

4-pass DInSAR 기법을 이용한 서남극 Canisteo 반도 주변 빙하와 해빙의 표면 변위 해석

한향선 · 이훈열[†]

강원대학교 지구물리학과

Analysis of Surface Displacement of Glaciers and Sea Ice Around Canisteo Peninsula, West Antarctica, by Using 4-pass DInSAR Technique

Hyangsun Han and Hoonyol Lee[†]

Department of Geophysics, Kangwon National University

Abstract : We extracted a surface displacement map of Canisteo Peninsula and the surrounding area in West Antarctica by applying 4-pass DInSAR technique to two ERS-1/2 tandem pairs and analyzed the surface displacement of glaciers and sea ice. In the displacement map, glaciers showed fast motion pushing the adjoining land-fast sea ice which has the displacement in the same direction as the glacier. Cosgrove ice shelf showed large displacement pushing the adjoining land-fast sea ice as well. Some sea ice indicated the displacement that is opposite to the land-fast sea ice. This was because the type of the sea ice is drift ice that is affected by ocean current. Therefore, we could confirmed the boundary between land-fast sea ice and drift ice. It was difficult to distinguish ice shelf from ice sheet because they showed similarities both in brightness of the SAR images and in fringe rates of the interferograms. However, a boundary between fast-moving ice shelf and stable ice sheet was easily confirmed in the displacement map after the phase unwrapping process.

Key Words : West Antarctica, 4-pass DInSAR, displacement map, glacier, sea ice

요약 : 본 연구에서는 서남극 Canisteo 반도와 그 주변 지역이 촬영된 2쌍의 ERS-1/2 tandem pair에 4-pass DInSAR 기법을 적용하여 표면 변위도를 생성하였고, 빙하와 해빙의 표면 변위를 해석하였다. 표면 변위도에서 빙하는 매우 빠른 움직임을 나타냈으며 인접해 있는 정착빙을 밀어내어 정착빙 표면에서는 빙하와 같은 방향의 변위가 관찰되었다. Cosgrove 빙붕도 큰 변위를 나타냈으며, 인접해 있는 정착빙을 밀어내는 것이 관찰되었다. 일부 해빙은 정착빙과 반대 방향의 움직임을 보였다. 이는 해빙이 해류에 영향을 받는 유빙이기 때문이며, 이로부터 정착빙과 유빙의 경계를 확인할 수 있었다. 빙붕과 빙상의 표면은 SAR 영상에서 유사한 밝기를 보이며, 간섭도에서도 비슷한 정도의 간섭띠 변화율을 나타내 두 빙체를 쉽게 구분할 수 없었다. 그러나 움직임을 큰 빙붕과 변위가 거의 없이 안정적인 빙상의 경계를 절대위상복원 후 생성한 변위도를 통해서 쉽게 확인할 수 있었다.

접수일(2011년 9월 10일), 수정일(1차 : 2011년 10월 5일, 2차 : 10월 20일), 게재확정일(2011년 10월 21일).

[†] 교신저자: 이훈열(hoonyol@kangwon.ac.kr)

1. 서론

빙하(glacier)와 빙붕(ice shelf), 빙상(ice sheet)과 같은 빙하빙(glacial ice)과 해빙(sea ice)의 변화는 지구 온난화와 해수면 상승에 가장 크게 관련된 환경학적 지시자이다. 북극에서는 해빙이 위치하는 최저위도가 매년 고위도로 이동하고 있으며, 그린란드(Greenland)의 빙하와 빙상의 감소 속도는 급격히 빨라지고 있다(Slobbe *et al.*, 2008; Howat *et al.*, 2007; Moholdt *et al.*, 2010; Kwoun *et al.*, 2005). 남극의 경우 서남극 지역의 극빙 감소가 가장 두드러지게 관찰되고 있다(Rignot, 1998; Rignot *et al.*, 2002; Rignot *et al.*, 2005). 서남극 빙상(West Antarctic Ice Sheet)은 최근 Pine Island 빙하의 ice tongue 붕괴와 같이 급격한 변화를 일으키고 있다. 특히 이 지역 빙하의 대규모 감소는 그린란드의 빙하 감소와 함께 해수면 상승의 주요 원인이 되고 있다. 서남극 빙붕의 체적은 매년 65 km^3 감소하고 있으며, 서남극의 모든 빙붕과 빙하의 유실량을 고려할 경우, 전 지구적 해수면 상승은 연간 0.2 mm 에 달한다(Thomas *et al.*, 2004). 이와 같이 서남극 지역의 극빙 변화는 지구 환경에 큰 영향을 미치고 있기 때문에 서남극 지역에 대한 지속적인 관측이 요구되고 있다.

극빙의 변화 관측에는 인공위성 SAR(synthetic aperture radar) 영상이 많이 활용되고 있다. 인공위성 SAR은 고해상도의 영상을 제공할 뿐만 아니라, 태양고도와 기상조건에 영향을 받지 않기 때문에 광학영상에 비해 효용성이 크다. 특히 위상간섭기법(SAR Interferometry, InSAR)의 적용을 통해 극지 표면의 미세한 변화를 관찰할 수 있는 장점이 있다. 위상간섭기법은 동일한 연구지역에서 획득된 2장 이상의 SAR 영상으로부터 위상의 차이를 구하고, 지표의 고도 및 표면의 변위를 측정하는 기법이다. 위상차분간섭기법(Differential InSAR, DInSAR)은 하나의 간섭도(interferogram)로부터 DEM(digital elevation model) 또는 고도에 의한 위상이 뚜렷한 간섭도를 이용하여 고도효과를 제거하고, 표면의 변위만을 추출하는 기법이다(윤근원 외, 2001).

DInSAR 기법은 지진 및 화산에 의한 지표면 변화(Yen *et al.*, 2008; Chini *et al.*, 2010; Stramondo *et al.*, 2011; Pavez *et al.*, 2006)와 지반침하(Tomás *et*

al., 2005; Jiang *et al.*, 2011; Pipia *et al.*, 2009) 등에 많이 사용되고 있으며, 극지의 환경 변화를 관찰하는 데도 널리 사용되고 있다. Rignot(1998)은 서남극 Pine Island 빙하가 촬영된 ERS-1/2 SAR 영상에 DInSAR 기법을 적용하여 빙하의 hinge line을 관측하였고, 1992~1996년 사이에 빙하의 hinge line은 1.2 km 후퇴한 것으로 나타났다. Rignot(2008)은 서로 다른 시기에 획득된 ERS-1/2 SAR, Radarsat-1 SAR, ALOS PALSAR 영상에 DInSAR 기법을 적용하여 서남극 Pine Island 빙하와 Thwaites 빙하, 그리고 Smith 빙하의 속도 변화를 관찰하였다. 연구 결과 모든 빙하의 표면 속도는 점점 빨라지고 있으며, 연간 빙체 감소량(ice mass loss)은 20년 동안 170% 이상 증가한 것으로 나타났다.

DInSAR 기법 중 가장 많이 쓰이는 방법은 연구지역의 간섭도와 정확한 DEM이 요구되는 2-pass DInSAR 기법이다(Massonnet *et al.*, 1993). 남극의 경우 RAMP(Radarsat-1 Mapping Project) DEM과 ASTER GDEM(Global DEM)이 존재한다. RAMP DEM은 남극 전 지역에 대한 고도 정보를 제공하고 있으나, 해안지역에서 약 400 m 의 수평 해상도를 가지며 기하학적 왜곡을 포함하고 있다(Liu *et al.*, 1999; Jezek *et al.*, 1999). 본 논문의 연구지역은 해안지역이기 때문에 2-pass DInSAR를 위한 RAMP DEM의 적용은 부적절하다. ASTER GDEM은 30 m 의 공간해상도로 고도 정보를 제공한다(Hayakawa *et al.*, 2008). 그러나 수 년 동안 획득된 광학 영상의 스테레오 모자이크를 통해 제작되었기 때문에 표면 변화가 심한 극지방에서는 고도 정밀도가 떨어지는 단점이 있다. 또한 극지 표면의 눈과 얼음으로 인해 스테레오 매칭(stereo matching)에 오류가 발생할 수 있으며, 이는 고도 정보의 불확실성으로 연결된다.

본 논문에서는 서남극 Canisteo 반도 주변의 빙하와 해빙의 표면 변위를 관측하기 위해 연구지역의 DEM 없이 두 개의 간섭도만을 이용하여 수행할 수 있는 4-pass DInSAR 기법을 적용하였다. 4-pass DInSAR 기법은 2개의 간섭도를 사용하는데, 표면 변화에 의한 위상이 지배적인 간섭도(diff-pair)로부터 고도에 의한 위상만을 나타내는 다른 간섭도(topo-pair)를 차분하는 방법이다(Zebker *et al.*, 1994). 4-pass DInSAR의 수행을 위해

서남극 Canisteo 반도를 중심으로 주변의 빙하와 빙붕, 해빙이 포함된 2쌍의 ERS-1/2 tandem pair 영상을 획득하였고, 각각의 pair로부터 생성된 간섭도를 분석하여 4-pass DInSAR 기법의 적용 가능성을 검토하였다. 그리고 위상차분간섭도(differential interferogram)로부터 레이더 관측 방향(line of sight, LOS)으로의 표면 변위를 추출하였으며, 하루 동안 발생된 빙하와 해빙의 변위를 해석하였다.

2. 연구지역 및 자료

연구지역은 서남극 아문젠 해(Amundsen Sea)에 인접한 Canisteo 반도(73° 48' S, 102° 20' W)와 그 주변 지역이다(Fig. 1). Canisteo 반도는 길이와 폭이 각각 48 km와 32 km이며, 다양한 규모의 빙하가 해안 지역에 위치하고 있다. 가장 대표적인 빙하는 Chavez 빙하로 Canisteo 반도의 동쪽 해안에 위치하고 있으며, 길이와 폭이 각각 15 km와 5 km이고, Cranton 만으로 흐르는 outlet 빙하이다. 반도의 양 옆으로는 Cosgrove 빙붕과 서남극 최대 규모의 빙하인 Pine Island 빙하의 ice tongue이 위치해 있다. 이 지역의 표면은 항상 눈과 얼음으로 덮여 있으며, 지반이 노출된 곳은 Canisteo 반도 주변의 소규모 섬들 중 일부에 국한된다. 이 지역의 바다는 겨울에 다양한 유형의 해빙으로 덮이지만 여름철에는 대부분 open water의 상태가 유지된다.

본 연구에서는 2쌍의 ERS-1/2 tandem 영상을 사용하였다. ERS-1/2 SAR 영상은 모두 ascending orbit에서 VV 편파 모드로 획득되었다. 각각의 ERS-1/2 tandem pair는 1995년 10월 21일과 22일, 1996년 3월 9일과 10일에 획득되었다(Table 1). 남극의 10월은 눈과 얼음이 서서히 녹기 시작하는 봄철에 해당하며, 극빙 표면에 변화가 발생하기 시작하여 변위가 잘 관찰될 수 있

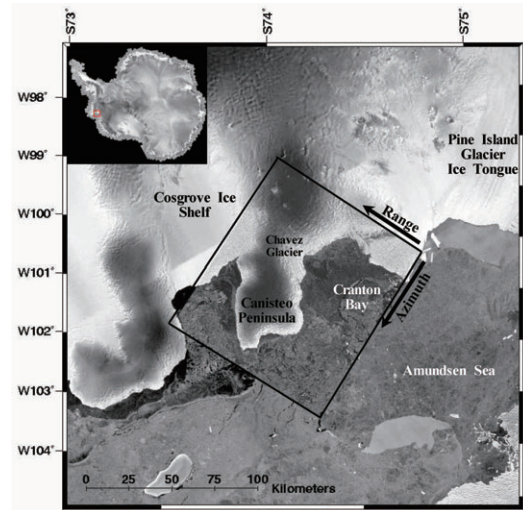


Fig. 1. ERS-1 SAR image of the study area obtained on October 21, 1995 (100 km × 100 km). The background image is Radarsat-1 SAR mosaic image (Jezek, 1999). The coordinates of the center of the ERS-1 SAR image is 73°48' S latitude and 102°20' W longitude (small box on the upper left image).

다. 3월은 남극의 여름이 끝나고 가을이 시작되는 시기로서, 녹아있던 지표면은 다시 동결되고 해빙이 서서히 형성된다. Fig. 1은 1995년 10월 21일에 획득된 ERS-1 SAR 영상으로 Cranton 만에 표면이 부드러운 해빙이 넓게 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 반도로부터 먼 바다에는 다양한 크기의 해빙이 위치하고 있고, 반도의 양 옆으로는 표면이 상대적으로 밝은 빙붕이 관찰된다. 반도 좌측의 빙붕이 Cosgrove 빙붕, 우측은 Pine Island 빙하의 ice tongue 바로 옆에 위치한 소규모의 빙붕이다.

3. 4-Pass DInSAR 적용 및 변위도 제작

2쌍의 ERS-1/2 tandem 영상으로부터 간섭도를 생

Table 1. ERS-1/2 tandem pairs used in this study

Track	Orbit (ERS-1/2)	Date (yy/mm/dd)	Polarization	Incidence angle	Perpendicular baseline	Height ambiguity
278	22310/ 2237	95/10/21 95/10/22	VV	23.4°	40.0 m	243.2 m
	24314/ 4641	96/03/09 96/03/10	VV	23.4°	152.4 m	63.9 m

성하기 위해 InSAR 자료처리 과정을 거쳤으며, 각각의 영상 pair에서 좋은 긴밀도(coherence)를 가지는 간섭도를 생성할 수 있었다. Fig. 2(a)는 1995년 10월의 pair로부터 생성된 간섭도로 지구타원체의 영향이 제거된 것이다. 이 pair는 수직 기선거리(perpendicular baseline)가 40 m로 매우 짧으며, 한 개의 간섭띠(fringe)가 나타내는 고도 변화량(height ambiguity)은 약 243 m이므로 표면의 변위를 잘 나타낼 수 있는 조건이다. 1996년 3월의 pair는 수직 기선거리가 152 m로 길고 고도 변화량은 64 m로 매우 작아 간섭도로부터 지표면의 변위보다는 고도의 변화량을 잘 관찰할 수 있는 조건이다. Fig. 2(b)는 이 pair를 이용해 생성한 간섭도로서, Canisteo 반도에서 관찰되는 간섭띠는 등고선의 형태로 나타나고 있다. 그러나 바다에서는 아직 해빙이 형성되지 않았음을 확인할 수 있다. 이는 영상이 획득될 당시에 높은 기온이 유지되고 있었음을 반영하며, Fig. 2(a)의 간섭도(10월)보다 Fig. 2(b)의 간섭도에 더 많은 변위가 포함될 가능성이 있음을 시사한다. 따라서 수직 기선거리와 고도 변화량 외에도 간섭띠 변화율(fringe rate)의 특성도 함께 검토하여 diff-pair와 topo-pair 간섭도를 선정해야 한다.

Fig. 2(a)에서 고도의 변화가 거의 없는 해빙과 Cosgrove 빙붕 표면에 많은 간섭띠들이 관찰되며, Canisteo 반도 우측의 빙붕 표면에서도 원형의 간섭띠가 다수 관찰된다. 이는 빙체 표면의 변위에 의한 간섭띠이다. Chavez 빙하에서도 많은 간섭띠들이 관찰되고 있으며, 이 간섭띠들은 빙하의 고도 변화뿐만 아니라 표면 변위를 모두 포함하고 있다. 빙하 표면에서 관찰되는 간섭띠 변화율은 Fig. 2(b)에서 관찰되는 것 보다 더 크며, 이로부터 Fig. 2(a)의 간섭도가 Fig. 2(b)의 간섭도보다 더 많은 표면 변위를 포함하고 있음을 알 수 있다. 일부 해빙에서는 낮은 긴밀도로 인해 간섭띠가 관찰되지 않는다. 이는 해빙의 시공간적 일변화가 심한 유빙과 부빙이기 때문이다(한향선과 이훈열, 2007). 이와 같이 간섭도에서 해석되는 사항들과 수직 기선거리 및 고도 변화량을 종합하여 10월에 획득된 pair를 4-pass DInSAR 수행을 위한 diff-pair로 선정하였다.

Fig. 2(b)의 생성에 사용된 pair의 수직 기선거리와 고도 변화량은 지표면의 변위보다는 고도의 변화를 잘 나타낼 수 있는 조건이다. Chavez 빙하의 경우 4개의

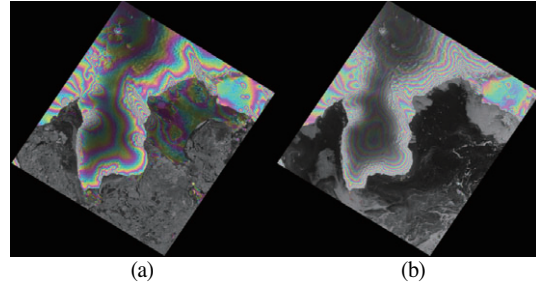


Fig. 2. Earth-flattened interferograms of (a) diff-pair obtained on October 21 and 22, 1995 and (b) topo-pair obtained on March 9 and 10, 1996. (a) shows the phase by deformation on glaciers, sea ice, and ice shelves whereas (b) shows topographic phase with little displacement phase.

간섭띠가 관찰되는데, 이는 pair의 고도 변화량을 고려했을 때 256 m의 고도 변화량을 의미한다. RAMP DEM에서 확인된 Chavez 빙하의 상부 고도가 250 m이므로, Fig. 2(b)에서 관찰되는 Chavez 빙하 표면의 간섭띠 변화율에는 변위에 의한 위상차의 영향이 매우 적음을 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 Fig. 2(b)를 4-pass DInSAR 적용을 위한 topo-pair 간섭도로 선정하였다. 그러나 Cosgrove 빙붕과 Canisteo 반도 우측의 소규모 빙붕의 표면에서 관찰되는 간섭띠는 diff-pair 간섭도와 서로 유사하게 관찰되었다. 이는 topo-pair 간섭도에서 관찰되는 빙붕 표면의 간섭띠에 지형의 고도 변화와 변위가 모두 포함될 수 있음을 의미한다. 따라서 4-pass DInSAR를 통해 생성된 변위도(displacement map)에서 표면의 변위를 정량적으로 해석할 경우 topo-pair 간섭도에서의 변위 효과를 주의하여야 하며, 특히 빙붕 표면의 변위 해석에 주의할 필요가 있다.

위상차분간섭도를 생성하기 위해 다음과 같은 처리과정으로 4-pass DInSAR를 수행하였다. 첫 번째로 diff-pair와 topo-pair의 주 영상(master image)이 서로 다른 geometry를 가지고 있기 때문에 이를 일치시켜야 한다. 이를 위해 주 영상들의 후방산란 세기(intensity)를 이용하여 영상 전체에 걸쳐 range와 azimuth 방향에 대한 registration offset들을 구하였고, 이로부터 4차 정합 다항식(registration polynomials)을 유도하여 topo-pair 주 영상의 geometry를 diff-pair 주 영상에 일치시켰다. 두 pair의 geometry 정합 후 기선거리의 차이를 보정하였다. 먼저 topo-pair에서

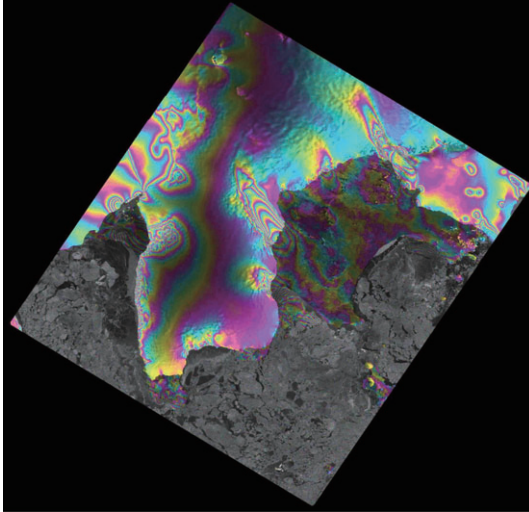


Fig. 3. The differential interferogram of the study area. The topography phase in diff-pair interferogram is nearly removed by topo-pair interferogram.

지구타원체에 의한 영향을 제거하지 않고 절대위상복원 (phase unwrapping)을 수행한 간섭도를 생성하였다. 절대위상복원은 branch-cut 알고리즘(Goldstein *et al.*, 1988)을 이용하여 수행하였다. 그리고 diff-pair와 topo-pair의 기선거리로부터 절대위상이 복원된 topo-pair 간섭도에 대한 위상 환산 계수(phase scale factor)를 계산하였으며, 이를 이용하여 topo-pair 기선거리를 변경하였다. 최종적으로 변경된 기선거리에 대한 topo-pair 간섭도를 생성하였고, diff-pair 간섭도에서 고도에 의한 위상차를 차분하였다.

Fig. 3은 4-pass DInSAR를 통해 생성된 위상차분 간섭도이다. 위상차분간섭도에서는 diff-pair에 포함되어 있던 고도 효과는 대부분 제거되었으며, 표면 변위에 의한 간섭띠들이 잘 관찰되고 있다. 위상차분간섭도로부터 절대위상복원 작업을 수행하였고, 빙하와 해빙 표면에서 LOS 방향으로의 변위를 추출하였다.

4. 빙하와 해빙의 표면 변위 해석

Fig. 4는 1995년 10월 21일과 22일 사이에 발생한 빙체 표면의 변위를 나타내는 변위도이다. 변위도에서 A부터 F까지 총 6개의 영역을 나누어 빙하빙과 해빙의 변위를 해석하였다. A-1, 2는 해안 지역에 위치한 빙하

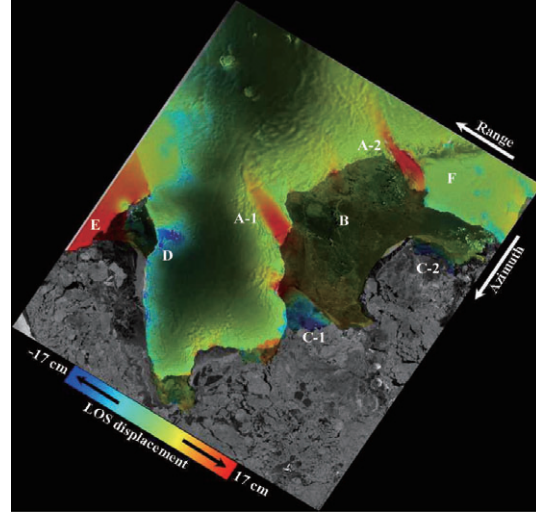


Fig. 4. The map of displacement toward the line of sight of radar extracted from phase unwrapped differential interferogram.

로 흐름의 방향이 바다를 향하는 outlet 빙하이다. A-1 영역에서 빙하(Chavez 빙하)는 유선(streamline)이 끝나는 부분에서 LOS 방향으로의 최대 변위(20 cm)를 나타냈다. A-2 영역의 빙하는 유선을 따라 LOS 방향으로의 변위가 증가하여 최대 18 cm의 변위를 나타냈다. 그러나 A-1 영역의 Chavez 빙하와는 다르게 A-2 영역의 빙하는 유선의 최하부에서 최대변위가 관찰되지 않았다. 이는 Chavez 빙하의 유선이 LOS 방향과 거의 평행한 반면, A-2 영역에서 빙하의 유선은 빙하의 하부로 갈수록 LOS 방향과 평행에서 어긋나므로 실제보다 작은 크기의 변위가 관찰되기 때문이다(Kenyi and Kaufmann, 2003; Strozzi *et al.*, 2002). 두 빙하와 인접해 있는 해빙은 빙하와 같은 LOS 방향의 변위를 나타냈다. 특히 빙하와 직접 맞닿아 있는 부분의 해빙에서는 매우 큰 변위(최대 14 cm)가 관찰되었다. 이 해빙의 유형은 육지와 연결되어 있는 정착빙(fast ice)으로, 빙하가 하강하면서 정착빙을 밀어내기 때문에 LOS 방향으로의 큰 변위를 나타낸다.

B 영역과 C 영역은 해빙이 위치한 지역이다. Fig. 2(b)의 topo-pair 간섭도에서 해빙 영역은 위상차가 계산되지 않았으므로, B와 C 영역의 변위는 0의 지형 고도를 적용하여 추출된 결과이다. 따라서 해빙 지역에서 추출된 변위는 topo-pair 간섭도에 포함될 수 있는 변위의 영향이 전혀 없으며, 1995년 10월 21일과 22일 사

이에 발생한 순수한 변위로 해석할 수 있다. B 영역은 빙하와 직접 연결되어 있지 않은 부분의 정착빙으로서, LOS 방향으로의 작은 움직임이 관찰되었다. 정착빙은 전체적으로 육지에 붙어있는 특성을 가지기 때문에 빙하에 직접 연결되어 있는 부분으로부터 영향을 받아 B 영역에서는 LOS 방향의 변위가 관찰된다. B 영역의 변위에는 빙하의 하강에 의한 영향뿐만 아니라 하루 동안의 조위 차이가 포함될 수 있다(Rignot, 2002). 해빙에서 관찰되는 변위에 대한 조위 차이의 영향은 향후 조위 모델링의 수행을 통해 분석할 예정이다.

C-1, 2는 정착빙의 가장자리 부분으로 정착빙과 반대 방향의 움직임인 LOS 방향에서 멀어지는 운동이 관찰되었다. 이는 해빙의 변위가 정착빙의 움직임과 관계 없이 해류 또는 조위 차이에 의해 발생한 것이며, 이로부터 이 해빙의 유형이 유빙임을 알 수 있다. SAR 영상에서 유빙은 정착빙과 유사한 표면을 가지는 것으로 관찰되어 해빙 유형의 구분이 쉽지 않았으나, 본 연구에서 DInSAR를 이용해 생성한 변위도를 통해 해빙의 유형과 분포 영역을 구분할 수 있었다.

D 영역에서 빙하와 해빙은 LOS 방향에서 멀어지고 있으며, Cosgrove 빙봉과 그에 인접한 해빙(E 영역)은 LOS 방향으로의 변위를 나타내고 있다. 따라서 D와 E 영역의 해빙은 빙하와 빙봉의 운동에 영향을 받는 정착빙임을 알 수 있다. Cosgrove 빙봉은 매우 큰 변위를 나타냈으나, 이는 topo-pair 간섭도에서 관찰되는 변위에 의한 간섭띠들이 영향을 준 것으로 판단된다. Cosgrove 빙봉과 Canisteo 반도를 비롯한 빙상은 SAR 영상에서 서로 유사한 밝기를 나타내 빙체의 경계 구분이 쉽지 않았다. 간섭도에서도 빙봉 표면의 변위와 빙상의 고도 변화에 의한 간섭띠 변화율이 비슷한 것으로 관찰되므로 두 빙체의 경계 구분이 어렵다. 그러나 절대위상복원을 거친 후 생성된 변위도에서는 표면 변위가 큰 빙봉과 변위가 거의 없이 안정적인 빙상이 확연히 구분되고 있으며, 이로부터 두 빙체의 경계부를 확인할 수 있었다.

F 영역은 소규모의 빙봉으로 LOS 방향을 향해 3 cm의 아주 작은 움직임을 보이고 있어, 빙봉이 비교적 안정적임을 추정할 수 있다. 빙봉의 표면에는 원형의 모양으로 LOS 방향에서 멀어지는 변위가 다수 관찰된다. 이는 diff-pair와 topo-pair 간섭도에서 모두 변위에 의

한 원형의 간섭띠로 관찰되는 것으로 해산(sea mount)에 의한 빙봉의 변형일 가능성이 높으나, 이 부분의 정확한 변위량과 변위의 특성 해석은 향후 보다 많은 영상 자료를 통해 규명할 필요가 있다.

5. 결론

서남극 아문젠 해의 Canisteo 반도와 그 주변 지역의 변화를 관찰하기 위하여 ERS-1/2 tandem pair 영상에 4-pass DInSAR 기법을 적용하였고, 위상차분간섭도로부터 절대위상복원 작업을 수행하여 LOS 방향으로의 변위를 추출하였다. 육지에 연결된 정착빙은 맞닿아 있는 빙하의 운동 방향과 같은 방향의 변위를 나타냈다. 정착빙의 가장자리에 위치한 해빙은 해류에 의한 영향으로 정착빙과 상반되는 변위를 나타냈으며, 이로부터 SAR 영상에서 구분이 어려운 해빙의 유형과 경계를 확인할 수 있었다. 빙봉과 빙상의 경계는 SAR 영상과 간섭도에서 확인할 수 없었으나, 변위도에서 표면 변위가 큰 빙봉과 변위가 거의 없는 빙상이 쉽게 구분되었다.

본 논문에서는 DInSAR 기법을 적용하여 기존의 SAR 영상에서 구분이 어려운 해빙의 유형과 경계, 빙봉과 빙상의 경계를 구분할 수 있었고, 빙하와 해빙의 운동관계를 해석할 수 있었다. 향후 지속적으로 고해상도 광학 및 SAR 자료의 축적, 빙하와 해빙 사이의 운동학적 관계 해석을 위한 수치 모델링, 그리고 해빙에서 발생한 변위의 영향인자 해석을 위한 조위 모델링이 수행된다면 보다 명확한 극빙의 변위 해석이 가능할 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(No.2010-0009465)과 한국해양연구원 부설 극지연구소의 장보고 과학기지 주변 빙권과 지각권의 상호 작용 규명: David Glacier 종합 관측망 구축 및 빙하 진화 연구(과제번호: PE11070)의 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 윤근원, 김상완, 민경덕, 원중선, 2001. DEM 정밀도 향상을 위한 2-pass DInSAR 기법의 적용, 대한원격탐사학회지, 17(3): 231-242.
- 한향선, 이훈열, 2007. 북극의 KOMPSAT-1 EOC 영상과 SSM/I NASA Team 해빙 면적비의 비교 연구, 대한원격탐사학회지, 23(6): 507-520.
- Chini, M., S. Atzori, E. Trasatti, C. Bignami, C. Kyriakopoulos, C. Tolomei, and S. Stramondo, 2010. The May 12, 2008, (Mw 7.9) Sichuan earthquake (China): Multiframed ALOS-PALSAR DInSAR analysis of coseismic deformation, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 7(2): 266-270.
- Goldstein, R.M., H.A. Zebker, and C.L. Werner, 1988. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping, *Radio Science*, 23(4): 713-720.
- Hayakawa, Y.S., T. Oguchi, and Z. Lin, 2008. Comparison of new and existing global digital elevation models: ASTER G-DEM and SRTM-3, *Geophysical Research Letters*, 35, L17404, doi:10.1029/2008GL035036.
- Howat, I.M., I. Joughin, and T.A. Scambos, 2007. Rapid changes in ice discharge from Greenland outlet glaciers, *Science*, 315(5818): 1559-1561.
- Jezeq, K.C., 1999. Glaciological properties of the Antarctic ice sheet from Radarsat-1 synthetic aperture radar imagery, *Annals of Glaciology*, 29: 286-290.
- Jezeq, K.C., H. Liu, Z. Zhao, and B. Li, 1999. Improving a digital elevation model of Antarctica using radar remote sensing data and GIS techniques, *Polar Geography*, 23(3): 185-200.
- Jiang, L., H. Lin, J. Ma, B. Kong, and Y. Wang, 2011. Potential of small-baseline SAR interferometry for monitoring land subsidence related to underground coal fires: Wuda (Northern China) case study, *Remote Sensing of Environment*, 115(2): 257-268.
- Kenyi, L.W. and V. Kaufmann, 2003. Estimation of rock glacier surface deformation using SAR interferometry data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6): 1512-1515.
- Kwoun, O., S. Baek, H. Lee, H. Sohn, U. Han, and C.K. Shum, 2005. Topography, vertical and horizontal deformation in the Sulzberger ice shelf, West Antarctica using InSAR, *Korean Journal of Remote Sensing*, 21(1): 73-81.
- Liu, H., C.K. Jezeq, and B. Li, 1999. Development of an Antarctic digital elevation model by integrating cartographic and remotely sensed data: A geographic information system based approach, *Journal of Geophysical Research*, 104(B10): 23199-23213.
- Massonnet, D., M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl, and T. Rabaute, 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, 364(8): 138-142.
- Moholdt, G., C. Nurth, J.O. Hagen, and J. Kohler, 2010. Recent elevation changes of Svalbard glaciers derived from ICESat laser altimetry, *Remote Sensing of Environment*, 114(11): 2756-2767.
- Pavez, A., D. Remy, S. Bonvalot, M. Diament, G. Gabalda, J-L. Froger, P. Julien, D. Legrand, and D. Moisset, 2006. Insight into ground deformations at Lascar volcano (Chile) from SAR interferometry, photogrammetry and GPS data: Implications on volcano dynamics and future space monitoring, *Remote Sensing of Environment*, 100(3): 307-320.
- Pipia, L., X. Fabregas, A. Aguasca, C. López-Martínez, S. Duque, J.J. Mallorquí, and J. Marturiá, 2009. Polarimetric differential SAR interferometry: First results with ground-based measurements, *IEEE Geoscience and*

- Remote Sensing Letters*, 6(1): 167-171.
- Rignot, E., 1998. Fast recession of a West Antarctic glacier, *Science*, 281(5376): 549-551.
- Rignot, E., 2002. Ice-shelf changes in Pine Island Bay, Antarctica, 1947-2000, *Journal of Glaciology*, 48(161): 247-256.
- Rignot, E., 2008. Changes in West Antarctic ice stream dynamics observed with ALOS PALSAR data, *Geophysical Research Letters*, 35, L12505, doi:10.1029/2008GL033365.
- Rignot, E., D.G. Vaughan, M. Schmeltz, T. Dupont, and D. MacAyeal, 2002. Acceleration of Pine Island and Thwaites glaciers, West Antarctica, *Annals of Glaciology*, 34(1): 189-194.
- Rignot, E., G. Casassa, S. Gogineni, P. Kanagaratnam, W. Krabill, H. Pritchard, A. Rivera, R. Thomas, J. Turner, and D. Vaughan, 2005. Recent ice loss from the Fleming and other glaciers, Wordie Bay, West Antarctic Peninsula, *Geophysical Research Letters*, 32, L07502, doi: 10.1029/2004GL021947.
- Slobbe, D.C., R.C. Lindenbergh, and P. Ditmar, 2008. Estimation of volume change rates of Greenland's ice sheet from ICESat data using overlapping footprints, *Remote Sensing of Environment*, 112(12): 4204-4213.
- Stramondo, S., M. Chini, C. Bignami, S. Salvi, and S. Atzori, 2011. X-, C-, and L-band DInSAR investigation of the April 6, 2009, Abruzzi earthquake, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(1): 49-53.
- Strozzi, T., G.H. Gudmundsson, U. Wegmüller, 2002. Estimation of the surface displacement of Swiss alpine glaciers using satellite radar interferometry, *Proc. of EARSeL-LISSIG-Workshop Observing our Cryosphere from Space*, Bern, Mar. 11-Mar. 13, EARSeL eProceedings no. 2, pp. 3-7.
- Thomas, R., E. Rignot, G. Casassa, P. Kanagaratnam, C. Acuna, T. Akins, H. Brecher, E. Federick, P. Gogineni, W. Krabill, S. Manizade, H. Ramamoorthy, A. Rivera, R. Russell, J. Sonntag, R. Swift, J. Yungel, and J. Zwally, 2004. Accelerated sea-level rise from West Antarctica, *Science*, 306(5694): 255-258.
- Tomás, R., Y. Márquez, J.M. Lopez-Sanchez, J. Delgado, P. Blanco, J.J. Mallorquí, M. Martínez, G. Herrera, and J. Mulas, 2005. Mapping ground subsidence induced by aquifer overexploitation using advanced differential SAR interferometry: Vega Media of the Segura River (SE Spain) case study, *Remote Sensing of Environment*, 98(2): 269-283.
- Yen, J., K. Chen, C. Chang, and W. Boerner, 2008. Evaluation of earthquake potential and surface deformation by differential interferometry, *Remote Sensing of Environment*, 112(3): 782-795.
- Zebker, H.A., P.A. Rosen, R.M. Goldstein, A. Gabriel, and C.L. Werner, 1994. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake, *Journal of Geophysical Research*, 99(B10): 19617-19634.