Landsat 위성영상을 이용한 킬리만자로 만년설 변화 분석

박승환* · 이명진**† · 정형섭*

*서울시립대학교 공간정보공학과

*한국환경정책평가연구원 국가기후변화적응센터

Analysis on the Snow Cover Variations at Mt. Kilimanjaro Using Landsat Satellite Images

Sung-Hwan Park*, Moun-Jin Lee** and Hyung-Sup Jung*

*Department of Geoinformatics, The University of Seoul

**Korea Adaptation Center for Climate Change, Korea Environment Institute

Abstract : Since the Industrial Revolution, CO₂ levels have been increasing with climate change. In this study, Analyze time-series changes in snow cover quantitatively and predict the vanishing point of snow cover statistically using remote sensing. The study area is Mt. Kilimanjaro, Tanzania. 23 image data of Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+, spanning the 27 years from June 1984 to July 2011, were acquired. For this study, first, atmospheric correction was performed on each image using the COST atmospheric correction model. Second, the snow cover area was extracted using the NDSI (Normalized Difference Snow Index) algorithm. Third, the minimum height of snow cover was determined using SRTM DEM. Finally, the vanishing point of snow cover was predicted using the trend line of a linear function. Analysis was divided using a total of 23 images and 17 images during the dry season. Results show that snow cover area decreased by approximately 6.47 km² from 9.01 km² to 2.54 km², equivalent to a 73% reduction. The minimum height of snow cover increased by approximately 290 m, from 4,603 m to 4,893 m. Using the trend line result shows that the snow cover area decreased by approximately 0.342 km² in the dry season and 0.421 km² overall each year. In contrast, the annual increase in the minimum height of snow cover was approximately 9.848 m in the dry season and 11.251 m overall. Based on this analysis of vanishing point, there will be no snow cover 2020 at 95% confidence interval. This study can be used to monitor global climate change by providing the change in snow cover area and reference data when studying this area or similar areas in future research.

Key Words : Snow cover, NDSI, Climate change, Mt. Kilimanjaro, Landsat

요약 : 산업혁명 이후 대기 중 이산화탄소 농도는 증가하고 있으며 이는 기후변화로 나타나고 있다. 본 연구에서는 기후변화에 의한 영향을 파악하기 위하여 원격탐사를 이용하여 만년설의 시계열 변화를 정량적으로 분석하고, 종설되는 시점을 통계적으로 예측하고자 한다. 연구지역은 아프리카 탄자니아의 킬리만자로 만년설이다. 1984년 6월부터 2011년 7월까지 전체 27년간 23장의 Landsat-5 TM 및 Landsat-7 ETM+ 자료를 사용하였다. 연구를 위하여 첫째, COST 대기보정 모델을 이용하여 각 영상들의 대기보정을 수행하

접수일(2012년 7월 5일), 수정일(1차 : 2012년 8월 6일, 2차 : 8월 18일), 게재확정일(2012년 8월 20일).

† 교신저자: 이명진(leemj@kei.re.kr)

었다. 둘째, NDSI(Normalized Difference Snow Index) 알고리즘을 이용하여 만년설 면적을 추출하였다. 셋째, SRTM DEM을 이용하여 만년설의 최저고도를 추출하였다. 마지막으로, 일차함수 형태의 추세를 활용하여 종설 시점을 예측하였다. 분석은 23장 전부를 활용한 것과 건기에 촬영된 17장만을 활용한 것으로 나누어 분석하였다. 분석결과 면적은 27년 동안 약 9.01 km^2 에서 약 2.54 km^2 로 약 6.47 km^2 감소하였고, 이는 약 73% 면적의 감소를 의미한다. 최저고도는 27년 동안 약 4,603 m에서 4,893 m로 약 290 m 상승하였다. 추세를 활용한 결과 면적은 매년 건기에 0.342 km^2 , 전체적으로 0.421 km^2 씩 감소하고 있으며, 최저고도는 매년 건기에 9,848 m, 전체적으로 11,251 m씩 상승하고 있는 것으로 나타났다. 면적 감소량을 통해 종설 시점을 예측한 결과 95% 신뢰도에서 2020년에 완전히 사라질 것으로 분석되었다. 이 연구는 적설지역의 변화를 통하여 전 지구의 기후변화를 모니터링할 수 있다는 근거를 제시했으며, 향후 연구지역 또는 유사 지역의 만년설 현황을 파악하는데 참고 자료로서 활용될 수 있을 것이다.

1. 서론

산업혁명 이후 인간활동 증가와 과도한 화석연료 사용으로 인해 대기 중 이산화탄소 농도는 증가하고 있으며, 이는 기후변화로 나타나고 있다. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 2007년 발간된 “제4차 기후변화 평가 보고서”는 온실가스 배출감축과 같은 노력으로 기후변화 현상을 완화시켜도 기후변화는 기존 배출된 온실가스에 의하여 향후 수 세기 이상 계속 진행될 것으로 예측하였다. 이러한 기후변화의 원인 및 배경에 대한 논의는 많지만, 기후변화 현상을 시계열, 정량적으로 나타내는 증거는 부족한 상황이다. 본 연구에서는 기후변화에 의한 영향을 파악하기 위하여 만년설¹⁾의 시계열 변화를 정량적으로 분석하였다.

만년설에 대한 기존의 연구는 다양한 방법으로 시도되었다. 가장 기본적인 방법으로 고위도 지역에 활용성이 높은 stake와 snowpit를 이용하여 계산한 적설심도를 통하여 만년설의 물질수지(mass-balance)를 직접 관측하는 방법과 저위도 지역에 활용성이 높은 물수지(water-balance)를 이용하여 물질수지를 계산하는 방법이 있다. 또한 만년설이 존재하는 지역에서 빙핵(ice-core)을 채취하여 만년설이 생성된 기후를 추측하는 방법이 있다. 빙핵이란 각 연도별 연륜층(annual layer)이 기록된 만년설을 의미하며, 연도별 연륜층에는 당해 연도의 공기가 들어있기 때문에 이를 분석하면 과거의 기온, 이산화탄소 및 메탄 농도 등을 추정할 수 있다. 이는 계절 변화와 만년설 변화에 대한 상관관계를 정립할

수 있는 중요한 자료이며, 기후변화에 따른 만년설 변화를 증명하는 자료로도 사용된다(Fujita *et al.*, 2006). Thompson *et al.*(2002)은 킬리만자로 만년설에서 6개의 빙핵을 채취한 후 화학적 및 물리적 분석을 통하여 과거 아프리카의 기후를 추정하였다. 추정된 기후와 자동기상관측자료(Automatic Weather Station; AWS), Landsat 위성영상자료와 항공영상자료를 이용하여 킬리만자로 만년설이 2015년에서 2020년 사이 소멸될 것이라고 예측하였다.

대부분의 만년설이 존재하는 지역은 고도 4,000 m 이상의 산악지역으로 물리적 접근이 어려운 지형적 특징을 가지고 있다. 그렇기 때문에 stake, snowpit 및 빙핵을 이용한 현장관측이 용이치 않으며, 비용의 문제로 인하여 장기간의 시계열 관측이 용이하지 못하다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 인공위성 영상을 이용한 원격탐사가 많이 활용되고 있다. 원격탐사를 활용할 경우, 넓은 범위의 자료를 손쉽게 얻을 수 있으며, 주기적으로 시계열 관측을 할 수 있다는 장점이 있다(Bamber and Dowdeswell, 1990). 특히 Landsat 위성영상은 1972년 Landsat 1호부터 현재의 Landsat 7호에 이르기까지 총 40년간의 누적된 시계열 자료를 확보할 수 있기 때문에 기후변화에 의한 영향을 분석하는데 효과적이다. 또한 30 m 급의 공간해상도와 7개의 밴드를 탑재하고 있어 다양한 파장대역의 분석이 가능하기 때문에 만년설의 시계열 변화를 관측하는데 활용성이 매우 높다(Bindschadler *et al.*, 2001).

기존의 Landsat 영상을 이용한 만년설 변화연구는 다음과 같다. Klein and Isacks(1999)는 단일 밴드를

이용하여 만년설의 면적을 추정하였다. Nolin(1998)은 일반적으로 눈을 분류할 때 사용하는 2번 밴드(Green band)와 5번 밴드(SWIR band)를 이용한 NDSI(Normalized Difference Snow Index) 알고리즘을 활용하여 만년설을 구분하는 연구를 수행하였다. Paul *et al.*(2004)은 1985년부터 1999년까지 4장의 위성영상자료를 이용하여 유럽에 위치한 알프스 산맥의 만년설 면적변화를 분석하였고, 그 결과 만년설 면적이 약 18% 감소하였다는 연구 결과를 발표하였다. Silverio *et al.*(2005)은 1970년부터 1996년까지 페루의 Cordillera Blanca의 만년설 면적이 약 15% 감소하였다고 밝혔다. 또한 Bolch *et al.*(2007)은 1955년부터 1999년까지 중국의 Tien Shan의 만년설 면적이 약 32%의 감소하였다는 연구를 수행하였다. 그러나 영상자료를 이용한 만년설 관련 연구는 단순히 연구기간 동안의 면적 변화에만 중점을 두어 미래 변화에 대한 예측이 이루어지지 않았으며, 6장 이하의 적은 수 영상자료만을 사용하여 정밀한 시계열 분석이 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 기후변화의 영향을 직접적으로 나타내는 만년설의 변화를 시계열 정량적으로 분석하고자 한다. 이를 위하여 만년설이 존재하는 아프리카 적도 부근 탄자니아 킬리만자로를 연구 대상지역으로 선정하여 1984년부터 2011년까지 총 27년간 Landsat TM과 ETM+ 23장을 분석하였다. 분석을 위하여 영상기반의 대기보정과 NDSI 알고리즘을 사용하였다. NDSI 알고리즘은 적설지역을 탐지하는데 장점이 있으며, 본 연구에서는 전술된 만년설의 정의를 반영하여 강수량이 거

의 없는 건기에도 존재하는 적설지역을 만년설로 분석하였다. 이로부터 만년설 면적 변화를 시계열로 분석하였다. 더욱이 SRTM DEM(Shuttle Radar Topography Mission)을 활용하여 적설지역의 최저고도변화를 시계열로 분석하여 기후변화가 지속적으로 진행될 때 연구지역의 만년설의 종설 시점을 통계적으로 분석하였다. 본 연구의 결과는 만년설 지역의 변화를 통하여 전지구의 기후변화를 모니터링할 수 있는 방법을 적용한 것으로, 향후 연구지역 또는 유사 지역의 만년설 현황을 파악하는데 참고 자료로서 활용될 수 있을 것이다.

2. 연구 방법

1) 연구지역 및 활용 영상

연구지역은 아프리카의 킬리만자로이며, 탄자니아와 케냐의 국경선에 해당한다. 위경도는 남위 $2^{\circ} 45' \sim 3^{\circ} 25'$, 동경 $37^{\circ} 00' \sim 37^{\circ} 43'$ 에 위치한다(Fig. 1). 킬리만자로는 아프리카 대륙 최고봉으로 지구에서 가장 큰 휴화산이며 중위도 적도 지방에서 만년설이 존재하는 지역이다. 킬리만자로는 키보(Kibo), 마웬지(Mawenzi), 시라(Sira)의 세 화산으로 구성되어 있으며 가장 높은 키보 화산의 고도는 약 5,895 m로 아프리카에서 가장 높고, 세계에서는 5번째로 높다. 키보 화산의 정상은 만년설에 덮인 둥근 지붕처럼 보이지만 분화구에는 너비 1.9 km, 최고수심 300 m의 칼데라 호가 있다(Hemp, 2005). 연

Fig. 1. Location map of the Mt. Kilimanjaro.

Table 1. Characteristics of the Landsat data

Date	Sensor	Season	Date	Sensor	Season	Date	Sensor	Season
19840624	TM	Dry	19921231	TM	Wet	20020821	ETM+	Dry
19580118	TM	Dry	19950319	TM	Wet	20030301	ETM+	Wet
19580323	TM	Wet	19990914	ETM+	Dry	20090613	TM	Dry
19860801	TM	Dry	20000714	ETM+	Dry	20090715	TM	Dry
19861020	TM	Wet	20010701	ETM+	Dry	20100819	TM	Dry
19870225	TM	Dry	20010818	ETM+	Dry	20110705	TM	Dry
19870414	TM	Wet	20020210	ETM+	Dry	20110721	TM	Dry
19870601	TM	Dry	20020602	ETM+	Dry

Fig. 2. Division of the Landsat TM/ETM+ images into wet and dry seasons. In this study, a total of 23 Landsat images are used for time-series analysis of snow cover change.

구지역은 1900년대 초부터 만년설 변화가 관측되었으며, 세계빙하관측서비스(World Glacier Monitoring Service)의 조사에 따르면 만년설이 사라지는 속도는 꾸준히 증가하고 있다(World Glacier Monitoring Service, 2008).

기온은 연평균 기온이 23.4°C 인 모시(Moshi) 시로부터 100 m 당 0.56°C 씩 감소하여 키보 화산에서는 -7.1°C 이다(Tompson *et al.*, 2002). 기후는 적도부근의 열대성 기후이며, 강수량에 따라 10~12월에 짧은 우기, 3~5월에 긴 우기 등 1년에 두 번의 우기를 가진다(Ageawala *et al.*, 2003). 킬리만자로의 경우 각 고도에 따라 다양한 강수량이 관측되고 있으며, 2,100 m까지는 연간 2,000 mm 이상, 3,000 m까지는 연간 1,000 mm에서 1,500 mm사이 이며 정상부근에는 1,000 mm이하의 강수량이 관측되고 있다(Hemp, 2001a). 또한 1900년부터 킬리만자로의 전체적인 강수량은 감소하고 있으며 1990년대 후반부터 2000년대에는 연도에 따라 최대

1,000 mm의 강수량 차이가 나타나고 있다(Hemp, 2005).

만년설의 변화를 분석하기 위하여 1984년 6월 24일부터 2011년 7월 21일까지 총 23장의 Landsat TM 및 ETM+ 영상자료와 SRTM DEM을 사용하였다(Table. 1). 사용한 위성영상자료 23장 중 17장은 건기에 촬영되었으며, 7장은 우기에 촬영되었다(Fig. 2). 만년설 변화를 분석할 때 시계열 적설 변화를 연구하기 위하여 23장 전부를 활용한 것과, 시계열 만년설 변화를 연구하기 위하여 건기에 촬영된 17장만을 활용한 것으로 나누어 분석하였다.

2) 연구 방법

연구지역을 선정하여 위성영상자료 및 SRTM DEM을 사용하였다. 자료 전처리 중 SRTM DEM은 공간해상도가 90 m 이다. 사용된 위성영상자료와의 공간해상도 통일을 위하여 30 m 로 공간해상도를 조정(resampling)하였다. 위성영상자료 및 DEM의 기하

Fig. 3. Detailed work flow used in this study.

보정을 통하여 좌표체계를 통일하였다. 다중 시기 광학위성영상자료 분석에서 필수적인 전처리 과정이 대기보정이다. 이를 위하여 본 연구에서는 우선적으로 개별 영상자료의 DN(Digital Number) 값을 복사휘도 값(radiance)으로 변환하였고, 복사휘도 값을 지표의 반사율(reflectance)로 변환하는 대기보정을 수행하였다. 대기보정이 완료된 영상을 NDSI 알고리즘을 이용하여 시계열별 만년설의 면적 변화를 분석하였다. 또한 연구지역의 SRTM DEM과 중첩하여 시계열별 만년설의 고도별 분포 변화를 분석하였다. 마지막으로 연구지역의 종설 시점을 통계적으로 분석하였다. 연구는 다음의 순서를 통하여 진행 되었다(Fig. 3).

(1) 대기보정

광학위성영상을 활용하여 시계열 분석을 수행하기 위해서는 대기보정이 필수적이다. 광학위성영상은 DN 값의 변화를 통하여 관측을 수행하는 것이다. 대기의 산란(scattering), 흡수(absorption) 및 굴절(refraction)은 영상자료에 직접적인 영향을 미쳐 지표의 반사율을 왜곡시키는 주요 원인이 된다(Chavez, 1996). 그렇기 때문에 전체 활용되는 시계열 영상에서 동일한 방법으

로 제거해 주는 것이 연구결과의 정확도를 높일 수 있다. 따라서 만년설의 반사율을 추정하기 위해서는 대기보정이 필수적으로 선행되어야 한다. 대기에 의한 영향을 보정하기 위하여 사용되는 방법은 대기모델을 이용하는 방법과 영상을 이용하는 방법이 있다. 대기모델을 이용하는 방법은 MODTRAN²⁰과 같은 대기모델을 이용하여 투과율, 대기의 상향복사량, 대기의 하향복사량 등을 구하여 보정하는 방법이며, 이 경우 영상촬영 당시의 대기 자료를 기반으로 하기 때문에 매우 정밀한 대기보정을 수행할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 영상촬영지역에 대한 대기관측 자료가 필요하며, 이 경우 많은 인력과 비용, 시간 등이 소요된다. 또한 자료를 얻기 어려운 지역에 대해서는 적용하기가 힘들다는 한계점이 있다.

따라서 본 연구에서는 사람이 접근하기 힘든 산악지형을 연구지역으로 선정하였기 때문에 영상을 기반으로 대기에 의한 영향을 보정하였다. 이 경우 직접적인 대기관측 자료가 필요하지 않다는 장점이 있다. 영상기반에 의한 대기보정은 그림자와 잔잔한 호수 등 영상 내 완전 흑체(Dark-object) 지역의 픽셀 값은 0이어야 하지만, 대기산란과 같은 영향이 이 지역에 존재한다면 완벽히 암흑이 될 수 없다는 가정하에 수행되며 다양한 알고리

즘들이 개발되어 왔다. 그러나 영상 내에서 완전 흑체 선정은 연구자의 주관적인 판단에 의존하며, 잘못 선정하였을 경우 과대보정이 이루어는 단점이 있다. 또한 각 알고리즘 별로 가정하는 바가 조금씩 다르다는 문제점이 제기되고 있다.

일반적인 대기보정은 위성센서에 기록된 복사휘도 값(radiance)을 지표의 반사율(reflectance)로 변환하는 것으로 수행할 수 있으며, 그 식은 다음과 같다.

$$L_{\lambda} = \frac{1}{\pi} \rho T_{\theta_0} \left(\frac{ESUN}{d^2} T_{\theta_0} \cos \theta_z + E_{d\downarrow} \right) + E_{d\uparrow} \quad (1)$$

위 식에서 L_{λ} 는 위성센서에 기록된 복사휘도 값(radiance), ρ 는 지표의 반사율(reflectance), $ESUN_{\lambda}$ 은 태양으로부터 복사된 복사조도(irradiance), d 는 태양과 지구와의 거리이며, T_{θ_0} 는 대기의 투과율, θ_z 는 태양의 천정각(zenith angle), $E_{d\downarrow}$ 는 대기의 하향복사량, $E_{d\uparrow}$ 는 대기의 상향복사량을 의미한다.

본 연구에서 선정한 대기보정 모델은 Chavez (1996)가 제안한 COST(cosine approximation) 대기보정 모델이다. 이 모델은 대기의 하향복사량은 무시하기 때문에 무시해도 된다고 가정하였고, 태양에서 지표까지의 대기투과율을 cosine값으로 근사화한 것이 특징이다. COST 대기보정 모델 식은 아래와 같다.

$$r = \frac{\pi(L_{\lambda} - L_p) \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cdot T_{\theta_0} \cdot \cos \theta_z} \quad (2)$$

Chavez는 현실적으로 반사율이 0인 지역은 존재하지 않을 것이라는 가정하에 완전 흑체의 반사율을 1%

로 결정하고 이로부터 대기의 상향복사량을 구하였다. Chavez가 제안한 대기의 상향복사량은 다음 식을 통해 구할 수 있다.

$$L_p = L_{s_d} - \frac{\rho_d \cdot \cos \theta_z \cdot ESUN_{\lambda}}{d^2 \cdot \pi} \quad (3)$$

위 식에서 L_p 는 대기의 상향복사량, L_{s_d} 는 dark-object에서의 복사휘도, ρ_d 는 완전 흑체의 반사율을 의미하며 0.01의 값을 가지고, $ESUN_{\lambda}$ 은 태양으로부터 복사된 복사조도(irradiance), d 는 태양과 지구와의 거리이며, θ_z 는 태양의 천정각(zenith angle)을 의미한다.

(2) NDSI 알고리즘을 이용한 시계열 만년설 면적 변화

기후변화가 발생하는 정량적, 과학적 증명을 위한 다양한 연구 중에서 만년설의 변화를 측정하는 것은 중요한 방법 중에 하나이다. 광학위성영상을 활용하여 만년설의 면적을 산출함에 있어서 가장 중요한 것은 적설지역과 구름을 효과적으로 분류하는 것이다. 잘못된 적설지역과 구름의 분류는 위성영상자료를 이용한 적설지역의 변화 분석에 있어서 직접적인 오차의 요인이 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Riggs *et al.* (1994)은 적설지역을 탐지하기 위해서 파장에 따른 적설지역의 반사율 특성을 분석하고, Terra, Aqua MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 위성영상으로부터 NDSI알고리즘을 개발하였다. 일반적으로 적설지역은 가시광선 및 근적외선 파장대역에서 매우 높은 반사율을 가지며, 약 80%의 반사율을 가지고 있다(Hall *et al.*, 1990). 그렇기 때문에 가시광선 및 근적외선 파

Fig. 4. Reflectance spectral of water cloud, ice cloud, snow surface(Gao *et al.*, 1998).

장대역에서는 구름과 유사한 반사율을 보이며, 구름과 적설지역을 구별하는 것은 가장 어려운 위성자료 처리 과정 중 하나이다(Riggs *et al.*, 1994). 그러나 구름에 비해 $1.65\ \mu\text{m}$ 파장대역에서는 상대적으로 낮은 반사율을 보인다(Fig. 4).

따라서 $1.65\ \mu\text{m}$ 파장대역을 이용하여 적설지역과 구름을 구별하기 위하여 NDSI알고리즘이 개발되었으며, 그 식은 다음과 같다.

$$NDSI = \frac{\rho_{0.56\mu\text{m}} - \rho_{0.165\mu\text{m}}}{\rho_{0.56\mu\text{m}} + \rho_{0.165\mu\text{m}}} \quad (4)$$

위 식에서 $\rho_{0.56\mu\text{m}}$ 은 $0.56\ \mu\text{m}$ 파장대역에서의 반사율을 의미하며, $\rho_{0.165\mu\text{m}}$ 은 $1.65\ \mu\text{m}$ 파장대역에서의 반사율을 의미한다. Landsat의 경우 $0.56\ \mu\text{m}$ 파장대역은 밴드 2번에 해당하고 $1.65\ \mu\text{m}$ 파장대역은 밴드 5번에 해당한다.

NDSI 알고리즘은 위와 같이 적설지역을 탐지하는데 유용하며 연구지역의 특성상 건기에는 강수량이 거의 없기 때문에, 본 연구에서는 건기에도 존재하는 적설지역을 만년설로 가정하였다. 따라서 연구지역의 만년설 변화를 분석하기 위하여 대기보정이 완료된 각각의 영상에 NDSI 알고리즘을 적용하였다. 적용한 영상은 1984년 6월 24일부터 2011년 7월 21일까지 이다. Fig. 5(a)는 1984년 6월 24일 영상이며, Fig. 5(b)는 2011년 7월 21일 영상이다. 동일 지역에 대하여 시각적으로 판단하여도, 27년간 상당히 많은 양의 만년설의 면적이 감소하였음을 알 수 있다.

(3) SRTM을 이용한 시계열 적설지역 고도 변화

기후변화에 의하여 온도가 증가함에 따라 만년설이 감소하고, 만년설의 고도별 분포는 변하고 있다(Noble, 1993). 본 연구에서는 만년설이 분포된 고도 중 가장 작은 고도를 최저고도라고 하였다. 시계열 만년설의 최저고도 변화를 분석하는 것은 시계열 만년설의 면적 변화와 더불어 기후변화 현상을 정량적으로 나타내는 증거 자료로서 활용될 수 있다.

시계열 만년설의 고도별 분포 변화를 분석하기 위해 SRTM DEM을 활용하였다. SRTM DEM은 간섭계(interferometry)의 원리를 이용하여 미국항공우주국에서 제작한 DEM자료이다. 지구 전체의 고해상도 지형 정보를 구축하기 위해 2000년 2월 11일에 발사된 우주왕복선에 2개의 SAR 안테나를 장착하였으며, 11일 동안 남위 $60^{\circ} 00'$ 에서 북위 $60^{\circ} 00'$ 까지 DEM을 구축하였다. 관련 해상도는 미국의 경우 30 m, 미국을 제외한 지역은 90 m의 해상도를 지니고 있다. 또한, 데이터는 가로 및 세로 EGM96 지오이드(geoid)를 참고하여 경위도 좌표계로 표현하고 있다.

SRTM DEM과 Landsat 위성자료와의 공간해상도 통일을 위하여 Cubic convolution과정을 거쳐 90 m의 공간해상도를 30 m의 공간해상도로 조정을 수행하였다. 또한 기하보정을 통하여 Landsat 위성영상자료와 좌표체계를 통일하였다. NDSI알고리즘을 적용하여 산출된 만년설의 면적에 SRTM DEM을 중첩시켜 시계열

Fig. 5. Result of applying the NDSI algorithm, 24 Jun. 1984 (a), 21 Jul. 2011 (b).

Fig. 6. Result of snow elevation using SRTM DEM, 24 Jun. 1984 (a), 21 Jul. 2011 (b).

Fig. 7. Result of snow cover area and lower elevation, 24 Jun. 1984 (a), 21 Jul. 2011 (b).

만년설의 고도별 분포 변화를 분석하였다. Fig. 6(a)는 1984년 6월 24일 영상이며, Fig. 6(b)는 2011년 7월 21일 영상이다. 동일 지역에 대하여 고도별 분포 변화를 시각적으로 판단하여도, 27년간 만년설의 최저고도가 상승하였음을 알 수 있다.

(4) 만년설의 종설 시점 분석

본 연구에서는 만년설의 변화를 시계열로 분석하였으며, 1984년 6월 24일 영상과 2011년 7월 21일 영상간의 시각적 분석 결과에서 만년설의 면적이 점진적으로 감소하고, 최저고도가 상승하는 것을 알 수 있었다. 만년설의 종설 시점을 예측하기 위하여 1984년 6월 24일 영상과 2011년 7월 21일 영상간의 정량적 분석을 수행하였다. NDSI 알고리즘을 이용하여 만년설로 분류된

화소를 SRTM을 이용하여 고도별로 집계 하였으며, 가장 작은 고도값을 최저고도로 하였다. 각 화소에 Landsat 위성영상자료의 공간해상도에 해당하는 면적을 곱하여 만년설의 총 면적을 구하였다. 또한 도수분포표를 이용하여 만년설의 전체적인 고도별 분포를 확인하였다. Fig. 7(a)는 1984년 6월 24일 영상에 대한 면적과 최저고도를 분석한 것이며, Fig. 7(b)는 2011년 7월 21일 영상에 대한 면적과 최저고도를 분석한 것이다. 동일 지역에 대하여 면적 및 고도 변화를 정량적으로 분석하였을 때, 만년설의 면적은 약 6.47 km^2 감소하였으며, 최저고도는 1984년 4,603 m에서 2011년 4,893 m로 약 290 m 상승하였다. 이러한 추세와 기후변화에 의한 영향이 지속적으로 발생하는 점 및 만년설 보호를 위한 특별한 행위가 수행되지 않는다는 현재와 같은 조건

에서, 사용한 영상을 바탕으로 기후변화가 지속적으로 진행될 때 지역의 만년설이 종설되는 시기를 통계적으로 예측하였다. 본 연구에 활용된 23장 전체 및 건기에 해당하는 17장만을 선택하여 같은 방법으로 정량적 분석을 수행한 후, 일차함수 형태의 추세선으로 도식화하여 분석하였다. 또한, Thompson *et al.*(2002)이 연구한 킬리만자로의 종설시점과 비교를 통한 검증을 실시하였다

3. 연구 결과

만년설의 변화를 정량적으로 분석하기 위하여 NDSI 알고리즘과 SRTM을 활용하였다. Table 2는 각 영상에 해당하는 적설지역 및 만년설의 면적과 최저고도 분석 결과를 나타낸다. 우기에 촬영된 영상은 대체적으로 건기에 촬영된 앞선 영상에 비하여 면적의 증가와 최저고도의 감소를 나타냈다. 적설지역의 면적 변화를 시계열로 도열(Fig. 8)하여 전체 영상을 분석한 경우 0.725(Fig. 8a) 및 건기에 해당하는 영상만을 분석한 경우 0.712(Fig. 8b)의 상관관계를 나타냈다. 적설지역의 최저고도 변화를 시계열로 도열(Fig. 9)하여 전체 영상을 분석한 경우 0.645(Fig. 9a) 및 건기에 해당하는 영상만을 분석한 경우 0.621(Fig. 9b)의 상관관계가 나타났다.

분석된 결과를 바탕으로 지속적인 기후변화에 의한

Table 2. Result of snow cover area and lower elevation

Date	Sensor	Season	Snow Cover Area(km ²)	Lower Elevation(m)
19840624	TM	Dry	9.005	4603
19850118	TM	Dry	11.581	4685
19850323	TM	Wet	13.517	4498
19860801	TM	Dry	7.352	4672
19861020	TM	Wet	17.496	4550
19870225	TM	Dry	15.451	4580
19870414	TM	Wet	14.040	4598
19870601	TM	Dry	10.598	4572
19921231	TM	Wet	14.069	4468
19950319	TM	Wet	7.142	4626
19990914	ETM+	Dry	7.272	4784
20000714	ETM+	Dry	3.845	4638
20010701	ETM+	Dry	8.558	4659
20010818	ETM+	Dry	4.947	4779
20020210	ETM+	Dry	2.980	4816
20020602	ETM+	Dry	4.766	4847
20020821	ETM+	Dry	2.792	4858
20030301	ETM+	Wet	6.891	4627
20090613	TM	Dry	2.641	4752
20090715	TM	Dry	2.062	4863
20100819	TM	Dry	2.243	4983
20110705	TM	Dry	2.997	4817
20110721	TM	Dry	2.543	4893

만년설의 종설 시점을 통계적으로 예측하였다. 만년설의 면적은 일차함수의 추세선을 활용하여 나타낸 결과 기울기는 건기에 -0.342, 전체적으로는 -0.421로 나타

Fig. 8. Time-series analysis of snow cover change, used 17 images in dry season (a), used 23 images (b).

Fig. 9. Time-series analysis of lower elevation change, used 17 images in dry season (a), used 23 images (b).

났다. 이는 매년 만년설의 면적 감소량을 의미하며 연간 건기에 0.342 km^2 , 전체적으로는 0.421 km^2 씩 감소하는 것으로 나타났다. 이때 추세선의 표준편차는 건기에 ± 1.814 이며, 전체적으로는 ± 2.655 로 나타났다. 또한 만년설의 최저고도는 추세선을 활용하여 나타낸 결과 기울기는 건기에 9.848, 전체적으로는 11.427로 나타났다. 이는 매년 최저고도 상승량을 의미하며 연간 건기에 9.889 m, 전체적으로 11.251 m씩 상승하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 만년설은 건기뿐만 아니라 다른 시기에도 점진적으로 감소하고 있음을 나타낸다. 최종적으로 추세선을 활용하여 만년설의 면적이 0이 되는 시점을 면적감소량을 이용하여 계산한 결과 킬리만자로의 만년설은 95%의 신뢰도에서 2020년에 완전히 사라질 것으로 분석되었다.

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 기후변화의 영향을 직접적으로 나타내는 만년설의 변화를 시계열 정량적으로 분석하고자 하였다. 이를 위하여 만년설이 존재하는 아프리카 적도 부근 탄자니아 킬리만자로를 연구 대상지역으로 선정하였고, 1984년부터 2011년까지 총 27년간 Landsat TM과 ETM+ 23장을 분석하였다. 영상기반의 대기보정(COST Model)과 NDSI알고리즘으로부터 만년설의 면적 변화를 시계열로 분석하였다. 또한 SRTM DEM을

활용하여 만년설의 최저고도 변화를 시계열로 분석하였다. 마지막으로 기후변화가 지속적으로 진행되며 만년설 보호를 위한 행위를 수행하지 않는다는 조건에서, 연구지역의 만년설이 사라지는 시기를 통계적으로 분석하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, NDSI알고리즘을 적용하여 만년설의 면적 변화를 시계열로 분석했을 때, 1984년에는 9.01 km^2 이었지만 2011년에는 2.54 km^2 로 27년 동안 약 6.47 km^2 감소하였으며 약 73%의 면적 감소를 나타냈다. 일차함수 형태의 추세선을 활용한 결과 면적은 시간에 흐름에 따라 음의 상관관계를 가지며, 매년 건기에 0.342 km^2 , 전체적으로는 0.421 km^2 씩 감소하는 것으로 나타났다. 상관계수는 전체 영상자료를 활용한 경우 0.712, 건기에 촬영된 영상자료만을 활용한 경우 0.725로 나타났다. 따라서 지속적으로 면적은 감소할 것이며, 최종적으로 킬리만자로의 만년설은 건기 영상만 활용한 경우 95%의 신뢰도에서 2020년에 완전히 사라질 것으로 분석되었다.

둘째, SRTM을 활용하여 만년설의 최저고도 변화를 시계열로 분석했을 때, 1984년에는 4,603 m 고도에서부터 만년설이 존재하였지만 2011년에는 4,893 m 고도에서부터 만년설이 존재하여 27년 동안 약 290m 상승하였음을 나타냈다. 일차함수 형태의 추세선을 활용한 결과 최저고도는 시간에 흐름에 따라 양의 상관관계를 가지며, 매년 건기에 9.848 m, 전체적으로 11.251 m씩 상승하고 있는 것으로 나타났다. 상관계수는 전체 영상

자료를 활용한 경우 0.621, 건기에 촬영된 영상자료만을 활용한 경우 0.645로 나타났다. 분석된 상관계수가 높지 않은 이유는 킬리만자로의 강수량이 연도별 최대 1,000 mm(Hemp, 2005)의 차이가 발생하는 것과 유기적 관계가 있는 것으로 사료된다.

본 연구를 통하여 기후변화에 의한 만년설의 면적 및 최저고도를 정량적으로 파악할 수 있었다. 또한 기후변화가 지속적으로 발생하고 연구지역은 이를 위한 대응행위를 하지 않는다는 조건에서의 통계적 방법을 이용하여 연구지역의 종설 시점을 파악하였다. 95%의 신뢰도에서 킬리만자로의 만년설은 2020년에 완전히 사라질 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 Thompson *et al.* (2002)이 현장관측을 통하여 예측한 킬리만자로 만년설 종설시점(2015년~2020년 사이)과 유사하다. 또한 일시적인 영상 자료에 국한되지 않은 장기간의 영상을 이용하여 만년설의 변화를 정량적으로 분석한 연구이다. 따라서 향후 연구지역 또는 유사 지역의 만년설 현황을 원격탐사를 이용하여 파악하는데 참고 자료로서의 활용성이 매우 높은 것으로 사료된다. 그럼에도 불구하고 본 연구는 몇가지 한계를 가지고 있다. 첫째, 연구지역의 만년설을 체계적으로 관리하거나 조사된 현장자료가 부족한 실정이며 현장 관측자료와 비교 검증을 수행하지 못하였다. 동일한 사유로 현재 IPCC에서는 전체 관측 빙하 46,000개 중 600개만 모니터링 하고 있다. 둘째, 위성영상 처리 기법인 NDSI알고리즘만을 활용하여 종설 시점을 예측하였다. 향후에는 이기종 센서 분석 등을 통한 영상간의 교차 검증도 고려할만 하다. 차후 현장검증 자료 수집을 통한 직접 검증 또는 다양한 분석 기법 비교를 통한 간접검증을 반영하는 포괄적인 논의가 필요하다.

사 사

본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었으며(2012 R1A1A2005801), 또한 공간정보 전문 인력 양성사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

주

- 1) 강설량이 녹는 양보다 많아서 해마다 내린 눈이 녹지 않고 쌓인 것을 말한다. 일시적으로 적설된 것이 아닌 지속적으로 존재하는 하는 것을 의미하며 눈의 압축되어 밀도가 증가하여, 0.4~0.6 g/cc 정도를 만년설이라 한다(두산백과, www.doopedia.co.kr).
- 2) MODTRAN(MODerate resolution atmospheric TRANsmision)은 미공군에서 개발한 대기복사 모델로 0부터 50,000 cm^{-1} 까지의 주파수 범위에 대해 0.2 cm^{-1} 의 스펙트럼 해상도마다 대기 투과율(transmittance)과 복사량(radiance)을 계산하는데 사용된다.

참고문헌

- 염종민, 한경수, 이가람, 2009. 적설역에서 나타나는 적외 휘도온도와 반사도 특성, 대한원격탐사학회지, 25(2): 193-203.
- Agrawala, S., A. Moehner, A. Hemp, M. van Aalst, S. Hitz, J. Smith, H. Meena, S.M. Mwakifwamba, T. Hyera, and O.U. Mwaipopo, 2003. Development and climate change in Tanzania: focus on Mountain Kilimanjaro, COM/ENV/EPOC/DCD/DAC (2003)5/FINAL. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, France.
- Bamber, J.L. and J.A. Dowdeswell, 1990. Remote-sensing studies of Kvitoyjokulen, an ice cap on Kvitoya, North-east Svalbard, *Journal of Glaciology*, 36(122): 75-81.
- Bindschadler, R., J.A. Dowdeswell, D. Hall, and J.G. Winther, 2001. Glaciological applications with Landsat-7 imagery: Early assessments, *Remote Sensing of Environment*, 78(1-2): 163-179.
- Bolch, T., 2007. Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data, *Global and Planetary Change*, 56(1-2): 1-12.
- Braithwaite, R.J., 2002. Glacier mass balance: the first 50 years of international monitoring, *Progress in Physical Geography*, 26(1): 76-95.

- Chavez, P.S., 1996. Image-based atmospheric corrections revisited and improved, *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 62: 1025-1036.
- Fujita, K., L.G. Thompson, Y. Ageta, and T. Yasunari, 2006. Thirty-year history of glacier melting in the Nepal Himalayas, *Journal of Geophysical Research*, 111: 1-6.
- Gao, B.C., W. Han, S.C. Tsay, and N.F. Larsen, 1998. Cloud detection over the Arctic region using airborne imaging spectrometer data during the daytime, *Journal of Applied Meteorology*, 37: 1421-1429.
- Hall, D.K., W.M. Kovalick, and A.T.C. Chang, 1990. Satellite-derived reflectance of snow-covered surfaces in Northern Minnesota, *Remote Sensing of Environment*, 33: 87-96.
- Hemp, A., 2001a. Ecology of the pteridophytes on the southern slopes of Mt. Kilimanjaro. Part II: Habitat selection, *Plant Biology*, 3: 493-523.
- Hemp, A., 2005. Climate change driven forest fires marginalize the impact of ice cap wasting on Kilimanjaro, *Global Change Biology*, 11: 1013-1023.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007 –Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.I. Parry, O.F. Canziani, J.P. Patulikof, P.J. van der Linden, and C.E. Hanson, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kaser, G. and C. Georges, 1999. On the mass balance of low latitude glaciers with particular consideration of the Peruvian Cordillera Blanca, *Geografiska Annaler*, 81A(4): 643-652.
- Klein, A.G. and B.L. Isacks, 1999. Spectral mixture analysis of Landsat thematic mapper images applied to the detection of the transient snowline on tropical Andean glaciers, *Global and Planetary Change*, 22: 139-154.
- Noble, I.R., 1993. A model of the responses of ecotones to climate change, *Ecological Applications*, 3(3): 396-403.
- Nolin, A.W., 1998. Mapping the Martian polar ice caps; Applications of terrestrial optical remote sensing methods, *Journal of Geophysical Research*, 103: 851-864.
- Østrem, G. and M. Brugman, 1991. Glacier mass-balance measurements: a manual for field and office work, NHRI Science Report No. 4: 224.
- Paul, F., A. Kaab, M. Maisch, T. Kellenberger, and W. Haeberli, 2004. Rapid disintegration of Alpine glaciers observed with satellite data, *Geophysical Research Letters*, 31: 1-4.
- Riggs, G.A., D.K. Hall, and V.V. Salomonson, 1994. A snow index for the Landsat Thematic Mapper and moderate resolution imaging spectroradiometer, *Proceedings of 1994 International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS)*, Pasadena, California, USA, Aug. 8-12, pp. 1942-1944.
- Silverio, W. and J.M. Jaquet, 2005. Glacial cover mapping (1987-1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery, *Remote Sensing of Environment*, 95: 342-350.
- Thompson, L.G., E. Mosley-Thompson, and M.E. Davis, 2002. Kilimanjaro ice core records: evidence of holocene climate change in tropical Africa, *Science*, 298: 589-593.
- WGMS, 2008. *Global glacier changes: facts and figures*, M. Zemp, I. Roer, A. Kaab, M. Hoelzle, F. Paul, W. Haeberli, University of Zurich Press, Zurich, Swiss.