

Landsat과 ASTER 위성영상 자료를 이용한 광물자원탐사로의 적용 가능성을 위한 예비연구

이홍진¹ · 박맹언² · 김의준^{1*}

¹한국지질자원연구원, ²부경대학교 환경지질과학과

Preliminary Study on the Application of Remote Sensing to Mineral Exploration Using Landsat and ASTER Data

Hong-Jin Lee¹, Maeng-Eon Park² and Eui-Jun Kim^{1*}

¹Geological Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

²Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

The Landsat and ASTER data have been used in mineralogical and lithological studies, and they have also proved to be useful tool in the initial steps for mineral exploration throughout Nevada mining district, US. Huge pyrophyllite quarry mines, including Jungang, Samsung, Kyeongju, and Naenam located in the southeastern part of Gyeongsang Basin. The geology of study area consists mainly of Cretaceous volcanic rocks, which belong into Cretaceous Hayang and Jindong Group. They were intruded by Bulgugsa granites, so called Sannae-Eonyang granites. To extraction of Ratio model for pyrophyllite deposits, tuffaceous rock and pyrophyllite ores from the Jungang mine used in reflectance spectral analysis and these results were re-sampled to Landsat and ASTER bandpass. As a result of these processes, the pyrophyllite ores spectral features show strong reflectance at band 5, whereas strong absorption at band 7 in Landsat data. In the ASTER data, the pyrophyllite ores spectral features show strong absorption at band 5 and 8, whereas strong reflectance at band 4 and 7. Based on these spectral features, as a result of application of $Py_{Landsat}$ model to hydrothermal alteration zone and other exposed sites, the DN values of two different areas are 1.94 and 1.19 to 1.49, respectively. The differences values between pyrophyllite deposits and concrete-barren area are 0.472 and 0.399 for Py_{ASTER} model, 0.452 and 0.371 for OH1b model, 0.365 and 0.311 for PAK model, respectively. Thus, Py_{ASTER} and $Py_{Landsat}$ model proposed from this study proved to be more useful tool for the extraction of pyrophyllite deposits relative to previous models.

Keywords : Landsat, ASTER, mineral exploration, pyrophyllite deposits

Landsat과 ASTER 위성영상을 이용한 암상구분은 반건조-건조 지역을 대상으로 활발한 연구가 이루어진 바 있으며, 미국 네바다 금속광화대 지역을 중심으로 광물자원탐사를 위한 초기 단계에서 유용한 방법으로서의 가능성에 관한 검증이 이루어졌다. 연구대상 지역인 중앙, 삼성, 경주, 내남 납석광산이 위치하고 있는 경상분지 남동부의 지질은 주로 백악기 하양층군에 속하는 진동층을 기저로 하여 유천층군에 해당하는 중성질 화산암류, 정각산층, 건천리층, 산성 화산암류와 후기에 이들 층을 관입하는 불국사 화강암류들로 구성되어 있다. 위성영상으로부터 납석광상을 추출하기 위한 비연산 모델을 제시하기 위해서, 중앙납석광산으로부터 채취된 응회암질 모암과 열수변질작용에 의해 형성된 납석을 대상으로 이들의 분광반사율을 측정하였다. 이들 분광반사율을 Landsat 영상과 ASTER 영상의 밴드별 분광반사율 곡선을 이용하여 재배열한 결과, Landsat 영상에 대해서는 밴드 5번에서 강한 반사 특성을 보이고, 밴드 7번에서 강한 흡수 특성을 보였다. ASTER 영상에서는 밴드 5와 8번에서 강한 흡수 특성을 밴드 4와 7번에서 반사특성이 나타났다. 이를 바탕으로 Landsat 위성영상의 DN (Digital Number) 값을 이용한 $Py_{Landsat}$ 모델을 적용한 결과, 열수변질대 지역은 1.94 이상으로 상대적으로 높은 값을 보이는데 반해서 이외의 지역은 1.19~1.49 사이의 낮은 값을 갖는 것으로 나타났다. 또한 Py_{ASTER} 모델의 적용결과 납석광산과 다른 대상물간의 차는 콘크리트와 0.472, 나대지와 0.399

*Corresponding author: euijun.kim@kigam.re.kr

로, OHI_b과 PAK모델의 적용결과 0.452, 0.371과 0.365, 0.311로 보다 큰 차이가 나타남을 알 수 있다. 따라서 이번 연구에서 제안한 PyASTER 모델은 납석광상을 보다 더 명확하게 규명할 수 있는 것으로 나타났다.

주요어 : Landsat, ASTER, 광물자원탐사, 납석광상

1. 서 론

최근 위성영상 자료를 이용한 원격탐사 기술은 자연 과학 및 인문·사회과학 분야 등으로 폭넓게 적용되고 있다. 특히 지질학적 연구 분야에 있어서 선구조분석, 암상 구분을 통한 지질도 작성, 열수변질대 규명을 통한 광물자원탐사, 지하수 탐사 등과 같은 다양한 분야에서 활발한 연구활동이 진행되고 있다.

일반적으로 지각을 구성하는 암석들은 다양한 광물의 집합체로서, 이를 구성하는 조암광물들의 화학조성에 따라서 특정 파장대역에서 전자기파의 분광학적 특성 및 반사특성이 다르게 나타난다. 따라서 이러한 분광학적 특성을 이용하여 화학조성을 달리하는 암상의 구분과 열수변질대의 규명이 가능하다. 그러나 식생의 영향으로 위성영상의 분광해상도 및 공간해상도는 지질학적 응용분야에 있어서 제한적으로 활용될 수밖에 없으나(Kim and Lee, 2004), 이들 노이즈의 충분한 제거가 이루어진다면, 지표 지질환경을 해석하는데 유용한 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다. ASTER와 Landsat 위성영상을 이용한 암석 구분 연구는 노두를 제외한 지표면의 피복물질들의 영향이 거의 없는 반건조-건조 지역을 대상으로 활발한 연구가 이루어진 바 있으며(Ninomiya, 2004; Ninomiya et al., 2005; Rowan et al., 2005; Rowan et al., 2006), 이를 이용한 광물 자원탐사는 이미 금속광화대로 잘 알려진 미국 네바다 Cuprita 지역을 대상으로 이들의 적용성에 관한 연구가 많이 이루어졌다(Yamaguchi and Naito, 2003; Rowan et al., 2003; Ninomiya, 2004). 특히 Bedell (2004)은 다중 파장대역 위성영상의 분광특성을 이용하여 광상성인을 해석하기 위해서 변질광물, 규산염광물, 점토광물, 탄산염광물, 산화철 등의 변질광물 및 광화대 주제도 작성 등에 대한 연구를 수행한 바 있다.

국내의 경우, 국내 금속광상에 발달한 열수변질대내 특정광물들의 광물학적 특성을 이용한 열수변질대 작성이 이루어졌으나(Pak et al., 2003), 위성영상 자료를 이용한 연구는 극히 드물다. 최근 10여 년간 다중 파장대역 위성영상인 Landsat 및 ASTER 영상과 초다중 파장대역 위성영상인 Hyperion 영상을 이용하여 열수변질작용으로부터 기인된 대규모 점토광상의 규명을

위한 연구가 활발히 진행되고 있으며(Lee et al., 2009), ASTER 영상의 분광학적 특성을 이용한 특정 광물과 암석의 추출을 위한 모델을 제시하고 있다(Lee, et al., 2008; 2009).

이번 연구는 대규모 열수변질작용에 의해 형성된 납석광상으로부터 채취된 시료들을 대상으로 열수변질대를 구성하는 납석(pyrophyllite)의 분광학적 특성을 규명하고, 이를 근거해서 노출된 다른 지형(나대지, 구조물)으로부터 구분하여 납석광상을 추출하기 위한 비연산(Ratio) 모델을 제시하는데 그 목적이 있다. 또한 이를 바탕으로 한발 더 나아가 위성영상자료를 이용하여, 열수광상에서 발달하는 열수변질대 규명을 위한 광물 자원탐사의 한 가지 방법으로서의 가능성을 검증하고자 한다.

2. 지 질

연구지역은 행정구역상 경상북도 청도군, 경산시, 경주시와 울산광역시 일원으로, 자인, 모량, 유천, 언양 도폭에 해당하는 동경 128°50'~129°10', 북위 35°30'~35°50'에 해당된다(Fig. 1). 연구지역의 지질은 주로 백악기 하양층군에 속하는 진동층을 기저로 하여 유천층군에 해당하는 중성질 화산암류, 정각산층, 건천리층, 산성 화산암류와 후기에 이들 층을 관입하는 불국사 화강암류들로 구성되어 있다(Fig. 2). 이들 층서들을 요약하면 다음과 같다.

연구지역의 남동쪽에 분포하는 진동층은 하양층군의 최상부에 해당되며, 주로 암회색 내지 흑색 셰일로 이루어져 있으며, 실트암, 사암, 역암 및 석회질 셰일층들이 협재되어 있다. 하양층군의 상부에 놓이는 유천층군은 경상분지 남동부에 분포하는 화산암으로 하부의 중성질 화산암류와 상부의 산성 화산암류로 세분된다. 유천층군의 상·하부 사이에 협재된 건천리층은 하부 안산암질 응회암에 부정합적으로 놓여 있으며, 주로 흑색 내지 흑갈색의 역암, 사암, 셰일, 쳐트와 안산암 및 안산암질 응회암이 협재되어 있다(Kim et al., 1998).

백악기에서 제 3기에 해당하는 불국사 화강암류인 산내-언양 화강암류가 연구지역 전반에 걸쳐 널리 분

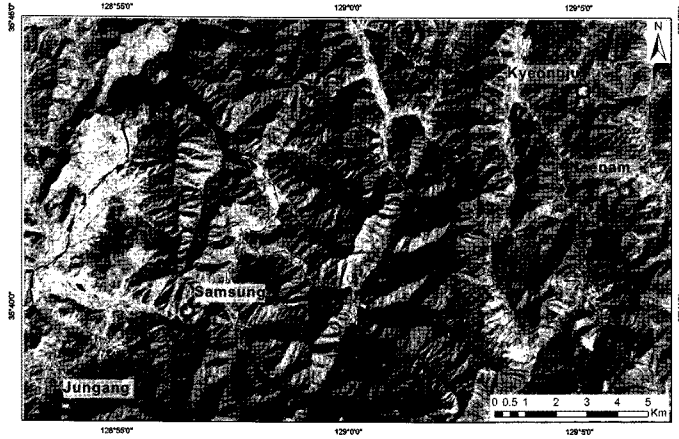


Fig. 1. Shaded relief topographic map showing the location of pyrophyllite quarry mines in the study area.

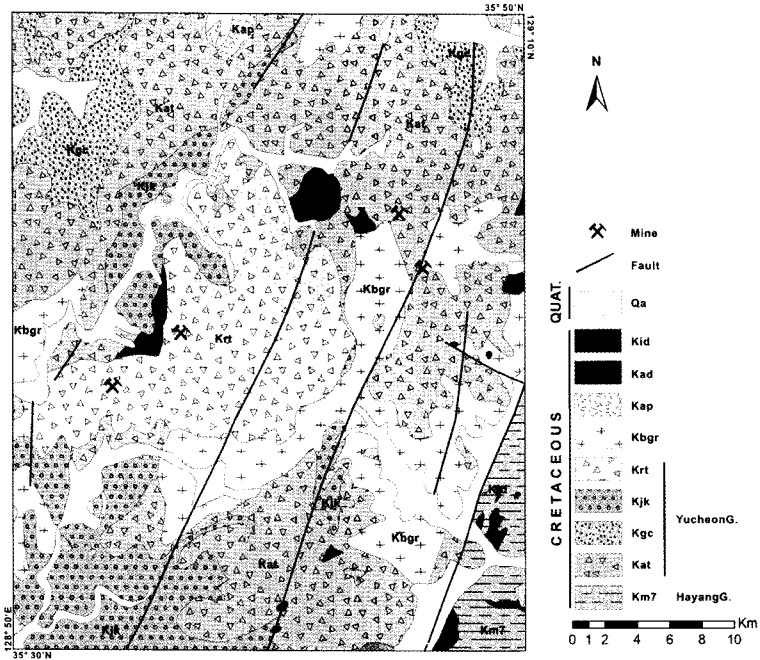


Fig. 2. Geologic map of the southeastern part of Gyeongsang basin, showing the general geology and distribution of non-metallic deposits.

포하고 있다. 산내-언양 화강암류는 I 타입의 칼크 알카리계열(Calc-alkaline series)에 해당되며, 흑운모 화강암으로 분류된다. 이들의 연대는 흑운모를 이용한 Rb-Sr과 K-Ar 연대측정 결과 각각 68 Ma와 64±3 Ma로 보고되어 있다(Moon *et al.*, 1998). 산내-언양 화강암류는 다양한 조직과 색을 띄고 있으며, 마그마의 결정화작용이 진행되면서 유체의 분리와 포화를 지시하는 정동(mirolitic cavities)이 풍부한 특징을 갖는다

(Yang and Lee, 2000).

3. 연구방법

이번 연구는 경상분지내 널리 분포하는 화산암류내에 대규모 열수변질작용에 의해서 형성된 삼성, 중앙, 경주, 내남 남석광상에서 채취한 점토광물들의 분광반사률을 측정하고, 이를 이용하여 다중 파장대역 위성

Table 1. Comparison between Landsat TM/ETM+ and ASTER spectra bandpass

Region	ASTER				Landsat TM/ETM+			
	Band number	Spectral range(μm)	Spatial Res.(m)	Quantization levels	Band number	Spectral range(μm)	Spatial Res. (m)	Quantization levels
VNIR					1	0.450-0.515	30	
	1	0.520-0.600	15		2	0.525-0.605		
	2	0.630-0.690		3	0.630-0.690			
	3N	0.780-0.860		4	0.750-0.900			
	3B	0.780-0.860		Pan.	0.520-0.900	15(ETM+)		
SWIR	4	1.600-1.700	30	8 bits	5	1.550-1.750	30	
	5	2.145-2.185			7	2.080-2.350		
	6	2.185-2.225						
	7	2.235-2.285						
	8	2.295-2.365						
TIR	9	2.360-2.430						
	10	8.125-8.475	90					
	11	8.475-8.825						
	12	8.925-9.275		12 bits				
	13	10.25-10.95			6	10.40-12.50	120/60(ETM+)	
	14	10.95-11.65						
							8 bits	

영상에 적용 가능한 비연산 모델을 제시하고자 한다.

위성영상 자료로부터 광물 혹은 암석의 분광특성을 이용한 연구방법에는 SAM (Spectral Angle Mapper), SFF (Spectral Feature Fitting), 분광반사 특성간의 비를 계산하는 비연산 방법 등이 있다. 이번 연구에서 사용된 비연산 방법은 비교적 간단하고 적용이 용이하다. 또한 대규모 열수변질대를 규명하는데 이용되고 있다(Tommaso *et al.*, 2007).

열수변질 시료의 분광반사율을 측정하기 위하여 GER-3700 분광분석기가 사용되었으며, 0.324~2.526 μm 사이에 해당하는 약 640여개의 파장대역의 반사율 측정이 가능하다. 이들의 분광반사 특성을 바탕으로 고안된 비연산 모델의 검증에는 현재 지질학적으로 널리 사용되고 있는 다중 파장대역 위성영상인 Landsat 7 ETM+ (2002. 4. 5 촬영)과 ASTER (2006. 4. 7 촬영)을 사용되었다. Landsat 7 ETM+는 4개의 가시광선-근적외선 대역(VNIR: Visible and near infrared)과 2개의 단파장적외선 대역(SWIR: Shortwave infrared) 그리고 2개의 열적외선 대역(TIR: Thermal infrared) 등 7개의 다중 파장대역 밴드와 전정색 밴드를 제공한다. VNIR과 SWIR 밴드는 30 m의 공간 해상도를 갖고 있으며, 15 m의 전정색 밴드와 60 m의 TIR 밴드가 있다. Landsat 시리즈에 비해서 분광해상도(spectral resolution)와 공간해상도(spatial resolution)가 대폭 향상된 ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer)는 15 m 공간해상도를

갖는 3개의 VNIR 밴드, 30 m의 공간해상도를 갖는 6개의 SWIR 밴드, 그리고 90 m의 공간해상도를 갖는 5개의 TIR 밴드의 영상을 획득할 수 있다(Table 1).

비연산 모델을 제시하기 위해서, 중앙납석광산에서 산출되는 납석시료는 크게 저, 중, 고품위로 구분되었

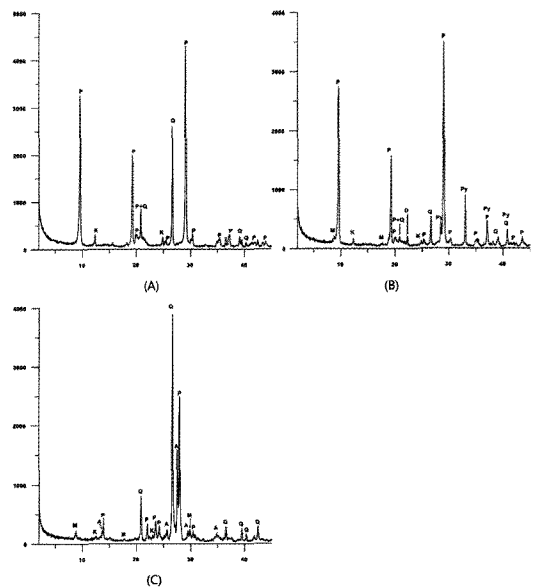


Fig. 3. The X-ray powder diffraction patterns of high (A), intermediate (B), and low grade pyrophyllite ores (C). Abbreviation: A: K-feldspar, D: diaspore, K: kaolinite, M: mica-illite, P: pyrophyllite, Py: pyrite, Q: quartz.

으며, 이를 대비하기 위하여 모암인 응회암을 그 비교의 대상으로 사용하였다. 채취된 납석시료의 경우, 납석의 광물 동정을 위해 X-회절분석이 사용되었으며, 각 납석 시료의 분석결과는 고-, 중-, 저품위로 각각 Fig. 3에 제시되어 있다. GER-3700 분광분석기를 이용하여 채취된 시료들의 반사율을 측정하였다. 이들 분광반사율을 Landsat 영상과 ASTER 영상의 밴드별 분광반사를 곡선을 이용하여 재배열(Re-sampling)하였다. 이로부터 특정 광물이 가진 고유 반사 및 흡수 패턴을 추출 후, Ninomiya (2003, 2004)와 Lee *et al.* (2008, 2009)에 의해 제안된 비연산 모델을 이용하였다. 이러한 모델의 적용은 기존 연구에서 제시된 모델에 비해 대상물 간의 반사율 차이를 극대화함으로써 서로 다른 조성을 갖는 암상 혹은 변질대의 규명에 보다 더 적합한 모델을 검증하기 위함이다.

4. 연구결과 및 토의

분광 특성에 있어서 모암인 응회암에 비해 열수변질 작용의 산물인 납석의 품위가 상대적으로 높은 반사율을 보인다. 또한 납석의 경우에도 각 품위가 높을수록 반사율의 값이 상대적으로 높게 나타나는 특징을 갖는다(Fig. 4). 납석의 분광특성은 1.01, 1.41, 1.87, 2.18

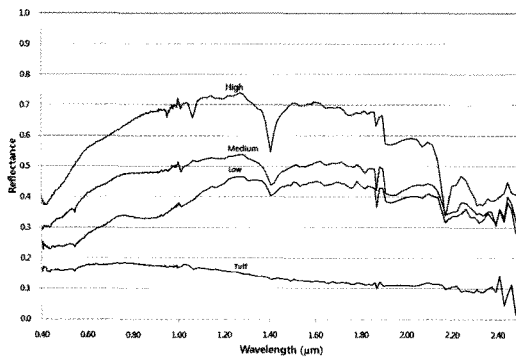


Fig. 4. Spectra patterns of tuff and low, medium, and high-grade pyrophyllite deposits.

μm 파장대역에서 강한 흡수 패턴을 보이고, 품위가 높을수록 1.41 μm 와 2.18 μm 에서 강한 흡수가 일어난다. 납석에 대한 강한 흡수특성이 나타나는 파장대역과 달리 강한 반사특성을 보이는 파장대역은 1.00, 1.15, 1.60, 2.14 μm 이다(Table 2).

이러한 특정 광물의 분광학적 특성만을 이용하여, 암상을 구분하기 위한 비연산 모델은 아래의 식 1과 식 2의 형태로 표현할 수 있다.

$$\frac{R_{r1} \times R_{r2} \times R_{r3} \times R_{r4}}{R_{a1} \times R_{a2} \times R_{a3} \times R_{a4}} \quad (\text{식 1})$$

$$\frac{R_{r2} \times R_{r4}}{R_{a2} \times R_{a4}} \quad (\text{식 2})$$

여기에서 r 은 반사특성이 나타나는 파장대역, a 는 흡수특성이 나타나는 파장대역이고, R 은 각각의 파장대역에 해당하는 반사의 정도를 나타낸다.

각각의 특정 시료에 대해서 식 1과 2를 적용한 비연산 결과는 Table 2에 제시되어 있다. 비연산 모델을 적용한 결과, 모암(응회암)과 열수변질시료(납석)의 흡수값과 반사값의 단순비교시와 비교했을 때 모암인 응회암과 납석간의 차이가 보다 더 명확해지는 것을 확인할 수 있으며, 납석의 경우 품위가 높을수록 상대적으로 높은 값을 갖는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 응회암과 납석에 대한 분광특성 곡선을 Landsat과 ASTER밴드의 형태로 재배열한 결과이다. Landsat의 분광특성에 대해서 재배열 결과에서는 비연산 모델의 적용 결과와 마찬가지로, 모암인 응회암에 비해 납석의 반사도가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 납석의 경우, 품위가 높을수록 분광반사 강도가 상대적으로 높게 나타나며, 밴드 5에서 높은 반사도를 가지는데 반해 밴드 7에서는 낮은 반사도를 갖는 특징을 보인다(Fig. 5A). ASTER의 분광특성에 대해서 재배열한 결과는 Landsat 위성영상에 비해 SWIR 영역에서 상대적으로 높은 분광해상도를 제공하기 때문에 Landsat에 대한 결과보다 상세한 구분이 가

Table 2. Results of application rationing model to various grade of pyrophyllite deposits and tuff

	Absorption				Reflection				Ratio	
	1.01	1.41	1.87	2.18	1.00	1.15	1.60	2.14	식 1	식 2
High	0.687	0.545	0.630	0.362	0.723	0.731	0.711	0.519	2.284	1.923
Midium	0.481	0.436	0.420	0.343	0.514	0.528	0.511	0.417	1.914	1.472
Low	0.366	0.402	0.365	0.324	0.381	0.434	0.450	0.396	1.693	1.320
Tuff	0.172	0.131	0.100	0.97	0.171	0.165	0.125	0.114	0.184	0.148

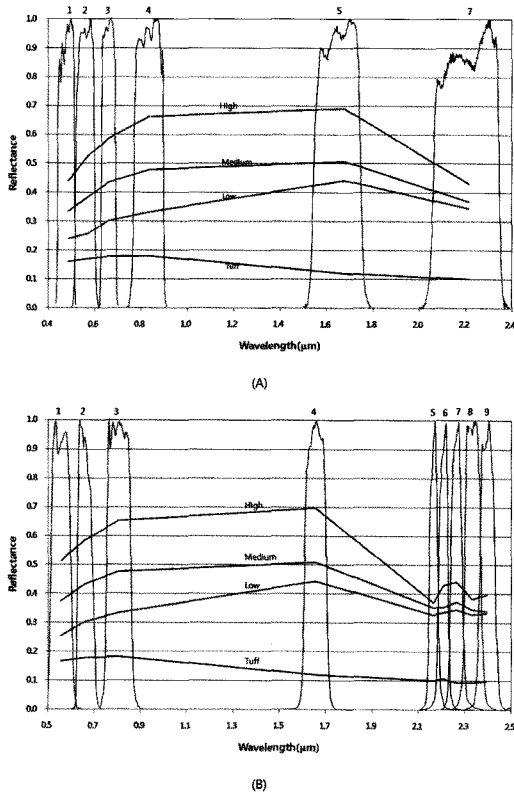


Fig. 5. Spectra patterns of tuff and pyrophyllite deposits. A. Spectra re-sampling to Landsat bandpass. B. Spectra re-sampling to ASTER bandpass.

능하다. ASTER 위성영상의 재배열 결과, Landsat의 결과와 마찬가지로 모암과 열수변질대의 분광특성이 명확히 구분된다. 납석의 경우, 밴드 4와 밴드 7에서 강한 반사값을 갖지만, 밴드 5와 밴드 8에서는 오히려 강한 흡수값을 갖는다(Fig. 5B).

이러한 분광학적 특성을 이용하여, 납석에 대한 Landsat (식 3)과 ASTER (식 4)의 비연산 모델은 다음의 식 3과 4와 같다.

$$Py_{Landsat} = \frac{band_5 \times band_5}{band_7 \times band_7} \quad (식 3)$$

$$Py_{ASTER} = \frac{band_4 \times band_6}{band_3 \times band_5} \quad (식 4)$$

Landsat 위성영상에 대한 비연산 모델인 식 3을 분광특성 곡선에 적용한 결과, 응회암이 가장 낮고 납석의 품위가 높아질수록 결과 값이 높게 나타났다(Table 3). 특히 고품위 납석의 경우에는 모암과 1 이상의 차

Table 3. Results of application $Py_{Landsat}$ model to various grade of pyrophyllite deposits and tuff

	Tuff	Low	Medium	High
Band 1	0.160	0.239	0.334	0.438
Band 2	0.170	0.259	0.385	0.528
Band 3	0.179	0.302	0.435	0.584
Band 4	0.179	0.332	0.478	0.663
Band 5	0.121	0.442	0.508	0.691
Band 7	0.101	0.346	0.370	0.431
$Py_{Landsat}$	1.425	1.637	1.886	2.571

Table 4. Results of application Py_{ASTER} model to various grade of pyrophyllite deposits and tuff

	Tuff	Low	Medium	High
Band 1	0.167	0.253	0.375	0.513
Band 2	0.179	0.303	0.435	0.584
Band 3	0.182	0.334	0.477	0.652
Band 4	0.121	0.444	0.510	0.697
Band 5	0.102	0.329	0.354	0.371
Band 6	0.107	0.336	0.353	0.432
Band 7	0.093	0.346	0.373	0.442
Band 8	0.094	0.330	0.347	0.382
Band 9	0.099	0.334	0.341	0.398
Py_{ASTER}	1.233	1.380	1.435	2.184

이를 보였다. ASTER 위성영상에 대한 비연산 모델인 식 4를 적용하여 계산한 결과 역시 모암인 응회암과 납석 간의 차가 크게 나타난다(Table 4).

앞에서 언급한 비연산 모델인 식 3과 4는 암석의 분광특성 곡선과 위성영상의 밴드별 상관관계만을 이용하여 작성되었다. 이러한 분광특성 곡선만을 이용한 비연산 모델을 실제 위성영상으로의 적용 가능성을 검토하기 위해서 Landsat 7 ETM+ (2002년 4월 5일) 과 ASTER (2006년 4월 7일) 위성영상이 사용되었다. Landsat 위성영상의 DN 값을 이용하여 비연산 모델을 적용한 결과, 열수변질대 지역은 1.94 이상으로 상대적으로 높은 값을 보이는데 반해서 이외의 지역은 1.19~1.49 사이의 낮은 값을 갖는 것으로 나타났다 (Table 5). 그러나 Landsat 영상을 이용한 모델은 Landsat 영상이 상대적으로 분광해상도가 낮고, 5번 밴드와 마지막 파장영역에 해당하는 7번 밴드를 사용하기 때문에 콘크리트 구조물이나 나대지와 열수변질대 간의 명확한 구분이 가능하지만 다른 지역과 명확하게 구분할 수 없다.

ASTER 영상을 이용한 고령토변질대(argillic alteration zone) 추출 가능 모델은 Ninomiya (2003)과 Rowan

Table 5. Results of application $Py_{Landsat}$ model to pyrophyllite mines and other exposed sites

	Mine I	Mine II	Mine III	Mine IV	Concrete	Barren I	Barren II	Barren III
Band 1	2746	3140	2191	2546	3229	2607	2638	2135
Band 2	3690	4161	2941	4137	3826	3591	3541	3496
Band 3	4571	4943	3572	5098	4145	4163	4203	4383
Band 4	5074	5597	4121	5381	4362	4708	4937	5283
Band 5	5065	6137	5214	5918	3613	5386	5152	6655
Band 7	3010	4411	3563	4194	3178	4685	4720	5456
$Py_{Landsat}$	2.831	1.936	2.141	1.991	1.292	1.322	1.191	1.488

Table 6. Results of application Py_{ASTER} model to pyrophyllite mines and other exposed sites

	Mine I	Mine II	Mine III	Mine IV	Concrete	Barren I	Barren II	Barren III
Band 1	1737	1628	1564	1635	1496	1506	1668	1766
Band 2	1898	1690	1777	1843	1512	1593	1779	1923
Band 3	2388	2146	2211	2256	2007	2027	2571	2425
Band 4	2251	1938	2280	2291	2089	2247	2391	2530
Band 5	1340	1225	1376	1292	1597	1702	1720	1780
Band 6	1423	1310	1434	1415	1704	1769	1809	1895
Band 7	1512	1311	1469	1395	1668	1739	1766	1960
Band 8	1451	1254	1368	1278	1668	1751	1748	1954
Band 9	1803	1600	1720	1626	2054	2123	2142	2255
OHI_b	1.895	1.693	1.769	1.915	1.366	1.350	1.427	1.565
PAK	2.742	2.651	2.699	2.869	2.375	2.360	2.442	2.486
Py_{ASTER}	1.750	1.654	1.779	1.936	1.308	1.311	1.404	1.426

and Mars (2003)에 의해서 이미 보고되어 있다. 식 5(OHI_b)는 Ninomiya (2003)가 제시한 모델로 고령토 변질대를 대상으로 한 분광특성 중 강한 흡수가 나타나는 ASTER 밴드 5와 강한 반사가 일어나는 밴드 4와 7의 비를 이용한 계산 방법이다.

$$OHI_b = \frac{band4 \times band7}{band5 \times band5} \quad (식 5)$$

Rowan and Mars (2003)의 PAK 모델은 ASTER 위성영상 내에서 채석광산이나 나대지와 같은 다른 대상물로부터 납석(pyrophyllite), 명반석(alunite) 그리고 고령토(kaolinite)를 구분하기 위하여 제안된 모델이며(식 6), 강한 흡수 특성을 보이는 5번 밴드와 이와 인접하는 밴드 4와 6번 간의 비를 이용한 것이다.

$$PAK(pyrophyllite/alunite/kaolinite) = \frac{band4 + band6}{band5} \quad (6)$$

OHI_b 모델과 이번 연구에서 제시한 모델(식 4)은 흡수 특성과 반사 특성의 곱을 이용하였으나, PAK 모델은 반사 특성의 합과 흡수 특성의 비를 이용한 것이다.

PAK 모델과 같이 분광 특성의 합을 이용한 방법은 일반적으로 널리 사용된 방법이나, 이번 연구에서 제시한 Py_{ASTER} 와 OHI_b 모델은 암석 고유의 분광학적 특성의 곱을 이용함으로써 해당 암석을 제외한 다른 부분과의 차이를 극대화하여 보다 더 명확한 구분이 가능하다(Table 5).

OHI_b 모델은 납석의 강한 흡수 특성을 보이는 밴드 5번만을 사용하여 계산하였지만, Py_{ASTER} 모델은 밴드 8번에서 흡수 특성이 나타나는 것을 이용하였다. 이는 밴드 5번에서 흡수 특성을 나타낼 수 있는 다른 대상물이 존재할 경우 명확하게 구분하기 어렵지만 납석의 모든 분광학적 특성을 고려하여 밴드 8번과 조합함으로써 납석 고유의 분광학적 특성을 이용한 납석광상의 추출이 가능하다(Fig. 6). 그러나 4개의 납석광화대지역 외에 연구지역의 북서쪽과 남동쪽에서 납석광산과 함께 추출이 되고 있다. 이들 지역이 함께 추출되는 데에는 여러 가지 요인을 배제할 수 없으며, 우선적으로 현장 확인이 필요하다. 또한 이들 지역이 납석광화작용을 수반하지 않을 경우, 이들을 납석광상으로부터 구별할 수 있는 추가적인 연구가 반드시 요구된다.

Py_{ASTER} 모델의 적용 외에 비연산 모델을 적용한

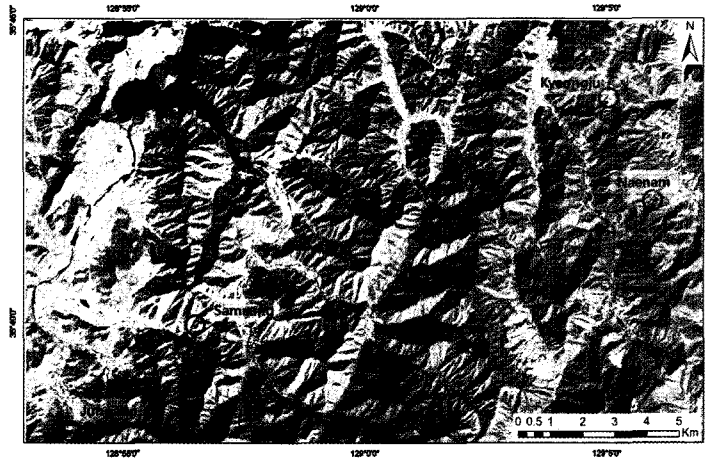


Fig. 6. Result of extraction of pyrophyllite deposits in red, using by Py_{ASTER} Model.

결과에 따르면, 납석의 평균 계산치는 2.740(PAK), 1.818(OH_b), 1.786(Py_{ASTER})이고, 콘크리트 구조물의 경우에는 2.375(PAK), 1.366(OH_b), 1.308(Py_{ASTER}), 나대지의 평균 계산치는 2.429(PAK), 1.447(OH_b), 1.380(Py_{ASTER})으로 나타난다. 비연산 모델의 적용으로 얻어진 결과는 서로 다른 대상물 간의 값의 차이 정도에 따라 결정되어지는 것이며, 값의 높고 낮음은 무의미하다. 이는 대상물 간의 차이가 클수록 영상 내에서 표현 가능한 DN 값의 차이가 커지기 때문에 상호간의 구별이 용이하다는 것을 의미한다.

이번 연구에서 제안된 비연산 모델 Py_{ASTER}의 적용 결과 납석광산과 다른 대상물간의 차는 콘크리트와 0.472, 나대지와 0.399로, OH_b과 PAK모델의 적용결과 0.452, 0.371과 0.365, 0.311로 보다 큰 차이가 나타남을 알 수 있다. 따라서 이번 연구에서 제안한 Py_{ASTER} 모델은 납석광산을 보다 명확하게 규명할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

광물자원탐사를 수행하는데 있어 지질학적, 지구물리학적, 지구화학적 탐사방법들이 일반적이었으나, 현재에 와서 초기 광물자원탐사에 위성영상자료를 이용한 원격탐사 방법이 폭넓게 이용되고 있고 그 중요성이 점차적으로 증가하고 있다.

현재의 비연산 모델은 납석의 분광학적 반사특성만을 이용한 것으로 분광해상도가 낮은 다중 파장대역 위성영상에는 부적합한 것으로 판단되나, 초다중분광

(hyper-spectral) 원격탐사 자료에는 적합한 것으로 이해된다. 다중 파장대역 위성영상 중 Landsat 영상에 대한 모델은 단파장적외선(Shortwave-infrared) 파장대역의 밴드 수가 적기 때문에 제시한 모델의 적용이 가능하나, 비슷한 분광학적 특성을 갖는 지질 혹은 대상물과 명확하게 구분하기가 어렵다.

이번 연구에서는 실제 국내에서 채취한 납석의 분광 특성을 이용하여 분광특성 곡선을 이용한 비연산 모델과 다중 파장대역 위성영상의 분광반응 특성을 이용한 모델을 제시하였다. 제안된 모델을 ASTER 영상에 적용한 결과 다른 유형의 노출된 지형(나대지, 콘크리트 구조물)과 명확한 구분이 가능하며, 열수변질에 의한 납석광상을 정확히 추출할 수 있었다.

현재 전세계적으로 LANDSAT Thematic Mapper를 이용한 VNIR 파장대역에서 철산화물을 구분하고 SWIR 파장대역에서 함 OH 및 CO₃ 광물들을 구분하는데 폭넓게 사용되고 있으며, ASTER 위성영상 자료를 통한 열수변질대 작성이 일반화되어 가는 상황이다. 따라서 이번 연구를 통해서 위성영상을 이용하여 국내 광물자원탐사를 위한 새로운 방법으로서의 가능성이 검증된 것으로 판단되나, 추후 보다 더 세부적인 연구가 절실히 요구된다.

사 사

본 연구는 기초기술연구회 “지상관측 위성자료 clearing house 구축” 과제의 일환으로 수행되었습니다. 또한 이 논문의 내용에 관한 자세한 지적과 건설

적인 제안을 해주신 익명의 심사위원님께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- Bedell, R. (2004) Remote sensing in mineral exploration. SEG Newsletter, n. 58.
- Kim, D.H., Hwang, J.H., Park, K.H. and Song, K.Y. (1998) Geolical map of the Pusan sheet, 1:250,000 scale. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 62p.
- Kim, S.T. and Lee, K. (2004) Application of linear spectral mixture analysis to geological thematic mapping using Landsat 7 ETM+ and ASTER satellite imageries. Korean Journal of Remote Sensing, v.20, p.369-382.
- 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 Geomorphological Association of Korea, v.15, p.49-60.
- 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 Geomorphological Association of Korea, v.16, p.77-86.
- Moon, S.H., Par, H., Ripley, E.M. and Hur, S.D. (1998) Petrography and stable isotopes of granites around the Eonyang rock crystal deposits. Jour. Geol. Soc. Korea, v.34, p.211-227.
- Ninomiya, Y. (2003) Rock type mapping with indices defined for multispectral thermal infrared aster data: case studies. Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering, v.4886, p.123-132.
- Ninomiya, Y. (2004) Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data. Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering, v.5234, p.180-190.
- Ninomiya, Y., Fu, B. and Cudahy, T.J. (2005) Detecting lithology with radiance at the sensor data of ASTER multispectral TIR. Remote Sensing of Environment, v.99, p.127-139.
- Pak, S.J., Choi, S.G. and Lee, D.E. (2003) The genetic implication of hydrothermal alteration of epithermal deposits from the Mugeuk area. J. Miner. Soc. Korea, v.16, p.265-280.
- 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, v.98, p.1019-1027.
- Rowan, L.C. and Mars, J.C. (2003) Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emissivity and Reflection Radiometer ASTER data. Remote Sensing of Environment, v.84, p.350-366.
- Rowan, L.C., Mars, J.C. and Simpson, C.J. (2005) Lithologic mapping of the Mordor, NT, Australia ultramafic complex by using the Advanced Spacedborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). Remote Sensing of Environment, v.99, p.105-126.
- Rowan, L.C., Schmidt, R.G. and Mars, J.C. (2006) Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data. Remote Sensing of Environment, v.104, p.74-87.
- Tommaso, I.D. and Rubinstein, N. (2007) Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infernillo porphyry deposit, Argentina. Ore Geology Review, vol.32, p.275-290.
- Yamaguchi, Y. and Naito, C.H. (2003) Spectral indices for lithologic discrimination using the ASTER SWIR bands. International Journal of Remote Sensing, v.24, p.4311-4323.
- Yang, K. and Lee, J.D. (2000) The Sannae-Eonyang granitic rocks and hydrothermal system, Southeastern Kyongsan Basin. Econ. Environ. Geol., v.33, p.19-30.