Article

북극 스발바드 콩스피오르텐 해역에서 L 밴드 PALSAR 데이터를
이용한 눈과 부빙에 의한 다중편파 산란특성 해석

정정수¹ · 양찬수^{2*} · Kazuo Ouchi³ · Kuzaki Nakamura⁴

¹한국항공대학교 공과대학 항공전자공학과
(412-791) 경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1
²한국해양연구원 해양위성센터
(425-600) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

³National Defense Academy
1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka, Kanagawa, 239-8686, Japan
⁴National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568, Japan

Polarimetric Scattering of Sea Ice and Snow Using L-band
Quad-polarized PALSAR Data in Kongsfjorden, Svalbard

Jung-Soo Jung¹, Chan-Su Yang^{2*}, Kazuo Ouchi³, and Kuzaki Nakamura⁴

¹Electronic Engineering and Avionics, Telecommunication & Computer Engineering
Korea Aerospace University, Goyang 412-791, Korea

²Korea Ocean Satellite Center, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

³National Defense Academy
1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka, Kanagawa, 239-8686, Japan
⁴National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568, Japan

Abstract : This study describes measurements of fast ice recorded on May 23, 2009, in Kongsfjorden (translated as 'Kongs Fjord'), an inlet on the west coast of Spitsbergen in the Svalbard Archipelago. Seasonal fast ice is an important feature for Svalbard fjords, both in relation to their physical environment and also the local ecosystem, since it grows seaward from the coast and remains in place throughout the winter. Ice thickness, snow, ice properties, and wind speed were measured, while SAR (Synthetic Aperture Radar) data was observed simultaneously observed two times from ALOS-PALSAR (L-band). Measured ice thickness was about 25-35 cm while the thickness of ice floe broken from fast ice was measured as 10-15 cm. Average salinity was 1.9-2.0 ppt during the melting period. Polarimetric data was used to extract H/A/alpha-angle parameters of fast ice, ice floe, snow and glacier, which was classified into 18 classes based on these parameters. It was established that the area of fast ice represents surface scattering which indicates low and medium entropy surface scatters such as Bragg and random surfaces, while fast ice covered with snow belongs to a zone of low entropy surface scattering similar to snow-covered land surfaces. The results of this study will contribute to various interpretations of interrelationships between H/A/alpha parameters and the wave scattering Phenomenon of sea ice.

Key words : ALOS-PALSAR, sea-ice, classification, polarimetry, multi-polarization, H/A/alpha-angle parameter

*Corresponding author. E-mail : yangcs@kordi.re.kr

1. 서 론

극지방의 해빙은 지구의 복사평형, 심층수 형성 등 지구의 생태계를 유지하는 물리 현상뿐만 아니라 극지방 연안 및 해안 서식지의 기후, 그리고 항로 등 인간 생활에 관련된 환경에 밀접한 영향을 끼친다. 최근에는 지구 온난화로 인한 해수면 상승으로 인해 항로 개척과 자원개발의 필요성이 대두 되면서 북극에 대한 장/단기 적인 관측이 요구되고 있다(Jackson and Apel 2004). 하지만 극지방은 극야현상과 구름이 자주 형성되는 환경으로 인해 기존의 광학위성이나 항공기를 이용하는 방법으로는 동일 지역에 대한 규칙적인 반복관측이 불가능하다(Stroeve et al. 2007; 양과 나 2009). 위성 SAR(synthetic aperture radar)는 광학위성이나 항공기와는 달리 주야 및 기상조건에 관계없이 운용 가능하고 동일 지역의 반복적인 관측이 가능하여 북극 해빙 모니터링에 유용하다. 다중편파 SAR 영상은 편파특성을 이용한 영상 분해기법(polarimetric decomposition)을 통해 상호상관(cross-correlation)항에 대한 정보를 획득할 수 있어 단일편파 SAR 영상에 비하여 획득할 수 있는 표적 특성이 다양하다. 하지만 레이더 표적들은 표면산란에서 체적산란까지의 다양한 산란특성을 가지고 있기 때문에 통계적인 산란 메커니즘에 대한 접근이 필요하다. 분산 표적에 대한 평균적인 산란 메커니즘에 대한 정보를 제공하는 표적 분해(target decomposition) 이론은 Huynen (1970)에 의하여 표적과 클러터를 구분하는 이분법적인 방법이 제안된 이후 표적의 물리적인 특성을 추출하기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 기저행렬(basic metrics)을 이용한 코히런트 분해기법(coherent decomposition)은 하나의 특정 산란이 우세할 경우에 적용하기 적합하나 코히런트 잡음(coherent noise)에 대한 영향이 크며 너무 많은 분해기법이 존재하여 영상 해석을 위한 고유의 방법으로 적용하기에는 어렵다(Lee and Pottier 2009). 물리적인 특성에 대한 수학적 모델에 기반한 3성분과 4성분 분해기법은 모델에 대한 초기 가정으로 인하여 특정 지역에서만 적용되기 때문에 일반화 시킬 수 없다는 단점이 있다(Freeman and Durden 1998; Yamaguchi and Moriyama 2005; Zhang et al. 2008).

H/A/alpha-angle(entropy/anisotropy/alpha-angle) 분해기법은 기저행렬로 변환된 2차 통계특성(second-order statistic)을 나타내는 행렬에 잡음제거 알고리즘(smoothing algorithm)을 사용하여 영상 데이터로부터 평균 파라미터를 추출하는 방법이다. 산란체의 고유 불변한 특성을 나타내는 고유치와 고유벡터에 대한 해석을 수행하고 산란특성에 대하여 통계적으로 접근하기 때문에 스펙클 잡음에 대한 영향이 적고 위성체의 운용 궤도에 의한 영향을 받지 않는다(Cloude and Pottier 1997). 또한 H/A/alpha 분

해기법은 가장 우세한 산란뿐만 아니라 상대적으로 작은 산란과정 추정 가능성이 존재한다. 다중편파 영상 분해기법을 이용한 영상해석의 대상은 대부분 가장 우세한 산란특성으로 상대적으로 작은 다른 산란들은 크게 고려하지 않는다. 하지만 이러한 산란과정들도 지역 특성을 나타내는 고유의 파라미터이므로 분류하는데 적용 될 수 있을 뿐만 아니라 주변환경 변화에 따라 우세한 산란으로 변화 될 수 있기 때문에 이에 대한 해석이 필요하다. 본 논문에서는 고유벡터 기반의 영상 분해기법에서 산출되는 H/A/alpha-angle에 대한 이론을 정립하고 SARscape을 이용하여 H/A/alpha-angle 파라미터를 추출한 후 북극 콩스피오르덴 해역에 존재하는 정착빙(fast ice), 바다, 눈, 그리고 빙하 지역에 대한 편파 특성을 H/A/alpha 파라미터를 이용하여 해석하였다. 콩스피오르덴 해역에 눈이 쌓이고 정착빙으로부터 떨어져나갔던 부빙(ice floe)이 유입 되었을 경우와 같은 단기적인 환경 변화가 발생했을 경우의 우세한 산란특성 변화는 H/A/alpha-angle 파라미터의 평균과 표준편차로 해석되고 우세한 산란 이외의 다른 산란 특성과 변화는 H/A/alpha-angle 파라미터를 이용하여 분류된 영역의 변화에 대한 해석으로 제시하였다.

2. 관측영역 및 데이터

Fig. 1은 유럽 노르웨이 북단에 위치해 있는 스발바르 제도과 콩스피오르덴 주변 해역을 나타낸다. 니알슨을 중심으로 점선으로 표현된 상자 안 지역은 북극다산기지(위도: 78°55', 경도: 11°56')가 위치해 있는 지역으로 계절마다 해빙의 생성과 소멸이 반복되는 초년빙(first-year ice) 중 해안선을 따라 형성되는 정착빙(fast ice) 지역이 넓게 존재한다.

Fig. 2는 연구지역으로 넓이는 가로 16 km, 세로 7 km 정도이며 해역의 수심은 최대 400 m이다. 연구지역 내 콩스피오르덴 해역 안쪽은 Bratliekollen섬과 Lovenoyane섬이 존재하고 빙하로 파여진 함몰지대가 형성되어 있으며 해수 깊이는 평균적으로 100 m 이하이다(Majewski et al. 2005). Kongsbreen은 가장 활성화된 빙하지역으로 7월경에 최대 138 m³s⁻¹의 탁수(turbid water)가 콩스피오르덴 해역으로 유입되며, 그림에 빙하지역(glacier ice area)이라고 표기된 Kongsbreen과 Conwaybreen 지역을 포함한 빙하에 의해 연간 0.33 km³의 탁수가 콩스피오르덴 해역에 유입되고 해안선에 주변에 주로 퇴적되어 높은 경사도를 지니는 해저지형이 형성되고 있다(Svendsen et al. 2002; Beszczyńska-Møller et al. 1997; Hop et al. 2002). 이러한 지형적인 조건과 기후변화에 따라 콩스피오르덴 해역에 형성되는 정착빙은 넓이가 좁아지고 생성주기가 짧아지는 추세에 있다(Gerland and Renner 2007).

Fig. 1. Kongsfjorden and Svalbard archipelago in the Arctic Ocean. The Korean DASAN station is located at Ny-Ålesund identified by the dotted box

Fig. 2. Study area (Enlarged for the dotted box of Fig. 1). The dotted boxes represent ROI area for sea ice, snow, and glacier. Location (a) shows wind speed and direction measurement and (b) photographing position

Fig. 3. Photographs of study area obtained at 11:44–51 UTC (a), and 19:45–51 UTC (b) on May 23, 2009 at the top of Zeppelin. Circled numbers represent the locations as follows: ① Kongsfjorden, ② Ny-Ålesund Airport, Hamnerabben, ③ Nordvåg fjellet, ④ Bratliekollen, ⑤ Ny-Ålesund, ⑥ Conwaybreen, ⑦ Stemmeknausane, ⑧ Lovenoyane, ⑨ Ossian Sarsfjellet, ⑩ Collettøda, ⑪ Kronebreen

Fig. 4. Time series of wind speed (black line) and wind direction (green line) with observation time (blue line)

Fig. 3은 Zeppelin 정상(Fig. 2 참조)에서 UTC 기준으로 2009년 5월 23일 11시(Fig. 3-(a))와 19시(Fig. 3-(b))에 사진을 이용하여 촬영한 영상을 각각 나타내고 Fig. 4는 니알슨에서 관측된 풍향과 풍속에 대한 시계열 자료를 나타낸다. 위 관측시간 사이 콩스피오르덴 해역의 해수는 부드러운 표면의 얇은 얼음 층인 막빙(grease ice)과 부빙이 존재하였다. 첫 번째 관측시간 이후로 서풍이 불어 해수표

면에 존재하는 부빙이 연안 쪽으로 이동하였으며 연구지역에 눈이 내리기 시작하였다. 11시와 19시의 풍속과 풍향은 각각 0.6 m/s(남동풍)과 0.8 m/s(남서풍)이었고, 첫 번째와 두 번째 관측시간 사이의 평균풍속 0.735 m/s이었다.

SAR 데이터는 2009년 5월 23일에 현장에서 측정한 정착빙의 표면 거칠기는 4~6 cm이므로 레일리 기준에 의한 최소 후방산란계수를 만족하는 L 밴드 PALSAR 데이터의 서로 다른 관측시간에 측정된 데이터를 이용하였다 (Jackson and Apel 2004). Fig. 5는 관측영역에 대한 기하 보정된 각 편파 별 데이터의 스패ن(SPAN) 영상을 나타낸다. (a)와 (b)는 각각 2009년 5월 23일 11시 36분과 23일 19시 45분에 관측한 기하 보정된 PALSAR 영상을 나타내며 (c)는 기하 보정된 영상의 모자이크 결과이다. 그림 (a)의 북쪽 부분과 (b)의 남쪽 부분이 중복되는 지역은 앞에서 설명한 연구지역인 니알슨 주변의 콩스피오르덴 해역으로 (c)에 점선으로 표기하였으며 본 논문에서 사용된 SAR 데이터 및 현장에서 관측된 해빙 파라미터는 Table 1에 제시하였다. 연구지역에서의 해석영역과 각 해석영역에 대한 현장자료는 Fig. 6에 제시하였다. (a)는 첫 번째 SAR 영상과 현장자료, (b)는 약 8시간 후의 SAR 영상과 현장자료를 나타낸다. 해석영역의 각 지역에 대한 특성은 지역 (i)의 경우 적설지역으로 두 번째 관측될 때 추가로 눈이 쌓이는 지역이며 지역 (ii)는 막빙이 생성된 바다이며 두 번째 관측될 때 부빙이 유입된 지역이다. 지역 (iii)은 정착빙 지역으로 두 번째 관측될 때 눈이 쌓여있는 지역이며 (iv)는 빙하지역이다.

Fig. 5. ALOS PALSAR images observed at 11:36 UTC (a) and 19:45 UTC (b) on May 23, 2009. (c) Stacking of two registered images

Table 1. SAR parameters and in-situ data

Parameter	Value
Sensor Type	ALOS/PALSAR
Band	L-band (1270 MHz)
Polarization	HH, HV, VH, VV
SLC Image Size (Line×Pixel)	18432×1088
SLC Spacing (Line×Pixel)	3.822 m×9.368 m
GRD Image Size (Line×Pixel)	7045×2039
GRD Spacing (Line×Pixel)	10 m×10 m
1 st incidence angle	25.683°
2 nd incidence angle	25.730°
1 st observation time	2009. 05. 23, 11:36 51~59
2 nd observation time	2009. 05. 23, 19:45:07~15
Sea Ice Roughness	4~6 cm
Sea Ice Salinity	1.9-2.0 ppt
Sea Ice Thickness	25 ~ 35 cm

3. H/A/alpha-angle 다중편파 영상 분해기법

표적의 후방산란특성을 나타내는 산란행렬은 송수신 전파의 위상 차이에 따른 함수로 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{pmatrix} E_h^r \\ E_v^r \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E_h^t \\ E_v^t \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서 S_{hh} , S_{hv} , S_{vh} , 그리고 S_{vv} 로 구성된 행렬은 각각 H(horizontal)과 V(vertical) 방향으로의 송수신 전파에 따른 산란행렬($\mathbf{S}$)을 나타내며, E_h^t 와 E_v^t 는 전기장의 송신파향, E_h^r 와 E_v^r 는 전기장의 수신파향을 각각 나타낸다. 산란행렬은 전기장의 입사파향을 산란파향으로 변환해준다. 파울리(Pauli) 기저행렬을 이용하여 산란행렬 $\mathbf{S}$ 를 벡터로 변환하면 단일 안테나로 송수신을 하는 레이더 시스템의 경우 S_{vh} 와 S_{hv} 가 동일하다는 가정하에 식 (2)와 같이 표현된다.

Fig. 6. Sub-image of PALSAR data for the study area and photographs obtained during fieldwork. (a) May 23, 2009 at 11:36 AM UTC, (b) May 23, 2009 19:45 UTC

$$\mathbf{k} = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{hh} + S_{vv} \quad S_{hh} - S_{vv} \quad 2S_{hv}]^T \quad (2) \quad \text{과 같이 표현된다.}$$

이때, 벡터 $\mathbf{k}$ 의 기대치는 코히런스 행렬(coherency matrix) $\mathbf{T}_3$ 이라 표현하며 지표면의 국부적인 변화를 설명하거나 분산표적에서 편파 파라미터를 추출하는데 매우 용이하다. 이 송수신 편파에 따라 이상적인 이방성특성(anisotropic)을 가지고 있다 가정하면 산란행렬 $\mathbf{S}$ 는 다음

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 a 와 b 는 H 와 V 에 따른 송수신 전파의 복소산란계수이며 $\mathbf{S}$ 의 $\mathbf{T}_3$ 행렬에서 레이더 응시각(line of sight)에 대한 회전의 영향을 고려한 식은 식 (4)와 같고 $\mathbf{R}_3(\theta)$ 은

식 (5)와 같다.

$$T_3(\theta) = R_3(\theta) \begin{bmatrix} \varepsilon & \mu & 0 \\ \mu & \nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} R_3(\theta)^{-1} \quad (4)$$

$$R_3(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 ε , ν , μ 는 T_3 행렬에 대한 인자로서 $\frac{1}{2}|a+b|^2$, $\frac{1}{2}|a-b|^2$, 그리고 $\frac{1}{2}(a+b)(a-b)^*$ 를 각각 나타낸다. 픽셀 내의 산란체가 균등하게 분포되어 있다고 가정하면 T_3 행렬이 레이더의 응시각 θ 에 대한 앙상블(ensemble) 평균으로 표현 가능하며 이는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\langle T_3 \rangle_\theta = \int_0^{2\pi} T_3(\theta) P(\theta) d\theta = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2\varepsilon & 0 & 0 \\ 0 & \nu & 0 \\ 0 & 0 & \nu \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 $P(\theta)$ 는 T_3 행렬의 좌표각 θ 에 따른 유사확률(pseudo-probability)을 나타낸다. 앙상블 평균화된 T_3 행렬의 유사확률은 식 (7)로 표현되고, 우세한 산란특성을 표현하는 알파각(alpha-angle) 파라미터는 식 (8)과 같다.

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^3 \lambda_k}, \quad \sum_{k=1}^3 P_k = 1 \quad (7)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\pi}{2} (P_2 + P_3) \quad (8)$$

여기서, λ 는 T_3 행렬의 고유치를 나타내며 k 는 고유치 해의 인자를 나타낸다. 알파각 파라미터의 범위는 $0^\circ \sim 90^\circ$ 이며 표면산란($\bar{\alpha} = 0^\circ$), 체적산란($\bar{\alpha} = 45^\circ$), 그리고 이면산란($\bar{\alpha} = 90^\circ$, dihedral scattering)을 각각 의미한다. 산란체 상호간의 무작위성을 나타내는 엔트로피(entropy) 파라미터는 T_3 행렬의 고유치가 특이행렬(singular matrix)의 최소 필요조건을 만족하는 경우부터 고유치가 0이 아닌 값을 가지는 범위 내에서 고유치의 유사확률에 대한 함수로 식 (9)와 같이 표현된다.

$$H = -\sum_{k=1}^N P_k \log_N(P_k) \quad (9)$$

여기서 N 은 고유치의 해의 개수를 나타내며 단일 안테나로 송수신을 수행하는 레이더 시스템에서는 3, 송수신 안테나가 분리되어 있는 시스템의 경우는 4이다. 엔트로피 파라미터는 산란과정의 복잡성을 나타낸다. 낮은 엔트로피는 λ_1 이 λ_2 와 λ_3 보다 매우 큰 경우에 발생하기 때문에 픽셀 내에서 특정한 하나의 산란이 우세하게 발생한다는 의미를 나타내고 높은 엔트로피는 $\lambda_1 \approx \lambda_2 > \lambda_3$ 이거나

$\lambda_1 \approx \lambda_2 \approx \lambda_3$ 일 경우 발생하므로 픽셀 내에서 여러 산란과정이 발생하는 것을 의미한다. 애니소트로피(anisotropy)는 λ_1 으로 표현되는 가장 우세한 산란을 제외한, 두 번째와 세 번째로 많이 발생하는 산란에 대한 고유치의 비로 표현되는 함수로 식 (10)으로 표현된다.

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad (10)$$

엔트로피는 픽셀 내에서 산란과정의 무작위성을 결정하는 반면에 애니소트로피는 두 번째와 세 번째 산란과정의 발생 비율을 나타낸다. 낮은 엔트로피에서의 낮은 애니소트로피는 $\lambda_1 \gg \lambda_2 \approx \lambda_3$ 일 경우 발생하므로 특정한 하나의 산란이 우세하게 발생하여 single scattering mechanism이 발생한다는 의미이며, 높은 애니소트로피는 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ 일 경우 발생하므로 two scattering mechanism 의미를 나타낸다. 높은 엔트로피에서 높은 애니소트로피는 $\lambda_1 \approx \lambda_2 > \lambda_3$ 일 경우에 발생하므로 픽셀에서 two scattering mechanism이 발생한다는 의미이고 낮은 애니소트로피는 $\lambda_1 \approx \lambda_2 \approx \lambda_3$ 일 경우에 발생하므로 three scattering mechanism이 발생한다는 의미이다.

4. 해빙 분류 및 해석

H/A/alpha-angle는 각 픽셀의 고유 산란 메커니즘을 표현하므로 이를 고려한 해빙 분류가 수행되었고 총 18단계 영역에 대한 경계 값에 대한 기준과 산란특성은 Table 2에 나타내었다(Ainsworth et al. 2000; Lee and Pottier 2009). Table 2에서 구역(area) 1~4는 산란메커니즘을 나타내며 엔트로피와 애니소트로피에 의해 결정되는 기준이며 영역(zone) 1~9과 10~18은 산란특성을 나타내며 알파각과 엔트로피에 의해 결정된다. 2009년 5월 23일 11시와 19시에 측정된 SAR 데이터의 고유벡터 기반 영상 분해 결과는 Fig. 7과 8에 각각 제시되었다. 각 그림에서 (a)는 알파각 파라미터 (b)는 엔트로피 파라미터 (c)는 애니소트로피 파라미터 특성을 나타내며 그림 (d)는 애니소트로피가 0.5 이하일 경우 알파각/엔트로피의 분포도, (e)는 애니소트로피가 0.5 이상일 경우 알파각/엔트로피의 분포도, 그리고 (f)는 18단계의 H/A/alpha-angle 기반의 해빙 분류 결과를 각각 나타낸다. 각 영역별 해빙 특성과 서풍과 눈으로 인한 개략적인 해빙 특성 변화는 H/A/alpha-angle 파라미터의 평균과 표준편차로 해석되어 Table 3에 제시되었다. 지역 (i)은 적설 지역으로 눈이 내리기 전후의 알파각 평균은 40° 이하이므로 표면 산란특성을 나타내며 0.5 이하의 낮은 엔트로피와 낮은 애니소트로피는 적설지역에서 single scattering mechanism이 발생하는 영역이 주로 존재한다. 지역 (ii)에서는 표면 산란특성이 나타나고 높은

Table 2. Scattering characteristics and boundary of the classified area based on A/H/alpha-angle parameters

Area	Zone	Scattering Mechanism	Scattering Characteristic	Boundary		
				Alpha-angle	Entropy	Anisotropy
1	7	Single Scattering Mechanism	Dihedral scatter	$>47.5^\circ$		
	8		Dipole	$>42.5^\circ, <47.5^\circ$	<0.5	<0.5
	9		Bragg surface	$<42.5^\circ$		
2	1	Three Scattering Mechanisms	Branch/crown structure	$>50^\circ$		
	2		Cloud of anisotropic needles	$>40^\circ, <55^\circ$	$>0.9, <1$	
	3		No feasible region	$<40^\circ$		<0.5
	4		Forestry double bounce	$>50^\circ$		
	5		Vegetation	$>40^\circ, <50^\circ$	$>0.5, <0.9$	
3	6		Random surface	$<40^\circ$		
	16		Dihedral scatter	$>47.5^\circ$		
	17		Dipole	$>42.5^\circ, <47.5^\circ$	<0.5	>0.5
4	18	Two Scattering Mechanisms	Bragg surface	$<42.5^\circ$		
	10		Branch/crown structure	$>50^\circ$		
	11		Cloud of anisotropic needles	$>40^\circ, <55^\circ$	$>0.9, <1$	
	12		No feasible region	$<40^\circ$		>0.5
	13		Forestry double bounce	$>50^\circ$		
	14		Vegetation	$>40^\circ, <50^\circ$	$>0.5, <0.9$	
	15		Random surface	$<40^\circ$

Fig. 7. Classification results based on H/A/alphaangle parameters for the PALSAR data obtained on May 23, 2009 at 11:36 AM UTC. (a) Alpha-angle image. (b) Entropy image. (c) Anisotropy image. (d) Distribution of entropy/alpha-angle plane corresponding to $A < 0.5$. (e) Distribution of entropy/alpha-angle plane corresponding to $A > 0.5$. (f) Classification result using (d) and (e)

Fig. 8. Same as Fig. 7, but on May 23, 2009 at 19:45 (UTC)

Table 3. Variation of A/H/alpha-angle parameters in each region (STD refers to standard deviation)

Parameter	Alpha-angle				Entropy				Anisotropy			
Data	1 st data		2 nd data		1 st data		2 nd data		1 st data		2 nd data	
	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD
Sub-area												
(i)	15.11	4.95	15.4	5.28	0.33	0.1	0.34	0.11	0.46	0.16	0.44	0.16
(ii)	41.03	15.07	26.71	12.37	0.65	0.15	0.53	0.19	0.57	0.19	0.41	0.16
(iii)	21.37	6.89	15.23	5.31	0.45	0.11	0.35	0.11	0.68	0.14	0.16	0.16
(iv)	44.11	9.85	43.86	8.94	0.77	0.12	0.77	0.11	0.38	0.16	0.39	0.16

엔트로피는 무작위성 산란이 발생하는 영역이라는 것을 나타낸다. 지역 (iii)은 표면 산란특성이 나타나며 눈이 쌓인 후에 알파각 값이 감소한다. 엔트로피는 눈이 오기 전 후에 유사한 값을 보이지만 애니소트로피는 눈이 쌓인 후 크게 감소하여 λ_2 와 λ_3 의 크기가 유사함을 알 수 있다. 지역 (iv)는 빙하 지역으로 체적산란특성이 나타나며, 높은 엔트로피와 낮은 애니소트로피가 나타나므로 three scattering mechanism이 주로 발생하는 것을 알 수 있다.

환경 변화에 따른 산란특성 변화 해석은 Table 4에 제

시된 18단계로 분류된 해빙의 영역 변화에 기반하여 수행되었다. (i) 지역에서 single scattering mechanism이 발생하는 지역은 53.61%이며 two scattering mechanism과 three scattering mechanism이 발생하는 지역은 각각 42.60%와 3.79%이다. 가장 우세한 산란은 브래그 표면산란으로 전체 영역의 93.47% 영역에서 발생하였으며 두 번째로 우세한 산란은 불규칙 표면산란은 6.49%이다. 눈이 내린 8시간 후 관측된 영역에서 (i) 지역의 single scattering mechanism이 발생한 지역은 57.84%로 증가하

Table 4. The change of classified area in each region (unit: pixels)

Sub-area Zone	Data	(i)		(ii)		(iii)		(iv)	
		1 st data	2 nd data	1 st data	2 nd data	1 st data	2 nd data	1 st data	2 nd data
1		0	0	89	190	0	0	301	170
2		1	0	242	448	2	0	677	621
4		0	0	3590	956	4	3	1997	1727
5		3	5	1919	2013	50	23	2892	3058
6		465	738	1744	6383	1375	3651	2074	2208
7		0	0	79	0	0	0	0	0
8		0	0	0	0	0	0	0	3
9		6635	7158	1272	9235	5323	36791	213	130
10		0	0	0	1	0	0	2	0
11		0	0	3	0	0	0	0	0
13		0	0	0	0	0	0	0	0
14		1	4	3773	872	606	25	1095	1304
15		338	368	6177	2605	16904	1896	904	1001
16		0	0	167	0	0	0	0	0
17		0	0	5	0	0	0	1	0
18		4933	4103	3448	4269	34209	16102	141	78

고 two scattering mechanism이 발생하는 지역은 36.16%로 감소하였으며 three scattering mechanism이 발생하는 지역은 6%로 증가하였다. 가장 우세한 산란은 브래그 표면산란으로 91% 영역에서 발생하였으며 두 번째로 우세한 산란인 불규칙 표면 산란은 8.94%이다. 여기서 환경변화는 눈에 대한 요소이므로 눈에 의하여 single scattering mechanism이 발생하는 영역이 증가하고 눈의 산란특성은 브래그 표면 산란특성임을 알 수 있다.

지역 (ii)의 single-, two-, 그리고 three scattering mechanism이 발생하는 영역은 각각 6%, 60.3%, 그리고 33.69%이다. 가장 우세한 산란은 불규칙 표면 산란으로 35.19%의 영역에서 발생하였으며 두 번째로 우세한 산란인 체적산란은 25.29%, 그리고 가장 약한 산란과정인 표면산란의 발생영역은 20.97%이다. 부빙이 유입된 후 single-, two-, 그리고 three scattering mechanism이 발생하는 영역은 34.24%, 28.72%, 그리고 37.04%이며 가장 우세한 산란은 브래그 표면산란으로 50.67%의 영역에서 발생하고 두 번째로 우세한 산란은 불규칙 표면 산란 그리고 가장 약한 산란은 체적산란이다. 따라서, 막빙이 존재하는 바다에 부빙이 유입된 경우 single scattering mechanism이 발생하는 영역이 증가하고 브래그 표면산란이 우세하게 발생하는 것을 알 수 있다.

지역 (iii)의 single-, two-, 그리고 three scattering mechanism이 발생하는 영역은 9.1%, 88.45%, 2.45%이고 가장 우세한 산란은 브래그 표면산란으로 67.61%의 영역에서 발생하였고 두 번째로 우세한 산란인 불규칙 표

면 산란은 31.26% 지역에서 발생하였다. 눈이 온 이후의 single-, two-, 그리고 three scattering mechanism이 발생하는 영역은 62.9%, 30.81%, 6.29%이며 가장 우세한 산란인 브래그 표면산란의 영역이 90.43%로 증가하고 두 번째로 우세한 산란인 표면산란의 영역이 9.48%로 감소하였다. 표면 거칠기가 4~6 cm이고 1.9~2.0 ppt의 염도를 지니는 정착빙의 경우 L 밴드에서 two scattering mechanism이 발생하고 가장 우세한 산란은 브래그 표면산란이며 두 번째로 우세한 산란은 불규칙적 표면산란이다. 정착빙에 눈이 쌓일 경우 정착빙의 산란특성은 사라지고 지역 (i)과 유사하게 single scattering mechanism이 발생하는 영역이 증가하고 브래그 표면산란특성이 강하게 나타나는 것을 알 수 있다.

지역 (iv)는 빙하 지역으로 three scattering mechanism이 발생하는 영역은 77.12%이고 가장 우세한 산란은 체적산란이고 두 번째로 우세한 산란은 불규칙 표면 산란이다. 눈이 온 이후 두 번째 관측된 빙하 지역 역시 three scattering mechanism이 발생하는 영역이 대부분이며 가장 우세한 산란과 두 번째로 많이 발생하는 산란은 체적과 불규칙 표면 산란이 각각 나타나므로 빙하지역에서는 눈에 대한 영향이 크게 나타나지 않았다.

5. 결 론

본 논문에서는 L 대역의 ALOS-PALSAR의 다중편파 데이터를 이용하여 콩스피오르덴 해역을 분류하고 현장데

이터에 기반하여 각 영역별 특성을 해석하였다. 다중편파 데이터는 고유벡터 기반의 영상 분해기법인 H/A/ α -angle을 적용하여 18단계로 분류하고, 해빙, 눈, 빙하 영역에 대한 산란특성을 해석하였다.

정착빙은 표면산란특성이 주로 나타났으며, 구체적으로 브래그 표면과 불규칙 표면 산란(거칠기가 다소 큼)으로 분류된 영역에 속했다. 하지만, 정착빙에 눈이 쌓인 경우, 불규칙 표면 산란 특성은 거의 없어지고, 브래그 표면산란이 대부분 발생하였다. 빙하지역에서는 체적 산란이 가장 많이 발생하였고 이와 비슷하게 표면산란, 그리고 이중반사산란이 동시에 발생하여 매우 다양한 산란이 발생하였으며 적설에 대한 영향은 관측되지 않았다. 하지만 빙하 지역은 고도와 경사면이 존재하는 지역으로 SAR 응시각에 따른 기하오차가 발생할 수 있으므로 L 대역에서 빙하에서의 눈에 대한 영향이 존재하지 않는다고 판단하기는 어렵다.

결론적으로 L대역 다중편파 영상을 고유벡터 기반의 영상 분해기법을 사용하여 재형성할 경우, 적설에 의한 영향이 커서 정착빙과 육지 지역에 적설이 존재할 때 서로의 구분은 쉽지 않다. 빙하의 경우 해빙과의 구분은 용이하나 주변 산맥들과의 구분은 쉽지 않았다. 향후, 본 기법을 보다 두께가 두껍고 넓은 해역의 정착빙에 대해 적용할 계획이다.

사 사

북극 해빙관측 조사에 많은 도움을 주신 김현철박사님, 윤영준박사님, 김기태박사님, 노르웨이 기지대장 Tor Ivan Karlsen, 독일 기지대장 Marcus Schumacher께 진심으로 감사드립니다. 본 연구는 국토해양부 연구개발사업 ‘운용 해양(해양예보)시스템 연구’, 지식경제부 국가연구개발사업 ‘극지용 저온 설계 및 Winterization 평가 기술’, 한국 해양연구원 기본연구사업(해양 오염사고 대응기술 개발)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 양찬수, 나재호 (2009) AMSR-E 위성 데이터를 이용한 북극 해빙분포의 계절 변동 및 연 변동조사: 2002년 7월-2009년 5월. *대한원격탐사학회지* **25**:423-444
- Ainsworth TL, Lee JS, Schuler DL (2000) Multi-frequency polarimetric SAR data analysis of ocean surface features. *INT Geosci Remote Se* **3**:1113-1115
- Beszczyńska-møller A, Węśławski JM, Walczowski W, Zajączkowski M (1997) Estimation of glacial meltwater discharge into Svalbard coastal waters. *Oceanologia* **39**(3):289-298
- Cloude SR, Pottier E (1997) An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR. *IEEE Trans Geosci Remote Se* **35**(1):68-78
- Freeman T, Durden SL (1998) A three-component scattering model for polarimetric SAR data. *IEEE Trans Geosci Remote Se* **36**(3):963-973
- Gerland S, Renner AHH (2007) Sea ice mass balance in an Arctic fjord. *Annals of Glaciology* **46**:435-442
- Hop H, Pearson T, Hegseth EN, Kovacs K, Wiencke C, Kwaceniowski S, Eiane K, Mehlum F, Gulliksen B, Włodarska-kowalczyk M, Lydersen C, Węśławski JM, Cochrane S, Gabrielsen GW, Leakey R, Lonne OJ, Zajączkowski M, Falkpetersen S, Kendall M, Wangberg SA, Bischof K, Voronkov AY, Kovaltchuk NA, Wiktor J, Polterman M, Diprisco G, Estoppey A, Papucci C, Gerland S (2002) The marine ecosystem of Kongsfjorden, Svalbard. *Polar Res* **21**:167-208
- Huynen JR (1970) Target averages and decomposition theorems. *Antennas and Propagation Soc Int Sym* **2**:780-783
- Jackson CR, Apel JR (2004) Synthetic aperture radar marine user's manual. NOAA/NESDIS Office of Res App **3**:81-115
- Lee JS, Pottier E (2009) Polarimetric radar imaging from basics to applications. CRC press, Boca Raton, 280 p
- Majewski W, Pawłowski J, Zajączkowski M (2005) Monothalamous foraminifera from West Spitsbergen fjords, Svalbard: a brief overview. *Polish polar Res* **26**:269-285
- Stroeve J, Holland MM, Meier W, Scambos T, Serreze M (2007) Arctic sea ice decline: faster than forecast. *Geophys Res Lett* **34**:L09501. doi:10.1029/2007GL029703
- Svendsen H, Beszczyńska-møller A, Hagen JO, Lefauconnier B, Tverberg V, Gerland S, Ørbæk JB, Bischof K, Papucci C, Zajączkowski M, Azzolini R, Bruland O, Wiencke C, Winther JG, Dallmann W (2002) Physical environment of Kongsfjorden, an Arctic fjord system in Svalbard. *Polar Res* **21**(1):133-166
- Yamaguchi Y, Moriyama T, Ishido M, Yamada H (2005) Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition. *IEEE Trans Geosci Remote Se* **43**(8):1699-1706
- Zhang L, Zhang J, Zou B, Zhang Y (2008) Comparison of methods for target detection and application using polarimetric SAR image. *PIERS* **4**(1):140-145

Received Sep. 30, 2010

Revised Nov. 3, 2010

Accepted Nov. 23, 2010