

# SPOT-5 스테레오 영상을 이용한 백두산 DEM 제작과 보정

## Correction of Mt. Baekdu DEM Generated from SPOT-5 Stereo Images

이효성<sup>1)</sup> · 안기원<sup>2)</sup> · 박병욱<sup>3)</sup> · 오재홍<sup>4)</sup> · 한동엽<sup>5)</sup>

Lee, Hyoseong · Ahn, Kiweon · Park, Byunguk · Oh Jaehong · Han, Dongyeob

### Abstract

The geoscientists are very interested in a volcanic reactivity of Mt. Baekdu. Periodical observation and monitoring are thus needed to detect the topographic and environmental changes of Mt. Baekdu. It is, however, very restrictive to survey with difficulty of observer's accessibility in the field due to political problems. This study therefore is to produce digital elevation model (DEM) of Mt. Baekdu using SPOT-5 stereo images. The produced DEM is very not accurate because of using without ground control points (GCP). To correct the previously generated DEM, scale-invariant feature transform(SIFT) matching method is adopted with shuttle radar topography mission(SRTM) DEM of NASA Jet Propulsion Laboratory(JPL). The results of the produced DEM to SRTM DEM matching indicate that the corrected DEM from SPOT-5 stereo images has more detail topographic structures. In addition, difference of spatial distances between the corrected DEM and SRTM DEM are much smaller than non-corrected DEM.

Keywords : Mt. Baekdu, SPOT-5 stereo images, DEM, SRTM, SIFT matching

### 초 록

백두산 화산의 재 활동 여부와 관련한 연구가 최근 지구과학자들 사이에서 활발히 진행되고 있다. 그러나 우리나라는 이러한 연구에 직접적으로 참여하기 힘들고 백두산을 현장에서 지속적으로 모니터링하기 힘들다. 본 연구는 백두산 모니터링을 위한 기본 단계로서 SPOT-5 스테레오 위성영상을 이용한 백두산 DEM을 제작하고자 하였다. 제작한 DEM은 현지관측 기준점 없이 제작되었으므로 매우 부정확하다. 따라서 제작 DEM 보정을 위해, SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) DEM을 이용한 SIFT(Scale-Invariant Feature Transform) 매칭방법을 제안하였다. 그 결과, SPOT 위성영상으로 제작한 DEM은 SRTM DEM에 비해 더욱 자세한 지형정보를 제공할 수 있었다. 그리고 보정 전 DEM에 비해 SIFT 방법으로 보정한 DEM이 더 양호한 결과를 나타내었다.

핵심어 : 백두산, SPOT-5 스테레오 위성영상, DEM, SRTM, SIFT 매칭

## 1. 서 론

백두산은 중국과 북한의 접경지대에 위치하고 있으

며, 유라시아 동부에서 해발고가 제일 높은 산으로서 다양한 동식물로 이루어진 특수한 자연환경과 접경지역 생태환경으로 유네스코 생물보호권으로 지정된 지역이

- 1) 정회원 · 순천대학교 공과대학 토목공학과 부교수(E-mail:hslee@sunchon.ac.kr)
- 2) 정회원 · 경상대학교 공과대학 토목공학과 교수, 경상대학교 공학연구원 책임연구원(E-mail:kwahn@gsnu.ac.kr)
- 3) 정회원 · 한경대학교 공과대학 토목공학과 교수(E-mail:ukpark@hknu.ac.kr)
- 4) 정회원 · 오하이오주립대학교 박사과정(E-mail:oh.174@osu.edu)
- 5) 교신저자 · 정회원 · 전남대학교 공학대학 해양토목공학과 조교수(E-mail:hozilla@chonnam.ac.kr)

다. 백두산 중심부인 화산추의 높이는 2,700 m 이상이고, 반경은 약 20 km이다. 화산 중심의 분화구에는 고도 약 2,187 m의 화산호수 천지가 있다. 과거 968±20 A.D에 발생한 백두산 폭발은 신석기 시대 이후 일어난 화산활동 중 세계적으로 가장 큰 규모라고 기록하고 있으며, 1702년 수증기 폭발을 마지막으로 화산활동을 멈추고 있다(Horn and Schmincke, 2000). 그러나 가스분출, 열수, 그리고 미소 지진이 빈번하게 발생하고 있어 화산의 재 활동 여부에 대해 지구과학자들 사이에서 관심이 높아지고 있으며, 백두산은 수백 개의 화산 분화구를 갖는 세계에서 가장 위험하고 활동적인 화산중의 하나라고 주장하는 사람도 있다(소원주, 2010). 한편 중국의 관광객 유치에 위한 무분별 개발로 인하여 백두산 주변지역의 오염이 심각한 수준에 이른다고 한다. 백두산 오염문제는 단순한 관광에 의한 환경오염뿐만 아니라 생태권 파괴로 주변국의 환경에도 영향을 끼치는 심각한 문제라고 본다. 물론 중국의 지방정부 기관에서 관리를 하겠지만 백두산의 환경파괴 현상은 점점 더 가속화 되고 있는 실정이다(녹색연합, 2000). 이러한 환경파괴 현상의 심각성을 우리나라를 포함한 주변국들에게 인지시키고, 앞으로 세계적 자연환경으로서 그 가치를 보존하기 위해선 백두산의 주기적 관찰과 정보수집, 체계적인 관리가 필요할 것이다.

이러한 관심에도 불구하고 백두산의 환경변화와 화산 활동을 관측하기 위한 측지학적 계측장비(지진관측소와 GPS 상시관측소 등)가 설치되어있지 않으며, 고해상도 수치표고모델(DEM; Digital Elevation Model)도 확보되어 있지 않은 상태이다(김상완, 2003). 우리나라는 여건상 현장에서 백두산을 주기적으로 관측하기 힘들므로 현재 접근 불가능 지역을 분석할 수 있는 원격탐사용 위성자료를 우선적으로 활용하는 것이 최선의 방법이라 판단된다. 백두산과 같은 화산지대를 3차원 모니터링하기 위한 원격탐사 적용사례로는 Vassilopoulou 등(2002)은 그리스 Nisyros 섬 화산활동(용암, 화산암, 토사 등의 흐름)에 대한 위험경고와 위기관리, 자연재해 대비에 사용되어 질수 있도록 3, 4월에 촬영되어진 IKONOS 칼라 입체영상과 DGPS 방법으로 획득한 지상기준점 자료로부터 DEM(2m 간격), 정사투영영상과 3D 시각화 자료를 제작한 바 있다. Kiyoshi 등(2002)은 필리핀 Mayon 화산활동으로부터 재해를 완화하고 예방하기 위해 실시간으로 화산활동을 관측·예보할 수 있는 “실시간 화산활동 매핑 시스템”을 구축하고, 휴대용 디지털 카메라로 화산의 Skyline을 시간대별로 촬영한 후, 기 제작된 DEM으로 촬영한 영상을 기하보정하여 화산

활동의 변화양상을 분석하였다. 그리고 Michael 등(1996)은 시실리 섬(Sicily) Etna 화산에서 12개 채널의 다중파장대 센서를 탑재한 항공기로 용암이 흐른 지역을 촬영하여 용암의 연령대별 토지피복도를 제작한 후, 용암흐름에 대한 상대적 연령도를 측정하였으며, 이를 기존에 제작된 지질도와 비교·검토하였다.

본 연구는 백두산의 DEM 제작을 위해 5m 해상도의 SPOT-5 스테레오 위성영상을 활용하였다. 그러나 정확한 기준점 확보가 힘들므로 제작된 DEM의 정확도는 위성의 해상도에 비해 매우 떨어질 것이다. 따라서 제작된 DEM의 정확도 보정을 위해 NASA JPL(Jet Propulsion Laboratory)에서 제공하는 SRTM DEM을 활용하였다. SRTM을 이용한 제작 DEM의 정확도 보정과 관련한 연구로는 Gonçalves(2006)는 SPOT 1과 SPOT 2 스테레오 위성영상으로 PCI 소프트웨어를 이용하여 위성보조자료와 동일점 영상좌표로 DEM을 제작한 후, SRTM-DEM과 상관계수 매칭을 실시하여 DEM의 이동량을 계산하고, 이로부터 SPOT 위성영상의 외부표정요소를 재계산하였다. 이태운 등(2007)은 DTED 레벨 2 DEM과 기존 정사영상을 이용하여 자동으로 기준점을 추출한 후, 고해상도 IKONOS 위성영상을 이용하여 DTED 레벨 3의 DEM을 제작하였다. 본 연구에서 SPOT-5 위성영상으로 제작한 DEM을 보정하기 위해 SRTM DEM을 이용한 SIFT(Scale-Invariant Feature Transform) 방법을 제안하였다.

## 2. 백두산 DEM 제작과 보정방법

SPOT-5 입체영상으로부터 백두산 DEM을 제작하고, 정확도 보정을 위한 전체적인 순서도는 그림 1과 같으며, 이에 대한 구체적인 내용은 다음과 같다.

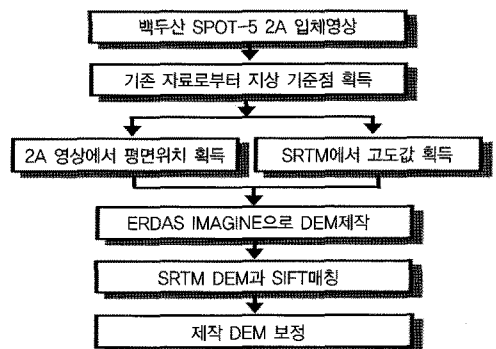


그림 1. SPOT-5 위성영상으로 백두산 DEM 제작 및 DEM 보정을 위한 순서도

먼저 구입한 백두산 SPOT-5 2A레벨 입체영상으로부터 영상좌표 기준점과 평면위치 기준점을 획득하고, 이와 동일한 위치의 높이를 미국 NASA에서 무료로 다운로드 받을 수 있는 3"간격(90m)의 SRTM-DEM으로부터 획득한다. SPOT-5 2A레벨 영상 또는 메타 데이터(Meta data)에서 제공되는 평면위치는 SPOT 자체 센서모델로부터 계산된 위치이며, 그 정확도는 대략 50m 내외로 보고되고 있다 (Spot Image, 2002). 해상도 90m인 SRTM-DEM의 위치정확도는 평면위치가 대략 9m, 높이가 6m 내외로 DEM 해상도에 비해 매우 좋은 위치정확도를 가지고 있다고 보고되고 있다(Farr 등, 2007).

다음으로 앞에서 획득한 기준점을 이용하여 ERDAS IMAGINE 9.1 LPS(이하 ERDAS)로 외부표정요소를 획득하고, 자동매칭을 실시한 후, DEM을 제작한다. 그러나 정확한 지상기준점을 사용하지 않고 외부표정요소를 결정하였기 때문에 DEM의 평면위치와 높이가 제공되는 SPOT 위성영상의 해상도에 비해 큰 오차를 가지고 있다.

마지막으로 제작된 DEM과 SRTM-DEM과의 SIFT 매칭을 실시하여 제작된 DEM의 정확도를 보정한다. SIFT 매칭(Lowe, 2004)은 축척, 회전, 조명(illumination), 변형(deformation)이 불변이고, Localization이 좋으며, 영상의 특징 개체들이 이동, 회전, 축척, 다른 영상인자에 불변인 지역적 개체 좌표로 변환되는 방법이다. 이 방법으로 영상에서 특징점을 찾고, 특징점 영역(그림 2 좌측에서 8×8)에서 축척과 방향에 불변인 영역을 탐색한다. 탐색영역은 영상좌표, 축척, 방향정보를 포함하고 있으며, 이정보를 이용하여 그래디언트 히스토그램을 계산하고, 가장 큰 그래디언트 방향이 위로 향하도록 회전시킨 후, 그림 2의 우측그림과 같이 2×2 화소의 그래디언트 히스토그램을 8방향 히스토그램 배열로 나누어 SIFT 기술벡터로 생성한다(한동엽 등, 2006). 이로부터 각각의 영상에서 독립적으로 생성된 특징점의 기술자를 최근린 정합 방법으로 처리하면 대응점을 찾을 수 있다. 두 DEM에서 대응점들의 3차원 위치를 이용하여 Affine 변환식을 적용하면 제작된 DEM을 보정할 수 있다.

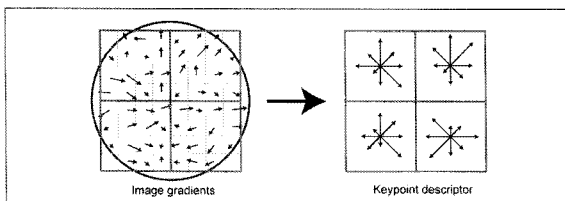


그림 2. SIFT 기술벡터 형성(Lowe, 2004)

### 3. 적용실험 및 결과분석

사용자료는 표 1에서 보는바와 같이 2007년 09월 28일과 10월 13일에 관측 수집된 백두산 일대의 전정색 SPOT-5호 입체영상이며, 영상에서 포함하는 지상면적은 약 25×25km이다.

표 1. 본 연구에 사용된 SPOT-5 입체위성영상의 주요제원

	Left image	Right image
Acquisition date	2007-10-13	2007-09-24
Sun azimuth	143° 55'	133° 04'
Sun elevation	71° 28'	69° 04'
Incident angle	10.89°	27.14°
Image size	6000×6000pixels	6000×6000pixels
Level	2A	
Altitude	832km	
Resolution	5m	
Coordinate system	WGS84	

실험 대상지역은 백두산 천지를 중심으로 가로방향 10km, 세로방향 15km이며, 높이는 SRTM 기준으로 대략 1400m에서 2700m의 범위이다. 그림 3에서 사각형으로 표시한 부분이 DEM 추출영역이다.



그림 3. 백두산 DEM 추출을 위한 SPOT-5 스테레오 영상(좌측이 10월 13일 영상, 가운데가 09월 24일 영상)의 대상영역, 기준점(삼각형 모양)과 검사점(원형 모양)

영상처리 프로그램으로는 ERDAS를 이용하였다. 외부표정요소를 획득하기 위해 기준점(15점)과 검사점(15점)을 획득하였다(그림 3). 기준점과 검사점 획득을 위해 먼저 ERDAS View창 2개를 띄우고, 각각에 SPOT-5 2A레벨 영상과 SRTM DEM을 실행시켰다. 그리고 SPOT-5 2A레벨 영상에서 평면위치를 취득한 후, 취득한 평면위치와 동일한 위치를 SRTM DEM에서 찾은 다음 그 위치에 해당하는

높이 값을 찾아 사용하였다. 외부표정요소 결정에 있어서 위치요소 다항식의 경우 일차와 이차의 정확도가 큰 차이가 없었으며, 회전요소 또한 상수와 다항식의 차이를 보이지 않았기 때문에 위치요소는 일차 다항식, 회전요소는 상수항만 이용하였다(식 1). 표 2는 결정된 외부표정요소로부터 산출된 기준점과 검사점의 3차원 위치의 결과 정밀도(현지관측이나 보다 신뢰할 만한 측정이 이루어지지 않고, SRTM DEM을 기준으로 확인하였기 때문에 정밀도 표현하였다)를 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned}
 X_R &= 460162 + 1.097 \cdot i, \omega_R = -0.23042 \text{rad}, X_L = 36329 + 5.068 \cdot i, \omega_L = -0.40135 \text{rad} \\
 Y_R &= 4743196 + 386.744 \cdot i, \phi_R = 0.08312 \text{rad}, Y_L = 4811261 + 401.323 \cdot i, \phi_L = -0.12365 \text{rad} \quad (1) \\
 Z_R &= 402682 + 17.400 \cdot i, \kappa_R = -0.00601 \text{rad}, Z_L = 380408 + 48.686 \cdot i, \kappa_L = -0.01130 \text{rad}
 \end{aligned}$$

여기서,  $i$  는 라인 수이다.

표 2. 결정된 외부표정요소로부터 계산된 기준점과 검사점의 위치결정 정밀도

Coordinates	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z
Control points	9.0m	12.4m	25.7m
Check points	19.5m	28.6m	68.5m

표 2에서 보는바와 같이, 검사점의 평면위치 편차는 Spot Image(2002)에서 보고된 정확도(약 50m) 이내의 결과가 나온 반면 높이편차는 SRTM-DEM 오차보다 크게 나온 것을 알 수 있다. 이는 처음 기준점을 결정할 때 제공영상의 평면위치와 동일한 지점의 높이를 SRTM-DEM에서 찾고, 찾은 높이 지점의 평면위치는 상대적으로 부정확한 제공영상에 의해 다소 이격되었기 때문일 것으로 판단된다.

이렇게 결정된 외부표정요소로부터 ERDAS를 이용하여 DEM을 제작하였다(그림 4). 그림 4(a, b)에서 제작된 DEM과 SRTM DEM을 시각적으로 비교해보면 제작 DEM의 해상도가 상대적으로 높게 나타난 것을 알 수 있다. 그러나 제작된 DEM은 산악지역과 구름에 의한 영향 등으로 인하여 부정확한 매칭이 많이 발생할 수 있기 때문에 표 2에서 결정된 외부표정요소 결정 정밀도 보다 큰 오차를 포함할 수 있다. 또한 사용한 기준자료 중 기준점의 평면위치 선정에 사용된 SPOT 2A 레벨 영상은 높이 선정에 사용된 SRTM DEM에 비해 상대적으로 정확도가 떨어지기 때문에 이로부터 결정된 표 2의 결과보다 제작된 DEM의 절대 오차는 더 크게 발생할 수 있다.

따라서 이러한 제작 DEM의 정확도 보정을 위해 보다 정확한 SRTM DEM을 이용하여 SIFT 방법에 의한 Affine 변

환식을 적용하여 하였다. 그림 5는 두 DEM 간의 SIFT 매칭에 의한 최종 정합쌍(Affine 변환을 위한 기준점들)을 나타낸 것이며, SRTM DEM의 기준점들과 SPOT DEM 기준점들 간의 변환 전·후에 대한 공간상의 거리를 나타낸 것이다.

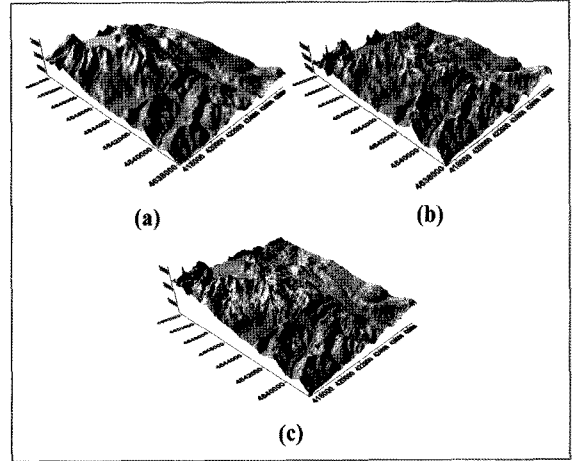


그림 4. SRTM-DEM(a), ERDAS로 제작한 동일지역의 보정 전 백두산 DEM(b), SIFT로 Affine 변환한 백두산 DEM(c)

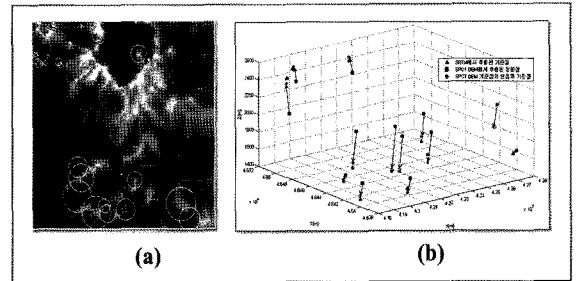


그림 5. SIFT를 이용한 90m 해상도 SRTM과 20m 해상도 SPOT DEM의 정합쌍(a), 3차원 Affine 변환에 의한 기하보정 전·후에 대한 SRTM DEM 기준점과 SPOT DEM 기준점의 공간상 거리변화 모습(b)

두 DEM에 대하여 영상기반의 SIFT 정합을 수행한 결과 29점이 추출되었다. 29점에서 2차원 Affine 변환식을 이용하여 변환오차가 95% 신뢰수준보다 큰 점을 반복적으로 제거하였다. 5번 반복후 RMSE가 0.97로 낮아졌으며, 이 때 남아있는 최종 정합 쌍 13점으로 3차원 Affine 변환을 수행하였다(식 2).

$$\begin{aligned}
 X_{srtm} &= 0.99966 \cdot X_{spot} + 0.00130 \cdot Y_{spot} - 0.08246 \cdot Z_{spot} - 5851.48 \\
 Y_{srtm} &= -0.00123 \cdot X_{spot} + 0.99895 \cdot Y_{spot} + 0.03072 \cdot Z_{spot} + 5461.34 \quad (2) \\
 Z_{srtm} &= 0.02830 \cdot X_{spot} + 0.05476 \cdot Y_{spot} + 0.46467 \cdot Z_{spot} - 265190
 \end{aligned}$$

13개의 3차원 좌표 값은 변환 전 평균 323.27m 떨어져 있었지만, 변환 식을 적용한 후, 평균 48.12m로 평균거리가 낮아졌다. 식(2)으로 SPOT 위성영상으로 제작한 DEM을 기하보정 하였다(그림 4의 c). 그림 4(c)의 DEM은 전체적으로 SRTM DEM과 유사한 형태로 변환 되었지만 해상도는 보정 전 DEM(그림 4의 b)과 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 제작한 DEM의 보정을 위해 SRTM DEM과 SIFT 매칭을 실시한 결과 정합 쌍을 토대로 변환 식을 적용하고, 기하보정 하였기 때문이다. 또한 기하보정한 DEM과 보정 전 DEM 각각에 대하여 SRTM DEM과의 차이 값을 비교한 결과 그림 6과 같았다. 그림 6에서 히스토그램 가로축은 높이 차이 값이고, 세로축은 빈도수이다. 전체적으로 보정 전 DEM과 SRTM DEM의 차이 값이 최소 -973.9m, 최대 1930.0m, 표준편차 213.1m인 반면에 보정 후 DEM은 최소 -695.8m, 최대 326.7m, 표준편차 122.2m의 결과를 보였으며, 이로부터 보정 후 DEM의 결과 정확도가 향상되었음을 알 수 있다.

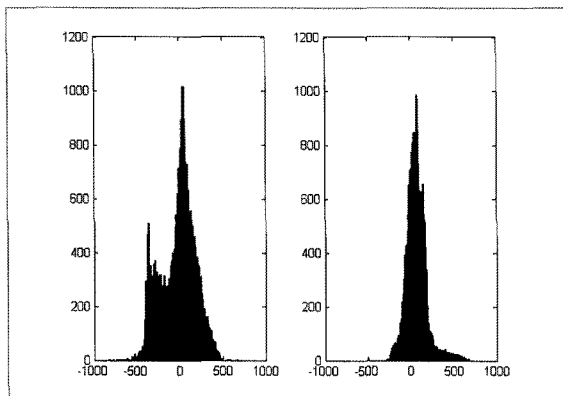


그림 6. SRTM DEM과 기하보정 전 SPOT DEM과의 차이에 대한 히스토그램(좌측그림), SRTM DEM과 기하보정 후 SPOT DEM과의 차이에 대한 히스토그램(우측그림)

따라서 본 연구를 통해 SPOT-5 위성영상을 이용하여 현 지관측 기준점 없이 SRTM-DEM의 위치 정확도에 접근하면서 보다 해상도가 높은 백두산 DEM을 제작할 수 있었으며, 보정된 DEM은 SRTM-DEM에 비해 백두산에 대한 보다 세밀한 지형정보를 제공할 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 백두산 지역의 SPOT-5 2A 레벨 스테레오 위성영상을 획득한 후, 제공 위성영상의 평면위치와

SRTM DEM의 표고로부터 기준점의 지상좌표를 획득하였으며, 이로부터 ERDAS를 이용하여 외부표정요소를 구하고, 자동매칭을 수행하여 DEM을 제작하였다. SPOT 위성영상으로 제작한 DEM은 SRTM DEM에 비해 해상도가 높고, 더욱 자세한 지형정보를 제공하였다. 그러나 제작한 DEM은 해상도에 비해 많은 오차를 포함하고 있기 때문에 제작한 DEM을 상대적으로 정확한 SRTM DEM과 SIFT 매칭시켜 기하보정하였다. 그 결과, SRTM DEM과의 3차원상의 공간거리 차이를 323.27m에서 48.12m로 7배 정도 줄일 수 있었으며, 전체적인 DEM의 차이도 대폭 줄일 수 있었다. 그러나 사용되는 기준점과 사용되는 변환식에 따라 결과의 정확도가 달라질 수 있을 것으로 판단되며, SIFT 방법이 아닌 다른 매칭방법도 생각해볼 필요가 있고, DEM의 새로운 변환 방법 또한 연구가 되어야 할 것으로 본다. 따라서 이에 대한 후속 연구가 계속 진행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 이러한 결과를 토대로 백두산 모니터링 연구를 보다 체계적으로 진행하기 위해, 시간과 비용이 요구되는 외국 위성영상에 의존하지 않고 향후 발사계획 중인 KOMPSAT 3호, 5호 등의 우리나라 다목적 실용 위성 등을 적극 활용할 필요가 있다.

#### 감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-331-2008-1-D00607)

#### 참고문헌

김상완 (2003), L-밴드 영상레이더 위상간섭기법을 이용한 백두산 및 부산지역의 지표면 변위관측, 박사 학위 논문, 연세대학교, pp. 1-174.  
 녹색연합 (2000), 백두산 관광으로 인한 환경훼손과 연결 녹색연합의 역할, 녹색연합, URL: [http://www.greenkorea.org/old\\_data/themenevents/themedata/20001116\\_backdu.htm](http://www.greenkorea.org/old_data/themenevents/themedata/20001116_backdu.htm).  
 소원주 (2010), 백두산 대폭발의 비밀, 사이언스북스, pp. 361-443.  
 이태윤, 김태정, 박완용 (2007), 정사영상과 DTED LEVEL 2 자료에서 자동 추출한 지상기 준점의 IKONOS 위성영상 모델링 적용 가능성 연구, 한국지형공간정보학회지, 한국지형 공간정보학회, 제 15권, 제 4호, pp. 103-109.

- 한동엽, 김대성, 이재빈, 오재홍, 김용일 (2006), SIFT 기법을 이용한 중·저해상도 위성영상 간의 자동 기하보정, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 24권, 제 5호, pp. 409-416.
- Farr, Tom G., Paul A. Rosen, Edward Caro, Robert Crippen, Riley Duren, Scott Hensley, Michael Kobrick, Mimi Paller, Ernesto Rodriguez, Ladislav Roth, David Seal, Scott Shaffer, Joanne Shimada, Jeffrey Umland, Marian Werner, Michael Oskin, Douglas Burbank, Douglas Alsdorf (2007), The Shuttle Radar Topography Mission, NASA, <http://www.jpl.nasa.gov/srtm>.
- Gonçalves, J. A., (2006), Orientation of SPOT stereopairs by means of matching a relative DEM and the SRTM-DEM. *Proceedings of the International Calibration and Orientation Workshop-EuroCow2006*, Barcelona(CD-ROM).
- Horn S. and Schmincke, H. U. (2000), Volatile emission during the eruption of Baitoushan volcano(China/North Korea) ca. 969 AD, *Bulletin of Volcanology*, Vol. 61, pp. 537-555.
- Kiyoshi H and Masahiko N. (2002), Real-time volcano activity mapping using ground-based digital imagery, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS, Vol. 57, pp. 159-168.
- Lowe, D. (2004), Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *International Journal on Computer Vision, IJCV*, Vol. 60, No. 2, pp. 91-110.
- Michael, A., Remo, B. and Dave, P. (1996), Revised Mapping of Lava Flows on Mount Etna, Sicily, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, ASPRS, Vol. 62, No.12, pp. 1353-1359.
- SPOT IMAGE (2003), SPOT IMAGE product & solution, SPOT IMAGE, [www.spotimage.com](http://www.spotimage.com)
- Vassilopoulou, S., Hurnia, L., Dietrich, V., Baltsavias, E., Paterakis, M., Lagios, E., Parcharidis, I. (2002), Orthophoto generation using IKONOS imagery and high-resolution DEM: a case study on volcanic hazard monitoring of Nisyros Island (Greece), *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS, 57, pp. 24-38.

---

(접수일 2010. 10. 15, 심사일 2010. 10. 23, 심사완료일 2010. 10. 27)