Landsat TM과 ETM+를 이용한 인도네시아 메라피 화산의 화산쇄설물 분포와 지표 온도 시계열 분석

조민지* · 종 루** · 이창욱*†

*기상청 국립기상연구소, **Cascades Volcano Observatory, U.S.Geological Survey (USGS)

Time-series Analysis of Pyroclastic Flow Deposit and Surface Temperature at Merapi Volcano in Indonesia Using Landsat TM and ETM⁺

Minji Cho*, Zhong Lu** and Chang-Wook Lee*†

*National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration

**Cascades Volcano Observatory, U.S.Geological Survey (USGS)

Abstract : Located on Java subduction zone, Merapi volcano is an active stratovolcano with a volcanic activity cycle of 1-5 years. Merapi's eruptions were relatively small with VEI 1-3. However, the most recent eruption occurred in 2010 was quite violent with VEI 4 and 386 people were killed. In this study, we have attempted to study the characteristics of Merapi's eruptions during 18 years using optical Landsat images. We have collected a total of 55 Landsat images acquired from July 6, 1994 to September 1, 2012 to identify pyroclastic flows and their temporal changes from false color images. To extract areal extents of pyroclastic flows, we have performed supervised classification after atmospheric correction by using COST model. As a result, the extracted dimensions of pyroclastic flows are nearly identical to the CVP monthly reports. We have converted the thermal band of Landsat TM and ETM⁺ to the surface temperature using NASA empirical formula and calculated time-series of the mean surface temperature in the area of peak temperature surrounding the crater. The mean surface temperature around the crater repeatedly showed the tendency to rapidly rise before eruptions and cool down after eruptions. Although Landsat satellite images had some limitations due to weather conditions, these images were useful tool to observe the precursor changes in surface temperature before eruptions and map the pyroclastic flow deposits after eruptions at Merapi volcano.

Key Words : Merapi volcano, Landsat, thermal band, band composition, surface cover change

요약 : 자바 섭입대 위에 존재하는 인도네시아 메라피 화산은 1~5년의 주기를 가지는 화산활동이 활발한 성층화산이다. 대체적으로 화산폭발지수가 1-3정도의 규모로 나타나는데 비해 최근 2010년 분화는 화산폭

접수일(2013년 8월 13일), 수정일(1차 : 2013년 8월 27일, 2차 : 9월 25일), 게재확정일(2013년 10월 4일).

† 교신저자: 이창욱(cwlee@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

발지수가 4까지 올라가 386명을 사망자를 유발했다. 본 연구에서는 40년간 지구를 관측해온 Landsat 영상을 이용하여 18년 동안 메라피 화산의 지표변화를 관측하였다. 연구를 위해 1994년 7월 6일부터 2012년 9월 1일까지 총 55장의 Landsat-5,7 영상을 수집하였으며, 밴드조합영상을 통해 화산쇄설류의 흐름이 시간에 따라 이동함을 확인하였다. 화산쇄설류가 덮고 있는 지역을 추출하기 위해서, COST model을 이용한 대기보정 후 감도분류를 수행하였으며, 그 결과 CVP 보고서에 기재된 화산쇄설류의 분화 방향과 추출된 화산쇄설류 영역의 변화가 거의 일치했다. NASA에서 제공하는 Landsat-5,7 위성의 열적외선 밴드를 이용한 온도 추출 기법을 적용하여 분화구 지역의 평균 지표온도를 산출한 결과, 분화 전 지표 온도가 급격히 상승하고, 분화 후 온도가 하강하는 양상을 반복적으로 나타냈다. 비록 기상조건에 따른 영상획득에 제약이 있지만, 장기간 발생한 메라피 화산의 지표변화를 확인하는데 있어서 Landsat 위성 영상이 매우 유용한 도구임을 확인했다.

1. 서론

화산의 전조현상 중 하나로 분출 전 화산의 정상과 사면의 분화구에서 지표 온도가 증가하게 되는데, 이러한 현상이 원격탐사를 통해 종종 관측되어 왔다(Wright *et al.*, 2002). 지표 온도의 증가는 넓은 지역에 걸쳐 미세하게 온도가 증가되거나 이산화황, 수증기, 이산화탄소와 같은 화산학적 가스의 방출과 압력의 증가로 인한 열 방출이 지각의 균열이나 분기공, 분화구에서 집중적으로 발생한다. 에트나 화산의 경우, 지열의 증가가 분출 전 장기간에 걸쳐 나타났으며(Glaze *et al.*, 1989; Oppenheimer *et al.*, 1993), 시살딘 화산의 경우에는 몇 시간 또는 몇 일 동안에만 분출에 의한 열의 증가가 발생했다(Dehn *et al.*, 2002). 라스카르 화산의 경우는 분출에 앞서 열 방출이 감소했으며(Oppenheimer *et al.*, 1993), 롱 밸리 칼데라인 캄피 플레그레이 칼데라의 경우에는 분화 없이 지열만 증가했다(Hill *et al.*, 2003; Chiodini *et al.*, 2001; de Lorenzo *et al.*, 2001). 이렇듯 특정 화산이 지니는 지표열 증가는 매우 다양한 방식으로 나타나므로, 장기 모니터링을 통한 지표열 변화 패턴을 관찰할 때 특정 화산의 분화 특성을 파악할 수 있다.

Landsat series와 같은 고해상도 원격탐사도구는 1970년부터 다양한 화산학적 특징을 관측하고 해석하는데 성공적으로 사용되어 왔다(Donegan and Flynn, 2004; Mia and Fujimitsu, 2012). 그러나 약 1 km의 공간해상도를 가지는 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) 저해상도 위성의 관측주기가 1일인 반면, 공간해상도가 약 60 m인 열적외선 밴드가 탑재된 Landsat 7 ETM+ 위성은 관측주기가 16일이므로 짧은 주기의 변

화를 관측하기가 어렵다(Landsat project science office, 2006). 게다가 구름의 분포와 같은 대기조건에 제약을 받는 광학위성의 경우, 관심지역의 관측주기가 훨씬 길어질 수 있다. 그럼에도 불구하고 Landsat 인공 위성은 1호에 7호에 이르기까지 1970년대부터 동일한 분광대역 센서로 40년 넘게 지구를 관측해 왔으므로, 긴 시간에 걸친 지표의 변화를 관측하기에 매우 유용하다. 또한 2013년 2월 11일에 Landsat 8 Landsat Data Continuity Mission (LDCM) 위성을 발사하면서 향후 지속적인 관측이 가능하게 되었다.

본 연구의 관심지역은 유라시아 판과 인도-오스트레일리아 판의 섭입대 위에 위치한 인도네시아 자바지역의 메라피 화산이다(Fig. 1(a)). 2010년 분출 이전에 2,968 m의 해발고도를 가지는 메라피 화산은 주변에 높은 인구 밀도 때문에 전세계적으로 위험한 화산 중에 하나로 알려져 있으며, 그 움직임을 Indonesian Center for Volcanology and Geologic Hazard Mitigation (CVGHM)와 the Yogyakarta Volcanic Technology Development and Research Center (BPPTK)에서 상시 모니터링 해오고 있다(Newhall *et al.*, 2000). 메라피 화산은 약 3,500만명이 거주하고 있는 대도시인 욕야카르타(Yogyakarta)의 북쪽 28 km 위에 위치하고 있다(Bignami *et al.*, 2013). 1900년 이후에 메라피 화산은 주로 서·남서쪽 방향으로 분화해 왔으나 최근 2006년과 2010년 두 번의 분출에서 대도시인 욕야카르타가 위치하고 있는 남쪽으로 분화가 시작되어 인명과 재산피해의 우려가 증가하고 있다. 또한 1~5년 주기를 가지고 화산폭발 지수(Volcanic Explosivity Index; VEI: 화산의 폭발력을 나타내는 지수로, 화산 분출물의 양을 기준으로 최소 0부터 최대 8까

지 구분) 3 이하의 잦은 분출을 보여왔던 메라피 화산이 2010년에는 화산폭발지수 4의 상당히 큰 분화를 보였고, 서·남서쪽으로 평균 8~9 km 정도의 화산쇄설류(pyroclastic flows)가 흘렀던 기존의 분화와는 달리 남쪽으로 약 17 km 까지 화산쇄설류가 흘러 386명의 사망자와 113명의 부상자가 발생했으며, 많은 양의 화산재로 인한 항공기 마비로 막대한 손실을 안겨주었다(Surono *et al.*, 2012). 이렇듯 위협적으로 돌변한 메라피 화산의 분출 양상을 파악하기 위한 연구가 활발하게 수행되고 있다(Charbonnier and Gertisser, 2008; Surono *et al.*, 2012; Bignami *et al.*, 2013).

본 연구는 Landsat 5 TM & 7 ETM⁺ 광학 위성 영상을 활용하여 1994년부터 2012년 까지 약 18년 동안 메라피 화산의 분출 양상과 지표 온도의 변화 모니터링을 수행하였다. 수집된 Landsat 7 ETM⁺ 자료의 약 80%가 SLC-off 현상 때문에 일정 간격을 가지고 화소 값이 손실되었기 때문에, 2003년 6월부터 2012년 9월까지 약 10년간의 지표 피복 변화를 관측하기 위해 Lee *et al.*(2013)에서 제안된 보간 기법을 적용하였다. 모든 Landsat 영상은 cosine of the solar zenith correction (COST) 대기보정 모델에 적용된 후, 화산쇄설류와 화산재 이류 등과 같은 화산성 물질의 분출로 영향을 받은 지표 피복 영역과 구름에 영향을 받은 지표 피복 영역을 감도분류를 수행하여 추출하였고, 화산성 물질에 영향을 받은 지표 피복이 시간적으로 어떻게 변화하는지에 대하여 CVP 보고서의 분출기록과 비교 분석하였다(Table 1, Fig. 1(b)). 또한 Landsat 7 handbook에서 제공된 NASA의 열적외선 밴드를 이용한 온도 변환 알고리즘을 적용한 후, 감도분류를 거쳐 얻어진 구름 피복을 이용하여 구름에 의해 낮아진 지표 온도를 제거했다. 그 후 본 연구를 위해 수집된 모든 위성영상에 대하여 산 정상 분화구에서의 평균 지표 온도를 계산하여 메라피 화산의 지표 온도 시계열 분석을 수행하였다.

2. 연구 지역

메라피 화산은 인도-오스트레일리아 판이 유라시아 판 아래로 섭입되는 자바섬입대 위에 형성된 인도네시아 자바섬에 위치하며, 1~5년 주기의 잦은 분출이 보이

는 성층화산이다(Fig. 1(a)). 화산의 고도는 2010년 분화 전 2,968 m 였으며, 산 정상 분화구에서 라바돔(lava dome)이 성장하다가 개방되어 있던 분화구를 점성이 높은 마그마가 막아버리면 압력이 높아지게 된다. 압력을 버틸 수 없는 시점이 오면, 형성되어 있던 라바돔이 무너지면서 수계를 따라 화산쇄설류가 흘러내린다. 분화는 개방된 분화구가 막힐 때까지 계속 반복되고, 많은 화산재와 가스, 용암, 용암 토석류(lava avalanches)를 방출한다(Andreastuti *et al.*, 2000; Camus *et al.*, 2000; Newhall *et al.*, 2000; Voight *et al.*, 2000; Surono *et al.*, 2012). 또한 인도네시아의 기후는 10월부터 4월까지 우기를 가지는데, 이 시기에 많은 비가 내릴 경우 화산재와 화산성 물질들이 화산재 이류(lahar)를 유발하여 2차 피해를 유발하기도 한다. 잦은 분출로 인해 보통 화산폭발지수가 1~3 이고, 약 $1 \sim 4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 의 화산쇄설류를 방출하는 위협적인 강도의 분화를 보이지는 않지만, 산 사면에 황을 채취하기 위한 거주민이 많기 때문에 세계의 위험한 화산 중 하나로 선정되었다(Newhall *et al.*, 2000; Voight *et al.*, 2000; Surono *et al.*, 2012).

Table 1에 CVP 보고서(CVP monthly reports: Merapi, Smithsonian Institution Bulletin of the Global Volcanism Network, available at <http://www.volcano.si.edu/>)에 기록된 1994년 7월 6일부터 2012년 9월 1일 사이에 발생한 화산분화 기록 중 지표 특성을 메라피 화산의 정상을 중심으로 반경 2 km 이상 변화시킨 분화기록이 정리되어 있다. 이 기록을 바탕으로 연도별로 각 수계를 향해 분출된 최고거리를 2001년 4월 28일에 촬영된 Landsat 7 ETM⁺ 전정색 밴드(panchromatic band) 영상 위에 도시하였다(Fig. 1(b)). 1994년 11월 22일에 일어난 화산쇄설류는 Boyong 수계를 따라 7.5 km까지 흘러 58명의 사상자와 주민 4,452명의 거주지 파괴, 작물에 피해를 입혔다. 이 분화는 끝나지 않고 6개월에서 1년 사이의 주기로 2002년까지 이어졌다. 남서쪽으로 흐르던 화산 분출물이 서쪽으로 흐르기 시작한 1997년 분화는 Bebeng, Boyong, Krasak, Sat, Senowo 수계를 따라 발생했고, 상대적으로 미약한 분출이었으나 6명의 사상자와 이류(mud flow)로 인한 작물 피해가 있었다. 1998년에는 Lamat 수계를 따라서 최대 5.5 km의 화산쇄설류가 흘렀고, 화산재 또한 산정상에서 42 km 떨어진 마을에까지 영향을 미쳤다. 2001년에서 2002년까지 메라피 화산은 Bebeng,

Krasak, Lamat, Sat, Senowo 수계를 따라 화산쇄설류와 용암, 낙석(rock fall), 용암 토석류, 토석류(avalanches) 등을 수시로 분출했으며, 화산재 낙하(ash fall)와 폭발, 유독성 가스를 방출했다. 빈번한 분출에 따른 돔 성장도 활

Table 1. Summary of eruptive events at Merapi volcano, Indonesia during the period from 6 Jul, 1994 to 1 Sep, 2012(CVP Monthly reports)

Year	Date	Event	Damages
1994	22 Nov	Ex(10), PF(7.5/Boyong)	58/villages & crops
1995	Nov	AV(2.5/Boyong & krasak)	SO ₂ (95)
	Dec		SO ₂ (70)
1996	9 Aug	PF(3.5/Boyong & Krasak), Ex(6)	
	24 Oct	PF(2.5/ Boyong & Krasak)	
	30 Oct	AF(4), PF(3/Bebeng & Boyong & Krasak & Kuning)	
1997	11 Jan	PF(4/-)	
	17 Jan	Ex(4), D(1.6), PF, MF	6/crops
	Sep	Ex(2), rf(2.5/Bebeng & Boyong & Krasak & Sat & Senowo)	
1998	17-21 Jul	Ex(6), AF(42), NA,PF(5.5/Lamat), rf(1.3/Lamat)	
1999	Jun - Jul	Ex(1.5), LA(2/Blongkeng & Lamat & Sat & Senowo)	
2001	9-22 Jan	Ex(3.4), SO ₂ (95), AF, LA(3.5/Bebeng & Lamat & Sat & Senowo), PF(4.5/Bebeng & Lamat & Sat & Senowo)	
	27 Jan	Ex(2), AF(20), D, LA, PF(4.5/Bebeng & Sat & Senowo)	
	30 Jan	PF(3.5/ Bebung & Senowo), AF(15)	
	5-9 Feb	D(10/45,000), L, LA(3.5/Bebeng & Lamat & Sat & Senowo), PF(4.5/Bebeng & Sat & Senowo)	
	10 Feb	Ex(5), AF(60), PF(7/Lamat & Sat)	
	14 Feb - 1 May	Ex(0.5), AF(7), AV(2.5/slope of SW), LA(2.5/Bebeng & Lamat & Sat & Senowo), LF(2.5/slope of WSW), PF(3/Bebeng & Lamat & Sat & Senowo), Hot AV(3/Bebeng & Lamat & Sat & Senowo)	
	11 Jul - 4 Nov	Ex(0.755), SO ₂ (78~121), AV(5/slope of SW/-), LA(2.8/Bebeng & Lamat & Sat & Senowo), LF(4/slope of SSW)	
2002	28 Jan - 3 Feb	Ex(0.65), SO ₂ (92-187), LA(3/Bebeng & Lamat & Sat & Senowo)	
	4-10 Feb	Ex(0.2), PF(2.7/Bebeng & Sat)	
	17 Jun - 1 Sep	Ex(0.55), SO ₂ (80-145), LA(2.6/Bebeng & Lamat & Sat & Senowo)	
2006	10 May - 30 Jun	Ex(1.6), PF(7/ Boyong & Gendol & Krasak), LA(3/ Boyong & Gendol & Krasak & Sat)	2
	12-18 Jul	Ex(4), LF(2/Gendol)	
	26 Jul - 1 Aug	Ex(3.4), LA(2/Gendol)	
	20 Nov	NA(3/-)	
2010	26 Oct	Ex(18), SO ₂ (3,000), AF(30), PF(8/Gendol & Kuning)	35/houses
	1-3 Nov	Ex(6.1), PF(9/Gendol)	-/flight cancellations
	4-5 Nov	Ex(18), SO ₂ (300,000), AF(240), PF(18/Gendol & Kuning)	386(113)/villages & crops
	6-9 Nov	Ex(16.5), PF(5/Gendol & Kuning & Senowo), LA(2/Gendol & Kuning)	-/flight cancellations
	10 Nov - 1 Dec	Ex(7.6), AF(9), SO ₂ , L(16.5/all drainages), PF(3.5/Gendol)	
2011	3-9 Jan	L(26/slope of WNW)	-/villages & bridges
	21 Mar	L(20/slope of SW)	
	14 Apr	L(20/slope of S)	

* Meaning of symbols: Ex(=Explosions(maximum height from summit(km))), PF/LF/LA/AV/NA/rf/L/MF(=pyroclastic flows/lava flows/lava avalanches/avalanches/nuee ardente/rock-fall/lahar/mudflows(maximum distance(km)/directions of flows), AF(=ashfall(maximum distance of extent), SO₂(=sulfur dioxide(average of emissions(ton/day))), D(=summit dome grows(volume of increased lava(1 × 105m³)/speed of growing dome(m³/day))). Damages consist of casualties(injured people)/properties.

발하게 이루어 졌다. 긴 화산활동이 중단된 후, 4년 뒤인 2006년에 메라피 화산이 다시 움직이기 시작했다. 상대적으로 긴 휴지기만큼 Boyong, Gendol, Krasak 수계를 따라 최대 7 km까지 많은 화산쇄설류가 발생했다. 이때부터 대도시인 욕야카르타로 연결되는 Gendol 수계를 따라 화산쇄설류가 흐르기 시작했고, 남쪽으로 약 28 km 나 떨어진 욕야카르타에서도 들릴 정도의 굉장한 폭음이 동반된 폭발과 용암, 용암 토석류와 열운(nuce ardente)이 발생했다(CVP monthly reports)(Table 1, Fig. 1(b)).

Fig. 1. (a) Depth of Java subduction zone on Java Island, Indonesia. Red triangle is Merapi volcano. (b) Direction and length of volcanic materials flows each year on Landsat 7 ETM⁺ panchromatic band image acquired on 28 Apr, 2001. Blue and black lines mean drainage and administrative district, respectively.

1872년 이후에 가장 큰 분화로 전세계를 주목시킨 2010년 분화는 화산폭발지수 4를기록했으며, 386명의 사상자와 113명의 부상자를 유발하고 산 사면에 거주하던 주민 30만 명의 거주지를 앗아갔다(Surono *et al.*, 2012). 메라피 화산은 과거에 많은 사상자와 재산피해를 입힌 분화기록들을 가지고 있다. 1672년 분화 당시 무려 3,000명, 1930년에는 1,300명을 죽이고 많은 마을을 파괴하여 재산피해를 일으켰다(Dove, 2008; CVP monthly reports). 또한 많은 층서학적 증거들이 1872년에 발생한 분화와 같은 매우 큰 폭발성 분출들이 과거에 있었다는 것을 알려준다(Hartmann, 1934). 이러한 과거의 분출 기록들과 화산쇄설류의 흔적들은 차후에도 화산폭발지수 4-5에 이르는 폭발적인 분화가 다시 발생할 가능성을 암시한다(Thouret *et al.*, 2000).

2010년 10월 26일에 폭발적인 분화를 동반한 화산쇄설류가 Gendol 수계를 따라 8 km까지 흘러내렸고, 35명의 사상자와 많은 집들이 무너지는 피해를 발생시켰다. 분화는 멈추지 않고 11월 3~4일에 동일한 방향으로 18 km까지 화산쇄설류가 흘러내려 약 $20 \sim 50 \times 106 \text{ m}^3$ 에 이르는 많은 양의 화산성 물질이 분출했고, 많은 인명피해와 마을과 작물의 막대한 피해를 가져왔다. 또한 산정상을 중심으로 반경 240 km까지 화산재 낙하가 발생되면서 많은 항공편들이 취소되어 막대한 손실이 발생했다. 뿐만 아니라 화산쇄설류와 화산재 낙하로 발생된 많은 화산성 물질들이 인도네시아의 우기인 10월에서 4월 사이에 내린 폭우와 만나, 11월 10일과 12월 1일 사이에 아직 식지 않은 화산성 물질들과 폭우가 섞인 뜨거운 화산재 이류가 메라피 화산 주변의 모든 수계로 16.5 km까지 흘러내려 2차 피해를 가져왔다. 메라피 화산의 대표적인 2차 피해인 화산재 이류는 2010년 뿐만 아니라 2011년에도 계속되어 마을과 강을 건널 수 있도록 연결 하던 다리들을 파괴했다(Iguchi *et al.*, 2011; CVP monthly reports)(Table 1, Fig.1(b)).

3. 연구 방법 및 자료 처리

본 연구에서 수행된 Landsat 영상의 자료 처리 과정은 Fig. 2와 같이 정리할 수 있으며, 본 연구를 위해 적용된 기법은 아래와 같다.

Fig. 2. Processing flowchart used in this study.

1) SLC-off Interpolation

2003년 5월 31일에 SLC의 작동이 중지되면서 일부 화소 값이 영상에 기록되지 않는 문제가 발생하였고, 이를 ‘SLC-off’ 라 부른다(Storey *et al.*, 2005). 본 연구에서도 수집된 Landsat 7 ETM+ 자료의 약 80%가 SLC-off 현상 때문에 일정 간격을 가지고 화소 값이 기록되지 않았다(Table 2). 이 문제를 해결하기 위한 연구들이 수없이 진행되어 왔으며, 기존에 제시된 기법은 크게 두 부류로 나눌 수 있다. 첫 번째는 대기 영향이 전혀 없는 SLC-off 현상이 발생하기 이전에 촬영된 SLC-on 영상이나, 비슷한 분광대역을 사용하는 SPOT과 같은 다른 센서로 취득된 광학위성영상을 이용하여, 분광 비율을 고려한 복원을 수행하는 기법이다(Storey *et al.*, 2005; Bédard *et al.*,

Table 2. Landsat 5 TM, 7 ETM+ images(path/row = 120/065)and zenith angle used in this study

No	Sensor	Date	Time	Zenith angle(°)	No	Sensor	Date	Time	Zenith angle(°)
1	TM	Jul 6, 1994	02:06:31	41.04	29	ETM+	Jun 10, 2005	02:37:37	47.57
2	TM	Nov 11, 1994	02:02:51	54.18	30	ETM+	Aug 13, 2005	02:37:28	51.50
3	TM	May 6, 1995	01:56:10	43.84	31	ETM+	Aug 29, 2005	02:37:21	54.97
4	TM	May 22, 1995	01:55:26	41.81	32	ETM+	Apr 26, 2006	02:38:09	53.71
5	TM	Jun 25, 1996	02:01:28	40.12	33	ETM+	Jun 13, 2006	02:38:08	47.34
6	TM	Aug 12, 1996	02:03:59	44.37	34	ETM+	Jun 29, 2006	02:38:03	46.72
7	TM	Mar 8, 1997	02:14:01	50.95	35	ETM+	Jul 31, 2006	02:37:49	49.27
8	TM	May 27, 1997	02:16:54	45.34	36	ETM+	Jun 16, 2007	02:38:23	47.20
9	TM	Jun 12, 1997	02:17:27	43.84	37	ETM+	Jul 2, 2007	02:38:22	46.78
10	TM	Jun 28, 1997	02:18:01	43.23	38	ETM+	Aug 3, 2007	02:38:14	49.71
11	TM	Jul 30, 1997	02:19:06	45.48	39	ETM+	Sep 20, 2007	02:37:55	59.81
12	TM	Aug 15, 1997	02:19:37	48.22	40	ETM+	Oct 6, 2007	02:37:47	62.33
13	TM	Aug 31, 1997	02:20:06	51.61	41	ETM+	Nov 23, 2007	02:38:18	60.67
14	TM	Sep 16, 1997	02:20:33	55.05	42	ETM+	Jun 18, 2008	02:37:50	46.93
15	TM	Jul 6, 2000	02:24:56	44.54	43	ETM+	Jul 20, 2008	02:37:28	47.76
16	ETM+	Dec 5, 2000	02:38:26	59.04	44	ETM+	Mar 17, 2009	02:38:18	57.03
17	ETM+	Apr 28, 2001	02:38:12	53.46	45	ETM+	Jun 5, 2009	02:38:34	48.16
18	ETM+	May 14, 2001	02:38:01	51.01	46	ETM+	Jun 21, 2009	02:38:32	47.01
19	ETM+	Jul 1, 2001	02:37:29	46.70	47	TM	Jul 31, 2009	02:37:13	49.19
20	ETM+	May 17, 2002	02:36:50	50.38	48	ETM+	Nov 15, 2010	02:40:51	62.42
21	ETM+	Jul 4, 2002	02:36:34	46.58	49	ETM+	Feb 19, 2011	02:41:35	57.13
22	ETM+	Sep 6, 2002	02:36:06	56.48	50	ETM+	May 10, 2011	02:41:43	52.40
23	ETM+	May 20, 2003	02:36:48	49.94	51	ETM+	Jun 11, 2011	02:41:43	48.21
24	ETM+	Apr 4, 2004	02:37:23	55.99	52	ETM+	Apr 10, 2012	02:42:10	56.62
25	ETM+	Apr 20, 2004	02:37:14	54.31	53	ETM+	May 12, 2012	02:42:49	52.04
26	ETM+	Jun 7, 2004	02:37:13	47.69	54	ETM+	Jun 13, 2012	02:42:31	48.13
27	ETM+	Jun 23, 2004	02:37:09	46.67	55	ETM+	Sep 1, 2012	02:43:26	57.14
28	ETM+	Oct 13, 2004	02:36:41	62.77

Fig. 3. In comparison with results before (a) and (b) after SLC-off interpolation using Landsat 7 ETM+ SLC-off image (false color image composite(RGB=742)).

2008; Chen *et al.*, 2011). 그러나 구름과 같이 시간에 따라 변하는 현상들을 반영할 수 없으므로, 많은 시기의 영상을 복원하는 기법으로는 적절하지 못하다. 두 번째는 2차원 기반의 다양한 보간기법들이다. 촬영된 밴드 별로 보간이 이루어지기 때문에 최대 13개의 화소 차이가 나는 지역에서는 복원 정확도가 다소 떨어지는 단점이 있다(Lee *et al.*, 2013). 그러나 첫 번째 기법에 비해 두 번째 기법은 상대적으로 간편하고, 시간에 따라 변하는 지표상을 반영하기에 유리하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 시간에 따른 지표피복의 변화를 관측하는 것이 연구 목적이므로, 두 번째 기법 중 1차원 보간 기법을 적용하여 간편하고, 복원 정확도가 상대적으로 높은 Lee *et al.*(2013)의 알고리즘을 적용하였다. 이 보간 기법은 Landsat 위성영상의 SLC-off 현상의 Y축 화소 공백 간격이 짧다는 특성을 반영하여 Y축을 기반으로 1차원 보간을 수행한 후, 2차원 보간을 수행하여 복원 정확도를 향상시켰다. Fig. 3은 본 연구지역에서의 보간 전·후 영상을 보여준다. Lee *et al.*(2013)의 알고리즘이 본 연구지역에 대하여 시간에 따른 지표 피복을 연구하기에 충분한 복원 결과를 제공함을 확인할 수 있다(Fig. 3(b)).

2) COST Model

광학 위성 영상은 대기를 통과한 신호의 강도를 화소

값으로 기록하여 관측을 수행하기 때문에, 대기의 산란, 흡수 및 굴절은 영상자료에 직접적인 영향을 미치며 지표의 반사율을 왜곡시키는 주요 원인이 된다(Chavez, 1996). 그러므로 광학 위성 영상을 활용한 시계열 분석에서는 대기보정이 필수적이며, 동일한 방법으로 대기 영향을 제거해야 연구결과의 정확도를 높일 수 있다(Park *et al.*, 2012). 대기보정 방법은 대기모형을 이용하는 방법과 위성 영상을 이용하는 방법이 있다. 대기모형을 이용하는 방법은 MODTRAN과 같은 대기모형을 이용하여 투과율, 대기의 상향복사량, 대기의 하향복사량 등을 구하여 대기를 보정하는 방법이며, 이 경우 영상 촬영시의 대기 자료를 기반으로 대기보정을 수행하기 때문에 매우 정밀하다는 장점이 있다(Acharya *et al.*, 1999). 그러나 연구지역에 대한 대기 관측자료를 얻기 위한 많은 인력과 비용, 시간 등이 소요되고, 자료를 획득하기 어려운 지역에서는 적용하기가 어렵다는 한계가 있다. 영상기반에 의한 대기보정은 그림자나 잔잔한 호수와 같은 영상 내 완전 흑체 지역에서는 완전 반사로 인해 화소 값이 0이어야 하지만, 대기산란에 의한 영향이 존재한다면 화소 값이 0이 아닌 값을 가진다는 가정하에 수행되며 다양한 알고리즘들이 개발되어 왔다. 그러나 영상 내의 완전 흑체 선정은 연구자의 주관적인 판단에 의존하기 때문에, 잘못 선정하였을 경우 과

Table 3. Landsat 5 TM, 7 ETM+ spectral range, post-calibration dynamic ranges, and mean exoatmospheric solar irradiance(ESUN_λ)

Band	Spectral range	Center wavelength	LMIN	LMAX	Gain	Bias	ESUN _λ
Units	μm		W/(m ² · sr · μm)		(W/(m ² · sr · μm))/DN	W/(m ² · sr · μm)	W/(m ² · μm)
TM Sensors(QCALMIN = 1 and QCALMAX = 255)							
1	0.452-0.518	0.485	-1.52	193	0.765827	-2.29	1983
2	0.528-0.609	0.569	-2.84	365	1.448189	-4.29	1796
3	0.626-0.693	0.660	-1.17	264	1.043976	-2.21	1536
4	0.776-0.904	0.840	-1.51	221	0.876024	-2.39	1031
5	1.567-1.784	1.676	-0.37	30.2	0.120354	-0.49	220.0
6	10.45-12.42	11.435	1.2378	15.3032	0.055376	1.18	N/A
7	2.097-2.349	2.223	-0.15	16.5	0.065551	-0.22	83.44
ETM+ Sensors(QCALMIN = 1 and QCALMAX = 255)							
1	0.452-0.514	0.483	-6.2	191.6	0.778740	-6.98	1997
2	0.519-0.601	0.560	-6.4	196.5	0.798819	-7.20	1812
3	0.631-0.692	0.662	-5.0	152.9	0.621654	-5.62	1533
4	0.772-0.898	0.835	-5.1	157.4	0.639764	-5.74	1039
5	1.547-1.748	1.648	-1.0	31.06	0.126220	-1.13	230.8
6	10.31-12.36	11.335	3.2	12.65	0.037205	3.16	N/A
7	2.065-2.346	2.206	-0.35	10.80	0.043898	-0.39	84.90
PAN	0.515-0.896	0.706	-4.7	158.3	0.641732	-5.34	1362

대보정이 이루어지는 단점이 있다(Park *et al.*, 2012). 본 연구지역은 사람이 접근하기 힘들고, 영상 촬영시의 대기정보를 획득하기 어렵기 때문에 영상을 기반으로 한 COST 모델을 이용하여 대기보정을 수행하였다.

일반적으로 대기보정은 위성 센서에 기록된 복사휘도 값을 지표의 반사율로 변환하는 것으로 수행되며, 그 식은 다음과 같다.

$$L_{sat} = \frac{1}{\pi} \rho T_{\theta_0} \left(\frac{ESUN_{\lambda}}{d^2} T_{\theta_0} \cos \theta_z + E_{d1} \right) + E_{d1} \quad (1)$$

위 식에서 L_{sat} 은 위성센서에 기록된 복사휘도 값, ρ 는 지표의 반사율, $ESUN_{\lambda}$ 는 태양으로부터 복사된 복사조도, d 는 태양과 지구와의 거리이며, T_{θ_0} 는 대기의 투과율, θ_z 는 태양의 천정각, E_{d1} 는 대기의 하향복사량, E_{d1} 는 대기의 상향복사량을 의미한다. 위의 식은 다음의 제시되는 식으로 다시 표현될 수 있다(Chander and Markham, 2003).

$$L_{sat} \text{ (TM Radiance)} = \text{Bias} + \text{Gain} \times \text{DN} \quad (2)$$

$$L_{sat} \text{ (ETM+ Radiance)} = \left(\frac{(LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda})}{(QCALMAX - QCALMIN)} \right) \times (QCAL - QCALMIN) + LMIN_{\lambda} \quad (3)$$

여기서, QCAL은 화소 값이며, 나머지 상수는 Table 3

에 제시된 값을 사용하였다(Chander *et al.*, 2009).

본 연구에 적용한 영상기반에 의한 대기보정 기법은 Chavez(1996)가 제안한 COST 모델이며, 다른 방법에 비해 비교적 단순한 원리식을 가지고 있다. 이 모델은 대기의 하향복사량은 무시하기 때문에 무시해도 된다고 가정하였고, 태양에서 지표까지의 대기투과율을 cosine값으로 근사화한 것이 특징이다(Park *et al.*, 2012). COST 대기보정 모델 식은 아래와 같다.

$$r = \frac{\pi(L_{sat} - L_{haze})d^2}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos^2(\theta_z)} \quad (4)$$

$$d = 1 + 0.0167 \times \sin[2\pi(JD - 93.5)/365]$$

$$\theta_z = 90 - \text{Solar Elevation}$$

여기서, r 은 대기보정된 반사율 값이고, 각 영상이 가지는 태양의 고도는 Table 2에 도시되었다. JD는 영상이 촬영된 날짜와 시간의 율리우스 적일(Julian Date)이다. Chavez(1996)는 현실적으로 반사율이 0인 지역은 존재하지 않을 것이라는 가정하에 완전 흑체의 반사율을 1%로 결정하고 이로부터 대기의 상향복사량을 구하였다. Chavez(1996)가 제안한 대기의 상향복사량은 다음 식을 통해 구할 수 있다.

$$L_{1\%} = \frac{0.01 \times d^2 \times \cos^2(\theta_z)}{\pi \times ESUN_\lambda} \quad (5)$$

$$L_{haze} = L_{min} - L_{1\%}$$

여기서, L_{min} 은 연구자가 반사율이 0일 것이라고 판단하여 선택한 흑체의 복사휘도 값이다.

3) Supervised Classification

7번 밴드를 적색, 4번 밴드를 녹색, 2번 밴드를 청색으로 설정한 가색상 합성 (false color composite) 영상은 도심지를 짙은 분홍색(마젠타), 성긴 작황지를 주황색이나 갈색, 무성한 숲이나 잔디를 녹색, 물은 파란색, 화산성 분출물을 보라색으로 표현한다. 특히 불이 붉은색으로 나타나기 때문에 화재에 영향을 받은 지역을 파악하기에 매우 유리하다.

Fig. 3(b)에서 메라피 화산 주변에 화산성 분출물이 짙은 보라색으로, 산 정상에 개방된 분화구에서 보이는 마그마가 붉은색으로 나타나고 있다. 화산성 분출물이 덮고 있는 지표 피복을 추출하기 위해, 산림, 경작지, 도심지, 구름, 화산성 분출물 총 5개의 지표 피복으로 분류하는 감독분류를 수행하였다(Fig. 4).

4) Conversion of Thermal Band to Surface Temperature

열적외선 센서를 이용하여 측정된 온도는 지표에서 방출하는 복사 에너지를 추정 한 방사온도 (radiant temperature)로, 실제 지표에서 측정된 운동 온도 (true kinetic temperature)와는 차이가 있다(Park *et al.*, 2013).

Fig. 4. Result from supervised classification using Landsat 7 ETM⁺ image.

이러한 차이가 나타나는 원인 중 하나는 대기에 의한 영향이다. 지표로부터 방출된 복사에너지는 대기를 통과하면서 산란, 흡수 및 굴절에 의한 영향을 받아 감쇠되며, 감쇠된 복사에너지가 열적외선 센서에 기록된다(Vidal, 1991). 따라서 열적외선 센서로 관측된 지표 온도의 추정에서 연구지역의 기온과 기후, 위성 영상이 획득된 시간에서의 대기상태를 충분히 고려해야만 한다. 또 다른 원인은 동일 온도에서 흑체가 방출하는 총 복사에너지와 지표가 방출하는 총 에너지의 비로 정의되는 지표의 복사율(emissivity)이다(Li and Becker, 1993). 동일 운동 온도를 지니는 지표라도 색상, 표면 거칠기, 수분 함유량 등에 따라 복사율이 달라지기 때문에, 열적외선 센서를 이용한 지표 온도 측정에서는 지표의 복사율이 필수적으로 요구된다(Ottle and Stroll, 1993, Park *et al.*, 2013). 해수표면온도(Sea Surface Temperature, SST) 측정의 경우, 해수는 거의 1에 가까운 복사율을 지니므로 위성영상을 이용한 온도 측정이 수월하지만, 복잡하게 변하는 지표에서의 온도 측정은 지표 피복마다 다른 복사율을 고려해야 하기 때문에 해석이 어렵고, 관측 정밀도에 한계가 존재한다(Gillespie *et al.*, 1998). 물과 같은 복사율이 1인 흑체의 경우, 복사율 오차가 약 2.5%이면 $\pm 1^\circ\text{C}$ 의 지표 온도 오차, 복사율 오차가 약 5%일 때는 $\pm 2^\circ\text{C}$ 의 지표 온도 오차를 가진다(Schädlich *et al.*, 2001; Dash *et al.*, 2002). 일반적으로 용암이나 화산쇄설류에 의해 형성된 암석일 경우의 복사율은 0.98 이다(Wan *et al.*, 1994; Higgins and Harris, 1997). 따라서 메라피 화산의 분화구 주변의 온도가 20°C 이상일 경우, 복사율 오차가 2.5%이면 약 $\pm 1.2^\circ\text{C}$ 에 해당하는 지표 온도 오차를 가진다. 본 연구에서는 단일 영상에서 온도를 분석할 경우, 약 $\pm 0.2 \sim 1.2^\circ\text{C}$ 의 지표 온도 오차를 가만하여 분석을 수행하였다(Lagois *et al.*, 2007).

Landsat 5 TM, 7 ETM⁺의 열적외선 밴드 영상에서 얻어지는 화소 값을 온도로 변환하기 위해서는 복사휘도 값으로 변환하는 과정이 선행되며, 이 과정은 식 (2)~(3)과 동일하다. 방사휘도를 온도로 전환시켜 주는 방법에는 NASA 경험식과 RESTEC 방법, 그리고 Quadratic 방법이 존재한다. 본 연구에서는, post-calibration에 의한 방법으로 계산치와 실측치 사이에서 높은 상관관계를 보여주는 NASA 경험식을 이용하여 다음과 같이 위성 영상에서 측정된 온도(T)를 구하였다(Landsat project

Table 4. Thermal band calibration constant of Landsat 5 TM, 7 ETM⁺

Constant	K1	K2
Units	W/(m ² · sr · μm)	Kelvin
Landsat 5 TM	607.76	1260.56
Landsat 7 ETM ⁺	666.09	1282.71

science office, 2006).

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{sat}} + 1\right)} \quad (6)$$

K1과 K2는 Kelvin 보정 상수이며, Table 4의 값을 사용한다. Landsat 5 TM과 7 ETM⁺에 대해서 식 (6)을 동일하게 사용하지만 상수는 각각 다르다(Table 4). Landsat 7 ETM⁺의 경우에는 열적외선 밴드가 high gain과 low gain의 두 가지로 구성되어 있으며, 서로 다른 값을 사용하여 온도를 산출한다. 두 밴드를 사용하여 추출한 온도 차이는 미미하기 때문에 어느 밴드를 사용하여도 무방하다(Lee and Han, 2005). 본 연구에서는 low gain 영상을 사용하여 온도를 산출하였다.

4. 연구 결과

1) Time Series of Volcanic Materials

Fig. 5는 메라피 화산의 분화 전 · 후의 변화를 비교적 잘 보여주는 영상들의 가색상 합성 영상이며, 영상 취득 사이에 발생된 분화의 방향과 분출이 영향을 미친 최대 거리를 화살표로 도시하였다. 앞서 언급한 바와 같이 7번 밴드를 적색, 4번 밴드를 녹색, 2번 밴드를 청색으로 조합한 가색상 합성 영상에서 본 연구의 주된 관심사인 화산성 분출물에 영향을 받은 지표 특성은 짙은 보라색으로 나타난다.

연구기간 동안 발생한 첫 번째 분화는 1994년 11월 22일로, Boyong 수계를 따라 최대 7.5 km까지 화산쇄설류가 흘렀다(Table 1). 그러나 Fig. 5(b)에서는 실제로 보고된 최대 분출 길이보다 화살표 아래 약 3 km 정도 Boyong 수계를 따라 더 흘러내렸음이 확인된다. Fig. 5(c)의 Bebeng과 Putih 수계의 하류에 넓어진 화산성 분출물 영역은 1996년 8월부터 1997년 1월까지 발생한 연속적인 분화에 의한 영향이며, 특히 강을 범람하여 두 수계

사이에 발생된 넓은 화산성 분출물 피복은 1997년 1월 17일에 발생된 이류에 의한 피해 지역이다(CVP monthly reports)(Table 1). CVP 보고서에서는 1998년 7월 17일에서 21일 사이에 Lamat 수계를 따라 5.5 km까지 긴 화산쇄설류가 흘렀음을 언급했으나, 실제 Landsat 위성영상에 촬영된 화산성 분출물은 Lamat 수계보다는 Sat 수계를 따라 더 많은 양의 화산쇄설류가 흘렀음이 확인된다(Table 1, Fig. 5(d)). 1997년 8월 15일에 관측된 Landsat 5 TM 영상에서 관측되지 않았던 Sat 수계 상류의 화산성 분출물이 2000년 12월 5일에 관측된 Landsat 7 ETM⁺ 위성 영상에서 관측되었다(Fig. 5(d)). 2001년 2월 10일에 Sat 수계를 따라 최대 7 km까지 화산쇄설류가 발생된 분화 기록과 동일하게 많은 양의 화산쇄설류가 Sat 수계를 뒤덮고 있음이 Fig. 5(e)에서 관측된다(Table 1).

Fig. 5(g)와 Fig. 5(h)에서는 SLC의 작동이 중지된 후 취득된 Landsat 7 ETM⁺ 영상이기 때문에, SLC-off 현상을 해결하기 위한 보간에 따른 약간의 일그러짐이 발생했다. 특히 2010년 11월부터 2011년 4월에 걸쳐 발생한 이류로 인해 전체 수계를 따라 선명하게 관측되는 화산성 분출물이 일부 끊어지는 현상이 보이는데, 이는 Y축을 기반으로 수행되는 본 연구에서 사용된 SLC-off 보간 알고리즘이 X축의 선형적인 성분을 충분히 고려하지 못하여 발생된 현상이다(Lee *et al.*, 2013).

2006년 6월 14일에 Gendol 수계를 따라 7 km의 화산쇄설류가 흘렀고, 그 이후에도 잦은 분화가 Gendol, Boyong, Krasak, Sat 수계를 따라 발생했다(Table 1, Fig. 5(g)). Fig. 5(g)에서도 Fig. 5(e)에서 관측되지 않았던 화산성 분출물이 Gendol 수계를 따라 흐른 흔적이 나타났다. 전세계를 놀라게 했던 Gendol 수계를 따라 18 km의 화산쇄설류가 흐른 2010년 11월 4일~5일에 발생한 분화 역시 Fig. 5(h)에서 매우 선명하게 관측되었다. 또한 10월에서 4월까지의 인도네시아 우기 때문에 연속적으로 발생된 화산재 이류로 인해 모든 수계에서 더 선명하고 많은 양의 화산성 분출물들이 관측되었다(Table 1, Fig. 5(h)).

Fig. 6(a)는 앞서 언급된 화산성 분출물의 시간에 따른 변화를 효과적으로 파악하기 위하여, 감도분류를 통해 추출된 시기별 화산성 분출물 레이어를 기복도(relief map) 위에 도시한 결과이다. 1994년 7월 6일과 1997년 8월 15일 사이에 Boyong 수계를 따라 발생한 화산쇄설류

Fig. 6. (a) Overlap of volcano materials layers extracted by supervised classification. (b) Distribution of pyroclastic flow at Merapi volcano after 1900(provided from Merapi Volcano Observatory(MVO)).

와 이류에 의한 피해지역으로 인해 화산성 분출물 면적이 거의 두 배 가까이 증가했고, 2000년 12월 5일과 2001년 4월 28일 레이더는 Sat 수계를 따라 흐른 화산쇄설류의 변화를 잘 보여준다. 2010년에 Gendol 수계를 따라 발생된 많은 양의 화산쇄설류와 2011년에 발생된 화산재 이류로 인해 2007년 6월 16일에 2020.52ha로 계산된 화산성 분출물 면적이 2011년 5월 10일 레이더에서는 거의 두 배에 가까운 4012.14ha로 증가했다.

Fig. 6(b)는 Merapi Volcano Observatory(MVO)에서 발표한 1911년부터 2006년까지 발생된 분화로 인한 화산쇄설류가 피해를 입힌 영역을 보여준다. 1911년과 1913년에도 남쪽 산사면을 향한 분화가 있었음이 확인되나 2010년에 발생된 분화만큼 긴 화산쇄설류가 발생하지는 않았다. 본 연구의 연구결과와 MVO에서 발표한 피해지역을 비교했을 때, 분화의 방향과 피해영역이 대략적으로 일치했다. 그러나 본 연구에서 Landsat 광학 위성영상을 이용하여 추출한 시기별 분화에 따른 화산성 분출물에 의한 피해 영역이 기 발표된 MVO의 연구 결과보다 향상된 공간 해상도와 정밀한 지표 피복 변화를 제공함을 확인할 수 있다(Fig. 6).

2) Time Series of Surface Temperature

일반적으로 열적외선 센서를 이용한 지표 온도 원격탐사에서 식생이 분포하는 지역은 나대지나 도식지와

같이 지표면이 노출된 지역보다 온도가 상대적으로 낮게 나타난다(Park *et al.*, 2013). 메라피 화산 역시 단일 영상 내에서 산 주변을 둘러싸고 있는 식생지역에서는 주변의 지표 피복보다 상대적으로 낮은 지표온도를 보였다(Fig. 7). 인도네시아는 일년 내내 25~34 °C의 기온을 가지고, 4월에서 10월까지의 우기, 11월~3월까지의 건기를 가진다. 메라피 화산 분화구를 제외한 영상의 우측 상단과 하부의 27~37 °C 사이의 온도를 보이는 지역은 도식지와 나대지로, 이 지표 피복은 3.4절에서 설명된 $\pm 0.2 \sim 1.2$ °C의 오차범위를 가만할 때 주로 인도네시아의 기온에 가장 큰 영향을 받는 것으로 판단된다(Fig. 7). 1996년 6월 25일 지표 온도는 대기에 얇은 구름막이 형성되어 전체적으로 낮은 온도가 관측되었다(Fig. 7(b)). 그럼에도 불구하고 라바돔을 형성하고 있는 마그마의 분출이 관측되어 분화구에서 높은 온도를 보였다. 1997년 7월 30일 영상에서는 1994년 7월 6일과 1997년 8월 15일 사이에 Boyong 수계를 따라 발생된 화산쇄설류와 이류에 의한 피해지역에서 1994년 7월 6일 영상과는 다르게 주변지역보다 약 5 °C 정도 높은 온도가 관측되었다(Fig. 7(b) and 7(c)). 2006년 6월 13일 지표 온도 영상에서 분화구에서부터 Gendol 수계를 따라 흐르는 화산쇄설류가 관측되어 59 °C의 높은 온도를 나타냈으며(Fig. 7(e)), 2010년 11월 15일 영상에서도 11월 4~5일에

Fig. 7. Surface temperature on Merapi volcano from 1994 to 2012 using Landsat images.

Gendol 수계를 따라 흐른 많은 양의 화산쇄설류가 식지 않아 Gendol 수계 하류에서 높은 온도가 관측되었다 (Fig. 7(f)). 그러나 이 시기에는 많은 양의 화산재로 분화구 주변의 온도가 관측되지 못하는 안타까움이 있었다.

앞서 언급한 바와 같이 열적외선 센서를 이용한 원격 탐사에서 지표면의 절대 온도를 구하는 것은 어렵지만 동일한 알고리즘으로 온도를 구한 후, 시기별 평균온도 차이를 비교하여 시간에 따른 상대적인 변화를 분석하기에는 충분하다. Fig. 8에 1996년 8월 9일, 2001년 2월 10일, 2006년 6월 14일을 분화 기준으로 설정하여, Landsat 위성 영상에서 관측된 메라피 화산의 분화구에서의 평균 지표 온도를 계산하고 분화 전·후의 온도 변화를 도시하였다. 분화구에서의 평균 지표 온도 계산시 분화구가 구름에 영향을 받아 관측되지 않거나, 영상 전체에 발생된 얇은 구름으로 인해 모든 영상 화소에 걸쳐 인도네시아의 평균 기온보다 지나치게 낮은 온도가 관측된 영상은 시계열 분석에서 제외하였다. 분화 기준일은 CVP 보고서의 기록을 참고하여 설정하였으며, 그 결과 세 번의 분화에서 분화 전에 온도가 증가하고 분화 후에 온도가 식는 반복적인 온도 변화 양상을 보였다

Fig. 8. Mean surface temperature relative to each eruption around crater of Merapi volcano.

(Table 1, Fig. 8). 붉은 색으로 도시된 1996년 8월 9일의 평균 지표 온도는 분화 직후의 높은 마그마 온도가 관측되어 다른 분화 시계열에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 세 시기의 시계열 변화양상에서 분화 시점과 멀어질수록 수목 약간의 노이즈한 온도 변화를 가지지만 이는 앞서 언급한 0.2~1.2 °C의 오차범위와 대기영향을 고려했을 때, 2~3 °C의 납득할 만한 변화폭을 보인다(Fig. 8).

대기 영향과 Landsat 위성의 16일의 관측 주기에 의한 제약 조건에도 불구하고 메라피 화산의 분화구에서의

평균 지표 온도 시계열 분석을 수행한 결과, 메라피 화산은 분화 전에 5 °C 이상의 평균 지표온도가 상승하고, 분화 이후 지표가 서서히 식어가는 경향을 반복적으로 나타냈다. 그러나 이 반복되는 온도 변화 패턴이 메라피 화산의 분화 전조 현상이라고 결정내리기 위해서는 본 연구의 연구기간 동안에 획득된 메라피 화산 주변에 설치된 근거리 열적외선 센서나 열밴드를 탑재한 ASTER 위성 영상 등을 통한 비교검증이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 Landsat 5 TM, 7 ETM⁺ 위성 영상을 활용하여 1994년 7월 6일부터 2012년 9월 1일까지 약 18년 동안 발생한 인도네시아 메라피 화산의 분화로 인해 변화된 지표 피복을 추출하고, 분화구에서의 평균 지표 온도 시계열 분석을 수행하였다. 2003년 5월 31일 이후에 발생된 SLC-off 현상을 해결하기 위한 Lee *et al.* (2013)의 보간 기법을 수행하여 약 10년동안 얻어진 SLC-off 상태의 위성 영상을 복원하여 활용하였으며, 광학 위성 영상을 이용한 시계열 분석이 수행되어야 하는 대기보정에는 COST 모델을 적용하였다.

감독분류를 통해 화산성 분출물이 덮여있는 피복의 영역을 추출하여 중첩한 결과, 큰 분화가 기록된 시기의 전·후 피복의 변화를 관측했다. 약 30 m의 공간해상도를 가지는 Landsat 5 TM, 7 ETM⁺ 위성 영상을 활용하여 추출된 화산성 분출물에 의한 피해 영역은 기존에 서면으로 작성되어 있는 CVP 보고서와 거의 일치하였으나, 1994년 11월 22일 분화의 최대 분출 거리와 1998년에 발생된 화산쇄설류의 분화 방향 등 일부 일치하지 않는 부분이 발견되었다. 또한 MVO에서 발표한 화산쇄설류에 의한 피해 영역보다 정밀하고 정량적인 피해영역을 산출할 수 있었으며, 그에 따른 피해 면적의 변화까지 정확하게 파악할 수 있었다.

Landsat 5 TM, 7 ETM⁺ 위성은 약 60 m의 공간해상도를 지니는 열적외선 센서를 탑재하고 있으며, 이를 이용하여 메라피 화산의 분화구에서의 평균 지표 온도를 계산하고 분화에 따른 시계열 분석을 수행하였다. 1996년 8월 9일, 2001년 2월 10일, 2006년 6월 14일의 세 번의

분화 기준일에 대하여, 메라피 화산의 분화구 평균 지표 온도가 분화 전 5 °C 이상 상승하고, 분화 이후 지표가 서서히 식어가는 경향을 반복적으로 나타냈다. 그러나 이 반복적인 패턴이 분화의 전조 현상임을 밝히기 위해서는 동일 시기에 관측된 ASTER 위성의 열적외선 밴드 관측치와 비교하거나, 메라피 화산 주변에 설치된 근거리 열적외선 센서들에 의한 자료로 비교검증이 수행되어야 할 것으로 판단된다. 대기 영향과 Landsat 위성의 16일의 긴 관측 주기로도 불구하고 40년 동안 동일한 분광대역으로 지구를 관측해온 Landsat 5 TM, 7 ETM⁺ 위성 영상이 실시간으로 변하는 지표면의 온도를 관측하기에는 어렵지만 장기간 동안 반복적으로 나타나는 온도 변화 양상을 분석하기에 매우 유용함을 확인하였다. 반복적이고 잦은 분화로 현장관측이 어려운 메라피 화산의 경우, 고해상도 위성영상을 활용한 지표 변화 모니터링이 매우 적합하다고 사료되며, 2013년 2월 11일에 Landsat 8 LDCM 위성이 발사되면서 지속적인 메라피 화산의 분화로 인한 지표 변화 관측과 온도 변화 모니터링에 도움을 줄 것으로 판단된다.

위성영상을 활용한 화산 모니터링은 국외의 메라피 화산과 같이 잦은 분출이 있는 화산뿐만 아니라 국내의 백두산과 같은 긴 휴지기의 화산을 분석하는데도 적극 활용될 수 있으며, Landsat 위성 영상이 화산뿐만 아니라 시간에 따라 변하는 지표특성의 모니터링에도 매우 유용하게 사용될 것이다.

사 사

이 연구는 기상청 국립기상연구소의 주요사업인 “관측·지진기술 지원 및 활용 연구(NIMR-2013-B-3)” 과제의 일환으로 수행되었습니다. We use Landsat TM and ETM⁺ data from the Earth Explorer archive provided by the United States Geological Survey(USGS).

Reference

- Acharya, P.K., A. Berk, G.P. Anderson, N.F. Larsen, S.C. Tsay, and K.H. Stamnes, 1999. MODTRAN4:

- Multiple scattering and bidirectional distribution function(BRDF) upgardes to MODTRAN, *Proc. of SPIE, Optical Spectroscopy Techniques and Instrumentation of Atmospheric and Space Research*, 3756.
- Andreastuti, S.D., B.V. Alloway, and I.E.M. Smith, 2000. A detailed tephrostratigraphic framework at Merapi Volcano, Central Java, Indonesia: implications for eruption predictions and hazard assessment, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100: 51-67.
- Bédard, F., G. Reichert, R. Dobbins and I. Trépanier, 2008. Evaluation of segment-based gap-filled Landsat ETM⁺ SLC-off satellite data for land cover classification in southern Saskatchewan, Canada, *International Journal of Remote Sensing*, 29(7): 2041-2054.
- Bignami, C., J. Ruch, M. Chini, M. Neri, M.F. Buongiorno, S. Hidayati, D.S. Sayudi, and Surono, 2013. Pyroclastic density current volume estimation after the 2010 Merapi Volcano eruption using X-band SAR, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 261: 236-243, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2013.03.023
- Camus G, A. Gourgaud, P-C. Mossand-Berthommier, and P-M. Vincent, 2000. Merapi (central Java, Indonesia): an outline of the structural and magmatological evolution, with a special emphasis to the major pyroclastic events, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100: 139-163.
- Charbonnier, S.J., and R. Gertisser, 2008. Field observations and surface characteristics of pristine block-and-ash flow deposits from the 2006 eruption of Merapi Volcano, Java, Indonesia, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177: 971-982.
- Chavez, P.S., 1996. Image-based atmospheric corrections revisited and improved, *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 62: 1025-1036.
- Chander, G., and B. Markham, 2003. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges, *IGARSS*, 41(1): 2674-2677.
- Chander, G., B. Markham, and D.L. Helder, 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM⁺, and EO-1 ALI sensors, *Remote Sensing of Environment*, 113: 893-903.
- Chen, J., X. Zhu, J.E. Vogelmann, F. Gao, and S. Jin, 2011. A simple and effective method for filling gap in Landsat ETM⁺ SLC-off images, *Remote Sensing of Environment*, 115: 1053-1064.
- Chiodini, G., F. Frondini, C. Cardellini, D. Granieri, L. Marini, and G. Ventura, 2001. CO₂ degassing and energy release at Solfatara volcano, Campi Flegrei, Italy, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 106(B8): 16213-16221.
- Dash, P., F.M. Gottsche, F.S. Olesen, and H. Fischer, 2002. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: theory and practice-current trends, *International Journal of Remote Sensing*, 23(13): 2563-2594.
- Dehn, J., K.G. Dean, K. Engle, and P. Izbekov, 2002. Thermal precursors in satellite images of the 1999 eruption of Shishaldin Volcano, *Bulletin of Volcanology*, 64(8): 525-534.
- de Lorenzo, S., P. Gasparini, F. Mongelli, and A. Zollo, 2001. Thermal state of the Campi Flegrei caldera inferred from seismic attenuation tomography, *Journal of Geodynamics*, 32(4-5): 467-486.
- Donegan, S.J., and L.P. Flynn, 2004. Comparison of the response of the Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus and the Earth Observing-1 advanced land imager over active lava flows, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 135: 105-126.
- Dove, M.R., 2008. Perception of volcanic eruption as

- agent of change on Merapi Volcano, Central Java, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172: 329-337.
- Glaze, L.S., P.W. Francis, S. Self, and D.A. Rothery, 1989. The 16 September 1986 of Lascar volcano, north Chile: Satellite investigations, *Bulletin of Volcanology*, 51: 149-160.
- Gillespie, A., A. Rokugawa, T. Matsunaga, J.S. Cothorn, S. Hook, and A.B. Kahle, 1998. A temperature and emissivity separation algorithm for advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4): 1113-1126.
- Higgins, J., and A. Harris, 1997. VAST: A program to locate and analyze volcanic thermal anomalies automatically from remotely sensed data, *Computers & Geosciences*, 23(6): 627-645.
- Hill, D.P., J.O. Langbein, and S. Prejean, 2003. Relations between seismicity and deformation during unrest in Long Valley Caldera, California, from 1995 through 1999, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 127(3-4): 175-193.
- Iguchi, M., K. Ishihara, Surono, and M. Hendrasto, 2011. Learn from 2010 eruptions at Merapi and Sinabung Volcanoes in Indonesia, *Annals of Disas. Prev. Res. Inst.*, Kyoto Univ., 54(B).
- Lagios, E., S. Vassilopoulou, V. Sakkas, V. Dietrich, B.N. Damiata, and A. Ganas, 2007. Testing satellite and ground thermal imaging of low-temperature fumarolic field: The dormant Nisyros Volcano (Greece), *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 62: 447-460.
- Landsat project Science Office, 2006. Landsat 7 Science Data User's Handbook. Available from <http://www.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html>.
- Lee, H., and H. Han, 2005. Analysis of lake water temperature and seasonal stratification in the Han river system from time-series of Landsat images, *Korean Journal of Remote Sensing*, 21(4): 253-271 (in Korean with English abstract).
- Lee, C.W., M. Cho, and Y.J. Choi, 2013. Satellite Imagery Correction Method and System, Republic of Korea, 10-2013-0033580.
- Li, Z.L., and F. Becker, 1993. Feasibility of land surface temperature and emissivity determination from AVHRR data, *Remote Sensing of Environment*, 43: 67-85.
- Mia, M.D.B. and Y. Fujimitsu, 2012. Mapping hydrothermal altered mineral deposits using Landsat 7 ETM+ image in and around Kuju Volcano, Kyushu, Japan, *Journal of Earth System Science*, 121(4): 1049-1057.
- Newhall, C., S. Bronto, B.V. Alloway, S. Andreastuti, N.G. Banks, I. Bahar, M.A. Del Marmol, R.D. Hadisantono, R.T. Holcomb, J. McGeehin, J.N. Miksic, M. Rubin, S.D. Sayudi, R. Sukhyar, R.I. Tilling, R. Torley, D. Trimble, and A.D. Wirakusumah, 2000. 10,000 Years of explosive eruptions at Merapi Volcano, Central Java: Archaeological and modern implications, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 100: 9-50.
- Oppenheimer, C., P.W. Francis, D.A. Rothery, R.W.T. Carlton, and L.S. Glaze, 1993. Infrared image-analysis of volcanic thermal features—Lascar Volcano, Chile, 1984-1992, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 98(B3): 4269-4286.
- Ottle, C., and M. Stroll, 1993. Effect of atmospheric absorption and surface emissivity of the determination of land surface temperature from infrared satellite data, *International Journal of Remote Sensing*, 14: 2025-2037.
- Park, S.H., M.J. Lee, and H.S. Jung, 2012. Analysis on the snow cover variations at Mt. Kilimanjaro using Landsat satellite images, *Korean Journal of Remote Sensing*, 28(4): 409-420 (in Korean with English abstract).

- Park, S.H., H.S. Jung, and H.S. Shin, 2013. An efficient method to estimate land surface temperature difference (LSTD) using Landsat satellite images, *Korean Journal of Remote Sensing*, 29(2): 197-207 (in Korean with English abstract).
- Schädlich, S., F.M. Gottsche, and F.S. Olesen, 2001. Influence of land parameters and atmosphere on Meteosat brightness temperatures and generation of land surface temperature maps by temporally and spatially interpolating atmospheric correction, *Remote Sensing of Environment*, 75(1): 39-46.
- Storey, J., P. Scaramuzza, and G. Schmidt, 2005. Landsat 7 scan line corrector-off gap filled product development, *Proc. of Pecora 16 conference*, Sioux Falls, SD, USA, Oct.23-27.
- Surono, P. Jousset, J. Pallister, M. Boichu, M.F. Buongiorno, A. Budisantoso, F. Costa, S. Andreastuti, F. Prata, D. Schneider, L. Clarisse, H. Humaida, S. Sumarti, C. Bignami, J. Griswold, S. Carn, C. Oppenheimer, and F. Lavigne, 2012. The 2010 explosive eruption of Java's Merapi volcano—A “100-year” event, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 241-242: 121-135.
- Thouret, J-C., F. Lavigne, K. Kelfoun, and S. Bronto, 2000. Toward a revised hazard assessment at Merapi volcano, central Java, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100: 479-502.
- Vidal, A., 1991. Atmospheric and emissivity correction of land surface temperature measured from satellite using ground measurements or satellite data, *International Journal of Remote Sensing*, 12: 2449-2460.
- Voight B, E.K. Constantine, S. Siswoidjjoyo, and R. Torley, 2000. Historical eruptions of Merapi volcano, central Java, Indonesia, 1768-1998, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100: 69-138.
- Wan, Z., D. Ng, and J. Dozier, 1994. Spectral emissivity measurements of land-surface materials and related radiative transfer simulations, *Advances in Space Research*, 14(3): 91-94.
- Wright, R., S. De la Cruz-Reyna, A. Harris, L. Flynn, and J.J. Gomez-Palacios, 2002. Infrared satellite monitoring at Popocatepetl: Explosions, exhalations, and cycles of dome growth, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 107(B8): 2153, doi:10.1029/2000JB000125.