

KOMPSAT-3A 입체영상을 이용한 남극 DEM 제작과 DEM 매칭에 의한 두 시기의 DEM 비교

Antarctic DEMs Generation Using KOMPSAT-3A Stereo Images and Comparison by DEM Matching

이효성¹⁾ · 황호빈²⁾ · 서두천³⁾ · 안기원⁴⁾

Lee, Hyoseong · Hwang, Hobin · Seo, Doochun · Ahn, Kiweon

Abstract

Antarctica, where ice sheet has been declined rapidly, should be monitored periodically. However, there are difficult to access for local survey or aircraft observation due to the vast and extreme environments of the polar regions. In order to overcome this problem, there have been a lot of studies by acquiring radar or laser data by satellite. It is also difficult to accurately measure the changes of the surface where is composed of snow or ice layer, and it is also difficult to product a high-resolution DEM. This study therefore aims to product DEMs of two periods using high-resolution KOMPSAT-3A stereo images, and DEM matching is implemented by the LZD(Least-squares Z-Differences) method to detect DEM changes in both periods. As a result, the proposed method could be suggested as comparing height differences of the two DEMs within 1m precision.

Keywords : Antarctic, DEM, KOMPSAT-3A, DEM Matching, LZD

초 록

남극지역은 극빙 감소가 빠르게 진행되고 있기 때문에 주기적인 모니터링이 이루어져야 한다. 그러나 극지대의 광범위하고 극한 환경 때문에 접근이 어려워 항공기 또는 현지관측방식이 곤란한 경우가 많다. 이 문제를 해결하기 위해 기존에는 위성에 의한 레이더 또는 레이저 자료 획득에 의한 연구가 많이 진행되었다. 그러나 이들로부터 획득한 자료는 눈이나 얼음 층으로 이루어진 극지대 표면의 변화를 정확하게 측정하기 힘들고, 고해상도 DEM 구축 또한 힘들다는 단점이 있다. 따라서 본 연구는 고해상도 KOMPSAT-3A 스테레오 위성영상으로부터 두 시기의 DEM을 제작하고 두 시기의 DEM 변화파악을 위해 LZD 방법으로 DEM 매칭을 시도하였다. 그 결과, 정밀도 1m 이내에서 높이차 비교 가능성을 제시할 수 있었다.

핵심어 : 남극, 수치표고모형, 아리랑3A, DEM 매칭, LZD

Received 2017. 05. 16, Revised 2017. 06. 09, Accepted 2017. 06. 21

1) Member, Dept. of Civil Engineering, Suncheon National University (E-mail: hslee@suncheon.ac.kr)

2) Dept. of Civil Engineering, Suncheon National University

3) Member, Satellite Data Cal/Val Dept., Korea Aerospace Research Institute (E-mail: dcivil@kari.re.kr)

4) Corresponding Author, Member, Dept. of Civil Engineering, Gyeongsang National University (Engineering Research Institute)
(E-mail: kwahn@gnu.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.

1. 서론

극빙 DEM 구축과 체적변화 관측을 위해, 레이저 고도계 (Altimeter)를 이용한 ICESat 위성, SAR 간섭기법(InSAR; Interferometry Synthetic Aperture Radar)을 이용한 ERS-1/2 위성, Radarsat-1 위성, ALOS PALSAR 위성 등이 국내외적으로 활용되어 왔다(Cavalieri and Parkinson, 2003; Shuman *et al.*, 2006; Kurtz and Markus, 2008; Han and Lee, 2011; Rignot *et al.*, 2011). 하지만 다수의 관련연구 자료에 따르면 이들로부터 제공되는 DEM의 해상도는 수십에서 수백 미터 까지 이른다. 최근에는 2대의 Terra SAR-X와 Tandem-X 위성 에 의해 생성되는 극빙지역 World DEM을 위치 정확도 2-3m 정도의 위치정확도로 제공하고 있다(Kim and Kim, 2017).

그러나 이들로부터 획득한 자료(또는 영상)는 극지대 표면의 변화특성을 시각적으로 분석하기 힘들고, 고해상도 DEM 구축 또한 힘들다는 단점이 있다. 그리고 표면이 물과 눈으로 덮여있는 극빙지역은 레이저나 SAR 간섭기법에 의한 탐지가 어려우며, 위치결정에 있어서 오차요인이 된다. 또한 극지대 눈이 딱딱하거나 마른 눈일 때 취득되어진 마이크로파는 눈을 투과하고, 눈 아래의 얼음 층 또는 육지면 높이로 표현되었을 가능성이 크다. 광학 위성영상의 경우, 기상요건이 좋은 쾌청한 날씨에만 극지표면 영상을 획득할 수 있다는 단점이 있으나, 눈 표면상의 DEM을 제작할 수 있기 때문에 World DEM과 비교하여 계절변화에 따른 쌓인 눈의 높이를 측정할 수 있다. 이외에 광학영상은 시각적 분석이 편하고, 여러 밴드로 촬영된 표면을 보다 다양한 방식으로 분석할 수 있다는 장점이 있다.

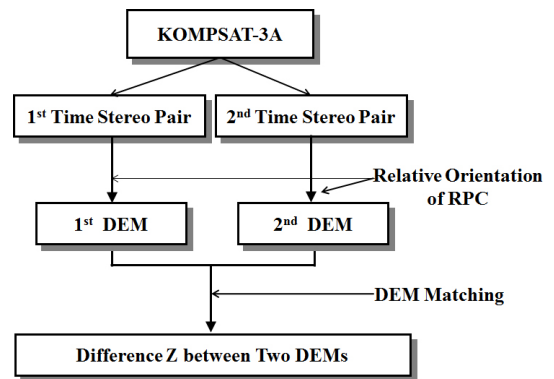
극지 DEM 제작을 위한 광학위성 활용사례는, 일본과 미국 공동으로 1999년에 발사된 ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) 위성의 중-저 해상도 영상으로부터 북극-남극 전역에 대한 DEM을 30m 해상도로 제작하여 무료로 제공(Han and Lee, 2011)하고 있는 사례와 프랑스 SPOT-5 위성의 5m급 해상도 영상을 이용한 SPIRIT (SPOT-5 stereoscopic survey of Polar Ice: Reference Images and Topographies) 프로젝트를 구축하고 남-북극 일부지역에 대한 DEM을 40m 해상도로 제작하여 제공(Korona *et al.*, 2009)하고 있는 사례가 있다. 그러나 중-저해상도의 광학 위성영상에서는 눈과 얼음으로 이루어진 극지 표면의 특성 파악이 어렵다. 한편, Lee *et al.*(2015)는 IKONOS-2 고해상도 위성영상으로 남극 일부지역에 대한 1m 해상도의 DEM을 구축하였다. 그러나 과거 우리나라 위성영상의 경우, 이전의 KOMPSAT-1/2 위성으로 극지 해빙면적 변화나 토지피복

분류 연구 사례(Kim *et al.*, 2013)는 있으나 DEM 제작용으로 거의 활용되지 못했다. 이에 반해, KOMPSAT-3 또는 KOMPSAT-3A 고해상도 위성영상의 경우, 극지대를 주기적으로 촬영할 수 있고, 국내 판매가격도 수입영상보다 경쟁력이 있기 때문에 국내 영상자료에 기반한 극지 DEM 구축과 체적변화 관측이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구는 극지 DEM 구축에 활용사례가 없는 우리나라의 고해상도 KOMPSAT-3A 스테레오 위성영상으로부터 DEM을 제작하였다. 그리고 기준점 확보가 어려워 위치 정확도가 떨어지는 두 시기의 극지 DEM으로부터 변화파악 가능성을 알아보기 위해, DEM 매칭을 시도하였다. DEM을 일치시키기 위해 가장 많이 활용되는 방법이 ICP(Iterative Closest Point) 방법이다(Gruen and Akca, 2005). ICP는 두 DEM에서 임의의 점들 간 최솟거리 조건으로 매칭 쌍을 찾는 다음 두 DEM 간 변환(위치이동, 회전)계수를 구하는 것이다. 그러나 이 방법은 일정 패턴의 빗맞힌 형태를 가진 지형이거나 일부분만 중복된 DEM에서는 상호간의 공분산 계산이 힘들기 때문에 변환된 DEM은 왜곡이 발생할 수 있으며, 같은 점을 찾기 위한 반복계산 시간이 많이 걸린다는 단점이 있다(Gruen and Akca, 2005; Han, 2007). 따라서 본 연구는 Rosenholm and Torlegård(1988)에 의해 제안된 LZD(Least-squares Z-Differences) 방법을 적용하였다. 이 방법의 특징은 두 DEM의 형태와는 상관없이 동일평면위치의 높이 차이로 변환계수를 구하기 때문에 계산방식이 간편하고 계산속도가 빠른 장점이 있다.

2. 남극 DEM 제작과 비교방법

KOMPSAT-3A 입체영상으로부터 남극 DEM을 제작하고, 두 시기의 DEM 변화를 파악하기 위한 전체적인 작업순서도는 Fig. 1과 같으며, 이에 대한 구체적인 내용은 다음과 같다.



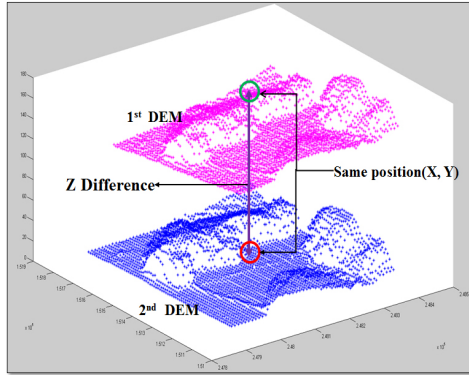


Fig. 1. Progress to compare two DEMs of the Antarctic test area from KOMPSAT-3A stereo satellite imagery(top) and schematic view of LZD DEM matching(bottom)

첫 번째로 남극 DEM을 제작하고 DEM 변화를 파악하기 위해 동일지역에 대한 다른 시기의 스테레오 영상을 확보하였다. 두 번째로 남극지역은 기준점 확보가 힘들기 때문에 시기별 스테레오 영상으로부터 ERDAS LPS(Leica photogrammetry suite) S/W(이하 LPS)를 이용하여 RPC를 상대표정 한 후 DEM을 제작하였다. 여기서 상대표정은 LPS를 이용하여 제공 RPC로 우선 제공 RPC로 3차원 좌표를 계산하고, LPS의 동일점 자동탐색 기능으로 좌우 영상의 동일 영상좌표를 찾은 후, 계산된 3차원 좌표와 획득한 영상좌표들을 이용하여 RPC를 재계산 하는 것이다.

마지막으로, 두 시기의 높이를 비교하기 위해 두 DEM을 LZD 방법으로 매칭하였다. 정확한 비교를 위해선 상대표정으로 제작한 DEM을 기 확보된 기준 DEM과 매칭시켜 보정해야 하나 앞에서 언급한 Tandem 자료를 제외한 이 지역의 정확한 DEM이 없을 뿐만 아니라 상대적인 높이를 위해선 굳이 기준 DEM이 필요하지 않다고 판단하였다.

첫 번째와 두 번째 시기의 DEM간의 변환 관계식은 Eq. (1)과 같이 표현할 수 있다. 이 식으로부터 변환

계수 결정을 위한 LZD 매칭의 구체적 수학적 모델은 Rosenholm and Torlegård(1988)의 논문을 참조하기 바란다.

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = SR \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

where X_1 , Y_1 and Z_1 are coordinates of the 1st DEM; X_2 , Y_2 and Z_2 are coordinates of the 2nd DEM; ΔX , ΔY , ΔZ , S and R are translations, scale factor, rotation matrix between the two DEMs, respectively.

추가로, Eq. (1)의 변환계수 결정을 위해서는 우선 두 DEM에서 제작된 DEM 격자간격 범위 내에서 동일한 평면위치를 찾아야 하며, 이로부터 두 지점간의 높이 차이를 구해야 한다. 그리고 과대오차 지점들의 계산참여를 제한하기 위해, 임의 한 점 i 의 높이차(d_{zi})는 주변(3×3) 8점의 높이차 평균 ($d_{zM} = \frac{d_{z1} + \dots + d_{z8}}{8}$)의 절대값과 같거나 작음 ($d_{zi} \leq |d_{zM}|$) 지점만 계수 계산에 참여토록 설정하였다(Lee, 2015).

3. 적용실험 및 결과분석

실험지역은 서남극 Ice Sheet 중에서도 가장 넓고 빠르게 빙하가 줄어들고 있는 지역 중 하나인 Thwaites 빙하를 대상으로 하였다(Rignot *et al.*, 2011). 그리고 Fig. 2에서 사각형으로 표시한 부분이 DEM 추출영역이다. 사용 자료는 Table 1에서

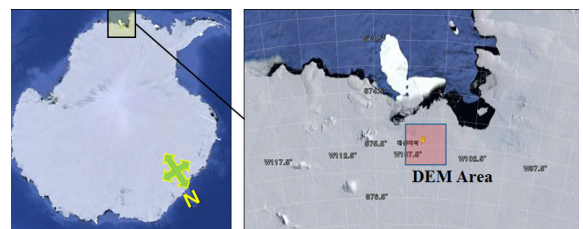


Fig. 2. Analysis target area in Thwaites glacier

Table 1. Thwaites glacier KOMPSAT-3A stereo images

	1 st time zone stereo image		2 nd time zone stereo image	
Imaging start time	2016-03-19 23:15:57	2016-03-19 23:17:39	2016-03-30 22:53:27	2016-03-30 22:55:03
Imaging end time	2016-03-19 23:16:04	2016-03-19 23:17:46	2016-03-30 22:53:34	2016-03-30 22:55:10
Target latitude(deg)	-75°30'0.086"	-75°30'0.007"	-75°30'0.086"	-75°30'0.086"
Target longitude(deg)	-106°30'0.010"	-106°30'0.010"	-106°30'0.010"	-106°30'0.010"
Roll(deg)	-19.97	-20.76	-08.43	-09.34
Pitch(deg)	30.00	-30.00	30.00	-30.00

Yaw(deg)	00.00	00.00	00.00	00.00
Incidence(deg)	39.215	39.674	34.152	34.402
Cloud(%)	0			
Imaging mode	One-pass stereo			

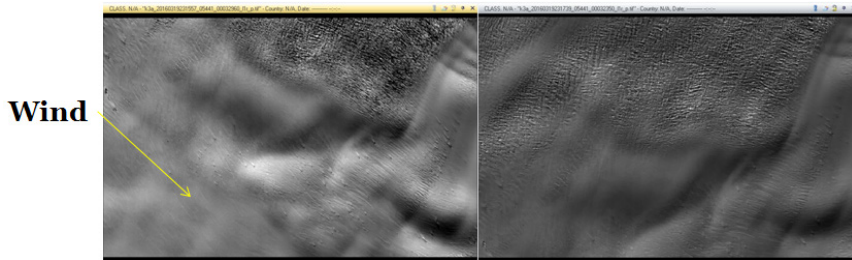


Fig. 3. 1st time stereo pair of KOMPSAT-3A

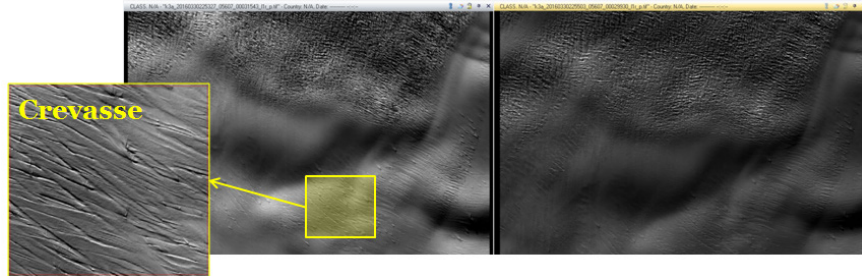


Fig. 4. 2nd time stereo pair of KOMPSAT-3A

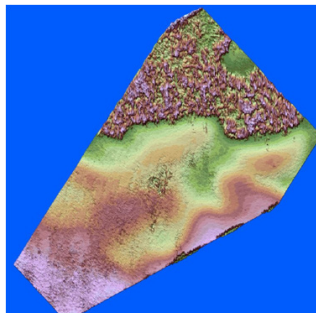


Fig. 5. 1st DEM by the provided RPC(grid space: 1m)

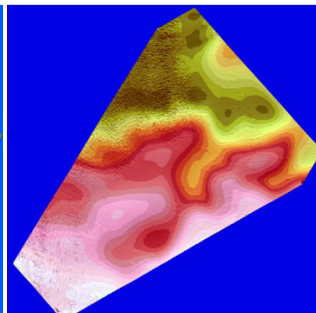


Fig. 6. 1st DEM by the relative oriented RPC (grid space: 1m)

보는 바와 같이 대상지역을 2016년 03월 19일과 03월 30일에 관측 수집한 KOMPSAT-3A 입체영상이다. 사용된 첫 번째와 두 번째 시기의 수렴각은 각각 60.94도, 60.77도이다. 물론 이 기간 동안 두 시기의 남극표면 변화는 거의 없을 것으로 예상되지만, 향후 시간변화에 따른 DEM 변화를 파악하는데 있어서 본 연구에서 제안하는 DEM 매칭방법의 적합성을 검토하기 위해 실험하였다.

Fig. 3, Fig. 4는 두 시기에 촬영된 KOMPSAT-3A 스테레

오 영상을 나타낸 것이다. 두 시기 모두, 바람에 의한 영향으로 영상이 다소 선명하지 않으나 크게 확대하면 크레바스(Crevasse) 같은 지형의 모습을 선명히 볼 수 있다. 따라서 영상 매칭에 있어서 바람이 큰 문제가 되지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 첫 번째 시기의 스테레오 영상으로 LPS에 기준점 없이 제공되는 RPC 정보만을 입력하여 위성삼각측량을 수행한 후 제작한 DEM(격자간격 1m)이며, Fig. 6은 제공되는

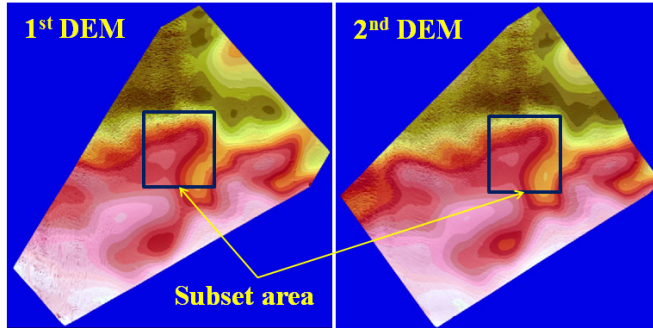


Fig. 7. 1st and 2nd DEM by the relative oriented RPCs, DEM matching area of the two DEMs

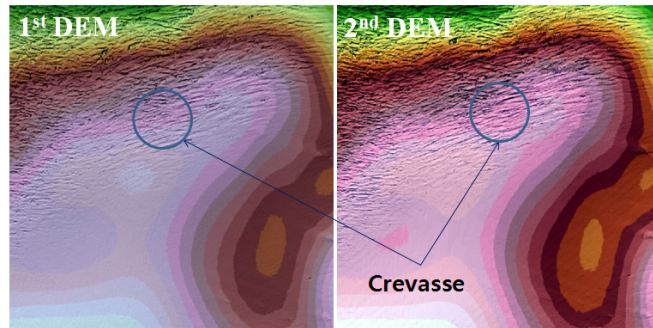


Fig. 8. Subset area(width:5km×height:5km) of 1st DEM(left) and 2nd DEM(right)

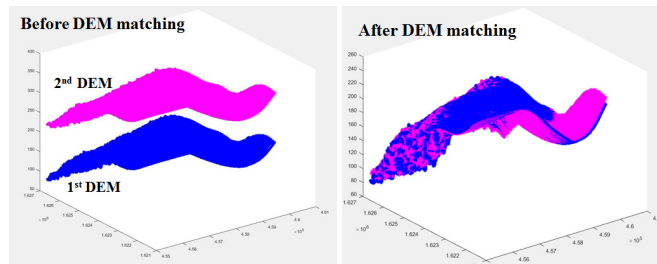


Fig. 9. Before(left) and after(right) LZD DEM matching of the two DEMs

RPC를 상대 표정시켜 제작한 DEM(격자간격 1m)이다. 여기서, 제공 RPC를 입력하여 제작한 것에 비해 상대 표정한 RPC로 제작한 DEM의 결과가 더욱 양호한 것을 시각적으로 확인할 수 있었다. 그 원인은 Fig. 5의 경우, LPS에서 에피플라 영상을 생성할 때 제공되는 부정확한 RPC 정보만으로 매칭하여 제작된 것에 반해 Fig. 6의 결과는 두 영상 간 RPC를 상대 표정시킨 에피플라 영상을 생성하여 매칭 하였기 때문인 것으로 판단된다. 물론 이 또한 정확한 위치결과가 아니기 때문에 Fig. 7(2nd DEM)과 같은 다른 시기의 상대표정 DEM과의 상대적인 변화 파악에만 사용하였다.

Fig. 7은 상대표정에 의한 RPC로 제작한 첫 번째와 두 번째 시기의 DEM을 나타낸 것이며, 사각형으로 표시한 부분은 두

시기 DEM의 비교를 위한 DEM 매칭 영역을 나타낸 것이다.

Fig. 8은 Fig. 7의 절취한 사각형 부분을 확대하여 나타낸 것으로 고해상도 위성영상의 경우 원 안에 표시한 바와 같이 크레바스 크기까지 표현 가능할 것으로 판단한다.

DEM간 매칭은 7개 계수 모두 적용한 경우, 스케일만 제외하여 적용한 경우, 위치이동만 고려한 경우로 나누어 실행하였다. KOMPSAT-3 국내영상의 경우, 일반적으로 제공 RPC는 위치이동 오차가 대부분을 차지한다(Lee *et al.*, 2013). 따라서 본 연구에서는 스케일의 영향을 포함한 위치이동만 고려해도 두 DEM 매칭이 잘 이루어지는지 여부를 판단하고자 하였다. Fig. 9는 두 시기의 DEM 매칭 전과 후를 나타낸 것이며(첫 번째 시기 DEM 기준으로 두 번째 시기 DEM을 LZD

Table 2. Transformation parameters between DEMs

Number of parameters	X(m)	Y(m)	Z(m)	Omega(deg)	Phi(deg)	Kappa(deg)	Scale
7	10.46	-0.20	-121.94	-0.058	-0.085	0.199	1.003
6	5.80	2.82	-121.91	-0.061	-0.084	0.135	-
3	2.69	3.14	-121.87	-	-	-	-

방법으로 변환), Table 2는 두 DEM간의 위치, 이동, 회전, 축척계수를 나타낸 것이다.

세 가지 경우의 DEM 모두, X, Y방향에 비해 Z방향 차이가 크게 나타났으며, 모든 경우의 X, Y 변수는 각각에 대해 차이를 보이나 Z 변수 차이는 거의 동일한 것으로 나타났다. 이는 Fig. 1에서 보는바와 같이 LZD DEM 매칭 계산에 참여하는 두 DEM의 3차원 좌표에서, 같은 평면위치의 높이차가 약 122m로 모두 일정한 값을 가지기 때문인 것으로 판단된다.

Table 3. Root mean square deviation of the height between DEMs

Cases	RMS(m)	Max(m)
Before DEM matching	122.27	174.45
After DEM matching	7 parameters	0.78
	6 parameters	0.85
	3 parameters	2.07

Table 3은 각 경우별로 두 DEM 매칭 전후의 동일한 평면 위치(X, Y)에서 Z차이를 RMS와 최대치를 나타낸 것이다. 여기서, 스케일은 큰 영향을 주지 않는 것으로 볼 수 있으며, 위치이동만 고려했을 때는 1m 정도 큰 차이를 보이고 있다. 그리고 RMS에 비해 최대차가 큰 이유는 둘 중 한 DEM의 불량 매칭 지점에 의한 결과로 판단된다. 불량매칭은 눈보라에 의한 스테레오 위성영상간의 지형변화가 주원인인 것으로 판단되며, 눈에 의한 화소대비가 뚜렷하지 않은 지점에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 10의 좌측 등고선은 122m 정도 차이가 나는 같은 모양의 등고선이며, 우측 등고선은 7개 변수적용으로 1m 정도 차이가 나는 같은 모양의 등고선을 표현한 것이다. 원 안의 두 등고선을 시각적으로 비교해 보면, 매칭 전에 비해 매칭 후의 두 등고선의 형태가 더욱 유사하게 표현되는 것을 알 수 있다.

결과적으로, DEM의 시기적 차이가 거의 없음을 감안할 때, 매칭 전의 Z차이(약 122m)에 비해 매칭 후의 Z차이가 약 1m내로 향상되었으며 기준점을 사용하지 않고도 대략

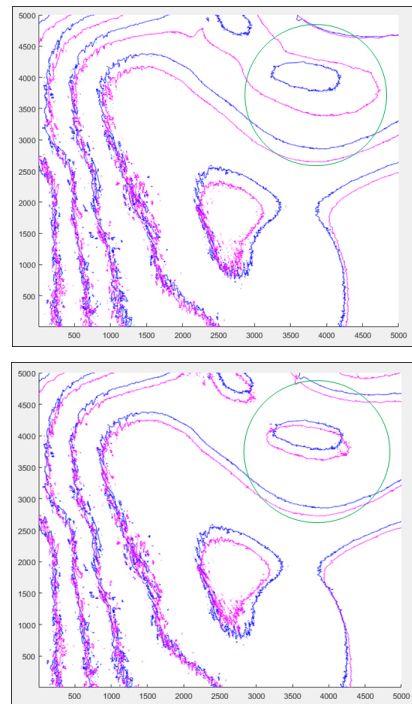


Fig. 10. Contours of two DEMs before(top) and after DEM matching(bottom)

상대오차 1m 내의 정도로 DEM 변화분석이 가능함을 제시 할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 남극 지역의 KOMPSAT-3A 스테레오 위성 영상을 획득한 후, 남극DEM 변화를 파악하기 위해 동일지역에 대한 다른 시기의 스테레오 영상을 확보하였고 이로부터 DEM을 제작하였다. 그리고 RPC 오차 범위 내에서 두 시기 DEM의 변화 파악을 위해 DEM 매칭을 적용하고 비교하였다. KOMPSAT-3A 위성영상의 RPC 정확도가 보정되지 않은 상태에서 극지 DEM이 제작되었다더라도 제안된 DEM 매칭 방법을 이용하면 서로 다른 시기에 제작된 DEM 간의 상대

적인 편차는 1m 이하로 계산이 가능하였다. 그 결과, 높이의 상대적 편차를 122m에서 1m 이하로 크게 줄일 수 있었고 전체적인 DEM 차이도 줄일 수 있었다. 따라서 본 연구를 통해 KOMPSAT-3A 위성영상을 이용하여 남극 DEM 변화분석을 위한 LZD DEM 매칭방법의 적용가능성을 제시할 수 있었으며, 극지의 빙하체적 변화관측 수단으로서 우리나라 위성영상의 활용 가능성을 제시할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 한국연구재단의 기초연구사업 지원(NRF-2015R1D1A3A01020842)을 받아 수행된 것이며, 이 논문은 2011년도 한국연구재단의 기초연구사업 지원(No. 2011-0014182)을 받아 수행된 것이며, 이 연구는 2014년도 경상대학교 연구년제연구교수 연구지원비 지원에 의하여 수행되었으며, 이 연구는 2015년도 경상대학교 발전기금재단 재원으로 수행되었음.

References

- Cavalieri D.J. and Parkinson, C.L. (2012), Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010, *The Cryosphere*, Vol. 6, pp. 881–889.
- Gruen, A. and Akca, D. (2005), Least squares 3D surface and curve matching, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 59, No. 3, pp. 151-174.
- Han, D. (2007), *Automatic Adjustment of Airborne LiDAR Strip Data Using the ICP and Extrema Detection Algorithm*, Ph.D. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea, 107p. (in Korean with English abstract)
- Han, H. and Lee, H. (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*, Vol. 27, No. 5, pp. 535-542. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.H and Kim, D.J., (2017), Combined usage of TanDEM-X and CryoSat-2 for generating a high resolution digital elevation model of fast moving ice stream and its application in grounding line estimation, *Remote Sensing*, Vol. 9, pp. 176-193.
- Kim, S.I., Kim, H.C., Shin, J.I., and Hong, S.G. (2013), Land-cover classification of Barton Peninsular around King Sejong station located in the Antarctic using KOMPSAT-2 satellite imagery, *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 29, No. 5, pp. 537-544. (in Korean with English abstract)
- Korona, J., Berthier, E., Bernarda, M., Rémy, F., and Thouvenot, E. (2009), SPIRIT. SPOT 5 stereoscopic survey of polar ice: reference images and topographies during the fourth international polar year (2007–2009), *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 64, pp. 204-212.
- Kurtz, N.T. and Markus, T. (2008), Comparison of ICESat data with airborne laser altimeter measurements over Arctic sea ice, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 46, No. 7, pp. 1913-1924.
- Lee, C., Oh, J., Hong, C., and Youn, J. (2015), Automated generation of a digital elevation model over steep terrain in Antarctica from high-resolution satellite imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 53, No. 3, pp. 1186-1194.
- Lee, H. (2015), Accuracy improvement of the ICP DEM matching, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 33, No. 5, pp. 443-451. (in Korean with English abstract)
- Lee, H., Seo, D., Ahn, K., and Jeong, D. (2013), Positioning accuracy analysis of KOMPSAT-3 satellite imagery by RPC adjustment, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 31, No. 6-1, pp. 503-509. (in Korean with English abstract)
- Rignot, E., Mouginot, J., and Scheuchl, B. (2011), Ice flow of the Antarctic ice sheet, *SCIENCE*, Vol. 333, No. 9, pp. 1427-1430.
- Rosenholm, D. and Torlegård, K. (1988), Three-dimensional absolute orientation of stereo models using digital elevation models, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 54, No. 10, pp. 1385-1389.
- Shuman, C.A., Zwally, H.J., Schutz, B.E., Brenner, A.C., DiMarzio, J.P., Suchdeo, V.P. and Fricker, H.A., (2006), ICESat Antarctic elevation data: preliminary precision and accuracy assessment, *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L07501, doi:10.1029/2005GL025227.

