

이중 위상차분간섭기법과 보 모델을 이용한 Campbell 빙하의 조위에 의한 변위 분석

한향선 · 이훈열[†]

강원대학교 지구물리학과

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

Analysis of Tidal Displacement of Campbell Glacier by Using Double Differential SAR Interferometry and Beam Model

Hyangsun Han and Hoonyol Lee[†]

Department of Geophysics, Kangwon National University

요약: 본 연구에서는 동남극 Terra Nova 만 인근에 위치한 Campbell 빙하에 대해 하루의 시간차를 가지는 16쌍의 COSMO-SkyMed SAR 간섭영상을 획득하였다. 획득된 간섭쌍 영상에 이중 위상차분간섭기법을 적용하여 조위에 의한 빙하의 변위를 추출하였으며, 조위 예측모델과 공학에서 사용되는 보 모델을 이용하여 조위에 의한 빙하의 변위특성을 분석하였다. 조위에 의한 빙하의 변위특성은 빙하의 휨 상수(deflection factor)와 탄성 감쇠계수(elastic damping factor)로 설명될 수 있으며, 총 120개의 이중 위상차분 간섭도로부터 휨 상수와 탄성 감쇠계수를 구하였다. Campbell 빙하의 휨 상수는 Ross Sea 조위모델로 예측된 조위와 이중 위상차분간섭도에서 추출된 변위의 비교를 통해 1.571임을 알 수 있었다. 탄성 감쇠계수는 $0.827 \pm 0.099 \text{ km}^{-1}$ 로 계산되었으며, 이를 통해 빙하의 두께는 약 400 m임을 추정할 수 있었다. 휨 상수와 탄성 감쇠계수를 이용하여 Campbell 빙하의 조위에 의한 변위를 정의하는 특성방정식을 제안할 수 있었으며, 이는 조위자료만을 이용한 빙하의 수직변위 추정을 가능하게 할 것이다.

1. 서론

빙하와 같은 얼음환경은 기후변화에 민감하게 반응하기 때문에 전 지구적인 기후 및 환경변화 연구에 중요한 지시자 역할을 하고 있다(Rott *et al.*, 1998; Rignot

and Thomas, 2002). 극지방의 빙하는 접근성이 제한적이고 지리적 범위가 넓기 때문에 현장에서의 관측은 매우 어렵다. 따라서 인공위성을 이용한 빙하의 모니터링 및 변화 관측이 이루어져 오고 있으며,

[†]교신저자: 이훈열(hoonyol@kangwon.ac.kr)

특히 합성구경레이더(synthetic aperture radar, SAR) 영상이 널리 사용되고 있다 (한향선과 이훈열, 2011).

SAR 영상에 위상차분간섭(Differential Interferometric SAR, DInSAR)기법을 적용하면 빙하의 표면 변위를 매우 정밀하게 관측할 수 있다. 이 기법을 통해 빙하의 흐름 관측이 가능하며 빙하의 질량 균형(mass balance) 상태를 연구할 수 있다 (Bamber and Rivera, 2007). 그러나 해수면 위에 부유하는 빙붕 및 ice tongue에 대한 DInSAR 결과는 빙하의 흐름에 의한 변위뿐만 아니라 조위에 의한 변위를 함께 나타낸다(Rignot, 2002). 따라서 정확하고 다양한 빙하 연구를 수행하기 위해서는 조위에 의한 빙하의 변위가 분석되어야 한다.

조위에 의한 빙하의 변위는 두 개의 위상차분간섭도를 차분하는 방법인 이중 위상차분간섭(Double DInSAR, DDInSAR) 기법을 통해 추출할 수 있다(Rignot, 1996, Rignot, 2011). 본 연구에서는 동남극 Terra Nova 만 인근에 위치해 있는 Campbell 빙하에 대해 총 16쌍의 COSMO-SkyMed SAR 간섭영상을 획득하였다. 획득된 간섭쌍 영상에 DDInSAR를 적용하여 조위에 의한 빙하의 변위를 추출하였으며, 조위 예측모델과 공학에서 널리 사용되는 보 모델을 이용하여 조위에 의한 빙하의 변위특성을 분석하였다. 그리고 이를 통해 조위에 의한 빙하의 변위를 정의하는 특성방정식을 제안하였다.

2. 연구지역 및 자료

동남극 Terra Nova 만은 우리나라 최초의 남극 대륙기지인 장보고 과학기지가 건설되는 지역으로 주변에는 현재 활동 중인 Melbourne 화산과 Priestly 빙하 및 Campbell 빙하가 위치해 있다. 연구지역

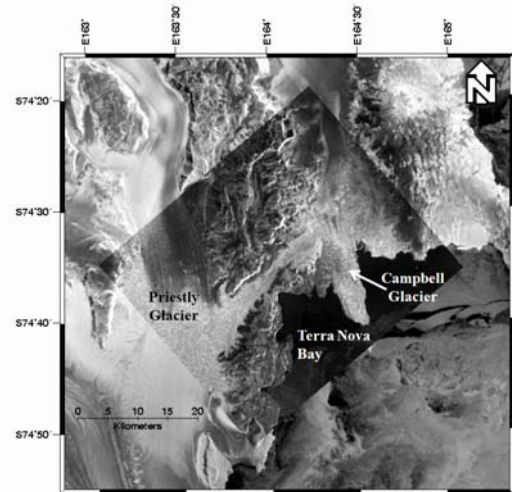


Fig. 1. COSMO-SkyMed SAR image obtained on 16 June, 2010. The location of Campbell glacier is $74^{\circ} 25'S$, $164^{\circ} 22'E$.

인 Campbell 빙하($74^{\circ} 25'S$, $164^{\circ} 22'E$)는 Terra Nova 만으로 흐르는 outlet 빙하로 길이는 약 110 km이다(Fig. 1). Campbell 빙하는 본류와 지류로 구분되는 ice tongue을 형성하고 있으며, 이 연구에서는 본류에 해당하는 ice tongue을 연구 대상으로 하였다.

본 연구에서는 Terra Nova 만 주변지역이 촬영된 COSMO-SkyMed SAR 영상을 사용하였다. COSMO-SkyMed SAR 영상은 2010년 6월부터 2011년 11월 사이에 촬영된 것으로, 모두 위상간섭(Interferometric SAR, InSAR)기법의 적용이 가능한 간섭쌍 영상으로 획득되었다(Table 1). 간섭영상은 총 16쌍이 획득되었으며, 모든 간섭쌍은 하루의 시간차를 가진다.

3. 연구방법

DDInSAR를 수행하기 위해 먼저 각각의 간섭쌍 영상에 InSAR 기법을 적용하여

Table 1. COSMO–SkyMed one–day interferometric tandem pairs used in this study

Dates	Baseline (m)	Dates	Baseline (m)
2010/06/16, 2010/06/17	31.6	2011/06/03, 2011/06/04	-36.5
2010/07/02, 2010/07/03	-46.3	2011/06/19, 2011/06/20	-47.5
2011/01/26, 2011/01/27	18.9	2011/08/22, 2011/08/23	181.7
2011/02/27, 2011/02/28	5.7	2011/09/07, 2011/09/08	37.3
2011/03/15, 2011/03/16	-44.4	2011/10/09, 2011/10/10	-44.3
2011/03/31, 2011/04/01	-39.2	2011/10/25, 2011/10/26	-110.9
2011/05/02, 2011/05/03	-89.6	2011/11/10, 2011/11/11	-91.7
2011/05/18, 2011/05/19	75.9	2011/11/26, 2011/11/27	-23.4

간섭도를 생성하였다. Fig. 2(a)는 2011년 9월 7, 8일에 획득된 간섭쌍을 이용한 간섭도로서, 빙하 표면에서 관찰되는 간섭띠(fringe)에는 빙하의 흐름에 의한 변위와 하루 사이의 조위 차이(\dot{T})에 의한 변위(\dot{Z})가 모두 포함된다. 본 연구에서는 ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM)을 이용하여 DInSAR를 수행하였고, 16개의 위상차분간섭도를 생성하였다. 그리고 DDInSAR의 적용을 통해 총 120개의 이중 위상차분간섭도를 생성하였다.

Fig. 2(b)는 2010년 6월 16, 17일과 2011년 9월 7일, 8일에 획득된 간섭쌍으로부터 생성한 이중 위상차분간섭도이다. 두 간섭쌍에서 빙하의 흐름속도가 거의 같기 때문에 흐름에 의한 변위는 대부분 제거되었으며, 각 간섭쌍에 포함된 조위차의 차이($\Delta\dot{T}$)에 의한 변위가 관찰된다. 이를 통해 Campbell 빙하의 grounding line과 hinge zone을 확인할 수 있고, ice tongue의 끝 부분에서는 얼음의 붕괴(calving)에 기인하는 변위를 관찰할 수 있다. 해빙의 표면에서도 $\Delta\dot{T}$ 에 의한 간섭띠들이 잘 관찰된다.

Vaughan(1995)은 빙하의 두께가 공간에 따라 변화가 없을 때, 시간 t 와

grounding line으로부터 거리 x 의 함수로써 조위에 의한 빙하의 변위 $Z(x, t)$ 를 다음과 같은 탄성 보 모델을 이용하여 구하였다.

$$Z(x, t) = \alpha T(t) [1 - e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x)] \quad (1)$$

T 는 조위, α 는 조위에 의한 변위가 최대가 되는 지점($x \rightarrow \infty$)에서의 휨 상수(deflection constant)로 이는 조위와 변위 사이의 관계를 설명하며, 0에서 1 사이의 값을 가진다. β 는 빙하의 탄성 감쇠계수(elastic damping factor)로 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

$$\beta^4 = 3\rho_{sea}g \frac{1 - \nu^2}{Eh^3}, \quad (2)$$

ρ_{sea} 는 해수의 밀도(1030 kgm^{-3}), g 는 중력가속도(9.8 ms^{-2}), ν 는 빙하의 포아송비(Poisson's ratio)로 0.3, E 는 빙하의 영률(Young's modulus)로서 $0.88 \pm 0.35 \text{ GPa}$, h 는 빙하의 두께를 나타낸다. 식 (1)에서 α 와 β 는 조위에 의한 빙하의 휨 변위를 정의하는 역할을 한다.

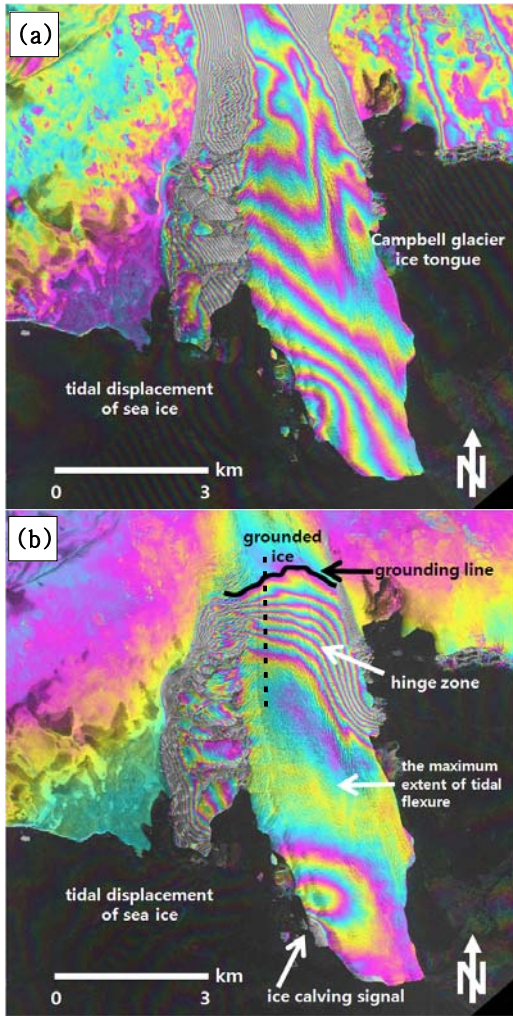


Fig. 3. (a) One-day interferogram over Campbell glacier generated from the COSMO-SkyMed SAR images obtained on 7 and 8 September, 2011. (b) Double differential interferogram generated from COSMO-SkyMed InSAR pairs obtained on 16, 17 June 2010 and 7, 8 September 2011.

이중 위상차분간섭도에서 추출된 \dot{Z} 의 차이($\Delta\dot{Z}$)는 식 (1)의 탄성 보 모델을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\dot{Z}(x, t) = \alpha\Delta\dot{T}(t)[1 - e^{-\beta x}(\cos\beta x + \sin\beta x)] \quad (3)$$

본 연구에서는 120개의 이중 위상차분간섭도로부터 α 와 β 를 계산하였으며, 이를 통해 Campbell 빙하에 대한 대표적인 α 와 β 를 구하였다.

4. 연구결과 및 토의

Fig. 2(b)에 나타낸 점선을 따라 $\Delta\dot{T}$ 에 의한 빙하의 변위를 추출하였다. 각각의 이중 위상차분간섭도에서 $\Delta\dot{Z}$ 는 $x = 3.5$ km인 지점에서 수렴하였다. Campbell 빙하의 대표적인 α 를 구하기 위해 $x = 3.5$ km의 $\Delta\dot{Z}$ 와 조위모델로부터 추출한 $\Delta\dot{T}$ 를 비교하였다. Fig. 3은 Terra Nova 만 지역에 적용이 가능한 조위 예측모델인 CATS2008a_opt (pers. comm., L. Padman, 2008), Ross Sea (Erofeeva *et al.*, 2005), TPX07.1 (Egbert and Erofeeva, 2002) 모델로부터 추출된 $\Delta\dot{T}$ 와 이중 위상차분간섭도에서 추출된 $\Delta\dot{Z}$ 사이의 상관도이다. 세 가지 모델 중 Ross Sea 모델이 가장 높은 상관성을 보였으며($R^2=0.769$), y 절편 또한 0에 가까웠다(Fig. 3a). 이는 빙하의 흐름이 일정하고, 빙하의 휨 상수 α 는 조위에 독립적임을 의미한다. CATS2008a_opt 조위 모델(Fig. 3b)과 TPX07.1 조위 모델(Fig. 3c)도 y 절편이 0에 가까운 결과를 나타냈으나, R^2 이 각각 0.692와 0.641로서 Ross Sea 모델을 이용한 결과보다 낮은 상관성을 나타냈다.

Ross Sea 조위 모델에서 계산된 $\Delta\dot{T}$ 와 이중 위상차분간섭도에서 추출된 $\Delta\dot{Z}$ 는 1.518의 기울기를 가지는 선형의 관계를 나타냈으며, 이 기울기를 Campbell 빙하의 대표적인 α 로 적용할 수 있다. 그러나

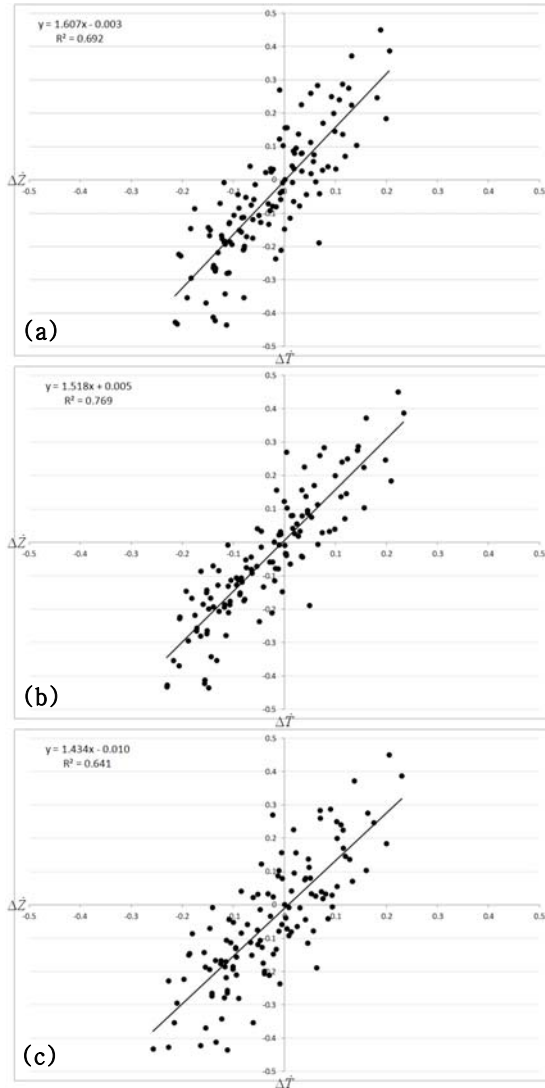


Fig. 4. Linear regression between ΔZ extracted from the double differential interferograms and ΔT calculated from the tidal prediction models as (a) CATS2008a_opt, (b) Ross Sea and (c) TPX07.1.

이 α 에는 GDEM의 수직해상도에 의한 오차, 대기에 의한 위상 지연에 기인하는 오차, 조위 모델의 오차, 그리고 두 간섭쌍 사이의 빙하 흐름속도 차이가 불확실성 (uncertainty)으로 포함될 수 있다.

Ross Sea 모델에서 추출된 ΔT 를 이용하여 각각의 이중 위상차분간섭도로부터 β 를 구하였다. β 는 평균이 0.827 km^{-1} , 표준편차는 0.099 km^{-1} 로 계산되었다. 본 연구에서는 Campbell 빙하의 대표적인 β 로 $0.827 \pm 0.099 \text{ km}^{-1}$ 를 적용하였다. β 를 식 (2)에 적용하면 빙하의 두께를 구할 수 있으며, Fig. 2(b)의 점선에 해당하는 빙하의 두께는 $406 \pm 52 \text{ m}$ 로 계산된다. 유체정역학적 평형(hydrostatic equilibrium) 이론에 의하면 빙하의 두께는 빙하의 고도에 9.11을 곱하여 추정할 수 있다 (Rignot, 2001). β 를 구하기 위한 변위가 추출된 곳의 고도는 50 m 이며, 유체정역학적 평형에 의한 빙하의 두께는 456 m 로 계산된다. 유체정역학적 평형에 의한 빙하 두께 추정의 불확실성은 $\pm 100 \text{ m}$ (Rignot, 2002)로 알려져 있기 때문에 본 연구에서 추정한 얼음의 두께($406 \pm 52 \text{ m}$)는 타당한 값이라고 할 수 있다.

위와 같은 방법으로 구한 Campbell 빙하의 대표적인 α 와 β 를 이용하여 조위에 의한 Campbell 빙하의 변위를 다음과 같은 특성방정식으로 정의할 수 있다.

$$Z(x, t) = 1.518T(t) \times [1 - e^{-0.827x}(\cos 0.827x + \sin 0.827x)] \quad (4)$$

위 식에서 x 의 단위는 km 이다.

5. 결론

본 연구에서는 이중 위상차분간섭기법과 조위 예측모델, 그리고 공학에서 사용되는 탄성 보 모델을 이용하여 동남극 Campbell 빙하의 조위에 의한 변위특성방정식을 제안하였다. 본 연구에서 제안한 변위 특성 방정식은 조위 자료만을 이용하여 Campbell 빙하의 조위에 의한 변위 추정을 가능하게 할 것으로 기대된다. 특

히 Campbell 빙하의 질량 균형 상태를 분석하기 위해 위상간섭기법을 적용할 경우 조위에 의한 변위를 제거하고 빙하의 흐름속도를 정확하게 측정하는데 본 연구의 결과가 크게 기여할 것으로 판단된다.

사사

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (No. 2010-0009465).

참고문헌

- 한향선, 이훈열, 2011. 4-pass DInSAR 기법을 이용한 서남극 Canisteo 반도 주변 빙하와 해빙의 표면 변위 해석, 대한원격탐사학회지, 27(5):535-542.
- Bamber, J.L. and A. Rivera, 2007. A review of remote sensing methods for glacier mass balance determination, *Global and Planetary Change*, 59:138-148.
- Egbert, G.D. and S.Y. Erofeeva, 2002. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19:183-204.
- Erofeeva, S.Y., L. Padman, and G. Egbert, 2005. Assimilation of ship-mounted ADCP data for barotropic tides: Application to the Ross Sea, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22:721-734.
- 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., 2002. Mass balance of East Antarctica glaciers and ice shelves from satellite data, *Annals of Glaciology*, 34:217-227.
- Rignot, E., J. Mouginot, and B. Scheuchl, 2011. Antarctic grounding mapping from differential satellite radar interferometry, *Geophysical Research Letters*, 38:L10504.
- Rignot, E. and T.H. Thomas, 2002. Mass balance of polar ice sheets, *Science*, 297:1502-1506.
- Rott, H., M. Stuefer, A. Siegel, P. Skvarca, and A. Eckstaller, 1998. Mass fluxes and dynamics of Moreno Glacier, Southern Patagonia Icefield, *Geophysical Research Letters*, 25(9):1407-1410.
- Vaughan, D. G., 1995. Tidal flexure at ice shelf margins, *Journal of Geophysical Research*, 100(B4): 6213-6224.