





3-D 레이저 스캐너를 이용한 해빙 표면고도 관측

서민지¹ , 박지은¹ , 박정원² , 박진구² , 김현철^{3,*} 

¹연수연구원, 극지연구소 원격탐사빙권정보센터, 인천광역시 연수구 송도미래로 26, 21990, 대한민국

²선임연구원, 극지연구소 원격탐사빙권정보센터, 인천광역시 연수구 송도미래로 26, 21990, 대한민국

³센터장, 극지연구소 원격탐사빙권정보센터, 인천광역시 연수구 송도미래로 26, 21990, 대한민국

Sea Ice Elevation Measurements Using 3-D Laser Scanner

Minji Seo¹, Ji-Eun Park¹, Jeong-Won Park², Jinku Park², and Hyun-Cheol Kim^{3,*}

¹PostDoc, Center of Remote Sensing and GIS, Korea Polar Research Institute, 26 Songdomirae-ro, Yeonsu-gu, 21990 Incheon, South Korea

²Senior Research Scientist, Center of Remote Sensing and GIS, Korea Polar Research Institute, 26 Songdomirae-ro, Yeonsu-gu, 21990 Incheon, South Korea

³Director, Center of Remote Sensing and GIS, Korea Polar Research Institute, 26 Songdomirae-ro, Yeonsu-gu, 21990 Incheon, South Korea

Received February 22, 2023
Revised March 13, 2023
Accepted March 14, 2023

Corresponding Author

Hyun-Cheol Kim

Tel: +82-32-760-5335

E-mail: kimhc@kopri.re.kr

This study aims to introduce a sea ice elevation dataset estimated by using a 3-D laser scanner during the ice camp of the 2022 Arctic summer field survey. The equipment used is FARO's Laser scanner FOCUS 3D X 130 HDR. The observed sea ice floe is located in the Arctic Ocean (76°13' N, 174°35') and is a multi-year ice with several melt ponds and ice ridges. We scanned eight sections separately, considering the equipment's maximum horizontal scan range and the ice surface's topographic features. The raw data were co-registered based on the positions of reference spheres. The result indicated a significant level of accuracy with a target-based vertical mean error of 4.8 mm. The laser scanner data were merged into point clouds ranging from 160×210 m. As a result, sea ice elevation data were generated in 0 to 2.8 m based on the minimum vertical point in the observation range. Sea ice elevation data is an essential variable in estimating the various properties of sea ice, such as ice thickness and roughness. In addition, using climatic variables such as air temperature and energy budget observed simultaneously can help to understand the physical interaction between the sea ice surface and the atmosphere on a local scale.

Keywords: Sea ice, Sea ice elevation, 3-D laser scanner

1. 서론

해빙은 극지방의 기온을 유지시키는 주요 인자 중에 하나이며, 최근 20년 동안 온난화로 인하여 빠르게 감소하고 있다(Kwok, 2018; Lee and Ham, 2022; Serreze et al., 2009). 온난화로 인한 해빙 면적의 감소는 표면에서 반사되는 태양 에너지의 감소로 이어지며, 대기 중 흡수되는 에너지

의 증가로 다시 기온이 상승하는 양의 피드백을 통해 북극 지역의 온난화 가속과 연결된다(Chapin et al., 2005; Curry et al., 1995). 해빙 면적뿐만 아니라 해빙의 여러 가지 물리적 특성은 지표에서 반사되는 에너지의 양을 변화시켜 북극 온난화에 지속적인 영향을 준다. 일년빙과 같은 얇은 얼음에 비해 다년빙과 같이 두꺼운 얼음에서 반사율이 높게 관측되며(Nicolaus et al., 2012), 해빙 농도가 높을수록 높은 반사율

이 관측된다(Seo et al., 2015). 동일한 해빙이라도 표면의 물리적인 특성에 따라 반사되는 에너지의 양이 변화하고 이로 인하여 얼음-해양 간의 에너지 수지가 변화한다. 그렇기 때문에 북극 해빙의 물리적인 특성을 파악하는 것은 북극 기후를 이해하는 데 중요한 부분이다.

해빙의 물리적 특성 중 해빙 표면고도는 해빙 표면의 높낮이 정보를 나타내며, 이로부터 해빙의 거칠기와 두께 등을 추정할 수 있다. 해빙 거칠기는 해빙의 두께, 유형, 변형과도 연관되어 해빙의 종류를 구분하고, 해빙 면적을 예측하는 데 활용되는 중요 변수이다(Park et al., 2020; Soh et al., 2004; Zakhvatkina et al., 2012). 또한, 해빙 두께로 추정 가능한 해빙의 부피는 해빙 변화 예측에 도움을 준다. 해빙 물성의 정확한 자료를 활용한다면 장기 기후 예측의 정확도를 개선할 수 있다. 또한, 과거 해빙 드론을 활용한 해빙 표면고도를 관측하였으며 이 때, DSM의 수평 및 스케일 복구를 위하여 지상 3-D 스캐너 자료를 사용하였다(Kim et al., 2021). 국지적 범위에서 관측된 해빙 표면고도는 드론과 SAR 위성 기반의 광범위한 범위의 표면고도 산출을 위한 검증 및 고도화를 자료로 활용할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 해빙 표면의 특성을 나타내는 변수 중에서 해빙 표면고도를 선정하였으며, 북극 하계 현장조사 기간 중 3-D 레이저 스캐너를 이용한 북극 해빙의 표면고도 관측 결과를 소개한다.

2. 조사 방법

본 연구에서는 FARO사의 Laser scanner FOCUS 3D X 130 HDR를 사용하여 해빙 표면을 측정하였다. FOCUS 스캐너는 1,550 nm의 파장대의 레이저와 HDR 카메라를 활용하여 관측 대상의 표면 정보와 이미지 영상을 수집한다. 수평 측정은 최대 150 m까지 측정 가능하며 표면 물체의 반사 특성에 따라 다른 노이즈를 보여준다(Table 1). 수직 측정에서

는 10 m에서 2 mm, 25 m에서 3.5 mm의 정확도를 보여준다. 하얀색의 표적 물체에서 높은 정확도를 보여주며 영하 20도까지 견디는 내구성으로 북극 해빙의 표면을 측정하는 데 적합한 장비이다.

하계 북극 탐사 연구 기간 중 2022년 8월 3일부터 5일까지 현장조사활동을 수행하였다. 현장조사는 쇄빙연구선인 아라온의 정박에 용이한 평균 두께 약 1.2 m의 다년빙에서 진행되었다. 조사를 수행한 해빙의 경우 대부분 마른 눈으로 덮여 있었으며 용빙호(melt pond)가 다수 분포하였다(Fig. 1). 현장상황을 고려하여 스캔 크기는 20,480×3,414, 점거리는 3.068 mm/10 m로 지정하였다. 해빙 표면의 용빙호와 빙맥(ice ridge)으로 인해 총 8회에 걸쳐서 조밀한 배치로 표면 정보를 취득하였으며 3-D 스캐너 위치 분포는 Fig. 1과 같다. 또한 스캔한 영상을 하나의 영상으로 합성하기 위해서는 측

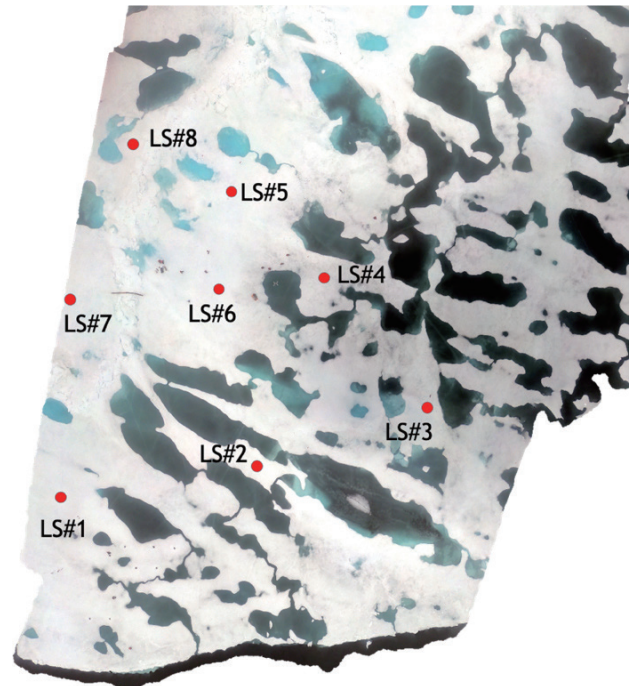


Fig. 1. Location of 3-D laser scanning points.

Table 1. Performance specifications of 3-D laser scanner

	Range	Range noise
White, 90% reflectivity	0.5-150 m	0.1 mm @ 10 m, 0.2 mm @ 25 m
Dark-grey, 10% reflectivity	0.5-150 m	0.3 mm @ 10 m, 0.4 mm @ 25 m
Black, 2% reflectivity	0.5-150 m	0.7 mm @ 10 m, 1.2 mm @ 25 m

정한 영상 사이의 정렬을 맞춰야 하며 이를 위하여 1,550 nm 에서 높은 반사율을 가지는 구체(sphere)를 설치하였다. 구체는 전/후 스캐너 사이에 최소 2개 이상 겹칠 수 있도록 위치를 선정하였다.

3. 연구 결과

스캐닝한 자료를 바탕으로 스캔 포인트 클라우드를 생성하

였으며 스캔시 측정된 이미지 데이터를 바탕으로 색상을 지정하였다. 다음으로 스캐너 자료 사이의 정렬을 수행하기 위하여 측정 자료의 처리과정에서 구체의 반사도와 구경정보를 이용하여 구체를 탐지하였다. 스캔 데이터의 수직 레이아웃정보를 이용하여 측정 자료의 1차 정렬 후 형상정보를 이용하여 2차 정렬을 수행하였다. 그리고 정렬 정확도 향상을 위해서 미리 설치했던 구체정보를 활용하여 레이저 스캐너 위치를 재정렬하였다. 포인트 클라우드 생성 후 중복된 구체가 탐지되지 않은 영

Table 2. Summary of target statistics in registration

Scan point	Maximum distance (mm)	Mean distance (mm)	Maximum horizontal (mm)	Mean horizontal (mm)	Maximum vertical (mm)	Mean vertical (mm)
LS#2	14.2	6.8	13.6	5.3	8.3	3.1
LS#3	8.4	5.1	5.0	3.2	8.3	3.1
LS#4	22.6	7.8	15.5	5.7	16.4	4.7
LS#5	28.0	14.4	24.4	11.5	16.4	7.8
LS#6	28.0	10.1	24.4	8.7	13.6	4.5
LS#7	5.1	3.7	4.5	2.2	5.1	2.3

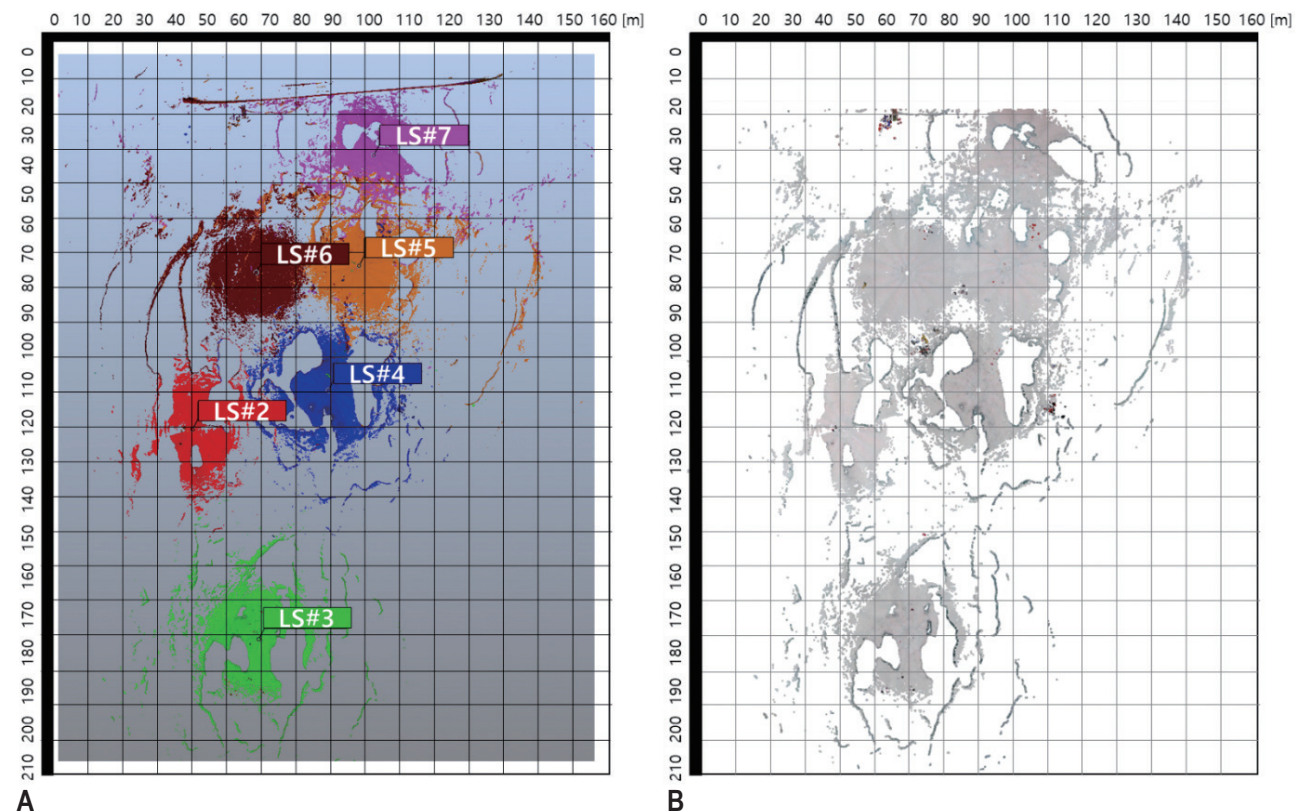


Fig. 2. Distribution of laser points after registration (A) and composed cluster with true color point clouds (B).

상(LS#1, LS#8)을 제외한 6개의 영상을 이용하여 스캔 위치를 정렬하였다. 영상의 정렬의 정확도를 보기 위하여 타겟(구체)을 이용한 수평/수직 오차를 확인하였다(Table 2).

FARO사에서 제공되는 설정 메뉴얼을 바탕으로 모든 오차는 20 mm 이하일 때 적합하며, 오차가 40 mm 이상이면 정렬 정확도가 낮다고 판단된다. 오차 통계 결과 수평 거리의 경우 최대 24.4 mm 오차를 보였고 평균적으로 7.2 mm의 적합한 수준을 보였다. 최대 수평 오차는 LS#5와 LS#6을 정렬할 때 발생하였다. 수직 오차의 경우 최대 16.4 mm, 평균 4.8 mm로 모든 정렬에서 비교적 높은 수준의 정확도로 관측되었다. 수평/수직 오차를 합산한 최대 거리 오차는 28 mm, 평균 거리 오류는 9.2 mm로 적합한 수준으로 관측되었다. 또한 추가적으로 경사계를 이용하여 정렬 일치도를 확인하였을 때 모든 스캔 자료에서 0 degree의 불일치도를 보여주어 경사 없는 영상으로 병합되었다. 종합하면 평균 오차 모두 적합한 수준의 정렬 정확도가 관측되었기 때문에 생성된 정렬을 통하여 스캐닝 영상을 병합하였다. 각 스캔 자료를 병합하여 160×210 m의 표면 스캐닝 자료를 생산하였다. Fig. 2는 자

료의 정렬 분포와 이미지 데이터를 이용한 3-D 포인트 클라우드를 나타내며 격자의 간격은 각각 10 m이다.

해빙 캠프 진행 중 스캐닝을 수행하였기 때문에 연구장비, 사람의 움직임으로 인한 노이즈가 섞여 있다. 전처리과정에서 움직임 물체에 대한 노이즈 제거를 수행하였으나 완벽하게 제거되지 않았다. 이렇게 발생한 노이즈는 주변보다 큰 높이 값을 가지고 있기 때문에 이미지 합성영상과 포인트 클라우드의 높이를 이용하여 노이즈를 제거하였다. 노이즈를 제거한 영상을 바탕으로 수직 측정 스캔정보를 취득하였다. 관측된 수직 스캔 자료에서 최소값(266.50)을 기준점으로 해빙 표면고도를 산정하였다. 해빙 표면고도는 0-2.81 m의 범위를 보였으며 평균은 0.96 m, 표준편차 0.19 m의 통계값을 보였다(Fig. 3). 연구지역의 사진과 비교하였을 때 용빙호와 빙맥의 위치가 동일하게 분포하는 것을 알 수 있다. 하지만 2번의 노이즈 제거를 수행하였으나 여전히 노이즈가 잔존하기 때문에 평평한 얼음지역에서도 일부 비정상적인 높은 고도가 관측된다. 이런 노이즈는 대부분 1.5 m 이상이었으며 이미지 측정 자료와 비교하였을 때, 사람의 움직임으로 인해 발생한 것으로 추정된다.

4. 결론 및 토의

본 연구는 북극 하계 해빙현장조사 기간 동안 3-D 레이저 스캐너를 이용하여 해빙의 표면고도를 측정하였다. 총 8개의 스캔 포인트 중 6개를 활용하여 영상을 병합하였으며 구체 타겟을 기준으로 수직 오차 4.8 mm, 수평 오차 7.2 mm의 유의한 수준의 정확도를 나타내었다. 병합된 영상은 160×210 m 범위의 해빙 표면정보이며 총 5,278,748개의 포인트 클라우드로 생성되었다. 측정된 수직 범위에서 가장 낮은 측정값을 기준으로 표면고도 자료를 생산하였다. 해빙현장조사의 경우 대기-지질-해양 등 다양한 분야의 조사가 함께 수행되었기 때문에 동일 지역에서 실측한 기후 자료(기온, 단파 복사 등)와 표면고도 자료를 연계한다면 해빙 표면의 특성이 지역적 규모에서 미치는 영향력을 분석할 수 있다. 해빙 표면의 물성에 따라서 지표온도 기온의 차이를 분석할 수 있으며 이는 지표-대기 사이의 에너지 교환에 대한 물리적 메커니즘을 밝히는 데 도움을 줄 수 있다. 또한 지상관측 자료로써 비슷한 시기의 무인기 촬영영상 혹은 위성 자료에 대한 검증 자료 및 알

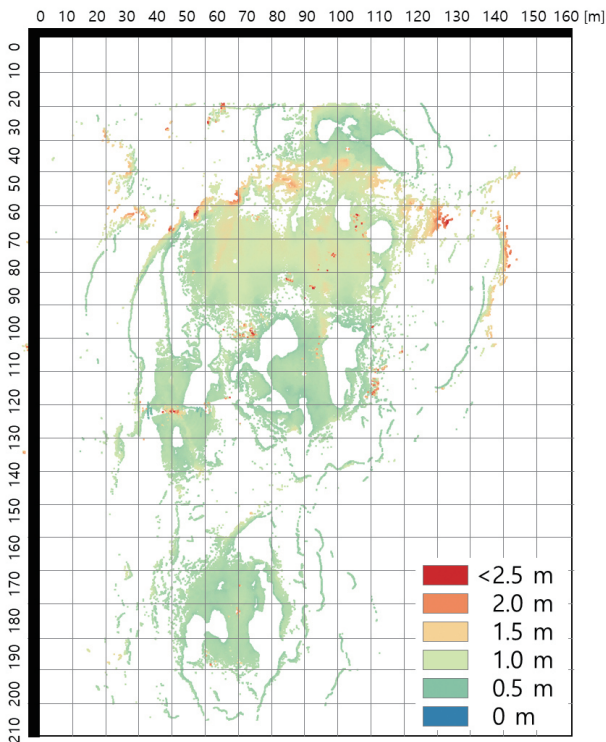


Fig. 3. Sea ice elevation of ice camp.

고리즘 개선에 활용 가능하다. 이를 이용해 고도화된 공간 범위가 확장된 플랫폼의 표면고도 산출물은 해빙 거칠기, 해빙 두께와 같은 해빙 변수 생산에 활용될 수 있으며 개선된 해빙 변수를 활용한다면 극지역의 기후 변화에 대한 예측 정확도를 향상시킬 수 있다. 또한, 추정된 해빙 고도 자료를 SAR 위성에서 관측한 후방 산란 자료와 비교한다면 광역적 범위의 해빙 표면고도 자료를 생산할 수 있다.

Acknowledgement

We would like to thank the anonymous reviewers for providing valuable comments on this study.

Conflict of Interest

Hyun-Cheol Kim has been an Editorial Board of GEO DATA; however, he was not involved in the peer reviewer selection, evaluation, or decision process of this paper. Otherwise, no other potential conflicts of interest relevant to this paper were reported.

Funding Information

This work was supported by Korea Polar Research Institute (KOPRI) grant funded by the Ministry of Oceans and Fisheries (KOPRI project No. PE23040).

References

- Chapin III FS, Sturm M, Serreze MC, et al (2005) Role of land-surface changes in Arctic summer warming. *Science* 310 (5748):657-660
- Curry JA, Schramm JL, Ebert EE (1995) Sea ice-albedo climate feedback mechanism. *J Clim* 8(2):240-247
- Kim JI, Hyun CU, Han H, Kim HC (2021) Digital surface model generation for drifting Arctic sea ice with low-textured surfaces based on drone images. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 172:147-159
- Kwok R (2018) Arctic sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: losses and coupled variability (1958–2018). *Environ Res Lett* 13(10):105005
- Lee JG, Ham YG (2022) Satellite-based data assimilation system for the initialization of Arctic sea ice concentration and thickness using CICE5. *Front Clim* 4:797733
- Nicolaus M, Kattlein C, Maslanik J, Hendricks S (2012) Changes in Arctic sea ice result in increasing light transmittance and absorption. *Geophys Res Lett* 39(24):L24501
- Park JW, Korosov AA, Babiker M, Won JS, Hansen MW, Kim HC (2020) Classification of sea ice types in sentinel-1 synthetic aperture radar images. *Cryosphere* 14(8):2629-2645
- Seo M, Lee CS, Kim H, Huh M, Han KS (2015) Relationship between sea ice concentration and sea ice albedo over Antarctica. *Korean J Remote Sens* 31(4):347-351
- Serreze MC, Barrett AP, Stroeve JC, Kindig DN, Holland MM (2009) The emergence of surface-based Arctic amplification. *Cryosphere* 3(1):11-19
- Soh LK, Tsatsoulis C, Gineris D, Bertoia C (2004) ARKTOS: an intelligent system for SAR sea ice image classification. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 42(1):229-248
- Zakhvatkina NY, Alexandrov VY, Johannessen OM, Sandven S, Frolov IY (2012) Classification of sea ice types in ENVISAT synthetic aperture radar images. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 51(5):2587-2600

Metadata for Dataset

Sort	Field	Subcategory#1	Subcategory#2	
Essential	*Title	Sea ice elevation using 3D-laser scanner		
	*DOI name	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00002177.1		
	*Category	Elevation		
	Abstract			
	*Temporal Coverage	2022/08/03 to 2022/08/05		
	*Spatial Coverage	Address	Arctic Ocean	
		WGS84 Coordinates	76° 13' 26.232" N, 174° 35' 0.042" E (160x210 m)	
	*Personnel	Name	Minji Seo	
Affiliation		Korea Polar Research Institute		
E-mail		seo_mj@kopri.re.kr		
	*CC License			
Optional	*Project	KOPRI PE23040		
	*Instrument	FARO Laser scanner FOCUS 3D X 130 HDR		