

Article

## ICESat-2 고도계 자료를 활용한 여름철 북극 용빙호 탐지

한대현<sup>1)</sup> · 김영준<sup>1)</sup> · 정시훈<sup>1)</sup> · 심성문<sup>1)</sup> ·  
김우혁<sup>1)</sup> · 장은나<sup>2)</sup> · 임정호<sup>3)†</sup> · 김현철<sup>4)</sup>

### Detection of Arctic Summer Melt Ponds Using ICESat-2 Altimetry Data

Daehyeon Han<sup>1)</sup> · Young Jun Kim<sup>1)</sup> · Sihun Jung<sup>1)</sup> · Seongmun Sim<sup>1)</sup> ·  
Woohyeok Kim<sup>1)</sup> · Eunna Jang<sup>2)</sup> · Jungho Im<sup>3)†</sup> · Hyun-Cheol Kim<sup>4)</sup>

**Abstract:** As the Arctic melt ponds play an important role in determining the interannual variation of the sea ice extent and changes in the Arctic environment, it is crucial to monitor the Arctic melt ponds with high accuracy. Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2 (ICESat-2), which is the NASA's latest altimeter satellite based on the green laser (532 nm), observes the global surface elevation. When compared to the CryoSat-2 altimetry satellite whose along-track resolution is 250 m, ICESat-2 is highly expected to provide much more detailed information about Arctic melt ponds thanks to its high along-track resolution of 70 cm. The basic products of ICESat-2 are the surface height and the number of reflected photons. To aggregate the neighboring information of a specific ICESat-2 photon, the segments of photons with 10 m length were used. The standard deviation of the height and the total number of photons were calculated for each segment. As the melt ponds have the smoother surface than the sea ice, the lower variation of the height over melt ponds can make the melt ponds distinguished from the sea ice. When the melt ponds were extracted, the number of photons per segment was used to classify the melt ponds covered with open-water and specular ice. As photons are much more absorbed in the water-covered melt ponds than the melt ponds with the specular ice, the number of photons per segment can distinguish the water- and ice-covered ponds. As a result, the suggested melt pond detection method was able to classify the sea ice, water-covered melt ponds, and ice-covered melt ponds. A qualitative analysis was conducted using the Sentinel-2 optical imagery. The suggested method successfully

Received October 15, 2021; Revised October 15, 2021; Accepted October 19, 2021; Published online October 29, 2021

<sup>1)</sup> 울산과학기술원 도시환경공학과 석·박사과정생 (Combined MS/PhD Student, Department of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology)

<sup>2)</sup> 울산과학기술원 도시환경공학과 박사후연구원 (Postdoctoral Researcher, Department of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology)

<sup>3)</sup> 울산과학기술원 도시환경공학과 정교수 (Professor, Department of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology)

<sup>4)</sup> 극지연구소 원격탐사 빙권정보센터 책임연구원 (Principal Researcher, Center of Remote Sensing and GIS, Korea Polar Research Institute)

† Corresponding Author: Jungho Im (ersgis@unist.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.

classified the water- and ice-covered ponds which were difficult to distinguish with Sentinel-2 optical images. Lastly, the pros and cons of the melt pond detection using satellite altimetry and optical images were discussed.

**Key Words:** ICESat-2, Sea ice, Melt pond, Altimetry, Photon height, Photon count

**요약:** 북극의 용빙호(melt pond)는 해빙 면적 감소 및 북극 빙권 변화에 중요한 역할을 하기 때문에 용빙호의 정확한 관측이 필요하다. 미국 NASA의 차세대 고도계 위성인 Ice, Cloud, and Land elevation Satellite-2 (ICESat-2)는 532 nm의 녹색 레이저를 발사한 뒤 반사되는 광자(photon)의 이동 시간을 계산하여 전 지구적으로 고해상도 고도 정보를 관측한다. ICESat-2는 현재 널리 쓰이고 있는 고도계인 CryoSat-2에 비해 세밀한 관측이 가능하기 때문에, Cryosat-2에서 관측할 수 없는 작은 규모의 용빙호를 탐지할 수 있을 것으로 기대된다. ICESat-2의 기본적인 정보로는 표면 높이(surface height)와 반사되는 광자의 수(photon count)가 있다. 본 연구에서는 각 ICESat-2 지점을 중심으로 10 m 길이의 segment를 생성하여 segment 내의 높이 표준편차와 총 광자 수를 활용한 용빙호 탐지 알고리즘을 제시하였다. 용빙호는 표면이 해빙에 비해 매끄러워서 높이의 분산이 적으므로 높이의 표준편차를 활용하여 일차적으로 용빙호와 해빙을 분류하였다. 그 다음으로는 용빙호 중에서 표면이 물인 용빙호와 얼음 표면인 용빙호를 분류하였다. 표면이 물인 용빙호는 광자를 많이 흡수하기 때문에 단위 segment 내에서 반사되어 수집된 광자의 수가 적으며, 반대로 얼음으로 덮인 용빙호는 반사되는 광자의 수가 많다. 결과적으로 본 연구에서 제시하는 용빙호 탐지 방법을 통해 물과 얼음으로 덮인 용빙호를 구별하여 탐지할 수 있다. Sentinel-2 광학 영상을 활용하여 용빙호 탐지 결과의 정성적인 분석을 하였다. 그 결과 Sentinel-2 광학 영상으로 구분하기 어려운 표면이 물인 용빙호와 얼음인 용빙호를 ICESat-2를 활용해 효과적으로 분류하였다. 마지막으로 고도계 위성 및 광학 영상을 활용한 용빙호 탐지의 고찰을 서술하였다.

## 1. 서론

북극 해빙은 대기와 바다의 에너지 교환을 차단하는 중요한 역할을 한다. 해빙과 눈의 높은 반사도는 북극 해양의 태양 에너지 흡수를 방해한다(Kim *et al.*, 2020). 또한 해빙은 물리적으로 바다와 대기를 차단시킨다. 해빙이 녹는 과정은 양성 피드백(positive feedback)의 특징을 가지는데, 해빙의 양이 줄어들수록 해당 지역에서 흡수되는 열의 양이 증가하며 이는 해빙의 감소 속도를 더욱 가속화시킨다(Comiso, 2006; Tietsche *et al.*, 2011). 해빙의 일부가 녹아서 생기는 용빙호(melt pond)에서는 대기와의 열 교환이 해빙에 비해 수십~수백 배 활발하게 이뤄진다(Blockley *et al.*, 2020; Marcq and Weiss, 2012). 또한 용빙호는 주변 해빙의 녹는 속도를 빠르게 증가시킨다(Perovich and Polashenski, 2012). 북극 용빙호 비율(melt pond fraction)의 변화는 해빙 면적 예측(Schröder *et al.*, 2014) 및 북극 진동(Arctic oscillation)과도 연관이 있으며(Feng *et al.*, 2021), 따라서 용빙호 비율의 연도별 경향을 파악하는 것은 해빙 예측 및 기후변화 분석에 매우 중요하다(Cohen *et al.*, 2014; Johannessen *et al.*, 2004;

Rampal *et al.*, 2009; Wernecke and Kaleschke, 2015).

인공위성 고도계는 날씨에 상관없이 전 지구에 걸쳐 표면 높이를 제공하기 때문에, 빙권 연구에 활발히 활용되고 있다. 고도계는 위성에서 신호를 보낸 후 반사된 신호를 받아 이동 시간을 계산하고 최종적으로 해당 지구 표면의 높이를 계산한다. 고도계를 활용한 관측은 위성의 궤도에 따른 1차원 표면 높이 정보를 높은 정밀도로 제공하고 있다. 현재 빙권 조사에 널리 쓰이고 있는 고도계는 2010년에 발사된 유럽 우주국(European Space Agency; ESA)의 CryoSat-2와 2018년에 발사된 미국 항공우주국(National Aeronautics and Space Administration; NASA)의 ICESat-2이다. CryoSat-2는 Ku 대역 레이더(13.575 GHz)를 활용하여 2010년부터 지금까지 지구 전체의 고도 데이터를 제공하고 있다. 특히 CryoSat-2는 해빙 두께 추정 및 남극 대륙의 고도 변화를 파악하는데 활발히 활용되고 있다(Laxon *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2016, 2018; Shepherd *et al.*, 2018). CryoSat-2의 관측 진행 방향(along-track)의 관측 간격은 약 250 m이며, ICESat-2의 진행 방향의 pulse 관측 간격은 약 70 cm이기 때문에 ICESat-2를 활용하면 CryoSat-2에서 관측하지 못한 작은

규모의 용빙호 탐지를 기대할 수 있다. CryoSat-2는 레이더를 활용하여 반사된 신호 강도를 bin 단위로 측정한다(Lee *et al.*, 2018). 반면에 ICESat-2는 532 nm의 녹색 파장대의 반사된 광자를 수집한다. 두 고도계 위성의 관측 특성이 다르기 때문에, ICESat-2를 이용한 용빙호 탐지를 위해서는 기존 CryoSat-2와는 다른 관점의 접근법이 필요하다.

고도계는 1차원의 높이 정보만을 제공하기 때문에, 용빙호 탐지 알고리즘 개발 및 검증 단계에서는 배경으로 활용할 수 있는 고해상도 다중 분광 영상이 필요하다. 다중 분광 영상은 넓은 지역에 걸쳐 가시 영상과 근적외선(near infra-red; NIR) 영상을 제공하기 때문에, 육안 판독을 통해 고도계 기반 용빙호 탐지 결과 분석에 활용될 수 있다. 해빙과 용빙호에서 측정되는 분광 특성의 차이는 용빙호의 종류에 따라 다르다. 용빙호 표면이 완전히 녹아서 물이 노출된 경우에는 해빙과 용빙호의 분광 특성의 차이가 뚜렷한 반면에, 얼음 및 눈으로 덮인 용빙호는 해빙과의 분광 특성이 유사한 경우도 있다. 따라서 다중 분광 위성으로 분류한 용빙호가 항상 참값은 아니라는 것을 유의할 필요가 있다.

현재 다양한 북극 표면에서의 ICESat-2 관측 자료의 특성 분석 및 용빙호 탐지 연구는 NASA의 ICESat-2 개발 팀에서 주로 진행하고 있다. Farrell *et al.* (2020)은 북극의 해빙, 용빙호, 리드(lead)에 대해서 ICESat-2의 특성을 분석하였다. Petty *et al.* (2020)은 ICESat-2를 활용하여 리드의 비율(lead fraction)을 산출 및 분석하였다. Tilling *et al.* (2020)은 ICESat-2에서 pulse당 수집한 광자의 수(photon count per pulse)를 활용하여 용빙호 탐지 방법을 제시하였다. 얼음으로 덮인 용빙호의 경우 표면의 거칠기가 해빙에 비해 상대적으로 적기 때문에, 단위 pulse당 더 많은 광자를 반사한다는 가정에 기반한 연구이다. Tilling *et al.* (2020)은 단위 pulse당 반사되어 수집되는 광자의 수가 16개 이상이면 melt pond로 간주하였다. 하지만 반사되는 광자 개수만을 활용하여 용빙호를 탐지하기에는 예외 사례가 많으며, 특히 용빙호 표면의 녹은 상태가 심한 경우에는 광자의 흡수율이 증가하기 때문에 반사되는 광자의 개수만으로는 용빙호를 탐지하는 것에 한계가 있다. 반사되는 광자 개수와 더불어 높이 정보는 해빙과 용빙호에서 뚜렷한 차이를 보인다. Farrell *et al.* (2020)은 용빙호와 용빙호 주변 해빙의 ICESat-2 표

면 높이를 비교하여 두 표면에서의 높이 분포에 확실한 차이가 있음을 보였으며, 이를 활용하여 용빙호의 깊이를 추정하였다. ICESat-2를 활용한 리드 탐지에는 광자 개수와 높이 정보를 같이 활용한 사례가 있지만(Petty *et al.*, 2020), 아직까지 ICESat-2를 활용한 용빙호 탐지에는 반사되는 광자의 개수와 표면 높이 정보를 함께 활용한 연구가 부족하다. 특히 ICESat-2 관측 궤도에 따른 표면 높이의 지역적인 분산은 해빙과 용빙호를 구별하는 중요한 역할을 할 것으로 기대되지만, 아직까지 이를 활용한 용빙호 탐지 연구는 미흡한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 북극 용빙호 탐지에 ICESat-2 광자를 통해 측정된 표면 높이(photon height)와 수집된 광자 수(photon count)를 함께 활용하는 가능성을 모색해보고자 한다.

본 연구의 주요 목적 및 흐름은 다음과 같다. 먼저 해빙 및 용빙호에서 ICESat-2의 관측 값을 분석하고, ICESat-2를 활용한 용빙호 탐지 방법을 제시한다. 이후 결과 분석을 통해 ICESat-2를 활용한 용빙호 탐지 연구의 가능성 및 한계에 대해 논의한다. ICESat-2 기반 용빙호 탐지 결과의 평가를 위해서는 같은 시간에 관측한 광학 위성을 활용하는 것이 이상적이며, 따라서 Sentinel-2와 관측 시간이 일치한 사례를 활용하였다.

## 2. 연구 자료

### 1) ICESat-2

ICESat-2는 2018년 9월에 NASA에서 발사한 차세대 레이저 기반 고도계이다. ICESat-2에 탑재된 Advanced Topographic Laser Altimeter System(ATLAS) 센서는 500 km 고도에서 지구의 표면 높이(surface elevation)를 측정한다(Markus *et al.*, 2017; Neumann *et al.*, 2020). ICESat-2의 같은 궤도의 재방문 주기는 91일이다. ATLAS는 532 nm 녹색 레이저 pulse를 10 kHz 주파수로 방출하며, 관측 궤도 방향에 따른 pulse별 거리는 70 cm이다. 하나의 pulse에서 발사된 약 10,000개의 광자는 3개의 강한 빔(strong beam)과 3개의 약한 빔(weak beam)으로 나뉘지며, 강한 빔과 약한 빔은 약 4대 1의 에너지 비율을 가진다(Neumann *et al.*, 2020). 강한 빔과 약한 빔은 관측 궤도와 수직 방향으로 약 3.3 m 떨어져서 한 쌍을 이루며, 총 3개의 쌍은 ICESat-2의 관측 궤도와 수직 방향으로 각각

2.5 km 간격을 가진다. 관측 궤도 방향으로 각 pulse의 기준 간격은 약 70 cm이지만, 각 pulse에서 방출된 광자들이 지표에서는 더욱 넓게 퍼진 뒤 수집된다. 결과적으로 실제 관측된 광자들간의 거리는 수 cm 정도로 촘촘한 경우도 있다.

ICESat-2의 산출물은 Advanced Topographic Laser (ATL) 시리즈로 이루어져 있으며, 기본이 되는 산출물은 Level-2 자료인 ATL03 photon height 자료이다. Level 3 및 4 자료들은 모두 ATL03 photon height 자료로부터 파생된다. 본 연구에서는 ATL03 photon height 자료를 사용하였다(<https://nsidc.org/data/ATL03/versions/4>). ICESat-2 자료는 Hierarchical Data Format 5(HDF5) 형식으로 제공되며, 3쌍의 레이저 빔 자료가 ground track (GT) 산출물로 제공된다. 강한 빔과 약한 빔에서 발사하는 에너지 비율이 다르므로 약한 빔은 강한 빔에 비해 반사되는 광자의 수가 적다. 특히 흡수가 잘 발생하는 표면이 물인 용빙호 및 리드에서는 일부 구간에서 수집되는 광자가 아예 없는 경우도 있다. 따라서 본 연구에서는 연구 대상으로 하는 용빙호를 지나는 강한 빔인 GT 1st track left beam (GT1L)을 활용하였다. GT1L은 3쌍의 트랙 중 1번째 트랙이며, 강한 빔과 약한 빔 중 왼쪽 빔을 의미한다. 산출물에서 제공하는 강한 빔과 약한 빔의 위치는 ICESat-2 궤도에 따라 달라지며, 본 연구에서 사용한 산출물에는 강한 빔이 왼쪽에 위치하였다.

ATL03 자료 중 본 연구에서는 photon height와 photon count per pulse를 활용하였다. Photon height는 각 관측 지점에서의 광자의 왕복 이동 시간을 계산하여 얻은 지표 높이를 나타내며, photon count per pulse는 같은 관측 지점에서 동시에 수집되는 광자의 개수를 의미한다. Photon count per pulse는 강한 빔 기준으로 16개 이상, 약한 빔 기준으로 4개 이상이면 포화되어 그 이상의 개수를 탐지할 수 없으며, 반사도가 높은 지역에서 포화될 가능성이 높다(Tilling *et al.*, 2020).

### 2) Sentinel-2

Sentinel-2는 ESA에서 발사 후 운용중인 위성으로, 2개의 쌍둥이 위성(2A, 2B)으로 구성되어 있다. 각 위성은 적도 기준으로 10일의 재방문 주기를 가지며, 두 위성의 관측을 통해 적도 기준 5일, 중위도 지역은 약 2-3일의 관측 기간을 가진다. Sentinel-2는 광학부터 근적외선

까지 총 13개의 채널을 가지며, 광학 채널은 10 m급의 공간 해상도를 가진다. ICESat-2의 경우 pulse별 관측 간격이 약 70 cm이기 때문에, ICESat-2의 세밀한 분석을 위해서는 고해상도 광학 위성 활용이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 고위도 지역에서 넓은 영역에 대한 고해상도 영상을 제공하는 Sentinel-2 광학 영상을 ICESat-2 기반 용빙호 탐지의 배경 영상으로 활용하였다.

### 3. 연구 방법

본 연구의 흐름은 크게 1) ICESat-2 ATL03 자료와 Sentinel-2 광학 영상의 match-up, 2) ICESat-2 ATL03 자료 처리, 3) ICESat-2를 활용한 용빙호 탐지로 구성된다. Fig. 1은 본 연구의 흐름도이다.

#### 1) ICESat-2 및 Sentinel-2 match-up 사례 조사

북극 해빙은 바다 위에서 이동하며 그 형태가 변화하기 때문에 고도계 자료의 정확한 분석을 위해서는 가급적 배경이 되는 광학 위성과의 시간 차이가 적어야 한다. ICESat-2와 Sentinel-2의 관측 궤도가 다르기 때문에, 두 위성이 동시에 관측하는 사례를 찾는 것은 매우 어렵다.

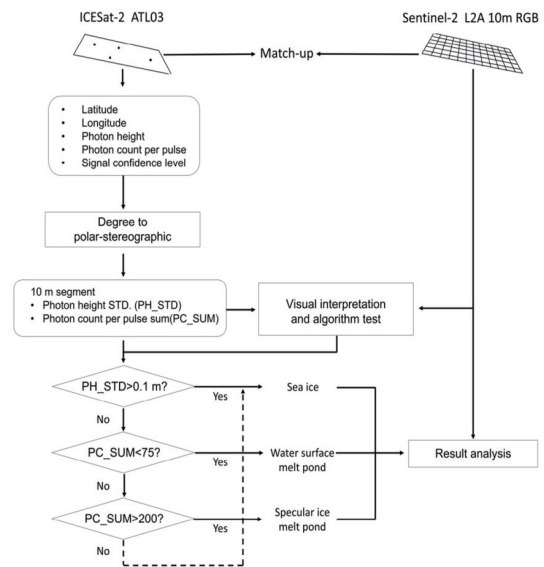


Fig. 1. The overall flowchart proposed to detect Arctic melt ponds in this study. ATL03 stands for the Advanced Topology Laser 03 product, which is the ICESat-2 level-2 photon height dataset.

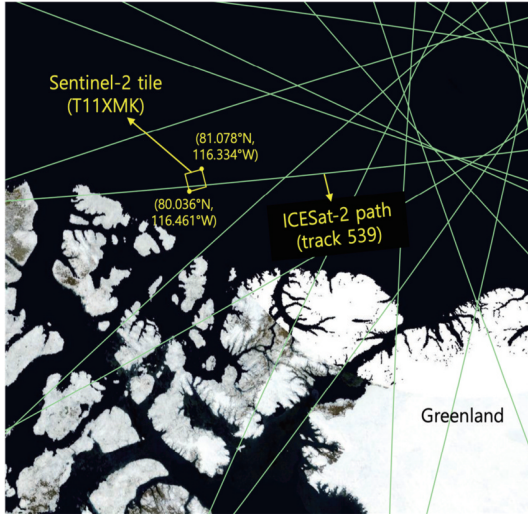


Fig. 2. The study area used in this research. Both ICESat-2 ATL03 and Sentinel-2 L2A data were collected on 5 August 2019. The yellow box represents the Sentinel-2 coverage. The green lines are ICESat-2 tracks on 5 August 2019. The background MODIS image and ICESat-2 tracks were provided from <https://openaltimetry.org/>.

본 연구에서는 위성간 관측 시간 차이에서 오는 불확실성을 최소화하기 위해 같은 시간에 촬영된 2019년 8월 5일 사례를 활용하였고, 해당 사례는 선행 연구인 Tilling *et al.* (2020)을 참조하여 선정하였다. ICESat-2는 track 번호 593의 ATL03 자료를 사용하였고, Sentinel-2는 T11XMK tile의 Level-2A 자료를 사용하였다. Fig. 2는 연구 지역 및 ICESat-2와 Sentinel-2의 match-up 정보이다.

## 2) ICESat-2 자료 처리

앞서 언급한대로 본 연구에서는 ICESat-2 ATL03의 photon height 및 photon count per pulse 자료를 활용하였다. 먼저 원하지 않는 신호를 제거하기 위해서 ICESat-2 자체적으로 제공하는 신호 신뢰값(signal confidence level)를 사용하였다. 신호 신뢰값은 -2에서 4까지 1의 간격으로 제공되는데, 2는 낮은 신뢰도, 3은 중간 신뢰도, 4는 높은 신뢰도를 제공하며 나머지 값들은 noise 및 해당 pulse에서 방출한 신호가 아닌 다른 곳에서 도달한 신호로 간주한다. 본 연구에서는 중간 신뢰도 이상의 ATL03 자료만을 사용하였다. ICESat-2 ATL03 단일 관측 지점의 표면 높이 외에 주변 지역과의 상대적 높이 분포 및 총 취득 광자 수를 계산하기 위하여 moving

window를 활용하여 각 관측 지점과 이웃하는 정보를 추출하였다. 각각의 ICESat-2 ATL03 자료의 중심 점으로부터 양쪽으로 각각 5 m 이내의 자료를 모아서 10 m 길이의 segment를 만들었으며, 각 segment별로 photon height의 표준편차 값(photon height standard deviation; PH\_STD)과 photon count per pulse의 총 합(photon count per pulse sum; PC\_SUM)을 구하였다. 하나의 segment 내에서 수집된 자료의 수는 segment별로 다르다. 10 m의 segment별로 수집된 ICESat-2 ATL03 데이터 개수는 최소 5개, 최대 261개, 평균값과 최빈값은 약 150개이다. Segment의 거리가 10 m이기 때문에 한 segment 내의 ICESat-2 ATL03 자료들의 평균 거리는 약 6.67 cm이다.

## 3) ICESat-2 segment 분석을 통한 용빙호 탐지

해빙과 용빙호를 구별하는 기본적인 방법은 상대적인 높이 차이를 활용하는 것이다. 표면 높이의 경우 기본적으로 지역별로 절대값의 차이가 발생할 수 있기 때문에, 높이 자체를 활용하기보다는 상대적인 특성을 활용하는 것이 더 중요하다. 따라서 본 연구에서는 PH\_STD를 사용하였으며, 이를 통해 해빙과 용빙호 높이의 상대적인 비교만을 수행할 수 있다. 표면이 거친 해빙 지역에 대해서는 PH\_STD 값이 상대적으로 높은 반면, 용빙호 및 리드에서는 PH\_STD 값이 상대적으로 작다. 경험적인 비교를 통하여 PH\_STD의 임계값을 0.1 m로 정하였으며, PH\_STD가 0.1 m 보다 크면 해빙, 0.1 m 이하인 경우에는 용빙호로 판별하였다(Fig. 1). PH\_STD는 segment 내의 높이 변화를 반영하기 때문에 해빙과 용빙호를 구별하는데 적합하지만, 표면이 물인 용빙호와 매끄러운 얼음 표면의 용빙호를 구별하기에는 한계가 있다.

ICESat-2는 532 nm의 녹색 레이저 pulse를 발사 후 돌아오는 광자를 수집하기 때문에, 지구 표면의 상태에 따라 반사되는 광자의 수가 현저하게 차이난다(Farrell *et al.*, 2020; Neumann *et al.*, 2020; Tilling *et al.*, 2020). 표면의 거칠기가 큰 경우에는 광자가 산란되기 때문에 반사되어 돌아오는 경우가 적으며, 반대로 매끈한 표면에서는 상대적으로 더 많은 수의 광자를 수집할 수 있다. 이를 활용하여 Tilling *et al.* (2020)에서는 16개 이상의 photon count per pulse를 용빙호의 기준으로 정의하였다. 하지만 표면이 많이 녹은 용빙호의 물 표면에서는 얼음으로 덮인 용빙호보다 광자의 반사가 적어서 수집된 광자의

수가 줄어들기 때문에, 반사된 광자 개수만을 활용하는 것은 한계가 있다(Tilling *et al.*, 2020). 또한 photon count per pulse의 경우 단일 ATL03 관측 값에 해당하는 정보를 제공하므로, 같은 용빙호 내에서도 공간적으로 연속되는 관측 값에서 일관적인 값을 가지지 않는 경우가 있다. 이를 해결하기 위해 photon count per pulse 대신 10 m segment 단위의 광자 개수인 PC\_SUM을 활용하였다. 하나의 ATL03 자료는 최소 1개에서 최대 16개의 광자를 동시에 수집하기 때문에, segment별로 수집되는 ATL03 자료의 개수와 PC\_SUM의 값은 매우 큰 연관성을 가진다. PC\_SUM을 활용하는 것은 개별 ATL03 point 자료에서 수집된 광자의 개수에서 획득하는 정보(Tilling *et al.*, 2020) 이외에도 ATL03 point 자료의 지역적인 분포까지 활용할 수 있다. 물 표면에서는 흡수되는 광자가 많기 때문에 급격하게 PC\_SUM 값이 줄어드는 경향을

보였으며, 경험적인 비교를 통해 75를 임계값으로 설정하였다. 앞서 PH\_STD 임계값을 활용해 해빙으로 분류되지 않은 결과 중 PC\_SUM이 75 미만인 경우는 물 표면으로 분류하였다. 반대로 표면이 얼음으로 덮인 용빙호의 경우에는 높은 PC\_SUM 값을 가지기 때문에 200 이상의 PC\_SUM을 가지는 경우를 용빙호로 분류하였다(Fig. 1). 결과적으로 PH\_STD를 통해 먼저 해빙과 용빙호 여부를 판별한 뒤, 용빙호 중에서 다시 PC\_SUM을 통해 물과 얼음 표면을 분류하였다.

### 4. 결과 및 토의

#### 1) Sentinel-2 영상 내의 용빙호 탐지 사례 분석

ICESat-2의 높이 및 광자 반사 특성이 해빙, 표면이 물

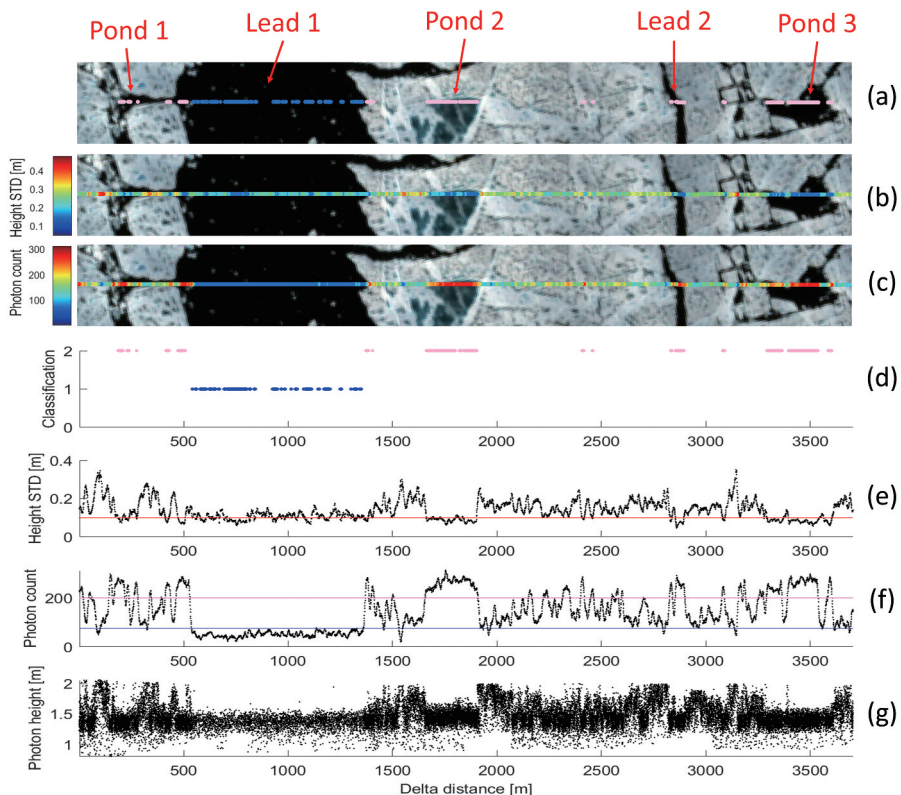


Fig. 3. Analysis of ICESat-2 data over various surface types identified from the Sentinel-2 image collected on 05 Aug. 2019. (a) and (d) are the classification results using the proposed approach. Blue and pink colors represent the water and specular ponds, respectively. (b) The standard deviation of the photon height per segment [m]. (c) The total number of photons per segment. (e) The standard deviation of photon heights with the threshold (red horizontal line). (f) The total number of photons per segment with the thresholds for water (blue line) and specular ponds (pink line). (g) ATL03 photon height [m].

인 용빙호, 표면이 얼음인 용빙호에서 어떻게 다른지 분석하기 위해 Sentinel-2를 배경으로 하여 분석을 수행하였다. Fig. 3은 2019년 8월 5일의 Sentinel-2 영상의 일부를 확대한 것이다. Fig. 3(a)는 용빙호 탐지 결과를 Sentinel-2와 비교한 것이며, 파란 색은 물을 표면으로 가지는 용빙호, 분홍 색은 반사도가 높은 얼음 표면을 가진 용빙호 (specular pond)를 나타낸다. Fig. 3(b)와 (c)는 각 segment의 PH\_STD를 나타내며 단위는 m이다. Fig. 3(d)와 (e)는 각 segment당 획득한 PC\_SUM을 의미한다. Fig. 3(d)는 Fig. 3(a)에서 물이 표면인 용빙호와 얼음이 표면인 용빙호의 분류 결과가 섞여있을 때 분류 결과를 판독하기 쉽게 하기 위해 수면(파랑)과 얼음 표면 용빙호(분홍)를 분리한 것이다. Fig. 3(e)의 붉은 선은 PH\_STD의 임계값인 0.1 m를 나타내며, Fig. 3(f)의 파란색 및 분홍색 선은 각각 수면 및 얼음 표면 용빙호의 PC\_SUM 임계값인 75와 200을 나타낸다. 마지막으로 Fig. 3(g)는 segment로 묶지

않은 개별 photon height의 분포를 나타내며, 총 개수는 43,825개이다.

Fig. 3에서는 북극의 다양한 형태의 리드 및 용빙호를 확인할 수 있다. PH\_STD의 분포는 모든 리드 및 용빙호에서 비교적 일관적인 분포를 보인다. 약 1 km 규모의 Lead1과 나머지 리드 및 용빙호에서 segment 중 일부가 PH\_STD가 임계값보다 낮은 결과를 보인다. 이를 통해 해빙과 리드 및 용빙호를 일차적으로 구분하는 데에는 PH\_STD가 효과적으로 사용될 수 있다는 가능성을 제시한다. 하지만 PH\_STD만으로는 표면이 물인 용빙호와 얼음인 용빙호를 구별하기 어렵다. 이는 PC\_SUM을 활용하면 보다 뚜렷하게 구분할 수 있는데, 비교적 규모가 큰 리드인 Lead1과 나머지 리드 및 용빙호의 신호를 비교하면 광자의 반사가 극명하게 차이 나는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 표면이 물인 Lead 1에서는 PC\_SUM이 매우 낮은 반면, 다른 리드 및 용빙호에서는

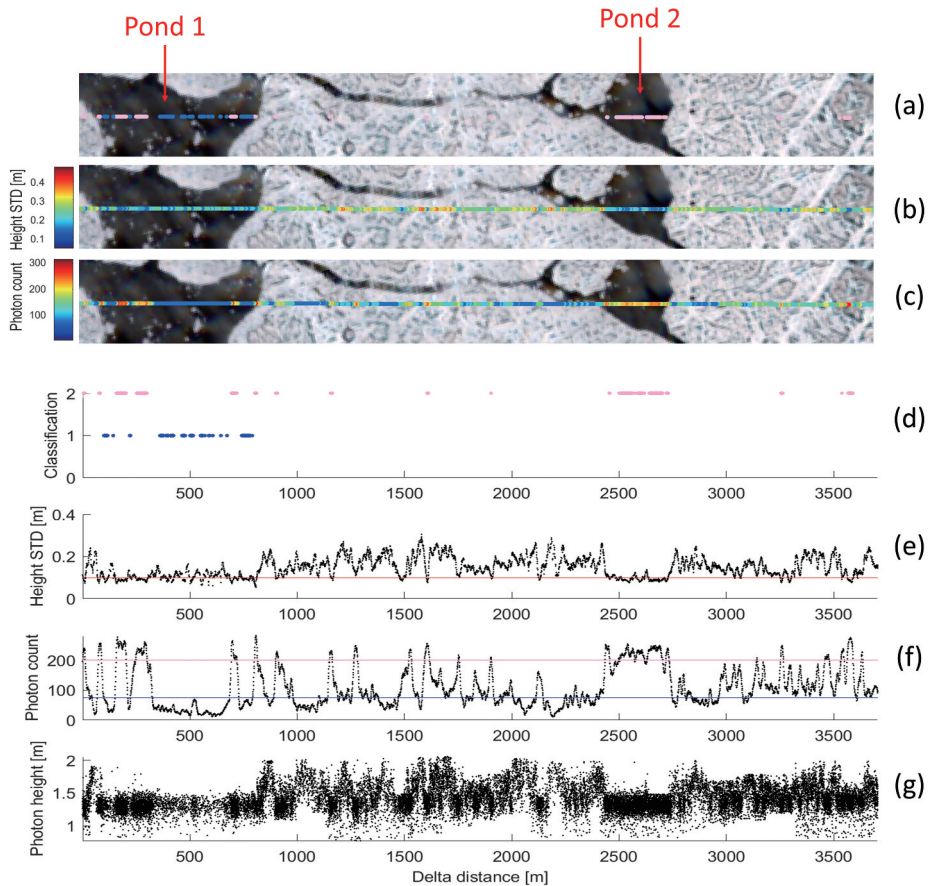


Fig. 4. Same as Fig. 3 over different melt ponds from same ICESat-2 track and Sentinel-2 image.

높은 PC\_SUM을 보이므로 표면이 얼음으로 덮였다는 것을 알 수 있다. 특히 Sentinel-2 광학 영상에서는 Lead1, Lead2, Pond3의 차이를 육안으로 구분하기 어려운 반면, ICESat-2에서 수집되는 광자의 양이 뚜렷하게 차이는 것은 고해상도 고도계의 핵심적인 특성으로 보인다. 지표 특성에 따른 광자 양의 차이는 Fig. 3(g)에서도 확인할 수 있는데, 수면인 Lead1에 비해 Pond1-3, Lead2에서는 단위 길이당 비교적 많은 양의 ICESat-2 높이 정보가 분포하고 있다.

Fig. 4는 같은 Sentinel-2 광학 영상의 다른 용빙호 사례이다. Pond2에서는 PH\_STD 및 PC\_SUM의 분포가 비교적 균일하다. 반면에 Pond1에서는 이웃한 지점에서도 다른 PC\_SUM 분포를 보여주며, 결과적으로 하나의 용빙호 내에서 물과 매끄러운 얼음이 동시에 존재하는 것으로 분류되었다. 이를 통해 광학 영상에서 구별하기 어려운 용빙호의 표면 특성을 ICESat-2에서 분류할 수 있는 가능성을 확인하였다. 하지만 해빙 내에서 일부 오분류가 발생하였으며, 반대로 탐지하지 못한 용빙호 정보도 다수 존재한다. 이를 통해 제시한 분류 알고리즘이 모든 상황에서 활용될 수 없다는 한계점을 확인하였다. 또한 본 연구에서 설정한 임계값은 본 연구에서 관찰한 용빙호에 대해 최적화 되었기 때문에, 추가적인 분석을 통해 더욱 일반화된 임계값 설정이 필요할 것이다.

## 2) 고도계 및 광학 영상을 활용한 용빙호 탐지의 고찰

고도계를 활용한 용빙호 탐지는 근본적인 한계점을 가지고 있다. 고도계 정보 자체는 1차원적인 정보만을 제공하기 때문에, 설사 관측이 정확하게 수행되었다고 하더라도 실제 지표의 정보를 광학 영상에 비해 확실하게 파악하는데 한계가 있다. 광학 영상과의 정확한 비교를 위해서는 두 위성간의 관측 시간의 차이가 최소가 되어야 하는데, 이러한 사례를 찾는 것은 매우 어려운 일이다. 본 연구에서 활용한 사례는 고도계와 광학 위성의 관측 시간이 거의 비슷하여 공간 분포가 잘 맞는 경우이다. 하지만 대부분의 다른 사례에서는 수집 분 이상의 시간 차이로 인해 사용자가 임의로 두 영상의 공간 분포를 일치시켜야 하며, 이 과정에서 해빙의 이동으로 인한 오차 및 주관적인 판단이 발생하게 된다. 이를 해결하기 위한 고해상도 광학 영상으로는 NASA

IceBridge 프로그램의 Continuous Airborne Mapping By Optical Translator(CAMBOT) 영상이 있다. CAMBOT 영상은 ICESat-2 촬영 시간에 맞춰 항공기에서 촬영한 고해상도 영상이다. 하지만 아직까지는 수집된 자료가 매우 제한적이기 때문에, 지속적으로 현장 관측 자료가 수집된다면 용빙호 탐지 연구에 활용할 수 있을 것으로 보인다. 정리하자면 ICESat-2와 함께 사용할 수 있는 고해상도 광학 영상을 확보하는 것이 ICESat-2를 활용한 용빙호 탐지 및 분석의 첫 단계라고 할 수 있다.

앞서 분석한 것과 같이 일부 리드 및 용빙호 사례에서 광학 위성에서는 차이점을 발견할 수 없지만, 고도계를 활용했을 때 신호의 차이를 확인할 수 있었다. 특히 ICESat-2는 세밀한 관측 간격을 가지기 때문에, 용빙호의 경계 부분의 얇은 얼음에 대한 신호를 탐지할 수 있다. 이는 지금까지 용빙호 탐지에서 참값으로 간주했던 광학 위성 기반의 평가도 오차를 가질 수 있음을 보이며, ICESat-2와 같은 고해상도의 고도계의 활용 가능성을 기대할 수 있는 부분이다. 물론 고도계 신호의 잡음, 광학 위성과 고도계의 관측 시간 차이 동안의 해빙의 이동, 공간 정합에서의 오차 등이 발생할 수 있기 때문에 추후 WorldView나 NASA IceBridge 프로그램의 CAMBOT과 같은 고해상도 광학 영상을 활용한 추가적인 분석이 필수적이다.

## 3) 연구의 독창성 및 한계점

본 연구는 ICESat-2를 활용하여 북극 용빙호 및 리드를 탐지하는 방법을 제안하였다. 표면 높이를 활용한 PH\_STD만으로는 용빙호의 종류를 판별하기에 어려운 면이 있으며, PC\_SUM만을 활용하여 용빙호 분류를 진행할 경우 높은 광자 반사도를 가지는 해빙을 용빙호로 오분류할 수 있다. 따라서 높이 및 광자 반사 정보를 함께 활용하여 서로의 한계점을 보완하며 물과 얼음 표면의 용빙호를 구별하여 탐지하였다.

본 연구의 가장 큰 한계점으로는 검증 사례의 부족이다. ICESat-2에 활용할 수 있는 고해상도 광학 위성이 부족하다. 북극 해빙 중 용빙호가 존재하는 지역은 대체로 해빙이 이동하기 때문에 육상에 비해 ICESat-2 분석에 적절한 광학 위성을 구하는 것이 더욱 어렵다. 추후 더 많은 match-up 사례가 추가된다면 정밀한 분석을 수행할 수 있을 것으로 예상된다. 정량적인 분석이 수행되



지 않은 것도 본 연구의 한계점이다. 이는 고도계 기반 용빙호 탐지 결과 비교를 위해 활용되는 광학 위성으로는 명확한 참값 데이터를 구축하기 어렵기 때문이다. 예를 들어 Fig. 3의 Lead 2와 Pond 3을 Sentinel-2 광학 영상을 통해 표면이 물인 용빙호로 분류하여 참값으로 설정한다면, ICESat-2를 활용한 결과는 오분류가 된다. 하지만 Fig 3(c-g)에서 확인할 수 있듯이 ICESat-2에서 뚜렷하게 얼음 표면 용빙호의 특성이 관측되었기 때문에, ICESat-2을 통해 분류된 결과가 틀렸다고 판단하기 어렵다. 따라서 광학 위성 기반의 용빙호 분류 결과를 모든 경우에 참값으로 활용 할 수 없으며, 이 또한 더욱 많은 ICESat-2와 광학 위성의 사례 조사를 통해 해결 방안을 제시할 수 있을 것으로 기대한다.

용빙호 탐지를 위해 본 연구에서는 단순하고 직관적인 임계값을 활용하였다. 이 임계값들은 제한된 사례에서의 분석결과를 통해 경험적으로 결정되었다. 최근에는 여러 기계학습 기법들이 좋은 성능을 보이고 있는 만큼, 추후에 충분한 샘플 수집이 수행된다면 더욱 다양한 모델을 적용하여 향상된 용빙호 탐지 모델을 개발할 수 있을 것으로 예상된다.

## 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 NASA의 차세대 고도계인 ICESat-2를 활용하여 북극 해빙의 용빙호 탐지를 수행하였다. ICESat-2와 동시에 관측된 Sentinel-2 광학 영상을 배경으로 활용하여 해빙, 표면이 물인 용빙호, 얼음으로 덮인 용빙호의 ICESat-2 높이 분포를 분석하였다. 그 결과 높이의 표준 편차가 용빙호에서 해빙과 구분되는 신호를 보인다는 것을 확인하였다. 경험적으로 PH\_STD 임계값을 설정하여 해빙과 용빙호를 분류하였다. 추가적으로 수면과 얼음에서의 광자의 반사도 차이를 활용한 PC\_SUM 임계값을 통해 용빙호를 물 표면을 가진 용빙호와 얼음 표면을 가진 용빙호로 분류하였다. 정성적인 분석 결과 제안된 방법은 전반적으로 용빙호를 효과적으로 탐지하는 것을 확인하다. 하지만 일부 용빙호의 오분류가 존재하며, 다양한 고해상도 위성에서의 검증을 통해 제안된 방법의 일반화 및 개선이 필요하다. 결과 분석을 통해 고도계 및 광학 위성을 활용한 용빙호

탐지에 대해 고려해야 할 점을 논의하였다. ICESat-2와 함께 사용할 수 있는 고해상도 위성 영상 자료를 얻는 것이 현재 ICESat-2를 활용한 용빙호 탐지 및 분석의 큰 한계점이며, 지속적으로 자료가 획득된다면 정량적인 분석 및 고도화된 알고리즘 개발이 가능할 것으로 기대한다.

## 사사

본 연구는 극지연구소 북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구 지원을 받았으며(PE21040), 이에 감사드립니다.

## References

- Blockley, E., M. Vancoppenolle, E. Hunke, C. Bitz, D. Feltham, J.-F. Lemieux, M. Losch, E. Maisonnave, D. Notz, and P. Rampal, 2020. The future of sea ice modeling: where do we go from here?, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(8): E1304-E1311.
- Cohen, J., J.A. Screen, J.C. Furtado, M. Barlow, D. Whittleston, D. Coumou, J. Francis, K. Dethloff, D. Entekhabi, and J. Overland, 2014. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather, *Nature Geoscience*, 7(9): 627-637.
- Comiso, J.C., 2006. Abrupt decline in the Arctic winter sea ice cover, *Geophysical Research Letters*, 33(18): L18504.
- Farrell, S., K. Duncan, E. Buckley, J. Richter-Menge, and R. Li, 2020. Mapping sea ice surface topography in high fidelity with ICESat-2, *Geophysical Research Letters*, 47(21): e2020GL090708.
- Feng, J., Y. Zhang, Q. Cheng, K. Wong, Y. Li, and J. Y. Tsou, 2021. Effect of melt ponds fraction on sea ice anomalies in the Arctic Ocean, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 98: 102297.

- Johannessen, O.M., L. Bengtsson, M.W. Miles, S.I. Kuzmina, V.A. Semenov, G.V. Alekseev, A. P. Nagurnyi, V.F. Zakharov, L.P. Bobylev, and L.H. Pettersson, 2004. Arctic climate change: observed and modelled temperature and sea-ice variability, *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 56(4): 328-341.
- Kim, Y.J., H.-C. Kim, D. Han, S. Lee, and J. Im, 2020. Prediction of monthly Arctic sea ice concentrations using satellite and reanalysis data based on convolutional neural networks, *The Cryosphere*, 14(3): 1083-1104.
- Laxon, S.W., K.A. Giles, A.L. Ridout, D.J. Wingham, R. Willatt, R. Cullen, R. Kwok, A. Schweiger, J. Zhang, and C. Haas, 2013. CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume, *Geophysical Research Letters*, 40(4): 732-737.
- Lee, S., J. Im, J. Kim, M. Kim, M. Shin, H.-C. Kim, and L.J. Quackenbush, 2016. Arctic sea ice thickness estimation from CryoSat-2 satellite data using machine learning-based lead detection, *Remote Sensing*, 8(9): 698.
- Lee, S., H.-C. Kim, and J. Im, 2018. Arctic lead detection using a waveform mixture algorithm from CryoSat-2 data, *The Cryosphere*, 12(5): 1665-1679.
- Marcq, S. and J. Weiss, 2012. Influence of sea ice lead-width distribution on turbulent heat transfer between the ocean and the atmosphere, *The Cryosphere*, 6(1): 143-156.
- Markus, T., T. Neumann, A. Martino, W. Abdalati, K. Brunt, B. Csatho, S. Farrell, H. Fricker, A. Gardner, and D. Harding, 2017. The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): science requirements, concept, and implementation, *Remote Sensing of Environment*, 190: 260-273.
- Neumann, T., A. Brenner, D. Hancock, J. Robbins, J. Saba, K. Harbeck, A. Gibbons, J. Lee, S. Luthcke, and T. Rebold, 2020. ATLAS/ICESat-2 L2A global geolocated photon data, version 3, Boulder, NASA National Snow and Ice Data Center, Tacom, WA, USA.
- Perovich, D.K. and C. Polashenski, 2012. Albedo evolution of seasonal Arctic sea ice, *Geophysical Research Letters*, 39(8): L08501.
- Petty, A.A., N.T. Kurtz, R. Kwok, T. Markus, and T.A. Neumann, 2020. Winter Arctic sea ice thickness from ICESat-2 freeboards, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(5): e2019JC015764.
- Rampal, P., J. Weiss, and D. Marsan, 2009. Positive trend in the mean speed and deformation rate of Arctic sea ice, 1979-2007, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C5): C05013.
- Schröder, D., D.L. Feltham, D. Flocco, and M. Tsamados, 2014. September Arctic sea-ice minimum predicted by spring melt-pond fraction, *Nature Climate Change*, 4(5): 353-357.
- Shepherd, A., E. Ivins, E. Rignot, B. Smith, M. Van Den Broeke, I. Velicogna, P. Whitehouse, K. Briggs, I. Joughin, and G. Krimmer, 2018. Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017, *Nature*, 558: 219-222.
- Tietsche, S., D. Notz, J. Jungclauss, and J. Marotzke, 2011. Recovery mechanisms of Arctic summer sea ice, *Geophysical Research Letters*, 38(2): L02707.
- Tilling, R., N. Kurtz, M. Bagnardi, A. Petty, and R. Kwok, 2020. Detection of Melt Ponds on Arctic Summer Sea Ice From ICESat-2, *Geophysical Research Letters*, 47(23): e2020GL090644.
- Wernecke, A. and L. Kaleschke, 2015. Lead detection in Arctic sea ice from CryoSat-2: quality assessment, lead area fraction and width distribution, *The Cryosphere*, 9(5): 1955-1968.