4-Pass DInSAR를 이용한 서남극 Canisteo 반도 주변 빙하, 해빙, 빙붕의 표면 변위 관측

한향선, 이훈열
강원대학교 지구물리학과
hyangsun@kangwon.ac.kr, hoonyol@kangwon.ac.kr

Observation of Surface Displacements on Glaciers, Sea Ice, and Ice Shelves Around Canisteo Peninsula, West Antarctica Using 4-Pass DInSAR

Hyangsun Han and Hoonyol Lee
Department of Geophysics, Kangwon National University

Abstract : 서남극 빙상의 감소 속도는 급격히 가속화되고 있으며, 전 지구적 해수면 상승과 기후변화 예측을 위해 이 지역에 대한 지속적인 관찰이 요구되고 있다. 본 연구에서는 서남극 Canisteo 반도와 주변 지역이 촬영된 2쌍의 ERS-1/2 tandem pair에 4-pass 위상차분간섭기법을 적용하여 위상차분간섭도를 생성하였고, 빙하와 해빙, 그리고 빙붕의 표면 변화를 관찰하였다. 위상차분간섭도에서 센서 방향으로의 변위를 추출한 결과 해안 빙하와 그에 인접한 정착빙은 같은 방향의 움직임을 나타냈다. 특히 빙하와 맞닿은 부분의 정착빙은 그 움직임이 다른 부분에 비해 컸는데, 이는 빙하의 하강 및 유실이 해빙에 영향을 끼치는 것으로 판단된다. 정착빙의 가장자리에 위치한 해빙은 해류의 영향에 기인하는 움직임을 보였으며, 이 해빙의 유형이 부빙 또는 유빙임을 알 수 있었다. 반도 양옆에 위치한 빙붕은 모두 센서 방향으로의 움직임을 보였으나 그 크기에서 차이를 나타냈다. 빙붕의 표면에서는 원형의 국부적 함몰이 다수 관찰되었는데, 이는 남극저층수의 적은 유입으로 인해 형성된 melt pond로 추정된다.

1. 서론

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 Greenland의 빙하 감소와 함께 해수면 상승의 주요 원인이 되고 있다(Thomas *et al.*, 2004). 따라서 지구 환경의 미래 예측을 위해 서남극 빙상의 지속적인 관측이 요구되고 있다.

Rignot(2008)은 ALOS PALSAR 자료에

SAR 위상간섭기법(SAR Interferometry, InSAR)을 적용하여 Pine Island 빙하와 Thwaites 빙하, 그리고 Smith 빙하를 관찰하였다. 빙하의 표면 이동을 연구한 결과 빙하의 감소 속도가 매우 빠르다는 것을 밝혀냈다. 이러한 얼음의 유실은 전 세계 해수면을 매년 0.08 mm 상승시키는 원인이 된다(Rignot *et al.*, 2002). 또한 빙상의 가장자리를 감싸고 있는 빙붕의 두께도 급격히 얇아지고 있음이 SAR 위상간섭기법(Shepherd *et al.*, 2001)과 해수순환 모델링(Payne *et al.*, 2004)을 통한 결과로부터 드러나고 있다.

위상간섭기법은 동일한 연구지역에서 획득된 2장 이상의 SAR 영상으로부터 위상의 차이를 구하고, 지표의 고도 및 표면의 변화를 측정하는 기법이다. 위상차분간섭기법(Differential InSAR, DInSAR)은 하나의 간섭도(interferogram)로부터 DEM 또는 고도에 의한 위상이 뚜렷한 간섭도를 이용하여 고도효과를 제거하고, 표면의 변화만을 추출하는 기법이다. 위상차분간섭기법은 지진 및 화산에 의한 지표면 변화와 지반침하 등에 많이 사용되고 있으며, 빙하와 빙붕의 움직임을 관찰하는데도 매우 유용한 방법이다(Han and Lee, 2008). 서남극 빙상의 관찰에도 DInSAR 기법이 국제적으로 많이 활용되고 있다. 그러나 국내에서는 Kwoun *et al.*(2005)과 Han and Lee(2008)의 연구가 유이하다.

본 연구에서는 서남극 Canisteo 반도와 그 주변지역이 촬영된 2쌍의 ERS-1/2 tandem pair 영상을 이용하였다. 빙하와 해빙, 빙붕 표면의 움직임을 관찰하기 위해 4-pass 위상차분간섭기법을 수행하였고, 생성된 위상차분간섭도로부터 표면의 변위를 추출하였다. 이로부터 빙하와 해빙의 움직임을 해석하고, 빙붕 표면의 변화와 그 원인을 분석하였다.

2. 연구지역 및 연구자료

연구지역인 Canisteo 반도는 길이와 폭이 각각 48 km, 32 km로 아문젠 해(Amundsen Sea)와 닿아 있고 바로 옆에 서남극 최대 규모인 Pine Island 빙하가 위치한다(Fig. 1). 이 지역의 표면은 항상 눈과 얼음으로 덮여 있으며, 지반이 노출된 곳은 반도 주변의 섬들 중 일부에 국한된다. 이 지역의 바다는 겨울에 다양한 유형의 해빙으로 덮이지만 여름철 대부분은 open water의 상태가 유지된다.

본 연구에 사용된 ERS-1/2 tandem pair 영상은 각각 1995년 10월 21일과 22일, 1996년 3월 9일과 10일에 획득되었다(Table 1). 남극의 10월은 눈과 얼음이 서서히 녹기 시작하는 봄철에 해당하고 3월은 해빙이 모두 녹는 여름철에 해당한다.

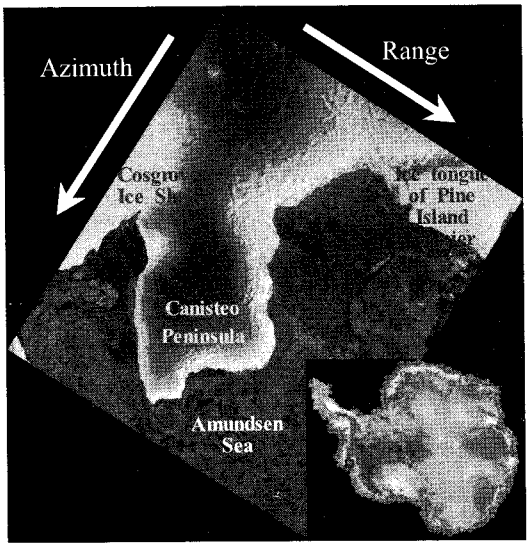

Fig. 1. Geocoded ERS-1 SAR image of the study area obtained on October 21, 1995 (small red box on the left lower image, 100 km × 100 km). Canisteo Peninsula is located in the West Antarctica.

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

Track	Orbit (ERS-1/2)	Date	*B_{perp} (m)	*Ha (m)
278	22310/ 2237	95/10/21 95/10/22	40.0	243.2
	24314/ 4641	96/03/09 96/03/10	152.4	63.9

*B_{perp}: perpendicular baseline

*Ha: height ambiguity

Fig. 1은 1995년 10월 21일에 획득된 영상으로 반도의 인근 바다에 표면이 부드러운 정착빙이 넓게 분포하고 있다. 반도로부터 먼 바다에는 다양한 크기의 유빙과 부빙이 위치하고 있고, 양 옆으로는 표면이 상대적으로 밝은 빙붕이 존재하고 있다. 반도 우측의 빙붕이 Pine Island 빙하의 끝 부분(ice tongue)에 해당하는 빙붕이며, 좌측은 Cosgrove 빙붕이다.

3. 위상간섭기법의 적용 및 간섭도 생성

위상차분간섭기법 중 가장 많이 쓰이는 방법은 연구지역의 간섭도와 정확한 DEM이 요구되는 2-pass DInSAR 기법이다. 남극의 경우 RAMP(Radarsat-1 Mapping Project) DEM이 최적의 해상도를 가지고 있다(Kwoun *et al.*, 2005). 그러나 해안지역에서 약 400 m의 수평 해상도를 가지며(Liu *et al.*, 1999), 기하학적 왜곡이 존재하기 때문에 본 연구에서 2-pass DInSAR의 적용은 부적절하다.

본 연구에서는 연구지역의 DEM 없이 수행할 수 있는 4-pass DInSAR 기법을 적용하였다. 4-pass DInSAR 기법은 2개의 간섭도를 사용하는데, 표면 변화에 의한 위상을 나타내는 간섭도(diff-pair)로부터 고도에 의한 위상만을 나타내는 다른 간섭도(topo-pair)를 차분하는 방법이다.

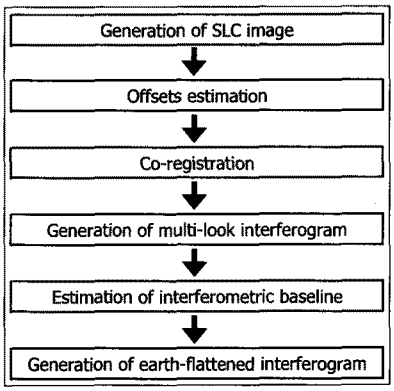

Fig. 2. Flow chart of the interferogram generation.

2쌍의 ERS-1/2 tandem pair로부터 간섭도를 생성하기 위해 Fig. 2와 같은 자료처리 과정을 거쳤으며, 두 pair 모두 긴밀도가 잘 유지되어 간섭도를 생성할 수 있었다. 1995년 10월에 획득된 pair의 기선거리(baseline)는 약 40 m로 매우 짧으며, 한 fringe가 나타내는 고도의 변화량(height ambiguity)은 약 243 m이다. 이 pair는 눈과 얼음이 녹기 시작하는 봄철에 해당하고, 기선거리와 height ambiguity가 표면의 변화를 잘 나타낼 수 있는 조건이다. 따라서 이 pair를 diff-pair로 선정하였다. 1996년 3월에 획득된 pair는 표면의 변화가 심한 여름철에 획득되었으나 기선거리와 height ambiguity가 각각 약 152 m와 64 m이기 때문에 topo-pair로 사용할 수 있었다.

Fig. 3은 각각 diff-pair와 topo-pair로부터 생성된 간섭도이며, 지구타원체에 의한 영향이 제거된 것이다. Diff-pair 간섭도(Fig. 3a)에서 빙하와 정착빙 표면의 fringe가 관찰되며, 정착빙의 가장자리에서도 다수의 fringe가 뚜렷이 나타난다. 빙붕

의 표면에서는 원형의 fringe가 다수 관찰된다. 일부 해빙에서는 fringe가 관찰되지 않는데, 이는 일변화가 심한 유빙과 부빙인 것으로 보인다. Topo-pair 간섭도(Fig. 3b)에서는 고도에 의한 fringe가 잘 나타나고 있으나, 여름철이기 때문에 변화에 의한 것으로 추측되는 fringe도 일부 관찰되고 있다.

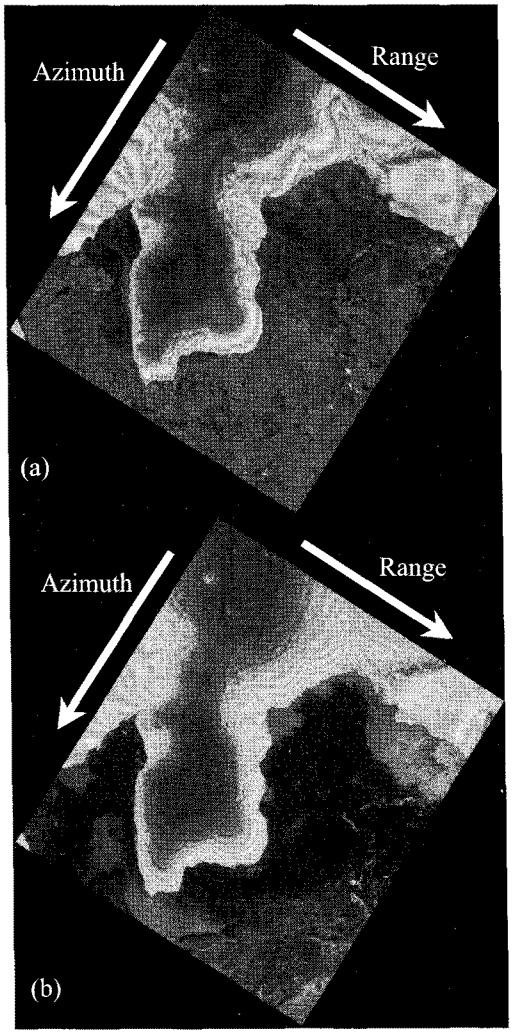

Fig. 3. The earth-flattened interferograms extracted from diff-pair (a) and topo-pair (b). (a) shows the phase by deformation on glaciers, sea ice, and ice shelves whereas (b) shows topographic phase with little displacement phase.

4. 위상차분간섭도를 이용한 표면 변위 해석

Diff-pair와 topo-pair의 간섭도를 이용하여 4-pass DInSAR를 수행하였고, 지구 타원체에 의한 효과가 제거된 위상차분간섭도를 생성하였다(Fig. 4a). 고도에 의한 위상은 대부분 제거되었고, 표면 변화에 의한 fringe만이 관찰된다. 변화의 크기와 방향성을 추정하기 위해 branch-cut 알고리즘(Goldstein *et al.*, 1988)을 이용하여 절대위상복원(phase unwrapping) 작업을 수행하였고, LOS(line of sight) 방향으로의 변위를 구하였다(Fig. 4b).

Fig. 4b에서 A부터 F까지 영역을 나누어 표면의 변위를 해석하였다. 각각의 영역에서 흰색 화살표는 LOS 방향, 빨간색 화살표는 LOS에서 멀어지는 방향이며, 화살표의 크기는 변위의 상대적인 크기를 의미한다. A-1, 2의 빙하는 LOS 방향으로 이동하였으며, 빙하와 마주하는 해빙도 같은 방향으로 움직였다. 이는 빙하가 하강하면서 육지와 연결된 정착빙을 밀어내기 때문이다. 특히 정착빙에서도 빙하와 직접 연결된 부분만 큰 움직임을 보였다. 반면에 빙하와 맞닿지 않은 정착빙(B)은 빙하의 운동에 덜 반응하여 LOS 방향으로 작은 움직임을 나타냈다. C-1, 2는 정착빙의 가장자리 부분으로 해빙은 정착빙과 반대로 LOS 방향에서 멀어지는 운동을 한다. 이는 해류의 영향에 의한 운동이며, 해빙은 유빙 또는 부빙임을 알 수 있다.

D에서 빙하와 해빙은 모두 LOS 방향에서 멀어지고 있으며, 이 영역의 해빙을 정착빙으로 판단할 수 있다. E와 F는 빙붕

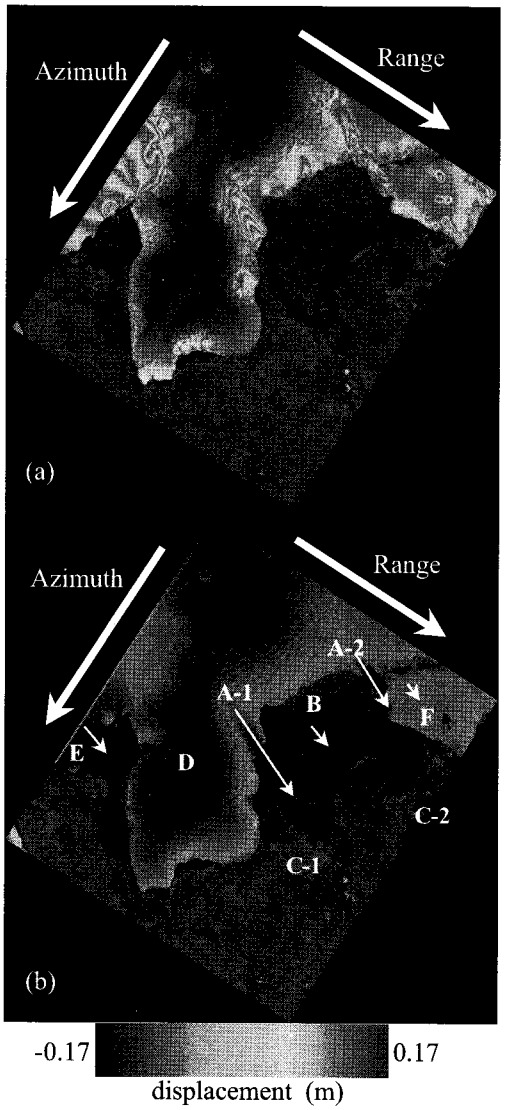

Fig. 4. (a) The earth-flattened differential interferogram of the study area. (b) The map of displacement toward the line of sight extracted from phase unwrapped differential interferogram.

으로 모두 LOS 방향으로 움직이고 있다. Cosgrove 빙붕에 해당하는 E는 F에 비해 움직임이 매우 크며, 이는 인접한 해빙도 같은 방향으로 이동시키고 있다.

Pine Island 빙하의 끝 부분인 F는 전체적으로 LOS 방향을 향해 미세한 움직임을 보인다. 그러나 표면에는 원형의 모양으로 LOS 방향에서 멀어지는 움직임이 다수 보이고 있다. 원형의 움직임이 관찰되는 지역은 빙붕의 표면이 국부적으로 함몰된 지역으로 판단되며, 수직 변위로 가정할 경우 최대 5 cm가 함몰된 것으로 나타났다. Thoma *et al.*(2008)에 의하면 저온의 남극저층수 유입이 적을 경우 해수의 온도가 높아지고 부유하는 얼음과 눈의 감소가 빨라지는데, 아문젠 해의 경우 1980년대와 1990년대에 남극저층수의 유입이 적었고 Pine Island 빙하의 감소 속도가 가속화되었다. 이와 관련하여 분석해 보면 함몰된 부분은 melt pond로 추정할 수 있다. Melt pond는 해수면과 닿아 있는 빙붕의 바닥 또는 표면의 높은 온도로 인해 형성되고 물의 배수로 역할을 하는 것으로, 빙붕의 붕괴 원인이 된다.

5. 결론

서남극 Canisteo 반도와 주변지역의 변화를 관찰하기 위해 ERS-1/2 tandem pair 영상에 4-pass DInSAR 기법을 적용하였고, 위상차분간섭도로부터 빙하와 해빙, 빙붕의 표면 변위를 추출하였다. 육지에 연결된 정착빙은 빙하의 하강에 반응하여 빙하와 같은 방향으로 이동하였다. 정착빙의 가장자리에 위치한 해빙은 정착빙과 상반되는 움직임을 보이며, 해류의 영향을 받는 유빙 또는 부빙으로 판단할 수 있다. Cosgrove 빙붕은 매우 급격하게 움직이는 것을 확인할 수 있었고, Pine Island 빙하의 끝에 위치한 빙붕의 경우 전체적인 움직임은 작지만 붕괴의 전초가 되는 표면의 함몰이 발견되었다.

SAR 위상간섭기법을 적용하여 기존의 SAR 영상에서 구분이 어려운 해빙의 유

형과 이동을 비교적 명확히 구분할 수 있었고, 빙하와 해빙의 운동관계를 해석할 수 있었다. 또한 빙붕의 움직임을 확인하고 빙붕 표면의 함몰을 규명함으로써 빙붕의 안정성을 진단할 수 있었다. 향후 고해상도 광학위성인 KOMPSAT-2, 3와 X-band SAR를 탑재한 KOMPSAT-5를 통해 지속적으로 자료가 축적되고, 운동해석을 위한 다양한 모델링이 수행될 수 있다면 보다 경쟁력 있는 연구결과가 도출될 것으로 기대된다.

참고문헌

Goldstein, R. M., Zebker, H. A., and Werner, C. L., 1988. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping, *Radio Science*, 23(4): 713-720.

Han, H., and Lee, H., 2008. Motion of glaciers, sea ice, and ice shelves in Canisteo Peninsula, West Antarctica observed by 4-pass differential interferometric SAR technique, *Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing (ISRS) 2008*, 29~31 Oct., Daejeon, Korea.

Kwoun, O., Baek, S., Lee, H., Sohn, H., Han, S., and Shum, C. K., 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., Jezek, C. K., and Li, B., 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): 23,199-23,213.

Payne, A. J., Vieli, A., Shepherd, A. P., Wingham, D. J., and Rignot, E., 2004. Recent dramatic thinning of largest West Antarctic ice stream triggered by oceans, *Geophysical Research Letters*, 31(23): L23401, doi: 10.1029/2004GL021284.

Rignot, E., 2008. Changes in West Antarctic ice stream dynamics observed with ALOS PALSAR data, *Geophysical Research Letters*, 35(12): L12505, doi: 10.1029/2008GL033365.

Rignot, E., Vaughan, D. G., Schmeltz, M., Dupont, T., and MacAyeal, D. 2002. Acceleration of Pine Island and Thwaites Glaciers, West Antarctica, *Annals of Glaciology*, 34: 189-194.

Shepherd, A., Wingham, D. J., Mansley, J. A. D., and Corr, H. F. J., 2001. Inland thinning of Pine Island Glacier, West Antarctica, *Science*, 291(5505): 862-864.

Thoma, M., Jenkins, A., Holland, D., and Jacobs, S., 2008. Modelling Circumpolar Deep Water intrusions on the Amundsen Sea continental shelf, Antarctica, *Geophysical Research Letters*, 35(18): L18602, doi: 10.1029/2008GL034939

Thomas, R., Rignot, E., Casassa, G., Kanagaratnam, P., Acuna, C., Akins, T., Brecher, H., Federick, E., Gogineni, P., Krabill, W., Manizade, S., Ramamoorthy, H., Rivera, A., Russell, R., Sonntag, J., Swift, R., Yungel, J., and Zwally, J., 2004. Accelerated sea-level rise from West Antarctica, *Science*, 306(5694): 255-258.