

AIRSAR 다중편파 자료를 이용한 굴 양식장 산란현상 연구

이승국 · 홍상훈 · 원중선[†]

연세대학교 지구시스템과학과

Study of Scattering Mechanism in Oyster Farm by using AIRSAR Polarimetric Data

Seung-Kuk Lee, Sang-Hoon Hong, and Joong-Sun Won[†]

Department of Earth System Sciences, Yonsei University

Abstract : Strong radar returns were observed in oyster sea farms, and coherent interferometric pairs were successfully constructed. Tide height in coastal area is possible to be measured by using interferometric phase and intensity of SAR data. This SAR application technique for measuring the tide height in the near coastal zone can be further improved when applied to double bounce dominant areas. In this paper, we investigate the characteristics of polarimetric signature in the oyster farm structures. Laboratory experiments were carried out using Ku-band according to the target scale. Radar returns from vertical poles are stronger than those from horizontal pole by 10.5 dB. Single bounce components were as strong as double bounce components and more sensitive to antenna look direction. Double bounce components show quasi-linear relation with the height of vertical poles, which implies double bounce is more useful to determine water level than total power. A L-band NASA/JPL airborne SAR (AIRSAR) image was classified into single-, double-bounce, and volume scattering components. It is observed that oyster farms are not always characterized by double bounced scattering. Double bounce is a main scattering mechanism in oyster farms standing above seawater, while single bounce is stronger than double bounce when bottom tidal flats are exposed to air. Ratios of the normalized single to double bounce components in the former and latter cases were 0.46 and 5.62, respectively. It is necessary to use double bounce dominant sea farms for tide height measurement by DInSAR technique.

Key Words : Polarimetric SAR, tide height, AIRSAR, double bounce, oyster sea farms.

요약 : 연안의 굴 양식장은 레이더 영상에서 강한 산란체로 나타나며, 긴밀도 높은 레이더 간섭쌍을 제공한다. 굴 양식장에서 일어나는 강한 신호의 간섭위상과 반사강도를 이용하여 조위를 관측하는 방법이 개발된 바 있다. 레이더를 이용한 조위 측정방법은 이중 반사가 일어나는 굴 양식장에서 적용되어야 한다. 이 논문에서는 굴 양식장 구조물에서 일어나는 산란의 특징을 분석한다. 실내실험은 다중편파 Ku-밴드를 이용하여 전파암실에서 축소된 산란체를 제작하여 수행하였다. 산란체의 수직막대로부터 돌아오는 신호는 수평막대로부터 돌아오는 신호보다 10.5 dB정도 강하게 나타났다. 단일 반사 성분은 이중 반사 성분과 유사한 정도로 큰 값을 나타냈으나 안테나의 관측방향에 매우 민감하였다. 또한 수직막대의 높이가 증가함에 따라

이중 반사 성분이 비례하여 증가하였고, 이중 반사 성분이 조위관측에 더 유용하게 이용될 수 있음을 확인하였다. L-밴드 AIRSAR 영상을 단일 반사와 이중 반사, 체적산란으로 분류 하였다. 그 결과 굴 양식장에서는 항상 이중 반사만이 일어나고 있는 것은 아닌 것으로 나타났다. 해수면 위로 노출된 굴 양식장에서는 이중 반사가 우세하게 일어나지만, 조위가 낮아 바닥의 조간대 면이 공기 중에 노출되면 단일 반사 성분이 주요 산란 특징으로 나타났다. 전자의 경우 단일 반사와 이중 반사의 비율은 0.46인 반면, 바닥면이 노출된 경우에는 이 비율이 5.62로 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. DInSAR 기술을 이용한 조위 관측을 위해서는 이중 반사가 우세하게 일어나는 지역을 선정하여야한다.

1. 서론

한반도 연안 조간대를 따라서 많은 종류의 양식장들이 분포하고 있다. 특히 굴 양식장은 구조물이 갖는 특징적인 형태로 인해 SAR(Synthetic Aperture Radar) 시스템에서 잘 관측된다. 각각의 굴 양식장 구조물은 하나의 수평막대와 두 개의 수직막대로 이루어져 있으며, 바닥면에 고정된 수직막대가 수평막대를 지지하고 있는 직사각형 형태를 띠고 있다. 이 같은 굴 양식장은 1 m급의 고해상도의 자료를 제외한 대부분의 광학 시스템으로는 거의 관측 되지 않는다.

레이더 간섭효과는 해양이나 범람지역과 같이 표면이 지속적으로 변화하는 물에서는 적용이 불가능한 것으로 알려져 왔으나, Alsdorf 등(2000, 2001)은 SAR자료를 이용하여 아마존의 침수된 범람원 지역의 식생에 의한 이중 반사 신호를 이용하여 수면고도의 변화를 관측하였다. 해수의 변화를 관측하는 것은 아마존의 범람을 관측하는 것 보다 매우 어려우며, 최근 Kim 등(2005)은 간섭위상과 반사 강도를 이용하는 새로운 방법을 제안하여 우리나라 연안의 굴 양식장에서 해수의 조위를 5.67 cm의 r.m.s 오차 (검조소 관측결과와 상관관계 $R^2 = 0.91$)로 측정하였다. 이 연구에서 반사강도로 wrapping count를 결정하여 절대위상을 구하는 방법을 제안하였으며, 이를 통하여 표준화된 반사강도로 phase unwrapping의 문제를 해결하였다. Phase unwrapping문제를 해결하기 위해 반사강도를 결정하는 레이더 신호는 굴 양식장의 수직수평막대와 해수면 사이에서 일어나는 이중 반사로 가정하였다. 하지만 기존의 단일편파채널을 사용하는 JERS-1 같은 시스템으로는 굴 양식장에서 일어나는 산란현상을 해석하는데

한계가 있으며, SAR 시스템을 활용한 조위 측정방법에서 사용된 가정을 검증할 수 있는 방법이 없었다.

Polarimetric SAR는 최근에 관심을 모으는 SAR의 한 분야로, 다중편파 관측을 통하여 특정한 물체 및 지역의 산란특성을 알아내는데 유용하게 사용된다. 한 예로, 이 방법을 통해 산림지역과 벌목지에 대한 연구가 이루어졌으며 (van Zyl, 1989), Krogager와 Czyz (1995)는 산란행렬을 기본적인 3개의 성분(sphere, dihedral, helix)으로 분해하여 이를 통한 분류를 시도하였다. Cloude와 Pottier(1997)는 coherency 행렬의 eigenvector 성분을 활용, H/α 값을 기초로 산란과정을 9개의 그룹으로 나누었다. 앞선 연구가 수학적인 기초로 이루어진 반면, Freeman과 Durden(1998)은 물리적인 산란과정에 기반을 둔 3가지의 기초 모델로 물체의 특징을 분해하는 방법을 제시하였다. 이로부터 지표면에서 일어나는 산란, 이중 반사, 체적산란을 기본성분으로 물체를 분해하는 방법을 제시하였다.

이 연구에서 관심을 갖는 것은 굴 양식 구조물의 수평막대와 수직막대에서 일어나는 단일 반사와 이중 반사의 특징이다. 이는 이전의 Kim 등(2005) 연구에서 레이더 역산란 크기는 해수면의 높이에 선형의 반비례 관계를 갖는 것으로 가정하였기 때문이다. 즉, 해수면이 높아지면 수직막대에서 일어나는 이중 반사가 비례적으로 줄어든다고 생각할 수 있다. 그러나 이에 대하여 실험을 통하여 검증할 필요가 있다. 연구의 목적은 굴 양식장 형태를 갖는 구조물에서 다중편파 레이더의 역산란 특성을 규명하고, 유사 구조물에서 이중 반사(double bouncing)와 단일 반사(single bouncing)가 일어나는 조건을 밝히고자 한다. 연구결과를 이용하여 레이더 간섭기술을 이용한 조위관측 방법을 적용 시 최

적의 조건을 만족하는 지역을 선정하고자 한다. 이를 위해 Ku-밴드 다중편파를 이용하여 수행된 실내실험 결과로부터 굴 양식장 구조물의 수평과 수직막대에서 일어나는 산란현상의 특징을 분석하고자 한다. 또한 L-밴드 NASA/JPL airborne SAR (AIRSAR) 자료의 분석을 통해 굴 양식장 지역의 산란현상을 특징을 살펴본다. AIRSAR 자료는 지표면과 굴양식 구조물의 방향성에 따른 이중 반사와 단일 반사의 비율을 계산하였다. 또한 H/α 분석에 따른 구조물의 특징을 구분하고자 하였다.

2. 연구지역 및 자료

1) 연구지역

이 연구에 활용된 굴 양식장은 기존의 Kim 등(2005) 연구에서 DInSAR 방법을 적용하여 조위를 관측한 가덕도 일대에 분포한 구조물로 그림 1과 같다. 연구지역의 JERS-1 영상은 그림 2와 같으며, 주변의 조간대는 비교적 낮은 레이더 반사도를 보이는 조간대와는 뚜렷이 구별되는 밝은 산란체로 나타난다. 연구 지역의 중심에 놀차도가 있으며, 북쪽으로 녹산 국가 산업단지과 남쪽으로 가덕도가 있다. 놀차도와 가덕도 사이에 생긴 지형으로 천성만이 위치하고 있다. 가덕도의 동안, 남안,

서안은 수심이 매우 깊으나 북안인 녹산 국가 산업단지 사이에는 상대적으로 넓고 얇은 갯벌이 분포하고 있다 (고철환, 2001).

연구지역은 놀차도를 중심으로 넓게 분포하고 있는 굴 양식장이다. 굴 양식장의 각각의 구조물은 두개의 수직막대가 하나의 수평막대를 지지하고 있는 모양을 하고 있다. 수평막대는 해수면 위 1-2m 정도에 노출되어 있다. 반면 수직막대는 바닥면에 고정되어 있으며 조위에 따라 노출되는 높이가 변하게 된다. 모든 막대의 직경은 약 10cm이다. 이러한 구조물이 50에서 100개 정도가 평행하게 줄지어 늘어서 하나의 배열을 이루게 되고, 이러한 배열들이 모여 굴 양식장을 형성한다 (그림 1 참조). 안테나 관측방향에 대한 구조물의 상대적 방향성도 매우 중요하며, 이에 대해서는 결과에서 토의키로 한다.

2) 실내실험

굴 양식장에 일어나는 산란현상을 알아보기 위해 두 가지 종류의 다중편파 자료를 사용하였다. 첫째 전파암실 내 실내실험을 통해 수평과 수직막대가 산란에 미치는 영향을 평가하였고, 또한 굴 양식장을 포함하고 있는 AIRSAR L-밴드 다중편파 자료의 분류를 통하여 구조물에서의 산란 특징을 알아보았다.

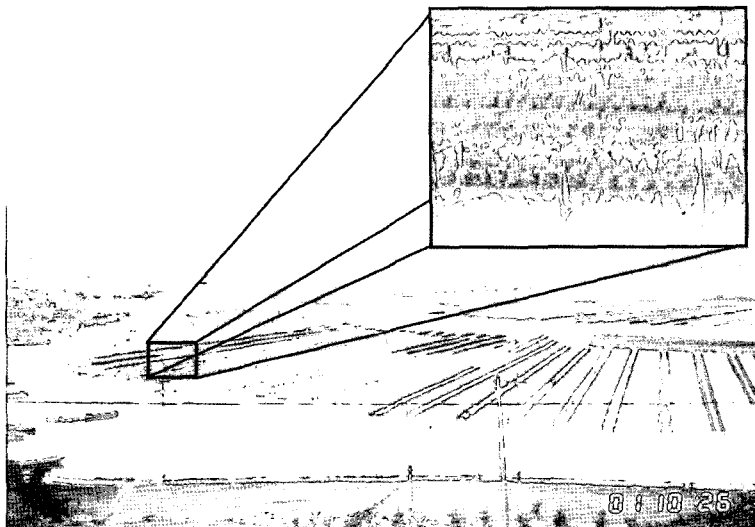


Fig. 1. Field photograph of oyster farm structures.

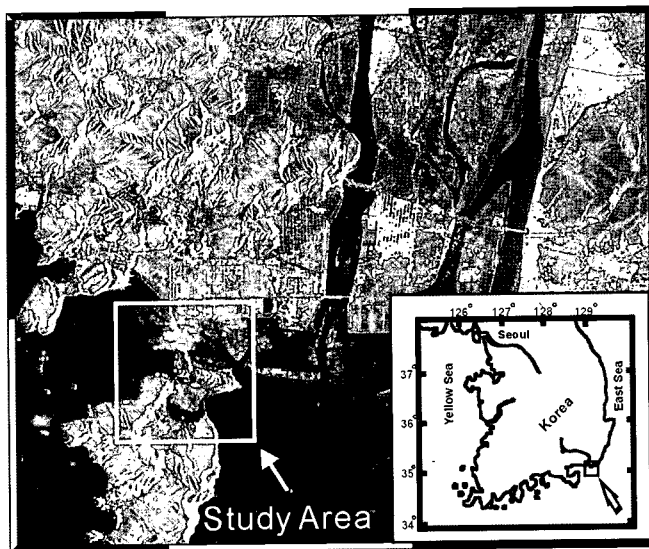


Fig. 2. Location map of the study area and a JERS-1 SAR amplitude image.

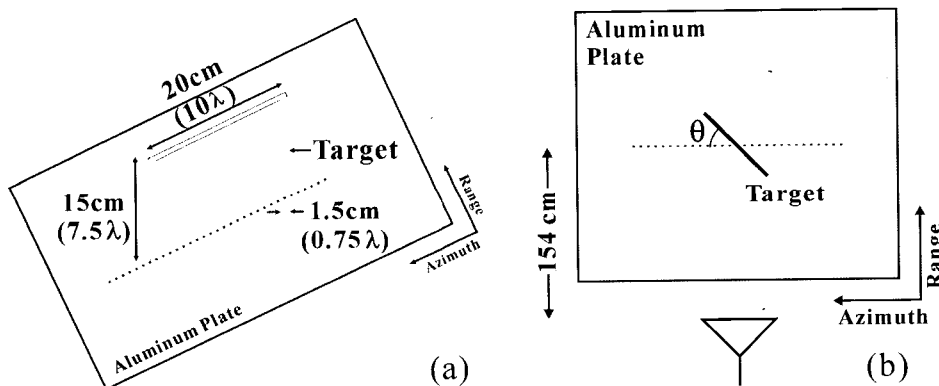


Fig. 3. (a) Target geometry and (b) target distance and rotation angle(θ).

이상적인 형태인 단일 수직막대와 수평막대 같은 산란체에 대한 산란행렬 등의 특징들은 이미 연구 되어졌다 (Boerner *et al.*, 1998). 그러나 굴 양식장 구조물과 같은 수평막대와 수직막대로 이루어진 구조물에 대한 산란현상에 대한 평가는 이루어지지 않았다. 수평막대와 수직막대가 산란에 미치는 영향을 평가하기 위해서 다중편파를 측정할 수 있는 Ku-밴드 안테나를 이용하여 실내 실험을 수행하였다.

굴 양식장 분석에 사용되는 L-밴드 파장과 실제 구조물의 크기를 고려하여 10분의 1로 축소된 산란체를 제작하였다 (그림 3(a)). 실험조건은 Table 1에 요약되어 있다. 해수를 대신하여 알루미늄 판을 사용하였고 젓

Table 1. Conditions of the experiment

Antenna type	Rectangular horn
Polarization	HH, HV, VV
Frequency points	201
Wavelength	2.0 cm
Center frequency	15.0 GHz
Sweep frequency	14.0 16.0 GHz
Scanning points	64
Scanning interval	1.0 cm
Antenna height	154.0 cm
Incidence angle	45.0 deg.

은 상태의 양식장 구조 막대를 나타내기 위해 알루미늄 테이프로 산란체를 감쌌다. 조위에 따른 노출된 수직막대의 변화가 산란에 미치는 영향을 알아보기 위해 수직막대의 높이를 변화시키면서 관측하였다. 또한, 안테나의 관측방향에 따른 산란현상의 변화를 알아보기 위해 산란체를 중심으로 수평막대를 회전시키면서 실험을 수행하였다. 그림 3(b)와 같이 수평막대와 안테나의 관측방향과 이루는 각을 회전각 θ 로 하였다. 회전각은 수평막대가 안테나의 관측방향과 수직인 경우를 0° (최대 역산란 방향)으로 정의하였다.

3) AIRSAR 자료

2000년 9월 30일 PACRIM-II 실험 당시 연구지역에서 획득된 L-밴드 NASA/JPL AIRSAR 영상을 사용하여 가덕도 일대의 굴 양식장 지역에 대한 분석을 실시하였다. 자료의 고유번호는 Kyungsang 24-2이고, 영상의 시작점의 경위도는 동경 128.8882° , 북위 34.8876° 이다. GMT시간으로 8시 10분 즉 현지시각 오후 5시 10분에 측정 되었으며, 관측 시 조위는 45cm로 낮은 조위를 나타내었으며 이는 가덕도 검조소에서 측정된 값이다.

AIRSAR 다중편광 자료는 NASA 자료양식으로 저장되어 있으며, 자료를 복원한 후에는 speckle 잡음 제거하면서도 다중편파 특성을 유지하기 위해 Lee *et al.*(1999)이 제안한 다중편파자료 필터링 방법을 적용하였다.

3. 실내실험 결과

실험에 앞서 세운 가정은 다음과 같다: i) 수평막대에서는 단일 반사가 우세하며 안테나의 관측방향에 매우 민감하다; ii) 수직막대는 이중 반사가 우세하고 노출되는 높이에 정비례하여 역산란이 증가하며 안테나 관측방향과는 무관하다; iii) 체적산란은 두 종류의 막대 모두에서 무시할 수 있다. 이와 같은 가정을 실내실험 및 AIRSAR 자료를 이용하여 검증하고자 하였다.

1) 기본 산란체

길이가 20cm인 수평막대와 높이가 15cm인 수직막대

로 이루어진 기본 산란체로 실험을 수행하였다. 산란체의 중심을 기준으로 안테나의 진행방향과 수평막대가 이루는 회전각을 0° , 45° , 90° 로 회전시키면서 측정하였다.

관측된 64×1024 개의 화소 중 산란체와 관련된 부분만을 사용하기 위해 산란체의 중심을 기준으로 30×30 개의 화소만을 선택하여 처리하였다. 각각의 화소에서 측정되는 산란행렬로부터 Mueller 행렬을 생성한 후에 평균화하여 산란체의 다중편파 시그네처(polarimetric signature)를 생성하였다 (Yamaguchi *et al.*, 2002). 산란체는 수평 wire와 수직 wire의 형태와 유사하나, 실제로 관측된 co-polarization의 결과를 보면 dihedral의 다중편파 시그네처와 유사하게 나타나고 있다. 그림 4는 회전각의 변화에 따라 측정된 다중편파 시그네처를 나타낸 것이다. 회전각도가 증가할수록 dihedral의 다중편파 시그네처와 더욱 유사하게 나타나고 있다. 즉, 알루미늄 판과 산란체 사이에서 일어나는 이중 반사가 dihedral에서 나타나는 산란현상과 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

산란체의 전체 파워를 3차원으로 그림 5(a)에 도시하였다. 두 개의 수직막대로부터 돌아오는 신호가 양쪽에 높게 나타나고 있으며, 그 앞에 수평막대로부터 돌아오는 신호가 나타나고 있다. 수직막대로부터 돌아오는 신호의 최대값은 양쪽 수직막대의 위치에서 -30.5 dB와 -30.8 dB로 나타났다. 수평막대의 경우는 -40.0 dB 정도의 신호가 수평막대를 따라서 분포하고 있었다. 수평막대로부터 돌아오는 신호의 최대값은 수직막대로부터 돌아오는 신호의 최대값보다 약 10.5 dB정도 작게 나타나고 있다 (Fig. 5(b)). 이로부터 수직막대로부터 돌아오는 신호가 일반적으로 수평막대로부터 오는 신호보다 강한 것을 알 수 있다. 따라서 굴 양식 구조물에서 수직막대의 역할이 더 중요한 것으로 해석할 수 있다.

산란체의 거리(range)와 이동(azimuth)방향을 축으로 안테나로부터 측정된 HH-, HV-, VV-편파를 3차원으로 그림 6에 표현하였다. 예상한 바와 같이 HV-편파보다 HH-와 VV-편파가 상대적으로 강하게 돌아오고 있음을 알 수 있다. HH-와 VV-편파는 산란체의 양쪽 끝에 위치한 수직막대의 위치에서 신호가 강하게 나타나고 있으며, 수평막대로부터 돌아오는 신호는 회전각도가 증가함에 따라 감소하고 있다.

<Cross-Polarimetric Signature>

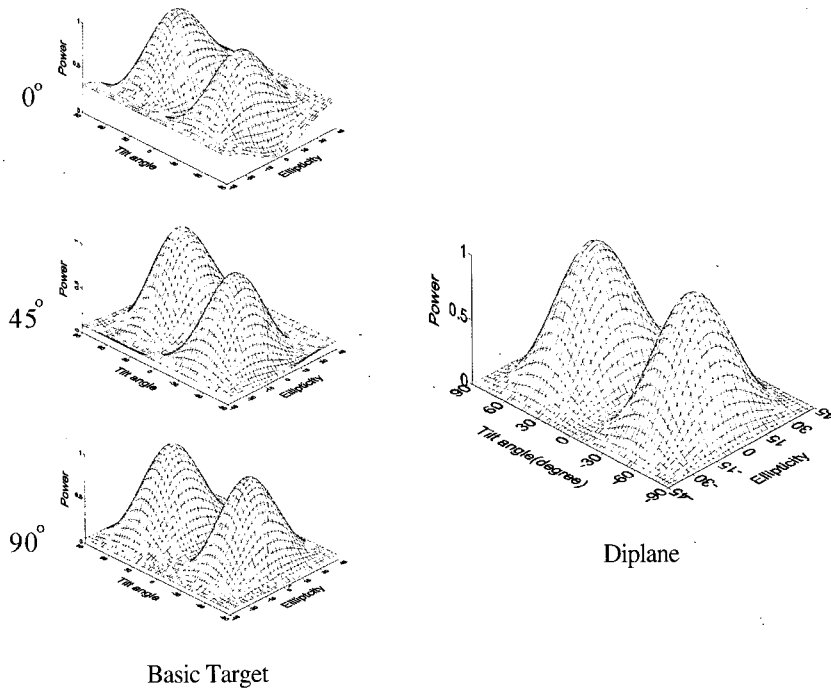


Fig. 4. Measured cross-polarimetric signature at different rotation angles and a typical polarimetric signature of dihedral.

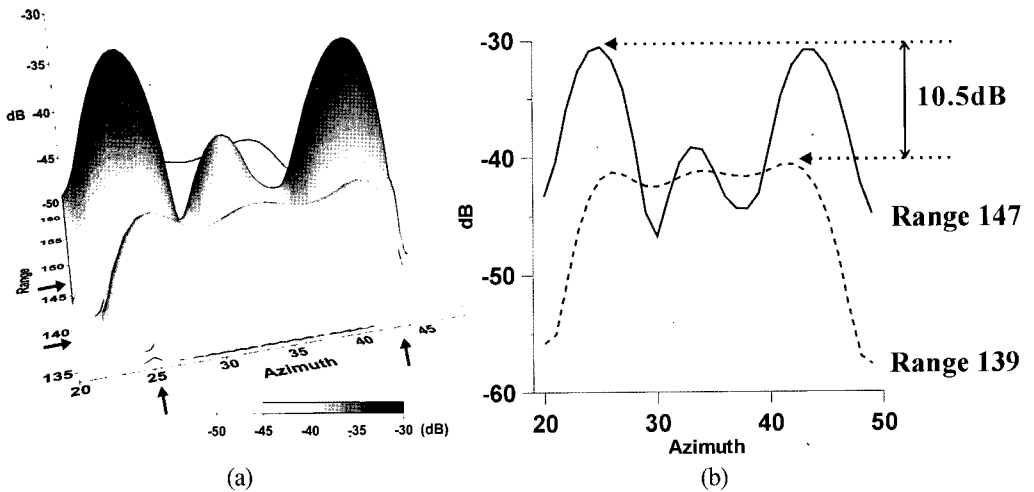


Fig. 5. (a) 3-D surface map of basic target and (b) profiles at the range 139, 147.

전체파워를 단일 반사(single bounce), 이중 반사(double bounce), 체적산란(volume scattering) 성분으로 분해하였다 (Freeman and Durden, 1998). 전체적으로 이중 반사가 크게 나타나고 있지만, 단일 반사

성분도 산란에 많은 부분을 차지하고 있다(그림 7). 특히 산란체의 회전각도가 0도일 때는 이중 반사보다 단일 반사가 더 중요한 역산란 메커니즘으로 나타났다. 각각의 성분사이의 관계를 알아보기 위해 세 가지 성분비

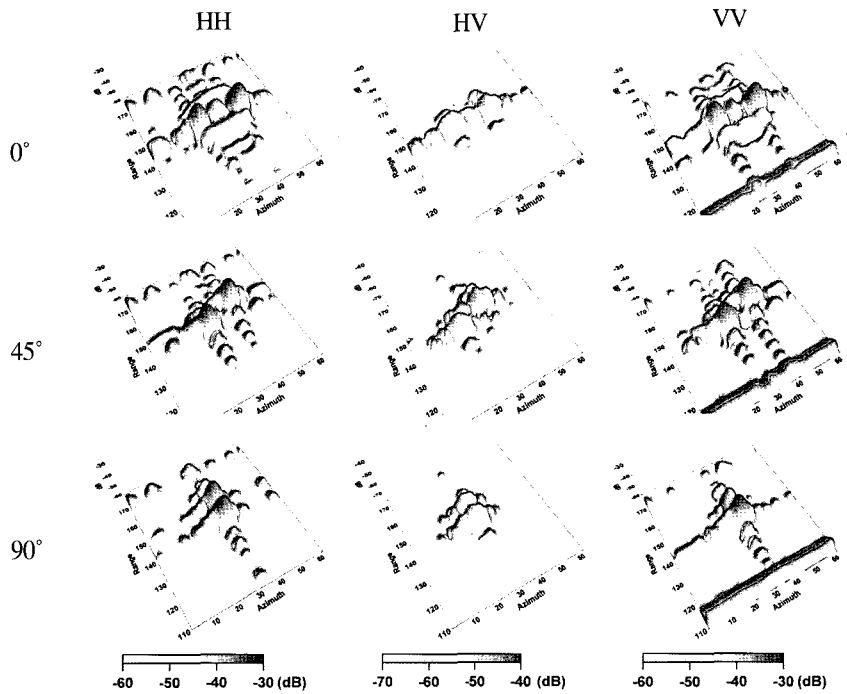


Fig. 6. HH-, HV-, and VV-polarization of target at three target rotation angles.

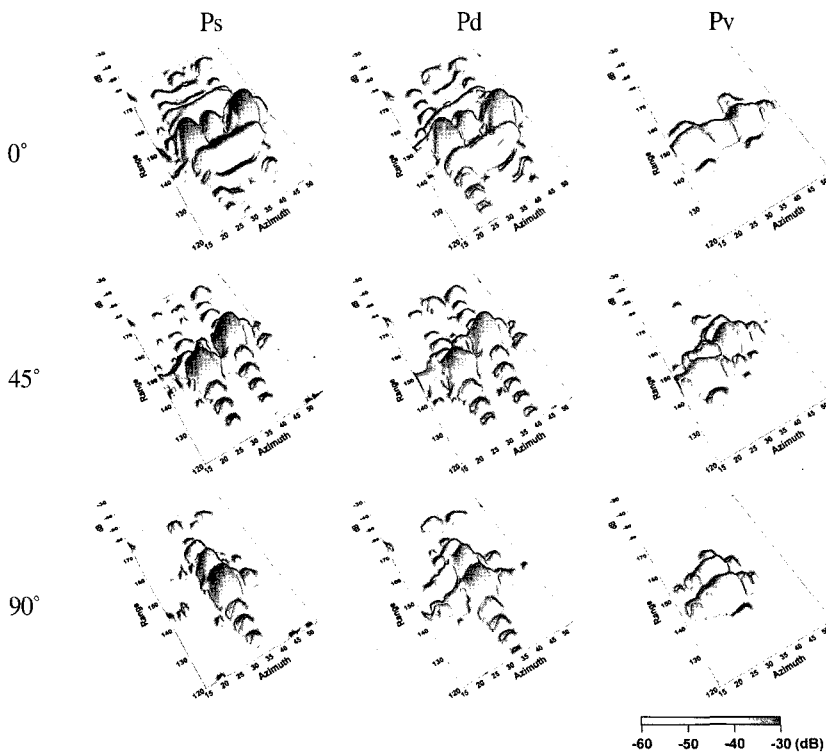


Fig. 7. Single bounce (P_s), double bounce (P_d), volume scattering (P_v) of target in three target rotation angles.

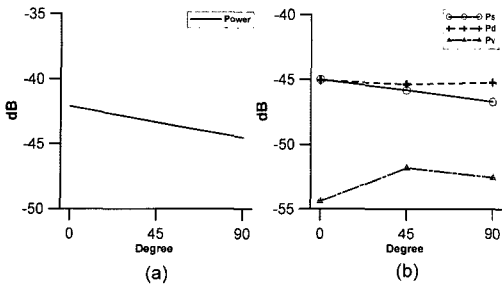


Fig. 8. Variation of backscattering according to target rotation angles.

와 회전각도에 따른 전체 파워의 변화를 그림 8에 도시하였다. 이중 반사 성분은 회전각도와 관계없이 거의 변화를 나타내지 않으나, 전체 파워와 단일 반사 성분은 회전각도에 따라 감소되고 있다. 이는 회전각도에 민감한 수평막대로부터 돌아오는 단일 반사의 성분이 감소하여 나타난 것으로 수평막대는 이중 반사보다 단일 반사 성분에 더 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

결과를 요약하면 수평막대에서는 처음 가정한 바와 같이 단일 반사가 우세하며 회전각에 매우 민감한 것으로 나타났다. 따라서 안테나의 관측방향에 따라 수평막대에서 돌아오는 신호는 그 변화가 매우 클 것으로 예상할 수 있다. 그러나 처음 가정과 다른 점은 수평막대에서도 이중 반사가 우세하였으며 또한 수직막대에서는 이중 반사뿐만 아니라 단일 반사도 매우 중요한 역산란 메커니즘으로 작용하고 있다는 점이다. 따라서 수직막대에서도 단일 반사의 성분을 완전히 무시하기는 어려우며 결국 정확한 해수면의 높이를 측정하기 위해서는 궁극적으로 이중 반사 성분만을 분리하여 계산하는 다중편파 레이더간섭기술 (polarimetric interferometry) 방법이 요구될 것으로 사료된다.

2) 수직막대의 높이 변화 실험

굴 양식장 구조물의 수평막대는 만조 시에도 해수면 위에 노출되어있다. 하지만 수평막대를 지지하고 있는 두 개의 수직막대의 경우는 조위에 따라 해수면에 노출되는 길이가 변화하게 된다. 수직막대의 노출길이 변화에 따른 산란현상을 알아보기 위해 수직막대의 길이를 10, 15, 20cm로 변화를 주며 측정하였다. 전체 파워와 세 가지 산란성분의 변화를 수직높이에 따라 그림 9에

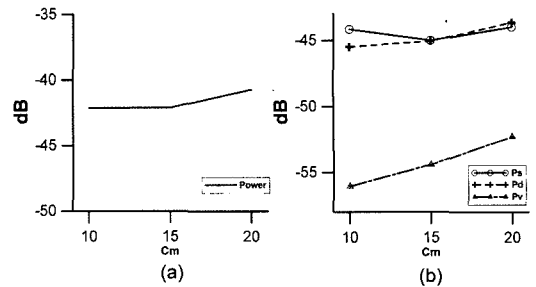


Fig. 9. Variation of backscattering as height of vertical poles.

서 그래프로 나타냈다. 그림 9에서 단일 반사 성분은 높이의 변화에 따라 항상 정비례 하지는 않는다는 것을 알 수 있다. 이와는 반대로 이중 반사 성분은 수직막대의 높이가 증가에 거의 선형의 비례관계를 갖고 증가하고 있음을 알 수 있다. 체적산란 역시 선형의 비례관계를 갖으나, 매우 약한 신호를 보여준다. 단일 반사와 이중 반사의 증가율은 각각 $\theta_{Ps} = 0.9^\circ$, $\theta_{Pd} = 10.4^\circ$ 로 계산되었으며, 전체파워의 증가율은 $\theta_{Power} = 8.0^\circ$ 로 이중 반사에 더 유사하게 나타나고 있다. 결과적으로 수직막대에서 일어나는 이중 반사의 증가가 전체파워를 증가시키고 있음을 알 수 있다.

이 실험결과에서는 수직막대의 높이변화에 측정 횟수가 충분하지 못하며, 일부는 측정오차가 있는 것으로 판단된다. 이에 따라 완전한 결론을 도출하기는 어려우나, 일반적으로 이중 반사의 역산란 강도는 수직막대의 높이에 비례한다는 가정이 합당하다는 것을 보여주고 있다. 이는 궁극적으로 이중 반사 우세지역만을 선정하여 해수면의 변화를 관측하고자 하는 방법의 타당성을 뒷받침한다.

3) 흡수체 위에서의 실험

실험에 사용한 산란체에서는 수직막대에서 돌아오는 신호의 세기가 수평막대로부터 돌아오는 신호에 비해 크게 나타나는 것을 확인하였다. 이는 해수면이 표면을 덮고 있는 상태를 가정하여 알루미늄 판을 사용하였다. 그 결과 수직막대와 알루미늄 판 사이에서 일어나는 이중 반사 때문에 수직막대의 신호가 크게 나타났다. 하지만 굴 양식장이 분포하는 일부 조건대에서는 간조 시 바닥면이 대기 중에 노출되는 경우가 있다. 이러한 상태는 알

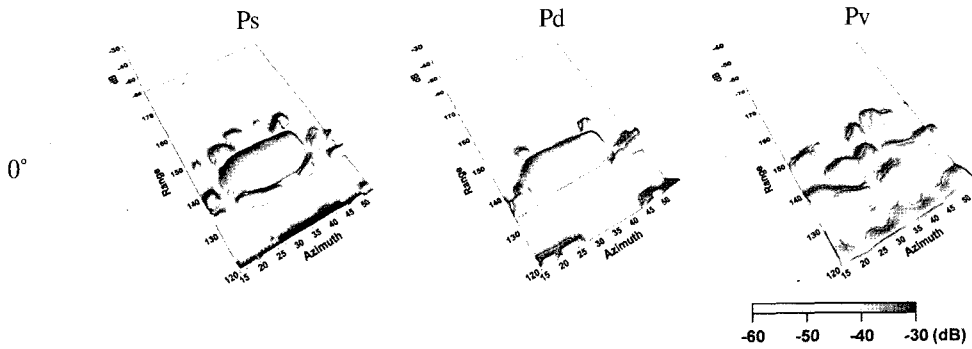


Fig. 10. P_s , P_d , P_v of target on black absorber.

루미늄 판으로 충족시킬 수 없으므로, 알루미늄 판을 흡수체인 검은색 스펀지로 교체하여 실험을 수행하였다.

그림 10은 바닥면이 흡수체인 경우에 측정된 결과이다. 바닥면을 흡수체로 변화시킨 경우에는 알루미늄 판을 사용한 경우(그림 7 참조)에 비하여 전체적인 신호의 세기가 크게 줄어들었다. 특히 기본 산란체에서 최대값을 나타내던 수직막대에 해당하는 신호가 흡수체인 경우에는 나타나지 않는다. 즉, 이는 바닥면과 수직막대 사이에서 일어나던 이중 반사가 더 이상 일어나지 않음을 의미한다. 그림 11은 바닥면이 알루미늄을 사용한 경

우와 흡수체를 사용한 경우에 얻어진 기본 산란체의 다중편파 시그네처이다. 이 결과를 보면 더 이상 다중편파 시그네처는 바닥면이 알루미늄인 경우에는 dihedral의 특성을 보이나(그림 4 참조) 바닥면이 흡수체인 경우에는 더 이상 dihedral의 특징이 나타나지 않는다. 굴 양식장 구조물의 산란현상을 평가 시, 바닥면의 상태 또한 매우 중요한 요소 중에 하나임을 알 수 있다. 따라서 해수면이 낮아져 바닥면이 노출되는 경우에는 수직막대의 역할이 상대적으로 급격히 감소하여 수평막대가 주요 역산란체로서 작용을 하며, 전체적인 역산란 신호는 크게 줄어든다.

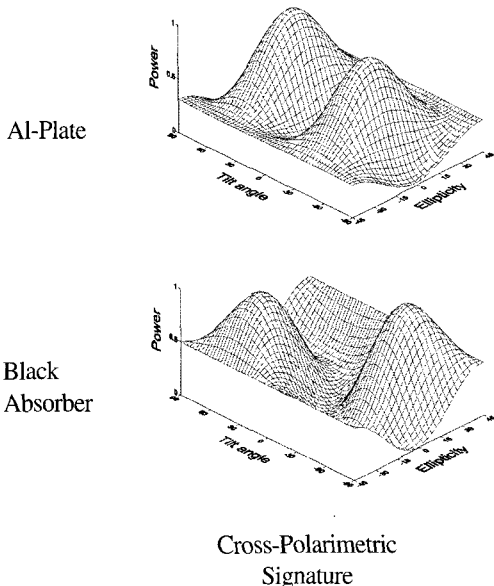


Fig. 11. Cross-polarimetric signature of target on black absorber.

4. AIRSAR 자료 분석결과

1) L-밴드 다중편파 분석

JERS-1, RADARSAT-1 등의 인공위성 SAR 시스템에서와 같이 AIRSAR 영상에서도 굴 양식장은 매우 잘 관측된다. AIRSAR 자료의 decomposition을 통해 산란행렬을 구한 후 HH(적), HV(녹), VV(청)편파를 이용하여 칼라영상을 그림 12(b)와 같이 만들었다. 고해상도 광학영상인 IKONOS 영상(그림 12(a))과 AIRSAR 영상을 비교하여 보면 굴 양식장 구조물이 고해상도 광학보다 SAR에 의해 훨씬 효과적으로 관측되고 있음을 쉽게 알 수 있다. 놀차도와 가덕도 일대에 식생이 발달한 지역에서는 체적산란에 의한 HV-편파가 우세하게 나타나고 있으며 이는 수목에 의해 나타나는 특징적인 현상

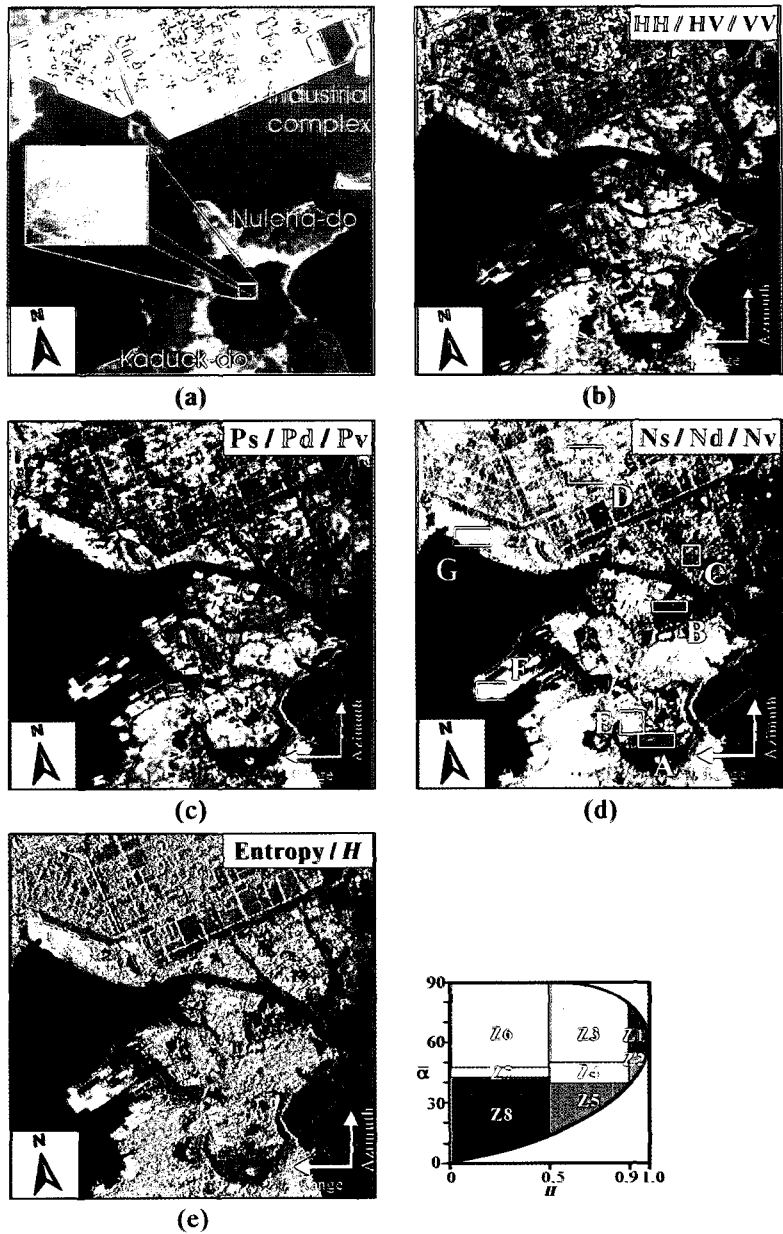


Fig. 12. (a) IKONOS image, (b) HH-, HV-, VV-polarization, (c) P_s , P_d , P_v , (d) N_s , N_d , N_v , and (e) Entropy H and α .

이다. 녹산 산업단지에서는 VV-와 HH-편파가 우세하게 나타나고 있으며, 이는 일반적인 도심지에서 잘 나타나는 현상이다. 관심 대상인 굴 양식장에서는 일반적으로 HH-편파가 VV-편파보다 강하게 나타나고 있다. 이는 굴 양식장과 유사한 구조물을 관측하는데는 L-밴드 HH-편파가 가장 효과적임을 보여주고 있다. 그러나 해

수면 위에 굴 양식장 구조물이 있는 지역에서는 VV-편파가 매우 강하게 나타나기도 한다. 이는 해수에서 먼저 일차 반사된 마이크로파가 수직막대에 의해 2차 산란이 발생하면서 나타나는 현상으로 해석된다. 구조물에서 HV-편파는 HH- 혹은 VV-편파에 비하여 매우 미약하며, 이는 실내실험 결과와도 잘 일치한다.

연구지역의 산란현상을 알아보기 위해 3-성분 산란 모델(Freeman and Durden, 1998)을 적용 시켰다. 이 방법에 의하여 연구 지역을 단일 반사(P_s)과 이중 반사(P_d), 그리고 체적산란(P_v) 성분으로 분류한 결과는 그림 12(c)에 나타나 있다. 우선 주변지역인 녹산 산업단지 내에 건물이 없는 나대지는 단일 반사의 특징을 나타내는 파란색을 띠고 있으며, 도로는 도로 주변의 가로수와 펜스의 영향으로 인해 이중 반사의 특징을 나타내는 붉은색으로 표현된다. 가덕도와 눌차도의 식생이 발달한 지역에서는 체적산란이 우세하게 일어나고 있다. 연대 대상물인 굴 양식장 지역을 살펴보면 연구지역의 서쪽지역과 동쪽지역에서 산란 현상의 특징이 다르게 나타나고 있다. 서쪽지역은 낙동강 갯벌이 끝나는 지역(고철환, 2001)으로 낮은 조위에서도 해수면과 굴 양식장 구조물에서 일어나는 우세한 이중 반사로 적색으로 나타나고 있다. 그러나 동쪽지역의 굴 양식장에서는 조건대 바닥면이 외부에 노출되면서 이중 반사보다 조건대의 바닥면과 굴 양식장 구조물에 직접 맞고 들어오는 단일 반사가 우세하여 청색으로 표현되고 있다.

각 화소별로 우세한 산란현상을 알아보기 위해 전체 파워에 대한 각 성분의 비율 계산으로 0~1의 값을 갖도록 정규화를 하였으며, 그 결과는 그림 12(d)와 같다. 여기서 N_s , N_d , N_v 는 각각 단일 반사, 이중 반사 및 체적산란의 정규화된 비율을 의미하며 계산과정은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} N_s &= \frac{P_s}{P_s + P_d + P_v} \\ N_d &= \frac{P_d}{P_s + P_d + P_v} \\ N_v &= \frac{P_v}{P_s + P_d + P_v} \end{aligned} \quad (1)$$

그림 12(d)에서 알 수 있듯이 굴 양식장에서는 이중 반사 외에도 단일 반사가 우세하게 나타나고 있는 지역이 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 특히 가덕도와 눌차도 사이의 만 안쪽의 굴 양식장에서도 이중 반사가 우세한 지역과 단일 반사가 우세한 지역이 혼재되어 나타나고 있다.

이와 같은 결과는 실내실험에서 바닥면을 알루미늄

판으로 한 경우와 흡수체로 한 경우와 잘 일치하고 있다. 즉 바닥면이 해수로 덮인 경우에는 알루미늄판의 경우와 같이 수직막대에서의 이중 반사가 중요한 역산란 메커니즘인 반면 조건대면이 노출된 상태에서는 흡수체인 경우와 유사하게 단일 반사가 특징적으로 나타난다. 또, 한 가지 주목할 점은 그림 12(d)에서 지역 "A"로 표시된 부분이다. 이 지역은 바닥면이 해수로 덮인 상태임에도 불구하고 단일 반사가 우세하다. 이 지역은 수평막대가 안테나의 관측방향에 수직(즉 수평막대의 방향이 비행방향에 평행)인 방향으로 배열된 곳이다. 이 경우 수평막대에서의 단일 반사가 크게 증가하는 것으로 해석된다. 따라서 실제의 경우 안테나 관측방향에 대한 수평막대의 상대적인 방향성이 매우 중요함을 알 수 있다.

2) α -H 분석

연구지역의 Cloude와 Pottier (1997)가 제안한 엔트로피(H)와 다중편파 eigenvector 파라메타 α 분석방법을 이용하여 8개의 지역으로 분류를 하였다. 그림 12(e)의 색은 오른쪽에 있는 특징적인 8개 zone의 색을 나타내며, 적색이 우세한 경우는 큰 α 값을 갖는 경우이며 청색은 반대로 작은 α 값을 갖는 zone에 속한다. 분석 결과 굴 양식장이 해수면 위에 있는 경우(그림 12(d)에서 적색이 우세한 양식장) 높은 α 값과 낮은 엔트로피부터 중간 정도의 엔트로피 값을 나타내는 zone 3과 zone 6에 속하는 것으로 나타났다. 반면 굴 양식장의 바닥면이 퇴적물이 드러난 경우에는 작은 엔트로피와 작은 값을 나타내는 zone 8에 속하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 zone 1, 3, 6은 다중산란이 우세한 경우를 나타낸다. 따라서 앞서 분석된 (N_s , N_d , N_v)에 의한 분석결과와도 잘 일치하고 있다. 반면 zone 8은 낮은 엔트로피의 표면산란이 우세한 경우를 나타내며, 이는 노출된 조건대 바닥면으로 인하여 다중산란이 감소된 경우임을 알 수 있다.

세부적인 산란현상을 알아보기 위해 7개의 지역(그림 12(d)에 회색의 사각형으로 표시)을 선택하여 단일 반사, 이중 반사, 체적산란을 비교하였다. E, F, G 지역은 전형적인 굴 양식장 지역으로 굴 양식장의 수직막대의 일부가 해수에 잠겨있는 상태이다. D지역은 녹산 산업단지 내의 지역이고, B, C 지역은 측정 당시 낮은 조위로 인해 일시적으로 굴 양식장의 바닥면이 노출된 상태

이다. A지역은 해수면 위에 굴 양식장이 있으나 구조물의 수평막대가 비행방향과 평행하게 있는 구조물들의 배열이 밀집되어 있는 지역이다. 선택된 지역에 대한 크기 및 산란현상에 관련된 값들을 Table 2에 정리하였으며 또한 그림 13에 도시하였다. E, F, G 지역은 전형적인 굴 양식장으로 수직막대와 해수면 사이에서 일어나는 이중 반사가 우세하게 나타나고 있어 P_d , N_d 의 값이 다른 값들에 비해 크게 나타나고 있다. 반면, B, C지역에서는 관측 당시 낮은 조위로 인해 바닥면이 공기 중에 노출되면서 수직막대와 바닥면과의 사이에서 일어나는 이중 반

사는 현저하게 줄어들고 구조물과 조간대의 바닥면을 직접 맞고 돌아오는 일회 반사가 주요한 산란현상이 되어 P_s , N_s 가 가장 크게 나타나고 있다. A지역은 만 안쪽에 분포하는 지역으로 해수면 위에 굴 양식장이 분포하고 있으나 수평막대가 안테나의 진행방향과 평행하게 분포하고 있는 굴 양식장 배열이 분포하는 지역으로 수평막대로부터 직접 돌아오는 신호의 증가로 인하여 단일 반사가 이중 반사보다 강하게 나타나고 있다(그림 13 참조). 전형적인 굴 양식장에서는 이중 반사가 주요 산란현상이지만 단일 반사가 우세하게 일어나고 있는 지역이

Table 2. Averaged L-band backscattering values for 7 sub-areas.

Sub-area ¹⁾	Size	Incidence angle (deg.)	S_{HH} (dB)	S_{HV} (dB)	S_{VV} (dB)	P_s (dB)	P_d (dB)	P_v (dB)	N_s (dB)	N_d (dB)	N_v (dB)
A	100×40	37.5	-8.4	-26.6	-12.3	-8.5	-13.0	-17.6	0.68	0.24	0.08
B	95×30	36.5	-9.3	-25.5	-25.5	-9.3	-16.6	-16.4	0.73	0.13	0.14
C	50×55	35.1	-6.7	-25.0	-25.0	-6.9	-11.4	-16.0	0.68	0.24	0.08
D	100×100	41.9	-10.0	-15.8	-15.8	-14.7	-12.7	-7.9	0.13	0.21	0.65
E	65×65	39.0	-10.6	-27.2	-27.2	-14.8	-11.5	-18.2	0.28	0.60	0.13
F	80×50	47.0	-10.7	-27.0	-27.0	-17.6	-10.6	-17.9	0.14	0.72	0.13
G	100×50	47.9	-10.9	-24.5	-24.5	-18.6	-11.3	-15.5	0.12	0.64	0.24

¹⁾Sub-areas are denoted by rectangles in Fig. 12(d).

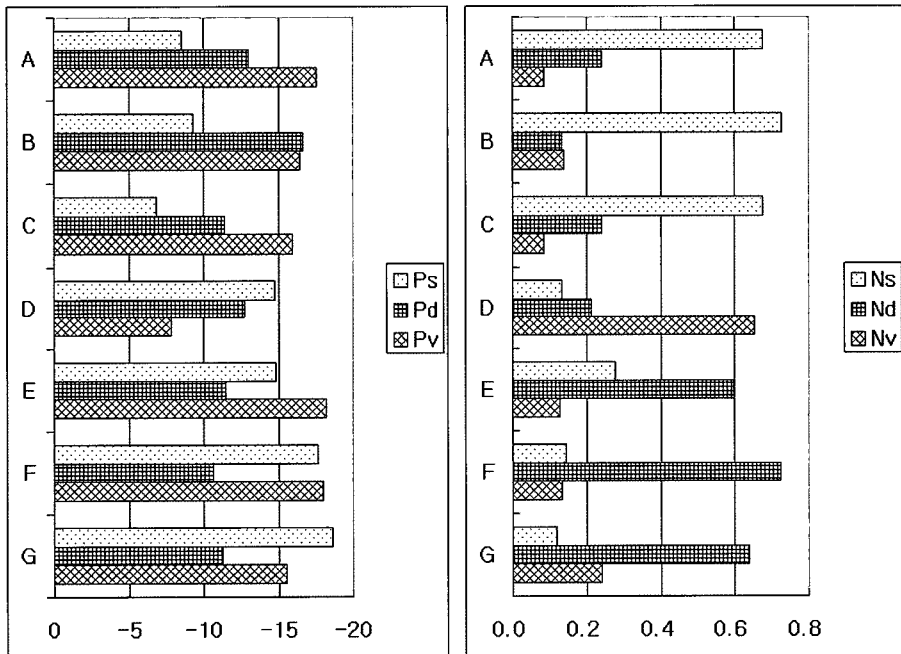


Fig. 13. The ratio of single bounce and double bounce, volume scattering.

있음을 확인하였다. 이는 관측 당시의 조위와 수평막대의 방향성과 관계가 있으며 낮은 조위에서도 바닥면이 노출되지 않는 E, F, G지역과 같은 지역에서는 이중 반사가 주요 산란 특징이라는 사실을 확인하였다.

5. 결론 및 토의

이 연구는 조간대 지역에 분포하는 굴 양식장 구조물에서 일어나는 산란현상을 평가하였다. 굴 양식장은 레이다 위성에서 잘 관측되고 있었으나 산란현상의 정확한 해석이 이루어지지 못해 제한적인 분석만이 가능하였다. 이러한 지역에 대한 산란현상의 정확한 이해는 다중편파 분석을 통해서만 가능하다. 연구지역의 다중편파 SAR 영상이 한정적이고, 굴 양식장 구조물이 전형적인 dihedral, sphere, wire의 형태가 아니므로, 단순화시킨 산란체를 제작하여 전파암실 내에서 실내 실험을 병행하여 굴 양식 구조물에서 일어나는 산란현상을 해석하였다.

굴 양식 구조물에서는 해수가 존재하는 경우에는 수평막대보다 수직막대가 주요 산란체 라는 것을 확인하였다. 기본 산란체인 경우 수직막대로부터 돌아오는 신호의 최대값은 양쪽 수직막대의 위치에서 -30.5 dB와 -30.8 dB로 나타났다. 수평막대의 경우는 -40.0 dB 정도의 신호가 수평막대를 따라서 분포하고 있었다. 수평막대와 수직막대의 최대값의 차이가 10.5 dB정도였다.

산란체의 수평막대에서는 단일 반사가 우세하게 일어나고 있다. 그러나 수평막대가 비행방향과 평행하지 않는 경우 단일 반사의 양이 급격히 줄어들어 전체파워에서 단일 반사가 차지하는 비율을 감소 시켰다. 반면, 수직막대에서는 이중 반사가 주로 일어나고 있으며 다만 단일 반사도 무시할 수 없다. 수직막대의 높이 변화 실험에서 높이가 증가하면 할수록 이중 반사의 증가율이 $\theta_{Pd} = 10.4^\circ$ 로 단일 반사의 증가율 $\theta_{Pd} = 0.9^\circ$ 보다 크게 나타나며 이는 이중 반사 성분만을 구분하여 해수의 높이에 대한 정보를 추출하는 것이 타당함을 입증한다. 전체파워의 증가율은 $\theta_{power} = 8.0^\circ$ 를 나타내어 이중 반사와 유사하게 나타났다. 따라서 기존에 전체파워를 이용하여 DInSAR 계산 시 wrapping count 산정에 사용한 방법

은 완전하지는 못하나 타당성이 있었음을 알 수 있다.

바닥면의 매질 종류 또한 산란현상에 영향을 준다. 바닥면이 흡수체인 경우 다중편파 시그니처는 dihedral의 특성을 잃게 된다. 바닥을 흡수체로 변화를 준 실험 결과 수평막대가 수직막대보다 산란에 더 큰 역할을 하며, 단일 반사가 전체파워에서 차지하고 있는 비율이 이중 반사가 차지하고 있는 비율보다 큰 것으로 나타났다.

굴 양식장 지역을 포함하고 있는 AIRSAR 영상을 분석한 결과 굴 양식장에서 일어나는 산란현상을 살펴보면 크게 세 가지로 구분 할 수 있다. 첫 번째는 굴 양식장 하부를 해수면이 덮고 있어 수직막대 일부가 물속에 잠긴 상태인 경우이다. 이 같은 지역은 이중 반사를 의미하는 P_d , N_d 값이 크게 나타나며, 낮은 α 값과 중간 내지 작은 엔트로피 값을 갖는다. 해수면과 굴 양식장 구조물의 수직막대에서 일어나는 이중 반사가 주요 역산란 메커니즘으로 전형적인 굴 양식장에 해당된다. 해수면의 높이를 측정하기 위해서는 가장 이상적인 상태이며, 이와 같은 특징을 갖는 지역을 DInSAR 방법에 의한 해수면 높이 측정에 이용해야 한다. 두 번째 경우는, 관측 당시 낮은 조위 상태로 인해 조간대의 바닥면이 공기 중에 노출된 지역에서 일어나는 산란이다. 이 같은 지역은 단일 반사를 의미하는 P_s , N_s 값이 다른 값들에 비해 크게 나타나고 있으며, 낮은 엔트로피와 낮은 α 값을 보인다. 이는 굴 양식장 구조물과 조간대의 바닥면에서 직접 되돌아오는 단일 반사가 주요 역산란 메커니즘이다. 이 경우에는 해수면의 높이를 구하는데 사용하기 어렵다. 셋째는 천성만 안쪽의 지역으로 첫 번째 경우와 같이 해수면 위에 굴 양식장이 발달된 경우이나, 수직막대가 비행방향에 평행하게 놓인 구조물이 밀집해 있는 지역으로 수평막대로부터 돌아오는 단일 반사 성분이 증가 하여 P_s , N_s 값이 크게 증가한 지역이다. 이 경우에는 비록 해수면이 수직막대 하부에 존재하지만 해수면의 높이와는 상관없는 수평막대에서의 강한 단일 반사로 인하여 해수면의 높이를 측정하는데는 적합하지 않다.

레이더 시스템을 이용한 조위를 측정 시, 낮은 조위에서도 해수면 위에 발달된 굴 양식장 지역을 선정하여 야만 한다. 또한 수평막대의 영향이 크게 나타나는 지역은 제외하고 이중 반사가 우세한 굴 양식장을 선정하여 조위관측에 활용해야한다.

사 사

이 연구는 연세대학교 2004년도 교내연구비 지원에 의해 수행되었음.

참고문헌

- 고철환, 2001. 한국의 갯벌, 서울대학교 출판부.
- Alsdorf, D. E., J. M. Melack, T. Dunne, L. A. K. Mertes, L. L. Hess, and L. C. Smith, 2000. Interferometric radar measurements of water level changes on the Amazon flood plain, *Nature*, 404: 174-177.
- Alsdorf, D. E., L. C. Smith, and M. Melack, 2001. Amazon floodplain water level changes measured with interferometric SIR-C radar, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39: 423-431.
- Boerner W. M., H. Mott, E. Luneburg, C. Livingstone C, B. Brisco, R. J. Brown, and J. S. Paterson, 1998. *Principles and Application of Imaging Radar*, John Wiley and Sons, Inc., Vol. 2: 272-303.
- Cloude S. R. and E. Pottier, 1997. An Entropy based classification scheme for land application of polarimetric SAR, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35: 68-78.
- Freeman A. and S. L. Durden., 1998. A three-component scattering model for polarimetric SAR data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3): 963-973.
- Kim, S.-W., S.-H. Hong, and J.-S. Won, 2005. An application of L-band synthetic aperture radar to tide height measurement, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(7): 1472-1478.
- Krogager. E. and Z. H. Czyz, 1995. Properties of the sphere, diplane, helix decomposition, *Proc. of 3rd International Workshop on Radar Polarimetry*, Nantes, France, March 21-23 Vol. 1: 106-114
- Lee J. S., R. W. Jansen, M. R. Grunes, and G. De. Grandi, 1999. Polarimetric SAR Speckle filtering and its implication for classification, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37: 2363-2373.
- Van Zyl J. J., 1989. Unsupervised classification of scattering behavior using radar polarimetry data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27: 36-45.
- Yamaguchi Y., 2002. *Fundamentals of Poarimetric Radar and its Application* (Japanese ed.), Realize, Inc., 83-147.