

COSMO-SkyMed 레이더 간섭영상으로 측정된 동남극 Campbell 빙하의 흐름속도와 변형률

한향선 · 이훈열[†]

강원대학교 지구물리학과

hyangsun@kangwon.ac.kr, hoonyol@kangwon.ac.kr

Flow Velocity and Strain Rates over Campbell Glacier in East Antarctica Measured from COSMO-SkyMed InSAR Images

Hyangsun Han and Hoonyol Lee[†]

Department of Geophysics, Kangwon National University

요약: 이 연구에서는 동남극 Campbell 빙하의 흐름속도와 변형률 측정을 위해 2011년에 14쌍의 COSMO-SkyMed one-day tandem 간섭영상을 획득하였다. 각각의 one-day 간섭쌍에 차분간섭기법을 적용하여 빙하의 표면변위를 추출하였고, Campbell Glacier Tongue (CGT)의 조위변형을 제거하여 빙하의 흐름속도만을 추출하였다. 그리고 빙하의 흐름방향에 대한 평균 흐름속도를 구하였다. Campbell 빙하의 최소 흐름속도는 20 cm/day로 빙하의 상류지역에서 측정되었으며, 최대 흐름속도는 CGT에서 67 cm/day로 측정되었다. CGT는 지반선의 영향으로 비선형적인 흐름속도를 보였으며, 이로 인한 전단변형이 관찰되었다. 빙하 상류지역의 크레바스는 흐름속도가 증가하여 인장변형이 발생하는 곳에서 형성되었으며, 빙하의 흐름을 따라 하류로 이동하였다. 그리고 흐름속도의 감소로 인한 압축변형이 발생하는 곳에서 소멸하였다. CGT의 크레바스는 전단변형에 의해 형성되는 것으로 분석되었다. Campbell 빙하의 빙퇴석은 빙하 가장자리의 전단변형 구역을 따라 상류에서 하류로 이동하였다.

1. 서론

극지방 빙하의 흐름은 빙체의 질량균형과 해수면 높이, 해안선의 변화에 매우 큰 영향을 주고 있다(Rignot *et al.*, 2011).

또한 빙하흐름에 의한 표면변형은 크레바스(crevasse)와 빙퇴석의 형성 및 진로, 소멸에 영향을 미치고 있다. 따라서 미래 극지의 환경 및 지형적 변화를 예측하기 위해 빙하의 흐름속도와 변형률의 정밀한

[†]교신저자: 이훈열(hoonyol@kangwon.ac.kr)

관측이 요구되고 있다.

SAR (synthetic aperture radar)는 기상조건과 태양고도에 관계없이 고품질의 영상을 제공하고 있다. 특히 레이더 간섭기법(Interferometric SAR; InSAR)을 적용하면 3차원적 지형정보를 분석할 수 있으며, 차분간섭기법(Differential InSAR; DInSAR)을 통해 표면변위를 cm 정확도로 관측할 수 있으므로 빙하의 흐름 연구에 매우 적합하다. 그러나 Ice tongue은 빙하흐름에 의한 수평변위와 조위변화에 의한 수직변위를 모두 나타낸다(Rignot, 1996). Ice tongue의 흐름속도를 측정하기 위해서는 조위변형이 제거되어야 하며, 이를 위해 빙하의 흐름이 일정하다고 가정한 후, 두 개의 DInSAR 영상을 차분함으로써 조위변형의 차를 구하는 이중차분간섭기법(Double-DInSAR; DDInSAR)이 유용하게 사용될 수 있다(Rignot, 1996). 그러나 DDInSAR 자료의 부족으로 인해 ice tongue에 대해 정밀한 흐름속도를 분석한 연구사례는 거의 없다.

이 연구에서는 동남극 Campbell 빙하에 대해 2011년에 획득된 14쌍의 COSMO-SkyMed one-day tandem 간섭영상을 이용하여 빙하의 표면변위를 추출하였다. 그리고 DDInSAR 기법을 적용하여 Campbell Glacier Tongue (CGT)의 조위변형을 제거하였고, 이로부터 빙하의

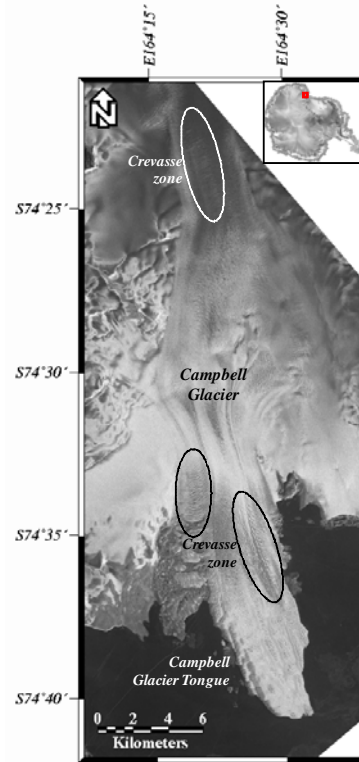


Fig. 1. COSMO-SkyMed SAR image over Campbell Glacier obtained on 27 November, 2011.

정밀한 흐름속도와 변형률을 측정하였다.

2. 연구지역 및 자료

Campbell 빙하(74° 25'S, 164° 22'E)는 동남극에서 가장 빠른 outlet 빙하 중

Table 1. COSMO-SkyMed one-day tandem InSAR pairs

Dates	Baseline (m)	Dates	Baseline (m)
2011/01/26, 2011/01/27	18.9	2011/06/19, 2011/06/20	-47.5
2011/02/27, 2011/02/28	5.7	2011/08/22, 2011/08/23	181.7
2011/03/15, 2011/03/16	-44.4	2011/09/07, 2011/09/08	37.3
2011/03/31, 2011/04/01	-39.2	2011/10/09, 2011/10/10	-44.3
2011/05/02, 2011/05/03	-89.6	2011/10/25, 2011/10/26	-110.9
2011/06/03, 2011/06/04	-36.5	2011/11/10, 2011/11/11	-91.7
2011/05/18, 2011/05/19	75.9	2011/11/26, 2011/11/27	-23.4

하나로, 로스 해의 테라노바 만으로 흐르는 CGT를 형성하고 있다(Fig. 1). CGT는 본류와 지류로 형성되어 있으며, 빙하흐름에 의한 수평변위와 조위변화에 의한 수직변위를 모두 나타낸다. Fig. 1에서 빙하상류지역의 흰색 원과 CGT의 검은색 원은 크레바스가 집중되어 있는 구역을 나타낸다.

이 연구에서는 2011년 1월부터 11월 사이에 Campbell 빙하가 촬영된 총 14쌍의 COSMO-SkyMed one-day tandem 간섭영상을 획득하였다(Table 1). 간섭도에서 지형고도에 의한 위상을 제거하기 위해 ASTER GDEM을 사용하였다. 그리고 CGT의 조위변형을 제거하기 위해 Ross_Inv 조위모델과 DDInSAR 기법으로 생성된 CGT의 조위변형비(tide deflection ratio)를 이용하였다(Han and Lee, 2013). 조위변형비는 조위변화에 대한 빙하의 조위변형의 비를 의미한다.

3. 연구방법

먼저 14개의 one-day 간섭도로부터 ASTER GDEM을 이용하여 고도에 의한 위상을 제거하였고, 이로부터 Campbell 빙하의 표면변위를 구하였다. CGT의 경우 빙하흐름과 조위변형이 차분간섭위상에 모두 포함된다. 이 연구에서는 Ross_Inv로 예측된 SAR 영상 촬영 시각의 조위와 Han and Lee (2013)의 조위변형비를 곱하여 CGT의 조위변형을 구하였다. 그리고 이를 DInSAR 영상에서 제거함으로써 빙하흐름에 의한 변위만을 구하였다. 모든 간섭도에서 빙하흐름에 의한 변위를 추출한 후 평균하였으며, 이를 Han et al. (2013)이 offset-tracking 기법으로 추출한 빙하의 흐름방향에 대한 속도로 변환하였다.

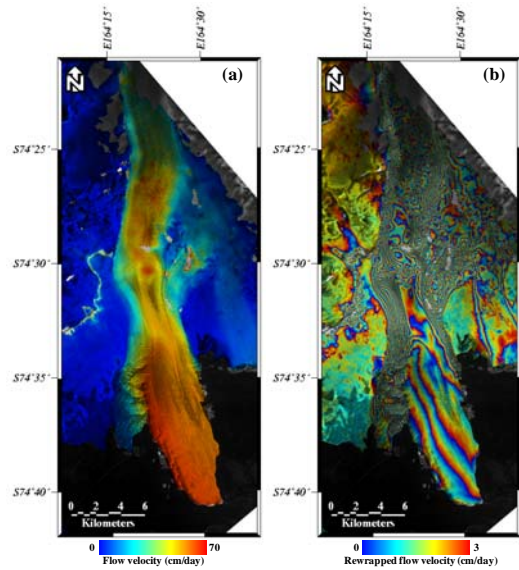


Fig. 2. (a) Map of the ice flow velocity over Campbell Glacier. (b) is the flow velocity rewrapped with 3 cm color contours.

4. 연구결과 및 토의

Fig. 2(a)는 빙하의 흐름방향에 대한 평균속도이며, (b)는 빙하 표면의 변형을 해석을 위해 (a)를 다시 간섭띠로 rewrap하여 나타낸 것이다. Campbell 빙하의 흐름속도는 빙하의 가장자리에서 중심으로 갈수록 빨라지며, 이에 따라 빙하의 가장자리에서는 전단변형이 나타남을 알 수 있다. 그리고 흐름속도는 빙하의 상류에서 하류로 갈수록 증가하며, 최소 흐름속도는 빙하의 상부지역에서 20 cm/day, 최대 흐름속도는 CGT의 끝에서 67 cm/day로 측정되었다. CGT 본류의 흐름속도는 동쪽보다 서쪽에서 더 빠른 반면에, 지류는 동쪽부분이 더 빠른 것으로 나타나는데, 이는 본류의 동쪽 가장자리와 지류의 서쪽 가장자리까지 기반선이 형성되어 있기 때

문이다. 이에 따라 CGT에서는 전체적으로 전단변형이 일어남을 판단할 수 있다.

빙퇴석은 전단변형이 발생하는 Campbell 빙하의 가장자리 부분을 따라 상류에서 하류로 이동하는 것으로 분석되었다. Campbell 빙하의 상류에서 관찰되는 크레바스는 흐름속도가 점점 증가하여 인장변형이 발생하는 곳에 형성되었음을 확인하였다. 크레바스는 빙하의 흐름에 의해 하류로 이동하였으며, 흐름속도가 감소하여 압축변형이 일어나는 곳에서 소멸되었다. CGT의 분류에서 관찰되는 크레바스는 전단변형에 의해 형성된 것으로 해석할 수 있다. CGT의 지류는 전체적으로 매우 많은 크레바스를 보이고 있는데, 이 또한 동서방향으로 다른 빙하의 흐름속도에 의한 전단변형이 기작인 것으로 해석된다.

5. 결론

이 연구에서는 Campbell 빙하에 대해 2011년에 시계열적으로 획득된 14쌍의 COSMO-SkyMed one-day tandem 간섭영상을 이용하여 빙하의 흐름속도와 변형률을 측정하였다. Campbell Glacier Tongue에 대해서는 이중차분간섭기법으로 추정된 조위변형비를 이용하여 조위변형을 제거하였으며, 이로부터 Campbell 빙하의 정밀한 흐름속도만을 구할 수 있었다. 그리고 빙하표면의 변형률을 분석함으로써 빙퇴석과 크레바스의 형성과 이동, 소멸의 기작을 해석할 수 있었다.

이 연구를 통해 시계열적으로 축적된 시간적 기선거리가 짧은 레이더 간섭쌍이 빙하의 흐름을 연구하는데 매우 효과적임을 확인할 수 있었다. 또한 레이더 간섭기법으로 ice tongue의 흐름속도를 분석할 경우, 조위에 의한 변위가 필수적으로 제

거되어야 함을 알 수 있었다.

사사

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2013R1A1A2008062).

참고문헌

- Han, H. and H. Lee, 2013. Tidal deflection of Campbell Glacier Tongue analyzed by COSMO-SkyMed double-differential interferometric SAR images, *Proc. of 2013 International Symposium on Remote Sensing*, Chiba, Japan, Apr. 15-17.
- Han, H., Y. Ji, and H. Lee, 2013. Accuracy assessment of tide models in Terra Nova Bay, East Antarctica, for glaciological studies of DDInSAR technique, *Korean Journal of Remote Sensing*, 29(4):357-387.
- Rignot, E., 1996. Tidal motion, ice velocity and melt rate of Petermann Gletscher, Greenland, measured from radar interferometry, *Journal of Glaciology*, 42(142): 476-485.
- Rignot, E., J. Mouginot, and B. Scheuchl, 2011. Ice flow of the Antarctic Ice Sheet, *Science*, 333:1427-1430.