AMSR-E NASA Team2 알고리즘에서 빙하빙의 마이크로파 복사특성

한향선 · 이훈열[†]

강원대학교 지구물리학과

Microwave Radiation Characteristics of Glacial Ice in the AMSR-E NASA Team2 Algorithm

Hyangsun Han and Hoonyol Lee[†]

Department of Geophysics, Kangwon National University

Abstract : Sea ice concentration calculated from the AMSR-E onboard Aqua satellite by using NASA Team2 sea ice algorithm has proven to be very accurate over sea ice in Antarctic Ocean. When glacial ice such as icebergs and ice shelves are dominant in an AMSR-E footprint, the accuracy of the ice concentration calculated from NASA Team2 algorithm is not well maintained due to the different microwave characteristics of the glacial ice from sea ice. We extracted the concentrations of sea ice and glacial ice from two ENVISAT ASAR images of George V coast in southern Antarctica, and compared them with NASA Team2 sea ice concentration. The result showed that the NASA Team2 algorithm underestimates the concentration of glacial ice. To interpret the large deviation of estimation over glacial ice, we analyzed the characteristics of microwave radiation of the glacial ice in PR (polarization ratio), GR (spectral gradient ratio), PR_R (rotated PR), and ΔGR domain. We found that glacial ice occupies a unique region in the PR , GR , PR_R , and ΔGR domain different from other types of ice such as ice type A, B, and C, and open water. This implies that glacial ice can be added as a new category of ice to the AMSR-E NASA Team2 sea ice algorithm.

Key Words : glacial ice, sea ice, microwave radiation characteristics, AMSR-E, NASA Team2 algorithm

요약 : Aqua에 탑재된 AMSR-E는 NASA Team2 해빙 알고리즘을 사용하여 해빙 면적비를 계산하고 있으며, 이는 남극의 해빙 지역에서 매우 정확하다는 것이 증명되었다. 그러나 AMSR-E의 관측 영역 내에 빙산 및 빙봉과 같은 빙하빙이 많이 포함될 경우 해빙과는 다른 빙하빙의 복사특성 때문에 NASA Team2 알고리즘으로부터 계산되는 얼음의 면적비는 그 정확성이 유지되지 않는다. 본 논문에서는 남극의 George V 해안이 촬영된 두 장의 ENVISAT ASAR 영상으로부터 해빙과 빙하빙의 면적비를 추출하였고, 이를 NASA Team2 해빙 면적비와 비교하였다. NASA Team2 알고리즘은 빙하빙에 대해 실제보다 작은 면적비를 계산하였다. 빙하빙에 대한 NASA Team2 알고리즘의 면적비 계산 오류를 해석하기 위해 PR (polarization

접수일(2011년 9월 2일), 수정일(1차 : 2011년 9월 25일), 게재확정일(2011년 9월 27일).

[†] 교신저자: 이훈열(hoonyol@kangwon.ac.kr)

ratio), GR (spectral gradient ratio), PR_R (rotated PR), 그리고 ΔGR 영역에서 빙하빙의 마이크로파 복사특성을 분석하였다. 빙하빙은 PR , GR , PR_R , ΔGR 영역에서 ice type A, B, C와 같은 남극의 해빙 및 open water와 구분되는 고유한 범위를 형성하였으며, 이는 빙하빙이 얼음의 새로운 종류로 AMSR-E NASA Team2 해빙 알고리즘에 추가될 수 있음을 의미한다.

1. 서론

극지방의 육지에서 오랜 시간 동안 지속적으로 눈이 쌓인 후 압축되면 빙하빙(glacial ice)이 형성된다. 육지 기원인 빙하빙은 빙하(glacier)와 빙상(ice sheet), 빙붕(ice shelf), 그리고 빙산(iceberg)으로 구분할 수 있으며, 해양 기원의 해빙(sea ice)과는 다른 마이크로파 복사특성(microwave characteristics)을 나타낸다(한향선과 이훈열, 2007). 북극의 그린란드와 남극 전역에 걸쳐 분포하는 빙하빙은 해빙과 함께 지구온난화와 밀접한 관계를 가지고 있다(Oppenheimer, 1998; Vinnikov *et al.*, 1999; Picard and Fily, 2006; Hanna *et al.*, 2008; Hattermann and Levermann, 2010). 또한 빙하빙은 극지방 얼음의 질량 균형(ice mass balance)에도 매우 크게 기여하고 있다(Rignot and Thomas, 2002; Velicogna, 2009). 남극에서는 빙하와 빙붕의 급격한 감소가 관측되고 있으며, 다양한 규모의 빙산이 생성되고 있어 해안선의 변화와 해빙의 성장 환경에 큰 영향을 미치고 있다(Fricker *et al.*, 2002).

빙하빙의 관측에는 수동 마이크로파(passive microwave) 센서가 널리 사용되고 있다. 수동 마이크로파 센서는 기상 및 대기조건에 의존적인 광학 센서의 단점을 보완할 뿐만 아니라, 매일 북극과 남극 전역을 관측할 수 있는 장점이 있다(Cavalieri *et al.*, 1997). 또한 수동 마이크로파 센서는 매일 극지의 해빙 면적비(sea ice concentration, SIC)를 제공하고 있다. 해빙의 분포를 정량적으로 나타내는 해빙 면적비는 일정한 영역 내에서 해빙이 존재하는 면적의 비를 백분율로 표현한 것으로, 해양에서의 얼음 분포 해석에 있어 가장 중요하게 사용된다(Comiso *et al.*, 1997). Aqua에 탑재된 Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS(AMSR-E)는 현재 운용되고 있는 대표적인 수동 마이크로파 센서로서 2002년부터 현재까지 NASA Team2(NT2) 알고리즘을 사용하여 12.5 km의 해상도

로 해빙 면적비를 제공하고 있다(Markus and Cavalieri, 2000). NASA Team2 알고리즘은 Special Sensor Microwave/Imager(SSM/I)에 사용되는 NASA Team 알고리즘의 해빙 면적비 측정 오류와 공간해상도를 개선시킨 것으로 북극과 남극의 해빙에 대해 정확도 높은 면적비를 계산한다고 알려져 있다(Comiso *et al.*, 1997; Cavalieri *et al.*, 2006). Cavalieri *et al.*(2006)의 연구에 의하면 NASA Team2 알고리즘은 북극의 first-year ice와 young ice에 대해 정확한 면적비를 계산하였다. Lee and Han(2008)은 남극의 해빙에 대해 NASA Team2 알고리즘이 NASA Team 알고리즘보다 정확한 해빙 면적비를 산출함을 증명하였다.

현재까지 AMSR-E NASA Team2 알고리즘의 정확성을 평가하기 위한 많은 연구가 수행되었다. 그러나 대부분의 연구는 해빙에 대해서만 한정적으로 수행되었고, 해빙과는 다른 마이크로파 복사특성을 가지는 빙하빙에 대해서는 NASA Team2 알고리즘의 정확성이 보고된 바가 없다. NASA Team2 알고리즘은 육지와 대규모 빙붕을 마스킹(masking) 한 후 해빙 면적비를 제공하고 있으나 소규모의 빙붕과 ice tongue는 마스킹되지 않으며, 빙산은 바다에서 해빙과 혼재하고 있어 잘못된 해빙 면적비가 계산되는 원인이 되고 있다. 따라서 NASA Team2 알고리즘으로 계산된 빙하빙의 면적비에 대한 정확도 분석은 매우 중요하다. 이에 따라 빙하빙에 대한 NASA Team2 해빙 알고리즘의 정확성을 분석하고, 오차가 발생할 경우 원인 규명을 위한 빙하빙의 마이크로파 복사특성을 해석해야 한다.

본 논문에서는 태평양에 인접한 남극 대륙의 가장자리에서 획득된 2개의 ENVISAT ASAR(Advanced Synthetic Aperture Radar) 영상으로부터 빙하빙과 해빙의 면적비를 계산하여 이를 AMSR-E NASA Team2 해빙 면적비와 비교하였고, 빙하빙에 대한 NASA Team2 알고리즘의 오차를 확인하였다. 그리고

오차의 원인을 해석하기 위해 NASA Team2 알고리즘에서 해빙의 유형 구분 및 면적비 계산에 사용되는 PR (polarization ratio), GR (spectral gradient ratio), PR_R (rotated PR), 그리고 ΔGR 에 대한 산점도(scatter plot)를 바탕으로 빙하빙의 복사특성을 분석하였다.

2. 연구 지역 및 자료

본 논문에서는 태평양과 인접한 남극 대륙의 George V 해안에서 획득된 2장의 ENVISAT ASAR 영상을 사용하였으며, ASAR 영상에 촬영된 지역을 연구지역으로 선정하였다(Fig. 1). ASAR 영상은 2006년 4월 20일과 26일에 HH 편파의 Wide Swath SLC(single look complex) mode로 촬영되었다(Table 1). Fig. 1(a)는 2006년 4월 26일에 획득된 ASAR 영상이며, Fig. 1(b)는 같은 일자의 AMSR-E NASA Team2 해빙 면적비 영상이다. ASAR 영상에서 남극대륙의 빙상은 매우 어둡게 나타난다. 남극 대륙의 빙상은 건조한 성질의 두꺼운 눈으로 구성되어 있다. 건조한 눈은 마이크로파를 잘

침투시키며, 이에 따라 마이크로파의 산란은 빙상의 표면이 아닌 내부에서 발생하게 된다(Magagi and Bernier, 2003; Mäkyneu *et al.*, 2007; Tedesco and Miller, 2007). 빙상 내부에서 발생한 체적 산란은 레이더에 되돌아오기 전에 빙상 내부에서 대부분이 감쇠되므로 ASAR 영상에서 빙상은 어둡게 나타난다. 빙상은 해안에 가까워질수록 밝게 나타나는데 이는 강한 바람에 의해 표면의 거칠기가 커져 체적산란보다 표면산란이 더 강하기 때문이다. ASAR 영상의 오른쪽에는 빙하가 바다로 흘러내려 형성된 ice tongue이 위치한다. ASAR 영상에서 바다는 대부분 해빙으로 덮여 있으며, 빙봉과 다양한 규모의 빙산이 관찰되고 있다. Fig. 1(b)의 AMSR-E NASA Team2 해빙 면적비 영상은 해빙 영역에서 100%에 가까운 면적비를 보이고 있으나, 빙산과 빙봉이 분포하는 영역에서는 작은 면적비를 산출하고 있음을 알 수 있다.

표면 거칠기가 큰 빙산은 ASAR 영상에서 매우 밝게 나타나기 때문에 해빙과의 구분이 용이하였다. 그러나 빙봉은 주변의 해빙과 후방산란의 강도가 유사하여 쉽게 구별할 수 없었다. 본 논문에서는 빙봉의 확인을 위해 MODIS(Moderate-resolution Imaging

Fig. 1. (a) ENVISAT ASAR image of study area obtained on 26 April, 2006. (b) AMSR-E NASA Team2 sea ice concentration image obtained on 26 April, 2006. The sea ice concentration is nearly 100% but the glacial ice concentration is underestimated in NASA Team2 sea ice concentration image.

Table 1. ENVISAT ASAR images used in this study

Date	Time	Swath	Orbit	Pass	Polarization	Incidence angle
2006/04/20	21:34:42	WSS	21640	Descending	HH	22.22°
2006/04/26	21:46:08	WSS	21726	Descending	HH	22.18°

Fig. 2. MODIS images obtained in summertime in (a) 2003, (b) 2004, (c-d) 2005, and (e-f) 2006. Red line represents the boundary of land mask used in NASA Team2 algorithm. Blue circle in each image represents an ice shelf that survived in summertime.

Spectroradiometer) 영상을 활용하였다. Fig. 2는 2003년 2월부터 2006년 4월까지 시계열적으로 수집된 MODIS 영상 중 구름이 많지 않은 날짜의 영상을 선별해 나타낸 것이다. Fig. 2의 적색 실선은 NASA Team2 해빙 면적비 영상에서 마스킹 된 육지의 가장자리를 의미한다. 청색 원으로 표시된 지역에서는 매년 여름에 눈으로 덮인 얼음이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 남극

의 해빙은 대부분 여름에 모두 녹으며, 웨델 해(Weddell Sea) 지역에서만 여름에 해빙이 녹지 않고 존재한다(Comiso *et al.*, 1997). 따라서 청색 원으로 표시된 지역의 얼음은 해빙이 아닌 빙봉임을 확인할 수 있으며, 이를 바탕으로 ASAR 영상에서 빙봉과 해빙을 구분하였다.

3. 연구 방법

1) AMSR-E NASA Team2 해빙 알고리즘

AMSR-E는 Aqua에 탑재된 수동 마이크로파 센서로 6.9, 10.7, 18.7, 23.8, 36.5, 그리고 89.0 GHz 등 총 6개 주파수에서 수직(V), 수평(H) 편파의 채널을 가지는 복사계이다(Comiso *et al.*, 2003). AMSR-E는 다른 수동 마이크로파 센서에 비해 다양한 주파수와 높은 해상도의 영상을 제공하는 장점이 있어 차세대 위성 복사계로 각광받고 있다. AMSR-E에서 해빙 면적비를 계산하기 위해 사용되는 표준 알고리즘은 NASA Team2 알고리즘으로 이는 SSM/I에 사용되는 NASA Team 알고리즘의 단점을 보완한 것이며, 12.5 km 해상도의 해빙 면적비를 계산한다(Markus and Cavalieri, 2000; Comiso *et al.*, 2003; Cavalieri *et al.*, 2006). NSIDC (National Snow and Ice Data Center)에서는 일평균(daily-averaged), day-time(ascending orbit), 그리고 night-time(descending orbit)에 대한 채널별 밝기온도와 NASA Team2 해빙 면적비를 모두 제공하고 있다.

NASA Team2 알고리즘은 PR 과 GR , PR_R , ΔGR 을 이용하여 남극 해빙의 유형을 ice type A, B, C로 구분하고 노출된 바다(open water)를 선별한다(Markus and Cavalieri, 2000). PR 과 GR 은 각각의 채널(v) 및 편파(p)에서 밝기온도(T_B)를 이용하여 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$PR(v) = \frac{(T_B(v, V) - T_B(v, H))}{(T_B(v, V) + T_B(v, H))} \quad (1)$$

$$GR(v_1 p v_2 p) = \frac{(T_B(v_1 p) - T_B(v_2 p))}{(T_B(v_1 p) + T_B(v_2 p))} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)로부터 계산되는 $PR(18)$ 과 $GR(37V18V)$ 는 해빙의 종류와 open water를 구분하는 중요한 변수로 작용한다. SSM/I에 적용되는 NASA Team 알고리즘은 남극의 해빙유형을 ice type A와 B로 구분하는데, 두 유형의 해빙은 $PR(18)$ 과 $GR(37V18V)$ 에서 작은 값을 가지게 된다. 반면에 open water는 $PR(18)$ 과 $GR(37V18V)$ 에서 모두 높은 값을 가지므로 해빙과의 구별이 용이하다. 그러나 해빙의 표면에 snow layer와 같이 복사특성에 영향을 미치는 표면적인 영향요소(surface

effect)가 존재할 경우 해빙의 $PR(18)$ 은 open water의 $PR(18)$ 에 가까운 값을 가지며, $GR(37V18V)$ 는 ice type A와 B 사이에서 그 값을 유지하게 된다(Andersen *et al.*, 2007; Markus and Cavalieri, 2000). 이러한 해빙 유형은 ice type C로 정의되며, 이를 구분하기 위해 NASA Team2 알고리즘은 89.0 GHz 채널을 사용하여 PR_R 과 ΔGR 이라고 하는 새로운 변수를 계산한다. PR_R 은 다음과 같이 계산된다.

$$PR_R(v) = -GR(37V18V) \sin \phi + PR(v) \cos \phi \quad (3)$$

식 (3)에서 ϕ 는 남극에서 18 GHz에 대해 -0.59 라디안, 89 GHz에 대해 -0.40 라디안이 적용된다. ΔGR 은 89 GHz와 18 GHz의 V, H 채널에 대한 GR 의 차이로서 아래 식과 같이 표현된다.

$$\Delta GR = GR(89H18H) - GR(89V18V) \quad (4)$$

$PR_R(18)$ 은 해빙의 표면 영향이 심할수록 그 값이 커지지만 $PR(18)$ 과 같이 open water에 크게 가까워지지 않는다는. $PR_R(89)$ 은 해빙의 표면 영향이 커지더라도 그 값이 0에 가까운 일정한 값을 유지하게 된다. 이는 89.0 GHz 채널의 밝기온도가 해빙의 표면 영향이 커지더라도 변화하지 않음을 의미한다. 그러나 89.0 GHz는 대기의 영향에 민감한 단점이 있다. 극지의 대기 조건은 항상 변화하기 때문에 89.0 GHz 채널의 민감도도 변화하게 된다. 이에 따라 NASA Team2 알고리즘은 다양한 대기 조건에 대한 보정 모델을 사용한다. 대기 보정 모델의 적용 결과 대기 영향에 의한 해빙 면적비의 오차는 $\pm 5\%$ 범위 안에 분포하였으며, 해빙과 open water의 구분 또한 모호하지 않았다(Markus and Cavalieri, 2000).

2) ASAR와 NASA Team2 해빙 면적비 비교

ASAR 영상에서 빙하빙과 해빙의 면적비를 산출하고 이를 AMSR-E NASA Team2 해빙 면적비와 비교하기 위해 먼저 NASA Team2 알고리즘의 land-mask product를 이용하여 ASAR 영상에서 육지를 마스킹 하였다. 그리고 감독분류(supervised classification) 방법과 디지털화(digitizing) 방법을 통해 ASAR 영상에서 빙하빙과 해빙이 포함된 얼음과 open water를 분류하였다. 감독분류 수행 결과 분류의 전체 정확도는 4월 20일 영상에서 97.4%, 26일 영상에 94.4%로 계산되었

Table 2. Classification accuracy of ENVISAT ASAR images

Date \ Accuracy	User Accuracy		Producer Accuracy		Overall Accuracy
	sea ice	open water	sea ice	open water	
2006/04/20	98.51%	84.12%	98.66%	82.68%	97.40%
2006/04/26	96.35%	86.69%	96.64%	85.67%	94.41%

다(Table 2). 두 ASAR 영상에서 바다에 대한 얼음의 면적비는 모두 97.3%로 계산되었다. ASAR 영상 내에서 빙하빙과 해빙이 영상 전체에 걸쳐 균질하게 분포하고 있으며, 노출된 바다가 거의 관찰되지 않는다는 특징을 바탕으로 97.3%의 값을 ASAR 영상의 빙하빙과 해빙 면적비로 적용하였다.

일교차가 큰 지역에서는 하루 동안 빙하빙과 해빙의 복사특성이 시간적으로 변화할 수 있으며, 바람이 강하거나 해류의 영향이 큰 경우 빙하빙과 해빙의 공간적인 변화가 발생할 수 있다. 이러한 경우에는 NASA Team2 알고리즘의 일평균 자료를 사용할 수 없다(Lee and Han, 2008; 한향선과 이훈열, 2007). 따라서 AMSR-E로 획득된 밝기온도와 NASA Team2 해빙 면적비의 시공간적 변화가 큰 지역은 연구에서 제외해야 한다. ASAR 영상에서 확인된 바다는 대부분 얼음으로 균일하게 덮여 있으며 영상이 획득된 시기는 시공간적인 변화가 작은 겨울에 해당하므로, 연구지역에 대한 빙하빙과 해빙의 복사특성은 공간적으로 안정적임을 가정하였다(Lee and Han, 2008).

본 논문에서는 빙하빙 및 해빙에 대해 NASA Team2 알고리즘으로부터 계산된 일평균 면적비를 ASAR 영상에서 계산된 면적비(97.3%)와 비교하였다. 그리고 빙하빙에 대한 NASA Team2 알고리즘의 오차를 해석하기 위해 PR 과 GR , PR_R , 그리고 ΔGR 영역에서 빙하빙의 복사특성을 분석하였다.

4. 결과 및 토의

Fig. 3(a)는 NASA Team2 알고리즘의 land-mask product를 이용해 육지를 마스크 한 4월 26일의 ASAR 영상이며, Fig. 3(b)는 ASAR 영상에서 추출된 빙하빙 및 해빙의 면적비와 NASA Team2 해빙 면적비의 차이를 나타낸 것이다. 해빙 영역에 대해 ASAR 영상에서

추출된 면적비는 NASA Team2 해빙 면적비와 거의 차이가 없었으며, RMSE(root mean square error)는 1.4%로 매우 작았다. 그러나 빙하빙 영역에서 NASA Team2 알고리즘은 ASAR 영상에서 추출된 면적비에 비해 매우 작은 면적비를 계산하였으며, RMSE는 26.4%로 매우 컸다. 이는 해빙과 다른 빙하빙의 마이크로파 복사특성으로 인한 NASA Team2 알고리즘의 면적비 계산 오류라고 판단되며, PR , GR , PR_R , 그리고 ΔGR 에 대한 빙하빙과 해빙의 차이를 관찰하였다.

Fig. 3(c)–(h)는 각각 4월 26일 획득된 AMSR-E 자료의 $PR(18)$, $GR(37V18V)$, $GR(89V18V)$, $GR(89H18H)$, $PR_R(18)$, 그리고 ΔGR 이다. 빙하빙이 위치한 영역에서 모든 PR , GR , PR_R , 그리고 ΔGR 은 해빙 영역에 비해 높은 값을 나타냈다. 특히 빙하빙 영역에서 NASA Team2 해빙 면적비 자료의 오차가 클수록 높은 PR , GR , PR_R , 그리고 ΔGR 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 빙하빙에 대한 마이크로파 복사특성을 보다 명확히 해석하기 위해 NASA Team2 해빙 면적비에 적용되는 $PR-GR$, $PR_R-\Delta GR$ 산점도를 생성하였다.

Fig. 4(a)는 해빙과 빙하빙에 대한 $PR(18)-GR(37V18V)$ 산점도로 가로축은 $PR(18)$, 세로축은 $GR(37V18V)$ 이다. 산점도에서 해빙은 검은색 원으로 나타냈으며, 빙하빙은 파란색 원으로 표현하였다. 산점도에 나타난 삼각형의 각 꼭짓점에 해당하는 $PR(18)$ 과 $GR(37V18V)$ 는 100% 해빙 면적비의 ice type A와 B, 그리고 0%의 해빙 면적비를 가지는 open water를 의미한다. 남극에서 ice type A는 북극의 first-year ice와 유사한 특성을 가지며, ice type B는 multi-year ice와 그 성질이 유사하다. 남극의 경우 ice type B는 주로 웨델 해에 분포하는 것으로 알려져 있으며, 대부분의 해빙은 여름에 녹아 소멸되는 ice type A에 해당한다. 삼각형 내에서 100%의 ice type A와 B를 연결한 선분에 평행한 선들은 open water를 향할수록 작은 해빙 면적비를 의미한다. 100% 면적비의 ice type A와 B를 연결하

Fig. 3. (a) ENVISAT ASAR image, (b) the difference between ASAR ice concentration and NASA Team2 sea ice concentration, (c) $PR(18)$, (d) $GR(37V18V)$, (e) $GR(89V18V)$, (f) $GR(89H18H)$, (g) $PR_R(18)$ and (h) ΔGR . Ice sheet in all images was masked by the land-mask product of NASA Team2 algorithm.

는 선분과 $GR(37V18V)$ 축 사이의 예각은 $PR_R(18)$ 의 계산에 사용되는 ϕ 를 의미한다.

높은 $PR(18)$ 은 얼음 위에 30 cm 이상의 두꺼운 눈이 쌓여있는 경우 자주 나타나며, 이러한 경우 해빙 면적비는 과소평가 된다(Cavalieri, *et al.*, 2006; Markus *et al.*, 2006). 두께가 매우 얇은 new ice는 open water와 유사한 복사특성을 가지기 때문에 높은 $PR(18)$ 을 나타내는 특징이 있다. $PR(18)$ 은 해빙의 표면 영향과 비례 관계를 가지며, NASA Team2 알고리즘에서 표면 영향이 큰 해빙은 ice type C로 정의된다(Markus and Cavalieri, 2000). Ice type C의 경우 18.7 GHz 수평 편파에서 복사휘도가 감소하며, 이로 인해 남극의 일반적인 해빙인 ice type A보다 큰 $PR(18)$ 이 계산된다. Ice type C의 $GR(37V18V)$ 는 100% 해빙 면적비를 가지는 ice type A, B의 $GR(37V18V)$ 값 사이에 분포한다. Fig. 4(a)의 $PR(18)$ - $GR(37V18V)$ 산점도를 통해 연구 지역의 해빙은 ice type A에 해당함을 알 수 있다.

산점도에서 빙하빙과 해빙은 뚜렷한 차이를 나타내고 있다. 빙하빙에 대한 $PR(18)$ 의 평균은 0.072로 계산되었으며(Table 3), 해빙에 대한 $PR(18)$ 의 평균(0.048)보다 크다. 이는 빙하빙의 표면에 매우 두꺼운 눈이 쌓여있기 때문이다. 빙하빙의 $GR(37V18V)$ 또한 해빙의 $GR(37V18V)$ 보다 큰 것으로 나타났다. 빙하빙과 해빙의 $GR(37V18V)$ 차이는 얼음 표면에 존재하는 눈의 밀도와 관계가 있다. Powell *et al.*(2006)의 연구에 의하면 얼음 표면에 존재하는 눈의 밀도가 증가함에 따라 $GR(37V18V)$ 는 증가하는 경향을 나타낸다. 일반적으로 빙하빙의 표면을 형성하는 눈의 밀도는 약 700~900 kg/m³으로 해빙 표면에 존재하는 눈의 밀도(100~400 kg/m³)보다 크다(Kelly *et al.*, 2003; Luckman *et al.*, 2009). 따라서 빙하빙은 해빙보다 큰 $GR(37V18V)$

Table 3. Statistics of the AMSR-E PR , GR , PR_R and ΔGR

	Glacial ice					Sea ice				
	avg.	std.	max.	min.	mdn.	avg.	std.	max.	min.	mdn.
$PR(18)$	0.072	0.020	0.181	0.044	0.068	0.048	0.019	0.128	0.021	0.042
$GR(37V18V)$	0.025	0.008	0.048	0.004	0.025	0.004	0.007	0.028	-0.017	0.004
$GR(89V18V)$	0.074	0.021	0.123	0.016	0.076	0.016	0.020	0.071	-0.026	0.013
$GR(89H18H)$	0.118	0.030	0.211	0.046	0.120	0.044	0.030	0.134	-0.016	0.040
$PR_R(18)$	0.074	0.019	0.175	0.045	0.070	0.042	0.017	0.106	0.016	0.038
ΔGR	0.044	0.014	0.118	0.021	0.042	0.028	0.016	0.098	0.006	0.024

Fig. 4. (a) Scatter plot of $PR(18)$ and $GR(37V18V)$ of sea ice (black dots) and glacial ice (blue dots). (b) Scatter plot of $GR(89H18H)$ and $GR(89V18V)$ of sea ice (black dots) and glacial ice (blue dots). (c) Scatter plot of $PR_R(18)$ and ΔGR of sea ice (black dots) and glacial ice (blue dots). The glacial ice forms a unique region in the $PR-GR$ and $PR_R-\Delta GR$ domain.

를 나타낸다고 할 수 있다. Fig. 4(a)의 $PR(18)-GR(37V18V)$ 산점도를 통해서 빙하빙은 해빙과 open water와는 확연히 구분되는 고유한 범위를 형성하는 것을 알 수 있다.

Fig. 4(b)는 빙하빙과 해빙에 대한 $GR(89H18H)$ 와

$GR(89V18V)$ 의 산점도이다. 빙하빙과 해빙은 각각 검은색과 파란색 원으로 표현하였다. $GR(89H18H)$ 와 $GR(89V18V)$ 산점도에 표시한 검은색 실선은 100%의 면적비를 가지는 ice type A와 B에 해당하며, 실선에서 멀어질수록 작은 해빙 면적비가 산출되게 된다. NASA Team2 해빙 면적비 영상에서 높은 면적비로 계산된 해빙은 이 실선으로부터 가까운 영역에 분포하는 반면, 실제보다 작은 면적비로 계산된 빙하빙은 실선에서 먼 영역에 분포하는 것을 알 수 있다. 검은색 원으로 표시한 영역은 open water에 해당하며, $GR(89H18H)$ 와 $GR(89V18V)$ 모두 높은 값을 가진다.

빙하빙은 해빙보다 큰 $GR(89H18H)$ 와 $GR(89V18V)$ 를 가진다. 이는 18.7 GHz와 89.0 GHz 영역에서의 복사특성이 빙하빙과 해빙에서 서로 다르기 때문이다. 빙하빙에서 18.7 GHz에 대한 밝기온도는 해빙에서 감지된 밝기온도보다 작다(Andersen *et al.*, 2007; Jiang *et al.*, 2007). 89.0 GHz 채널이 얼음의 표면 또는 표면에서 가까운 얼음 내부에서의 복사휘도를 감지하는 반면에, 18.7 GHz 채널은 얼음의 하부층(lower layer)으로부터 발생된 후 얼음표면에 도달하는 동안 감쇄된 복사휘도를 감지한다. 따라서 두꺼운 빙하빙에서 18.7 GHz 채널로 측정된 복사휘도는 상대적으로 두께가 얇은 해빙에서 측정된 복사휘도보다 작으며, 이는 높은 $GR(89H18H)$ 와 $GR(89V18V)$ 가 계산되는 원인으로 작용한다. Fig. 4(b)의 $GR(89H18H)-GR(89V18V)$ 산점도에서도 빙하빙과 해빙, 그리고 open water는 서로 구분되는 범위를 형성함을 알 수 있다.

Fig. 4(c)는 $PR_R(18)$ 과 ΔGR 의 산점도로서, 빙하빙은 파란색 원으로 나타냈으며 해빙은 검은색 원으로 나타냈다. 일반적으로 빙하빙의 $PR_R(18)$ 과 ΔGR 은 해빙보다 큰 값을 가지는 것으로 나타났다. 남극에서 ice type A, B, C는 모두 0에 가까운 $PR_R(18)$ 을 가지므로 산점도에서 해빙의 $PR_R(18)$ 은 0에 가까운 값을 나타낸다. 빙하빙의 ΔGR 이 해빙보다 크게 나타난 것은 빙하빙에서의 $GR(89H18H)$ 와 $GR(89V18V)$ 의 차이가 해빙에서보다 크기 때문이다. 이러한 큰 차이는 18.7 GHz 채널에 대한 빙하빙의 복사휘도가 수직 및 수평 편파에서 서로 다르기 때문인 것으로 판단되며, 향후 지속적인 연구를 통해 규명할 계획이다. 빙하빙은 $PR_R(18)-\Delta GR$ 산점도에서도 고유한 범위를 형성하고 있다.

Fig. 4(a), (b), (c)의 $PR-GR$ 과 $PR_R-\Delta GR$ 산점도에
서 빙하빙은 해빙 및 open water와는 다른 마이크로파
복사특성 때문에 고유한 영역을 형성하고 있으며, 이는
빙하빙이 AMSR-E NASA Team2 해빙 알고리즘에서
새로운 유형의 얼음으로 분류될 수 있음을 의미한다.

5. 결 론

남극 대륙의 가장자리에서 획득된 ENVISAT ASAR
영상을 이용하여 빙하빙과 해빙의 면적비를 구하고, 이
를 AMSR-E NASA Team2 해빙 면적비와 비교하였
다. NASA Team2 해빙 면적비는 해빙 지역에서 1.4%
의 RMSE로 매우 높은 정확성을 나타냈으나, 빙산 및
빙봉과 같은 빙하빙 영역에서는 실제보다 매우 작은 면
적비를 계산하였다(RMSE = 26.4%). 이는 빙하빙과 해
빙의 서로 다른 마이크로파 복사특성에 기인하는 것으로,
본 논문에서는 NASA Team2 알고리즘에서 사용하는
 PR 과 GR , PR_R , ΔGR 을 이용하여 빙하빙의 마이크로파
복사특성을 해석하였다. 빙하빙의 $PR(18)$, $GR(37V18V)$,
 $GR(89V18V)$, $GR(89H18H)$, $PR_R(18)$, 그리고 ΔGR 은
모두 해빙보다 큰 값을 나타냈다. 이는 해빙보다 상대적
으로 두껍고, 표면을 구성하는 눈의 밀도가 큰 빙하빙의
물리적 특성이 영향을 미친 것으로 분석되었다. 해빙 및
open water와는 다른 마이크로파 복사특성으로 인해
빙하빙은 $PR-GR$ 과 $PR_R-\Delta GR$ 산점도에서 해빙 및
open water와 구분되는 고유의 영역을 형성하였다.

위와 같은 분석을 통하여 빙하빙의 마이크로파 복사
특성을 해석할 수 있었고, NASA Team2 해빙 알고리
즘에서 빙하빙이 새로운 유형의 얼음으로 구분될 수 있
음을 제시하였다. 그러나 이 논문에서는 제한된 지역 및
계절의 영상이 연구결과 분석의 한계점으로 작용하였
다. 향후 연구에서는 다양한 지역 및 계절에 대한 빙하
빙의 영상을 확보하여 연구결과의 해석을 보완할 예정
이다. 그리고 연구결과를 이용하여 기존의 NASA
Team2 해빙 알고리즘에 빙하빙 면적비(Glacial Ice
Concentration)를 추가하고, 알고리즘의 정확성을 향
상시킬 계획이다. 빙하빙 면적비는 AMSR-E 및 SSM/I
해빙 면적비 자료의 land-mask product 개선, 빙산
추적, 빙하빙의 움직임에 의한 해안선의 변화 등 다양한

극지 연구에 활용될 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으
로 한국연구재단의 기초연구사업(No.2010-0009465)
과 한국해양연구원 부설 극지연구소의 남극 제2기지 건
설사업(발주처: 국토해양부, 과제번호: PM11030)의 지
원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 한향선, 이훈열, 2007. 북극의 KOMPSAT-1 EOC 영
상과 SSM/I NASA Team 해빙 면적비의 비교
연구, 대한원격탐사학회지, 23(6): 507-520.
- Andersen, S., L. Kaleschke, G. Heygster, and L.T.
Pedersen, 2007. Intercomparison of passive
microwave sea ice concentration retrievals
over the high-concentration Arctic sea ice,
Journal of Geophysical Research, 112, C08004,
doi:10.1029/2006JC003543.
- Cavalieri, D.J., P. Gloersen, C.L. Parkinson, J.C.
Comiso, and H.J. Zwally, 1997. Observed
hemispheric asymmetry in global sea ice
changes, *Science*, 278(5340): 1104-1106.
- Cavalieri, D.J., T. Markus, D.K. Hall, A.J. Gasiewski,
M. Klein, and A. Ivanoff, 2006. Assessment of
EOS Aqua AMSR-E arctic sea ice concentration
using Landsat-7 and airborne microwave
imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and
Remote Sensing*, 44(11): 3057-3069.
- Comiso, J.C., D.J. Cavalieri, C.L. Parkinson, and P.
Gloersen, 1997. Passive microwave algorithms
for sea ice concentration: A comparison of
two techniques, *Remote Sensing of Environment*,
60(3): 357-384.
- Comiso, J.C., D.J. Cavalieri, and T. Markus, 2003. Sea
ice concentration, ice temperature, and snow

- depth using AMSR-E data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2): 243-252.
- Fricker, H.A., N.W. Young, I. Allison, and R. Coleman, 2002. Iceberg calving from the Amery ice shelf, East Antarctica, *Annals of Glaciology*, 34(1): 241-246.
- Hanna, E., P. Huybrechts, K. Steffen, J. Cappelen, R. Huff, C. Shuman, T. Irvine-Fynn, S. Wise, and M. Griffiths, 2008. Increased runoff from melt from the Greenland ice sheet: A response to global warming, *Journal of Climate*, 21(2): 331-341.
- Hattermann, T. and A. Levermann, 2010. Response of Southern Ocean circulation to global warming may enhance basal ice shelf melting around Antarctica, *Climate Dynamics*, 35(5): 741-756.
- Jiang, L., J. Shi, S. Tjuatja, J. Dozier, K. Chen, and L. Zhang, 2007. A parameterized multiple-scattering model for microwave emission from dry snow, *Remote Sensing of Environment*, 111(2-3): 357-366.
- Kelly, R.E., A.T. Chang, L. Tsang, and J.L. Foster, 2003. A prototype AMSR-E global snow area and snow depth algorithm, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2): 230-242.
- Lee, H., and H. Han, 2008. Evaluation of SSM/I and AMSR-E sea ice concentrations in the Antarctic spring using KOMPSAT-1 EOC imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(7): 1905-1912.
- Luckman, A., L. Padman, and D. Jansen, 2009. Persistent iceberg groundings in the western Weddell Sea, Antarctica, *Remote Sensing of Environment*, 114(2): 385-391.
- Magagi, R., and M. Bernier, 2003. Optimal condition for wet snow detection using RADARSAT SAR data, *Remote Sensing of Environment*, 84(2): 221-233.
- Mäkynen, M.P., B. Cheng, M.H. Similä, T. Vihma, and M.T. Hallikainen, 2007. Comparisons between SAR backscattering coefficient and results of a thermodynamic snow/ice method for the Baltic Sea land-fast sea ice, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(5): 1131-1141.
- Markus, T., and D.J. Cavalieri, 2000. An enhancement of the NASA team sea ice algorithm, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(3): 1387-1398.
- Markus, T., D.J. Cavalieri, A.J. Gasiewski, M. Klein, J.A. Maslanik, D.C. Powell, B.B. Stankov, J.C. Stroeve, and M. Sturm, 2006. Microwave signatures of snow on sea ice: Observations, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(11): 3081-3090.
- Oppenheimer, M., 1998. Global warming and the stability of the West Antarctic Ice Sheet, *Nature*, 393: 325-332.
- Picard, G. and M. Fily, 2006. Surface melting observations in Antarctica by microwave radiometers: Correcting 26-year time series from changes in acquisition hours, *Remote Sensing of Environment*, 104(3): 325-336.
- Powell, D.C., T. Markus, D.J. Cavalieri, A.J. Gasiewski, M. Klein, J.A. Maslanik, J.C. Stroeve, and M. Sturm, 2006. Microwave signatures of snow on sea ice: Modeling, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(11): 3091-3102.
- Rignot, E. and R.H. Thomas, 2002. Mass balance of polar ice sheets, *Science*, 297(5586): 1502-1506.
- Tedesco, M., and J. Miller, 2007. Observations and statistical analysis of combined active-passive microwave space-borne data and snow depth at large spatial scales, *Remote Sensing of Environment*, 111(2-3): 382-397.
- Velicogna, I., 2009. Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE, *Geophysical Research*

- Letters*, 36, L19503, doi:10.1029/2009GL040222.
- Vinnikov, K.Y., A. Robock, R.J. Stouffer, J.E. Walsh,
C.L. Parkinson, D.J. Cavalieri, J.F.B. Mitchell,
- D. Garrett, and V.F. Zakharov, 1999. Global warming and northern hemisphere sea ice extent, *Science*, 286(5446): 1934-1937.