MODIS 영상을 이용한 빙하의 정규청빙지수(NDBI) 개발 및 변화요인 분석

한향선 · 지영훈 · 김연춘 · 이훈열[†]

강원대학교 지구물리학과

Development of Normalized Difference Blue-ice Index (NDBI) of Glaciers and Analysis of Its Variational Factors by using MODIS Images

Hyangsun Han, Younghun Ji, Yeonchun Kim, and Hoonyol Lee[†]

Department of Geophysics, Kangwon National University

Abstract : Blue-ice area is a glacial ice field in ice sheet, ice shelf and glaciers where snow ablation and sublimation is larger than snowfall. As the blue-ice area has large influences on the meteorite concentration mechanism and ice mass balance, it is required to quantify the concentration of blue-ice. We analyzed spectral reflectance characteristics of blue-ice, snow and cloud by using MODIS images obtained over blue-ice areas in McMurdo Dry Valleys, East Antarctica, from 2007 to 2012. We then developed Normalized Difference Blue-ice Index (NDBI) algorithm which quantifies the concentration of blue-ice. Snow and cloud have a high reflectance in visible and near-infrared (NIR) bands. Reflectance of blue-ice is high in blue band, while that lowers in the NIR band. NDBI is calculated by dividing the difference of reflectance in the blue and NIR bands by the sum of reflectances in the two bands so that $NDBI = (Blue - NIR)/(Blue + NIR)$. NDBI calculated from the MODIS images showed that the blue-ice areas have values ranging from 0.2 to 0.5, depending on the exposure and concentration of blue-ice. It is obviously different from that of snow and cloud that has values less than 0.2 or rocks with negative values. The change of NDBI values in the blue-ice area has higher correlation with snow depth ($R^2 = 0.699$) than wind speed ($R^2 = 0.012$) or air temperature ($R^2 = 0.278$), all measured at a meteorological station installed in McMurdo Dry Valleys. As the snow depth increased, the NDBI value decreased, which suggests that snow depth can be estimated from NDBI values over blue-ice areas. The NDBI algorithm developed in this study will be useful for various polar research fields such as meteorite exploration, analysis of ice mass balance as well as the snow depth estimation.

Key Words : blue-ice, normalized difference blue-ice index (NDBI), MODIS, snow depth, Antarctica

요약 : 빙상이나 빙하, 빙봉에서 푸른색의 얼음이 지표에 노출되어 있는 지역을 청빙지대라 한다. 이는 빙하 표면에 쌓인 눈이 바람에 의해 침식되거나 기온과 일사량에 따른 승화로 인해 대부분 제거되기 때문이다.

접수일(2014년 7월 11일), 수정일(1차 : 2014년 8월 19일), 게재확정일(2014년 8월 19일).

[†] 교신저자: 이훈열(hoonyol@kangwon.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

청빙지대는 운석이 농집되기 쉽고 빙체의 질량균형에 매우 큰 영향을 미치기 때문에, 청빙의 노출도 및 밀집도에 대한 정량적 지표의 개발이 요구되고 있다. 이 연구에서는 2007~2012년에 동남극 맥머도 드라이벨리를 촬영한 MODIS 영상을 이용하여 청빙과 눈, 구름의 분광반사특성을 분석하고, 청빙의 노출도 및 밀집도를 정량화 할 수 있는 정규청빙지수(Normalized Difference Blue-ice Index, NDBI) 알고리즘을 고안하였다. 눈과 구름은 가시광선과 근적외선 파장대역에서 매우 높은 반사율을 나타낸다. 청빙은 청색 파장대역에서 높은 반사율을 보이는 반면에, 근적외선 파장대역에서 낮은 반사율을 보인다. NDBI 알고리즘은 청색과 근적외선 파장대역에서의 반사율 차이를 두 반사율의 합으로 나누는 것으로 표현된다[$NDBI = (Blue - NIR)/(Blue + NIR)$]. 청빙의 NDBI는 노출도와 밀집도에 따라 0.2~0.5의 값을 가지며, 0.2 이하의 값을 가지는 눈과 구름이나 음수의 값을 나타내는 암석으로부터 명확히 구분되었다. 청빙의 NDBI가 시간에 따라 변화하는 현상은 맥머도 드라이벨리의 기상관측소에서 측정된 풍속($R^2 = 0.012$)이나 기온($R^2 = 0.278$) 보다는 적설두께와 가장 높은 상관성($R^2 = 0.699$)을 나타냈다. 적설두께가 증가할수록 NDBI 값은 감소하였는데, 이는 청빙지대의 NDBI 값으로부터 적설량의 추정이 가능함을 의미한다. 이 연구에서 개발된 NDBI 알고리즘은 운석탐사, 빙체의 질량균형 분석, 적설량 추정 등 다양한 극지연구 분야에서 매우 유용하게 사용될 것으로 전망된다.

1. 서론

남극대륙은 수백만 년 이상의 시간 동안 형성된 얼음층인 남극 빙상(Antarctic Ice Sheet)으로 덮여 있으며, 빙상의 약 98%는 70~100 m 두께의 눈으로 피복되어 있다(Bintanja and van den Broeke, 1995; Scambos *et al.*, 2012). 남극의 일부 지역에서는 강한 활강풍(katabatic wind)과 건조한 기후로 인해 적설량보다 더 많은 양의 눈이 제거되어, 오랜 기간 동안 눈과 얼음이 압착되어 형성된 얼음층이 지표에 노출된다(van den Broeke and Bintanja, 1995; Bintanja, 1999; Bintanja, 2000). 이러한 얼음층은 얼음의 밀도가 매우 높아 가시광선 파장대역에서 청색에 대한 반사율이 높으며, 이와 같은 광학적 특성으로 인해 청빙(blue-ice)이라 불리고 있다.

청빙의 위치, 밀집도, 청빙표면의 적설량은 운석탐사 연구자들에게 많은 관심을 받고 있다. 지구상에서 발견된 운석의 약 80%가 남극에서 회수되었는데, 대부분 청빙이 지표에 노출된 영역인 청빙지대(blue-ice area)에서 발견되었다. 이는 남극의 여러 장소에 낙하한 운석들이 얼음층에 포집된 후, 빙하의 흐름에 의해 이동하다가 청빙지대에서 집중적으로 노출되기 때문이다(Lee, 2009; Spaulding *et al.*, 2012). 우리나라를 비롯한 세계 각국은 청빙지대를 중심으로 운석 탐사를 수행하고 있으며, 다량의 운석을 회수하여 다양한 연구를 진행하고 있다. 청빙지대에서는 적설량보다 승화(sublimation)되는 눈의

양이 많아 남극의 지역적인 질량균형(mass balance)에도 큰 영향을 미치고 있다(Bintanja *et al.*, 1997; Bintanja and Reijmer, 2001; Scambos *et al.*, 2012). 따라서 청빙의 분포와 밀집도, 청빙지대의 적설량을 정량적으로 분석하고, 청빙지대의 시간적 변화를 해석하는 것은 다양한 극지연구의 수행을 위해 매우 중요하다.

청빙지대는 대부분 남극 내륙의 고지대 또는 해안 인근의 산악지역에 위치하기 때문에 현장에서 청빙의 밀집도와 적설량을 조사하는 것은 거의 불가능하다. 이에 따라 직접적인 접근 없이 광범위한 영역의 지표 정보를 시계열적으로 획득할 수 있는 인공위성 원격탐사가 청빙 연구에 유용하게 사용되고 있다. Winther *et al.* (2001)은 U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) 위성의 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) 영상을 이용하여 약 120,000 km²의 청빙지대가 남극대륙에 분포하고 있음을 밝혔다. Brown and Scambos (2004)는 MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)와 Landsat 영상을 이용하여 적설면적이 넓을수록 청빙지대의 면적은 감소함을 밝혔고, 이로부터 청빙지대의 면적이 남극 기후변화의 지시자 역할을 할 수 있음을 제시하였다. 이외에도 몇몇 연구자들이 위성영상을 활용하여 청빙에 관련된 연구를 수행하였다(Liston *et al.*, 2000; Orheim and Lucchitta, 1990). 그러나 청빙지대의 분포면적을 분석한 연구가 대부분이었으며, 청빙의 밀집도를 정량적으로 제시한 사

레는 없다. 또한 시간에 따른 청빙의 노출도 및 밀집도 변화를 관찰하고, 그 원인을 규명한 연구도 거의 없는 실정이다.

이 연구에서는 동남극 맥머도 드라이벨리(McMurdo Dry Valleys)의 청빙지대에 대해 MODIS 영상을 획득하여 청빙의 분광특성을 분석하였고, 이를 바탕으로 청빙의 분포와 밀집도 및 노출도를 정량화할 수 있는 정규청빙지수(Normalized Difference Blue-ice Index, NDBI) 알고리즘을 개발하였다. 그리고 청빙지대에서 실측된 다양한 기상자료와 정규청빙지수 사이의 상관성을 해석하여 정규청빙지수의 변화요인을 분석하였다.

2. 연구지역 및 연구자료

1) 연구지역

연구지역은 기상관측 자료의 획득이 용이한 동남극 맥머도 드라이벨리로 설정하였다(Fig. 1). 맥머도 만(McMurdo Sound)의 서쪽에 위치하고 있는 맥머도 드라이벨리는 -18도의 연평균 기온을 나타내며(Fountain *et al.*, 2010), 평균 3~4 m/s, 최대 40 m/s의 강한 활강풍이 부는 지역이다(Doran *et al.*, 2002). 이에 따라 얼음표면의 침식과 승하가 활발하게 일어나고 있으며, 이로 인해 광범위한 청빙지대가 형성되어 있다. Fig. 1(a)는 2011년 1월 16일에 촬영된 Terra MODIS 영상으로, 맥머도 드라이벨리에서 청색을 띠는 청빙지역이 넓게 분포하고 있음을 볼 수 있다.

2) 연구자료

청빙의 분광특성을 분석하고 정규청빙지수 알고리즘을 개발하기 위해 Terra와 Aqua 위성의 MODIS 영상을 이용하였다. MODIS는 36개의 분광 대역에서 250~1000 m의 공간해상도로 지표를 관측하고 있으며, 영상의 후처리를 통해 지표면의 반사율, 정규식생지수, 수증기량 등 다양한 정보를 제공해주고 있다. 이 연구에서는 가시광선, 근적외선, 중적외선 영역에 대해 대기 및 방사보정이 수행된 분광 반사율 정보를 제공하는 Terra/Aqua MODIS 지표 반사율(Surface Reflectance) product (MOD09, MYD09) (Vermote *et al.*, 2002; Vermote and Kotchenova,

2008)를 사용하였다. MODIS 자료는 2007년부터 2012년까지 남극의 여름철인 12월~3월에 촬영된 영상을 획득하였다. 이는 혹야가 지속되는 남극의 겨울철에는 광량이 부족하여 가시광선 영역에 대해 고품질의 관측정보를 제공하는 영상을 획득하기가 매우 어렵기 때문이다. 획득된 MODIS 자료 중에서 구름에 의해 연구지역의 청빙지대가 관찰되지 않는 영상과 산악지형의 그림자가 청빙지대에 포함되는 영상을 제외하고, 총 95개의 영상을 연구에 사용하였다.

청빙의 노출도 및 밀집도의 변화에 영향을 미치는 기상요소를 분석하기 위해 맥머도 드라이벨리의 Taylor 빙하에 설치된 기상관측소(Fig. 1a의 삼각형 표식)에서 측정된 풍속, 기온, 얼음표면의 고도변화 자료를 이용하였다(www.mcmlter.org). Taylor 빙하의 기상관측소는 다양한 기상요소를 30초마다 측정하고 있으며(풍속은 4초), 모든 측정항목에 대해 15분 평균 자료를 제공하고 있다. 얼음표면의 고도변화는 최초 관측시점인 2004년 1월 23일 23시부터 초음파 거리센서(ultrasonic distance sensor)로 측정된 누적 변화량이다.

3. 연구방법

1) NDBI 알고리즘

Fig. 1(b)는 Fig. 1(a)에 대해 중적외선(band 7, 2105~2155 nm), 근적외선(band 2, 841~876 nm), 청색(band 3, 459~479 nm) 파장대역을 사용하여 생성한 RGB 조합 영상이다. Fig. 1(b)에서 구름은 적색, 눈은 청록색, 청빙은 진청색으로 구분되어 나타남을 볼 수 있으며, Fig. 1(a)에 비해 구름과 눈, 청빙을 보다 명확히 구분할 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 바다와 노출된 암반도 Fig. 1(b)에서 구분이 가능하였다. 그러나 Fig. 1(b)와 같은 RGB 조합으로는 청빙 분포의 가시적 분석만이 가능하며, 청빙의 분포나 밀집도를 정량화시킬 수 없는 한계가 있다.

Fig. 2는 Fig. 1의 MODIS 지표 반사율 영상에서 추출한 눈, 구름, 청빙의 분광반사율을 나타낸 것이다. 눈, 구름, 청빙의 분광반사율은 각 항목에 대해 대표성을 나타내는 영역에서 추출되었다. 청빙과 눈, 구름은 모두 청색 파장대역에서 매우 높은 반사율을 보인다. 구름과 눈은

Fig. 1. (a) A Terra MODIS true-color image over McMurdo Dry Valleys in East Antarctica (small box on the upper left image) obtained on 16 January 2011. (b) A false-color image of the same area using an RGB composite of middle-infrared (band 7), near-infrared (band 2) and blue band (band 3).

Fig. 2. Spectral reflectance characteristics of blue-ice, snow and cloud.

가시광선과 근적외선 파장대역에서 반사율의 변화가 거의 없는 반면에, 청빙은 파장이 길어질수록 반사율이 작아지고 근적외선 파장대역에서 구름 및 눈과 뚜렷하게 구분되는 반사율을 나타내고 있다. 따라서 청색과 근적외선 파장대역에서의 분광반사율 차이를 이용하면 구름과 눈으로부터 청빙을 구분할 수 있으며, 청빙의 분포량과 상대적 밀집도에 대한 정량적 지표 개발할 수 있다. 이 연구에서는 Fig. 2로부터 분석된 구름과 눈, 청빙의 분광반사특성에 기초하여 아래와 같은 정규청빙 지수(NDBI)를 고안하였다.

$$NDBI = \frac{Blue - NIR}{Blue + NIR} \quad (1)$$

식 (1)에서 *Blue*와 *NIR*은 각각 청색과 근적외선 파장대역에서의 반사율이다. NDBI는 청색과 근적외선 파장대역에서의 반사율 차이를 두 파장대역에서의 반사율 합으로 나눈 것으로, 산림연구 분야에서 널리 활용되고 있는 정규식생지수의 산출 방법과 유사한 수식으로 계산된다. NDBI는 단위가 없으며, -1에서 1의 범위를 가진다. 눈과 구름은 청색과 근적외선 파장대역에서의 반사율 차이가 매우 작기 때문에(Fig. 2) 0에 가까운 NDBI를 나타내며 암석의 경우 대부분 음수를 가진다. 해수는 근적외선 파장대역에서 매우 낮은 반사율을 보이므로 1에

가까운 NDBI 값을 가진다. 반면에 청빙은 청색 파장대역에서의 반사율이 근적외선 대역에서의 반사율보다 높기 때문에 양의 NDBI 값을 가지게 된다.

청빙에 대한 NDBI 값은 지표에 노출된 청빙의 밀집도가 높을수록 큰 값을 가지지만, 0.5 이상의 값을 나타내는 경우는 많지 않다. 이는 지표에 완전히 노출된 청빙의 경우 청색 파장대역에서 최대 0.9, 근적외선 파장대역에서 최소 0.3의 반사율을 나타내기 때문이다(Warren *et al.*, 1993). 이 연구에서는 식(1)을 맥머도 드라이벨리가 촬영된 MODIS 영상에 적용하고, 청빙의 분포와 상대적 밀집도를 정량화하기 위한 NDBI 알고리즘의 적용가능성을 검토하였다. 그리고 청빙지대에서 산출된 NDBI의 변화를 관찰하였다.

2) 적설두께 추정

청빙지대의 표면은 강설에 의해 눈이 쌓이거나, 바람과 기온에 의해 침식과 승화작용이 일어나면 물리적 특성이 변화하며(Liston *et al.*, 2000; van den Broeke and Bintanja, 1995; Bintanja, 1999; Bintanja, 2001), 이로 인해 분광반사특성이 변화된다. 따라서 풍속, 기온, 적설량과 같은 기상요소를 통해 청빙지대의 NDBI 변화를 해석할 필요가 있다. 그러나 실측 기상자료가 획득된 Taylor 빙

Fig. 3. An example of the estimation of snow depth from the ice surface change measured at Taylor Glacier meteorological station.

하의 기상관측소에서는 적설량이나 적설두께를 측정하지 않는다. 청빙지대의 표면고도는 침식과 승화작용에 의해 낮아지는데, 강설이 있는 경우에는 표면고도가 상승하게 된다. 따라서 얼음표면의 고도변화를 이용하면 적설두께의 추정이 가능하다.

Fig. 3은 Taylor 빙하의 기상관측소에서 측정된 얼음표면 고도변화의 예시로, 2010년 2월 6일부터 3월 5일까지의 관측값을 나타낸 것이다. 2010년 2월 6일 0시에 측정된 얼음표면의 고도변화 값은 -121.6 cm인데, 이는 최초 관측 시점인 2004년 1월 23일 이후로 표면고도가 121.6 cm 낮아진 것을 의미한다. Fig. 3에서 얼음표면의 고도는 2월 16일 23시까지 지속적으로 낮아졌으며, -122.6 cm의 값을 기록하였다. 그러나 2월 17일부터 강설에 의한 영향으로 얼음표면의 고도가 높아졌고, 2월 26일 12시 이후에 -122.6 cm보다 낮아졌다. 이는 2월 17일부터 2월 26일 사이에 청빙지대의 표면에 적설이 있었음을 의미한다. 따라서 -121.0 cm의 고도변화 값을 기록한 2월 21일 17시에 해당하는 적설두께는 1.6 cm로 추정할 수 있다 (Fig. 3).

이 연구에서는 Taylor 빙하의 기상관측소에서 측정된 풍속, 기온, 얼음표면의 고도변화로부터 추정된 적설두

께를 이용하여 맥머도 드라이벨리의 청빙지대에 대한 NDBI의 변화를 분석하였다.

4. 연구결과 및 토의

1) NDBI를 이용한 청빙지대 추출

Fig. 4(a)는 Fig. 1의 MODIS 영상에 대한 NDBI 영상으로, NDBI의 표현 범위는 [-1, 1]이다. 청빙지대는 노출된 청빙의 밀집도에 따라 0.2-0.5의 NDBI 값을 나타냈다. 청빙에 대한 NDBI는 청빙의 청색 및 근적외선 파장대역에서의 반사율 특성상 0.5 이상의 값을 나타내지 않았다. 해수에 대한 NDBI는 1에 가까운 값으로 표현되고 있으며, 노출된 암반지역은 청색보다 근적외선 파장대역에서의 반사율이 높아 음의 NDBI 값을 보이고 있다. 눈으로 피복된 지역과 두꺼운 구름이 덮인 지역은 청색과 근적외선 파장대역에서의 반사율 차이가 매우 작기 때문에 0에 가까운 NDBI를 나타내고 있으며, 지역에 따라 최대 0.2의 NDBI를 보였다. 산악지역의 그림자 영역에서는 0.7 이상의 NDBI가 산출되었는데, 이는 그림자 영역에서 근적외선 파장대역의 반사율이 청색 파장대

Fig. 4. Procedure of generating MODIS NDBI image on blue-ice field. (a) is the NDBI image with the value range of $[-1, 1]$ while (b) and (c) is $[0.2, 0.5]$. (c) was generated by removing the pixels at which reflectance in the blue band is less than 0.7.

역에서의 반사율에 비해 매우 작기 때문이다.

청빙의 NDBI 값이 0.2 이상, 0.5 이하로 표현되므로, Fig. 4(a)로부터 $[0.2, 0.5]$ 의 범위를 가지는 NDBI만을 추출하여 청빙에 대한 분별력을 높였다(Fig. 4b). 이를 통해 0.2 이하의 NDBI를 가지는 눈과 두꺼운 구름을 제거할 수 있었으며, 0.7 이상의 NDBI 값을 나타내는 그림자 영역도 제거할 수 있었다. 그러나 일부 산악지역과 Fig. 1(a)에서 어렵게 관찰되는 구름은 제거되지 않았다. 이는 산악지역과 어두운 구름에 대한 청색 및 근적외선 파장대역의 반사율이 청빙과는 상대적인 차이를 나타내지만, 식 (1)에 의해 계산된 값은 청빙의 NDBI 범주에 포함되기 때문이다. MODIS 지표 반사율 영상으로부터 분석된 산악지역의 반사율은 청색 파장대역에서 -0.3 이하로 매우 작았으며, 어두운 구름의 경우 청색 파장대역에서 최대 0.7의 반사율을 나타냈다. 이는 청빙에 대한 청색 파장대역의 반사율에 비해 현저히 작은 값에 해당한다. 따라서 청색 파장대역에서 0.7 이하의 반사율을 나타내

는 영역을 제거하면, 청빙과 같은 범위의 NDBI 값을 보이는 산악지역과 어두운 구름을 마스크 할 수 있다. 이 연구에서는 청색 파장대역에서 0.7 이하의 반사율을 나타내는 영역을 Fig. 4(b)로부터 제거하였고, 이를 통해 Fig. 4(c)와 같이 청빙이 노출된 지역에 대한 NDBI만을 표현할 수 있었다. Fig. 4(c)는 청빙의 분포위치를 Fig. 1의 RGB 조합 영상보다 더 명확하게 지시하고 있으며, 노출된 청빙의 상대적 밀집도를 정량적으로 나타내고 있다.

Fig. 5는 맥머도 드라이벨리의 청빙지대에 대한 NDBI 영상의 예시를 나타낸 것으로, 노출된 청빙의 분포면적이 변하는 것을 볼 수 있다. 또한 청빙이 지속적으로 노출되어 있는 지역에서도 영상마다 NDBI 값의 분포가 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 NDBI 값의 변화는 청빙지대 표면의 특성이 변화하기 때문이다. 따라서 청빙지대의 변화에 영향을 미치는 풍속, 기온, 적설 두께를 이용하여 NDBI의 변화를 해석할 필요가 있다.

Fig. 5. Examples of changes in MODIS NDBI over McMurdo Dry Valleys.

2) NDBI의 변화 해석

청빙지대의 NDBI 변화를 해석하기 위해 맥머도 드라이벨리에서 청빙이 균일하고 넓게 분포되어 있는 영역(Fig. 5b의 청빙지대)을 설정하였고, 이 영역에 대한 평균 NDBI를 각각의 NDBI 영상으로부터 구하여 풍속, 기온, 적설두께와 비교하였다(Fig. 6). 이때 사용된 NDBI 영상은 Fig. 4(a)와 같이 모든 NDBI 값을 포함하는 영상인데, 이는 청빙지대 표면의 물리적 특성 변화에 따른 NDBI의 변화를 고려하기 위함이다. NDBI의 공간적 평균을 산출하기 위해 설정한 영역에 구름 및 그림자에 의한 영향이 포함된 영상은 없었다. 풍속은 측정이 이루어지지 않은 시기가 일부 있었기 때문에 70개의 NDBI 영상과 비교되었다. 적설두께는 얼음표면의 고도변화로부터 추정되었는데, 42개의 NDBI 영상에 대해서만 청빙지대 표면에 적설이 있는 것으로 나타났다. 이에 적설이 없는 것으로 추정된 시각의 NDBI 영상은 분석에서 제외하였다.

Fig. 6(a)와 6(b)는 각각 풍속과 NDBI, 기온과 NDBI의 상관도로써, 세로축은 NDBI, 가로축은 풍속과 기온이다. 풍속과 NDBI는 0.012의 매우 작은 R^2 을 보여, 서로 상관성이 없는 것으로 나타났다(Fig. 6a). Fig. 6(b)에서는 기온이 증가하면 NDBI가 증가하는 경향성은 확인되었으나, 상관관계는 매우 약한 것으로 분석되었다($R^2 = 0.278$).

Fig. 6(c)는 적설두께와 NDBI 사이의 상관도를 도시한 것으로, 0.699의 가장 높은 R^2 값을 보이고 있다. 적설두께가 증가할수록 NDBI 값이 감소하는 반비례 관계가 관찰되는데, 이는 청빙지대 표면의 눈이 두꺼울수록 근적외선 파장대역에서의 반사율이 증가하여 작은 정규청빙지수가 산출되기 때문이다. 적설두께가 0.1 cm 이하로 매우 작을 경우, NDBI 값은 0.13-0.32 사이에서 다양하게 나타난다. 이러한 NDBI 값의 분포는 매우 작은 적설량으로 인해 MODIS로 관측된 지표 반사율에 눈과 청빙의 분광특성이 혼재되어 있기 때문인 것으로 판단

Fig. 6. Correlation between NDBI of blue-ice area in McMurdo Dry Valleys with (a) wind speed, (b) air temperature and (c) snow depth.

할 수 있다. 특히 MODIS의 한 화소(pixel) 내에서 부분적인 적설이 있을 경우, 청빙의 노출도가 감소하여 작은 NDBI 값이 산출될 수도 있다. 이러한 부분적 적설에 의한 영향은 적설두께가 클 때보다 작을 때 더욱 크게 나타날 수 있으며, 이는 0.1 cm 이하의 적설두께에서 매우 작은 NDBI 값이 산출된 원인이 된 것으로 판단된다.

Fig. 6(c)를 통해서 적설량은 청빙지대의 형성뿐만 아니라 청빙의 노출도 변화에도 매우 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 또한 청빙지대의 NDBI 값이 적설두께를 지시하는 것을 확인하였으며, 향후 NDBI 값을 통해 적설량을 추정하는 알고리즘이 개발될 수 있음을 보여준다.

5. 결 론

청빙의 상대적인 노출도와 밀집도에 대한 정량적 지표를 개발하기 위해 동남극 맥머도 드라이벨리가 촬영된 MODIS 영상으로부터 청빙과 눈, 구름에 대한 분광반사특성을 분석하였다. 눈과 구름은 모두 가시광선과 근적외선 파장대역에서 매우 높은 반사율을 나타냈다. 그러나 청빙은 청색 파장대역에서만 매우 높은 반사율을 보였으며, 근적외선에서의 반사율은 매우 낮아 눈, 구름과 확연히 구분되었다. 이러한 분광반사특성에 기초하여, 청색과 근적외선에서의 반사율 차이를 두 파장대역에서의 반사율 합으로 나눈 것으로 표현되는 NDBI 알고리즘을 개발하였다. 청빙지대는 청빙의 노출도와 밀집도에 따라 0.2-0.5 사이의 NDBI 값을 나타냈으며, 0.2 이하의 NDBI 값을 가지는 눈, 구름과 뚜렷하게 구분되었다. 청빙지대에서 산출된 NDBI 값은 지속적으로 변화하였으며, 이에 대한 영향인자를 분석하고자 풍속, 기온, 적설두께를 청빙지대의 NDBI와 비교하였다. NDBI는 적설두께와 가장 높은 상관성을 보였으며($R^2 = 0.699$), 적설두께가 증가할수록 NDBI 값이 작아지는 음의 상관관계를 나타냈다. 그러나 NDBI는 풍속 및 기온과 각각 0.012, 0.278의 R^2 을 보여 상관성이 매우 약한 것으로 분석되었다.

이 연구에서 개발된 NDBI 알고리즘은 가시광선 및 증적외선 영역의 영상을 이용한 가시적 분석기법에 비해 청빙지대의 분포위치를 더욱 명확히 지시하므로, 새

로운 청빙지대의 발견에 도움을 줄 수 있다. 또한 NDBI는 노출된 청빙의 밀집도를 정량적으로 나타내며, 적설 두께에 대한 지표 역할도 수행할 수 있기 때문에 운석탐사, 빙체의 질량균형 분석, 극지의 적설량 추정 및 기후 특성 분석 등 다양한 극지연구 분야에서 매우 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 한국연구재단의 이공분야 기초연구사업(NRF-2013R1A1A2008062)과 거대과학연구개발사업(NRF-2013M1A3A3A02041853)의 지원을 받았으며 이에 감사드립니다.

References

- Bintanja, R., 1999. On the glaciological, meteorological, and climatological significance of Antarctic blue ice areas, *Reviews of Geophysics*, 37(3): 337-359.
- Bintanja, R., 2000. Surface heat budget of Antarctic snow and blue ice: Interpretation of spatial and temporal variability, *Journal of Geophysical Research*, 105(D19): 24387-24407.
- Bintanja, R., 2001. Snowdrift Sublimation in a Katabatic Wind Region of the Antarctic Ice Sheet, *Journal of Applied Meteorology*, 40(11): 1952-1966.
- Bintanja, R. and C.H. Reijmer, 2001. Meteorological conditions over Antarctic blue-ice areas and their influence on the local surface mass balance, *Journal of Glaciology*, 47(156): 37-50.
- Bintanja, R. and M.R. van den Broeke, 1995. The surface energy balance of Antarctic snow and blue ice, *Journal of Applied Meteorology*, 34(4): 902-926.
- Bintanja, R., S. Jonsson, and W.H. Knap, 1997. The annual cycle of the surface energy balance of

- Antarctic blue ice, *Journal of Geophysical Research*, 102(D2): 1867-1881.
- Brown, I.C. and T.A. Scambos, 2004. Satellite monitoring of blue-ice extent near Byrd Glacier, Antarctica, *Annals of Glaciology*, 39(1): 223-230.
- Doran, P.T., C.P. McKay, G.D. Clow, G.L. Dana, A.G. Fountain, T. Nylen, and W.B. Lyons, 2002. Valley floor climate observations from the McMurdo dry valleys, Antarctica, 1986-2000, *Journal of Geophysical Research*, 107(D24): 4772.
- Fountain, A.G., T.H. Nylen, A. Monaghan, H.J. Basagic, and D. Bromwich, 2010. Snow in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica, *International Journal of Climatology*, 30(5): 633-642.
- Lee, J.I., 2009. 2006-2008 Korea expedition for Antarctic meteorites (KOREAMET), *Journal of the Geological Society of Korea*, 45(6): 621-637 (in Korean with English abstract).
- Liston G.E., J.-G. Winther, O. Bruland, H. Elvehøy, K. Sand, and L. Karluöf, 2000. Snow and blue-ice distribution patterns on the coastal Antarctic Ice Sheet, *Antarctic Science*, 12(1): 69-79.
- Orheim, O. and B. Lucchitta, 1990. Investigating climate change by digital analysis of blue ice extent on satellite images of Antarctica, *Annals of Glaciology*, 14(1): 211-215.
- Scambos, T.A., M. Frezzotti, T. Haran, J. Bohlander, J.T.M. Lenaerts, M.R. van den Broeke, K. Jezek, D. Long, S. Urbini, K. Farness, T. Neumann, M. Albert, and J.-G. Winther, 2012. Extent of low-accumulation 'wind glaze' areas on the East Antarctic plateau: implications for continental ice mass balance, *Journal of Glaciology*, 58(210): 633-647.
- Spaulding, N.E., V.B. Spikes, G.S. Hamilton, P.A. Mayewski, N.W. Dunbar, R.P. Harvey, J. Schutt, and A.V. Kurbatov, 2012. Ice motion and mass balance at the Allan Hills blue-ice area, Antarctica, with implications for paleoclimate reconstructions, *Journal of Glaciology*, 58(208): 399-406.
- van den Broeke, M.R. and R. Bintanja, 1995. The interaction of katabatic winds and the formation of blue-ice areas in East Antarctica, *Journal of Glaciology*, 41(138): 395-407.
- Vermote, E.F., N.Z. El Saleous, and C.O. Justice, 2002. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results, *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2): 97-111.
- Vermote, E.F. and S. Kotchenova, 2008. Atmospheric correction for the monitoring of land surfaces, *Journal of Geophysical Research*, 113, D23S90.
- Warren, S.G., R.E. Brandt, and R.D. Boime, 1993. Blue ice and green ice, *Antarctic Journal of the United States*, 28(5): 255-256.
- Winther, J.-G., M.N. Jespersen, and G.E. Liston, 2001. Blue-ice areas in Antarctica derived from NOAA AVHRR satellite data, *Journal of Glaciology*, 47(157): 325-334.