

북극의 KOMPSAT-1 EOC 영상과 SSM/I NASA Team 해빙 면적비의 비교 연구

한향선 · 이훈열[†]

강원대학교 지구물리학과

Comparative Study of KOMPSAT-1 EOC Images and SSM/I NASA Team Sea Ice Concentration of the Arctic

Hyangsun Han and Hoonyol Lee[†]

Department of Geophysics, Kangwon National University

Abstract : Satellite passive microwave(PM) sensors have been observing polar sea ice concentration(SIC), ice temperature, and snow depth since 1970s. Among them SIC is playing an important role in the various studies as it is considered the first factor for the monitoring of global climate and environment changes. Verification and correction of PM SIC is essential for this purpose. In this study, we calculated SIC from KOMPSAT-1 EOC images obtained from Arctic sea ice edges from July to August 2005 and compared with SSM/I SIC calculated from NASA Team(NT) algorithm. When we have no consideration of sea ice types, EOC and SSM/I NT SIC showed low correlation coefficient of 0.574. This is because there are differences in spatial resolution and observing time between two sensors, and the temporal and spatial variation of sea ice was high in summer Arctic ice edge. For the verification of SSM/I NT SIC according to sea ice types, we divided sea ice into land-fast ice, pack ice, and drift ice from EOC images, and compared them with SSM/I NT SIC corresponding to each ice type. The concentration of land-fast ice between EOC and SSM/I SIC were calculated very similarly to each other with the mean difference of 0.38%. This is because the temporal and spatial variation of land-fast ice is small, and the snow condition on the ice surface is relatively dry. In case of pack ice, there were lots of ice ridge and new ice that are known to be underestimated by NT algorithm. SSM/I NT SIC were lower than EOC SIC by 19.63% in average. In drift ice, SSM/I NT SIC showed 20.17% higher than EOC SIC in average. The sea ice with high concentration could be included inside the wide IFOV of SSM/I because the drift ice was located near the edge of pack ice. It is also suggested that SSM/I NT SIC overestimated the drift ice covered by wet snow.

Key Words : sea ice concentration, KOMPSAT-1 EOC, SSM/I, NASA Team algorithm, land-fast ice, pack ice, drift ice.

요약 : 인공위성 수동 마이크로파(passive microwave, PM) 센서는 1970년대부터 극지 해빙의 면적비(sea ice concentration, SIC)와 표면 온도(ice temperature), 적설 두께(snow depth) 등을 관찰하고 있

다. 특히 SIC는 기후 및 환경 변화 관찰을 위한 1차 요소로 고려되는 등 다양한 연구 분야에서 중요한 역할을 하기 때문에 PM SIC의 지속적인 검증과 보정이 필요하다. 본 연구에서는 2005년 7-8월 북극해의 가장 자리를 촬영한 KOMPSAT-1 EOC 영상으로부터 SIC를 계산하였고, 이를 NASA Team(NT) 알고리즘으로 계산된 SSM/I SIC와 비교하였다. EOC와 SSM/I NT SIC는 서로 다른 해상도와 관측 시각을 가지며 북극의 여름철 해빙 분포지역의 가장자리에서 해빙의 시공간적인 변화가 크기 때문에, 해빙의 유형을 고려하지 않았을 경우 0.574의 낮은 상관성을 보였다. 해빙의 유형에 따른 SSM/I NT SIC를 검증하기 위하여 EOC 영상으로부터 정착빙, 부빙, 유빙으로 해빙 형태를 분류하였고, 각 유형 별로 EOC와 SSM/I NT SIC를 비교하였다. 정착빙의 면적비는 EOC와 SSM/I NT SIC 사이에서 평균 오차가 0.38%로 매우 유사한 값을 나타냈다. 이는 정착빙의 시공간적인 변화가 작기 때문이며, 표면에 쌓인 눈은 건조한 상태일 것으로 추정되었다. 부빙의 경우 NT 알고리즘에서 면적비가 과소평가되는 빙맥(ice ridge)과 new ice가 많이 관찰되었으며, 이로 인해 SSM/I NT SIC는 EOC보다 평균 19.63% 작은 값을 나타냈다. 유빙 지역에서 SSM/I NT SIC는 EOC보다 평균 20.17% 큰 값을 가진다. 유빙은 부빙의 가장자리와 가까운 지역에 위치하기 때문에 SSM/I의 넓은 IFOV 내에 비교적 높은 SIC를 가지는 부빙이 포함되어 오차를 일으킬 수 있다. 또한 유빙 표면에 쌓인 수분 함량이 높은 눈의 영향으로 SSM/I NT SIC가 과대 측정되었을 것으로 사료된다.

1. 서론

해빙(sea ice)은 바닷물이 얼어 형성된 것으로 대부분이 북극과 남극에 분포하고 있으며, 분포 면적이 최대로 팽창하는 겨울철에는 전 지구 표면의 6% 정도를 차지한다(Thomas and Dieckmann, 2003). 계절에 따라 분포 면적이 변화하는 해빙은 북극권의 대부분과 남극 대륙의 둘레에 위치하고 있으며, 전 지구적인 기후 및 환경 변화를 관찰하는데 일차적인 요소로 작용하고 있다(Björge *et al.*, 1997; Cavalieri *et al.*, 1999; Parkinson *et al.*, 2001; Vinnikov *et al.*, 1999; Zwally *et al.*, 2002). 또한 해빙은 식물성 플랑크톤의 분포 범위 및 성장 시기를 결정하는 등 해양 생물과도 밀접한 관계를 가지고 있어 여러 가지 과학 연구 분야에서 중요한 역할을 하고 있다(Arrigo and Dijken, 2004).

이러한 해빙은 인간의 접근이 제한적인 극지에 넓은 범위에 걸쳐 분포하기 때문에 인공위성 원격탐사를 이용한 관찰이 효과적이다. 현재 광학 센서(optical sensor)뿐만 아니라 마이크로파(microwave)를 이용한 고도계, 산란계, 복사계, SAR(synthetic aperture radar) 시스템 등 다양한 인공위성 센서가 해빙을 관찰하고 있다. 국외에서는 인공위성 원격탐사 자료를 이용하여 해빙 분포에 관한 다양한 연구가 이루어졌으며, 최근에도 많은 연구 논문들이 발표되고 있다. Worby and Comiso(2004)는 수동 마이크로파(passive microwave,

PM) 센서인 SSM/I(Special Sensor Microwave/Imager)로부터 관찰된 해빙 분포 영역의 가장자리를 현장에서 관측한 자료와 비교하였다. 그 결과 해빙이 성장하는 시기에 PM 센서는 비교적 정확한 해빙 분포 영역을 나타내지만 해빙이 녹는 시기에는 PM 자료의 정확성이 낮아짐을 밝혔다. Belchansky and Douglas(2000)도 SSM/I와 RADARSAT SAR 영상에 나타난 해빙 분포의 차이는 여름철에 가장 크다고 설명하였다. Allen and Long(2006)은 1999년부터 2005년까지 QuikSCAT 산란계와 SSM/I 자료를 이용하여 남극 해빙의 팽창과 축소를 연구하였다. 두 센서가 관찰한 일별(daily) 해빙 영역은 서로 비슷하였으며, 일부 오차가 발생하는 원인은 두 센서의 민감도 차이로 해석하였다. 우리나라에서도 해빙의 분포와 관련된 몇몇 연구가 진행된 바 있다. Hong *et al.*(2000)은 Topex/Poseidon 레이더 고도계 자료를 이용하여 남극 웨델 해(Weddell Sea)의 해빙 분포를 관찰하였으며, 해빙 분포 연구에 레이더 고도계 자료가 효과적이지만 한계점으로 수 km에 달하는 해상도를 지적하였다. 황중선 외(2003)의 연구에 의하면 남극 드레이크 해협(Drake Passage)에서 Topex/Poseidon 레이더 고도계, ERS-1 고도계, ERS-2 산란계, SMMR(Scanning Multichannel Microwave Radiometer)과 SSM/I는 서로 유사한 해빙 분포를 나타내었으며, 다양한 센서를 이용하면 단일 센서를 이용하는 경우보다 해빙 분포 연구의 정확성을

향상시킬 수 있음을 말하였다.

PM 센서는 광학센서에 비해 기상 상태나 태양 고도에 영향을 덜 받기 때문에 극빙 관찰에 매우 유용하다. 특히 PM 센서는 ESMR(Electrically Scanning Microwave Radiometer)이 발사된 1972년부터 현재까지 축적된 데이터를 제공하고 있어 그 효용 가치가 매우 높다(Cavalieri *et al.*, 1997; Stroeve *et al.*, 1998). 대표적인 PM 센서 중 하나인 SSM/I는 현재 DMSP의 F-13 위성에 탑재되어 운용되고 있으며, 19.35, 37.0, 85.5 GHz의 수직 편광(vertical polarization) 및 수평 편광(horizontal polarization) 채널과 22.235 GHz의 수직 편광 채널 등 총 4개 주파수, 7개 채널로 구성되어 있다(Derksen and Walker, 2003; Stroeve *et al.*, 1998). SSM/I의 각 채널은 서로 다른 순간 시야각과 데이터 샘플링 간격(grid spacing)을 가지며, 각각 해빙 표면의 복사세기를 관찰하여 1987년부터 현재까지 매일 북극과 남극의 해빙 면적비(sea ice concentration, SIC)를 알려주고 있다(Cavalieri *et al.*, 1997).

SSM/I가 관측한 해빙의 복사 세기로부터 SIC를 계산하기 위해 사용되는 NASA Team(NT) 알고리즘은 SMMR에 쓰이던 SIC 계산 알고리즘을 일부 개선한 것이며(Cavalieri *et al.*, 1991; Cavalieri *et al.*, 1984), SSM/I가 하루 동안 관측한 해빙의 복사세기로부터 일 평균 SIC를 계산한다. NT 알고리즘은 해빙 표면의 복사휘도 비율을 이용하여 multi-year ice와 first-year ice를 구분하고, 두 해빙 유형의 면적비를 합산하여 전체 SIC를 계산하며 이를 25 km×25 km 간격의 격자 형태로 나타낸다. NT 알고리즘은 해빙 표면의 복사휘도 비율을 사용하기 때문에 표면온도의 영향을 많이 받지 않는 장점이 있다. 그러나 복사 특성이 다른 두 가지 이상의 해빙 유형을 구별할 수 없고, 계절적, 지역적으로 변화하는 해빙 표면의 방사율을 고려할 수 없다. 또한 개방구역(open water)이 넓은 면적을 차지하고 있는 해빙 분포 영역의 가장자리 지역을 비롯하여 표면에 눈이 쌓여있는 해빙, 그리고 두께가 얇거나 표면에 물이 존재하는 해빙에 대해서는 오차를 나타낸다고 알려져 있다(Comiso *et al.*, 1997; Meier, 2005).

PM SIC의 정확성을 검증하기 위해 다양한 위성영상과의 비교 연구가 세계적으로 활발히 진행되어 오고 있으며, 대부분의 연구가 중저해상도의 광학 영상 혹은

SAR 영상을 이용하였다. 그러나 중저해상도의 광학 영상의 경우 해빙 표면을 자세히 관찰할 수 없는 단점이 있으며, SAR 영상은 new ice와 young ice의 구별이 모호한 문제점이 있다. 1999년 발사된 우리나라의 KOMPSAT-1(KOrea Multi-Purpose SATellite-1)은 6 m급의 고해상도 영상을 촬영할 수 있는 EOC(Electro-Optic Camera) 센서를 탑재하고 있다. EOC는 펜크로매틱 밴드(0.51 μm -0.73 μm)만을 가지는 광학 센서로써 다른 센서에 비해 고해상도의 영상을 제공하며, 해빙 표면의 자세한 관찰이 가능하여 해빙 연구 분야에 매우 유용하게 사용될 수 있다.

본 연구에서는 EOC 센서가 촬영한 2005년 여름 북극의 해빙 영상으로부터 SIC를 계산하였고 이를 SSM/I NT SIC와 비교하였다. 또한 서로 다른 특성을 가지는 해빙 유형이 SSM/I NT SIC에 어떻게 반영되는지 분석하였다.

2. 해빙의 종류와 해빙 면적비

해빙은 육지 기원인 빙하(glacier), 빙상(ice sheet), 빙붕(ice shelf), 빙산(iceberg)과는 달리 해양 기원의 얼음으로써 일반적으로 가을과 겨울에 걸쳐 성장하며, 여름이 되면 대부분이 녹는다. 그러나 일부 고위도 지역에서는 여름에도 해빙이 녹지 않고 존재할 수 있으며, 북극해의 중앙 부분과 남극의 웨델 해가 대표적인 지역이다.

해빙의 유형은 다음과 같은 분류 기준에 따라 다양하게 분류될 수 있다(Table 1). 먼저 연령과 형태 및 두께에 따라 multi-year ice, first-year ice, young ice, 그리고 new ice로 구분된다(WMO, 1970). Multi-year ice는 여름이 되어도 녹지 않는 해빙으로 보통 2-4년의 존재 기간을 가지며 두께는 3 m 이상이다. First-year ice는 봄과 여름철에 녹는 해빙으로 1년 이상 존재하지 않으며, 두께는 30 cm-2 m이다. 두께에 따라 thin first-year ice, medium first, thick first-year ice로 그 종류가 세분되기도 한다. Young ice의 두께는 10-30 cm이며 grey ice와 grey-white ice가 이에 해당한다. New ice는 해빙 형성 단계 중 가장 첫 번째 단계에 해당하는 해빙 유형으로 두께는 10 cm 이하로써 매우 얇고, frazil ice, grease ice, nilas, pancake ice 등 다양한 세부 유형으로 나눌 수 있다.

Table 1. Classification of sea ice types according to three classification systems (WMO, 1970).

Classification system of sea ice types							
according to age, thickness, and formation			according to characteristics of distribution, movement, and surface properties		according to distribution area and concentration		
New ice	Frazil ice	<10 cm	Land-fast ice	Forms and remains fast along the coast	Very open ice	10-30% ice concentration	
	Grease ice						
	Slush and Shuga				Open ice	40-60% ice concentration	
	Nilas						
Young ice	Pancake ice	10-15 cm	Drift ice	<70% ice concentration and various size	Close ice	70-80% ice concentration	
Grey ice	grey-white ice						15-30 cm
First-year ice	Thin first-year ice				30-70 cm	Pack ice	
	Medium first-year ice	70-120 cm					
Thick first-year ice	>120 cm						
Multi-year ice	Second-year ice	>3 m	Pack ice	>70% ice concentration and forms wide ice floe	Compact ice	100% ice concentration with no open water	
	Multi-year ice						

해빙 분류의 두 번째 기준은 분포 및 이동 특성, 그리고 표면의 성질이다. 이 기준에 따라 해빙은 land-fast ice, pack ice, drift ice로 분류될 수 있다(WMO, 1970). Land-fast ice는 해안선을 따라 형성된 해빙을 일컫는 용어로 정착빙이라고도 한다. 정착빙은 해안선과 얇은 대륙붕에 접합되어 형성된 해빙으로 공간적인 변화가 거의 없다. 일반적으로 1년 이상의 존재 기간을 가지며, 정착빙이 2 m 이상의 두께를 가지게 되면 이를 빙붕(ice shelf)이라 한다. Pack ice와 drift ice는 모두 유빙이란 용어로 번역될 수 있으나 약간의 차이가 있다. 유빙은 해수면 위에 떠서 해수의 흐름이나 바람에 의해 이동하는 해빙을 의미하는데, 일정한 면적 내에서 유빙이 차지하는 면적이 70% 이상일 경우 이를 pack ice라 하고, 70% 이하일 경우를 drift ice라 한다. 이 때, pack ice란 용어는 유빙 대신 부빙 또는 총빙이라는 용어로 번역될 수 있다. 본 논문에서는 pack ice를 부빙, drift ice를 유빙이라는 용어로 사용하였다.

해빙 분류에 있어서 세 번째 기준이 되는 것은 해빙의 분포 면적과 밀집도이다. 일정한 면적 안에서 해빙이 차지하는 면적에 따라 very open ice(10-30%), open ice(40-60%), close ice(70-80%), very close ice(90-100%), consolidation ice(100%), 그리고 compact ice(100%)로 세분될 수 있다(WMO, 1970). Consolidation ice과 compact ice는 모두 밀집도가 100%인 해빙을 의미하지만 바닷물의 노출 여부에 따라 구분된다.

Compact ice는 해빙의 표면 또는 내부에 바닷물이 전혀 관찰되지 않는 경우에 사용되는 용어이다.

Sea ice concentration(SIC)은 해빙 면적비 혹은 해빙 밀도라고도 한다. 일정한 면적 내에서 해빙이 차지하는 면적을 백분율로 나타낸 것으로 정의되며, 일반적으로 15% 이상의 SIC가 신뢰할 수 있는 수치로 사용된다. 15% 이상의 SIC를 나타내는 픽셀의 면적을 모두 더한 것을 해빙 영역(ice extent)이라 하고, 해빙 영역 안에서 해빙이 실제로 차지하는 면적(픽셀 면적×SIC)을 해빙 면적(ice area)이라 한다(Serreze *et al.*, 2003; Vinnikov *et al.*, 1999).

3. 연구지역 및 위성자료

이 논문의 연구지역은 랍테프 해(Laptev Sea), 추크치 해(Chukchi Sea), 동시베리아 해(East Siberian Sea), 보퍼트 해(Beaufort Sea), 그린란드 해(Greenland Sea), 그리고 허드슨 만(Hudson Bay)으로 이 지역들은 모두 북극해의 가장자리에 위치한다. 이러한 북극해의 가장자리 지역은 겨울철에 해빙이 넓은 범위에 걸쳐 분포하지만 여름철에는 대부분이 녹는 계절적 해빙지역에 해당한다. 계절적 해빙지역은 계절에 따라 해빙 표면의 방사율 변화가 심하기 때문에 SSM/I NT 알고리즘을 통해 계산된 SIC와 실제 SIC 사이에 오

차가 발생하는 지역이라고 할 수 있다. 계절적 해빙지역에서는 여름철에 주간의 기온이 빙점(freezing point) 위로 상승하기 때문에 해빙 표면이 녹아 크고 작은 웅덩이(melt pond)가 형성될 수 있으며, 빠른 속도의 바람 때문에 해빙의 위치와 해빙 표면의 구조 및 형태가 자주 변화한다(Markus *et al.*, 2003; Markus and Dokken, 2002).

EOC는 2005년 7-8월 사이에 이 지역들에서 총 10개 궤도를 촬영하였으며, 624개 영상을 획득하였다(Fig. 1, Table 2). EOC 영상은 광량이 충분한 여름철에 촬영되었으나, 대기의 변화가 심하고 연중 대부분 흐린 날씨를 나타내는 극지의 기후 특성 때문에 많은 영상을 이용할 수 없었다. 예를 들어 캐나다의 허드슨 만에서 획득된 1개 궤도의 EOC 영상에서는 해빙이 전혀 관찰되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 구름의 영향이 크지 않고 해빙의 유형 구분이 가능한 9개 궤도의 72개의 영상을 연구에 사용하였다(Table 2).

EOC 영상에서 관찰되는 해빙의 광역적인 특징과 분포 위치를 파악하기 위하여 EOC 영상과 촬영 시각 및 지역이 근접한 Terra/Aqua MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 영상과 ENVISAT ASAR(Advanced Synthetic Aperture Radar) 영상을 사용하였다. MODIS 영상은 2000 km의 넓은 swath를 가지기 때문에 EOC 영상에 비해 보다 넓은 지역의 정보를 파악하는데 유용하다. ENVISAT ASAR 영상은 해빙 표면의 상대적인 거칠기 정보를 제공해주며, MODIS 영상에서 구름으로 인해 확인하기 어려운 EOC 영상의 광역적인 촬영 위치 정보를 제공한다.

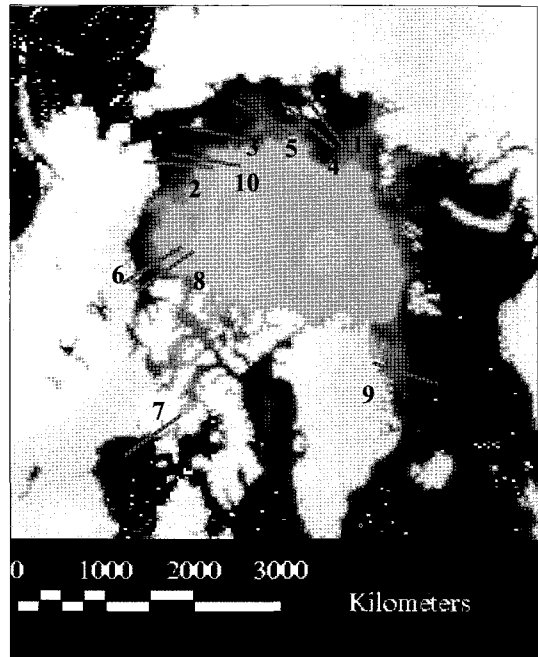


Fig. 1. KOMPSAT-1 EOC orbits overlying SSM/I NASA Team sea ice concentration image(5 August 2005, 6000 km × 6000 km). The orbit numbers are listed in Table 2.

SSM/I NT SIC 격자 자료는 NSIDC(National Snow and Ice Data Center)에서 제공받았다. NSIDC는 SSM/I를 비롯한 다양한 PM 센서의 SIC 자료를 제공해주고 있으며, 그 외에도 극지와 관련된 다양한 위성 영상 및 현장자료들을 제공하고 있다. 북극 SSM/I NT SIC 자료의 크기는 7600 km × 11200 km로써 북극 전역을 나타내며, KOMPSAT-1 EOC 영상이 촬영된 날짜의 자료를 획득하였다. 또한 EOC 영상의 촬영 전, 후일의 SSM/I NT SIC 자료도 같이 획득하였다.

Table 2. KOMPSAT-1 EOC images obtained from July to August 2005 in the Arctic sea ice edges.

No.	Date	Center Location	Geographical Designation	Scenes	Usable Scenes
1	2005/07/12	77.31N/129.93E	Laptev Sea	62	4
2	2005/07/15	72.95N/168.65W	Chukchi Sea	63	3
3	2005/08/05	73.05N/179.76E	East Siberian Sea	61	5
4	2005/08/06	76.44N/143.04E	Laptev Sea	64	4
5	2005/08/07	74.92N/159.60E	East Siberian Sea	62	25
6	2005/08/11	71.86N/130.01W	Beaufort Sea	62	4
7	2005/08/14	72.18N/157.59W	Hudson Bay	62	0
8	2005/08/22	73.89N/128.60W	Beaufort Sea	63	2
9	2005/08/25	76.66N/14.23W	Greenland Sea	64	14
10	2005/08/27	75.71N/179.21W	East Siberian Sea	61	11
Total			10 orbits	624	72

4. 위성영상의 처리 및 SIC 비교

보다 정확한 해빙 면적비의 비교 연구를 위해서는 EOC 영상의 기하보정이 중요하다. EOC 영상은 KOMPSAT-1의 궤도 정보에 의해 일차적인 기하보정이 이루어진다. 그러나 KOMPSAT-1의 궤도 정보를 통해 기하보정된 EOC 영상은 촬영시각이 가장 근접하고 같은 지역에서 획득된 MODIS 영상과 비교했을 때 약 5 km 정도의 오차가 발견되었다. EOC 영상에서는 지상 기준점으로 사용할 수 있는 육지 또는 인공구조물 등이 관찰되지 않는다. MODIS 영상의 공간해상도는 EOC 영상에 비해 취약하지만 촬영시각이 매우 근접하여 해빙의 위치 변화에 따른 영향을 최소화할 수 있으며, 기하보정에 유용하게 사용될 수 있다. 이에 따라 EOC 영상과 촬영 시각이 근접한 MODIS 영상을 이용하여 EOC 영상의 기하보정을 다시 수행하였다.

EOC 영상으로부터 SIC를 산출하기 위해서 감독분류(supervised classification) 방법 중 최단거리 분류법(minimum distance method)을 이용하였다. 대부분의 EOC 영상에서는 해빙의 표면이 매우 불균일하고, 해빙의 연령 및 두께와 관련된 현장 자료가 없기 때문에 연령과 형태, 두께에 따라 해빙의 유형을 분류할 수 없었다. 따라서 해빙과 바다의 두 가지로 분류 항목을 지정하여 감독분류를 수행하였고, 해빙과 바다의 면적을 계산하였으며, 이로부터 EOC 영상의 SIC(C_{EOC})를 산출하였다. 각 분류 항목별로 감독분류 결과에 대한 정확도를 Table 3에 나타내었다. 전체 정확도의 평균은 89.35%로 비교적 높은 값을 보였으나, 일부 영상에서 구름이 해빙으로 분류되는 등 분류 작업이 제대로 수행되지 못하였다. 이러한 영상에 한해서는 육안으로 오차를 보정하여 C_{EOC} 를 조정해 주었다.

C_{EOC} 를 SSM/I NT SIC 자료에서 EOC 영상이 획득된 위치에 해당하는 픽셀의 SIC($C_{SSM/I}$)와 비교하였다. 또한 EOC 영상의 촬영 일자 및 전, 후일의 SSM/I 자료로

부터 EOC 영상이 촬영된 지점과 그 주변 픽셀(cubic pixel, $3 \times 3 \times 3$ pixels)의 SIC를 구하였다. 그리고 cubic pixel SIC의 표준편차(σ_{cubic})를 계산하여 해빙의 시공간적인 불안정성을 파악하였는데, σ_{cubic} 이 작을수록 해빙이 시공간적으로 안정적이고 균일하다는 것을 의미한다.

Fig. 2는 북극의 C_{EOC} 와 $C_{SSM/I}$ 를 비교한 상관도이며, 15% 이상의 값을 가지는 데이터만 도시하였다. 각각의 데이터 포인트에 표시된 세로 막대는 σ_{cubic} 을 나타낸다. C_{EOC} 와 $C_{SSM/I}$ 는 15-95% 사이의 다양한 값을 가지고 있으며, 전체적으로 σ_{cubic} 이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 바람이나 해류에 의해서 해빙의 시공간적인 변화가 크다는 것을 의미한다. 전체 데이터 포인트에서 σ_{cubic} 의 평균($\overline{\sigma_{cubic}}$)은 4.97%로 계산되었고 C_{EOC} 와 $C_{SSM/I}$ 는 0.574의 낮은 상관계수를 나타낸다. 식 (1)에 의해 구해진 두 SIC 차이($C_{EOC} - C_{SSM/I}$, ΔC)의 평균($\overline{\Delta C}$)은 8.60%, 표준편차(σ_C)는 20.20%를 나타내 서로 잘 일치하지 않음을 보여준다.

$$\Delta C = C_{EOC} - C_{SSM/I} \quad (1)$$

C_{EOC} 와 $C_{SSM/I}$ 가 서로 큰 차이를 나타내는 1차적인 원인은 EOC와 SSM/I의 해상도 및 관측 시각의 차이에 있다. $C_{SSM/I}$ 격자 자료의 한 픽셀은 EOC 영상의 촬영 폭(swath width)보다 크다. 또한 EOC 영상은 한 시각에 촬영되었으나 $C_{SSM/I}$ 자료는 하루 동안 관측된 해빙 복사 세기의 평균으로부터 계산되기 때문에 여름철과 같이 해빙의 시공간적인 변화와 해빙 표면의 방사를 변화가 심할 경우 SIC가 서로 일치하지 않을 수 있다. 특히 해상도의 차이는 PM 센서의 SIC와 광학 및 SAR 영상의 SIC를 비교한 연구들에서 많이 언급되었다 (Belchansky and Douglas, 2000; Meier, 2005; Partington, 2000). 그러나 북극의 해빙은 계절과 지역에 따라 표면의 성질 및 방사의 변화가 심하고, 존재하는 해빙의 유형 및 해빙의 시공간적인 변화도 다르다 (Cavalieri *et al.*, 1991; Comiso *et al.*, 1997; Piwowar *et al.*, 1998). 따라서 단순히 해상도와 촬영 시각의 차이

Table 3. Classification Accuracies of KOMPSAT-1 EOC images.

Type	Accuracy	User's Accuracy(%)		Producer's Accuracy(%)		Overall Accuracy(%)	
		Average	STD	Average	STD	Average	STD
Ice		88.76	10.21	86.06	11.18	89.35	7.72
Open water		88.89	9.76	90.20	9.24		

만을 가지고 C_{EOC} 와 $C_{SSM/I}$ 의 차이를 설명할 수 없다.

5. 해빙 특성에 따른 EOC와 SSM/I NT SIC의 차이

본 연구에서는 EOC 영상에서 관찰되는 해빙의 유형을 분포 및 이동 특성, 그리고 표면의 성질에 따라 정착빙, 부빙, 유빙의 3가지 유형으로 분류하였다. 해빙 유형 분류를 위해 Terra/Aqua MODIS 영상과 ENVISAT ASAR 영상을 참고하여 보다 넓은 범위에 대한 해빙의 분포 특성을 파악하였다. Fig. 2에 각각의 유형 별로 데이터 포인트의 색상을 달리하여 C_{EOC} 와 $C_{SSM/I}$ 를 도시하였는데, 정착빙은 검정색, 부빙은 흰색, 유빙은 회색으로 나타내었다. 해빙의 특성에 따른 분석을 위하여 Fig. 2에 서로 다른 색상으로 나타낸 데이터 포인트를 각각의 해빙 유형 별로 나누어 Fig. 3(a), 4(a), 그리고 5(a)에 도시하였다. 이 때, ΔC 값이 $\overline{\Delta C}$ 값을 중심으로 σ_C 값의 2배 이상 벗어나는 이상값(outlier)의 제거 작업을 두 번 수행하였고, 제거된 데이터 포인트는 투명하게 표시하였다. 이상값 제거 과정을 통해 정착빙과 유빙에 해당하는 데이터에서 각각 2개, 부빙 유형에서 3개의 데이터 포인트가 제거되어 총 65

개의 데이터 포인트가 분석에 사용되었다. 각 유형 별 상관도에는 C_{EOC} 와 $C_{SSM/I}$ 의 상관계수, $\overline{\Delta C}$, σ_C , 그리고 $RMSE$ 를 나타내었다.

1) 정착빙 (Land-Fast Ice)

EOC 영상에서 정착빙이 관찰되는 경우, C_{EOC} 와 그에 상응하는 $C_{SSM/I}$ 의 상관도를 Fig. 3(a)에 나타내었다. 총 65개의 포인트 중에서 8개(약 12%)의 데이터 포인트가 이 그룹에 해당한다. C_{EOC} 와 $C_{SSM/I}$ 는 0.975의 높은 상관계수를 가지며, $\overline{\Delta C}$ 는 0.38%로 두 SIC 사이의 차이가 거의 없다. 또한 $\overline{\sigma_{cubic}}$ 값도 2.87%로 계산되어 다른 해빙 유형에 비해 해빙의 시공간적인 변화가 가장 작다. 이는 정착빙이 해안선을 따라 형성되어 육지에 묶여있는 특성을 가지기 때문이다. Fig. 3(b)의 EOC 영상(8월 25일, 그린란드 해)에서 정착빙의 표면에 눈이 쌓여있는 것이 관찰된다. Fig. 3(c)는 Fig. 3(b)의 EOC 영상과 같은 날, 동일한 지역에서 촬영된 ENVISAT ASAR 영상으로 해안 주변을 둘러싸고 있는 정착빙이 넓은 지역에 걸쳐 분포하는 것이 관찰되며, 정착빙의 표면은 비교적 어둡게 나타남을 볼 수 있다. 이는 해빙 표면에 빙맥(ice ridge)이 거의 관찰되지 않고, 표면이 비교적 부드러우며 눈이 쌓여있기 때문인 것으로 추측된다. SSM/I의 NT 알고리즘은 표면에 눈이 쌓여 있는 해

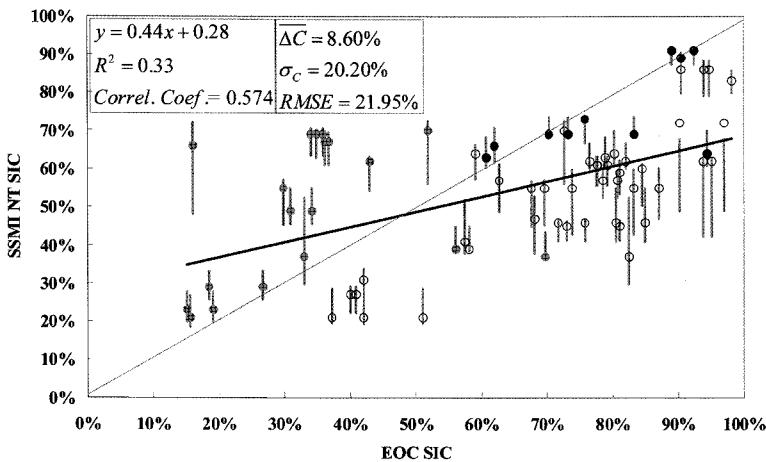


Fig. 2. The relationship between EOC sea ice concentration (C_{EOC}) and SSM/I NASA Team sea ice concentration ($C_{SSM/I}$) of the Arctic sea ice edges. The vertical bars are the spatio-temporal standard deviation of sea ice concentration for SSM/I cubic pixels (σ_{cubic}). The black points are snow covered land-fast ice identified from EOC images. The white points are pack ice while grey points indicate drift ice. The black line is linear regression line for all data points.

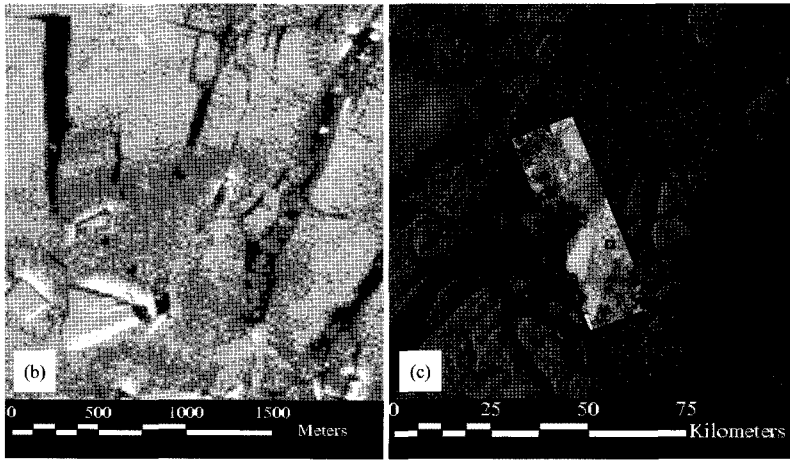
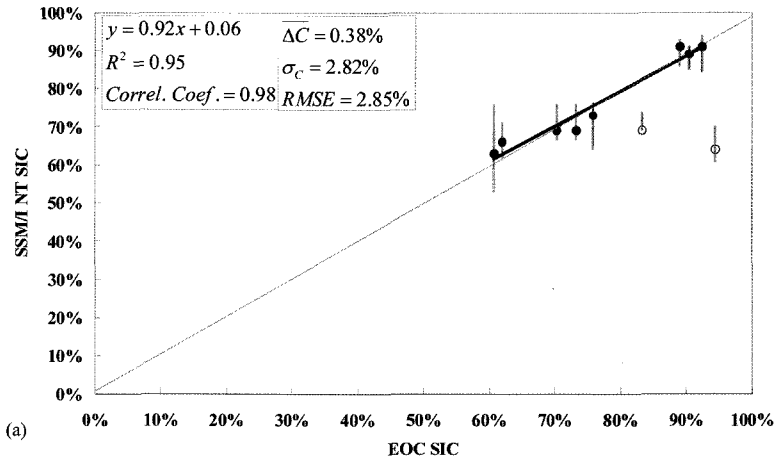


Fig. 3. (a) The relationship between EOC sea ice concentration (C_{EOC}) and SSM/I NASA Team sea ice concentration ($C_{SSM/I}$) of land-fast ice. The vertical bars are spatio-temporal standard deviation of sea ice concentration for SSM/I cubic pixels (σ_{cubic}). The outliers outside $2\sigma_c$ from the ΔC were removed. The black line is the linear regression line after the outlier removal. (b) A portion of KOMPSAT-1 EOC sea ice image (Greenland Sea, 2 km \times 2 km) on 25 August 2005. The snow covered surface of land-fast ice is relatively smooth with cracks and leads. (c) ENVISAT ASAR sea ice image (Greenland Sea, 100 km \times 100 km) on 25 August 2005 is overlaid by KOMPSAT-1 EOC images obtained on the same day. The land-fast ice is widespread on the locations between Greenland eastern seashore and small islands. The box corresponds to the location of (b).

빙에 대해 실제보다 작은 SIC를 계산한다(Comiso *et al.*, 1997; Markus and Cavalieri; 2000, Meier, 2005). 그러나 정착빙에 대한 C_{EOC} 와 $C_{SSM/I}$ 는 Fig. 3(a)에서 서로 유사한 값을 나타내고 있는데, 이는 정착빙의 시공간적인 변화가 작을 뿐만 아니라 표면에 쌓인 눈이 $C_{SSM/I}$ 에 많은 영향을 주지 않는다는 것을 의미한다. 해빙 표면을 덮은 눈은 건조한 상태일 것으로 예상되며, 낮은 온도에서 결빙되어 설빙(snow ice)의 형태로 변형될 수 있다(Maksym and Jeffries, 2000). 건조한 상태의 눈은 해빙의 방사율에 거의 영향을 주지 않

다(Pullianen *et al.*, 1999). 따라서 건조한 눈으로 덮인 정착빙에 대해 SSM/I NT 알고리즘이 SIC를 과소측정하지 않을 가능성이 있다. 그러나 본 연구에서는 현장 자료가 없고 주변 지역의 기후에 따라 다양한 특성을 나타내는 정착빙의 특성(Shirasawa *et al.*, 2005)으로 인해 추측만이 가능하다.

2) 부빙 (Pack Ice)

넓은 면적의 부빙이 우세하게 나타나는 EOC 영상의 SIC(C_{EOC})와 그에 상응하는 $C_{SSM/I}$ 의 상관도를 Fig.

4(a)에 나타내었다. 이 데이터 군에는 전체 데이터 포인트 중 40개(약 62%)가 해당된다. C_{EOC} 와 $C_{SSM/I}$ 는 0.878의 비교적 높은 상관계수를 가지지만 $\overline{\sigma_{cubic}}$ 은 5.24%로 해빙의 시공간적인 불안정성이 큰 것으로 나타났다. 또한 모든 C_{EOC} 값이 $C_{SSM/I}$ 보다 높은 값을 나타내었으며, ΔC 는 19.63%로 계산되었다. C_{EOC} 가 $C_{SSM/I}$ 보다 높은 값을 가지는 데에는 해빙의 시공간적인 변화와 더불어 부빙 내에 존재하는 new ice 또는 young ice의 영향이 크다. Fig. 4(b)는 7월 12일 랍테프해의 부빙 지역에서 획득된 EOC 영상으로 부빙의 표면

은 전체적으로 균질하지 않고, 작은 크기의 빙백과 개빙 구역이 많이 노출되어 있음이 관찰된다. 이는 높은 온도와 강한 바람 때문인 것으로 판단되며, 해빙의 두께는 얇을 것으로 예상된다. 기온이 빙점 아래로 내려가는 야간 또는 바람이 강하게 부는 날에 부빙 내부에 노출된 개빙구역에서는 frazil ice 또는 shuga와 같은 new ice가 형성된다(Dethleff *et al.*, 1998). New ice와 같이 두께가 얇은 해빙은 마이크로파 복사 특성이 개빙구역 또는 바다와 매우 유사하기 때문에 multi-year ice와 first-year ice만을 구분하는 NT 알고리즘에서 실제보

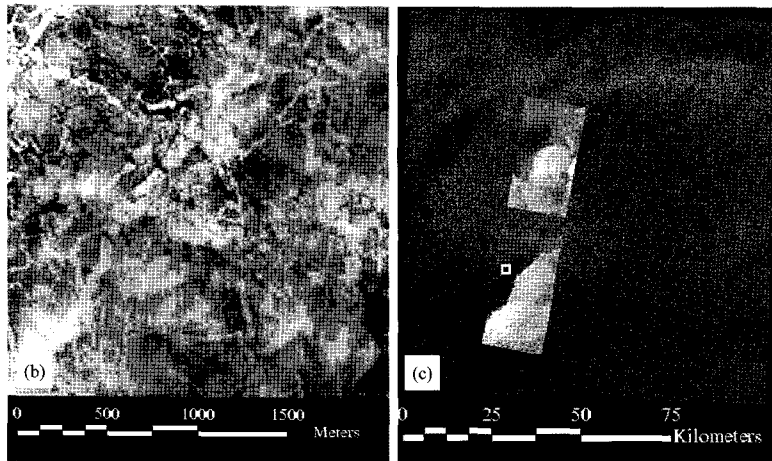
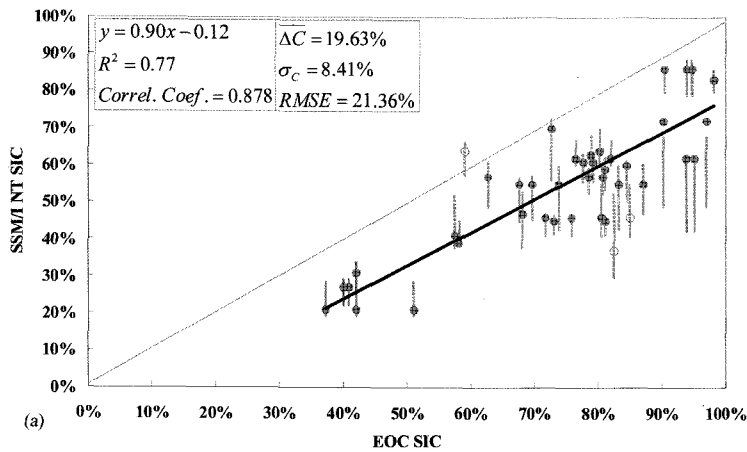


Fig. 4. (a) The relationship between EOC sea ice concentration (C_{EOC}) and SSM/I NASA Team sea ice concentration ($C_{SSM/I}$) of pack ice. The vertical bars are spatio-temporal standard deviation of sea ice concentration for SSM/I cubic pixels (σ_{cubic}). The outliers outside $2\sigma_c$ from the ΔC were removed. (b) A portion of KOMPSAT-1 EOC sea ice image (Laptev Sea, 2 km \times 2 km) on 12 July 2005. The small ice ridges and open water on top of ice floe are observed. (c) ENVISAT ASAR sea ice image (Laptev Sea, 100 km \times 100 km) on 11 July 2005 overlaid by KOMPSAT-1 EOC images obtained on 12 July 2005. The ice floe of rough surface is widespread on the ENVISAT image while a thick cloud cover is observed on EOC image. The box corresponds to the location of (b).

다 작은 SIC를 계산하게 하는 주요 원인으로 작용한다 (Comiso *et al.*, 1997; Han and Lee, 2007; Markus and Cavalieri, 2000). 또한 해류와 바람에 의해 해빙이 서로 결합되어 형성되는 빙맥이 존재하거나, 해빙 표면의 녹고 어는 현상이 지속되면 해빙 표면의 방사율이 변화하게 되는데, 이러한 경우 NT 알고리즘은 해빙 면적비를 작게 계산하는 경향이 있다(Meier, 2005). Fig. 4(c)는 7월 11일의 ENVISAT ASAR 영상으로 Fig. 4(b)의 EOC 영상과 같은 지역에서 획득되었다. ASAR 영상에서는 넓은 범위에 걸친 부빙이 확인되며, 표면은

비교적 거친 것으로 나타났다.

3) 유빙 (Drift Ice)

Fig. 5(a)는 넓은 면적의 개빙구역과 크고 작은 유빙이 많이 관찰되는 EOC 영상의 SIC(C_{EOC})와 그에 상응하는 $C_{SSM/I}$ 의 상관도이며, 총 65개의 데이터 포인트 중에서 17개(약 26%)의 데이터 포인트가 이에 해당한다. $\overline{\Delta C}$ 는 -20.17% 로 C_{EOC} 값은 $C_{SSM/I}$ 보다 작은 값을 가지는 것으로 계산되었으며, $\overline{\sigma_{cubic}}$ 값은 5.27% 로 정착빙, 부빙에 비해 해빙의 시공간적인 변화가 가장 큰 것으로

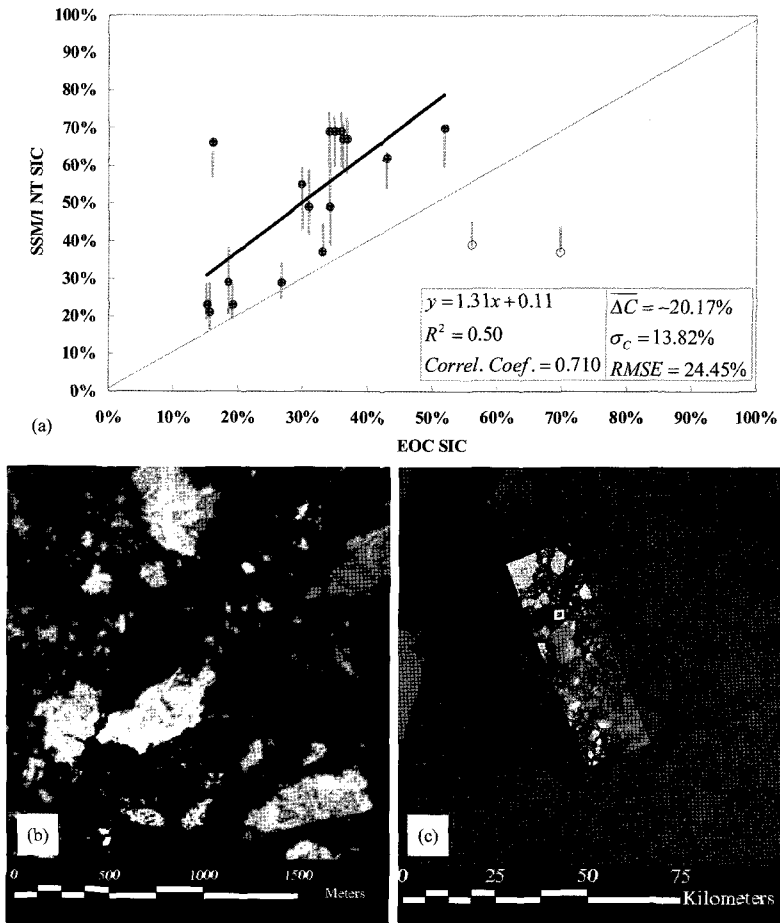


Fig. 5. (a) The relationship between EOC sea ice concentration (C_{EOC}) and SSM/I NASA Team sea ice concentration ($C_{SSM/I}$) of drift ice. The vertical bars are spatio-temporal standard deviation of sea ice concentration for SSM/I cubic pixels (σ_{cubic}). The outliers outside $2\sigma_c$ from the $\overline{\Delta C}$ were removed. (b) A portion of KOMPASAT-1 EOC sea ice image (Greenland Sea, 2 km x 2 km) on 25 August 2005. The pack ice of various size and wide open water are observed. (c) ENVISAT ASAR sea ice image (Greenland Sea, 100 km x 100 km) on 25 August 2005 overlaid by KOMPASAT-1 EOC images obtained on the same day. Many chunks of 'very open pack ice' and 'open pack ice' are observed. The box corresponds to the location of (b).

나타났다. Fig. 5(b)의 8월 25일 그린란드 해에서 획득된 EOC 영상에서 유빙은 그 크기가 다양하며, 표면에는 부빙의 표면에서와 같이 작은 크기의 빙맥이 많이 형성되어 있다. EOC 영상과 같은 날짜에 촬영된 ENVISAT ASAR 영상에서는 표면이 비교적 거칠고 다양한 크기를 가지는 유빙이 많이 분포하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 5c). 이런 유빙 지역에서 NT 알고리즘은 C_{EOC} 보다 높은 SIC를 계산하고 있는데, 이는 SSM/I의 순간 시야각(Instantaneous Field Of View, IFOV)과 EOC의 촬영 폭의 차이가 원인이 될 수 있다(Meier, 2005). SSM/I의 채널 중에서 NT 알고리즘에 사용되는 19 GHz와 37 GHz의 IFOV는 각각 $69 \text{ km} \times 43 \text{ km}$, $37 \text{ km} \times 28 \text{ km}$ 이다(Derksen and Walker, 2003). 그러나 EOC 영상의 촬영 폭은 18 km로써 SSM/I의 IFOV와 큰 차이를 보이고 있다. EOC 영상이 촬영한 유빙은 부빙의 가장자리와 가까운 지역에 분포하며, 이 지역에서 SIC는 그 값이 급격히 변화한다. 따라서 SSM/I의 IFOV는 높은 SIC를 나타내는 넓은 면적의 부빙을 포함할 수 있지만, EOC 영상의 촬영 폭에는 낮은 SIC의 유빙만이 포함될 수 있다. 유빙 지역은 정착빙과 부빙에 비해 저위도에 위치하기 때문에 표면에 관찰되는 눈은 비교적 축축한 상태일 것으로 예상된다. 해빙 표면의 눈이 축축할 경우, 마이크로파의 복사 특성이 흑체(blackbody)에 가깝기 때문에 $C_{SSM/I}$ 가 실제보다 높은 SIC를 관찰할 수 있다(Markus and Dokken, 2002; Mätzler and Wiesmann, 1999). 그러나 정착빙과 마찬가지로 표면의 눈에 대한 현장 자료가 없기 때문에 추측만 가능하다.

6. 토의 및 결론

북극의 여름철 북극해의 가장자리 지역에서 NASA Team(NT) 알고리즘으로 계산된 SSM/I 해빙 면적비(sea ice concentration, SIC)를 검증하기 위하여 2005년 7-8월 북극 해빙을 촬영한 6 m 해상도의 KOMPSAT-1 EOC 영상을 이용하였다. EOC 영상으로부터 감속분류를 통하여 해빙과 바다를 분류하였고 육안보정을 통해 SIC를 산출하였으며(C_{EOC}), 이를 SSM/I NT SIC($C_{SSM/I}$)와 비교하였다. 해빙 유형을 분류하지 않고 비교하였을 때

C_{EOC} 는 $C_{SSM/I}$ 와 0.574의 상관계수로 잘 일치하지 않았으며, 두 SIC 차이($C_{EOC} - C_{SSM/I}$, ΔC)의 평균($\overline{\Delta C}$)은 8.60%로 나타났다. 이는 해빙 분포 영역의 가장자리 지역에서 해빙의 시공간적인 변화가 크기 때문이다.

해안선을 따라 정착빙이 형성된 지역에서 C_{EOC} 는 $C_{SSM/I}$ 와 0.975의 매우 높은 상관계수를 나타내었으며, $\overline{\Delta C}$ 는 0.38%로 서로 잘 일치하였다. 이는 정착빙의 시공간적인 변화가 크지 않기 때문이다. 정착빙의 표면에는 NT 알고리즘에서 오차의 원인이 되는 눈이 존재하였으나, 해빙의 방사에 거의 영향을 주지 않는 건조한 상태일 것으로 추측되었다. 부빙이 관찰된 지역에서 $\overline{\Delta C}$ 는 19.63%로 C_{EOC} 는 $C_{SSM/I}$ 보다 큰 값을 나타낸다. 부빙의 표면에는 작은 크기의 개빙구역과 빙맥이 많이 관찰되었는데, 개빙구역은 기온이 낮아질 경우 new ice가 형성될 수 있는 공간이 되며, 이는 빙맥과 함께 NT 알고리즘에서 실제보다 작은 SIC를 계산하게 하는 원인이 된다. 유빙이 관찰되는 지역에서 C_{EOC} 는 $C_{SSM/I}$ 보다 작은 값을 나타내었다($\overline{\Delta C} = -20.17\%$). 이는 유빙의 시공간적인 변화가 정착빙과 부빙에 비해 크고, SSM/I의 IFOV와 EOC의 촬영 폭 차이에 기인한다. 유빙을 촬영한 EOC 영상은 대부분 부빙의 가장자리와 가까운 지역에서 획득되었기 때문에, SSM/I의 IFOV에는 넓은 면적의 부빙이 포함될 수 있고, 높은 SIC가 산출될 수 있다. 그러나 EOC 영상에서는 낮은 SIC의 유빙만이 관찰될 가능성이 있다. 또한 유빙 표면의 눈은 축축한 상태일 것으로 예상되는데, 축축한 성질의 눈은 NT 알고리즘이 SIC를 과하게 계산하는 원인으로 작용한다.

본 연구에서는 현장 관측 자료를 사용할 수 없었지만 고해상도 팬크로매틱 영상인 EOC 영상을 이용하여 해빙의 표면 특성을 자세하게 관찰할 수 있었고, 이를 통하여 북극의 여름철 해빙의 특성에 따른 SSM/I NT SIC를 평가할 수 있었다. 본 연구를 통하여 그 동안 지구 온난화의 지표로 사용되었던 PM SIC의 검증 및 보정에 대한 지속적인 연구의 필요성이 인지되었으며, 보다 정밀한 PM SIC의 검증 및 평가를 위하여 고해상도의 광학 센서 및 SAR 센서와 현장 자료의 동시 관측이 요구된다.

우리나라의 경우 고해상도의 광학센서를 탑재한 KOMPSAT-1(6 m급)과 KOMPSAT-2(1 m급)를 보유하고 있으며, X-band SAR를 탑재한 KOMPSAT-5를

발사할 예정에 있다. 또한 제 2 남극 대륙기지 건설 및 쇄빙선 건조가 진행 중에 있다. 이와 같은 인공위성 및 쇄빙선, 그리고 남극 대륙 기지는 전 세계적으로 매우 경쟁력이 있으며, 앞으로 PM SIC 검보정 연구를 비롯한 다양한 분야의 극지 연구 및 개발에 많은 기여를 할 것으로 전망된다.

사 사

이 논문은 한국해양연구원부설극지연구소 및 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었습니다(KRF-2006-511-C00123). SSM/I NASA Team 해빙 면적비 자료와 MODIS 영상은 NSIDC(National Snow and Ice Data Center)에서 제공받았으며 ENVISAT ASAR 영상은 ESA(European Space Agency)로부터 제공받았습니다(AO no. 3966).

참고문헌

황중선, 이방용, 심재설, 홍성민, 윤호일, 권태영, 민경덕, 김정우, 2003. 마이크로웨이브 원격탐사를 이용한 남극 웨델해 해빙 관측, 자원환경지질학 회지, 36(2): 141-148.

Allen, J. R. and D. G. Long, 2006. Microwave observations of daily Antarctic sea-ice edge expansion and contraction rates, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3(1): 54-58.

Arrigo, K. R. and G. L. van Dijken, 2004. Annual cycles of sea ice and phytoplankton in Cape Bathurst polynya, southern Beaufort Sea, Canadian Arctic, *Geophysical Research Letters*, 31(8): L08304.

Belchansky, G. I. and D. C. Douglas, 2000. Classification methods for monitoring Arctic sea ice using OKEAN passive/active two-channel microwave data, *Remote Sensing of*

Environment, 73(3): 307-322.

Björge, E., O. M. Johannessen, and M. W. Miles, 1997. Analysis of merged SMMR-SSM/I time series Arctic and Antarctic sea ice parameters 1978-1995, *Geophysical Research Letters*, 24(4): 413-416.

Cavalieri, D. J., C. L. Parkinson, P. Gloersen, J. C. Comiso, and H. J. Zwally, 1999. Deriving long-term time series of sea ice cover from satellite passive-microwave multisensor data sets, *Journal of Geophysical Research*, 104(C7): 15803-15814.

Cavalieri, D. J., J. P. Crawford, M. R. Drinkwater, D. T. Eppler, L. D. Farmer, R. R. Jents, and C. C. Wackerman, 1991. Aircraft active and passive microwave validations of sea ice concentrations from the DMSP SSM/I, *Journal of Geophysical Research*, 96(C12): 21989-22008.

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., P. Gloersen, and W. J. Campbell, 1984. Determination sea ice parameters with the NIMBUS 7 SMMR, *Journal of Geophysical Research*, 89(D4): 5355-5369.

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.

Dethleff, D., P. Loewe, and E. Kleine, 1998. The Laptev Sea flaw lead-detailed investigation ice formation and export during 1991/1992 winter season, *Cold Regions Science and Technology*, 27(3): 225-243.

Derksen, C., and A. E. Walker, 2003. Identification of systematic bias in the cross-platform (SMMR and SSM/I) EASE-grid brightness temperature

- time series, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(4): 910-915.
- Han, H. and H. Lee, 2007. Comparative study of sea ice concentration by using DMSP SSM/I, Aqua AMSR-E, and KOMPSAT-1 EOC, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2007*, Barcelona, Spain, 23-27 July.
- Hong, C., S. Hong, J. Hwang, D. Lee, and J. W. Kim, 2000. Distribution of altimetry-implied sea ice in the Weddell Sea, Antarctica: preliminary results, *Proceedings of International Symposium on Remote Sensing 2000*, Kyungju, 1-3 November.
- Maksym, T. and M. O. Jeffries, 2000. A one-dimensional percolation model of flooding and snow ice formation on Antarctic sea ice, *Journal of Geophysical Research*, 105(C11): 26313-26331.
- Markus, T. and D. J. Cavalieri, 2000. An enhancement NASA team sea ice algorithm, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(3): 1387-1398.
- Markus, T., D. J. Cavalieri, M. A. Tschudi, and A. Ivanoff, 2003. Comparison of aerial video and Landsat 7 data over ponded sea ice, *Remote Sensing of Environment*, 86(4): 458-469.
- Markus, T. and S. T. Dokken, 2002. Evaluation of late summer passive microwave Arctic sea ice retrievals, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(2): 348-356.
- Mätzler, C. and A. Wiesmann, 1999. Extension of the microwave emission model of layered snowpacks to coarse-grained snow, *Remote Sensing of Environment*, 70(3): 317-325.
- Meier, W. N., 2005. Comparison of passive microwave ice concentration algorithm retrievals with AVHRR imagery in Arctic peripheral seas, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(6): 1324-1337.
- Parkinson, C. L., D. Rind, R. J. Healy, and D. G. Martinson, 2001. The impact of sea ice concentration accuracies on climate model simulations with the GISS GCM, *Journal of Climate*, 14(12): 2606-2623.
- Partington, K. C., 2000. A data fusion algorithm for mapping sea-ice concentrations from Special Sensor Microwave/Imager data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(4): 1947-1958.
- Piwowar, J. M., D. R. Peddle, and E. F. Ledrew, 1998. Temporal mixture analysis of arctic sea ice imagery: A new approach of monitoring environmental change, *Remote Sensing of Environment*, 63(3): 195-207.
- Pullianien, J. T., J. Grandell, and M. T. Hallikainen, 1999. HUT snow emission model and its applicability to snow water equivalent retrieval, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(3): 1378-1390.
- Serreze, M. C., J. A. Maslanik, T. A. Scambos, F. Fetterer, J. Stroeve, K. Knowles, C. Fowler, S. Drobot, R. G. Barry, and T. M. Haran, 2003. A record minimum arctic sea ice extent and area in 2002, *Geophysical Research Letters*, 30(3): 10(1)-10(4), doi: 10.1029/2002GL016406.
- Shirasawa, K., M. Leppäranta, T. Saloranta, T. Kawamura, A. Polomoshnov, and G. Surkov, 2005. The thickness of coastal fast ice in the Sea of Okhotsk, *Cold Regions Science and Technology*, 42(1): 25-40.
- Stroeve, J., J. Maslanik, and L. Xiaoming, 1998. An intercomparison of DMSP F11- and F13-derived sea ice products, *Remote Sensing of Environment*, 64(2): 132-152.
- Thomas, D. N. and G. S. Dieckmann, 2003. *Sea Ice: an introduction to its physics, chemistry, biology, and geology*, Blackwell Science, Malden, MA, USA.
- 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.
- Worby, A. P. and J. C. Comiso, 2004. Studies of the Antarctic sea ice edge and ice extent from satellite and ship observations, *Remote Sensing of Environment*, 92(1): 98-111.
- World Meteorological Organization, 1970. *WMO-Sea ice nomenclature*, 1970 ed., Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva.
- Zwally, H. J., J. C. Comiso, C. L. Parkinson, D. J. Cavalieri, and P. Gloersen, 2002. Variability of the Antarctic sea ice 1979-1998, *Journal of Geophysical Research*, 107(C5): 1029-1047.