, 영상 분석에 도움을 준 홍익대학교의 이경엽에게 감사한다. 이 연구는 한국해양연구원 기본연구사업(PE98501, PM55210) 및 국토해양부 국가연구개발사업(PM55480, PM55210)의 일환으로 수행되었다.

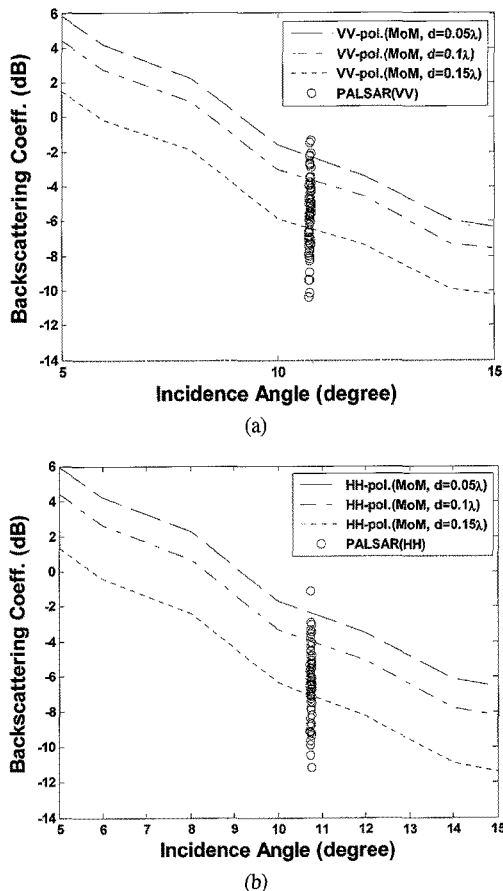


Fig. 6. Comparison with measurement data for oil spills on sea surface at (a) VV- and (b)HH-polarizations.

참고문헌

- M. Adamo, G. De Carolis, V. De Pasquale, G. Pasquariello, 2006. Oil Spill Surveillance and Tracking with Combined use of SAR and Modis Imagery: A Case Study, *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS) 2006, Digest*, pp. 1327 - 1330.
- C. M. Bentz, A. T. Politano, and N. F. F. Ebecken, 2007. Automatic Recognition of Coastal and Oceanic Environmental Events with Orbital Radars, *IGARSS 2007, Digest*, pp. 914 - 916.
- C. Brekke and A. H. S. Solberg, 2005. Oil spill detection by satellite remote sensing, *Remote Sensing of Environment*, 95: 1-13.
- C. Cox and W. Munk, 1954. Measurement of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of the Sun's Glitter, *J. Opt. Soc. Am*, 44: 838-850.
- H. Espedal, 1999. Detection of oil spill and natural film in the marine environment by spaceborne SAR, *IGARSS 1999, Digest*, pp. 1478-1480
- W. Morchin, *Radar Engineer's Sourcebook*, Artech House, 1993.
- Y. Oh, 1996a. An Exact Evaluation of Kirchhoff Approximation For Backscattering From a One-dimensional Rough Surface, *IEEE 1996 AP-S Digest.*, vol. 2, pp. 1522-1525.
- Y. Oh, 1996b. Numerical study for wave scattering from randomly rough dielectric surfaces, *1996 Microwave Symposium, Digest*, POSTECH, pp. 234-237.
- Y. Oh, 1998. Numerical simulation of radar backscattering from oil spills on sea surfaces, *IEEE Antennas and Propag.*, 1: 21-26.
- K. Sarabandi and E. S. Li, 1997. Microstrip Ring Resonator for Soil Moisture Measurements, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 35: 1223-1231.
- F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, 1986. *Microwave Remote Sensing Active and Passive*, Artech House.
- T. Wu and L. L. Tsai 1977. Electromagnetic fields induced inside arbitrary cylinders of biological tissues, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1: 61-65.
- A. Rosenqvist and M. Shimada, 2007. ALOS PALSAR: A pathfinder mission for global scale monitoring of the environment, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 45(11): 3307-3316.