



# 해빙/적설탐지(SSI: Snow and Sea Ice) 알고리즘 기술 분석서 (SSI-v1.0)

NMSC/SCI/ATBD/SSI, Issue 1, rev.0  
2012.12.12

REPORT SIGNATURE TABLE

국가기상위성센터



해빙/적설탐지  
알고리즘 기술 분석서

Code: NMSC/SCI/ATBD/SSI  
Issue: 1.0 Date:2012.12.21  
File: NMSC-SCI-ATBD-SSI\_v1.0.hwp  
Page: 22

Function	Name	Signature	Date
Prepared by	Lee, Jung Rim		2013. 3. 4
Reviewed by			
Authorised by			



해빙/적설탐지  
알고리즘 기술 분석서

Code: NMSC/SCI/ATBD/SSI  
Issue: 1.0 Date:2012.12.21  
File: NMSC-SCI-ATBD-SSI\_v1.0.hwp  
Page: 22

DOCUMENT CHANGE RECORD

Version	Date	Pages	Changes

## 차 례

1. 개요
2. 배경 및 목적
3. 알고리즘
  - 3.1 이론적인 배경 및 근거
  - 3.2 산출방법
  - 3.3 산출과정
  - 3.4 검증
    - 3.4.1 검증방법
    - 3.4.2 검증자료
    - 3.4.3 시공간일치방법
    - 3.4.4 검증결과분석
4. 천리안위성 발사 후 COMS화 및 경계값 재설정
  - 4.1 경계값재설정
  - 4.2 적용결과
5. 산출결과 해석방법
6. 문제점 및 개선 가능성
7. 참고문헌

## List of Tables

- Table 1 : Input data for the SSI Algorithm.
- Table 2 : Criteria used in the SSI algorithm.
- Table 3 : SSI results.
- Table 4 : Description of the auxiliary data for SSI validation.
- Table 5 : The collocation methods for SSI validation.

## List of Figures

Figure 1: Spectral reflectance for different land surface cover types. Spectral bands of the GOES imager channels 1 and 2 are shown with bars. (Romanov et al., 2000)

Figure 2: Flow chart of SSI algorithm.

Figure 3: Timeseries of visible reflectance before (a,b) and after solar zenith angle correction (c,d) on January 29 and 30 in 2005.

Figure 4: NDVI image(a), snow and sea ice extent before(b) and after(c) NDVI correction on January 4, 2007.

Figure 5: Sea Ice extent with CMDPS algorithm before(a) and after(b) the application of SST at 0333 UTC 27 January 2007.

Figure 6: SSI validation methods.

Figure 7: The validation results for snow (a) and sea ice (b) during 2007-2008 winter seasons. Graphs on the left hand side are the daily variation, and the right hand side are the monthly mean from November 2007 through April 2008.

Figure 8: Sea ice extent map by CMDPS (a) and IMS (b) on 12 January 2008. Light blue, dark blue and gray represent sea ice, open sea water and cloud, respectively.

Figure 9: Daily snow and sea ice map on December 21, 2011.

Figure 10: Validation results of CMDPS SSI with IMS from October to December in 2011.

Figure 11: Snow detection results of IMS (upper left), CMDPS (upper right), MODIS(bottom right) on 18 December 2011, and COMS visible channel image at 0345 UTC of this day. IMS tends to overdetect snow area. Otherwise, CMDPS SSI looks agree well with CMDPS VIS image, and MODIS agree with CMDPS SSI rather than IMS.

Figure 12: SSI result (a), QC flag\_count (b) and QC flag\_% (c) on 11 January 2008. White, light gray, dark gray, light blue and dark blue in (a) stand for snow, cloud, clear land, sea ice and open sea water, respectively. Dark through white colors in (b) and (c) express from small number to large number.

## List of Acronyms

COMS : Communication, Ocean, and Meteorological Satellite  
CMDPS : Coms Meteorological Data Processing System  
FAR : False Alarm Rate  
GOES : Geostationary Operational Environmental Satellites  
IMS : Interactive Multi-sensor Snow and Ice Mapping System  
IST : Ice Surface Temperature  
MCSST : Multi-Channel Sea Surface Temperature  
MODIS : Moderate-Resolution Imaging spectro radiometer  
MTSAT-1R : Multi-functional Transport SATellite  
NDVI : Normalized Difference of Vegetation Index  
NOAA/NESDIS:  
POD : Probability of Detection  
POFD : Probability of False Detection  
SSM/I : Special Sensor Microwave/Imager  
SST : Sea Surface Temperature

## 1. 개요

해빙과 적설은 지표면과 대기 사이의 상호작용(Berry, 1981; Walsh et al., 1985), 산업과 인간 활동에 큰 영향을 미친다. 실제로 적설로 인해 교통, 산업 등 인간 생활에 많은 제약이 따르며, 해빙의 존재는 석유 시추 등 산업과 해상항로의 이용에 위험요인으로써 정확한 해빙 탐지가 필요시 된다. 특히 적설은 그 자체로서 중요한 수자원의 공급원으로 농업, 산업 뿐 아니라 황사발생과도 밀접한 관계가 있다. 또한 황사는 겨울철 발원지의 적설량에 의해 영향을 받는데, 정확하게 탐지된 적설역은 예보 모델의 초기 자료로 사용되어 황사의 주기와 발생 빈도 예측에 중요한 역할을 한다(Kurosaki et al., 2004).

본 문서는 CMDPS의 해빙/적설 알고리즘의 기술 분석서로서 2장에서는 해빙/적설 산출의 물리적인 배경과 일반적인 산출 방법, 산출목적에 관해 기술하였고, 3장에서 CMDPS 알고리즘의 이론적인 배경과 근거, 산출 방법과 산출 과정, 산출 결과의 검증에 관한 내용을 기술하였으며, 4장에서 산출결과의 해석 방법, 5장에서는 문제점 및 개선 가능성에 대해 상세히 기술하였다.

## 2. 배경 및 목적

해빙과 적설의 가장 두드러진 특징은 높은 알베도와 낮은 표면 온도이다. 위성을 이용한 해빙/적설 산출은 크게 광학센서를 이용한 방법(Salomonsen et al., 2004)과 마이크로웨이브 센서를 이용하는 방법(Groby, 1988)이 있다. 광학센서를 이용하는 산출방법은 첫 번째로 가시채널( $0.4-0.7\mu\text{m}$ )에서 해빙/적설의 높은 반사도를 이용하여 산출한다. 해빙과 적설은 바다표면과 지표면에 대해 모두 높은 가시채널 반사도를 갖기 때문에 청천역에서 해빙/적설의 탐지가 용이하다. 한편, 구름이 존재할 때, 구름의 높은 반사도로 인해 구름과 해빙/적설의 구분이 어려워지는데, 이때 근적외채널( $1-4\mu\text{m}$ )을 이용하여 구름과 해빙/적설을 구분한다. 근적외채널에서 해빙/적설은 구름에 비해 낮은 반사도를 가지므로 이 차이를 이용하는 데, 일반적으로 사용되는 파장대는  $1.6\mu\text{m}$ 와  $2.2\mu\text{m}$ , 그리고 권운과 같이 얇은 구름의 식별을 위해  $1.38\mu\text{m}$  등을 사용한다. 하지만 이같이 광학 센서를 이용한 해빙/적설 산출 방법은 구름이 존재할 때, 지표면 정보를 얻을 수 없는 한계를 가지고 있다. 반면 마이크로웨이브 센서를 이용한 방법은 구름의 영향을 받지 않고, 해빙/적설의 연령과 해빙의 표면 온도까지 산출할 수 있다. 하지만 공간 분해능이 20km 이상으로 아주 크기 때문에 화소 오염

이 쉬워 정확도에 한계를 갖는다. 실제로 마이크로웨이브 센서를 이용한 SSM/I의 해빙/적설 산출물은 공간분해능이 25km로 과소 또는 과대 추정하는 경우가 많다.

COMS는 정지궤도 위성으로 같은 지역에 대해 하루 여러 번 정기관측을 한다. 광학센서의 가장 큰 한계점이 지표면이 구름으로 덮혀 있을 때 지표면 정보를 얻을 수 없는 것이지만, COMS 위성의 경우 극궤도 위성에 비해 훨씬 더 많은 관측 영상을 얻을 수 있어 이와 같은 한계를 줄일 수 있다. 또한 산출된 해빙/적설 탐지 결과는 COMS 영역 내의 해빙/적설의 감시와 함께 구름탐지 알고리즘에서의 오차요인(적설역이 구름대로 잘못 탐지됨)을 보정하는데 지표가 될 것으로 기대한다.

### 3. 알고리즘

#### 3.1. 이론적인 배경 및 근거(Theoretical Background)

본 알고리즘에서는 해빙/적설이 가시채널에서 높은 반사도를 갖고 단파적외채널에서 낮은 반사도를 갖는 특성을 이용한다(Kidder et al., 1984). 해빙과 적설은 바다표면과 지표면에 비해 높은 가시채널 반사도를 갖기 때문에 청천역에서 해빙/적설의 탐지가 용이하다. 한편, 구름이 존재할 때, 구름의 높은 반사도로 인해 구름과 해빙/적설의 구분이 어려워지는데 이때, 단파적외채널을 이용하여 구름과 해빙/적설을 구분한다(Bunting et al., 1982; Carroll, 1990; Klein et al., 1998, Rosenthal and Dozier, 1996). 해빙/적설 탐지에 적합한 단파적외 파장대는 1.6  $\mu\text{m}$ 와 2.2  $\mu\text{m}$  이지만, 본 알고리즘에서는 COMS 위성의 단파적외 채널인 3.7  $\mu\text{m}$  파장대를 사용한다. 3.7  $\mu\text{m}$  파장대는 낮 동안 태양으로부터의 반사성분과 지구로부터의 방출성분을 함께 측정하기 때문에 해빙/적설 탐지에 직접 사용은 불가능하다. 따라서 이로부터 반사성분만을 유도하여 사용하는데, Allen et al.(1990)과 Romanov et al.(2000)은 3.7  $\mu\text{m}$ 의 방출률과 11  $\mu\text{m}$ 의 방출률이 같다고 가정하고 두 채널을 이용해 3.7  $\mu\text{m}$  채널의 반사성분을 계산했다. 하지만 본 알고리즘에서는 두 채널의 단순 차(3.7  $\mu\text{m}$ -11  $\mu\text{m}$ )를 단파적외 채널의 반사도 값으로 가정하여 사용한다. 단파적외채널을 이용한 해빙/적설 탐지의 문제점으로 구름에 의한 오염화소가 나타나는 것인데, 본 알고리즘에서도 권운과 같이 얇은 구름에서 적설/해빙의 3.7  $\mu\text{m}$  채널의 반사성분 스펙트럼과 겹쳐지기 때문에 얇은 구름이 있을 경우 적설로 잘못 탐지되는 경우가 있다. 또한 삼림지역과 지형이 복잡한 지역에서는 적설이 있어도 지표면 반사도가 낮아지기 때문에 적설 탐지가 어렵다.

### 3.2. 산출방법(Methodology)

청천의 지표면에서 해빙/적설 탐지는 가시채널 반사도로 쉽게 탐지가 가능하다. 하지만 구름이 있으면 구름의 높은 반사도로 인해 해빙/적설과의 구분이 어렵다. 반면 단파적외 채널의 반사도는 구름에서는 높은 값을 갖지만 해빙/적설에서는 낮은 값을 갖기 때문에 광학 센서를 이용한 해빙/적설 탐지에 중요한 자료로 사용된다. 해빙/적설 탐지에 사용되는 단파적외 채널은 1.6  $\mu\text{m}$ 와 2.2  $\mu\text{m}$  등이 많이 사용된다. 하지만 COMS 에는 이런 채널들의 부재로 단파적외채널인 3.7  $\mu\text{m}$  자료를 사용한다. Fig. 1 은 GOES 위성 자료로부터 얻은 다양한 지표면에 대한 반사특성을 나타낸 그래프이다(Romanov et al., 2000). 굵은 선이 적설의 반사특성을 나타내는데 가시광선 영역에서 높은 반사도를 갖지만 단파적외 영역에서는 낮은 반사도를 갖는다. 하지만 3.7  $\mu\text{m}$  는 주간에 태양으로부터의 반사성분 뿐만 아니라 지표로부터의 방출성분도 함께 관측한다. 3.7  $\mu\text{m}$  채널 자료로부터 반사성분만을 뽑아내기 위해 본 알고리즘에서는 10.8  $\mu\text{m}$  채널 값을 사용했다. 3.7  $\mu\text{m}$  와 10.8  $\mu\text{m}$  의 방출 특성은 온도와 지표 타입 등에 따라 다르게 나타나지만, 본 알고리즘에서는 두 채널의 방출량이 같다고 가정하고 3.7  $\mu\text{m}$  와 10.8  $\mu\text{m}$  의 단순차를 구해 단파적외의 반사 성분으로 사용했다.

광학센서를 이용한 해빙/적설 탐지의 가장 큰 문제점은 구름에 의한 오염과 삼림이 존재하는 지역에서의 과소 탐지이다. 특히 COMS 위성에는 해빙/적설 탐지의 최적화 파장대인 1.6  $\mu\text{m}$  채널의 부재로 3.7  $\mu\text{m}$  채널을 사용하는데 구름과 해빙/적설의 특성이 겹쳐지는 부분이 많아 특히 저위도 지역에서의 구름오염 화소가 많이 나타난다. 이의 보정을 위해 다른 적외채널차 방법을 사용하여 이를 보정하고자 하였다. 또한 삼림지역에서 적설이 과소 추정되는 문제를 보정하기 위해 Normalized Difference of Vegetation Index (NDVI)를 사용해 이를 보정하고자 하였다. 반면 COMS 위성의 많은 관측 자료들을 이용해 해빙/적설을 탐지하고 일일 합성장을 만들어 구름의 영향을 최소화 하였다.

품질정보의 생산은 일일합성 시 각각의 화소에 대해 하루 동안 해빙/적설로 탐지된 회수를 더해서 quality flag를 만들어내는데, 이 수가 클수록 그 화소가 실제 해빙/적설일 가능성이 크고, 값이 작거나 1 일 경우 구름에 의한 오염화소일 가능성이 크다.

CMDPS의 SSI 알고리즘은 정지궤도 위성을 이용해 해빙/적설을 탐지하는 것으로, 해빙/적설이 존재하는 고위도 지역에 대해서는 위성 천정각 뿐만 아니라 태양 천정각도 크기 때문에 해빙/적설 탐지에 많은 한계점이 있다. 또한 제한된 채널수로 인해 3.7  $\mu\text{m}$  과 10.8  $\mu\text{m}$  의 단순차를 단파적외채널의 반사 성분으로 가정하여 사용하므로 구름 오염 화소의 가능성도 다른 알고리즘에 비해 더 크다. 이런 한계점을 극복하는 방법으로 하루 동안 모든 영상에 대해 산출된 해빙/적설 화소를 합성하고 quality flag를 사용하여 최종 SSI 산출 결과를

만들고자 한다.

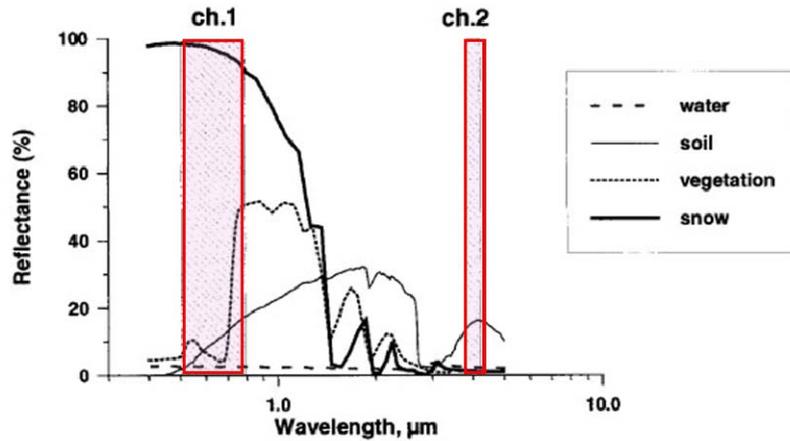


Figure 1. Spectral reflectance for different land surface cover types. Spectral bands of the GOES imager channels 1 and 2 are shown with bars. (Romanov et al., 2000)

### 3.3. 산출과정

해빙/적설 산출 흐름도를 Fig. 2 에 나타냈다. 알고리즘은 크게 자료입력, 전처리, 각 영상에서의 육지/해양에 대한 계산 및 적설/해빙 탐지(DPM), 그리고 품질검사를 포함한 일일 합성장 산출(후처리)로 이루어져 있다.

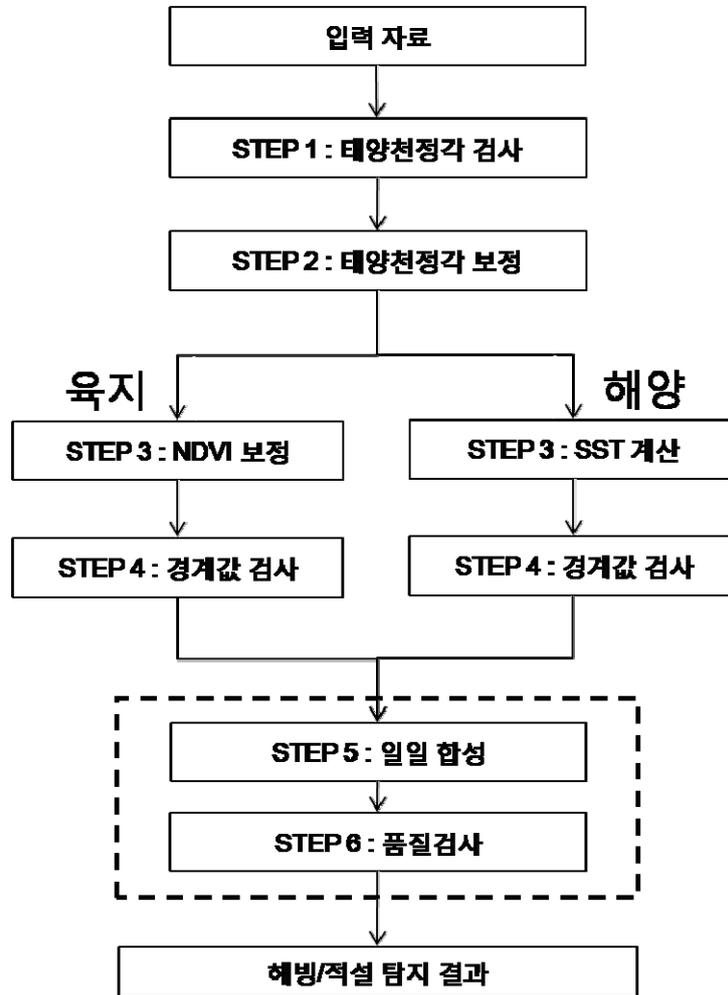


Figure 2. Flow chart of SSI algorithm.

## 입력자료

해빙/적설 탐지는 기본적으로 가시채널과 단파적외채널, 적외1채널 값이 들어가지만, 구름화소와 지표면 보정을 위해 COMS 위성의 5개 채널 자료를 모두 사용한다. 보조 자료로는 적설 산출시 삼림지역 보정을 위한 10일 합성 NDVI 자료와 land/sea mask 자료가 필요하고, 동적 입력 자료로 주야간 구분과 가시채널 반사도 보정을 위한 태양천정각, 해수면 온도 산출을 위한 위성천정각이 입력 자료로 사용 된다(Table 1).

Table 1. Input data for the SSI Algorithm.

	Data	공간 해상도
COMS	VIS	11000 × 11000
	SWIR	2750 × 2750
	WV	2750 × 2750
	IR1	2750 × 2750
	IR2	2750 × 2750
정적입력자료	Land/sea mask	2750 × 2750
	10-day composite NDVI	2750 × 2750
동적입력자료	Solar zenith angle	2750 × 2750
	Satellite zenith angle	2750 × 2750

### STEP 1: 태양 천정각 검사

해빙/적설 탐지 알고리즘은 낮 동안의 가시채널과 단파적외채널의 반사도를 이용한 방법으로, 주간에만 산출이 가능하다. 따라서 태양천정각이 80° 보다 작을 경우에만 알고리즘을 적용한다. 한편, 위성천정각도 65° 보다 작은 영역에 대해서만 해빙/적설 탐지 알고리즘을 적용한다.

### STEP 2: 태양 천정각 보정

같은 반사도를 갖는 지표면이라도 태양 천정각에 따라 가시채널 반사도가 달라진다. 따라서 영상에서 같은 반사 특성을 갖는 적설/해빙역이라도 지역과 시간에 따른 태양천정각의 변화에 따라 다른 값을 갖는다. 이는 경계값을 이용해 적설/해빙을 탐지하는 본 알고리즘의 탐지 결과에 큰 영향을 준다. Fig. 3의 (a)와 (b)는 GOES-9 위성의 가시채널 자료를 이용하여 적설역에 대한 반사도의 일변화를 나타낸 것이다. 낮 동안 태양의 고도가 높아짐에 따라 높은 반사도를 보이다가 정오를 지나면서 점차 낮아지는 변화를 보이고 있다. 이는 태양의 고도 변화에 따른 것으로 같은 지점의 적설/해빙에 대해 반사도의 일변화를 보여준다. 반면 (c)와 (d)는 태양 천정각을 이용하여 식 (1)과 같이 보정한 후의 하루 동안의 시계열을 보여준다.

$$mod\_sza\_alb = ch1\_alb / \cos(\theta_0) \quad (1)$$

여기서,  $ch1\_alb$  과  $mod\_sza\_alb$  는 각각 가시채널 반사도와 태양 천정각 보정 후의 반사도이고,  $\theta_0$  는 태양 천정각이다. 태양 천정각 보정된 가시채널 반사도는 전체적으로 값이 상승하였으며, 태양 천정각의 일변화에 따른 변화가 거의 나타나지 않고 표준화 된 것을 볼 수 있다. 본 알고리즘에서는 이렇게 보정된 반사도에 경계치를 두어 구름이 없는 지표면으로부터 적설을 탐지하였다.

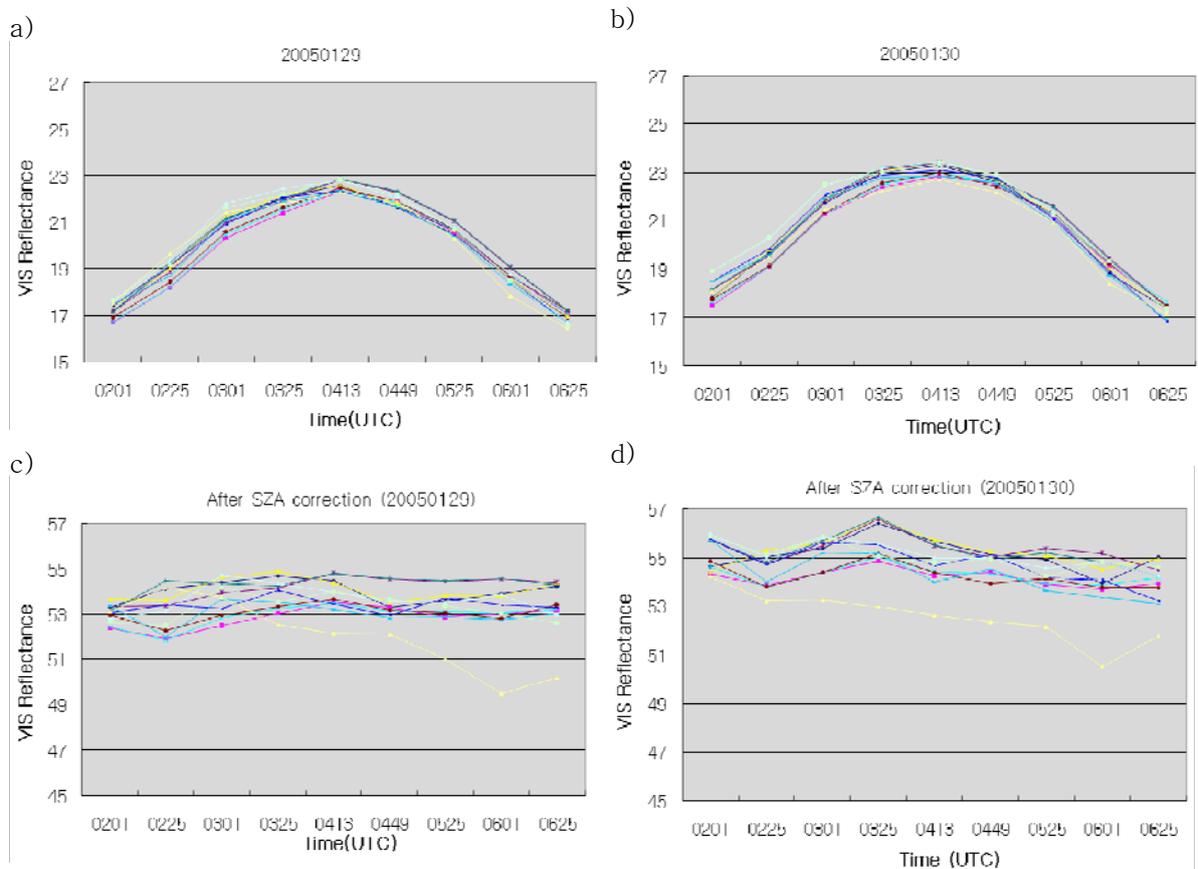


Figure 3. Timeseries of visible reflectance before (a,b) and after solar zenith angle correction (c,d) on January 29 and 30 in 2005.

### STEP 3 : 해양/육지에 따른 보정

STEP 3에서는 해양과 육지에 대해 각각 보정하였는데, 해양에 대해서는 MCSST 계수(기상연구소, 2006)를 이용한 해수면 온도를 산출하고, 육지에 대해서는 삼림 지역의 과소추정을 보정하기 위해 식생지수를 이용한 가시채널 반사도를 보정하였다.

### STEP 3.1 : NDVI 보정

삼림이 있는 산악지역에서는 지표면에 적설이 존재해도 삼림이 적설면을 덮기 때문에 적설역의 반사도가 적어지고, 결과적으로 적설역으로 탐지하기가 어렵다. Fig.4 의 (a)는 1월 평균 NDVI 를 영상으로 표출한 것이다. NDVI 는 식생의 분포를 정규화하여 나타낸 지수로서 0~1의 값을 갖고, 값이 클수록 식생이 많이 분포함을 나타낸다. 그림에서 초록색이 파란색보다 식생이 많이 분포하는 것으로, 한반도와 중국 특히 블라디보스토크에서 오호츠크해에 이르는 산악지역에 삼림이 많이 분포하고 있다. 2007년 1월 4일에 적설역을 탐지한 결과를 (b)에 나타냈다. 산악인 백두산 근처와 블라디보스토크 북부에 적설이 거의 탐지되지 않고 있는데 이는 삼림의 영향이다. 따라서 본 알고리즘에서는 이 둘 사이의 관계를 이용하여 식(2)와 같이 삼림지역에 대한 반사도를 보정하였다.

$$\begin{aligned} \text{조건} : \text{NDVI} < 0.5, \\ \text{mod\_sza\_ndvi\_alb} = \text{mod\_sza\_alb} \times (\text{NDVI} + 1) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, *mod\_sza\_alb* 와 *mod\_sza\_ndvi\_alb* 는 각각 식(1)을 이용해서 보정된 반사도와 NDVI 보정 후의 반사도이고, NDVI는 10일 합성 NDVI 자료이다. 가정으로 NDVI가 0.5 이상인 경우엔 어느 정도 숲이 울창하여 적설이 존재하지 못하는 기후로 단정하고 반사도 보정을 하지 않았다. 식(3)을 이용한 삼림지역에 대한 보정 결과는 (c)에 나타냈다. 보정 후 적설을 과소 탐지하던 백두산 부근과 블라디보스토크 북부의 삼림지역에 적설이 잘 탐지되고 있다.

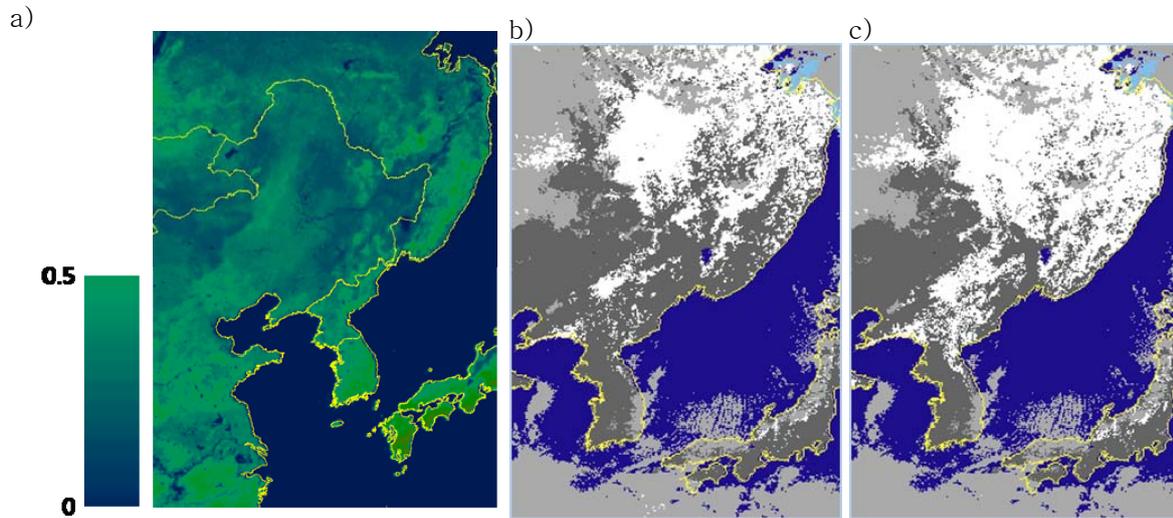


Figure 4. NDVI image(a), snow and sea ice extent before(b) and after(c) NDVI correction on January 4, 2007.

### STEP 3.2 : SST 계산

해빙 탐지 알고리즘에서 각 영상에 대해 MCSST 계수를 이용한 해수면온도를 계산하여 해빙 탐지의 조건으로 적용하였다. MODIS의 해빙 산출물은 반사도를 이용한 해빙화소 탐지와 더불어 해빙의 표면온도 (Ice Surface Temperature, IST)를 계산하여 두 조건이 모두 만족하는 화소에 대하여 해빙으로 결정한다. 하지만 본 COMS의 경우 한계점들로 인해 IST 산출에 어려움이 있다. 첫 번째로, 정지궤도 기상위성인 COMS의 경우 해빙이 존재하는 고위도 지역의 위성천정각이 아주 크기 때문에 산출 정확도에 문제가 있다. MODIS의 경우 위성천정각이 0-45°에 대해서만 IST를 산출하지만, COMS의 관측 영역에서 해빙이 산출되는 지역의 위성천정각은 55° 이상이다. 다음으로 실측자료의 부재이다. MODIS 등 다른 기관의 경우, 해빙이 존재하는 지점에서 특별 관측을 통하여 실측 자료를 얻어 IST 산출 회귀계수를 산출하지만, CMDPS의 경우 실측자료를 얻기가 거의 불가능하다. 이러한 이유로 해빙 산출시 IST를 산출하지 못하지만, 본 알고리즘에서는 각 영상의 모든 화소에 대해 MCSST의 계수를 이용한 해수면 온도를 산출하고 해빙 산출시 온도가 높은 구름화소가 해빙으로 잘못 탐지되는 화소를 제거하는데 사용했다.

$$\text{MCSST} = A \times \text{Tb11} + B \times \text{DT} + C \times (\sec \theta - 1) \times \text{DT} + D \quad (3)$$

$$A=1.0189310$$

B=2.1369202

C=0.27073261

D=2.1392299

여기서, DT는 Tb11-Tb12이고,  $\theta$ 는 위성천정각이다. Fig. 5는 2007년 1월 27일 0333 UTC의 MTSAT-1R 영상에 CMDPS 알고리즘을 적용하여 산출한 해빙 탐지 결과이다. 그림의 (a)는 SST를 적용하기 전의 값으로 붉은 원으로 표시된 부분과 같이 구름에 의해 오염된 화소가 해빙으로 잘못 탐지되고 있다. 그림의 (b)는 SST를 적용한 탐지 결과로써 전체적으로 그림 (a)와 같은 패턴을 보이고 있지만, 붉은 원으로 표시된 부분의 구름 오염화소가 사라진 것을 볼 수 있다.

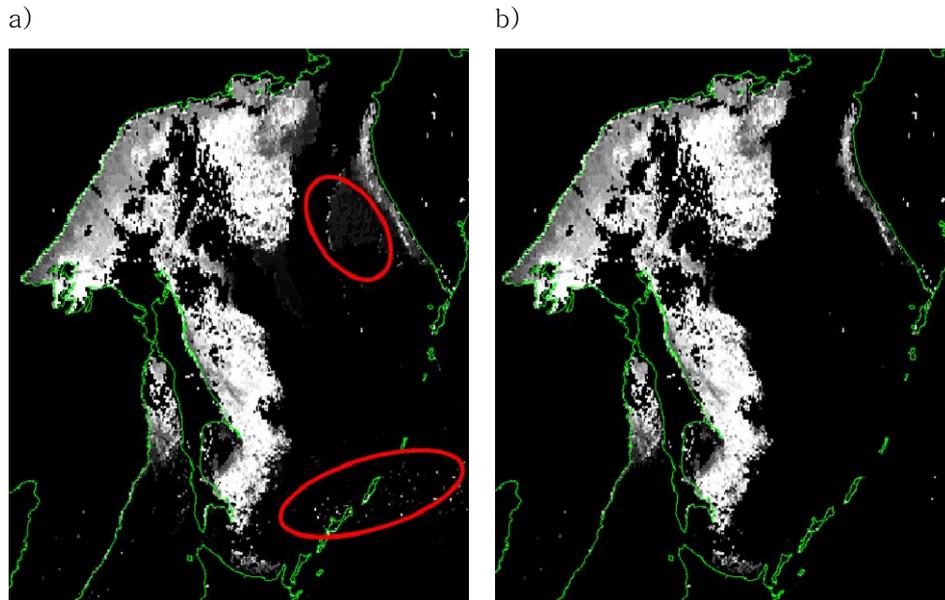


Figure 5. Sea Ice extent with CMDPS algorithm before(a) and after(b) the application of SST at 0333 UTC 27 January 2007.

현재, 해빙 탐지를 위한 MCSST 산출 계수는 2006년 기상연구소의 차세대 위성자료 활용기술 연구(II) 과제의 연구결과에 따른 값으로, COMS 위성 발사 후 CMDPS의 해수면 온도 산출물(SST)의 MCSST 계수가 새로 계산되었을 때, 함께 수정되어야 할 것이다.

#### STEP 4: 해빙/적설에 대한 경계값 검사

본 알고리즘에서 사용되는 경계값들을 Table 2에 나타냈다. 경계값은 MTSAT과

COMS에 대해서 COMS 경계값은 COMS가 발사되고 자료가 서비스된 이후인 2011년 12월에 재설정되었다. 해빙의 경우 태양천정각으로 보정된 반사도와 SWIR-IR1, IR1-WV, IR1 그리고 SST의 경계값을 이용하고, 적설에 대해선 태양천정각과 NDVI로 보정된 반사도, SWIR-IR1, IR1-WV 그리고 IR1의 경계값을 이용하여 탐지한다. 각각의 요소에 대한 설명과 경계값 결정 방법에 대해 다음에 소개한다.

Table 2. Criteria used in the SSI algorithm.

Criteria	적설		해빙		Explanation
	MTSAT	COMS	MTSAT	COMS	
mod_sza_alb	-		13.5 <	25 <	청천의 바다에서 해빙 탐지
mod_sza_ndvi_alb	28 <	35 <	-	-	청천의 지표면에서 적설 탐지
SWIR-IR1	2.5 - 8	2.5 - 10	0 - 3.5	0 - 5	구름과 적설/해빙 분류
IR1-WV	15 - 35	15 - 35	15 - 35	15 - 35	상층운, 사막지역 보정
IR1	< 277 K	< 277 K	245-277K	245-277K	하층운 보정
SST	-		< 278 K	< 278 K	바다에서 구름오염화소 보정

- mod\_sza\_alb

태양천정각으로 보정된 반사도 값으로 청천의 바다에서 해빙을 탐지하며, 구름의 경계값이 된다.

- mod\_sza\_ndvi\_alb

태양천정각과 NDVI로 보정된 반사도 값으로 청천의 육지에서 적설을 탐지하고, 구름의 경계값이 된다.

- SWIR-IR1

구름과 적설/해빙이 함께 존재할 때 이 둘의 구분을 위한 경계값이 된다.

- IR1-WV

상층운 제거와 사막지역의 보정을 위한 경계값으로, 채널차가 15보다 작으면 상층운이 있는 경우고, 채널차가 35보다 크면 반사도가 크고 지표면 온도도 높은 사막 지역으로, 본 알고리즘에서는 이 채널차가 15와 35 사이일 경우에만 해빙/적설을 탐지한다.

- IR1

저위도 지역에 온도가 높은 구름이 적설/해빙으로 잘못 탐지되는 것을 제거하기 위한 경

계값으로 경계값의 결정은 경험적으로 277K 로 정했다.

- SST

해상에서 온도가 높은 구름이 해빙으로 잘못 탐지되는 것을 제거하기 위한 경계값으로 경계값의 결정은 경험적으로 278K 로 정했다.

한편, 해빙/적설 탐지에서 경계값은 탐지결과에 가장 큰 영향을 주는 요소로써, 경계값의 재설정만 꼭 필요한 작업인 동시에 신중을 기해야 하는 부분이다. Table 2에 나와 있듯이, 본 알고리즘에서도 현재 2개의 경계값이 있으며, 각기 다른 해 겨울에 적용한 결과 연도별로 다른 탐지특성을 보였다. 특히 지표면에서 해빙/적설을 탐지하는 가시채널 반사도(mod\_sza\_alb, mod\_sza\_ndvi\_alb)와 구름과 해빙/적설을 구분하는 SWIR-IR1의 경계값 설정에 특히 신중을 기해야 한다.

## STEP 5: 일일합성

SSI는 하루 동안 관측되는 모든 COMS 영상에 대해 태양천정각 검사(태양천정각 <math>80^\circ</math>) 후 적설/해빙을 탐지하고, 이 자료를 합성해서 SSI 일일합성장을 생산한다. SSI 탐지 결과는 Table 3과 같이 나오는데, 이때의 합성 방법은 하루 동안 해빙/적설로 탐지된 적이 있는 화소에 대해서는 해빙 또는 적설로, 해빙/적설로 탐지된 적이 없고 청천의 해양 또는 육지로 탐지 되었으면 해양/육지로, 하루 종일 구름으로 덮여 있을 경우엔 구름으로 탐지한다. 'Undefined' 는 태양천정각 검사 등에 의해 하루 종일 자료가 생산되지 않은 경우이다.

SSI 표준화 코드에서의 일일합성방법은 각각의 화소에 대해 최소값을 결정하는 방법으로 해양의 경우 해빙(0) -> 바다(2) -> 구름(4) 의 순서로 우선순위를 갖고, 육지의 경우 적설(1) -> 육지(3) -> 구름(4) 의 순서로 우선순위를 갖는다.

최종 SSI 결과는 다음 장(STEP 6)의 품질검사 결과를 사용하여 해빙/적설 화소를 결정한다. 품질검사 결과 중 백분율(%)이 25%를 초과할 경우 해빙/적설 화소로 탐지하고, 0~25%일 경우 구름으로 분류한다.

또한 다른 위성자료와의 검증을 위해 8일 합성 SSI를 함께 생산하는데, 이는 MODIS의 해빙/적설 산출물과의 비교를 위해 생산한다. 8일 합성장의 합성방법은 일일합성과 같은 우선순위를 갖고 분류한다. 또한 일일합성과 같은 방법으로 품질정보를 산출하며, 이 중 백분율(%)이 25%를 초과할 경우 최종적으로 해빙/적설 화소로 분류한다.

Table 3. SSI results.

Parameter	Index
Sea ice	0
Snow	1
Open sea water	2
Snow-free land	3
Cloud	4
undefined	-999

## STEP 6: 품질검사

SSI의 품질정보는 두 가지로 생산된다. 첫 번째는 하루 동안 각각의 탐지 영상을 합성할 때 각각의 화소에 대해 해빙/적설로 탐지된 회수를 카운트한 값이며, 두 번째는 첫 번째 값의 백분율(%)이다. 백분율 계산 시 분모는 탐지 결과가 -999가 아닌 모든 수의 합을 나타내며, 그 수가 클수록 높은 정확도를 갖는다. 예를 들어 낮 동안 full disk 영역에 대해 4번 관측한 영상을 가지고 각각에 대해 해빙/적설을 탐지 후 합성한 결과 [적설, 적설, 구름, 구름]의 결과를 얻었다면 카운트 값은 2가 되고, 백분율은 50%가 된다. 실제로 이렇게 생산된 SSI 산출 결과와 quality flag를 비교해본 결과 quality flag가 1인 경우 구름에 의한 오염화소인 확률이 크고, 4인 경우는 안정적인 해빙/적설화소를 탐지했다. 한편 고위도지역의 경우 태양천정각 80도 이하에 대해서만 해빙/적설을 탐지하는 탐지 조건에 의해 한번만 해빙 또는 적설로 탐지되었을 경우, 예를 들어 [-999, -999, 적설, -999]의 경우에 카운트값은 1이지만 백분율은 100%가 되고 이때의 탐지 결과에 신뢰성이 있다고 본다. 자세한 해석 방법은 4장 산출물 해석방법에 기술하였다.

## 3.4. 검증

### 3.4.1. 검증방법

해빙/적설의 검증은 일일 합성된 해빙/적설 결과를 다른 위성으로부터 산출된 일일 해빙/적설 산출 결과와 비교한다. 검증은 모든 화소 단위에 대해 실시하며, 검증 방법으로는 검증 보조 자료의 결과와 일치하게 해빙/적설을 탐지한 비율을 나타내는 POD(Probability

of detection)와 검증 보조 자료와 비교하여 해빙/적설 화소로 잘못 탐지한 비율을 나타내는 Probability of false detection (POFD) 등을 비롯한 다섯 가지 방법으로 계산한다 (Fig. 6). POD와 PC, CSI 는 값이 1에 가까울수록, POFD 와 FAR 은 0에 가까울수록 좋은 일치를 의미한다.

한편, CMDPS와 MODIS는 광학센서로써 산출물에 구름화소가 포함되어 있다. 구름이 있을 경우 지표면의 상태를 알 수 없기 때문에 CMDPS가 구름화소로 분류된 화소는 검증에 포함하지 않았다.

**검증보조자료**

		Yes	No
산출값	Yes	<b>A</b>	<b>B</b>
	No	<b>C</b>	<b>D</b>

POD (probability of detection) :  $A / (A + C)$

POFD (probability of false detection) :  $B / (B + D)$

FAR (false alarm ratio) :  $B / (A + B)$

PC (proportion correct, accuracy) :  $(A + D) / N$

CSI (critical success index, threat score)

:  $A / (A + B + C)$

Figure 6. SSI validation methods.

### 3.4.2. 검증자료

해빙/적설의 검증 보조 자료에 대한 설명을 Table 4 에 나타냈다. MODIS 위성자료로부터 산출한 일일 해빙/적설 산출물(Hall et al., 2006)은 적설과 해빙에 따라 각각 다른 자료로 생산되며, 적설의 경우 공간 해상도가 500 m, 해빙의 경우 1 km 이다. MODIS 적설 산출물은 하루에 대해 가로세로 총 36×18개의 타일로 이루어져 있고, CMDPS 검증은 그 중 동아시아 영역의 19개 타일 자료를 사용한다. MODIS 해빙 산출물은 북반구와 남반구에 대해 각각 가로세로 19×19개의 타일로 이루어져 있으며, 이 중 북반구의 7개 타일 자료와 검증한다. MODIS 산출물은 산출 정확도가 높지만, 광학센서를 이용하고 한 지역에

대해 하루 두 번 정도 관측이 이루어지기 때문에 구름의 제약을 많이 받는다. 구름이 있을 경우 지표면을 볼 수 없기 때문에 산출 결과도 적설의 유무 뿐 아니라 구름화소를 포함하며, MODIS 산출물을 이용한 검증 시 이를 고려해야 한다.

Interactive Multi-sensor Snow and Ice Mapping System (IMS)는 NOAA/NESDIS(2004)에서 산출하는 일일 해빙/적설 지도로써 북반구에 대해서만 산출되고, 공간해상도는 4 km 이다. 특히 IMS는 정지궤도와 극궤도의 광학센서와 극궤도 위성의 마이크로웨이브 자료를 같이 사용하고, 지상관측자료도 모두 사용해서 생산된 자료로써 높은 정확도를 보인다. 하지만 동아시아 지역에 대한 산출 모니터링 결과 해빙/적설을 과대 탐지하는 경향이 있으며, 때에 따라서는 일별 변동성이 크게 나타난다.

Table 4. Description of the auxiliary data for SSI validation.

보조 자료		영역	사용자료	공간 해상도	산출 결과
MODIS	적설	전구	MODIS/Terra	500 m	적설, 지표면, 구름
	해빙	전구	MODIS/Terra	1 km	해빙, 해양, 구름
IMS		북반구	GOES, AVHRR, SSM/I and surface observations	4 km	적설, 해빙, 지표면, 해양

### 3.4.3. 시공간일치방법

해빙/적설 산출물과 검증 보조 자료는 일일 주기로 생산된다. 공간적으로는 1 km 해상도인 CMDPS 산출물에 비해 MODIS의 해빙(해상도 1km) 산출물을 제외한 MODIS 적설, IMS, NISE가 모두 다른 해상도를 가지므로 해상도가 낮은 산출물을 기준으로 주변의 화소들을 평균하여 사용하였다. MODIS 해빙의 경우는 CMDPS 산출물과 해상도가 같으므로 CMDPS 산출화소를 기준으로 가장 가까운 화소를 찾아 비교하였다(Table 5).

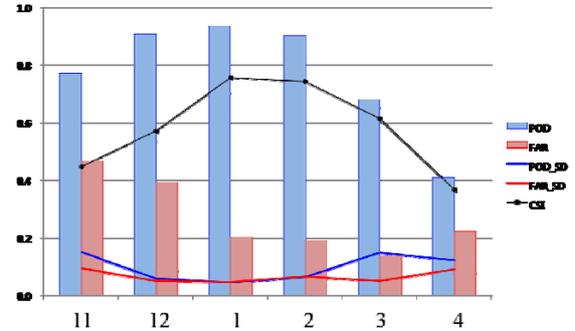
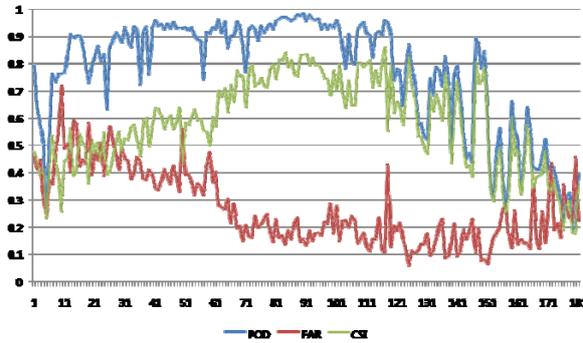
Table 5. The collocation methods for SSI validation.

보조 자료		시간 해상도	공간해상도	시공간 일치		
				시간	공간	기준자료
MODIS	적설	1 일	500 m	daily	13×13	CMDPS
	해빙	1 일	1 km		5×5	
IMS		1 일	4 km	daily	nearest	IMS

### 3.4.4. 검증결과분석

동아시아 영역에서 해빙/적설이 존재하는 겨울 (2007년 11월 ~2008년 4월)에 대한 검증 결과를 Fig. 7에 나타내었다. (a)와 (b)는 각각 적설과 해빙에 대한 통계치이며, 왼쪽의 그래프는 일일 통계치를, 오른쪽은 월평균 통계치를 나타낸 결과이다. 적설의 월평균 통계치를 보면, POD의 경우 11월에 0.78 정도의 값을 보이다가 한 겨울인 12, 1, 2월에 0.9 이상의 높은 값을 보이며, 3, 4월로 접어들면 급격히 감소하는 경향을 보인다. 이는 동아시아 영역에서의 적설의 트렌드와 연관 지어 진다. 적설이 쌓이기 시작하는 초겨울 (10월, 11월)은 적설이 막 내리기 시작하는 시기로써 적설 층이 얇고, 면적도 작기 때문에 탐지가 어려워 상대적으로 낮은 검증 결과를 보인다. 반면 적설 면적이 넓고 두꺼운 한겨울 (12월 ~2월)에는 POD가 0.9 이상, 1, 2월에는 FAR도 0.2 정도로 비교적 좋은 검증 결과를 보인다. 한편, 봄이 시작되고 눈이 녹기 시작하는 3월이 되면서 검증치는 급격히 떨어지고, 4월에는 POD가 0.4에 이른다. 해빙의 경우도 월별 통계치의 변화를 보이는데, 해빙은 적설보다 더 늦게 생성되어 더 늦게까지 지속되는 경향이 통계치를 통해서도 나타나고 있다. 11월에 해빙의 POD는 0.4의 낮은 값을 보이고, 12월에서 3월까지 0.9 이상의 높은 검증 결과를 보이며, 4월에도 0.7 이상의 값을 갖는다. 이는 적설과 비교해 한 달 정도의 지연을 보이는 것이며, 해빙의 경우 전반적으로 적설보다 좋은 검증 결과를 나타낸다. 한편, 일일 검증치를 보면 매일 매일의 검증치의 변화가 상당히 큰 것을 볼 수 있는데, 이는 해빙/적설의 탐지 성능 (구름에 의한 오염화소가 많을 경우 등)과 더불어 구름의 양과도 관련이 있다. 해빙의 경우 전체 탐지 영역(바다)에서 해빙역의 면적은 굉장히 낮은데, 해빙역의 대부분이 구름으로 가려져 있을 경우 상대적으로 검증치가 낮게 나온다. Fig. 8은 2008년 1월 12일 사할린 섬 부근의 해빙/적설 탐지 결과를 나타낸 것이다. (b)는 IMS의 산출 결과인데 남색은 바다를 나타내고 하늘색은 해빙역을 나타낸다. 반면 CMDPS의 산출 결과(a)는 구름(밝은 회색)에 의해 해빙역의 대부분이 가려져 있어 지표면의 정보를 알 수 없게 되고, 이 경우 검증 결과는 아주 낮게 산출된다.

a) snow



b) sea ice

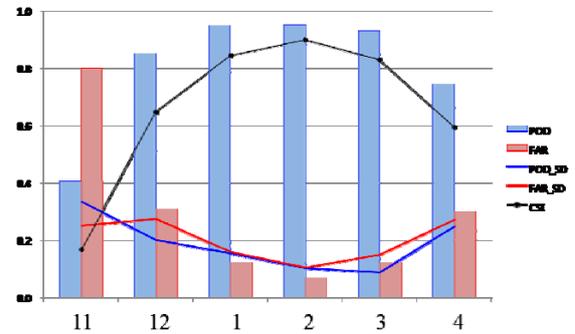
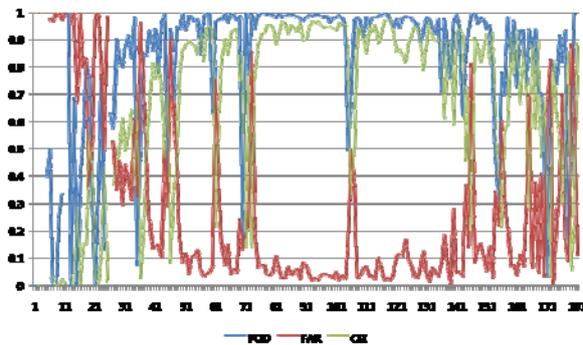
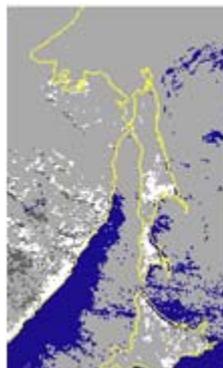


Figure 7. The validation results for snow (a) and sea ice (b) during 2007–2008 winter seasons. Graphs on the left hand side are the daily variation, and the right hand side are the monthly mean from November 2007 through April 2008.

a) CMDPS



b) IMS



Figure 8. Sea ice extent map by CMDPS (a) and IMS (b) on 12 January 2008. Light blue, dark blue and gray represent sea ice, open sea water and cloud, respectively.

## 4. 천리안위성 발사 후 COMS화를 위한 경계값 재설정

### 4.1. 경계값 재설정

천리안위성이 발사되고 정규관측이 시작됨에 따라 기존에 MTSAT 위성에 맞춰져있던 해빙/적설 탐지를 위한 경계값을 재설정하였다. Fig. 9는 2011년 12월 21일의 MTSAT 위성의 경계값을 이용한 해빙/적설 탐지 결과이다. 그림에서 흰색과 하늘색은 각각 적설과 해빙, 회색은 구름으로 탐지된 결과를 나타내며, 중국 북부와 블라디보스토크, 일본과 사할린 섬의 적설을 탐지하고 있으며, 오호츠크해 주변의 해빙역을 탐지한 결과를 보여준다. Fig. 20은 2011년 10월부터 12월의 일일 검증결과의 시계열을 보여주는 그래프이며, 해빙의 검증값은 파란색, 적설의 검증값은 보라색 선으로 나타내었다. 또한 이 중 실선은 POD, 파선은 FAR을 나타낸다. 이전의 결과와 같이 초겨울에 적설이 쌓이기 시작 할 때부터 검증치가 계산되기 시작해서 점차 겨울로 접어들면서 검증치가 안정적으로 나오고 있으며, 해빙의 경우는 동아시아 영역에 해빙이 나타나기 시작하는 11월 초부터 검증결과 나오기 시작하여 FAR은 점차 감소하고, POD도 점차 안정적인 값을 유지하고 있다.

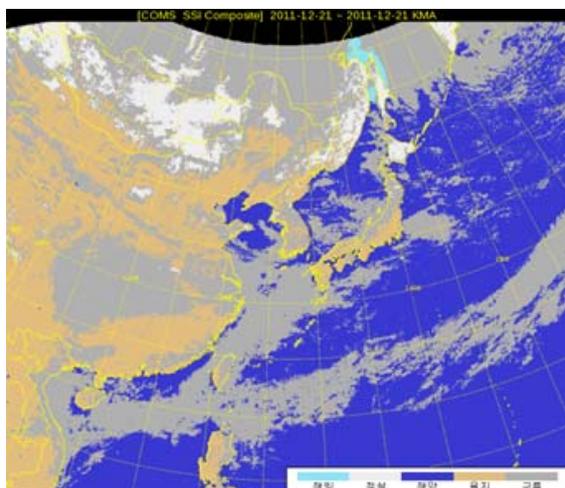


Figure 9. Daily snow and sea ice map on December 21, 2011.

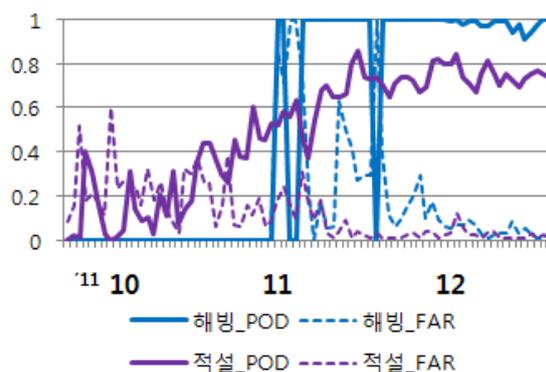


Figure 10. Validation results of CMDPS SSI with IMS from October to December in 2011.

한편, Fig. 19의 해빙/적설 탐지 결과를 보면 고위도 육지지역에서 구름으로 탐지된 화소가 많아 지표면 정보를 얻지 못하는 지역이 넓게 분포하고 있다. 이를 개선하고 최대한 많은 지표면정보를 얻기 위한 방향으로 경계값을 재설정하였다. 경계값의 재설정은 지표면으로부터 구름 또는 적설을 탐지하기 위한 가시채널 반사도와 적설과 구름을 구분하기 위

한 단파적외외과 적외채널의 휘도온도차에 대해 이루어졌다. 첫 번째로 가시채널의 경계값은 너무 높게 설정하면 지표면에 띄엄띄엄 적설이 존재할 때, 위성에서 관측되는 화소의 반사도가 낮아 적설로 탐지되지 않는 문제가 생길 수 있다. 하지만 경계값을 낮추게 되면 지표면이 적설로 잘못탐지되거나 지표면이 모두 구름으로 덮히는 결과를 초래할 수 있다. 적설 사례에 대한 천리안위성 가시채널반사도의 분석 결과 적설이 있을 경우 기존의 경계값보다 높은 반사도를 보여 이를 상향 조정하였다. 두 번째로, 단파적외외과 적외채널의 휘도온도차에 대한 경계값 재설정은 false signal이 어느 정도 존재하더라도 적설이 구름으로 잘못 탐지하는 경우를 감소하는 방향으로 이루어졌다. 재설정된 경계값은 table 2.에 정리되었다. 2011년 12월 18일에 대한 개선결과를 Fig. 21에 나타내었다.

## 4.2. 적용 결과

왼쪽 아래의 가시채널 영상과 비교하여 볼 때, NOAA/NESDIS의 IMS가 적설을 과도하게 탐지하는 결과를 보였다. 반면 COMS와 같이 광학센서를 이용하는 MODIS의 산출결과는 본 알고리즘의 결과와 비슷하게 나타났다.

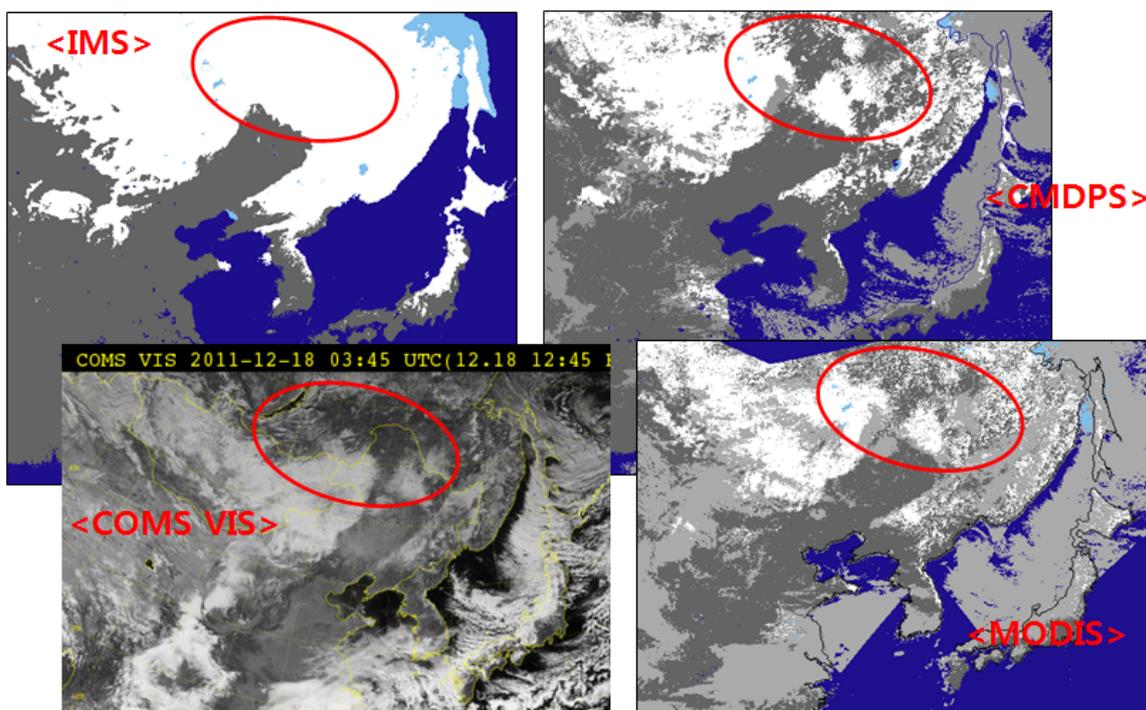


Figure 11. Snow detection results of IMS (upper left), CMDPS (upper right), MODIS(bottom right) on 18 December 2011, and COMS visible channel image at 0345 UTC of this day. IMS tends to overdetect snow area. Otherwise, CMDPS SSI looks agree well with CMDPS VIS image, and MODIS agree with CMDPS SSI rather than IMS.

## 5. 산출결과 해석방법

해빙/적설 산출 결과는 매일 한 번씩 생산되며, 탐지결과는 sea ice, snow, open sea water, snow free land, cloud, unavail의 6 가지로 생산된다. 그리고 일일 합성 시 매 영상에서 해빙/적설로 탐지된 회수를 화소별로 카운트한 quality flag 가 생산된다. quality flag는 두 가지로 생산되는데, 단순히 해빙/적설 탐지 회수를 카운트한 결과 QC\_flag\_count 와, 카운트 자료의 백분율 (%)인 QC\_flag\_100 가 있다. QC\_flag 분석 결과 화소별로 카운트한 회수 또는 백분율이 클수록 해빙/적설 탐지의 높은 정확도를 보였고, 적을수록 구름오염화소의 가능성이 크게 나타났다. Fig. 9는 2008년 1월 11일에 대한 해빙/적설 탐지 결과와 품질 정보를 나타낸 그림이다. 그림 (a)는 적설 탐지 결과로써 흰색, 짙은 회색, 밝은 회색, 밝은 청색, 어두운 청색은 각각 적설, 청전지표면, 구름, 해빙, 바다표면을 나타낸다. 그림 (b)와 (c)는 각각 품질정보 카운트와 백분율을 나타내며, 흰색은 각각 4와 100을, 어두울수록 낮은 수를 나타낸다. 탐지 결과(a)는 적설/해빙에 대해 각각 한 가지 값으로 표현되지만 품질 정보는 다른 색으로 나타내 지는데, 이로써 탐지 결과의 신뢰성을 어느 정도 평가할 수 있다. 예로써, 품질정보에서 고위도 지역의 검은색으로 표시된 화소는 상층운에 의해 오염된 화소일 가능성이 크다. 또한 사할린섬 동쪽해안의 해빙역은 품질정보 카운트에서 검은색에 가깝게 표현되어 신뢰성이 적을 수 있으나 (c)의 품질 정보에서 흰색으로 나타나 높은 신뢰성을 보이는 걸로 최종 결론지을 수 있다. 이는 고위도 지역의 경우 해빙/적설 탐지 조건 (태양천정각 80도 이상)에 의해 해빙/적설탐지가 이루어지

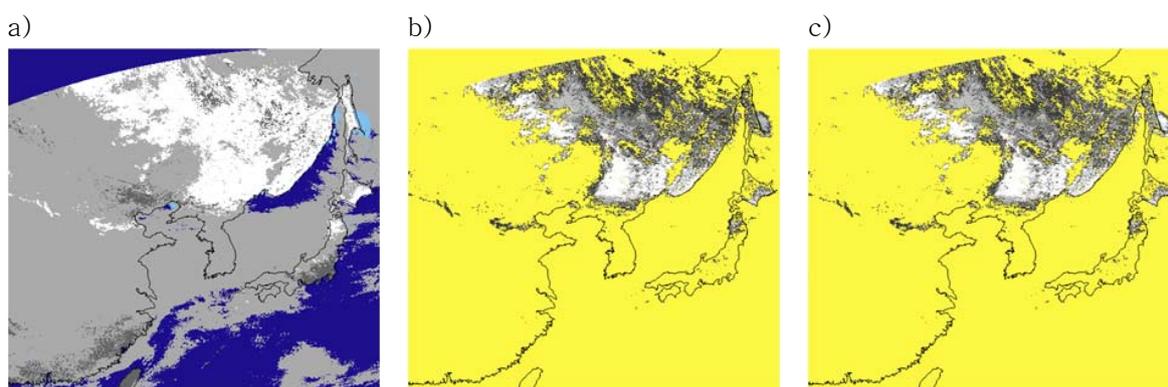


Figure 12. SSI result (a), QC flag\_count (b) and QC flag\_% (c) on 11 January 2008. White, light gray, dark gray, light blue and dark blue in (a) stand for snow, cloud, clear land, sea ice and open sea water, respectively. Dark through white colors in (b) and (c) express from small number to large number.

지 않은 영상을 제외하고 백분율로 나타내었기 때문이다. 또한 중국지역에 동서로 길게 적

설로 탐지된 화소는 품질정보에서 모두 검은색으로 나타나 구름에 의한 오염화소일 가능성을 보인다.

## 6. 문제점 및 개선 가능성

광학센서를 이용한 해빙/적설의 탐지는 기본적으로 가시채널과 근적외 채널의 반사도에 의존한다. COMS 위성은 광학센서를 탑재한 정지궤도 위성이지만 근적외 채널이 탑재되어 있지 않아 CMDPS의 SSI 알고리즘은 가시채널과 단파적외 채널을 주로 사용한다. 단파적외 채널의 반사성분은 해빙/적설에서 근적외 채널과 유사한 특성을 나타내지만, 단파적외 채널의 특성상 지표로부터의 방출성분을 함께 포함하고 있어 관측된 값으로부터 반사성분만을 계산해서 사용해야 한다. 하지만 단파적외 채널로부터 반사 성분만을 정확히 산출하기가 어렵기 때문에 해빙/적설 탐지에 더 많은 한계점을 가지고 있다. 또한 COMS가 적도에 중심을 둔 정지궤도위성이기 때문에, 해빙/적설이 존재하는 고위도에서는 큰 위성 천정각으로 인해 path length가 길어지고 이는 더 많은 부정확성을 초래한다. 해빙/적설 탐지 결과에서 가장 크게 나타나는 가시적인 문제점은 주로 저위도 지역에서 나타나는 구름오염 화소와 고위도 지역에서의 과소 탐지 문제인데 이는 COMS 위성의 특성에 의한 알고리즘의 한계점으로 생각된다. 더불어 NDVI를 보정한 이후에도 여전히 나타나는 삼림지역과 지형이 복잡한 지역에서의 과소추정은 현재의 해상도(가시채널 1 km, 적외 채널 4 km)와 위성환경으로는 당연한 결과이다. 향후 MODIS, MSG/SEVIRI 와 같이 근적외 채널이 추가 된다면, 구름에 의한 오염화소가 줄고, NOAA/NESDIS 와 같이 다른 자료(극궤도, 마이크로웨이브 등)를 함께 사용한다면 동아시아 지역에 초점을 둔 보다 정확한 해빙/적설 탐지가 기대된다.

## 참고문헌

기상연구소, 2006: 차세대 위성자료 활용기술 연구(II)

Allen, R. C., P. A. Durkee, and C. H. Wash, 1990: Snow/cloud discrimination with multispectral satellite measurements. J. Appl. Meteor., 29, 994-1004.

Berry, M. O., 1981: Snow and climate. Handbook of Snow. Pergamon Press, 32-59.

Bunting, J. T., and R. P. d'Entremont, 1982: Improved cloud detection utilizing

- Defense Meteorological Satellite Program near infrared measurements. AFGL TR 82-0027, 91 pp.
- Carroll, T. R., 1990: Operational airborne and satellite snow cover products of the National Operational Hydrologic Remote Sensing Center, paper presented at 47th Eastern Snow Conference.
- Hall, D. K., G. A. Riggs, and V. V. Salomonson. 2006, updated daily. MODIS/Terra snow cover daily L3 global 500m grid V005, From 2006. 11 up to now. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center. Digital media.
- Kidder, S. Q., and H.-T. Wu, 1984: Dramatic Contrast between low cloud and snow cover in daytime 3.7 $\mu$ m imagery. Mon. Wea. Rev., 112, 2345-2346.
- Klein, A. G., D. K. Hall, and G. Riggs, 1988: Improving snow cover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model, Hydrol. Processes, 12, 1723-1744.
- Kurosaki, Y. and M. Mikami, 2004: Effect of snow cover on threshold wind velocity of dust outbreak, Geophys. Res. Lett., 31, L03106, doi:10.1029/2003GL018632.
- Groby, N. C., 1988: Surface identification using satellite microwave radiometers. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 26, 850-859
- NOAA/NESDIS/OSDPD/SSD. 2004, updated 2006. IMS daily Northern Hemisphere snow and ice analysis at 4 km and 24 km resolution. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center. Digital media.
- Romanov P., G. Gutman, and C. Ivan, 2000: Automated Monitoring of snow cover over North America with Multispectral Satellite Data, J. of Appl. Meteor., 39, 1866-1880.
- Rosenthal, W., and J. Dozier, 1996: Automated mapping of montane snow cover at a subpixel resolution from the Landsat Thematic Mapper, Water Resour. Res., 32, 115-130.
- Salomonson, V. V. and I. Appel, 2004: Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index, Remote Sens. Environ., 89, 351-360.
- Walsh, J. E., W. H. Jasperson, and B. Ross, 1985: Influences of snow cover and soil moisture on monthly air temperature. Mon. Wea. Rev., 113, 756-768.