

점토광물의 분광반사율 및 ASTER 위성영상을 이용한 산사태 발생지역 분석

남경훈¹ · 이흥진² · 정교철^{1*}

¹안동대학교 지구환경과학과, ²한국지질자원연구원 국토지질연구본부

Analysis of Landslide locations using Spectral Reflectance of Clay Mineral and ASTER Satellite Image

Koung-Hoon Nam¹, Hong-Jin Lee², and Gyo-Cheol Jeong^{1*}

¹Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

²Geological Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Received 25 August 2014; received in revised form 10 September 2014; accepted 11 September 2014

이 연구의 목적은 2011년 경기도 용인시에서 발생한 산사태 지역을 대상으로 산사태 발생에 영향을 끼치는 팽창성 점토광물 및 지형분석을 통한 산사태 발생 원인을 분석하는 것이다. XRD, XRF, 분광분석 및 아스터(ASTER) 위성영상을 이용하여 점토광물 분석과 현장조사를 통한 산사태 발생원인과 취약지역을 분석하였다. 일라이트는 0.9와 1.0 μm 인근과 장대역에서 Fe^{2+} 와 Fe^{3+} 의 흡수가 나타났으며 1.4와 1.9 μm 인근과 장대역에서 OH와 H_2O 의 강한 흡수 특성이 일어났다. 추가적으로 2.2, 2.3과 2.4 μm 인근과 장대역에서 Al-hydroxyl이 나타났다. 흡수 특징은 아스터 위성영상의 밴드 5, 6, 7에서 일치하였고, SWIR_{Illite} 밴드연산을 이용하여 일라이트 영상을 추출하였다. 분석 결과를 바탕으로 팽창성 점토광물에 의한 산사태 해석에 아스터 위성영상의 적용 가능성을 확인하였다.

주요어 : 산사태, 분광반사율, 점토광물, 아스터, 밴드연산

The purpose of this study is to analyze the key factors that contribute to landslide causes through swelling clay minerals and terrain analysis in landslide sites taken place of in Yongin city, Gyeonggi-do, 2011. The study was conducted based on field survey by XRD (X-ray Diffraction), XRF (X-ray fluorescence), spectroscopic analysis on soil samples obtained from landslide sites and ASTER satellite image. Illite shows absorption features; Fe^{2+} and Fe^{3+} at 0.9 and 1.0 μm , broad water absorption features near 1.4 and 1.9 μm , and additional Al-hydroxyl features at 2.2, 2.3 and 2.4 μm , respectively. These absorption features are consistent with the bands 5, 6, and 7 of ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) satellite image. Illite image was extracted using band math of SWIR_{Illite}. From these results, we confirmed the applicability of ASTER satellite image using identification of swelling clay minerals to landslide study.

Key words : landslide, spectral reflectance, clay mineral, ASTER, band math

*Corresponding author: jeong@anu.ac.kr

© 2014, The Korean Society of Engineering Geology

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.

서 론

점토광물은 수축 및 팽창으로 인해 구조물에 피해를 입히는 것뿐만 아니라 자연사면에서의 불연속면 및 전단면을 발생시켜 산사태를 유발하는 사면 불안정성을 야기 시킨다. 점토광물의 팽창은 점토 판 사이의 점토 구조에 포함된 물 분자의 화학적 인력에 기인한다. 점토광물이 수분을 보유하기 어려울 때 점토판은 분리되며 광물 구조가 불안정해 진다. 점토의 팽창에 관여하는 요인은 토양에서 점토입자의 양과 유형, 양이온교환용량, 점토입자 크기, 토양밀도, 토양수분의 함량 및 구조, 표면부하량이다. 팽창성 점토광물의 세 가지 주요 그룹은 몬토릴로나이트, 일라이트, 카올리나이트이며 몬토릴로나이트가 가장 팽창성이 높고 카올리나이트가 팽창성이 가장 낮다(Van der Meer, 1999). 이들은 점토광물을 형성하는 가장 일반적인 토양이며(Gray and Murphy, 2002) 지질공학에서 토양 팽창과 수축 가능성을 나타내는 주요 지시자로 간주된다(Al-Rawas, 1999; Fall and Sarr, 2007). 점토광물은 광물 조성, 구조 및 물리 화학적 특성은 서로 다르게 나타난다. 토양 팽창은 지질공학의 주요 문제를 야기하며 활성 점토광물의 존재로 인해 발생하는 고유 속성이다(Snethen, 1975; Al-Rawas, 1999; Bell, 1999; Shi et al., 2002; Sridharan and Gurtug, 2004; Kim et al., 2005; Al-Mukhtar et al., 2010; Seco et al., 2011). 점토광물의 존재를 감지하는 것은 잠재 팽창성 토양을 구별하기 위한 주요 요인이며 식별 및 정량화는 토양 팽창을 평가함에 있어서 필수적이다.

지질공학적 실험인 애틀버그(Atterberg) 한계실험 및 팽창률을 측정하는 압밀실험과 같은 실내 실험은 노동 집약적이고 고가이며, 현장에서 측정 및 결과를 제공하지 않는다. 실내실험들은 노동 집약적 실내 실험의 결과로써 팽창 가능성 상대적 지수를 제공한다(Van der Meer, 1999). 특히 X선회절분석(XRD), 주사전자현미경(SEM), 투과전자현미경(TEM), 시차열분석(DTA), 열중량분석(TGA) 기법을 사용한 토양의 점토광물을 분별하는 방법이 오랫동안 사용되어 왔으며 점토광물의 기본물성을 분석하기 위한 실내실험으로 필수적이다. 그러나 상대적으로 고가이고 복잡한 분석 절차를 요구하므로 지질공학에서 일상적인 분석을 위한 토질역학 실험으로는 흔히 사용되지 않는다(Yitagesu et al., 2009).

한편, 센서기법의 향상으로 ASTER (Advanced Space-

borne Thermal Emission and Reflection Radiometer) 위성영상이 산사태 연구에 사용되어 왔다(Crowley et al., 2003; Liu et al., 2004; Fourniadis et al., 2007; Santini et al., 2009; Choi et al., 2012; Nefeslioglu et al., 2012; Song et al., 2012). Santini et al. (2009)은 국내에서 주로 발생하는 산사태 유형인 얇은 산사태(shallow landslide)를 사면안정 모델인 SHALSTAB (Shallow Landslide Stability)으로 다양한 지형 분석 절차의 효과를 분석하기 위해 아스터 데이터로부터 생산된 DEMs 비교를 수행하였다. 또한 분광반사율 특성을 이용하여 토양에 주로 분포하는 광물을 분석한 후 아스터 위성영상의 다양한 밴드연산(band math)을 통해 지수(index) 영상을 생성하는 연구가 진행되어 왔다(Rowan and Mars, 2003; Tommaso and Rubinstein, 2007; Van der Meer et al., 2012). 원격탐사방법은 광물분류를 명확히 하긴 어렵지만 빠르고 쉽게 분광학적 특성에 기초한 변질광물이나 암석의 탐지가 가능하다는 장점이 있어, 국내 광산지역의 분광학적 특성 확인을 위한 분석방법으로 이용된 바 있다(Chi and Lee, 2007; Lee et al., 2011; Son et al., 2011). 따라서 본 연구에서는 비교적 저가이고, 현재 많은 연구기관에서 손쉽게 이용되고 있는 분광광도계를 이용하여 산사태 발생지역의 시료에서 점토광물을 측정하여 아스터 위성영상과의 적용 가능성에 대하여 분석하였다.

연구지역

연구지역은 행정구역상 경기도 용인시 처인구 일원으로서 지리적 좌표는 127° 10'00"~127° 15'00", 북위 37° 18'00"~37° 22'50"에 위치한다. 산사태 발생위치는 2011년 7월 27일부터 29일까지 극한강우로 인해 발생한 산사태로 시·군청에서 획득한 자료와 탐문조사로 구축하였다. 현장조사 결과 연구지역 내의 18개 산사태 발생지역의 산의 고저는 118~335 m, 산사태 길이는 41~450 m, 산사태 경사는 11.09°~38.6°의 분포 양상을 보였다. 지형은 서해안에 인접한 얇은 구릉들로 이루어진 노년기의 최후단계로 광주산맥의 남쪽 분지에 해당한다. 지질은 선캠브리아기의 변성암류인 호상흑운모편마암과 층적층이 전역을 차지하며(Fig. 1) 대체로 중립질이며 장석은 주로 백색으로 산출된다(Oh and Yoon, 1972). 산지에서의 토양은 대부분 풍화잔류토 및 봉적토로 나타난다.

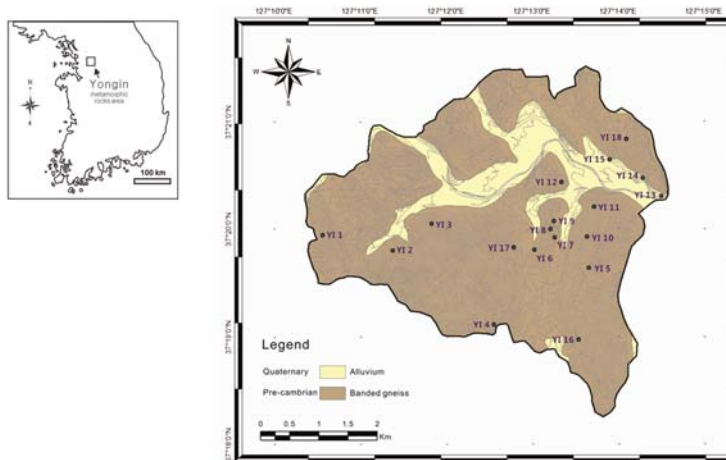


Fig. 1. Sampling locations with geological map of the study area.

연구방법

광물분석

산사태 발생지역의 건조한 풍화토시료로 입도, XRD 및 XRF 분석을 실시하였다. 토층의 전체시료를 상온에서 건조시켜 비방향성시료(randomly oriented sample)를 제작하였고 0.075 mm의 표준체로 각각 체가름하여 사분법에 의해 혼합한 시료를 사용하였다. X-선 회절분석은 Rigaku (Japan)사의 Ultima IV 기종을 사용하였다. 시료의 전처리과정에서 발생할 수 있는 편향성 효과를 최소화하기 위해 X-선 조사시에 시료홀더를 분당 60회의 속도로 회전시켜 재현성을 향상시키고, 조사 분포의 오차를 최소화하여 시료의 방향성에 따른 회절강도가 균일하게 되도록 하였다. XRD의 분석조건은 5~65도 2θ 범위에서 Cu-Kα (1.54056 Å)선을 이용하였고, 가속전압 및 전류는 40 kV/20 mA, 측정방법은 연속스텝 스캐닝으로 스텝당 0.5초를 적용하였다. 분석이 완료된 X-선 회절 분석 결과는 SIROQUANT ver. 3.0 프로그램을 이용하여 토층에 함유되어 있는 각 광물의 함량을 정량 분석하였다. 또한 시료의 주 원소와 미량원소를 분석하기 위하여 XRF 분석을 실시하였다. X-선 형광분석(X-ray Fluorescence)은 시료에 1차 X선을 조사하여 발생하는 형광 X선을 보통 분광결정에 의하여 분광하는 강도를 검출기로 측정하는 방법으로 본 연구에 사용된 X-선 형광 분석기는 Rigaku사의 ZSX Primus II이며, 조사 직경 20 mm, 로프(Rh)타겟, 전압 50 kV, 전류 50 mA 조건으로 20분 동안 시료에 조사하여 얻은 결과를 정성 및 정량 분석하였다.

분광 분석

지구상의 수많은 토양은 각각 고유의 분광반사 특성을 가지며 토양의 분광반사특성 자료들을 사전에 취득해 둔다면 원격탐사에 접목시켜 보다 쉽게 토양분포를 알 수 있다. 이 연구는 산사태 예측 및 방지에 이를 적용할 수 있도록 원격탐사 기법을 이용하여 산사태 재해에 관한 기초자료를 수집하고 그 정보추출방법을 제시하고자 한다. Figure 2는 점토광물의 3가지 그룹에 대한 분광 반사학적 특성을 보여주는 선형 그래프이다.

일반적으로 분광측정을 수행함에 있어 측정 대상물, 측정 방법, 측정 조건 등에 따라서 측정 결과가 상이하게 나타난다. 샘플의 표면 상태와 그림자의 영향을 최소화하고 정량적인 분석을 위하여 전체시료를 상온에서 건조시켜 분석을 실시하였다. 센서와 샘플간의 거리는 30 cm로 유지하고 1~2 cm 두께의 토층을 3회 반복 측정하였다. 암석분광 측정에 사용한 장비는 323~2,526 nm 범위의 분광을 측정할 수 있는 분광광도계(spectroradiometer) GER-3700으로 실외에서 측정하였으며 객관적이고 정성적인 분광반사율을 얻기 위해서 측정샘플 전처리, 조건, 방법 및 환경 등을 고려하여 분석하였다.

ASTER 영상자료

다중분광 위성 영상자료인 아스터는 NASA의 지구 관측 위성 시스템의 하나로 1999년에 발사되었다. 아스터 위성영상은 가시·근적외대역(VNIR), 단파장적외대역(SWIR), 열적외대역(TIR)을 포함하여 총 15개의 밴드 정보를 제공하고 있다(Table 1). 각 파장대역은 각각 15 m, 30 m, 90 m의 공간해상도를 갖는다(Fujisada, 1995).

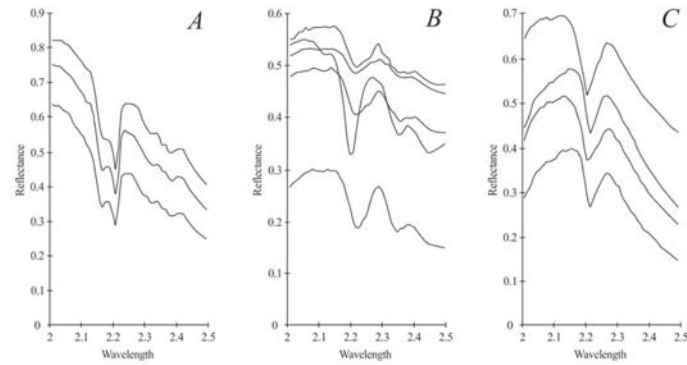


Fig. 2. SWIR reflectance spectra of typical (A) kaolinites, (B) illites, and (C) montmorillonites (Van der Meer, 1999).

Table 1. Performance parameters for the ASTER radiometer (Fujisada, 1995).

ASTER baseline performance requirements						
Subsystem	Band number	Spectral range (μm)	Radiometric resolution	Absolute accuracy (σ)	Spatial resolution	Signal quantization levels
VNIR	1	0.52-0.60	$NE\Delta\rho \leq 0.5\%$	$\leq \pm 4\%$	15 m	8 bit
	2	0.63-0.69				
	3N	0.78-0.86				
	3B	0.78-0.86				
	4	1.600-1.700	$NE\Delta\rho \leq 0.5\%$			
SWIR	5	2.145-2.185	$NE\Delta\rho \leq 1.3\%$		30 m	8 bit
	6	2.185-2.225	$NE\Delta\rho \leq 1.3\%$	$\leq \pm 4\%$		
	7	2.235-2.285	$NE\Delta\rho \leq 1.3\%$			
	8	2.295-2.365	$NE\Delta\rho \leq 1.0\%$			
	9	2.360-2.430	$NE\Delta\rho \leq 1.3\%$			
TIR	10	8.125-8.475			90 m	12 bit
	11	8.475-8.825		$\leq 3\text{K}$ (200-240 K)		
	12	8.925-9.275	$NE\Delta T \leq 0.3\%$	$\leq 2\text{K}$ (240-270 K)		
	13	10.25-10.95		$\leq 1\text{K}$ (270-340 K)		
	14	10.95-11.65		$\leq 2\text{K}$ (340-370 K)		
Stereo based-to-height ratio	0.6 (along-track)					
Swath width	60 km					
Total coverage in cross-track direction by pointing	232 km					
Mission life	5 years					
MTF at Nyquist registration	0.25 (cross-track)					
	0.20 (along-track)					
Band-to-band registration	Intra-telescope: 0.2 pixels					
	Intra-telescope: 0.3 pixels					
	of coarser band					
Peak data rate	89.2 Mbps					
Mass	406 kg					
Peak power	726 W					

아스터 영상의 주사면적은 60 km × 60 km으로 광범위한 지역에 대한 광물자원 탐지를 위해 유용하게 사용되어 왔다. 특히, 1.6~2.43 μm의 단파장적외대역 SWIR (Shot Wave Infra Red)영역에서는 밴드가 6개로 세분화 되어 있어 광물자원을 추출하고 점토광물의 흡수밴드를 구별할 수 있다는 장점이 있다. 이 연구는 아스터 위성영상의 분광학적 특성으로 사면 불안정을 야기하는 점토광물의 분광학적 특성에 따라 밴드정보를 이용하여 산사태 분석을 시도하였다.

산사태 발생지내 점토광물 중 일라이트 식별을 위해 사용된 아스터 영상자료는 2004년 4월 17일에 촬영된 것으로 ERSDAC (Earth Remote Sensing Data Analysis Center, Japan)에서 수신하여 Level 1B로 처리된 것이다. 미국지질조사소(USGS) 광물 라이브러리로부터 선별된 대표적인 일라이트의 분광특성 자료는 ENVI ver. 4.8 소프트웨어를 이용하여 아스터 밴드의 파장대역에 맞게 재배열 하였다. ENVI ver. 4.8의 FLAASH를 사용하여 대기보정이 이루어졌으며, 이와 함께 복사휘도(radiance)는 반사도(reflectance)로 변환하였다.

연구결과 및 토의

토층의 구성광물 및 화학조성 분석

산사태발생지역에 대해 XRD 분석을 수행하여(Fig. 3) 구성광물들을 정량 분석한 결과는 Table 2와 같다. 카올리나이트와 일라이트의 함량을 합하면 18개 지역 모두 50%가 넘는 함량을 보이고 있다. YI 07, YI 08, YI 13 순으로 일라이트 함량이 60% 이상으로 높게나왔고, 카올리나이트와 일라이트 함량을 합하면 70%가 넘는 높은 함량을 나타내었다. 특히, YI 13의 경우 일라이트 함량이 67%가 넘게 나타났으며, 점토광물인 카올리나이트와 일라이트 함량을 합하면 77.3%로 가장 높은 함량을 포함하고 있다.

모든 시료에서 많은 함량을 차지하고 있는 일라이트는 일라이트-스멕타이트의 혼합층상 광물, 또는 혼합층상(illite-smectite mixed-layer, I/s)구조라고 부르며 기본적인 구조가 백운모와 매우 흡사하다. 특히, 일라이트 층과 스멕타이트 층이 일정한 비율로 섞여 있는 혼합층상 구조(I/s) 광물은 순수한 일라이트나 스멕타이트가 단독으로 산출하는 경우보다도 훨씬 흔하다(Choo, 2001). 따라서 정확한 광물명은 전자현미경분석(EPMA), 주사전자현미경, 투과전자현미경, 시차열분석법, 열중량분석법 등과 같은 광물 분석을 추가적으로 진행해야지만 정확

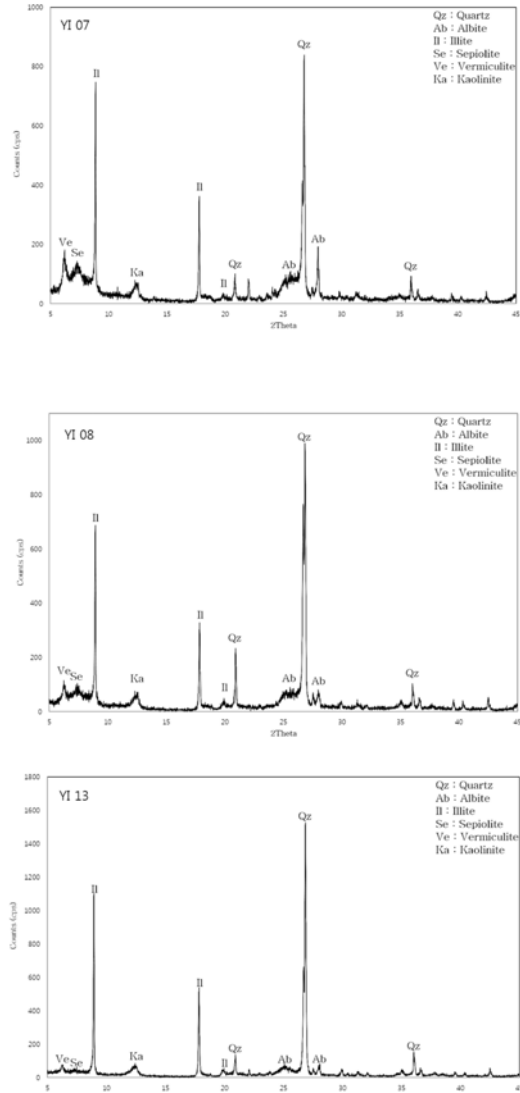


Fig. 3. XRD analysis of samples YI 07, 08, and 13 collected from the landslide sites.

하게 규명할 수 있을 것으로 판단된다. 그렇지만 본 연구에서는 XRD 정량분석을 실시하여 주요 광물의 종류와 함량을 계산하였으므로, 토층에서의 일라이트 함량비를 추정하는데 크게 문제되지 않았다.

산사태 시료의 분광학적 특성

분광반사율은 대상물의 물리-화학적 특성, 지표면의 상태, 대기의 상태, 태양의 고도 등의 영향을 받는다. 특히 토양분광 측정에서 있어서 대부분의 사면이 식생으로

Table 2. Mineral composition of landslide samples by XRD analysis.

No.	Mineral composition (%)					
	Quartz	Albite	Vermiculite	kaolinite	Illite	Sepiolite
YI 01	29.1	14.7	5.2	14.9	36.1	Nd
YI 02	26.6	16.4	5.8	15.1	36.1	Nd
YI 03	33.5	12.6	5.1	14.7	34.0	Nd
YI 04	36.3	10.0	3.8	15.3	34.6	Nd
YI 05	26.7	6.0	4.8	14.1	44.9	3.7
YI 06	12.1	7.7	7.8	18.7	49.3	4.3
YI 07	11.9	7.8	5.4	11.2	60.1	3.5
YI 08	16.5	2.1	3.1	11.8	64.4	2.1
YI 09	29.3	8.9	4.3	15.4	42.1	Nd
YI 10	28.2	14.6	4.7	15.7	36.8	Nd
YI 11	13.3	6.9	4.6	15.6	59.6	Nd
YI 12	25.2	14.3	4.0	15.3	41.1	Nd
YI 13	19.2	1.1	2.3	10.1	67.2	Nd
YI 14	30.2	9.5	3.8	16.5	40.0	Nd
YI 15	32.1	17.0	4.7	17.2	29.0	Nd
YI 16	19.9	8.1	5.8	16.2	50.1	Nd
YI 17	26.4	12.3	5.7	14.4	41.3	Nd
YI 18	23.5	9.2	5.5	17.4	44.3	Nd

*Nd : Not detected

피복하고 있으며, 식생 및 지형지물에 의해 생긴 그림자, 측정 시 구름의 이동에 의한 그림자 등으로 인하여 토양의 고유한 분광학적 특성을 반영하는 분광반사율을 측정하는데 문제점이 있다. 즉 야외에서 토양의 분광반사율을 측정하더라도 상기와 같은 자연적, 인위적인 요인의 영향으로 토양 고유의 분광특성을 보이는 파장대역에서 잡음이 관측되거나 측정시마다 결과가 상이하게 나타나기도 한다. 샘플의 분광반사율 R_λ 은 다음과 같은 식 (1)과 같다.

$$R_\lambda = C_\lambda \frac{S_\lambda}{T_\lambda} \times 100(\%) \quad (1)$$

위의 식에서 S_λ , C_λ , T_λ 는 각각 빛의 파장, 표준백판의 분광반사율, 샘플암석과의 표준백판을 GER-3700에서 측정하였을 때 값이고, C_λ 은 1이라 가정한다(Chi and Lee, 2007).

모든 토양샘플에 대해 앞에서 서술한 것처럼 측정샘플 전처리, 조건, 방법 및 환경 등에 대해 표준화하여 분광반사율 측정된 결과 값이다(Fig. 4).

XRF 분석결과 모든 시료에서 50%가 넘는 SiO_2 의 함량을 보였고, 그 다음으로 Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O 의 순

의 함량을 보였다. 산사태발생지역의 토양에서는 분광반사율이 0.8~1.1 μm 에서도 흡수가 일어나며 흡수영상을 USGS 분광라이브러리로 제공되는 일라이트의 분광곡선을 아스터 밴드로 재배열하니 0.8~1.1 μm 인근파장대에서 흡수가 일어났다. 0.8~1.1 μm 인근파장대에서 흡수를 야기하는 원소는 Fe^{2+} , Fe^{3+} 이며 산사태발생지역의 토양시료를 XRF 분석 결과를 보면 Fe_2O_3 가 모든 시료에서 검출되었다(Table 3). 따라서 0.8~1.1 μm 인근파장대에서 흡수가 일어난 것이다. 그리고 광물의 특성에 의해 OH 및 Al-OH 파장대의 영역에서도 강한 흡수가 일어났음을 알 수 있다. 연구지역에서 대부분을 차지하는 일라이트 $\{(\text{K},\text{H}_3\text{O})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2, (\text{Si},\text{Al})_4, \text{O}_{10}, ((\text{OH})_2, \text{H}_2\text{O})\}$ 는 1.4 와 1.9 μm 인근파장대에서 광범위한 수분 흡수 특성과 강한 흡수 밴드를 보이며 2.2, 2.3 및 2.4 μm Al-hydroxyl의 추가 밴드가 있다. 따라서 흡수 패턴으로 USGS 분광곡선과 비교 하였을 때 일라이트 분광곡선과 비슷한 패턴으로 나타났다.

점토광물 추출모델

일라이트는 녹염석과 마찬가지로 OH와 H_2O 에 의한 특징적인 분광특성이 나타나는 것으로 알려져 있다

Table 3. Element composition of landslide samples by XRF analysis. (Unit: wt %)

Oxide	YI 01	YI 02	YI 03	YI 04	YI 05	YI 06	YI 07	YI 08	YI 09
SiO ₂	59.49	58.73	59.6	63.28	53.4	50.29	50.19	55.75	58.16
Al ₂ O ₃	22.18	22.46	22.93	20.05	26.37	29.75	27.3	26.27	25.13
Fe ₂ O ₃	8.29	8.5	8.59	7.13	10.44	10.85	11.44	8.59	8.29
K ₂ O	3.48	3.58	3.32	3.69	4.02	3.69	4.58	4.38	4.01
F	0.35	0.26	0.32	0.3	Nd	0.21	0.22	0.29	Nd
Na ₂ O	0.85	0.85	0.51	1.13	0.59	0.45	0.81	0.42	0.51
MgO	2.56	2.56	2.25	2.1	2.56	2.34	2.72	2.1	1.85
P ₂ O ₅	0.09	0.21	0.09	0.09	0.11	0.11	0.13	0.09	0.21
SO ₃	0.29	0.31	0.39	0.28	0.42	0.3	0.26	0.3	0.12
Cl	0.03	0.03	0.02	0.01	0.02	0.04	0.01	0.02	Nd
CaO	0.71	0.8	0.35	0.45	0.32	0.4	0.48	0.24	0.33
TiO ₂	1.28	1.22	1.22	1.14	1.3	1.1	1.34	1.15	1.01
Cr ₂ O ₃	0.04	0.04	0.04	0.03	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05
MnO	0.1	0.14	0.12	0.08	0.13	0.12	0.18	0.08	0.09

*Nd : Not detected

Table 3. (Continued). (Unit: wt %)

Oxide	YI 10	YI 11	YI 12	YI 13	YI 14	YI 15	YI 16	YI 17	YI 18
SiO ₂	55.41	49.26	57.19	54.43	55.44	56.99	50.44	54.06	52.42
Al ₂ O ₃	26.18	31.45	26.13	29.42	27.21	24.33	27.68	25.83	29.1
Fe ₂ O ₃	9.41	10.07	7.71	7.02	9.06	9.76	13.09	9.73	9.32
K ₂ O	3.57	3.67	4	5.13	4.56	3.22	3.59	4.63	5.31
F	Nd	0.25	Nd	0.25	Nd	0.21	Nd	Nd	Nd
Na ₂ O	0.52	0.46	1.01	0.38	0.31	0.48	0.31	0.66	0.29
MgO	2.17	1.78	1.65	1.51	1.95	2.51	2.15	2.63	1.99
P ₂ O ₅	0.26	0.17	0.14	0.11	0.13	0.1	0.19	0.21	0.11
SO ₃	0.22	0.3	0.19	0.35	0.13	0.26	0.54	0.21	0.08
Cl	Nd	0.02	Nd	0.01	Nd	0.02	0.03	Nd	Nd
CaO	0.54	0.54	0.45	0.16	0.16	0.39	0.23	0.6	0.17
TiO ₂	1.43	1.51	1.24	0.9	0.86	1.32	1.42	1.18	0.99
Cr ₂ O ₃	Nd	0.02	0.03	0.03	Nd	0.04	0.05	Nd	Nd
MnO	0.11	0.19	0.08	0.04	0.07	0.12	0.11	0.13	0.1

*Nd : Not detected

(Clark et al., 1990). 하지만 녹염석이 2.0~2.5 μm 파장대역 중 Fe-OH의 영향을 받은 흡수특성이 나타나는 반면 일라이트는 Al-OH의 영향으로 흡수특성이 나타난다. Fig. 5는 USGS와 JPL 분광라이브러리에서 제공하는 일라이트의 분광특성 곡선으로 VNIR 파장대역에서 다소간의 차이가 나타난다. 일라이트는 Fe²⁺와 Fe³⁺의 함유 여부에 따라 발생되는 것으로 판단되며 OH의 영향을 받는 1.4 μm 인근파장영역과 H₂O의 영향으로 인한

1.9 μm 인근파장영역에서는 모두 흡수특성이 나타난다. 일라이트의 분광특성 곡선을 아스터 밴드별 파장특성에 맞게 재배열한 결과에서 USGS의 곡선에서는 Fe²⁺와 Fe³⁺의 영향으로 밴드 3에서 흡수특성이 나타나고 있으며, OH와 H₂O의 흡수특성에 해당하는 밴드는 없는 것으로 나타났다. Al-OH로 인한 흡수특성은 재배열한 결과에서도 동일하게 나타났으며 2.37 μm 인근파장대역의 반사특성은 아스터 밴드 9 인근에 해당하지만 전체적으로

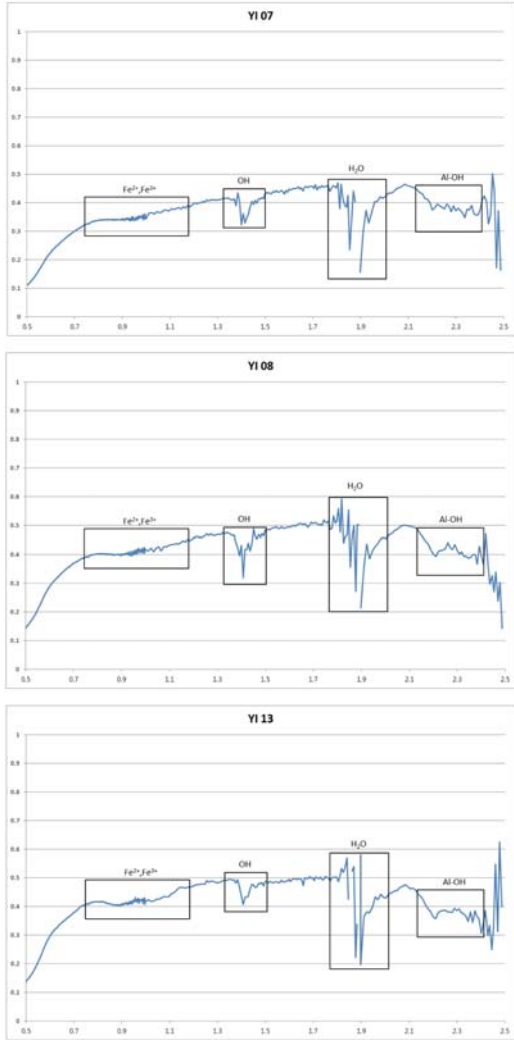


Fig. 4. Reflectance spectra of YI 07, 08, and 13 soil sampled from the landslide locations.

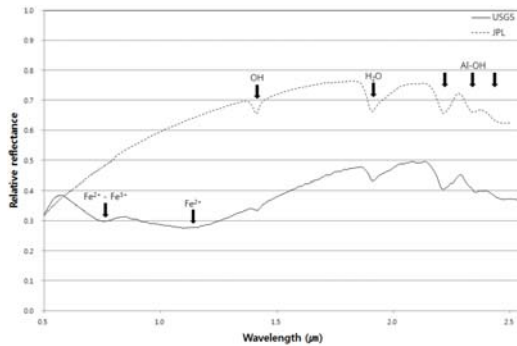


Fig. 5. Laboratory spectra of illite from both USGS and JPL (Lee, 2014).

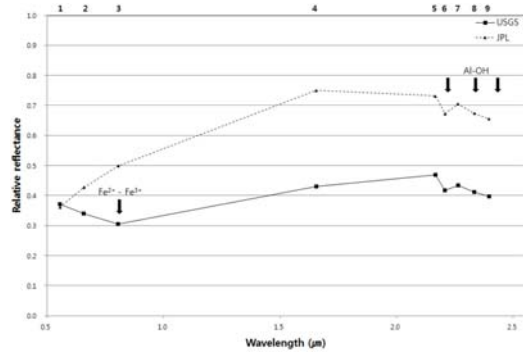


Fig. 6. Rearrangement of laboratory spectra on illite to ASTER SWIR bands (Lee, 2014).

로 반사율이 감소하는 양상을 나타낸다(Fig. 6).

Rowan et al. (2003)은 아스터 영상에서 일라이트를 추출하는 SMIS모형을 제안하였다. SMIS (Sericite/Muscovite/Illite/Smectite) 모델은 견운모, 백운모, 일라이트 그리고 스�멕타이트가 함께 산출되는 지역을 대상으로 제안되었다. SMIS모델은 Al-OH에 의해서 흡수가 일어나는 밴드 6과 인근의 밴드 5, 7을 조합한 비연산 모델로 식 (2)와 같다.

$$SMIS = \frac{band_5 + band_7}{band_6} \quad (2)$$

하지만 점토광물은 특정 반사 및 흡수 과장대역을 이용한 비연산 방법을 적용할 경우 유사한 분광 특성을 보이는 대상물과 유사한 결과를 나타낸다. 단점을 극복하기 위해 Lee et al. (2008)은 과장대역 간의 곱에 대한 비를 이용한 암석 추출 모델을 제시하였다. 즉, 이 모델들은 점토광물의 분광반사율 곡선을 아스터 자료의 밴드별 분광반사율 곡선으로 재배열하여 점토광물이 지니고 있는 고유의 반사 및 흡수 패턴을 추출한 후, 반사 패턴간의 곱과 흡수 패턴간의 곱에 대한 비를 계산하는 방법이다. 이 방법은 기존 연구에서 제시된 방법에 비해서 대상물 간의 반사율 차이를 크게 함으로써 원하는 정보를 쉽게 획득할 수 있도록 한다(Lee et al., 2009).

따라서 일라이트의 분광특성을 정확하게 반영하고자 밴드 5와 밴드 7의 합연산을 대신하여 식 (3)과 같은 SWIR_{Illite} 모델을 적용하였다. 또한, 분모와 분자에서 사용되는 밴드의 수를 일치시켜 대상물과 주변 지역의 분별력을 개선하였다.

$$SWIR_{Illite} = \frac{band_5 \times band_7}{band_6 \times band_6} \quad (3)$$

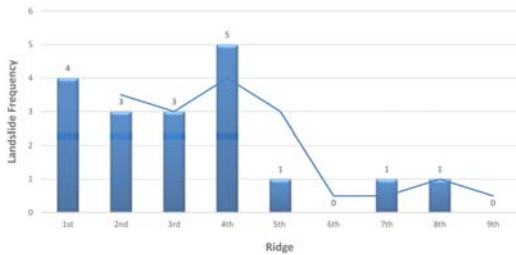


Fig. 7. Frequency of landslide for part of the ridge.

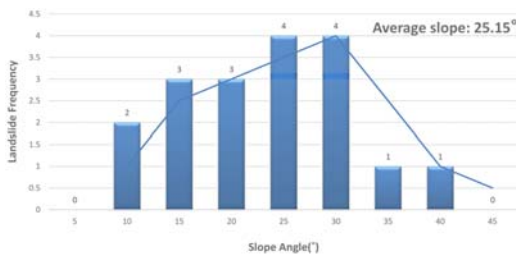


Fig. 8. Frequency of landslides for 5° intervals of the slope angle.

지형학적 특성

연구지역의 18개 산사태 발생지역의 능선, 사면경사, 사면방향 분석한 결과 4부 능선 아래에서 83%, 20~30° 사이가 44%, 북서 및 남서 방향으로 우세하게 나타났다. 가장 많은 산사태 발생 빈도수를 보인 능선은 4부 능선으로 파악되었으며 4부 능선 아래에서 집중적으로 산사태가 발생한 것으로 나타났다. 1부 능선에서 4지점, 2부 능선에서 3지점, 3부 능선에서 3지점, 4부 능선에서 5지점으로 발생하였다(Fig. 7). 산사태 발생지는 자연사면에서 11개, 인공사면(임도, 벌목, 사육, 경작지, 조경 등)으로 인한 인간활동에 의한 사면경사 조정 및 파괴)에서 8개가 발생하였다. 1부 능선과 2부 능선은 인간활동에 의한 전단강도 감소로 산사태가 발생되었다고 판단되며 대부분의 자연사면에서는 3부 능선과 4부 능선에서 산사태가 발생되었다. 경사도에 따른 산사태의 빈도수를 보면 급사면보다는 완만한 경사에서 산사태가 많이 발생하는 것으로 나타났다. 10~20° 사이가 5개, 20~30° 사이가 8개, 30~40° 사이가 5개로 분포하였다(Fig. 8). 또한 평균 경사도는 25.15°로 나타나 국내의 연구결과들과 유사한 경향성을 보였다. Figure 9는 산사태가 발생한 방향성과 사면경사를 장미도형(rose diagram)으로 표시하였다. 20° 보다 경사가 급해지면서 발생빈도도 급격히 증가함을 알 수 있으나 경사각이 30° 이상의 산사태 발생빈도는 감소하는 경향을 보였다.

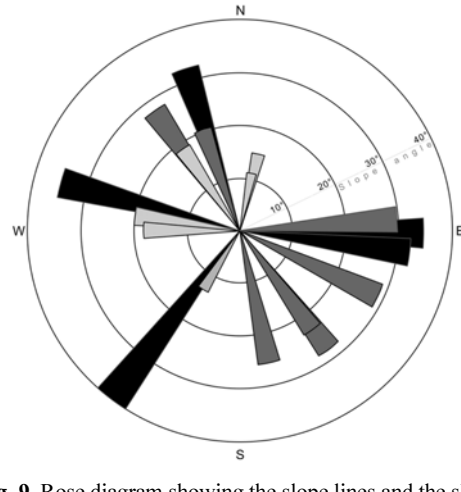


Fig. 9. Rose diagram showing the slope lines and the slope angle.

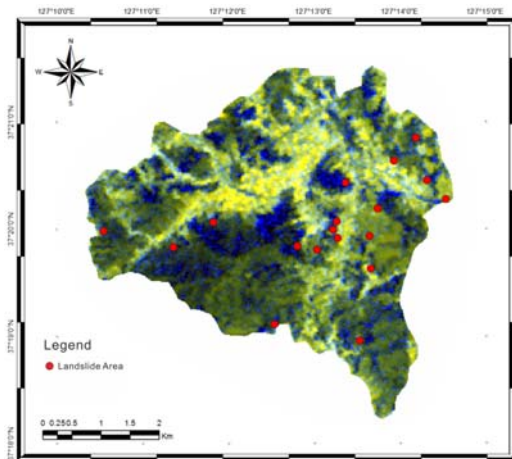


Fig. 10. False color composite image using band 6, band 7, and SWIR_{IIIite} overlaid on a topographic map.

ASTER 적용 가능성

2004년 4월 17일에 촬영한 아스티 위성영상으로 SWIR_{IIIite} 모델을 적용 후 R/G/B (band 6/band 7/SWIR_{IIIite})로 합성하였다(Fig. 10). 영상에서 파란색 계열과 청록색 계열로 나타나는 지역이 일라이트의 함량이 높은 것으로 사료된다. 2011년 7월에 발생한 산사태 지역과 SWIR_{IIIite} 모델을 적용한 아스티 합성영상 비교 결과 경사가 10° 미만 40° 초과 지역, 등고선 간격이 넓은 지역, 노란색으로 표시된 충적층 지역, 파란색 계열이 넓고 조밀하게 분포하나 고도가 높은 지역을 제외하고 일라이트의 함량이 높은 계곡부 지역에서 비교적 산사태가 많이 발생하였다. 따라서 산사태 예방 및 방지를

위한 아스터 위성영상을 이용한 스펙트럼 탐사(spectral sensing)의 가능성을 보여 줄 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 향후 현장조사를 통한 산사태 미발생지역에서 점토광물내 일라이트 함량과 SWIR_{illite} 모델을 적용하여 비교 및 검토로 검증이 이루어진다면 산사태 연구에 더욱 신뢰성 있는 데이터베이스가 될 것이라 기대된다.

결 론

다중분광 위성영상자료인 2004년 4월 아스터 위성영상을 이용하여 경기도 용인시 처인구 일대에서 2011년 7월에 발생한 산사태 연구의 적용 가능성을 확인하였다. 산사태 시료의 일라이트 분광반사특성은 0.9와 1.0 μm 파장대역 인근에서 Fe^{2+} 와 Fe^{3+} 의 흡수가 나타났으며 1.4와 1.9 μm 파장대역 인근에서 OH와 H_2O 에 의한 강한 흡수 특성을 보인다. 추가적으로 2.2, 2.3과 2.4 μm 파장대역 인근에서 Al-hydroxyl이 보였다. 또한 고유의 토양조성성분에 따라서 서로 다른 파장대역 인근에서 에너지의 흡수와 반사특성으로 반영되어 나타나는 것을 확인하였다. 아스터 분광분석의 결과는 야외지질조사 및 광물학적 연구를 통한 산사태 시료의 팽창성 광물의 지표 분포특성 결과와 유사하게 나타났다. 즉, Lee et al. (2009)이 제안한 모델을 적용한 결과, 산사태 발생지역들은 일라이트의 함량에 의해서 주변 대상물에 비해 파란색 및 청록색 계열을 보였다. 또한, 일라이트 함량이 높게 나타난 지역과 계곡부 인근의 산사태 발생지역이 일치하였다.

아스터 분광분석과 광물학적 연구, 야외지질 조사의 좋은 상관성은 산사태 지역을 대상으로 한 아스터 분광분석이 야외지질조사에 필요한 시간과 경비를 줄이는 것은 물론, 산사태 취약 지역 분석을 위한 방법으로서의 가능성을 제시하고 있다. 향후 점토광물을 이용한 아스터 위성영상과 GIS 공간분석 및 통계분석을 수행한다면 양질의 산사태 발생 원인규명의 데이터베이스를 얻을 수 있으리라 판단된다.

사 사

이 연구는 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 · 공공복지안전연구사업의 지원을 받아 수행된 연구로(과제번호 : 2012M3A2A1050976) 이에 감사드립니다.

References

- Al-Mukhtar, M. L. A. and Alcover, J. F., 2010, Behavior and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20°C, *Applied Clay Science*, 50, 191-198.
- Al-Rawas, A. A., 1999, The factors controlling the expansive nature of the soils and rocks of northern Oman, *Engineering Geology*, 53, 327-350.
- Bell, F. G., 1999, *Geological hazards: their assessment, avoidance and mitigation*: London etc, E & FN SPON, 648p.
- Chi, K. H. and Lee, H. J., 2007, Extraction of pyrophyllite mineralized zone using characteristics of spectral reflectance of rock samples, *Journal of the Korean Society of Remote Sensing*, 23(6), 493-500 (in Korean).
- Choi, J. W., Oh, H. J., Lee, H. J., Lee, C. W., and Lee, S. R., 2012, Combining landslide susceptibility maps obtained from frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models using ASTER images and GIS, *Engineering Geology*, 124, 12-23.
- Choo, C. O., 2001, Mineralogical Characteristics of illite and its applications, *The Journal of the Mineralogical Society of Korea (Mineral & Industry)*, 14(2), 29-37. (in Korean)
- Clark, R. N., King, T. V. V., Klejwa, M., Swayze, G., and Vergo, N., 1990, High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *Journal of Geophysical Research*, 95, 12653-12680.
- Crowley, J. K., Hubbard, B. E., and Mars, J. C., 2003, Analysis of potential debris flow source areas on mount shasta, california, by using airborne and satellite remote sensing data, *Remote Sensing of Environment*, 87, 345-358.
- Di Tommaso, I. and Rubinstein, N., 2007, Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina, *Ore Geology Reviews*, 32, 275-290.
- Fall, M. and Sarr, A. M., 2007, Geotechnical characterization of expansive soils and their implications in ground movements in Dakar, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66, 279-288.
- Fourniadis, I. G., Liu, J. G., and Mason, P. J., 2007, Landslide hazard assessment in the Three Gorges area, China, using ASTER imagery: Wushan-Badong. *Geomorphology*, 84, 126-144.
- Fujisada, H., 1995, Design and performance of ASTER instrument, *Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering*, 2583, 16-25.
- Gray, J. and Murphy, B., 2002, Parent material and world soil distribution, 17th World Congress of Soil Science (WCSS) Bangkok, Thailand, 2215-1 - 2215-14.
- Kim, K. S., Choo, C. O., Booh, S. A., and Jeong, G. C., 2005, Importance of microtextural and geochemical characterizations of soils on landslide sites, *Journal of Engineering Geology*, 15(4), 447-462. (in Korean)
- Lee, H. J., 2014, *Extracting Models of Hydrothermal Altered Minerals by ASTER SWIR Images*, PhD Thesis, Pukyong National University, Pusan, Korea, 48-51 (in Korean).

- Lee, H. J., Chi, K. H., and Jang, D. H., 2008, Extraction of pyrophyllite mine using characteristics of spectral reflectance of aster satellite imageries, *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 49-60 (in Korean).
- Lee, H. J., Kim, E. J., and Moon, D. H., 2011, Identification of advanced argillic-altered rocks of the haenam area, using by aster spectral analysis, *Journal of the Korean Society of Economic and Environmental Geology*, 44(6), 463-474 (in Korean).
- Lee, H. J., Kim, I. J., Chi, K. H., Kim, E. J., and Jang, D. H., 2009, Extraction model of non-metallic mine using multi-spectral aster swir data, *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 16(3), 77-86 (in Korean).
- Liu, J. P., Mason, P. J., Clerici, N., Chen, S., Davis, A. M., Miao, F., Deng, H., and Liang, L., 2004, Landslide hazard assessment in the three gorges area of the Yangtze river using ASTER imagery: Zigui-Badong, *Geomorphology*, 61, 171-187.
- Nefeslioglu, H. A., San, B. T., Gokceoglu, C., and Duman, T. Y., 2012, An assessment on the use of Terra ASTER L3A data in landslide susceptibility mapping, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14, 40-60.
- Oh, I. S. and Yoon, Y. Y., 1972, 1:50,000 Geological map of the Suwon sheet, KIGAM, 7p.
- Rowan, L. C., Hook, S. J., Abrams, J. J., and Mars, J. C., 2003, Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada using the Advanced Spaceborne Thermal Emissivity and Reflection Radiometer (ASTER), A new satellite-imaging system, *Economic Geology*, 98, 1019-1027.
- Rowan, L. C. and Mars, J. C., 2003, Lithologic mapping in the mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data, *Remote Sensing of Environment* 84, 350-366.
- Santini, M., Grimaldi, S., Nardi, F., Petroselli, A., and Rulli, M. C., 2009, Pre-processing algorithms and landslide modelling on remotely sensed DEMs, *Geomorphology*, 113, 110-125.
- Seco, A., Ramirez, F., Miqueliez, L., and Garcia, B., 2011, Stabilization of expansive soils for use in construction, *Applied Clay Science*, 51, 348-352.
- Shi, B., Jiang, H., Liu, Z., and Fang, H. Y., 2002, Engineering geological characteristics of expansive soils in China, *Engineering Geology*, 67, 63-71.
- Snethen, D. R., Townsend, F. C., Johnson, L. D., Patrick, D. M., and Vedros, P. J., 1975, A Review of Engineering experiences with expansive soils in highway subgrades, Federal Highway Administration Office of Research and Development, Washington D.C.
- Song, K. Y., Oh, H. J., Choi, J., Park, I., Lee, C., and Lee, S., 2012, Prediction of landslides using ASTER imagery and data mining models, *Advances in Space Research*, 49, 978-993.
- Son, Y. S., Kang, M. K., and Yoon, W. J., 2011, Study of the pyrophyllite deposit characteristics in nohwa-do using aster image, *The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 335-350 (in Korean).
- Sridharan, A. and Gurtug, Y., 2004, Swelling behavior of compacted fine-grained soils, *Engineering Geology*, 72, 9-18.
- Van der Meer, F. D., 1999, Can we map swelling clay with remote sensing?, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 1, 27-35.
- Van der Meer, F. D., van der Werff, H., van Ruitenbeek, F. J., Hecker, C. A., Bakker, W. H., Noomen, M. F., van der Meijde, M., Carranza, E. J. M., Smeth J. B. d., and Woldai, T., 2012, Multi and hyperspectral geologic remote sensing: a review, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14, 112-128.
- Yitagesu, F. A., van der Meer, F., van der Werff, H., and Zigterman, W., 2009, Quantifying engineering parameters of expansive soils from their reflectance spectra, *Engineering Geology*, 105(3), 151-160.

남경훈

안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 경동로 1375(송천동)
Tel: 054-820-7735
Fax: 054-822-5467
E-mail: namsoil@naver.com

이흥진

한국지질자원연구원 국토지질연구본부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 30
Tel: 042-868-3072
E-mail: leehj@kigam.re.kr

정교철

안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 경동로 1375(송천동)
Tel: 054-820-5753
Fax: 054-822-5467
E-mail: jeong@anu.ac.kr