화성쇄설류 분출 지역의 감시를 위한 광학영상과 화성쇄설류 범람 예측 모델링 분석

조민지* · 이사로** · 이창욱*†

*기상청 국립기상연구소, **한국지질자원연구원

Analysis of Optical Satellite Images and Pyroclastic Flow Inundation Model for Monitoring of Pyroclastic Flow Deposit Area

Minji Cho*, Saro Lee** and Chang-Wook Lee*†

*National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration

**Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources

Abstract : Field survey research on damages caused by volcanic activities has plenty of difficulties due to human resources, safety and costs issues. Remote sensing application using satellite image is one of very useful tools to overcome those issues. In this study, we monitored the volcanic activities of Sinabung volcano in 2010, which is located in Sumatra island, Indonesia by using Landsat 7 ETM+ satellite images acquired on 17 April, 2009 and 30 July, 2012. We found that the area of pyroclastic flow inundation after 2010 has been tripled roughly, since extracting the pyroclastic flow inundation before and after 2010 eruption from classification. The result from modeling of pyroclastic flow inundation has been compared with the extracted pyroclastic flow inundation from Landsat 7 ETM+ images. As a result, we confirmed that the length of inundation area from the modeling was calculated to 92% accurate, but the width of inundation area was somewhat imprecisely estimated in the volcanic area having the sharp slope and only calculated to 17% accurate.

Key Words : Pyroclastic flow, Laharz, Remote sensing, Landsat

요약 : 화산활동으로 인한 피해를 현장관측을 통해 조사할 경우, 비용과 인력, 안전 등의 문제로 인한 어려움이 많다. 인공위성 영상을 활용한 원격탐사는 이와 같은 문제를 극복하기에 매우 유용한 도구 중에 하나이다. 본 연구에서는 2009년 4월 17일과 2012년 7월 30일에 획득된 Landsat 7 ETM+ 위성 영상을 이용하여 인도네시아 수마트라 섬에 위치한 시나봉 화산의 2010년 화산활동을 관측하였다. 피복분류를 통해 2010년 분화 전·후의 화성쇄설류 범람 지역을 추출한 결과, 2010년 분화로 인해 화성쇄설류 범람 지역의 면적이 약 3배나 증가한 것을 확인하였다. 화성쇄설류 범람 지역 예측 모델링으로 얻어진 결과는 Landsat 영상에서 추

접수일(2014년 4월 7일), 수정일(1차 : 2014년 4월 15일, 2차 : 4월 15일), 게재확정일(2014년 4월 16일).

† 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.

출된 화성쇄설류 범람 지역과 비교되었다. 그 결과, 화성쇄설류 범람 지역 예측 모델링은 범람의 거리(길이)는 92%로 정확하게 계산되었지만 화산의 경사가 급격한 지역에서는 범람의 폭이 다소 부정확하게 계산되어 17%의 정확도를 나타내었다.

1. 서론

인간이 쉽게 접근할 수 없거나 물리적인 거리가 먼 지역을 관측하기 위해 원격탐사기법이 개발되어 적극 활용되어 오고 있다. 인공위성은 원격탐사를 위한 유용한 도구 중 하나로서, 지진, 화산, 산사태, 지반침하, 빙하, 홍수 등의 자연재해 관측에 적극적으로 활용되고 있다(Cho *et al.*, 2013a; Lee *et al.*, 2010; Donegan and Flynn, 2004). 인공위성 영상을 이용한 화산활동 감시기법은 크게 2가지로 분류할 수 있다. 첫 번째 방법은 광학위성 영상을 이용해 화산활동으로 인한 지표특성의 변화나 분출 피해 지역을 추출하고, 열적외선 밴드를 이용하여 화산 분화구 주변의 지표 온도변화를 감시하는 방법이다(Donegan and Flynn, 2004). 다중 분광 센서로 지구를 관측하고 있는 Landsat, ASTER 등의 광학위성은 암석의 분류에 활용할 수 있는 근적외선(Short Wavelength InfraRed; SWIR; 2.065-2.430 μm) 센서를 탑재하고 있어, 지표면에 노출된 암석의 특성을 분류해 낼 수 있다(Mia and Fujimitsu, 2012). Landsat 7 ETM+ 위성영상의 경우, 가색상 합성(false color composite) 7, 4, 2번 밴드 조합 영상에서 노출된 화산성 분출물을 보라색으로 보여주며, 다중 밴드의 통계분석을 이용한 피복분류를 통해 화산성 분출물에 의한 피해 지역을 추출해 낼 수 있다(Cho *et al.*, 2013a). 과학의 발전으로 인해 IKONOS나 Kompsat-3와 같은 1 m급 고해상도 위성이 운영되면서 더 정밀하고 정확한 피해 지역 추출이 가능해졌다.

또 다른 방법은 SAR 영상을 이용하여 화산에서 발생된 지표변위를 관측하는 것이다. 차분간섭기법은 수십 km^2 의 넓은 지역에 걸친 지표변위를 수 mm내지 수 cm의 정밀도로 관측할 수 있는 기법이다(Masonnet and Feigl, 1998). 차분간섭기법을 이용하여 전세계적으로 화산 분출의 전·후에 발생된 지표변위를 관측한 많은 연구가 수행된 바 있다(Cho *et al.*, 2013b; Philiposian and Simons, 2011; Ebmeier *et al.*, 2010; Lu *et al.*, 2007; Lu *et al.*, 2005).

본 연구는 400년간의 휴지기를 끝내고 2010년에 다

시 분화가 시작된 인도네시아 수마트라 섬에 위치한 시나봉 화산의 화성쇄설류(pyroclastic flow) 범람 지역을 Landsat 7 ETM+ 광학 위성 영상을 이용해 분석하였다(Global Volcanism Program; GVP). 2010년 분화시 시나봉 화산은 긴 휴지기를 가졌기 때문에 화산 모니터링 시스템이 매우 빈약한 상태였다. 2010년 9월 이후 다시 3년의 휴지기를 가진 시나봉 화산은 2013년 9월부터 많은 화산재와 화성쇄설류를 동반한 활발한 화산활동을 지금까지 지속하고 있다. 2010년 분화 이후 화산활동을 감시하기 위해 GPS, EDM, 열적외선 카메라 등의 모니터링 시스템이 구축되었지만, 화산의 분화를 예측하고 피해를 최소화하기 위해서는 장기간 화산거동을 분석하고 파악해야만 한다(De la Cruz-Reyna, 1991; Blong, 1984). Fig. 1은 본 연구의 자료처리 과정을 보여준다. 본 연구를 위해 수집된 2010년 분화 전·후의 Landsat 영상은 가색상 합성을 통해 노출된 화산성 분출물의 존재 여부를 판별하고, 피복분류를 적용하여 화성쇄설류에 의한 피해 지역을 추출하였다. 추출된 화성쇄설류 범람 지역은 USGS에서 발표한 이류(lahar)나 산사태(debris flow), 낙석(rock-fall)에 의한 피해 지역을 예측하는 Laharz 모델을 바탕으로 화성쇄설류에 대한 경험적 계수를 적용한 화성쇄설류 범람 지역 예측 모델의 결과와 비교하였다(Widiwijayanti *et al.*, 2009; Iverson *et al.*, 1998). Iverson *et al.*(1998)은 9개의 화산에 존재하는 27개의 수계에서 발생된 이류를 통계 분석하여, 이류의 분출량에 대한 함수로 이류 범람 지역의 수평면적(planimetric area)과 적분된 수직단면적(cross-sectional area)을 계산하는 공식을 개발

Fig. 1. Processing flowchart of this study.

하였다. Geographic Information System (GIS) 기반으로 수행되는 Laharz 모델은 입력된 수치고도모델(Digital Elevation Model; DEM)과 이류 분출량을 바탕으로 Iverson *et al.*(1998)이 발표한 공식을 이용하면 사용자가 선택한 수계에서 흘러내린 화성쇄설류의 범람 지역을 수학적으로 예측할 수 있다. 이를 바탕으로 시나봉 화산 지대에 Laharz 모델을 수행하여 Landsat 영상에서 관측된 화성쇄설류의 범람 지역이 어느 정도의 분출량을 가질 때 가장 잘 일치하는지 추정하였다. 이와 같은 원격탐사기법을 활용한 화산 모니터링은 현장에서 관측된 실측자료와 함께 활용될 경우, 화산 분화 예측 시스템에 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

2. 연구지역

인도네시아의 화산지질재해방지센터(Center of Volcanology and Geological Hazard Mitigation; CVGHM)와 지질기관(Geological Agency; GA), 에너지광물자원부(Ministry of Energy and Mineral Resources; MEMR)는 인도네시아의 127개 화산에 대하여 화산활동에 따른 정보와 정보 레벨에 해당하는 대비책을 마련해, 화산으로 인한 인명피해를 예방하고 있다. 127개의 화산은 크게 3가지 유형으로 분류되는데, 17세기 이후에 분화 이력이 있는 화산을 A 유형, 17세기 이전에 분화한 화산을 B 유형,

화산의 분기공만 활동을 보이는 화산을 C 유형으로 분류한다. A 유형에 속해 있는 화산들만 CVGHM과 GA, MEMR로부터 지진계, GPS, tiltmeter, 열적외선 카메라 등을 통한 상시 관측이 수행되며, B 유형의 화산들은 감시되지 않는다. 인도네시아 수마트라섬의 북부에 위치한 시나봉 화산은 2010년 분화 이전에 B 유형에 속하는 화산이었다(Fig. 2)(Iguchi *et al.*, 2011). 따라서 시나봉 화산은 아무런 상시 관측 시스템이 없는 상태에서 400년 만에 다시 화산활동을 시작하였다. 시나봉 화산의 화산 활동 재개에 많은 화산학자들이 관심을 가지는 이유는 반경 50 km 정도 떨어진 토바(Toba) 화산 때문이다. 토바 호수는 거대한 칼데라 분화로 인해 생성되었고, 토바 화산은 전세계적으로 위험이 될 만큼 강력한 폭발력을 가지는 화산분화지수(Volcanic Explosivity Index; VEI) 8에 해당한다. 인근의 화산인 시나봉 화산의 활동은 토바 화산이 긴 휴지기를 끝내고 다시 화산 활동을 시작할 수도 있다는 가능성을 암시한다.

마그마의 열이 간접적으로 지하수를 데워 지표로 수증기를 내뿜는 형태의 수증기 폭발(Phreatic eruption)은 수증기뿐만 아니라 주변의 암석이나 토양도 함께 분화된다. 이와 같은 분화는 수증기, 물, 화산재, 암석 등이 팽창된 수증기의 엄청난 압력으로 인해 지표 밖으로 폭발적인 분화를 야기한다. 2010년에 시나봉에서 발생한 모든 분화는 수증기 폭발의 형태로 발생했다(Iguchi *et al.*, 2011). 2010년 8월 27일에 시나봉 화산의 첫 분화로 인해 시나봉 화산을 감시하기 위한 시스템이 구축되기 시작했고, 2010년 8월 30일에 시나봉 화산의 정상을 중심으로 반경 6 km에 거주하는 모든 주민들이 대피했다(Table 1). 그럼에도 불구하고 두 명의 사상자가 발생했으며, 9월 7일에는 최대 8 km까지 화산재 기둥이 치솟는 등 9월 21일까지 수 차례 분화가 지속적으로 발생했다(GVP). Fig. 3은 2010년 9월 11일에 촬영된 Landsat 7 ETM+ 영상으로 9월 7일에 발생한 화산 분화의 화산재가 시나봉 화산의 동남쪽 부분에서 검게 나타난 것을 볼 수 있다(Darwin Volcanic Ash Advisory Center; VAAC).

Fig. 4는 2010년 8월 29일부터 2011년 1월 31일 사이에 시나봉 화산에서 발생된 화산성 지진의 횡수를 보여준다. 시나봉에서 발생된 화산성 지진은 크게 volcanotectonic A(VA or VTA), volcanotectonic B(VB or VTB), hembusan으로 분류된다. VTA는 진원의 깊이가 2 ~ 5 km 깊이에

Fig. 2. Depth of subduction zone in Sumatra island, Indonesia. Red triangle is Sinabung Volcano and yellow triangle is Toba Volcano.

Table 1. Eruption history of Sinabung Volcano in 2010

Date	Ash plume height	Damage
27~28, Aug	20 m	Ashfall (the villages of Sukameriah, Gungpitu, Sigarang-garang, Sukadebi, and Susuk)
30, Aug	2 km	Evacuation of 20,000~30,000 residents., killed 2 people
3, Sep	3 km	Large explosion
7, Sep	5~8 km	Drift SE
12~14, Sep	4.3~4.6 km	Drift E., alert level 4
15~21, Sep	4.3 km	Drift W.

Fig. 3. Landsat 7 ETM+ image(RGB = 3,2,1) acquired on 11 September, 2013.

Fig. 4. The number of volcanic earthquakes during the period from 29 Aug, 2010 to 31 Jan, 2011(modified from Iguchi *et al.*, 2011).

서 발생하는 심발지진, VTB는 1.5 km보다 얕은 깊이에서 발생하는 천발지진, hembusan은 인도네시아어로 화산성 가스 분출과 관련하여 발생하는 지진을 의미한다

(Iguchi *et al.*, 2011). 2010년 9월 말까지는 VTB 지진이 VTA 지진보다 빈번하게 발생되었고, 그 이후에는 VTA 지진이 우세하게 발생하였다(Fig. 4). 이는 화산의 분화가 지속되고 있는 9월 말까지는 산정상 인근의 분화구에서 발생한 화산활동으로 인해 천발지진이 많이 발생했으며, 화산활동이 중단되고 난 후에는 마그마가 얇은 지각보다 심부에서 움직임을 보였기 때문에 나타난 현상으로 판단된다. Hembusan 지진은 8월 말기와 9월 초기에 활발하게 발생된 후, 점차 그 발생 횟수가 줄어들었다. Fig. 5(a)는 2010년 9월 6일부터 7일까지 발생된 지진의 진원을 보여준다. 붉은 점은 9월 7일 분화 이전에 발생된 지진의 진원을, 파란색은 분화 이후에 발생된 지진의 진원을 의미한다. 분화 이전에는 심부 -2 km에서 8 km까지 넓게 분포하던 지진의 진원이 분화 이후 -1 km에서 3 km 사이의 산정상 부근에 집중되어 나타났다. Fig. 5(b)는 2010년 9월 8일부터 9월 22일 동안에 발생된

Fig. 5. Hypocentral distribution of volcanic earthquakes at Sinabung Volcano during the period from 6 Sep, 2010 to 7 Sep, 2010(a) and 8 Sep, 2010 to 22 Sep, 2010(b). Red and blue dots indicate hypocenters before and after the eruption at 7 Sep, 2010, respectively. Green stars indicate the locations of seismic survey stations.(modified from Iguchi *et al.*, 2011).

지진의 진원을 보여준다. 이 기간 동안에는 대부분 지진의 진원이 산정상 부근에 집중되어 발생했지만, 남북방향의 단면도를 보면 심부로 갈수록 진원이 Kawar 호수 인근에 위치한 지진계 KWR 방향으로 기울어지고 있는 것을 볼 수 있다(Fig. 5(b)). 실제로 2013년 10월 22일에 Kawar 호수 방향으로 해발고도 50 ~ 70 m 정도에 새로운 분기공이 생겨났다. 진원의 이동은 심부의 마그마 방의 위치와 이동경로를 의미한다(Fig. 5(b))(CVGHM).

2010년 9월 이후에 잠잠해진 시나봉 화산은 3년 뒤인 2013년부터 다시 화산활동을 재개했다. 2010년 분화와 달리, 2013년 발생한 분화는 현재까지도 분화가 지속되고 있으며 많은 양의 화산재를 내뿜고 화성쇄설류와 낙석이 수 차례 발생했다. 2014년 2월 1일에는 대피명령

이 내려졌음에도 불구하고 거대한 화성쇄설류가 남쪽 사면으로 4.5 km까지 분출되어 15명이 죽고 2명이 심각한 부상을 입었다(CVGHM). 계속되는 시나봉 화산의 분출로 인해 분출 양상 및 전조 현상에 대한 연구와 재해에 따른 피해 예방책 마련이 시급한 실정이다.

3. 자료처리

1) Processing of Landsat Satellite Images

본 연구를 위해서 2009년 4월 17일과 2012년 7월 30일에 촬영된 두 장의 Landsat 7 ETM+ 영상을 수집하였

Fig. 6. False color composite(RGB = 7,4 and 2) images of Landsat 7 ETM+ acquired on 17 April, 2009 (a) and 30 July, 2012 (d). (b) and (e) are the results of GIF method using (a) and (d), respectively. (c) and (f) are the results of supervised classification using (b) and (e), respectively.

다. 2003년 5월 31일에 Landsat 7 ETM+ 위성의 Scan Line Corrector (SLC) 작동이 중지되면서 일부 화소 값이 영상에 기록되지 않는 문제가 발생하였고, 이 현상을 'SLC-off' 라 부른다(Storey *et al.*, 2005). 본 연구에서 수집된 2010년 분화 전 · 후를 촬영한 두 장의 Landsat 7 ETM+ 영상도 SLC-off 현상 때문에 일정한 간격을 가지고 화소 값이 기록되지 않았다(Fig. 6(a)와 (d)). 이 문제를 해결하기 위한 연구들이 수 없이 진행되어 왔으며, 본 연구에서는 최근 제시된 Lee *et al.*(2013)의 Gap Interpolation & Filtering (GIF) 기법을 이용하여 화소가 손실된 부분을 복구시켰다. GIF 기법은 시간에 따른 지표피복의 변화를 관측하는 연구에 적합하며, 1차원 보간 기법을 적용하여 간편하면서도 높은 복원 정확도를 제공한다(Lee *et al.*, 2013; Cho *et al.*, 2013a). 이 기법을 적용하여 인도네시아 메라 피 화산에서 1994년부터 2012년 동안에 발생된 지표 피복과 지표온도 변화를 성공적으로 관측한 연구가 수행된 바 있다(Cho *et al.*, 2013a). Fig. 6(b)와 (e)는 수집된 두 장의 Landsat 7 EMT+을 GIF 기법에 적용한 결과를 보여준다. 이 기법은 SLC-off 현상으로 발생된 화소 손실 영

역의 간격이 좁을수록 높은 정확도를 제공한다. 연구지역인 시나봉 화산은 화소 손실 영역이 매우 좁은 지역이므로, Lee *et al.*(2013)의 알고리즘이 본 연구지역에 대하여 시간에 따른 지표 피복을 연구하기에 충분한 복원 결과를 제공함을 확인할 수 있었다(Fig. 6(b)와 (e)).

GIF 기법으로 복원된 Landsat 7 ETM+ 위성의 7번 밴드를 적색, 4번 밴드를 녹색, 2번 밴드를 청색으로 설정한 가색상 합성 영상은 도심지를 짙은 분홍색, 성긴 작황지를 주황색이나 갈색, 무성한 숲이나 잔디를 녹색, 물을 파란색, 화산성 분출물을 보라색으로 표현한다(Fig. 6(b)와 (e))(Cho *et al.*, 2013a). 화산성 분출물이 덮고 있는 지표 피복을 추출하기 위해, ERDAS ERMapper 소프트웨어를 이용하여 Maximum Likelihood Enhanced 기법으로 산림, 물, 농경지, 도심, 그림자, 화산성 분출물 총 6개의 지표 피복으로 영상을 분류하는 감독분류를 수행하였다(Fig. 6(c)와 (f)). 2010년 분화로 인해 남쪽, 남동쪽, 동쪽 사면에 화성쇄설류가 흘렀다는 것을 Fig. 6(c)와 (f)에서 확인할 수 있다. Fig. 6(e)에서 밝은 보라색으로 표현되고 있는 화성쇄설류 인근의 짙은 갈색으로 나타난 분

출물들이 Landsat 7 ETM+ 위성의 1~5번, 7번 밴드를 통계 분석한 결과, 기존에 분출된 화성쇄설류 지역과 같은 지역으로 분류되어 갈색으로 나타났던 지역이 6개의 밴드에서 통계적으로 화성쇄설류와 유사한 화소 특성을 가지고 있었음이 Fig. 6(f)에서 확인되었다.

2) Modeling of Pyroclastic Flow Inundation

일반적으로, 이류나 화성쇄설류와 같은 화산성 분출물의 범람 지역은 현장 관측을 기반으로 조사되어 왔다. 그러나 화산은 사람이 접근하기 어려운 지역이 많고, 광범위한 지역의 조사를 위한 인력, 시간, 경비의 소요가 매우 크며, 화산 활동이 활발한 화산의 경우 안전을 보장 받을 수 없기 때문에 모든 화산에 대한 현장조사를 하기는 매우 어렵다(Schilling, 1998). 이러한 문제를 극복하고, 모든 화산에 대해서 화산성 분출물의 범람 지역을 쉽게 예측하고 재해위험도를 작성하기 위해, Iverson *et al.*(1998)은 9개의 화산에서 발생한 27번의 이류의 현장 관측 자료를 바탕으로, 분출된 이류 범람 지역의 적분된 수직단면적 A와 수평면적 B를 이류의 분출량 V에 대한 함수로 정의했다. Iverson *et al.*(1998)은 이류 범람 지역의 A와 B가 V^2 과 비례한다는 사실을 통계 분석으로 정의했으며, 경험적 계수 C와 c를 계산했다($C = 0.05, c = 200$).

$$\log A = \log C + (2/3) \log V \quad (1)$$

$$\log B = \log c + (2/3) \log V$$

수식 (1)은 통계분석으로 산출된 경험식이며, 관심 지역의 수치고도모델만 있다면 사용자가 입력한 이류의 분출량 V를 바탕으로 선택된 수계를 따라 이류가 범람 될 지역을 예측할 수 있게 해준다(Iverson *et al.*, 1998). Widiwijayanti *et al.*(2009)은 수식 (1)을 이용하여 4개의 화산에서 발생한 29번의 화성쇄설류에 대한 통계 분석을 수행해 화성쇄설류 범람 지역을 계산하는 경험적 계수를 산출했다($C=0.05, c=35$ or $C=0.1, c=40$). 일반적으로 화성쇄설류는 block-and-ash 유형과 surge 유형으로 분류된다. block-and-ash 유형은 부석(pumice)과 화산재(fine ash)보다는 주로 용암덩어리(block of lava)와 입자가 매우 큰 화산재(coarse-grained nonvesicular ash particles)로 구성되어 있으며, 보통 지심의 압력이 높아져 산정상의 라바 돔(lava dome)이 폭발하여 붕괴되면서 발생한다. 이러한 유형의 화성쇄설류는 인도네시아에 있는 활화산에서

자주 발생하며, 인도네시아 자바섬의 메라피 화산이 대표적이다. 수증기를 풍부하게 포함하고 있는 마그마가 갑작스러운 폭발적인 분화로 인해 뜨거운 수증기 구름을 동반한 화성쇄설류를 발생시키는데, 이를 화쇄난류(pyroclastic surge)라 한다. 화쇄난류는 매우 빠르고 유동성이 뛰어나며 뜨겁기 때문에, 무서운 재앙 중에 하나이다(Schmincke, 2004). Widiwijayanti *et al.*(2009)은 화쇄난류를 제외한 block-and-ash 유형의 화성쇄설류 기록만을 가지고 경험적 계수 C와 c를 산출했다. 본 연구에서는 Iverson *et al.*(1998)의 수식과 Widiwijayanti *et al.*(2009)의 계수를 바탕으로 3-arc SRTM 수치고도모델을 이용하여 시나봉 화산의 화성쇄설류 범람 지역을 계산하였다($C=0.05, c=35$ or $C=0.1, c=40$). 또한 Schilling(1998)에 의해 개발된 GIS 프로그램 기반의 Laharz 프로그램을 수정하여 사용했으며, 이 프로그램은 입력된 DEM을 이용하여 수계를 계산하고, 사용자가 선택한 하나의 수계에서 사용자가 입력한 분출량에 대한 범람 지역을 계산한다. 그러나 실제로는 분화가 발생했을 때, 여러 수계로 동시에 분출물이 흐르는 경우가 종종 발생된다. Laharz 프로그램은 이러한 부분을 반영하지 못하기 때문에 본 연구에서는 산 정상 분화구와 가까운 4개의 수계를 선택하여 각각 27,000 m³, 50,000 m³, 100,000 m³ 그리고 150,000 m³의 화성쇄설류 분출량에 대한 범람 지역을 계산했다(Widiwijayanti *et al.*, 2009).

4. 결 과

추출된 산 정상의 2010년 분화 전 · 후 화성쇄설류 범람지역을 비교하기 위해, Fig. 7과 같이 2009년 4월 17일과 2012년 7월 30일에 획득된 Landsat 7 ETM+ 영상으로부터 추출된 화성쇄설류 범람지역을 함께 도시하였다. 2009년 4월 17일 영상에서 추출된 화성쇄설류 범람 지역의 단면적은 약 0.315 km²이지만, 2012년 7월 30일 영상에서 추출된 화성쇄설류 범람 지역의 단면적은 약 0.872 km²으로 2010년 분화 전보다 약 2.8배나 넓어졌으며, 주로 동쪽 사면으로 많은 화성쇄설류가 흘렀음이 확인된다.

Fig. 8의 검은 선은 앞서 Landsat 영상에서 추출한 2010년 분화 후의 화성쇄설류 범람지역이며(2012년 7월 30

Fig. 7. Pyroclastic flow inundation before and after 2010 eruption at Sinabung Volcano. Lines are contour on Landsat 7 ETM+ panchromatic image acquired on 17 April, 2009.

Fig. 8. The pyroclastic flow inundation estimated from revised Laharz program by various volumes (a) $C = 0.1$, $c = 40$, (b) $C = 0.05$, $c = 35$). Black line is the pyroclastic flow's inundation area after 2010 eruption from Landsat. Gray line represents drainage extracted from SRTM.

일에 촬영된 Landsat 7 ETM+ 영상), 회색선은 수치고도 모델로부터 계산된 수계를 나타낸다. 본 연구에서는 Widiwijayanti *et al.*(2009)가 제시한 4개의 화산에서 발생된 29개의 화성쇄설류 기록으로 계산된 첫 번째 계수 $C=0.05$, $c=35$ 와 몬세라트 화산에서 발생된 11개의 화성쇄설류 기록만으로 계산된 두 번째 계수 $C = 0.1$, $c = 40$

에 대해서 각각 분석하였다(Fig. 8(a)와 (b)). 산 정상 분화구와 가까운 4개의 수계를 선택하여 각각 27,000 m³, 50,000 m³, 100,000 m³ 그리고 150,000 m³의 화성쇄설류 분출량에 대한 범람 지역을 계산한 결과, 계수 C 가 큰 값을 가질수록 범람지역의 폭이 넓어지며 범람의 거리(길이)가 짧아지는 경향을 보였고, 계수 c 가 클수록 범람된

지역의 면적이 커지는 경향이 나타났다(Fig. 8(a)와 (b)). 두 결과의 설정된 화성쇄설류의 분출량에 대한 범람지역의 면적이 Fig. 8(a)와 (b)에 표시되어 있다.

Fig. 8(a)와 (b) 두 경우 모두 화성쇄설류의 분출량이 27,000 m³일 때, 예측된 범람 지역의 거리(길이)가 Landsat 영상의 화성쇄설류 범람 지역과 잘 일치하는 것을 볼 수 있다(Fig. 8(a)와 (b)). 그러나 화성쇄설류 범람 지역의 거리(길이)가 잘 맞는 반면에 범람 지역의 폭이 매우 좁게 계산된 것을 볼 수 있다. 이 문제는 Laharz 프로그램의 계산 방식상 사면의 경사가 급할수록 범람 지역의 폭이 좁게 산출되는 경향을 보이기 때문에 발생된다(Widiwijayanti *et al.*, 2009). 실제 분화 시에는 많은 양의 화산재가 발생하고 가벼운 화산재는 바람을 타고 주변으로 확산되지만, 무거운 화산재들은 분화와 동시에 산정상 부근에 떨어지게 된다. 또한 화쇄난류가 발생할 경우, 뜨거운 수증기 구름을 타고 광범위한 범위로 화산재와 토사, 암석들이 확산되게 된다(Schmincke, 2004). Landsat 영상의 화성쇄설류 범람 지역과 수정된 Laharz 프로그램의 산출 결과가 차이가 나는 이유는 수식(1)의 계수 C와 c가 block-and-ash 유형의 화성쇄설류만을 고려하여, 화산재나 화쇄난류와 같은 다양한 분화 현상을 반영하는데 한계를 지니기 때문이다. 시나봉 화산의 경우, 4개의 화산에서 발생한 29개의 화성쇄설류 분출 기록으로 계산된 Fig. 8(b)의 결과보다 몬세라트 화산의 화성쇄설류 분출 기록만을 가지고 계산한 Fig. 8(a)의 결과가 Landsat 7 ETM+의 화성쇄설류 범람 지역과 더 잘 일치했다(Widiwijayanti *et al.*, 2009). 따라서 본 연구지역은 C = 0.1, c = 40의 계수로 계산된 범람 지역이 Landsat 7 ETM+의 화성쇄설류 범람 지역과 비교해 볼 때 더 적합한 결과를 제공할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 400년간의 긴 휴지기 끝에 2010년부터 활발한 화산활동을 보이고 있는 시나봉 화산의 화성쇄설류 범람 지역을 관측하고, 범람 지역을 예측할 수 있는 모델링을 수행하였다. 2010년 분화 전 · 후에 관측된 Landsat 7 ETM+ 영상을 이용하여 추출된 화성쇄설류 범람 지역을 비교한 결과, 2010년 분화시 남쪽, 남동쪽, 동

쪽 사면에 화성쇄설류가 흘렀다는 것을 알 수 있었다. 또한 분화 전 화성쇄설류 범람 지역의 단면적은 약 0.315 km²이지만, 분화 후 계산된 화성쇄설류 범람 지역의 단면적은 약 0.872 km²으로 2010년 분화 전보다 약 2.8배나 넓어졌다. Iverson *et al.*(1998)의 수식과 Widiwijayanti *et al.*(2009)의 계수를 바탕으로 분화구 인근의 4개의 수계에 대하여 예측된 화성쇄설류 범람 지역은 C = 0.05, c = 35의 경험적 계수보다 C = 0.1, c = 40의 경험적 계수로 얻어진 결과가 Landsat 7 ETM+ 영상에서 추출된 분화 후 화성쇄설류 범람 지역과 좀 더 잘 일치하였다. Widiwijayanti *et al.*(2009)에서 제시한 대로라면 C = 0.05, c = 35의 경험적 계수를 적용한 결과가 Landsat 7 ETM+의 화성쇄설류 분출 지역과 비교했을 때 더 좋은 결과를 제공해야 하지만, 계수 C와 c가 경험적 계수이기 때문에 시나봉 화산의 분화를 잘 반영하지 못한 것으로 판단된다. 따라서 본 화성쇄설류 범람 예측 모델링은 연구 대상인 화산의 과거 분화 기록을 바탕으로, 각 화산별로 산출된 계수 C와 c를 얻을 경우에 더 좋은 결과를 계산해 낼 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서와 같이 인공위성을 이용한 원격탐사를 통해 화성쇄설류의 범람 피해 지역을 관측하고, 화성쇄설류 범람 지역을 예측하는 연구는 화산의 분화 정도에 따른 피해 지역을 미리 예측하여 그 피해를 최소화할 수 있는 방법 중 하나라고 사료된다. 특히 국내의 가장 위협적인 화산인 백두산과 같이 접근이 어려운 화산의 경우, 본 연구와 같은 원격탐사를 활용한 화산 감시가 적합할 것이라고 사료된다. 시나봉 화산의 2010년 분화에 대해서 현장관측 자료가 매우 부족하기 때문에, 본 연구의 연구 결과와 함께 분석될 수 없었다. 만일 현장관측 자료와 함께 원격탐사 기법을 적용해 얻은 결과를 분석할 수 있다면 더 좋은 연구 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

사사

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

Reference

- Blong, R., 1984. *Volcanic hazards-a sourcebook on the effects of eruptions*, Australia, Sydney: Academic Press.
- Cho, M., Z. Lu, and C.W. Lee, 2013a. Time-series Analysis of Pyroclastic Flow Deposit and Surface Temperature at Merapi Volcano in Indonesia using Landsat TM and ETM+, *Korean Journal of Remote Sensing*, 29(5): 433-459(in Korean with English abstract).
- Cho, M., L. Zhang, and C.W. Lee, 2013b. Monitoring of Volcanic Activity of Augustine Volcano, Alaska using TCPIInSAR and SBAS Time-series Techniques for Measuring Surface Deformation, *Korean Journal of Remote Sensing*, 29(1): 21-34(in Korean with English abstract).
- Center of Volcanology and Geological Hazard Mitigation, <http://www.vsi.esdm.go.id/>.
- De la Cruz-Reyna, 1991. Poisson-distributed patterns of explosive eruptive activity, *Bulletin of Volcanology*, 54: 57-67.
- 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.
- Ebmeier, S.K., J. Biggs, T.A. Mather, G. Wadge, and F. Amelung, 2010. Steady downslope movement on the western flank of Arenal volcano, Costa Rica, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11, Q12004, doi:10.1029/2010GC003263.
- Global Volcanism Program, Smithsonian, <http://www.volcano.si.edu/index.cfm>.
- 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).
- Iverson R.M., and S.P. Schilling, J.W. Vallance, 1998. Objective delineation of lahar-inundation hazard zones, *Geological Society of America Bulletin*, 110(8): 972-984.
- Lee, C.W., Z. Lu, H.S. Jung, J.S. Won, and D. Dzurisin, 2010. Surface deformation of Augustine volcano(Alaska), 1992-2005, from multiple-interferogram processing using a refined SBAS InSAR approach, USGS Professional Paper, 1769, pp. 453?465.
- Lee, C.W., M. Cho, and Y.J. Choi, 2013. Satellite Imagery Correction Method and System, *Republic of Korea*, 10-2013-0033580.
- Lu, Z., C. Wicks, D. Dzurisin, and J. Power, 2005. InSAR Studies of Alaska Volcanoes, *Korean Journal of Remote Sensing*, 21(1): 59-72.
- Lu, Z., D. Dzurisin, C. Wicks, J. Power, O. Kwoun, and R. Rykhus, 2007. Diverse deformation patterns of Aleutian volcanoes from satellite interferometric synthetic aperture radar (InSAR), in *Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region*(edited by J. Eichelberger *et al.*), *American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, 172: 249-261.
- Massonnet, D., and K.L. Feigl, 1998. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface, *Review of Geophysics*, 36: 441-500.
- Mia, MD.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.
- Philibosian, B. and M. Simon, 2011. A survey of volcanic deformation on Java using ALOS PALSAR interferometric time series, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 12(11): 1-20.
- Schilling, S.P., 1998. LAHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar-inundation zones, US Geol. Survey, Open-file Report 98-638.
- Schminke, H.U., 2004. *Volcanism*, Springer Berlin

- Heidelberg New York, ISBN 3-540-43650-2.
- 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, South Dakota, USA.
- Darwin Volcanic Ash Advisory Center, <http://www.bom.gov.au/info/vaac/>.
- Widiwijayanti, C., B. Voight, D. Hidayat, and S.P. Schilling, 2009. Objective rapid delineation of areas at risk from block-and-ash pyroclastic flows and surges, *Bull. Volcanol.*, 71: 687-703.