

COSMO-SkyMed SAR 영상을 이용한 동남극 Campbell 빙하의 연간 면적변화 및 유속 추정

한향선 · 지영훈 · 이훈열[†]
강원대학교 지구물리학과

Estimation of Annual Variation of Ice Extent and Flow Velocity of Campbell Glacier in East Antarctica Using COSMO-SkyMed SAR Images

Hyangsun Han, Younghun Ji and Hoonyol Lee[†]
Department of Geophysics, Kangwon National University

Abstract : Campbell Glacier in East Antarctica is one of the major glaciers that flow into Terra Nova Bay. It is necessary to estimate accurate extent and flow velocity of Campbell Glacier which influences the dynamics of mass balance of East Antarctic Ice Sheet. However, few studies on Campbell Glacier have been performed since 1990s. In this study, we obtained a total of 59 COSMO-SkyMed SAR images over Campbell Glacier from June 2010 to January 2012. We estimated variations in the extent of Campbell Glacier Tongue and flow velocity of Campbell Glacier by applying the image digitizing and the offset tracking by image matching. Although the extent of Campbell Glacier Tongue decreased in summertime due to ice calving and increased in wintertime, the variation in the extent was very small. Campbell Glacier Tongue retained mean extent of 75.5 km². The ice discharge of Campbell Glacier Tongue was estimated to be 0.58 ± 0.12 km³/yr, which was bigger than in 1989. The flow velocity over Campbell Glacier Tongue was estimated to be from 181 to 268 m/yr that was faster than in 1988-1989, which contributed to the increase in the ice discharge of the glacier.

Key Words : Campbell Glacier, COSMO-SkyMed, SAR, digitizing, offset tracking, glacier extent, flow velocity

요약 : 동남극의 Campbell 빙하는 테라노바 만으로 유출되는 주요한 빙하 중 하나이다. Campbell 빙하는 동남극 빙상의 질량 균형에 영향을 미치고 있기 때문에 정확한 면적 및 흐름속도의 분석이 필요하다. 그러나 Campbell 빙하에 대한 연구는 1990년 이후로 거의 수행되지 않았다. 이 연구에서는 2010년 6월부터 2012년 1월 사이에 Campbell 빙하가 촬영된 59장의 COSMO-SkyMed SAR 영상을 획득하였다. 디지털 이징 방법과 영상정합에 의한 변위추적 기법을 적용하여 Campbell Glacier Tongue의 면적과 Campbell 빙하의 흐름속도를 추정하였다. Campbell Glacier Tongue의 면적은 여름철에 얼음의 붕괴로 인해 감소하고 겨울철에 증가하지만 증감의 폭이 크지 않았고, 평균 75.5 km²의 면적을 유지하였다. Campbell

접수일(2013년 1월 2일), 수정일(1차 : 2013년 2월 5일), 게재확정일(2013년 2월 6일).

[†] 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.

Glacier Tongue의 유출량은 $0.58 \pm 0.12 \text{ km}^3/\text{yr}$ 로 추정되었는데, 이는 1989년에 비해 증가한 것이다. Campbell Glacier Tongue의 흐름속도는 181-268 m/yr로서 1988-1989년의 흐름속도에 비해 빠르며, 이는 빙하의 유출량 증가에 영향을 준 것으로 해석되었다.

1. 서론

남극의 빙하(glacier)는 수십 년 동안 흐름 속도가 증가하고 있으며, 빙붕(ice shelf)에서는 대규모의 붕괴가 빈번하게 발생하고 있다(Scambos *et al.*, 2000; Scambos *et al.*, 2004; Stearns *et al.*, 2008; Rignot, 1998; Rignot *et al.*, 2004). 그러나 남극의 적설량은 1980년대 이후 일정하게 유지되고 있어 남극 빙상(ice sheet)의 전체적인 유출량(ice discharge)이 지속적으로 증가하고 있다(Monaghan *et al.*, 2006; Rignot *et al.*, 2008). 이는 남극 빙상의 질량 균형(mass balance)을 깨트림과 동시에 해수면 상승과 같은 전 지구적 환경변화에 매우 큰 영향을 미친다. 남극 빙상의 유출량은 서남극에서 매우 큰 반면에, 동남극 빙상은 질량 균형 상태를 유지하는 것으로 알려져 있다(Rignot and Thomas, 2002; Rignot *et al.*, 2008). 그러나 동남극의 주요 빙하는 그 두께가 점점 얇아지고 있으며, 특히 해안 지역에서의 빙하 유실이 지속적으로 보고되고 있다(Rignot, 2002; Stearns *et al.*, 2008; Bell *et al.*, 2007). 이에 따라 동남극 지역 빙하의 정밀한 질량 균형 상태를 분석할 필요가 있으며, 이를 위해서는 시계열적인 관측을 통한 빙하의 유동특성 연구가 선행되어야 한다.

기상 조건과 태양고도에 영향을 받지 않고 고품질의 영상을 제공하는 synthetic aperture radar (SAR) 시스템은 극빙의 유동특성 연구에 매우 유용하다(Han and Lee, 2011). SAR 영상으로부터 빙하의 유동특성을 관측하는데에는 위상 신호를 이용한 Interferometric SAR (InSAR) 기법과 영상정합에 의한 변위추적(offset tracking) 기법이 사용되고 있다. InSAR 기법은 동일한 연구지역에 대해 획득된 두 장 이상의 SAR 영상으로부터 위상의 차이를 계산하여 지형정보를 추출하는 기법이다. InSAR 기법을 통해 생성된 간섭도(interferogram)에서 연구지역의 수치고도모델 또는 고도변화에 의한 간섭위상이 지배적인 다른 간섭도를 이용하여 지형고도를 제거하면 지표 변위만을 추출할 수 있으며, 이를 Differential

InSAR (DInSAR) 기법이라 한다. DInSAR는 수 mm-수 cm 정확도의 지표면 변위를 제공해 주지만, 빙하 지역에서는 시간적 위상오차(temporal decorrelation)로 인해 장시간 동안의 유동특성 관측에는 한계가 있다(Weydahl, 2001; Rott, 2009). 반면 영상정합에 의해 지표면의 피쳐(feature)를 추적하여 변위를 추출하는 기법은 수 m의 정확도를 가지나, 빠른 유속을 가진 빙하의 장시간에 걸친 유동특성 연구에는 InSAR 기법보다 유용하게 사용될 수 있다(Strozzi *et al.*, 2002; Trouve *et al.*, 2007; Scherler *et al.*, 2008; Strozzi *et al.*, 2008). 특히 최근에는 고해상도의 영상을 획득하는 X-band SAR 시스템이 활발하게 운용되고 있으므로, 영상정합을 통한 지표면 위 측정의 정밀도가 보다 향상될 수 있다.

동남극에서 가장 빠르게 유동하고 있는 빙하 중 하나인 Campbell 빙하(Campbell Glacier)는 바다로 확장된 Campbell Glacier Tongue을 형성하고 있으며, 동남극 빙상의 질량 균형에 영향을 미치고 있다. 따라서 Campbell 빙하에 대한 면적변화 및 흐름속도의 정확한 분석이 요구되고 있다. 뿐만 아니라 Campbell 빙하는 2014년 건설 예정인 우리나라의 장보고 과학기지 건설지와 인접해 있기 때문에, 이 빙하에 대한 유동특성 연구는 매우 중요한 의미를 가진다. 그러나 동남극 지역의 빙하에 대한 유동특성 연구는 David 빙하(David Glacier) 및 Ninnis 빙하(Ninnis Glacier)와 같이 남극 전역의 질량 균형에 영향을 미칠 수 있는 대규모 빙하에 집중되어 수행되었다(Rignot, 2002; Rignot and Thomas, 2002; Rignot *et al.*, 2008). 반면에 Campbell 빙하의 유동특성은 Frezzotti (1993)에 의해 수행된 연구가 유일하며, 최근의 연구사례는 거의 없다.

이 연구에서는 2010년 6월에서 2012년 1월까지 시계열적으로 획득된 Constellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation (COSMO-SkyMed) 위성의 SAR 영상으로부터 Campbell Glacier Tongue의 면적변화를 분석하였고, 영상정합을 통해 Campbell 빙하의 흐름속도를 추정하였다. 이 연구에서 추정된 면적과

흐름속도를 선행연구(Frezzotti, 1993)의 결과와 비교하였으며, 이를 통해 Campbell 빙하의 유동특성 변화를 해석하였다.

2. 연구지역 및 자료

1) 연구지역

장보고 과학기지의 건설지인 동남극 북빅토리아 랜드(northern Victoria Land)의 테라노바 만(Terra Nova Bay)은 다양한 규모의 빙하가 유출되는 곳으로, 동남극 빙상의 질량 균형 연구에 매우 중요한 지역이다. 테라노바 만에 설치된 자동 기상관측기구(Automatic Weather System: AWS)에 의해 관측된 2010-2012년 기상 자료에 의하면, 이 지역은 연중 -30°C 에서 5°C 사이의 기온 변화를 나타낸다. 테라노바 만의 평균 적설량은 빙하지역의 얼음 코어 분석을 통해 $170\text{ kg/m}^2\text{ yr}$ 로 추정되고 있다(Stenni *et al.*, 2000).

테라노바 만으로 유입되는 대표적인 빙하는 Priestly

빙하와 Reeves 빙하, Campbell 빙하이다. 이 연구에서는 장보고 과학기지와 가장 인접해 있는 Campbell 빙하($74^{\circ} 25' \text{ S}, 164^{\circ} 22' \text{ E}$)를 연구지역으로 선정하였다(Fig. 1a). Campbell 빙하는 유역면적(basin area)이 약 $4,000\text{ km}^2$, 길이가 약 110 km 인 분출빙하(outlet glacier)로서 로스 해(Ross Sea)로 확장된 Campbell Glacier Tongue을 형성하고 있다(Frezzotti, 1993; Frezzotti, 1997). Campbell Glacier Tongue은 두 개의 빙류(ice stream)로 구성되어 있다(Fig. 1b). 본류(main stream)의 길이와 폭은 각각 약 13.5 km 와 약 4.5 km 이며, 지류(branch stream)의 길이와 폭은 각각 약 8.0 km 와 약 2.5 km 이다. Fig. 1(b)의 COSMO-SkyMed SAR 영상에서 Campbell Glacier Tongue의 본류는 거의 일정한 방향의 유선(ice flow line)을 나타내고 있다. 반면에 Campbell Glacier Tongue의 지류에서는 일정한 방향의 유선을 확인할 수 없다.

2) 연구자료

Campbell 빙하의 유동특성을 분석하기 위해 테라노바 만 주변 지역이 촬영된 COSMO-SkyMed SAR 영상을 활용하였다. COSMO-SkyMed는 이탈리아 우주국

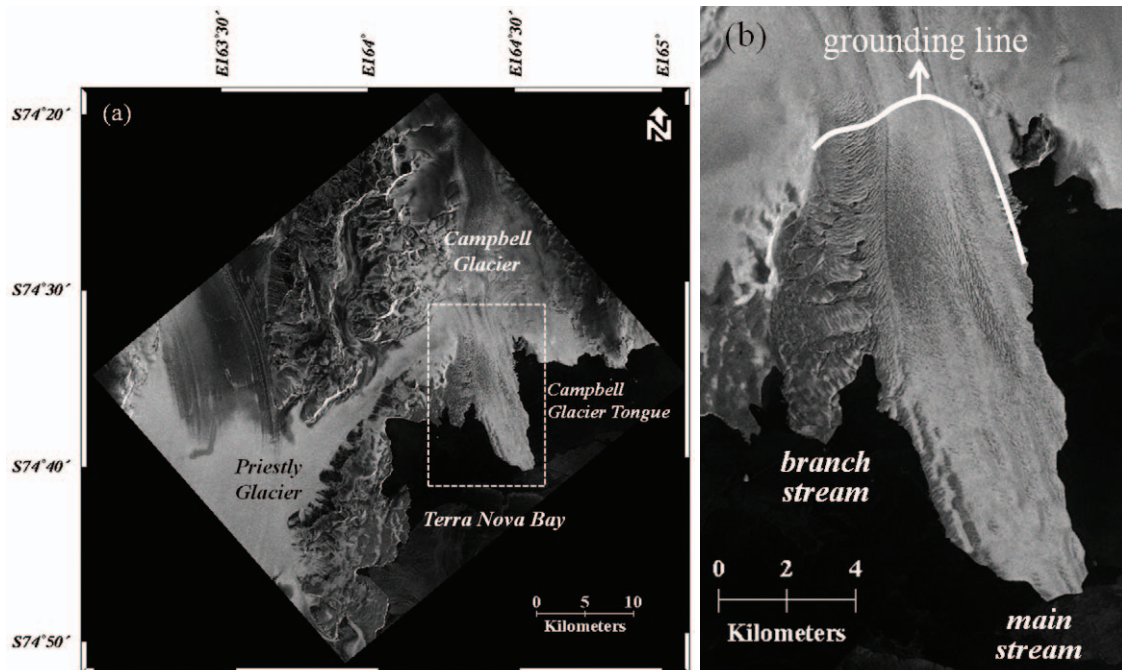


Fig. 1. (a) COSMO-SkyMed SAR image over Campbell Glacier in East Antarctica obtained on 16 June 2010. (b) Campbell Glacier Tongue enlarged from the white dotted box on Fig. 1(a). The white solid line indicates the location of grounding line of Campbell Glacier (Han and Lee, 2012).

Table 1. COSMO-SkyMed SAR images used in this study. Extent (A^G), calving area (A^c) and cumulated extent (A) of Campbell Glacier Tongue were estimated from each SAR image

No.	Date(yyyy/mm/dd)	$A^G(\text{km}^2)$	$A^c(\text{km}^2)$	$A(\text{km}^2)$	No.	Date(yyyy/mm/dd)	$A^G(\text{km}^2)$	$A^c(\text{km}^2)$	$A(\text{km}^2)$
1	2010/06/16	77.31	-	77.31	31	2011/05/26	74.31	0.0132	78.37
2	2010/06/17	77.24	-	77.24	32	2011/06/03	74.35	-	78.41
3	2010/06/24	77.31	0.0016	77.31	33	2011/06/11	74.33	-	78.38
4	2010/07/02	77.32	-	77.32	34	2011/06/19	74.46	-	78.52
5	2010/07/03	77.40	-	77.40	35	2011/06/27	74.65	-	78.71
6	2010/07/10	77.40	-	77.40	36	2011/07/05	74.68	-	78.74
7	2010/12/01	78.02	0.0174	78.04	37	2011/07/13	74.68	-	78.74
8	2010/12/09	77.96	0.0097	77.98	38	2011/07/22	74.71	-	78.77
9	2010/12/10	77.97	0.0048	78.00	39	2011/07/29	74.71	-	78.77
10	2010/12/17	77.97	-	78.01	40	2011/08/06	74.77	-	78.82
11	2010/12/25	78.04	-	78.08	41	2011/08/14	74.77	-	78.83
12	2010/12/26	78.04	-	78.08	42	2011/08/22	74.83	-	78.89
13	2011/01/02	77.78	0.2581	78.07	43	2011/08/30	74.83	-	78.89
14	2011/01/10	77.63	0.0921	78.01	44	2011/09/07	74.97	-	79.03
15	2011/01/18	76.97	0.7529	78.11	45	2011/09/15	74.97	-	79.03
16	2011/01/27	76.93	0.0199	78.08	46	2011/09/24	74.97	-	79.03
17	2011/02/03	75.34	1.7790	78.23	47	2011/10/01	74.96	-	79.02
18	2011/02/11	75.22	0.0036	78.16	48	2011/10/09	75.11	-	79.16
19	2011/02/19	74.53	0.5690	78.04	49	2011/10/17	75.10	-	79.16
20	2011/02/27	74.50	0.0634	78.07	50	2011/10/25	75.13	-	79.18
21	2011/03/07	74.43	0.2481	78.25	51	2011/11/02	75.14	-	79.20
22	2011/03/15	74.19	0.0162	78.02	52	2011/11/10	75.12	-	79.17
23	2011/03/23	74.19	-	78.03	53	2011/11/18	75.37	-	79.42
24	2011/03/31	74.23	-	78.07	54	2011/11/26	75.40	-	79.46
25	2011/04/08	74.32	-	78.16	55	2011/12/04	75.32	-	79.37
26	2011/04/16	74.25	0.1122	78.20	56	2011/12/28	75.31	0.0216	79.39
27	2011/04/24	74.30	-	78.25	57	2012/01/05	75.32	-	79.40
28	2011/05/02	74.36	-	78.31	58	2012/01/13	75.33	-	79.41
29	2011/05/10	74.23	0.0965	78.28	59	2012/01/21	75.35	-	79.41
30	2011/05/18	74.31	-	78.36					

(Italian Space Agency)과 이탈리아 국방부(Italian Ministry of Defence)에 의해 개발된 인공위성으로, 중심 주파수 9.6 GHz의 X-band SAR 시스템을 탑재하여 고해상도의 영상을 제공하고 있다(Bianchessi and Righini, 2008; Covello *et al.*, 2010). COSMO-SkyMed는 총 4기의 위성군(constellation)으로 구성된다. COSMO-SkyMed의 각 위성은 16일의 시간 해상도를 가지고 있으나, 4기의 위성을 모두 이용할 경우 최소 1일의 시간 해상도를 구현할 수 있는 장점이 있다.

이 연구에서는 테라노바 만 주변지역에 대해 2010년 6월 16일부터 7월 10일 사이에 10장, 2010년 12월 1일부

터 2012년 1월 21일 사이에 49장의 COSMO-SkyMed SAR 영상을 획득하였다(Table 1). 총 59장의 SAR 영상은 모두 single look complex (SLC) 영상으로 수집되었다. 영상이 획득되지 않은 시기인 2010년 8-11월을 제외하고, 모든 영상은 최소 1일에서 최대 8일의 시간 간격을 가지며, descending 궤도에서 stripmap 모드, VV 편파, 40°의 입사각으로 3:45 UTC (Coordinated Universal Time)에 촬영되었다. COSMO-SkyMed SAR 영상에 멀티 룩(multi-look)과 기하보정(geometric correction)을 수행하였고, 공간 해상도 4 m의 영상으로 연구에 사용하였다. 이 연구에서는 Campbell 빙하의 면적변화와 기온의 상관

관계를 분석하기 위해 테라노바 만의 AWS로 매 시간마다 측정된 기온자료를 사용하였다.

3. 연구방법

1) Campbell Glacier Tongue 면적 추출

기하보정이 수행된 총 59장의 SAR 영상으로부터 Campbell Glacier Tongue의 폴리곤(polygon)을 육안으로 디지털타이핑(digitizing)하였고, 이로부터 면적을 산출하였다. Campbell Glacier Tongue의 가장자리는 glacier tongue과 바다 사이의 큰 후방산란 차이로 인해 쉽게 정의할 수 있었으며, 디지털타이핑의 정밀도를 높이기 위해 SAR 영상을 최대한 확대하여 폴리곤을 추출하였다. 그러나 빙상과 glacier tongue의 경계인 지반선(grounding line)의 위치는 SAR 영상의 후방산란만으로는 확인할 수 없다. 빙하의 지반선은 두 개의 위상차분간섭도(differential interferogram)를 차분하는 방법인 Double-Differential InSAR (DDInSAR) 기법으로 추출할 수 있다 (Rignot, 1996). Glacier tongue에 대한 위상차분간섭도는 흐름에 의한 수평변위와 조위에 의한 수직변위를 모두 포함하고 있다. 이때 빙하의 흐름이 시간에 따라 일정하다면, 두 개의 위상차분간섭도를 차분하여 두 간섭도 사이의 수직변위 차이만을 추출할 수 있으며, 수직변위의 차이가 0으로 수렴하는 곳이 빙하의 지반선에 해당한다. Han and Lee (2012)는 Campbell 빙하에 대해 획득된 COSMO-SkyMed 레이더 간섭쌍에 DDInSAR 기법을 적용하여 빙하의 지반선을 정의하였으며, 이는 Fig. 1(b)에 흰색 실선으로 표시하였다. 이 연구에서는 총 59장의 COSMO-SkyMed SAR 영상에 Han and Lee (2012)에 의해 정의된 Campbell 빙하의 지반선을 적용하여 Campbell Glacier Tongue의 면적을 산출하였고, 시간에 따른 면적의 변화를 분석하였다.

Glacier tongue의 가장자리에서는 얼음의 붕괴(calving)가 발생하며, 이는 빙산(iceberg)으로 해양에 부유하게 된다. 시간에 따른 빙하의 유출면적을 구하기 위해서는 얼음의 붕괴면적이 산출되어야 한다. Campbell Glacier Tongue의 붕괴영역은 시간적으로 연속된 두 장의 COSMO-SkyMed SAR 영상을 비교하여

추출하였으며, 이로부터 붕괴면적을 산출하였다. 이때 기하보정된 COSMO-SkyMed SAR 영상의 공간 해상도가 4 m 이므로, 4 m × 4 m 보다 작은 규모의 붕괴는 확인할 수 없었다. Campbell Glacier Tongue의 붕괴면적을 기온과 비교하였고, 이로부터 빙하의 붕괴와 기온 사이의 상관관계를 해석하였다.

빙하의 면적과 붕괴영역의 면적을 이용하면 빙하가 바다로 유출된 총 면적인 누적유출면적 A 를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$A_n = A_n^G + \sum_{i=2}^n A^c(i) \quad (1)$$

여기서 n 은 SAR 영상이 획득된 시간적인 순서를 의미하며, [2 59]의 범위를 가진다. A^G 는 Campbell Glacier Tongue의 면적, $A^c(i)$ 는 i 번째 영상과 $i-1$ 번째 영상 사이에서 추출된 Campbell Glacier Tongue의 붕괴면적을 의미한다. 즉 누적유출면적은 빙하의 면적에 얼음 붕괴면적을 보충한 것이다. 이 연구에서는 식 (1)을 이용하여 시간에 따른 Campbell 빙하의 누적유출면적 변화를 분석하였고, 연간 유출량을 추정하였다.

2) 영상정합을 통한 표면변위 추적

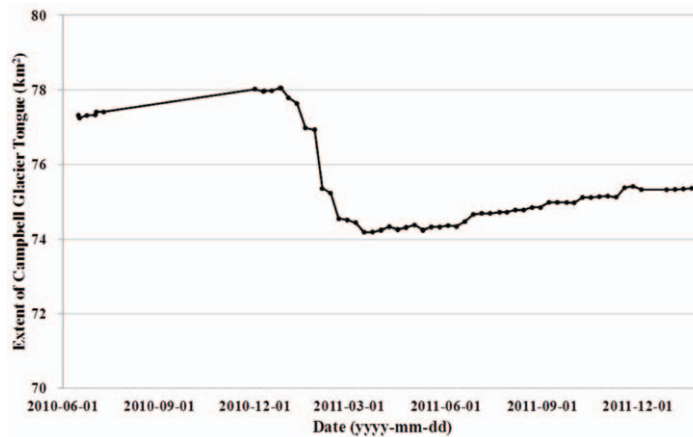
영상정합에 의한 변위추적 기법은 두 장 이상의 영상으로부터 특정 지점의 위치 변화를 추적하는 방법으로, 광학 및 SAR 영상에서 지표의 변위 및 이동속도를 구하는데 널리 사용되고 있다 (Fallourd *et al.*, 2011; Berthier *et al.*, 2005; Strozzi *et al.*, 2008). SAR 영상자료로부터 영상정합을 통해 변위를 추적하는 데에는 후방산란의 강도(intensity) 또는 SAR 영상 사이의 긴밀도(coherence)를 이용하는 방법이 있다(Strozzi *et al.*, 2002). SAR 영상의 정합을 통한 변위추적 기법은 장시간 동안의 지표변위 추출에 매우 유용하므로, DInSAR 기법이 가지는 한계점을 보완할 수 있다. 그러나 SAR 영상은 급경사의 산악지형에서 지형 왜곡을 수반하기 때문에 영상정합을 위한 피쳐의 선정이 어려울 수 있으며, 이러한 경우 고정밀 수치고도모델을 이용한 정보보정을 통해 측정 변위를 보정해야 한다(Scherler *et al.*, 2008).

이 연구에서는 SAR 영상의 후방산란 강도를 이용하여 Campbell 빙하에 대해 영상정합에 의한 변위추적을 수행하였다. 이때 첫 번째와 마지막으로 획득된 SAR 영상의 정합을 통한 변위추적은 수행할 수 없었

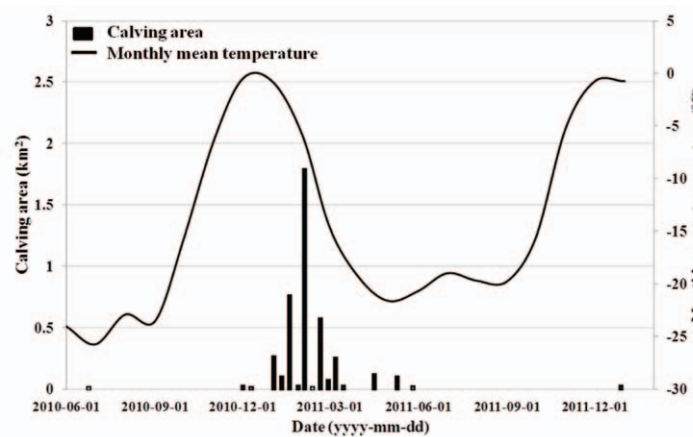
다. 이는 두 영상 사이의 긴 시간적 기선거리(584일)에 의해 변위가 크게 발생하고, 이로 인해 피처의 상관성 (correlation)이 저하되어 신호 대 잡음비(signal to noise ratio)가 매우 작기 때문이다. Han and Lee (2012)에 의하면 Campbell 빙하의 흐름속도는 계절에 관계없이 거의 일정하다. 이 연구에서도 Campbell 빙하의 흐름은 시간적으로 일정하다고 가정하였고, 가장 먼저 획득된 2010년 6월 16일의 COSMO-SkyMed SAR 영상을 영상정합을 위한 주영상으로 선정하였다. 부영상으로는 2010년 7월 10일에 획득된 영상을 사용하였으며, 영상정합을 통해 24일 동안 발생한 빙하의 변위를 추출하여 빙하의 연간 흐름속도를 추정하였다. 이는 2010년 7월 10일 이후부터 11월까지 영상을 획득하지 않았으므로, 7월 10일 이후의 영상을 부영상으로 사용할 경우 큰 시간

적 기선거리로 인해 영상정합을 통한 변위의 추적이 어렵기 때문이다.

영상정합에 의해 추정된 흐름속도의 오차를 평가하기 위해 육안으로 Campbell 빙하의 표면변위를 추출하였다. 먼저 2010년 6월 16일의 COSMO-SkyMed SAR 영상을 이용하여 Campbell 빙하 표면에서 총 45개의 피처를 선정하였다. 그리고 24-32일의 시간간격을 가지는 17장의 COSMO-SkyMed SAR 영상을 사용하여 45개 피처에 대한 584일 동안의 변위를 추출하였다. Campbell 빙하는 지형기복이 심하지 않기 때문에 피처 선정의 어려움은 없었으며, SAR 영상의 정사보정을 수행하지 않아도 추출된 변위의 정밀도는 크게 저하되지 않을 것으로 판단하였다. 육안분석으로 추출된 빙하의 표면 변위를 이용하여 흐름속도를 계산하였고, 이를 영상정



(a)



(b)

Fig. 2. (a) Variations in the extent of Campbell Glacier Tongue from June 2010 to January 2011. (b) Calving area of Campbell Glacier Tongue and variations in the monthly mean temperature over Terra Nova Bay from June 2010 to January 2011.

합을 통해 추정된 흐름속도와 비교하였다. 이를 통해 영상정합에 의해 추출된 변위로부터 추정된 range 및 azimuth 방향의 흐름속도 오차를 평가하였다.

4. 결과 및 토의

1) Campbell Glacier Tongue의 면적변화

Table 1은 Campbell Glacier Tongue의 면적과 붕괴면적, Campbell 빙하의 누적유출면적을 나타낸 것이다. n 번째 SAR 영상에서의 붕괴면적은 n 번째와 $n-1$ 번째 SAR 영상이 획득된 날짜 사이에 발생한 붕괴면적을 의미한다. COSMO-SkyMed SAR 영상의 공간 해상도(4 m) 보다 작은 규모의 붕괴는 확인할 수 없었으며, 이러한 경우 붕괴면적은 Table 1에 표기하지 않았다. Fig. 2(a)는 2010년 6월부터 2012년 1월까지 Campbell Glacier Tongue의 면적변화를 나타낸 것이다. Campbell Glacier Tongue의 면적은 2010년 12월까지 서서히 증가하였다. 그러나 남극의 여름철에 해당하는 1-3월에 급격한 감소를 보였으며, 3월 이후에는 다시 증가하는 것으로 나타났다.

Campbell Glacier Tongue의 면적 증감은 glacier tongue의 붕괴와 관련된다. Fig. 2(b)는 Campbell Glacier Tongue의 붕괴면적(막대)을 테라노바 만의 월 평균 기온(실선)과 함께 나타낸 것이다. Campbell Glacier Tongue의

붕괴는 남극의 여름철인 1-3월에 집중되어 있는데, 이는 연 평균 기온에 비해 높은 여름 기온이 빙붕 및 glacier tongue의 붕괴를 가속화시키는 주요 원인이 되기 때문이다(Skvarca *et al.*, 1999; Dyurgerov and McCabe, 2006; Scambos *et al.*, 2000). 따라서 Campbell Glacier Tongue의 면적 감소는 계절적 영향에 의한 빙하의 붕괴 때문인 것으로 판단할 수 있다. Fig. 2(b)에 의하면 Campbell Glacier Tongue의 붕괴면적은 최고기온이 기록된 시기로부터 2개월 후에 최대로 나타난다. 여름철의 높은 기온은 빙하 표면을 녹여 못(melt pond)을 형성시킨다. 이러한 못은 높은 기온이 유지되는 동안 지속적으로 확장되며, 빙하 내부에 액체 상태의 물이 흐를 수 있는 균열을 만들어 빙하의 붕괴를 야기한다(Scambos *et al.*, 2000). Campbell Glacier Tongue에서도 기온이 상승하는 동안 형성된 못이 균열을 발생시키고, 2개월이 지난 이후에 대규모의 붕괴를 일으킨 것으로 판단된다.

Fig. 2를 통하여 Campbell Glacier Tongue의 면적은 계절적 영향에 의한 붕괴로 인해 변화하지만 증감의 폭은 크지 않은 것을 알 수 있다. 그리고 2010-2012년에 Campbell Glacier Tongue의 평균 면적은 75.5 km²로 추정되었다. Frezzotti (1993)의 연구에 의하면 Campbell Glacier Tongue의 면적은 1963년에 77 km², 1972-1973년에 77.9 km², 그리고 1989년에는 78.4 km²이었다. 이로부터 Campbell Glacier Tongue의 면적은 거의 일정하게 유

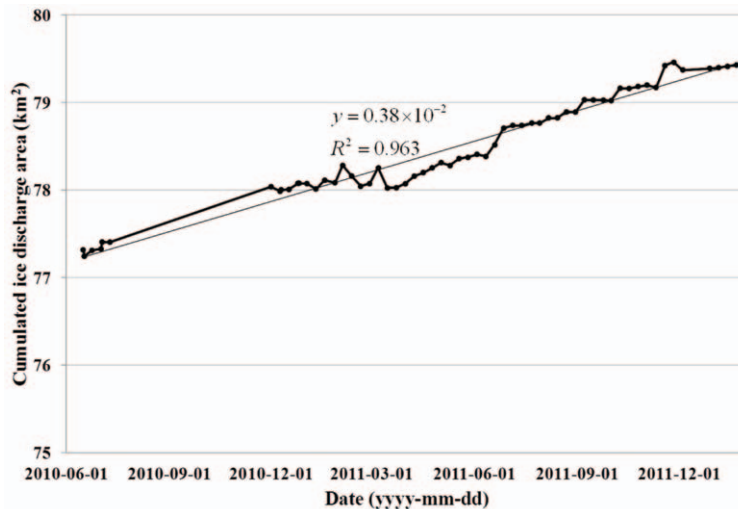


Fig. 3. Cumulated ice discharge area of Campbell Glacier Tongue from June 2010 to January 2011.

지되고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 Campbell Glacier Tongue의 누적유출면적을 도시한 것으로, 누적유출면적은 시간에 따라 선형으로 증가하는 것을 알 수 있다. 누적유출면적에 대한 선형 회귀 분석 결과, 2010년 6월부터의 면적 증감량은 $0.38 \times 10^2 \text{ km}^2/\text{day}$ ($1.39 \text{ km}^2/\text{yr}$)로 추정되었다. Han and Lee (2012)는 Campbell Glacier Tongue의 두께를 $418 \pm 86 \text{ m}$ 로 추정하였으며, 이를 이 연구에서 추정된 면적 증감량과 함께 고려하면 Campbell Glacier Tongue의 유출량은 $0.58 \pm 0.12 \text{ km}^3/\text{yr}$ 로 분석된다. 이는 Frerzzotti (1993)이 분석한 1988-1989년의 유출량($0.4 \text{ km}^3/\text{yr}$)보다 증가한 수치이다. 빙하의 면적이 시간에 따라 거의 일정한 반면에 유출량이 증가한 것은 빙하의 흐름속도 가속화 때문으로 추정할 수 있다(Rignot *et al.*, 2004; Stearns *et al.*, 2008). Campbell 빙하의 흐름속도 변화는 다음 절에서 분석될 것이다.

2) Campbell 빙하의 흐름속도

Fig. 4(a)와 (b)는 24일의 시간적 기선거리를 가지는

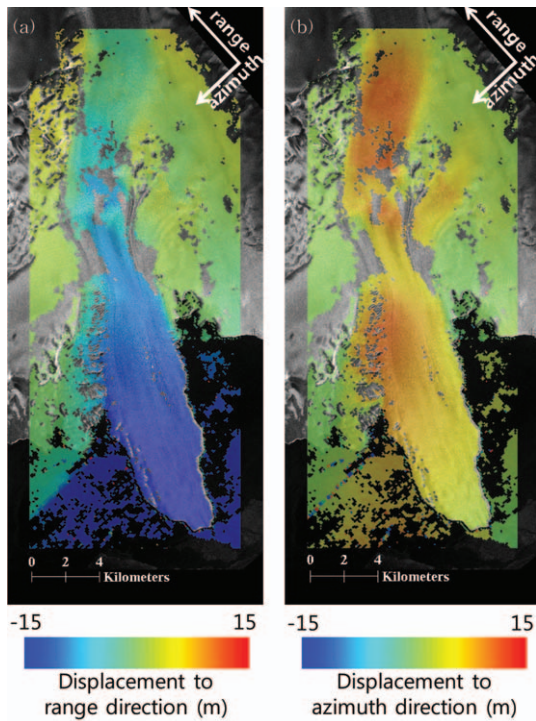


Fig. 4. Displacement of Campbell Glacier to (a) range and (b) azimuth direction of COSMO-SkyMed SAR image from 16 June 2010 to 10 July 2010 (24 days).

2010년 6월 16일과 7월 10일의 영상정합을 통해 추출한 Campbell 빙하의 range 방향과 azimuth 방향의 변위이다. Range 방향의 변위가 azimuth 방향의 변위에 비해 상대적으로 큰 것을 볼 수 있는데, 이는 빙하의 흐름방향이 SAR 영상의 range 방향과 거의 평행하기 때문이다. Fig. 4(a)와 (b)로부터 테라노바 만에서도 변위가 관찰됨을 볼 수 있다. 영상정합에 사용된 SAR 영상은 남극의 겨울철인 6, 7월의 영상이며, 이 시기에는 테라노바 만에 해빙이 광범위하게 형성된다. 따라서 테라노바 만에서 관찰되는 변위는 해빙의 변위로서, 해수의 이동과 조위의 변화에 기인한다(Han and Lee, 2011). 이 연구는 Campbell 빙하의 면적 및 흐름속도 분석이 목적이므로, 해빙의 변위분석은 논외로 한다.

Fig. 5는 영상정합을 통해 추출된 변위를 이용하여 추정한 Campbell 빙하의 흐름속도이다. 빙하 표면에 나타난 화살표는 흐름의 방향과 속도의 크기를 지시한다. Campbell 빙하의 흐름 방향은 SAR 영상에서 관찰되는 유선의 방향과 평행함을 확인할 수 있다. 빙하의 흐름속도는 기반선을 지나면서 급격히 빨라지며,

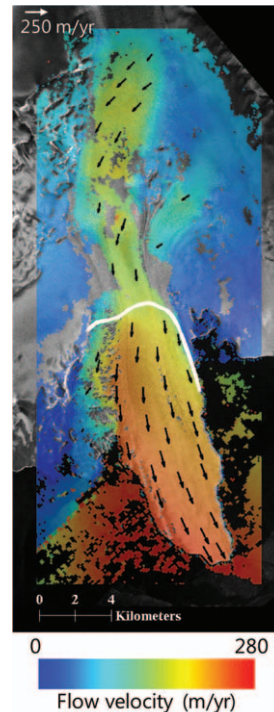


Fig. 5. Flow velocity map of Campbell Glacier. White solid line indicates the grounding line of the glacier.

Campbell Glacier Tongue에서는 본류의 흐름속도가 지류의 흐름속도보다 빠른 것으로 관찰된다. 이는 지류에 유입되는 얼음의 양이 적어 흐름이 잘 발생하지 않기 때문인 것으로 추정할 수 있다.

지반선 위쪽의 빙하 상류 지역에서 흐름속도는 150-170 m/yr로 추정되었다. Campbell 빙하의 상류 지역은 유선을 따라 거의 일정한 흐름속도를 보이고 있다. 빙하의 흐름속도는 지반선을 지나 Campbell Glacier Tongue에서 급격히 빨라진다. Campbell Glacier Tongue 본류의 흐름속도는 지반선의 위치에서 181 m/yr로 최소였으며, 유선을 따라 하류로 갈수록 증가하여 glacier tongue의 끝 부분에서 268 m/yr의 최대속도를 나타냈다. 이 연구에서 분석된 Campbell Glacier Tongue의 흐름속도는 Frezzotti (1993)에 의해 분석된 1988-1989년의 흐름속도(140-240 m/yr)에 비해 빨라진 것이며, 이로부터 Campbell 빙하의 유출량 증가는 1988-1989년에 비해 가속화된 흐름속도에 기인함을 확인할 수 있다.

영상정합을 통해 추정된 흐름속도의 오차를 평가하기 위해 Campbell 빙하 표면에서 45개 피처에 대한 변위를 육안으로 추출하였다. 그리고 각 피처의 range 방향과 azimuth 방향의 흐름속도를 계산하였고, 이를 영상정합을 통해 추정된 range 방향과 azimuth 방향의 흐름속도와 비교하였다. 영상정합을 통해 추정된 흐름속도의 평균 제곱근오차(root mean square error)는 range 방향과 azimuth 방향에 대해 각각 18.8 m/yr와 15.8 m/yr로 분석되었다. 이는 영상정합에 의해 추출된 변위로부터 추정된 빙하의 흐름속도에 약 9%의 오차가 포함되어 있음을 나타낸다.

5. 결론

동남극 테라노바 만에 위치한 Campbell 빙하의 변화를 분석하기 위해 2010년 6월부터 2012년 1월까지 총 59장의 COSMO-SkyMed SAR 영상을 획득하였고, 디지털타이징과 영상정합에 의한 변위추적 기법을 이용하여 빙하의 면적을 추출하고 흐름속도를 추정하였다. Campbell Glacier Tongue의 면적은 여름철에 감소하고 겨울철에 증가하지만 증감의 폭이 크지 않았으며, 2010-2012년의 평균 면적은 75.5 km²로 1989년의 면적

(78.4 km²)과 유사하였다. 반면에 Campbell Glacier Tongue의 유출량은 1989년(0.4 km³/yr)에 비해 증가한 0.58±0.12 km³/yr로 추정되었다. 영상정합에 의한 변위 추적을 통해 추정된 Campbell 빙하의 흐름속도는 상류 지역에서 공간적으로 거의 일정하였으나, 지반선을 지나 Campbell Glacier Tongue에서는 급격히 빨라졌다. Campbell Glacier Tongue 본류는 지류보다 빠른 흐름속도를 나타냈다. Campbell Glacier Tongue의 흐름속도는 181-268 m/yr로서 1988-1989년의 흐름속도(140-240 m/yr)에 비해 빠른 것으로 분석되었고, 이로부터 Campbell Glacier Tongue의 유출량 증가는 과거에 비해 가속화된 흐름속도에 영향을 받은 것으로 해석할 수 있었다.

이 연구를 통해 시계열적으로 획득된 고해상도의 COSMO-SkyMed SAR 영상은 빙하의 면적과 흐름속도 분석에 매우 유용함을 확인할 수 있었고, Campbell 빙하에 대한 가장 최근의 유동특성 정보를 제공할 수 있었다. 이 연구는 향후 고해상도의 X-band SAR 영상을 제공할 다목적실용위성 5호의 활용성을 증대시킬 수 있을 뿐만 아니라, 장보고 과학기지의 빙하분야 연구 활동에도 크게 기여할 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2010-0009465)입니다. 자료처리에 많은 도움을 준 강원대학교 지구물리학과 김재윤, 백승용, 장민주, 함아름에게 감사드립니다.

참고문헌

- Bell, R.E., M. Studinger, C.A. Shuman, M.A. Fahnestock, and I. Joughin, 2007. Large subglacial lakes in East Antarctica at the onset of fast-flowing ice streams, *Nature*, 445: 904-907.
- Berthiera, E., H. Vadon, D. Baratoux, Y. Arnaud, C. Vincent, K.L. Feigl, F. Remy, and B. Legresy,

2005. Surface motion of mountain glaciers derived from satellite optical imagery, *Remote Sensing of Environment*, 95(1): 14-28.
- Bianchessi, N. and G. Righini, 2008. Planning and scheduling algorithms for the COSMO-SkyMed constellation, *Aerospace Science and Technology*, 12(7): 535-544.
- Covello, F., F. Battazza, A. Coletta, E. Lopinto, C. Fiorentino, L. Pietranera, G. Valentini, and S. Zoffoli, 2010. COSMO-SkyMed an existing opportunity for observing the Earth, *Journal of Geodynamics*, 49(3-4): 171-180.
- Dyurgerov, M. and G.J. McCabe, 2006. Associations between accelerated glacier mass wastage and increased summer temperature in coastal regions, *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 38(2): 190-197.
- Fallourd, R., O. Harant, E. Trouve, J. Nicolas, M. Gay, A. Walpersdorf, J. Mugnier, J. Serafini, D. Rosu, L. Bombrun, G. Vasile, N. Cotte, F. Vernier, F. Tupin, L. Moreau, and P. Bolon, 2011. Monitoring temperate glacier displacement by multi-temporal TerraSAR-X images and continuous GPS measurements, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4(2): 372-386.
- Frezzotti, M., 1993. Glaciological study in Terra Nova Bay, Antarctica, inferred from remote sensing analysis, *Annals of Glaciology*, 17: 63-71.
- Frezzotti, M., 1997. Ice front fluctuation, iceberg calving flux and mass balance of Victoria Land glaciers, *Antarctic Science*, 9(1): 61-73.
- Han, H. and H. Lee, 2011. Analysis of surface displacement of glaciers and sea ice around Canisteo Peninsula, West Antarctica, by using 4-pass DInSAR technique, *Korean Journal of Remote Sensing*, 27(5): 535-542 (in Korean with English abstract).
- Han, H. and H. Lee, 2012. COSMO-SKYMed AO Projects - Tidal deflection characteristics of Campbell Glacier, East Antarctica, observed by double-differential SAR interferometry, *Proc. of 2012 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Munich, Jul. 22-27, pp. 4465-4468.
- Monaghan, A.J., D.H. Bromwich, R.L. Fogt, S. Wang, P.A. Mayewski, D.A. Dixon, A. Ekaykin, M. Frezzotti, I. Goodwin, E. Isaksson, S.D. Kaspari, V.I. Morgan, H. Oerter, T.D. van Ommen, C.J. van der Veen, and J. Wen, 2006. Insignificant change in Antarctic snowfall since the International Geophysical Year, *Science*, 313(5788): 827-831.
- 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., 1998. Fast recession of a West Antarctic glacier, *Science*, 281(5376): 549-551.
- Rignot, E., 2002. Mass balance of East Antarctic glaciers and ice shelves from satellite data, *Annals of Glaciology*, 34: 217-227.
- Rignot, E., G. Casassa, P. Gogineni, W. Krabill, A. Rivera, and R. Thomas, 2004. Accelerated ice discharge from the Antarctic Peninsula following the collapse of Larsen B ice shelf, *Geophysical Research Letters*, 31, L18401.
- Rignot, E., J.L. Bamber, M.R. van den Broeke, C. Davis, Y. Li, W.J. van de Berg, and E. van Meijgaard, 2008. Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling, *Nature Geoscience*, 1: 106-110.
- Rignot, E. and R.H. Thomas, 2002. Mass balance of polar ice sheet, *Science*, 297(5586): 1502-1506.
- Rott, H., 2009. Advances in interferometric synthetic aperture radar (InSAR) in earth system science, *Progress in Physical Geography*, 33(6): 769-791.
- Scambos, T.A., C. Hulbe, M. Fahnestock, and J. Bohlander, 2000. The link between climate

- warming and break-up of ice shelves in the Antarctic Peninsula, *Journal of Glaciology*, 46(154): 516-530.
- Scambos, T.A., J.A. Bohlander, C.A. Shuman, and P. Skvarca, 2004. Glacier acceleration and thinning after ice shelf collapse in the Larsen B embayment, Antarctica, *Geophysical Research Letters*, 31, L18402.
- Scherler, D., S. Leprince, and M.R. Strecker, 2008. Glacier-surface velocities in alpine terrain from optical satellite imagery-Accuracy improvement and quality assessment, *Remote Sensing of Environment*, 112(10): 3806-3819.
- Skvarca, P., W. Rack, H. Rott, and T.I. Donangelo, 1999. Climatic trend and the retreat and disintegration of ice shelves on the Antarctic Peninsula: an overview, *Polar Research*, 18(2): 151-157.
- Stearns, L.A., B.E. Smith, and G.S. Hamilton, 2008. Increased flow speed on a large East Antarctic outlet glacier caused by subglacial floods, *Nature Geoscience*, 1: 827-831.
- Stenni, B., F. Serra, M. Frezzotti, V. Maggi, R. Traversi, S. Becagli, and R. Roberto, 2000. Snow accumulation rates in northern Victoria Land, Antarctica, by firn-core analysis, *Journal of Glaciology*, 46(155): 541-552.
- Strozzi, T., A. Kouraev, A. Wiesmann, U. Wegmuller, A. Sharov, and C. Werner, 2008. Estimation of Arctic glacier motion with satellite L-band SAR data, *Remote Sensing of Environment*, 112(3): 636-645.
- Strozzi, T., A. Luckman, T. Murray, U. Wegmuller, and C.L. Werner, 2002. Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11): 2384-2391.
- Trouve, E., G. Vasile, M. Gay, L. Bombrun, P. Grussenmeyer, T. Landes, J. Nicolas, P. Bolon, I. Petillot, A. Julea, L. Valet, J. Chanussot, and M. Koehl, 2007. Combining airborne photographs and spaceborne SAR data to monitor temperate glaciers: potentials and limits, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(4): 905-924.
- Weydahl, D.J., 2001. Analysis of ERS tandem SAR coherence from glaciers, valleys, and fjord ice on Svalbard, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(9): 2029-2039.