

Article

TerraSAR-X 위성레이더 오프셋 트래킹 기법을 활용한 스발바르 Uvêrsbreen 빙하의 2차원 속도 관측

백원경*, 정형섭 , 채성호*, 이원진 **†

*서울시립대학교 공간정보공학과, **기상청 지진화산국 지진화산연구과

Two-dimensional Velocity Measurements of Uvêrsbreen Glacier in Svalbard Using TerraSAR-X Offset Tracking Approach

Won-Kyung Baek*, Hyung-Sup Jung , Sung-Ho Chae* and Won-Jin Lee **†

*Department of Geoinformatics, University of Seoul

**Earthquake and Volcano Research Division, Earthquake and Volcano Bureau, Korea Meteorological Administration (KMA)

Abstract : Global interest in climate change and sea level rise has led to active research on the velocities of glaciers. In studies about the velocity of glaciers, in-situ measurements can obtain the most accurate data but have limitations to acquire periodical or long-term data. Offset tracking using SAR is actively being used as an alternative of in-situ measurements. Offset tracking has a limitation in that the accuracy of observation is lower than that of other observational techniques, but it has been improved by recent studies. Recent studies in the Uvêrsbreen glacier area have shown that glacier altitudes decrease at a rate of 1.5 m/year. The glacier displacement velocities in this region are heavily influenced by climate change and can be important in monitoring and forecasting long-term climate change. However, there are few concrete examples of research in this area. In this study, we applied the improved offset tracking method to observe the two-dimensional velocity in the Uvêrsbreen glacier. As a result, it was confirmed that the glacier moved at a maximum rate of 133.7 m/year. The measurement precisions for azimuth and line-of-sight directions were 5.4 and 3.3 m/year respectively. These results will be utilized to study long-term changes in elevation of glaciers and to study environmental impacts due to climate change.

Key Words : Uvêrsbreen glacier, offset tracking, two-dimensional velocity measurement

요약 : 전 지구적으로 기후 변화와 해수면상승에 대한 관심이 집중되면서 빙하의 변위 속도에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 빙하의 속도와 관련된 연구에서 현장관측 방법이 가장 정확한 데이터를 취득할 수 있으나 데이터 취득의 어려움으로 위성레이더를 활용한 오프셋 트래킹 기법이 활발하게 활용되고 있다. 오프셋 트래킹은 관측 정밀도가 위상 기반의 지표변위 관측 기법(위성레이더 간섭기법, 위성레이더 다중개구간섭기법)에

Received March 13, 2018; Revised April 1, 2018; Accepted April 5, 2018; Published online June 6, 2018

† Corresponding Author: Won-Jin Lee (wjleeleo@korea.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.

비하여 떨어지는 한계가 존재하였으나 최근 연구에 의하여 개선되었다. Uvërsbreen 빙하 지역은 최근 연구에 의하여 1.5 m/year의 속도로 빙하의 고도가 저하된다는 사실이 밝혀졌다. 그만큼 이 지역은 빙하 변위 속도는 기후 변화에 큰 영향을 받고 있으며 장기적인 기후변화를 관측하고 예측하는 데에 중요하게 활용될 수 있다. 하지만 이 지역에 대한 구체적인 연구 사례는 거의 존재하지 않는다. 본 연구에서는 개선된 위성레이더 오프셋 트래킹 기법을 활용하여 Uvërsbreen 지역의 2차원 변위 속도를 관측하였다. 그 결과 연간 최대 133.7 m/year의 속도로 빙하가 이동하는 것이 확인되었다. 관측 정밀도는 아지무스 방향과 레인지 방향에 대하여 각각 5.4 그리고 3.3 m/year이었다. 이 결과는 장기적인 빙하의 고도 변화에 관한 연구 그리고 기후 변화에 따른 환경 영향 평가 연구에 활용될 것이다.

1. 서론

최근 전 지구적으로 기후 변화에 따른 환경 변화에 주목하고 있다. 지구온난화는 기후 변화의 한 예로 극지방과 고산 지역 빙하 용빙에 직접적인 영향을 미치고 있다. 빙하의 용빙은 해수면 상승의 주된 원인으로 여겨지고 있다. 이와 관련하여 빙하의 부피 측정에 관한 연구가 지속적으로 진행되어 왔다(McNabb *et al.*, 2012). 최근 빙하의 이동 속도를 바탕으로 빙하의 두께와 부피를 산출해내는 기술이 제안되었다(McNabb *et al.*, 2012). 이 때문에 빙하의 변위 속도는 기후 변화에 의한 지구 환경 변화 영향을 분석하는 데에 굉장히 중요한 요소이다. 위성항법장치(Global Navigation Satellite System) 혹은 데오들라이트와 같은 현장 관측 방법은 매우 정밀하게 빙하 변위 속도를 관측할 수 있으나, 해당 지역에 대하여 접근이 어려워 정기적인 관측에 한계가 존재한다(Chae *et al.*, 2017; Nuth, 2007).

한편, 위성 레이더를 활용하여 빙하의 변위를 관측하는 기술이 적용되어 왔다. 이 기법은 위성의 궤도에 따른 정기적인 관측이 가능할 뿐만 아니라, 공간적으로 넓은 지역에 대한 빙하 속도를 동시에 관측할 수 있는 장점이 존재한다. 위성 레이더를 활용한 변위 관측에 가장 활발하게 활용되는 기술은 위성레이더 간섭기법(InSAR; SAR Interferometry)이다. 위성레이더 간섭기법은 넓은 지역에 대한 상대 지표 변위를 cm 미만의 정밀도로 관측할 수 있는 유일한 기술로 다양한 연구 지역에 대하여 적용되어 왔다. 하지만 위성레이더 간섭기법은 빙하와 같이 변위의 속도가 빠른 지역에 대해서는 비상관화(decorrelate)되어 관측이 어려운 한계가 존재한다(Hu *et al.*, 2014). 때문에 시간 기선이 짧은 tandem 자료

에 대하여 제한적으로 적용되었다(Mattar *et al.*, 1998). 뿐만 아니라 레인지(LOS; Line-of-Sight) 방향의 지표변위만을 관측할 수 있는 한계가 존재하여, 빙하의 실제 속도를 관측하는 데에는 한계가 존재한다.

반면에 오프셋 트래킹 기법의 경우 강도교차상관기법에 의하여 직접적인 변위를 계산하기 때문에 빙하 지역의 2차원 속도(LOS, Along-Track)를 관측하는 데에 잘 적용되어 왔다(Strozzi *et al.*, 2002; Nagler *et al.*, 2015; Chae *et al.*, 2017). 하지만 기존의 오프셋 트래킹 기법은 위성레이더 간섭기법에 비하여 정밀도가 크게 떨어지는 한계가 존재한다. 일반적으로 높은 긴밀도 지역에 대하여 약 12~15 cm의 관측 정밀도를 보인다고 알려져 있다(Strozzi *et al.*, 2002; Jonsson *et al.*, 2002; Fialko *et al.*, 2001; Jung *et al.*, 2013a). 보다 자세하게 오프셋 트래킹의 관측 정밀도는 변위 추정 커널의 크기에 대하여 1/20의 수준을 유지한다고 알려져 있다(Strozzi *et al.*, 2002). 따라서 변위 추정 커널의 크기에 따라 관측의 품질이 크게 달라지는 한계가 존재하였다. 변위 추정 커널의 크기가 작을 때에는 미세한 변위를 관측할 수 있으나 긴밀도가 떨어졌으며 변위 추정 커널의 크기가 클 때에는 긴밀도는 잘 유지할 수 있지만 미세한 변위의 관측 측면에서는 한계가 존재하였다. 이와 관련하여 최근 다중변위 커널을 활용한 오프셋 트래킹 기법이 제안되었다(Chae *et al.*, 2017). 그 결과 노이즈 성분이 크게 저감되고 정밀도가 향상되어 GPS 관측치와 비교하였을 때 레인지 방향과 아지무스 방향으로 약 5.92와 6.95 cm의 관측정밀도를 보였다(Chae, 2016).

Uvërsbreen 빙하 지역은 스발바르(Svalbard) 제도 북서쪽에 위치한 Ny-Alesund으로부터 10 km 이내에 존재하는 빙하이다(Nuth, 2007). 이 빙하는 약 20 km의 길이,

최대 4km의 폭으로 형성되어있다. 최근 연구에 따르면 이 빙하 지역은 연간 약 1.8 m의 고도 저하가 관측된 만큼 빙하의 소실량이 매우 큰 지역이다(Nuth, 2007). 그만큼 Uvêrsbreen 빙하 지역은 기후 변화에 큰 영향을 받고 있으며, 이 지역의 빙하 변위 속도를 관측하는 것은 장기적인 기후 변화를 예측하는 데에 중요한 역할을 한다(Nuth, 2007). 해당 지역에 대한 빙하의 2차원 변위 속도 관련 관측은 수행된 바 있으나 기존 오프셋 트래킹 기법이 적용됨에 따라 상관도가 떨어졌다(Luckman, 2014).

본 연구에서는 개선된 위성레이더 오프셋 트래킹 기법을 활용하여 Uvêrsbreen 지역의 2차원 지표변위를 관측하였다. TerraSAR-X로부터 2014년 10월 11일부터 2014년 11월 24일까지 매 11일 마다 촬영된 5장의 영상을 획득하였고, 수직기선과 시간기선을 고려하여 간섭쌍을 선별하여 두 쌍의 간섭쌍에 대하여 아지무스 방향과 레인지 방향의 지표 변위 속도를 획득하였다. 획득한 지표 변위 속도 영상은 스테킹하여 관측 정밀도를 향

상시켰다. 최종적으로 획득된 지표변위 속도는 연간 최대 133.7 m/year 이었으며, 이러한 변위의 크기는 영구 동토층 근처에서 0에 수렴하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결과와 관측 프로세스는 빙하의 고도 변화에 관한 연구 그리고 기후 변화에 따른 환경 영향 평가 연구에 활용될 것이다.

2. 연구지역과 자료

Fig. 1은 연구지역인 Uvêrsbreen 빙하 지역을 나타낸다. Uvêrsbreen 빙하지역은 그린란드의 북동쪽 스발바르(Svalbard) 제도에 위치하고 있으며 78.5°N, 12.3°E에 위치하고 있다. 집수지가 명확하게 생성되어 있는 전형적인 계곡 빙하이다. 빙하의 길이는 20.5 km이며 그 넓이는 약 63.5 km²이다. 빙하 전방은 영구 동토층에 위치하고 있으며 얼음을 포함하고 있는 빙하성 암석물질이

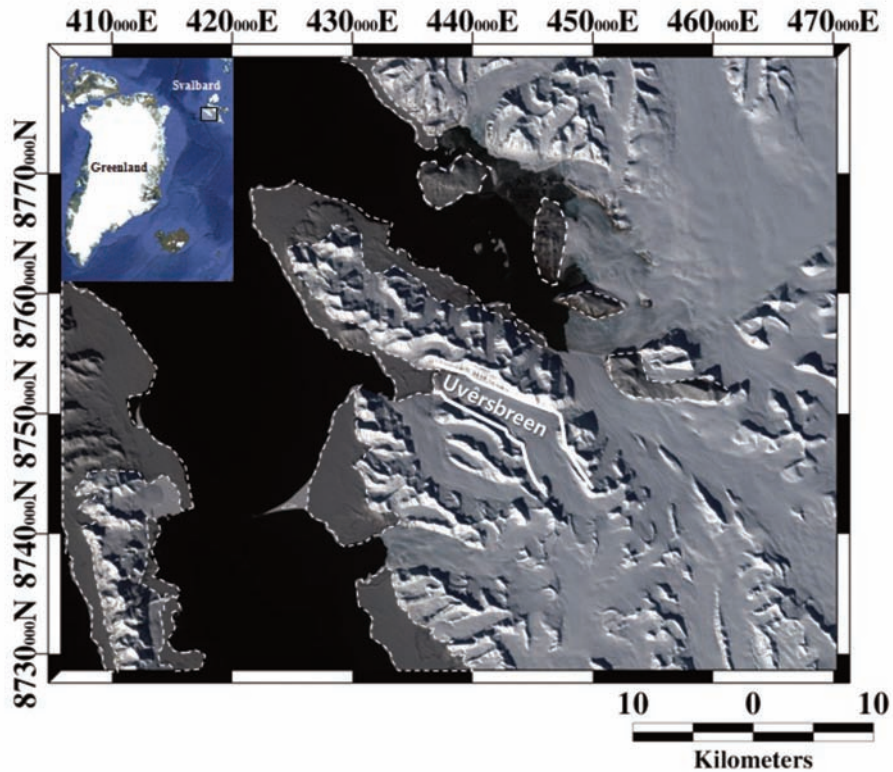


Fig. 1. Study Area, Solid line indicates Uvêrsbreen glacier, Svalbard; white dashed polygons indicate permafrost area (Humlum *et al.*, 2003; Brandt *et al.*, 2007); small scale image captured from Google Earth; and large scale image is from Sentinel-2 RGB image acquired at 20160427.

Table 1. System parameters of TerraSAR-X

Parameter	Value
Effective Azimuth Antenna Dimension (m)	4.8
Effective Doppler Bandwidth (Hz)	2739.24
Pulse Repetition Frequency (Hz)	3688.44
Chirp Bandwidth (MHz)	150
Carrier Frequency (GHz)	9.65
Sampling Frequency (MHz)	164.9
Azimuth Pixel Spacing (m)	1.91
Ground Range Pixel Spacing (m)	1.57

퇴적되어 있다. 이 빙하지역과 관련된 구체적인 자료는 거의 존재하지 않는다(Hamran *et al.*, 1996; Nuth, 2007). 주변의 Comfornlessbreen, Kongsvegen, Kronebreen 등과 같은 다른 빙하에 비하여 빙하 전방이 후퇴하는 양상을 보이지는 않는다(Nuth, 2007; Hamran *et al.*, 1996). 하지만 1920년 이후 계속해서 음의 mass balance 변화를 보이고 있음이 판단되고 있으며 빙하의 고도는 최근 연구에 의하여 약 1.5 m/year의 속도로 계속해서 감소하고 있는 것이 밝혀졌다(Nuth, 2007).

Table 1은 본 연구에서 활용한 TerraSAR-X 영상의 주요 촬영 파라미터를 나타낸다. Stripmap 모드로 촬영된 본 영상은 4.8 m의 아지무스 방향 유효 안테나 폭으로 촬영되었으며 중심주파수는 9.65 GHz로 극지방에서 극심하게 발생하는 이온층에 의한 변이에 대해서는 큰 영향을 받지 않을 것으로 판단된다(Meyer *et al.*, 2006; Jung *et al.*, 2013b; Chae *et al.*, 2017; Lee *et al.*, 2015). 다만 본 연구에서 활용한 영상은 2014년 10월 11일부터 2014년 11월 24일까지 11일 주기로 촬영된 5장의 동일 모드 영상으로 대기 효과에 의하여 발생하는 오차 성분을 충분히 저감하기에는 어려운 한계가 존재한다(Ferretti *et al.*, 2001; Berardino *et al.*, 2002).

3. 연구방법

1) 다중 변위 커널 기반 오프셋 트래킹

오프셋 트래킹 기법은 위성레이더 간섭쌍에 대한 지표변위를 관측하기 위하여 강도교차상관기법을 적용한다. 강도교차 상관계수가 가장 높은 지점을 결정한 후 그 지점에 대한 거리를 직접 계산한다. 이처럼 위성레

이더 간섭기법처럼 지표변위를 관측하는 데에 위상 불구속화 과정을 요구하지 않는다. 이 덕에 변위 속도가 매우 빨라 지표변위를 관측하기 어려운 경우에도 지표변위를 관측할 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점에 의하여 특히 변위의 속도가 빠른 빙하의 변위를 관측하는 데에 널리 활용되었다 (Rott *et al.*, 1998; Strozzi *et al.*, 2002; Gray *et al.*, 2005; Gray, 2011).

오프셋 트래킹 기법의 관측 정밀도는 지표변위를 산출하기 위하여 활용한 커널 해상도에 의하여 결정된다. 이에 따라 오프셋 트래킹 관측 결과의 해상도와 정밀도는 서로 커널 사이즈에 대하여 트레이드오프(Trade-off) 관계를 지니게 된다. 변위 추정 커널의 크기가 클 때 변위 영상의 관측 정밀도는 향상되지만 해상도가 저하된다. 반대로 변위 추정 커널의 크기가 작을 때에는 해상도는 저하되지만 관측 정밀도는 향상된다. 이 때문에 최적 커널을 결정하는 것은 위성레이더 오프셋 트래킹을 활용하여 지표변위를 관측하는 데에 가장 중요한 요소이다. 그런데 이와 관련하여 연구지역의 특성에 따라 최적 커널이 달라져서 경험적으로 최적 커널을 결정할 수 밖에 없었다(Chae, 2016; Baek, 2017).

한편 다중 변위 추정 커널 기반 오프셋 트래킹 기법은 다양한 크기의 변위 추정 커널을 활용하여 각각의 오프셋 트래킹 관측 결과를 산출한다. 각각의 커널에 의하여 관측된 결과는 커널 사이즈에 따라서 다른 특성의 노이즈 성분과 해상도를 가지고 있다. 그 후 얻어진 다중 변위 추정 커널에 대하여 각 픽셀의 관측 결과에 대한 신뢰 구간을 결정한다. 이 때 신뢰 구간에 따른 이상치를 제거한 뒤 평균을냄으로써 최종 지표변위 결과를 생성한다. 그 결과 다중 변위 추정 커널에 존재하는 이상치가 제거됨으로써 관측 정밀도가 향상된다(Chae, 2016; Baek, 2017). 동시에 작은 커널 결과가 가지고 있는 세부적인 지표 변위 성분들이 최종 지표변위 결과에 반영되면서 관측 해상도 역시 개선된다(Chae, 2016).

2) 데이터 처리 절차

빙하지역의 경우 변위속도가 매우 빠르고 영상 촬영 범위에 대하여 넓게 분포되어 있기 때문에 일정 시간 기선 사이의 변위의 양이 큰 경우 두 위성 영상의 정합이 정확하게 이루어지지 않는 어려움이 존재한다. 서로 다른 시기에 촬영된 두 위성레이더 영상의 정합이 잘 이

Table 2. Parameters of interferometric pairs used for this study

No	Acquisition date	Temporal Baseline (days)	Perpendicular Baseline (m)
1	2014101120141022	11	57
2	2014102220141102	11	-118
3	2014110220141113	11	22
4	2014111320141124	11	113

루어지지 않을 시에 관측된 변위 영상은 쉽게 비상관화될 수 있으며 궤도 오차, 지형 오차 등이 추가적으로 발생하여 위성레이더의 정합과정은 굉장히 중요하다. 본 연구에서는 큰 변위에 의한 정합의 오차를 최소화하기 위하여 획득된 5장의 위성레이더 영상에 대하여 11일의 시간 기선에 대한 간섭쌍을 활용했다. Table 2는 11일의 시간 기선을 가진 위성레이더 간섭쌍의 목록과 해당 간섭쌍의 수직 기선이다. 11일의 시간기선을 가진 위성레이더 간섭쌍은 총 네 쌍이었다.

일반적으로 위성레이더 간섭기법에서 수직기선이 늘어나면 늘어날수록 비상관화가 심해져서 긴밀도가 떨어지는 특성이 존재한다(Zebker and Villasenor, 1992). 오프셋 트래킹 방법에서도 그와 유사하게 수직기선에 대하여 관측 정밀도가 영향을 받게 되는데 그것은 주영상과 부영상에 대하여 강도교차상관기법을 적용할 때에 수직기선이 길어질수록 서로의 관측 기하가 달라져 상관도가 떨어지기 때문이다(Baek, 2017). 이와 같이 오차가 포함된 영상을 활용하여 스테킹을 할 시에 관측 품질을 오히려 저하시킬 수 있다(Jung *et al.*, 2017). 본 연구에서는 이러한 효과를 고려하여 얻어진 4개의 간섭쌍 중에서 수직기선의 길이가 비교적 짧은 20141011_20141022와 20141102_20141113을 활용하여 다중 변위 커널 기반의 위성레이더 오프셋 트래킹 기법을 적용하였다(Chae *et al.*, 2017).

Fig. 2는 본 연구에서 2차원 지표변위를 추출하기 위하여 처리한 전반적인 데이터 처리 과정이다. 위성레이더 영상은 비행방향에 수직하게 촬영을 하게 되는데 촬영 당시의 조건에 의하여 실제로는 약간 틀어진 상태로 촬영한다. 이와 같이 존재하는 squint는 두 영상을 서로 정합하는 데에 악영향을 미친다(Jung *et al.*, 2009). 본 연구에서는 이러한 효과를 저감하기 위하여 우선적으로 각각의 위성레이더 간섭쌍에 대하여 common band

filtering을 적용하였다. 이어서 두 영상에 대하여 강도교차상관기법을 적용하여 정밀하게 정합하였다. 끝이어서 다중 커널 오프셋 트래킹 기법을 적용하였다. 다중 커널 오프셋 트래킹 기법은 크기가 다른 다중 변위 커널로부터 계산한 지표변위 관측치를 활용하여 다중 변위 커널의 평균 변위를 계산하는 기법이다. 이 기법은 변위 커널의 사이즈에 따른 상충관계를 개선하여 관측 정밀도를 향상시키는 장점이 있다(Chae *et al.*, 2017).

영상에 존재하는 스펙클 노이즈를 저감하기 위하여 레인지 방향과 아지무스 방향에 대하여 각각 20의 멀티 룩을 적용하였다. 또한 영상의 사이즈와 멀티룩 수를 고려하여 레인지 방향으로는 1,019, 아지무스 방향으로는 1,659개의 샘플을 설정하여 총 1,690,521개의 샘플에 대하여 강도교차상관기법을 적용하였다(Strozzi *et al.*, 2002; Chae *et al.*, 2017). 이 때 커널의 사이즈를 레인지 방향과 아지무스 방향에 대하여 32×32부터 128×128까지 32

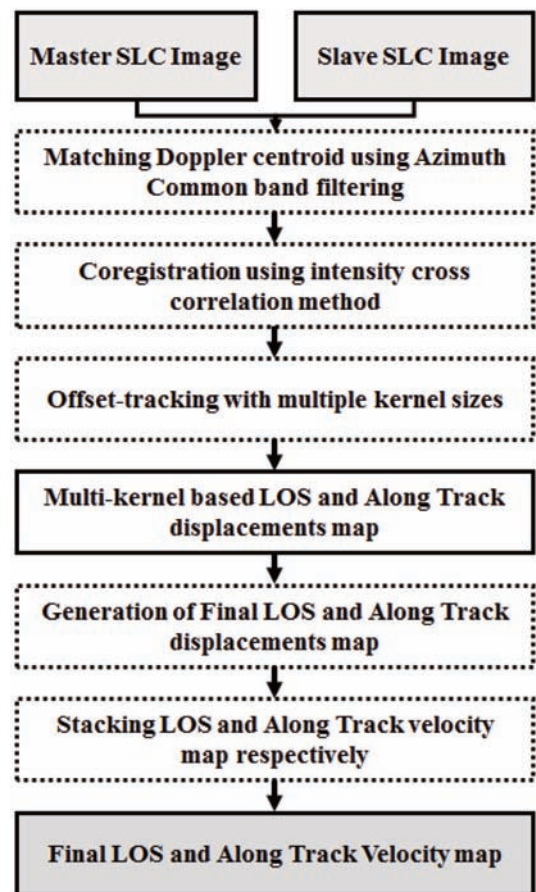


Fig. 2. Detailed work flow in this study.

픽셀의 차이를 각각 두어 총 16개의 서로 다른 커널 사이즈에 대한 오프셋 트래킹 영상을 획득하였다. 그리고 그 결과 얻어진 멀티 커널 영상을 신뢰도 95%에 대한 필터를 적용하여 이상치를 제거하였다. 마지막으로 각 영상에 대하여 존재할 수 있는 오차 성분을 저감하기 위하여 이로서 얻어진 두 시기의 오프셋 트래킹 영상을 서로 스테킹하여 최종적인 레인지 방향과 아지무스 방향의 속도 영상을 획득하였다.

4. 연구결과

Fig. 3은 20141011_20141022의 위성레이더 간섭쌍으로부터 얻어진 오프셋 트래킹 영상이다. 위성의 촬영방향과 비행방향의 지표변위를 관측한 결과이다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(c)는 일반적인 위성레이더 오프셋 트래킹 기법으로 획득한 아지무스 방향과 레인지 방향의 지표변위이며, Fig. 3(b)와 Fig. 3(d)는 다중변위 커널 기반 위성레이더 오프셋 트래킹 기법으로 획득한 아지무스 방향과 레인지 방향의 지표변위이다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(c)의 박스 부분을 확인하여 볼 때 간섭쌍 간의 상관도가 저하되어 관측이 되지 않았다. 반면 다중변위 커널 기반 위성레이더 오프셋 트래킹 기법을 적용한 Fig. 3(b)와 Fig. 3(d)의 경우에는 해당 지역에 대해서도 높은 상관도를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 95%의 신뢰도로 다

중변위 추정 커널의 각 관측 결과의 이상치를 제거하였기 때문에 판단된다.

Fig. 4는 20141102_20141113의 위성레이더 간섭쌍으로부터 얻어진 오프셋 트래킹 영상이다. Fig. 4(a)는 일반적인 오프셋 트래킹 기법을 통하여 얻어진 지표변위 영상이다. 이 관측 영상에서는 아지무스 방향의 줄무늬를 확인할 수 있다. 이 줄무늬는 위성체의 상하 방향의 진동에 의하여 발생한 것으로 각 아지무스 라인에 대한 레인지 방향의 평균값을 활용하여 제거가 가능하다 (Jo *et al.*, 2015b). Fig. 4(b)는 아지무스 방향의 줄무늬를 제거한 다중 커널 기반 오프셋트래킹 기법에 의한 아지무스 방향 지표 변위 관측치이다(Chae *et al.*, 2017). 전체적으로 영상의 긴밀도가 향상된 것을 확인할 수 있으며 특히 하얀색 점선 박스 내부의 빙하 이동 지역에 대해서 더욱 명확한 변위 관측이 가능하였다. Fig. 4(c)와 Fig. 4(d)는 일반적인 오프셋 트래킹 기법과 다중 커널 기반 오프셋 트래킹 기법을 적용한 레인지 방향 지표변위 관측 결과이다(Chae *et al.*, 2017). 레인지 방향에 대한 전체 지역에 대하여 긴밀도가 향상되었으며 관측이 되지 않았던 지역에 대해서도 관측이 가능하였다.

Fig. 5는 Fig. 4의 하얀색 점선 박스 영역을 확대한 그림이다. 기존 관측 기법의 경우에도 지표변위 관측이 가능하였으나 비상관화 되어 관측이 되지 않는 영역이 넓게 분포하였다(Fig. 5(a), (c)). 특히 영상 내 상단 부분은 변위를 관측하는 것이 불가능하였다. 반면 Fig. 5(b)와

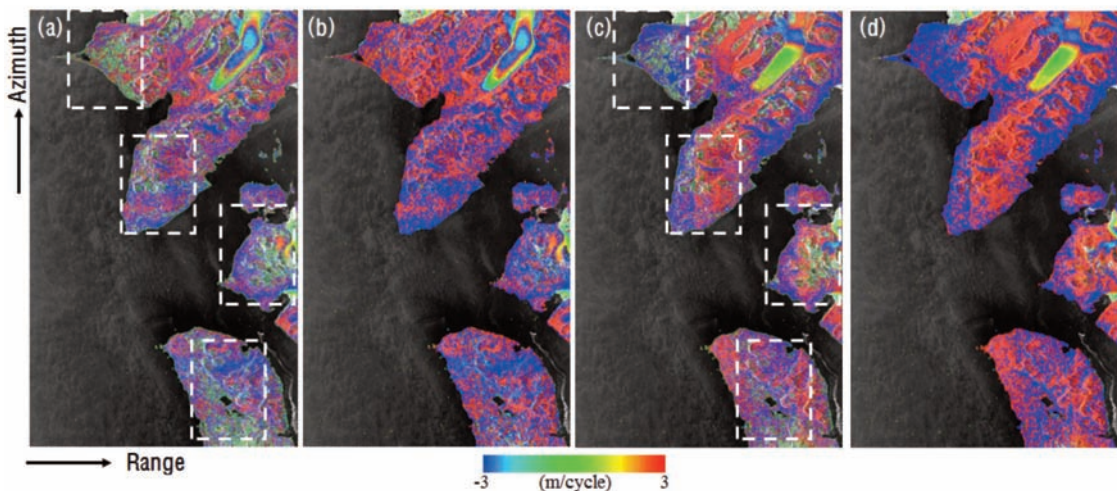


Fig. 3. Azimuth (a, b) and LOS (c, d) displacements measurements of the interferometric pair 20141011_20141022 based on offset tracking methods; (a, c) : Conventional; (b, d) : proposed by (Chae *et al.*, 2017).

Fig. 5(d)의 경우 빙하의 전체 영역에 대하여 노이즈 성분이 크게 저감되었으며 전체 빙하에 대하여 유효한 변위 관측이 가능하였다.

Fig. 6은 다중 커널 오프셋 트래킹에서 관측한 빙하 변위량을 바탕으로 연간 변위 속도를 계산한 빙하 변위 속도맵을 나타낸다. Fig. 6(a), Fig. 6(c)는 각각 20141011_20141022과 20141102_20141113의 간섭쌍에서 획득된 아지무스 방향 빙하 유속 영상이며, Fig. 6(b), Fig. 6(d)는 각각 20141011_20141022과 20141102_20141113의 간섭쌍에서 획득된 레인지 방향 빙하 유속 영상이다. 각각의 변위 맵은 주영상과 부영상이 서로 달라 독립적으로

촬영되었음에도 불구하고 거의 비슷한 수준의 변위 양상을 보이는 것을 확인할 수 있다. 연구지역으로 설정한 Uvêrsbreen 빙하지역에 대하여 아지무스 방향의 변위 속도는 각각 최대 130.2, 139.4 m/year로 산출되었고, 레인지 방향의 변위 속도는 각각 최대 -51.4, -54.4 m/year로 산출되었다. 관측된 변위 영상의 관측 품질을 검증하기 위하여 각각의 변위 속도 영상에 대하여 변위가 발생하지 않는 안정된 지역에 대한 표준편차를 산출하였다(Chae *et al.*, 2017). 그 결과 아지무스 방향과 레인지 방향에 대하여 각각 8.6 그리고 4.9 m/year로 산출되었다. 또한 20141102_20141113의 간섭쌍에 대해서는 아지무

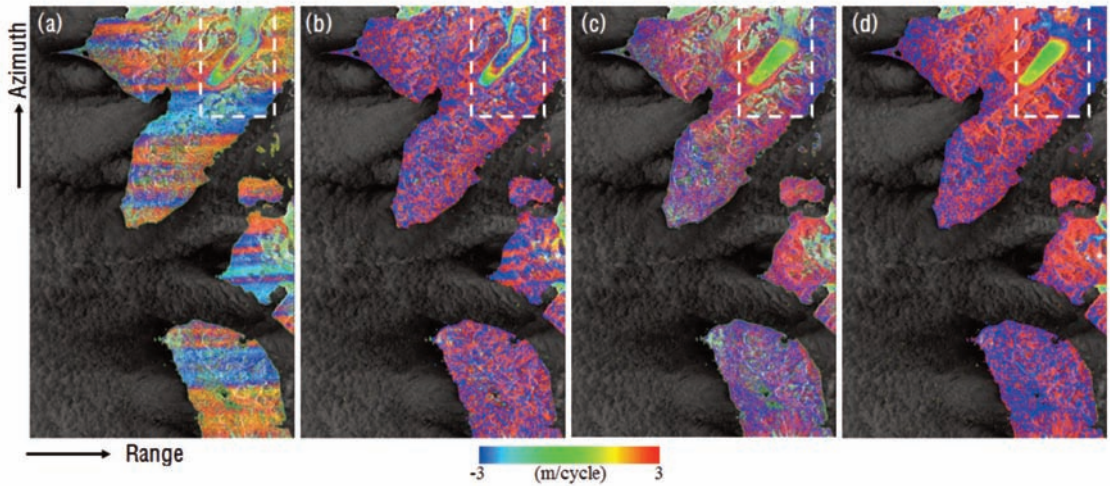


Fig. 4. Azimuth (a, b) and LOS (c, d) displacements measurements of the interferometric pair 20141102_20141113 based on offset tracking methods; (a, c) : Conventional; (b, d) : proposed by (Chae *et al.*, 2017).

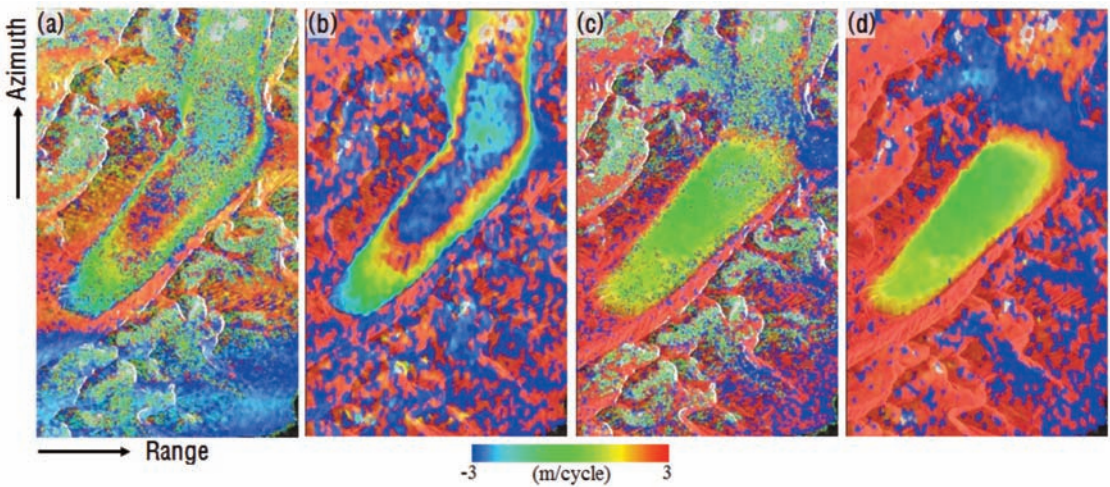


Fig. 5. Enlarged images of the white broken line on Fig. 4 (a~d).

스 방향과 레인지 방향에 대하여 각각 6.4 그리고 4.0 m/year로 산출되었다.

두 변위 속도 영상 중 20141102_20141113에서 보다 낮은 표준편차를 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 두 배 이상의 수직기선의 차이에 의한 것으로 오프셋 트래킹 관측치에 포함된 지형효과와 긴밀도 저하에 의한 영향으로 판단된다(Baek, 2017; Zebker and Villasenor, 1992). 또한 각각의 위성영상이 촬영될 당시의 대기 효과가 서로 다르기 때문에 변위 속도에서 오차 성분이 포함되어 있을 것으로 판단된다(Ferretti *et al.*, 2001; Berardino *et al.*,

2002). 영상에서 확인할 수 있는 대기 효과는 랜덤하고 공간적으로 넓게 분포되어 있어 한 장의 영상만을 활용하여 변위 성분과 분리하는 것이 굉장히 어렵다(Ferretti *et al.*, 2001; Berardino *et al.*, 2002). 그 때문에 다중시기의 영상을 활용하여 통계적으로 대기 효과를 분리하는 기술이 개발되어 활용되고 있으나, 본 연구에서는 해당 기법을 활용하기에는 영상 수가 부족하였다(Ferretti *et al.*, 2001; Berardino *et al.*, 2002). 그 때문에 활용 가능한 두 장의 영상을 활용하여 대기 효과의 전체적인 비율을 낮추기 위하여 스테킹을 수행하였다(Jo *et al.*, 2015a).

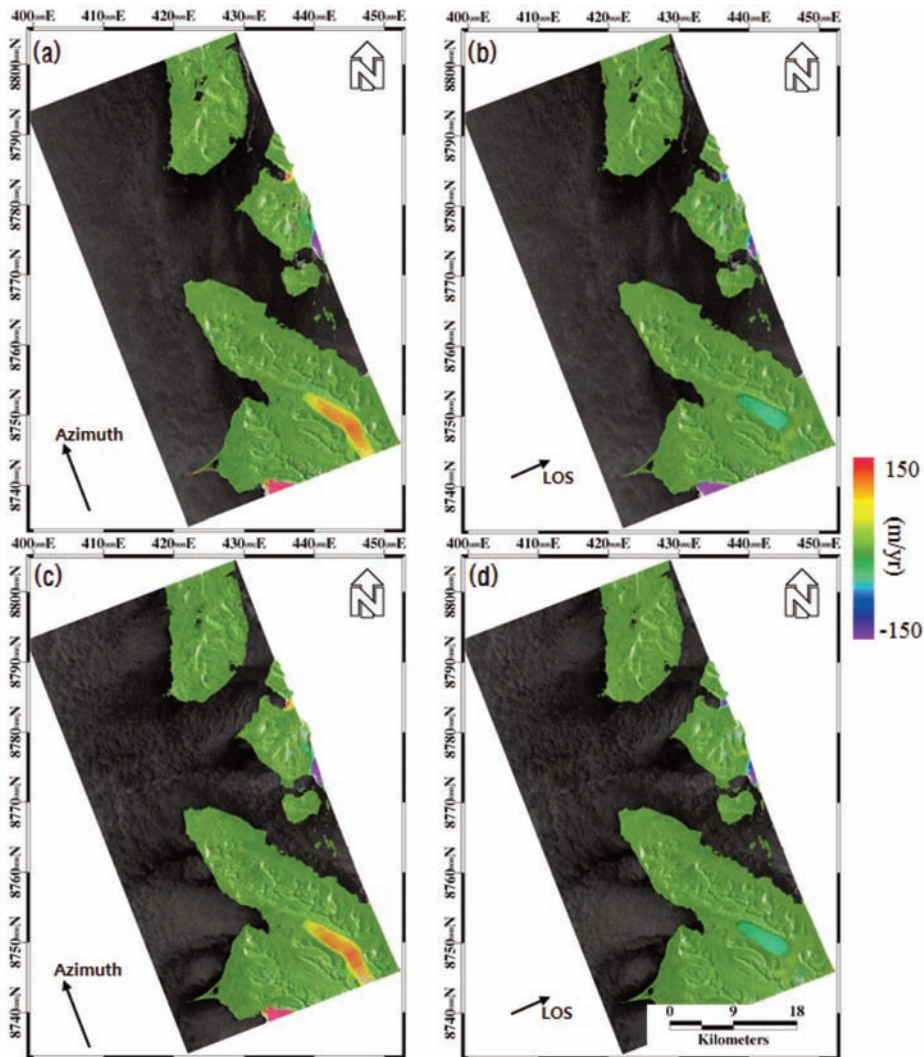


Fig. 6. Glacier velocity maps by applying multi-kernel offset tracking approach. (a) and (b) indicate azimuth and LOS velocity maps of the pair 20141011_20141022 respectively; (c) and (d) indicate azimuth and LOS velocity maps of the pair 20141102_20141113 respectively.

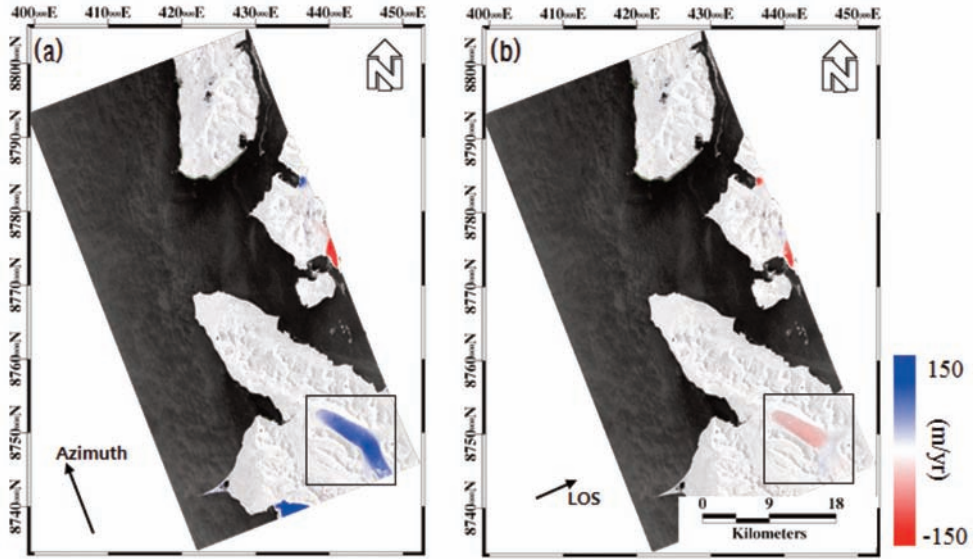


Fig. 7. Stacked glacier velocity maps for azimuth (a) and LOS (b) direction.

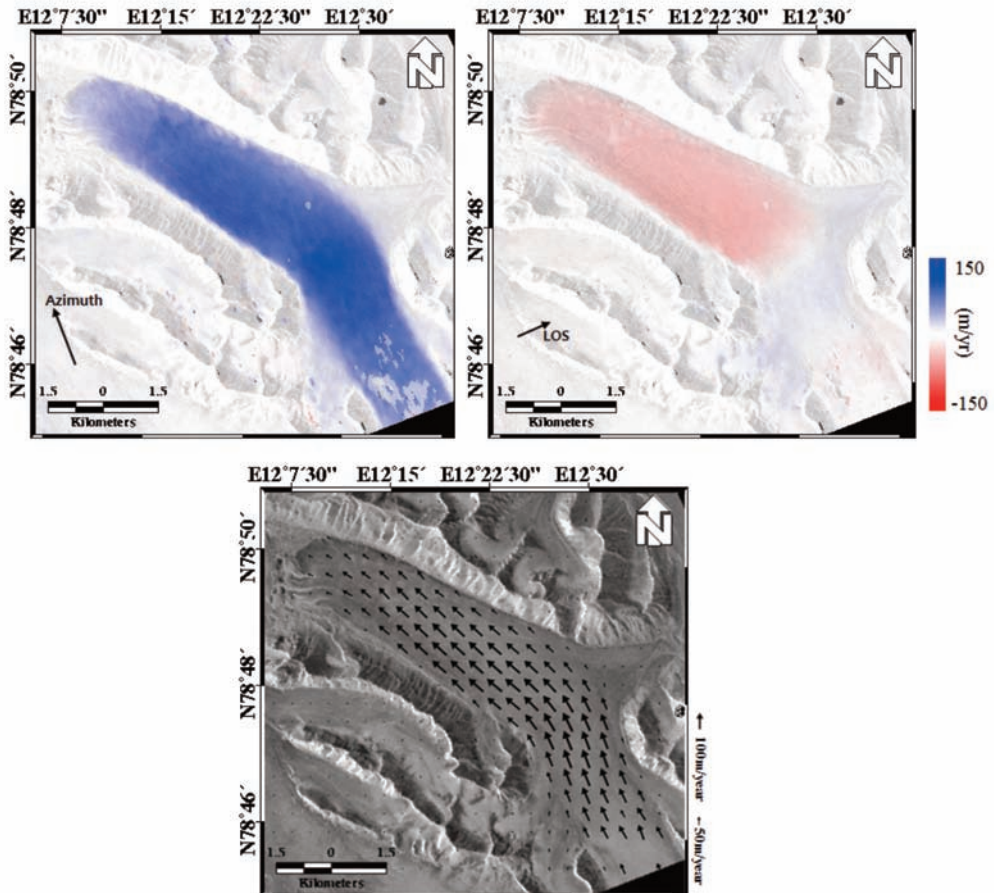


Fig. 8. Enlarged glacier velocity maps for azimuth (a) and LOS (b) direction from Figure 7; Two-dimensional glacier movement vector map (c); Background image is TerraSAR-X intensity acquired at 20141011.

Fig. 7는 20141011_20141022과 20141102_20141113의 간섭쌍에서 획득한 각 방향의 지표 변위 속도 영상에 대하여 스테킹한 결과이다. 변위가 발생하지 않는 안정된 지역에 대하여 표준편차를 계산하였을 때 아지무스 방향과 레인지 방향에 대하여 각각 5.4 그리고 3.3 m/year이었다. 20141011_20141022의 관측 결과에 비하여 아지무스 방향으로는 36.5%, 레인지 방향으로는 32.8% 정밀해졌으며, 20141102_20141113의 관측 결과에 대하여 아지무스 방향과 레인지 방향에 대하여 각각 14.2%, 17.6% 향상되었다.

Fig. 8은 Fig. 7의 검정색 박스 지역을 확대한 영상이다. 아지무스 방향과 레인지 방향에 대한 최대 변위 속도는 각각 133.4, -53.6 m/year으로 관측되었다. 관측한 아지무스 방향과 레인지 방향의 지표 변위 속도 영상으로부터 2차원 속도 벡터를 나타냈다(Fig. 8(c)). 그 결과 Uvérsbreen 빙하지역의 최대 속도는 133.7 m/year로 산출되었다. 빙하의 속도는 영구동토층 근처로 가면서 점차 감소하다가 영구동토층 근처에서 0에 수렴하였다.

5. 결론

본 연구에서는 개선된 위성레이더 오프셋 트래킹 기법을 활용하여 Uvérsbreen 지역의 2차원 지표변위를 관측하였다. 이를 위하여 TerraSAR-X로부터 2014년 10월 11일부터 2014년 11월 24일까지 매 11일 마다 촬영된 5장의 영상을 획득하였으며, 위성레이더 간섭쌍의 시간기선과 수직기선을 고려하여 두 쌍의 간섭쌍을 선정하였다. 선정한 위성레이더 간섭쌍의 아지무스 방향과 레인지 방향의 지표변위 영상에 대하여 각각 스테킹하여 평균 변위 속도 영상을 제작하였다. 제작된 변위 영상의 관측 품질을 검증하기 위하여 변위가 발생하지 않는 안정된 지역에 대하여 표준편차를 계산하였다. 그 결과 아지무스 방향과 레인지 방향에 대하여 각각 5.4 그리고 3.3 m/year이었다. 이 결과는 20141011_20141022의 관측 결과에 비하여 아지무스 방향으로는 36.5%, 레인지 방향으로는 32.8% 향상되었으며 20141102_20141113의 관측 결과에 대하여는 아지무스 방향과 레인지 방향에 대하여 각각 14.2%, 17.6% 향상된 것이다. 관측된 Uvérsbreen 빙하지역의 연간 최대 변위 속도는 133.7

m/year이었으며 영구 동토층 근처에 가면서 속도가 느려지다가 영구동토층 근처에서 소실되었다.

본 연구에서는 짧은 기간 동안의 변위만을 관측하였기 때문에 장기적인 빙하속도 변화에 대한 연구를 수행하기에는 역부족이었다. 기후변화에 의한 환경 변화 영향에 대한 분석을 위해서는 장기적인 관측이 필요할 것으로 보인다. 이를 위해서는 재방문기간이 짧고 비교적 파장 길이가 짧아 이온층 효과의 영향이 적은 Sentinel-1, TerraSAR-X, TanDEM-X 등의 데이터 누적이 우선적으로 필요하다. 본 연구를 통하여 얻어진 결과와 데이터 획득 절차는 빙하의 고도 변화에 관한 연구 그리고 기후 변화 연구에 활용될 것이며, 이는 장기적으로 환경 변화 영향 평가에 관한 연구에 활용될 것이다.

사 사

이 연구는 2017년 기상청 기상·지진 See-At 기술개발연구 사업의 지원을 받아 수행되었습니다(KMI2017-9060).

Reference

- Baek, W. K., 2017. *Precise three-dimensional mapping of the 2016 Kumamoto earthquake through the integration of SAR interferometry and off-set tracking*, University of Seoul, Seoul, Korea.
- Bennett, M. M. and N. F. Glasser, 2011. *Glacial geology: ice sheets and landforms*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA.
- Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11): 2375-2383.
- Brandt, O., K. Langley, J. Kohler, and S. Hamran, 2007. Detection of buried ice and sediment layers in permafrost using multi-frequency Ground Penetrating Radar: A case examination on Svalbard, *Remote Sensing of Environment*,

- 111: 212-227.
- Chae, S. H., 2016. *An Improvement of SAR Offset Tracking Method to Observe Precise Surface Displacements*, University of Seoul, Seoul, Korea.
- Chae, S. H., W. J. Lee, H. S. Jung, and L. Zhang, 2017. Ionospheric Correction of L-Band SAR Offset Measurements for the Precise Observation of Glacier Velocity Variations on Novaya Zemlya, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(8): 3591-3603.
- Ferretti, A., C. Prati, and F. Rocca, 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 8-20.
- Fialko, Y., M. Simons, and D. Agnew, 2001. The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine earthquake, California, from space geodetic observations, *Geophysical Research Letters*, 28(16): 3063-3066.
- Gray, L., I. Joughin, S. Tulaczyk, V. B. Spikes, R. Bindschadler, and K. Jezek, 2005. Evidence for subglacial water transport in the West Antarctic Ice Sheet through three-dimensional satellite radar interferometry, *Geophysical Research Letters*, 32(3).
- Gray, L., 2011. Using multiple RADARSAT InSAR pairs to estimate a full three-dimensional solution for glacial ice movement, *Geophysical Research Letters*, 38(5).
- Hamran, S., E. Aarholt, J. O. Hagen, and P. Mo, 1996. Estimation of relative water content in a sub-polar glacier using surface-penetration radar, *Journal of Glaciology*, 42(142): 533-537.
- Hu, J., Z. W. Li, X. L. Ding, J. J. Zhu, L. Zhang, and Q. Sun, 2014. Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: A review, *Earth-Science Reviews*, 133: 1-17.
- Humlum, O., A. Instanes, and J. L. Sollid, 2003. Permafrost in Svalbard: a review of research history, climatic background and engineering challenges, *Polar Research*, 22(2): 191-215.
- Jo, M. J., H. S. Jung, J. S. Won, M. P. Poland, A. Miklius, and Z. Lu, 2015a. Measurement of slow-moving along-track displacement from an efficient multiple-aperture SAR interferometry (MAI) stacking, *Journal of Geodesy*, 89(5): 411-425.
- Jo, M. J., H. S. Jung, J. S. Won, M. P. Poland, and A. Miklius, 2015b. Measurement of three-dimensional surface deformation by Cosmo-SkyMed X-band radar interferometry: Application to the March 2011 Kamoamo fissure eruption, Kilauea Volcano, Hawai'i, *Remote Sensing of Environment*, 169: 176-191.
- Jonsson, S., H. Zebker, P. Segall, and F. Amelung, 2002. Fault slip distribution of the 1999 Mw7.1 Hector Mine, California, earthquake, estimated from satellite radar and GPS measurements, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(4): 1377-1389.
- Jung, H. S., J. S. Won, and S. W. Kim, 2009. An improvement of the performance of multiple-aperture SAR interferometry (MAI), *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(8): 2859-2869.
- Jung, H. S., Z. Lu, and L. Zhang, 2013a. Feasibility of along-track displacement measurement from Sentinel-1 interferometric wide-swath mode, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(1): 573-578.
- Jung, H. S., D. T. Lee, Z. Lu, and J. S. Won, 2013b. Ionospheric correction of SAR interferograms by multiple-aperture interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(5): 3191-3199.
- Jung, H. S. and S. M. Hong, 2017. Mapping three-dimensional surface deformation caused by the 2010 Haiti earthquake using advanced satellite radar interferometry, *PLOS ONE*, 12(11):

e0188286.

- Lee, W. J., H. S. Jung, S. H. Chae, and W. K. Baek, 2015. Enhancement of Ionospheric Correction Method Based on Multiple Aperture Interferometry, *Korean Journal of Remote Sensing*, 31(2): 101-110 (in Korean with English abstract).
- Luckman, A., 2014. Possible surge on Uvêrsbreen from TerraSAR-X data, CRIOS Project, UNIS, <http://feltlogg.blogspot.kr/2014/03/mulig-surge-pa-uvêrsbreen-possible.html?m=0>, Accessed on Mar. 13, 2018.
- Mattar, K. E., P. W. Vachon, D. Geudtner, A. L. Gray, I. G. Cumming, and M. Brugman, 1998. Validation of alpine glacier velocity measurements using ERS tandem-mission SAR data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3): 974-984.
- McNabb, R. W., R. Hock, S. O'Neel, L. A. Rasmussen, Y. Ahn, M. Braun, H. Conway, S. Herreid, I. Joughin, W. T. Pfeffer, B. E. Smith, and M. Truffer, 2012. Using surface velocities to calculate ice thickness and bed topography: a case study at Columbia Glacier, Alaska, USA, *Journal of Glaciology*, 58(212): 1151-1164.
- Meyer, F., R. Bamler, N. Jakowski, and T. Fritz, 2006. The potential of low-frequency SAR systems for mapping ionospheric TEC distributions, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3(4): 560-564.
- Nagler, T., H. Rott, M. Hetzenecker, J. Wuite, and P. Potin, 2015. The Sentinel-1 mission: New opportunities for ice sheet observations, *Remote Sensing*, 7(7): 9371-9389.
- Nuth, C., 2007. *Geodetic mass balance of Svalbard glaciers: 1936-2004*, University of Oslo, Oslo, Norway.
- Rott, H., M. Stuefer, A. Siegel, P. Skvarca, and A. Eckstaller, 1998. Mass fluxes and dynamics of Moreno Glacier, Southern Patagonia Icefield, *Geophysical Research Letter*, 25(9): 1407-1410.
- 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.
- Zebker, H. A. and J. Villasenor, 1992. Decorrelation in interferometric radar echoes, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(5): 950-959.