

제25권 2012년 12월

가시광선 및 적외선 분광학을 이용한 광물자원 탐사 응용

유 재 형

충남대학교 지질환경과학과

● 서언

현대는 광물자원의 전쟁이라 해도 과언이 아닐 만큼 자원확보가 매우 중요한 시대이다. 그러나 국내자원의 실정은 상대적으로 풍부하지 않은 매장량과 환경문제로 인하여 국내수요를 충당할 만한 자원의 공급이 여의치 않다. 따라서 자원량이 풍부한 반면 자본과 기술의 부재로 인하여 자원개발의 여지가 많은 해외자원을 확보하기 위하여 박차를 가하고 있다. 그러나 해외자원 탐사에 있어 기초자료의 부족함과 인프라의 부족이 가장 어려운 면이라 할 수 있다. 또한 탐사대상지역이 매우 광범위하여 한정된 인력과 기초인프라로 넓은 조사지역을 탐사하기에는 한계가 있다. 따라서 현장 조사에 앞서 암상의 분포와 광상배태 가능성을 인지할 수 있는 기초조사의 중요성이 대두되고 있다. 또한 현장에서 광종과 변질대의 형태를 인지하기에는 육안으로 구분할 수 있는 광물이 제한적이어서 시료를 채취하여 실내실험을 통하여 광종과 변질대를 파악하고 그 결과를 다시 야외조사에서 활용하는 여러단계의 탐사활동을 거쳐야 한다.

1990년대 부터 활발하게 활용되기 시작한 가시광선과 적외선을 활용한 반사도 분광학과 이를 이용한 원격탐사의 활용은 앞에서 기술한 문제에 해

결책으로 제시되어 선진국에서는 이미 활발하게 이용되고 있으며, 자원탐사의 정확도와 경제성을 높이는데 기여도가 상당히 높은 획기적인 기술 중의 하나로 인식되고 있다. 분광학의 자원탐사의 활용은 야외조사에서의 암석 및 광물 식별에 탁월한 효과를 발휘할 뿐 아니라 야외조사에서 획득한 분광학적 자료를 활용하여 원격탐사자료의 신뢰도를 높임으로 인해 광역자원탐사에 활용도가 탁월하다. 특히 암석이나 광물의 경우 가시광선과 적외선영역에서 화학조성에 따라 변이를 탐지하기가 용이하여 가시광선 및 적외선 분광학이 가장 효율도가 높다고 할 수 있다. 따라서 본문에서는 분광학을 이용한 광물자원탐사의 기본원리와 가시광선과 근적외선 영역에서의 분광학적 특성, 그리고 대표적인 spectral library정보의 이용에 대해 기존에 발표되었던 논문과 Hauff의 review paper (http://www.pimausa.com/Case_Studies.html)를 바탕으로 살펴보고자 한다.

● 분광학을 이용한 광물분석

분광학(spectroscopy)이란 태양으로 부터 방사된 전자기파(Electromagnetic Radiation, EMR)와 지표에 존재하는 물질사이의 반응에 대한 연

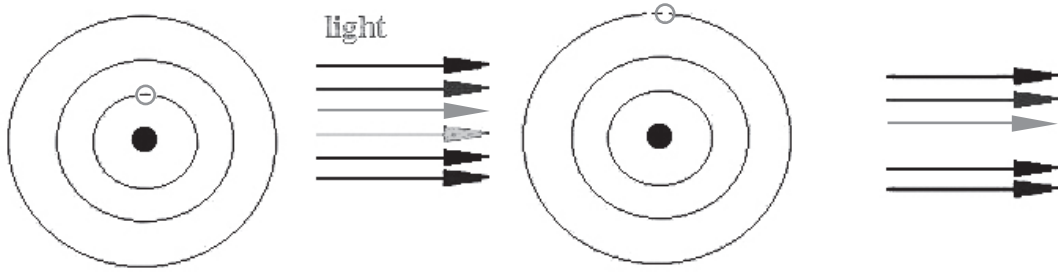


그림1. 수소원자의 전자전이에 의한 에너지 흡수 모식도

구를 수행하는 학문이다. 전자기파가 물질과 만나게 되면 물질에 의해 흡수(absorption), 방사(emission) 또는 산란(scattering) 된다. 반사분광법(Reflectance Spectrometry)은 전자기파의 영역 중 물질에 의해 반사되는 영역에 해당하는 가시광선(visible, 0.4~0.75 μm), 근적외선(Near-Infrared, 0.75~1.4 μm), 및 근적외선(Short-Wave Infrared, 1.4~3.0 μm)을 이용하여 광물을 분석하는 방법이다. 위에서 기술한 바와 같이 근적외선 영역은 파장에 따라 상대적으로 짧은 근적외선 영역에 해당하는 Near Infrared와 파장이 긴 근적외선인 Short-wave infrared로 구분된다. 본문에서는 근적외선을 구분하기 위하여 Near infrared는 단-근적외선, Short-wave infrared는 장-근적외선으로 표기하였다. 이 방법은 물질의 원자구조내에서 특정 원자

와 분자가 특정한 파장에 해당하는 에너지를 흡수하는 특징을 이용한다(Hunt, 1977; Goetz et al., 1982). 가시광선 및 단-근적외선 영역에서 에너지의 흡수는 전자의 전이(electronic transition)에 의해 발생한다(그림 1).

장-근적외선 영역에서의 에너지 흡수는 광물조성에 따른 결정격자의 진동상태전이(vibrational state transition)에 의해 발생한다. 이들 진동상태는 특정한 에너지 레벨에서 발생하므로 특정한 파장을 갖는 스펙트럼에서 에너지를 흡수하는 특징을 보이며, 이를 기반으로 광물조성의 구분이 가능하다. 특정 화학조성에 따른 에너지 흡수 레벨은 특정한 분자결합을 이루는 양이온의 이온반경에 의해 특정파장과 연관된다. 특정 원자와 분자간의 결합반경은 광물을 정의하는 화학조성에 따

표 1. 각 광물군에 대한 적외선 영역의 에너지 흡수 파장과 이와 연결된 분자

Wavelength	Molecule	Mineral Group
1.4 μm	OH and H ₂ O	Clays, sulfates, hydroxides, zeolites
1.56 μm , 2.02 μm , 2.12 μm	NH ₄	NH ₄ species
1.8 μm	OH	Sulfates
1.9 μm	H ₂ O	Smectite
2.2 μm	Al-OH	Clays, sulfates, micas
2.29 μm	Fe-OH	Fe-Clays
2.31 μm	Mg-OH	Mg-Clays, Organics
2.324 μm	Mg-OH	Chlorites
2.35 μm	CO ₂ -2	Carbonates
2.35 μm	Fe-OH	Fe-Chlorites

라 일정한 특징을 보이므로 특정 스펙트럼의 흡수 특징을 바탕으로 광물의 화학조성 및 화학조성의 변화를 감지할 수 있다(Hunt, 1977). 표 1은 광물 자원 탐사에 용이한 변질대와 밀접한 관련을 갖는 광물군의 스펙트럼 흡수 파장과 이들 에너지 흡수와 연관되는 분자를 나타 내었다. 예를 들면 OH와 H₂O기를 많이 갖는 광물군(점토광물군 등)의 경우 1.4 μ m 에서 특징적으로 흡수도가 높아 반사되는 에너지가 적고 다른 영역에서는 상대적으로 높은 반사도를 갖는다.

각 각의 광물들은 그 화학조성과 결정구조 등에 따라 특정한 스펙트럼의 반사 및 흡수의 특징을 보이므로 이들 스펙트럼의 반사도를 그래프로 나타낸 것을 spectral signature라고 부른다. 예를 들어 Cu₃(CO₃)₂(OH)₂의 화학조성을 갖는 Azurite의 경우 1.5 μ m, 2.05 μ m, 2.3 μ m, 2.35 μ m에서 특징적인 에너지 흡수를 보인다. 이를 바탕으로 이와 유사한 spectral signature를 보이는 광물을 탐사현장에서 발견한다면, 그 광물이 Azurite일 확률이 매우 높다. 이와 같이 특정 광물을 반사분광법을 사용하여 인지하기 위하여는 그 광물의 반사도를 표준화해 줄수 있는 자료가 필요하며 이들 자료를 spectral

library라 한다. 현재 세계적으로 미국의 USGS에 의해 제작된 spectral library가 반사분광법의 기준으로 사용된다. USGS의 spectral library는 본문에서 따로 설명하였다.

● 가시광선(Visible-Near Infrared) 분광학

앞에서 설명한 바와 같이 가시광선은 0.3~0.75 μ m, 단-근적외선은 0.75~1.4 μ m 의 파장을 가지며 가시광선/적외선 분광학에서 상대적으로 짧은 파장에 해당한다. 대부분의 광물들이 중적외선 영역에서 특징적인 흡수파장을 갖지만 적지않은 광물들이 가시광선의 흡수 파장으로 인해 특정한 색을 보인다. 예를 들면 chlorite의 경우 가시광선의 영역에서 특징적인 스펙트럼을 갖는데 반해 중적외선 영역에서는 다른 광물들과 분간이 어려운 경우가 종종 발생한다(그림 3). 전체적으로 반사도가 중적외선 영역에 비해 낮지만 녹색의 영역에 해당하는 0.5~0.6 μ m에서 다른 가시광선 영역에 비해 높은 반사도를 보이는 반면 적색영역(0.6~0.7 μ m)과 청색영역(0.4~0.5 μ m)에서 높은 흡수도를 보인다.

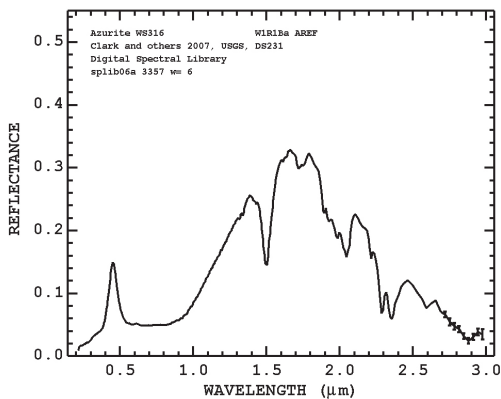


그림 2. 남동석(Azurite)의 분광특성(Clark et al., 2007, USGS spectral library).

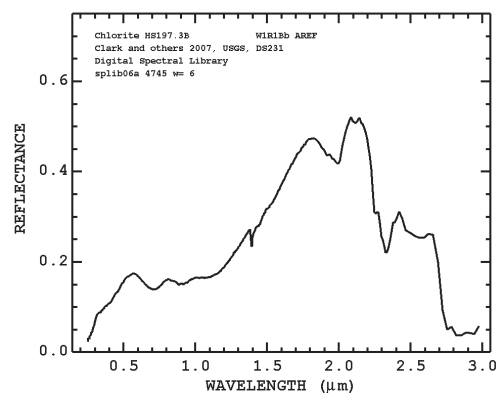
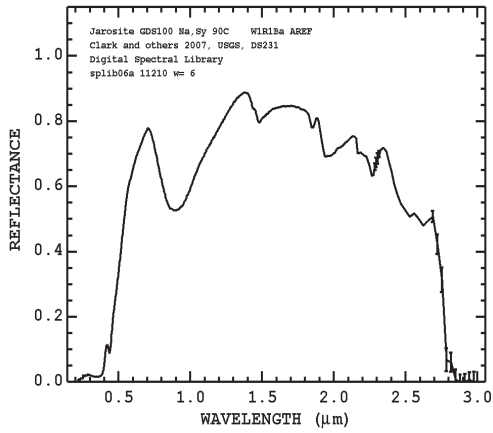
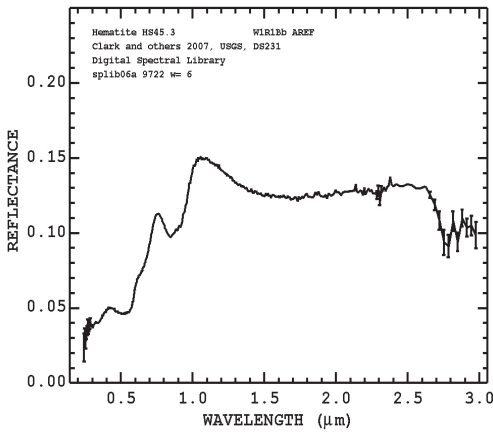


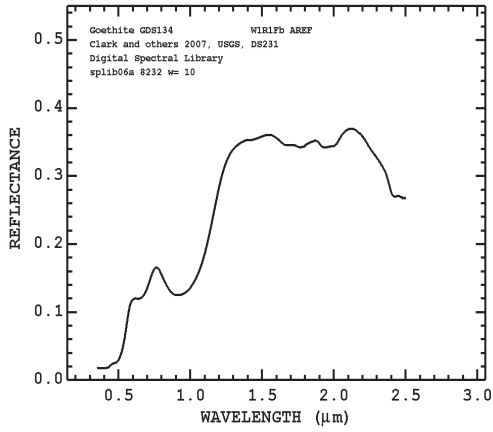
그림 3. 녹나석(Chlorite)의 분광특성(Clark et al., 2007, USGS spectral library).



a)

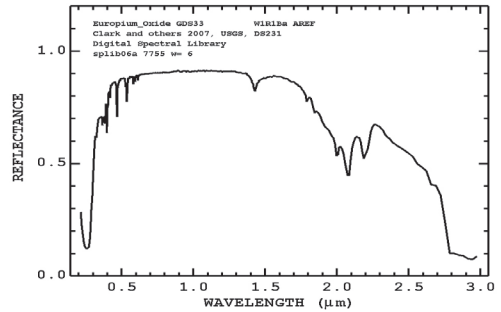


b)

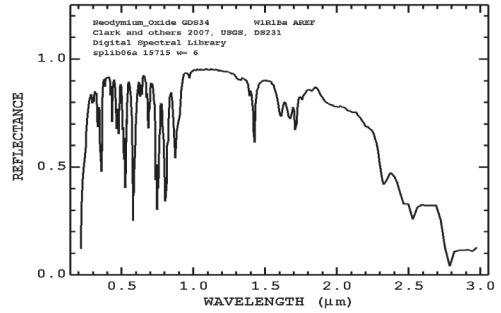


c)

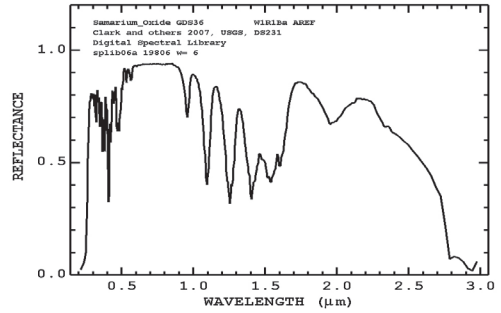
그림 4. 일반적인 철광물의 분광특성;
a) 자로사이트(Jarosite), b) 적철석(Hematite)
c) 침철석(Goethite) (Clark et al., 2007, USGS spectral library).



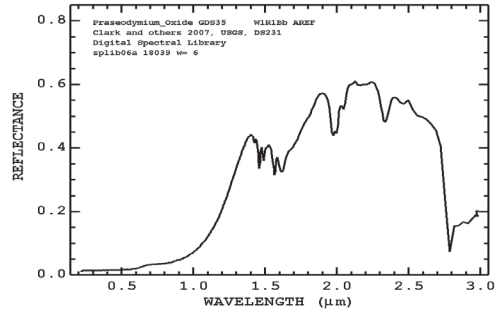
a)



b)



c)



d)

그림 5. 몇몇 희토류광물의 분광특성;
a) 산화 유틀륨(Europium oxide), b) 산화 네오디뮴 (Neodymium oxide), c) 산화 사마리움(Samarium oxide), d) 산화 프라세오디뮴(Praseodymium oxide) (Clark et al., 2007, USGS spectral library).

또한 광물자원 탐사에 있어 중요한 역할을 하는 iron oxyhydroxides의 경우 단-근적외선 영역에서 특징적인 흡수도를 보인다. 그림 3은 가장 대표적인 철광물에 해당하는 Jarosite ($KFe^{3+}_3(OH)_6(SO_4)_2$), hematite (Fe_2O_3), goethite ($FeO(OH)$)의 spectral signature를 보여준다. Jarosite의 경우 전체적으로 반사도가 다른 광물에 비해 높고 $0.9\mu m$ 에서 높은 흡수도를 보이는 반면 hematite는 반사도가 이에 비해 떨어지며 $0.85\mu m$ 영역에서 높은 흡수도를 보인다. 또한 goethite는 Jarosite보다 반사도가 떨어지며 $0.95\mu m$ 영역에서 높은 흡수도를 보인다. 그외 nickel laterite, 크롬광물 및 망간광물 등이 가시광선 영역에서 특징적인 스펙트럼을 보인다. Garnet, pyroxenes, olivine의 경우 단-근적외선 영역에서 특징적인 에너지 흡수를 보이는 경향이 있다.

근래에 들어 관심이 더욱 더 높아진 희토류 원소(Rare Earth Elements) 들도 매우 특징적인 가시광선 스펙트럼을 보인다. 그림 5는 대표적인 희토류 광물에 해당되는 europium oxide, neodymium oxide, samarium oxide, praseodymium oxide의 spectral signature를 보여준다. 일반적으로 희토류 광물의 경우 야외조사 현장에서 구분이 어려운 단점이 있으나 가시광선 분광계를 사용할 경우 상대적으로 용이하게 구분할 수 있음을 지시한다. Europium oxide는 가시광선과 단-근적외선 영역에서 높은 반사도를 보이는 경향을 가지며, 청색 영역에 해당하는 $0.4\mu m$, $0.48\mu m$ 과 녹색 영역에 해당하는 $0.54\mu m$ 에서 특징적인 흡수도를 가진다. Neodymium oxide는 가시광선과 단-근적외선 영역에서 반사도의 변이가 잦고 큰 특징을 보인다. 특징적인 에너지 흡수는 청색 영역의 $0.37\mu m$, 녹색 영역의 $0.52\mu m$, $0.59\mu m$, 근적외선 영역의 $0.74\mu m$,

$0.8\mu m$, $0.88\mu m$ 에서 나타난다. Samarium oxide는 가시광선 영역에서는 europium oxide와 유사한 에너지 흡수 파장을 보이지만 단-근적외선 영역에서 확연히 다른 에너지 흡수 파장을 갖고, 가시광선에서의 에너지 흡수도가 europium oxide보다 큰 특징을 갖는다. 이들의 에너지 흡수 파장은 청색 영역의 $0.41\mu m$, $0.48\mu m$ 과 단-근적외선 영역의 $0.96\mu m$, $1.1\mu m$, $1.25\mu m$ 에서 특징적으로 보여진다. Praseodymium oxide는 다른 희토류와 다르게 가시광선의 전 영역에서 에너지의 흡수도가 매우 높으며 파장이 길어짐에 따라 반사도가 증가해 $1.4\mu m$ 부근에서 최대치의 반사도를 보이는 특징을 갖는다.

● 근적외선(Short-wave infrared, SWIR) 분광학

앞에서 기술된 바와 같이 장-근적외선에 기초하는 분광법은 원자와 분자간의 화학결합에 의한 진동에너지를 활용하는 방법이다. 따라서 Si-OH 결합에 의한 비정질 규산염광물을 확인하는데 용이하다. 장-근적외선 분광법이 가장 많이 사용되는 분자들은 H_2O , OH, CO_3 및 NH_4 등이 있다. 또한 장-근적외선 분광법은 광상의 형성과 밀접한 관계를 갖는 변질작용과 밀접한 광물을 구분하는 데 매우 유용하다(Thompson et al., 1999). 따라서 선진국에서는 이를 이용하여 광화작용의 특징을 현장에서 이해하는 데 큰 도움을 주고있다. 표 2에는 주요 광화작용과 연관된 변질작용과 장-적외선 영역에서 특징적인 흡수도를 보이는 광물을 정리하였다(Thompson and Thompson, 1996). 표에서 보이는 바와 같이 거의 모든 변질광물들의 구분이 가능하다. 가장 흔하게 발견되는 변질광물의

spectral signature는 그림 6에 정리하였다.

Alunite는 advanced argillic 변질작용을 지시하는 광물로 1.44 μm , 1.49 μm , 1.76 μm , 2.17 μm 에서 특징적인 에너지 흡수를 보이며, dickite는 argillic, intermediate argillic 및 advanced argillic의 변질작용을 지시하며 1.38 μm , 2.21 μm , 2.75 μm 에서 특징적인 에너지 흡수를 보여 alunite와는 유사한 에너지 흡수 형태를 보이나 1.76 μm 에서 현저히 낮

은 에너지 흡수를 갖는다. Kaolinite도 역시 모든 종류의 argillic 변질작용을 지시하는 광물로서 에너지 흡수가 다른 점토광물과 유사하나 에너지 흡수가 1.41 μm , 2.2 μm , 2.75 μm 에서 특징적으로 나타나 구분이 가능하다. Muscovite는 potassic 및 chloritic 변질작용을 지시하는 광물로 kaolinite와 매우 유사한 에너지 흡수 패턴을 보여 1.41 μm , 2.2 μm , 2.78 μm 에서 에너지 흡수가 일어나나 2.2 μm 에서의

표 2. 근적외선(short-wave infrared) 영역에서 특징적인 분광특성을 보이는 광화작용과 변질작용에 연관된 광물(Thompson and Thompson, 1996).

Environment of formation	Related Alteration	SWIR active mineral assemblage
Intrusion-related	Potassic, K silicate, biotitic	Biotite, actinolite, sericite, chlorite, epidote, muscovite, anhydrite
	Sodic, sodic-calcic	Actinolite, clinopyroxene, chlorite, epidote, scapolite
	Phyllic, sericitic	Sericite, chlorite, anhydrite
	Intermediate argillic, sericite-chlorite-clay, argillic	Sericite, chlorite, kaolinite, montmorillonite, calcite, epidote
	Advanced argillic	Prophyllite, sericite, diaspore, alunite, topaz, tourmaline, dumortierite, zunyite
	Greisen	Topaz, muscovite, tourmaline
	Skarn	Clinopyroxene, wollastonite, actinolite-tremolite, vesuvianite, epidote, serpentinite-talc, calcite, chlorite, illite-smectite, nontronite
	Propylitic	Chlorite, epidote, calcite, actinolite, sericite, clay
High-sulfidation epithermal	Advanced Argillic	Kaolinite, dickite, alunite, diaspore, pyrophyllite, zunyite
	Argillic, intermediate argillic	Kaolinite, dickite, montmorillonite, illite-smectite
	Propylitic	Calcite, chlorite, epidote, sericite, clay
Low-sulfidation epithermal	Sericitic, argillic	Sericite, illite-smectite, kaolinite, chalcedony, opal, montmorillonite, calcite, dolomite
	Advanced argillic	Kaolinite, alunite, cristobalite, jarosite
	Propylitic, zeolitic	Calcite, epidote, wairakite, chlorite, illite-smectite, montmorillonite
Mesothermal	Carbonate	Calcite, ankerite, dolomite, muscovite, chlorite
	Chloritic	Chlorite, muscovite, actinolite
	Biotitic	Biotite, chlorite
Sediment-hosted gold	Argillic	Kaolinite, dickite, illite
Volcanogenic massive sulfide	Sericitic	Sericite, chlorite, chlorioid
	Chloritic	Chlorite, sericite, biotite
	Carbonate	Dolomite, siderite, ankerite, calcite, sericite, chlorite
Sediment-hosted massive sulfide	Tourmalinite	Tourmaline, muscovite
	Carbonate	Ankerite, siderite, calcite, muscovite
	Sericitic	Sericite, chlorite
	Albitic	Chlorite, muscovite, biotite

에너지흡수가 상대적으로 적어 높은 반사도를 보인다. Tourmaline 은 1.43 μm , 2.2 μm , 2.35 μm , 2.8 μm 에서 특징적인 에너지 흡수가 관찰되며 sediment-hosted massive sulfide와 연관된 tourmalinite

변질작용을 지시한다. Actinolite는 sodic 변질 작용을 지시하는 대표적인 광물로서 1.39 μm , 2.31 μm , 2.38 μm 에서 특징적인 에너지 흡수가 보여진다.

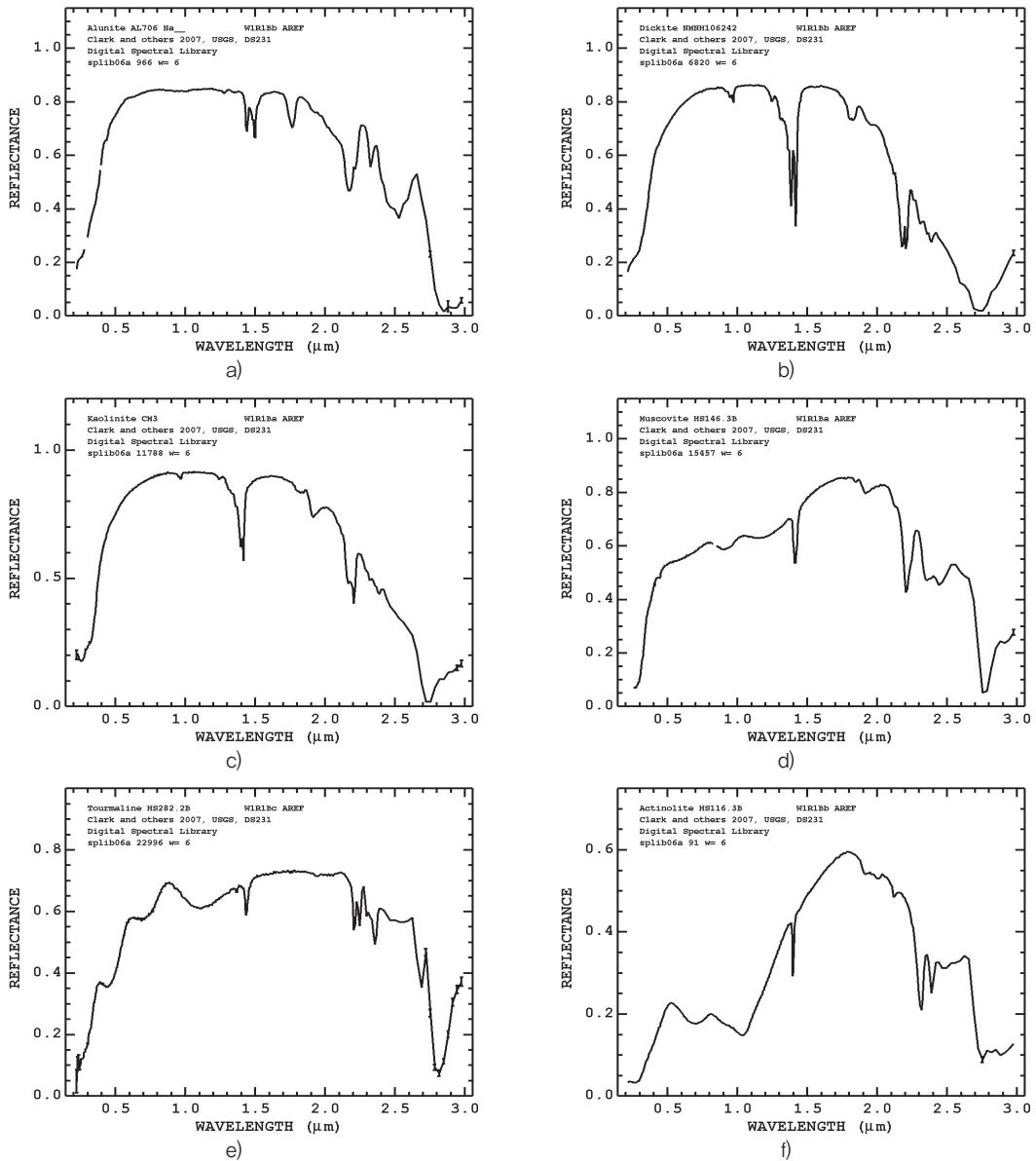


그림 6. 일반적인 변질광물의 분광특성;

a) 명반석(alunite), b) 디카이트(dickite), c) 고령석(kaolinite), d) 백운모(muscovite), e) 전기석(tourmaline), f) 양기석(actinolite) (Thompson et al., 1999; Clark et al., 2007).

● USGS Spectral Library

지금 현재 세계적으로 가장 보편적으로 사용되는 지표물질의 분광학적 기준치는 미국 USGS의 spectroscopy lab에 의해 만들어진 library이다. 현재까지 6개의 version이 만들어 졌으며, 가장 최근에 업데이트는 2007년에 splib06a가 편찬되며 이루어 졌다. 1300 여개 이상의 물질에 대한 스펙트럼이 기준치로 제공되며 <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral-lib.html>에서 무료로 다운받을 수 있다(Clark et al., 2007). 이 자료는 광물, 암석, 토양, 식물 및 식물군, 미생물과 인조물질에 대한 분광학적 자료를 포함하고 있으며, 이들 자료를 처리하기 위한 프로그램이 무료로 제공되고 있다. 광물에 대한 자료의 경우 X-ray diffraction (XRD), electron microprobe (EM), X-ray fluorescence (XRF) 및 편광현미경 분석자료를 함께 제공한다(Clark et al., 2007).

이 spectral library는 모두 6개의 챕터로 이루어져 있으며 챕터 1은 광물, 챕터 2는 토양, 암석 및 혼합물, 챕터 3은 코팅물질, 챕터 4는 물을 포함한 액체와 휘발성 물질, 챕터 5는 인조물질, 챕터 6는 식물과 식물군에 대한 자료를 보인다. 지표 물질들에 대한 분광분석은 0.2에서 3 μ m 을 수집할 수 있

는 Beckman 5270 분광계, 0.35에서 2.5 μ m의 ASD 휴대용 분광계, 1.3 에서 150 μ m 에 대한 Nicolet Fourier Tranform Infra-Red Interferometer 분광계 등을 사용하여, 각 물질에 대해 0.2~3.0 μ m, 1.5~6.0 μ m, 5~25 μ m, 25~150 μ m 의 파장영역에 해당하는 spectral signature를 제공한다. 가시광선과 근적외선 영역에 해당하는 0.2~3.0 μ m 파장의 경우 모든 물질에 대해 제공되나, 다른 영역의 경우 생략되어 있는 경우가 많다(Clark et al., 2007).

앞에서 언급한 바와 같이 특정 물질의 반사도는 원자구조와 분자구조 등에 의해 특정 에너지를 흡수함에 따라 다르게 나타나므로 같은 종류의 광물일 지라도 화학조성이 약간 변화하게 되면 흡수하는 에너지 레벨도 달라지게 되며 spectral signature가 다르게 나타난다. 다시 말하면 같은 종류의 광물도 spectral library가 잘 조성되어 있다면 화학분석 없이 분광계를 이용한 spectral signature를 바탕으로 화학조성을 예측할 수 있다는 것을 지시한다. 따라서 USGS spectral library에는 같은 종류의 광물일 지라도 미세한 화학조성의 및 다른 광물과의 혼합 정도에 따라 여러가지의 기준치를 제공한다. 예를 들어 Actinolite의 경우 mica, calcite, opaque등의 광물과의 미세한 혼합정도에 따라 6개의 자료를 제공한다.

표 3. 미국 USGS spectral library splib06a의 기재사항의 예; Actinolite (ID: HS116) (Clark et al., 2007).

<p>TITLE: Actinolite HS116 DESCRIPT DOCUMENTATION_FORMAT: MINERAL SAMPLE_ID: HS116 MINERAL_TYPE: Inosilicate MINERAL: Actinolite (Amphibole group) FORMULA: Ca₂(Mg,Fe⁺²)₅Si₈O₂₂(OH)₂ FORMULA_HTML: Ca₂(Mg,Fe+2)₅Si₈O₂₂(OH)₂ COLLECTION_LOCALITY: San Bernadino, CA ORIGINAL_DONOR: Hunt and Salisbury Collection CURRENT_SAMPLE_LOCATION: USGS Denver Spectroscopy Laboratory ULTIMATE_SAMPLE_LOCATION: USGS Denver Spectroscopy Laboratory SAMPLE_DESCRIPTION: Forms a series with Tremolite and Ferro-actinolite.</p>
--

Original spectrum published in:
 Hunt, G.R., J.W. Salisbury, 1970, Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I. Silicate minerals, Modern Geology, vol. 1, pp283-300.

With the note that this sample lacks the contamination by opaque inclusions that is seen in the actinolite sample HS22.

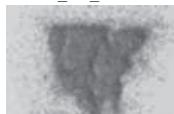
A spectrum of this sample is also published in:

Clark, R.N., T.V.V. King, M. Klejwa, G. Swayze, and N. Vergo, 1990, High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals: J. Geophys Res., v. 95, 12653-12680.

Where it is noted that, although XRD indicates chlorite but no chlorite bands are seen spectrally, microscope analysis indicated ~1% opaque and ~5 volume% chlorite as contaminants. The sample measured was HS116.3B, which was dry sieved to the grain-size interval 74-250 µm.

Analysis of cation proportions indicates that this actinolite is low enough in iron to border on being called a tremolite.

IMAGE_OF_SAMPLE:



END_SAMPLE_DESCRIPTION.

XRD_ANALYSIS:

Analysis by Norma Vergo indicates Actinolite + Chlorite

END_XRD_ANALYSIS.

COMPOSITIONAL_ANALYSIS_TYPE: EM(WDS) # XRF, EM(WDS), ICP(Trace), WChem

COMPOSITION KEYWORD	Oxide ASCII	Amount	Weight Percent,%	Oxide html
COMPOSITION:	SiO2	57.78	wt%	SiO ₂
COMPOSITION:	TiO2	0.02	wt%	TiO ₂
COMPOSITION:	Al2O3	0.22	wt%	Al ₂ O ₃
COMPOSITION:	Cr2O3	0.06	wt%	Cr ₂ O ₃
COMPOSITION:	FeO	4.38	wt%	FeO
COMPOSITION:	MnO	0.12	wt%	MnO
COMPOSITION:	MgO	22.39	wt%	MgO
COMPOSITION:	CaO	12.13	wt%	CaO
COMPOSITION:	Na2O	0.38	wt%	Na ₂ O
COMPOSITION:	K2O	0.07	wt%	K ₂ O
COMPOSITION:	Total	97.55	wt%	
COMPOSITION:	O=Cl,F,S		wt%	#correction for Cl, F, S
COMPOSITION:	New Total		wt%	

COMPOSITION_TRACE: None

COMPOSITION_DISCUSSION: EM analysis by Gregg A. Swayze at USGS Branch of Geophysics, Denver.

END_COMPOSITION_DISCUSSION.

MICROSCOPIC_EXAMINATION:

Clark, R.N., T.V.V. King, M. Klejwa, G. Swayze, and N. Vergo, 1990, High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals: J. Geophys Res. 12653-12680.

Bimodal grain size distribution:

population 1 avg. grain size= 325 µm 99 vol%

population 2 avg. grain size= 15 µm < 1 vol%

avg. grain size for entire populations = 325 µm

Note the presence of ~1% opaque and ~5 volume% chlorite as inclusions. Actinolite prisms bounded by cleavage surfaces. G. Swayze

END_MICROSCOPIC_EXAMINATION.

SPECTROSCOPIC_DISCUSSION:

END_SPECTROSCOPIC_DISCUSSION.

SPECTRAL_PURITY: 1b2_3_4_# 1= 0.2-3, 2= .5-6, 3= 6-25, 4= 20-150 microns

LIB_SPECTRA_HED:	where	Wave Range	Av_Rs_Pwr	Comment
LIB_SPECTRA:	splib04a r 28	0.2-3.0µm	200	g.s.=325µm
LIB_SPECTRA:	splib05a r 66	0.2-3.0µm	200	g.s.=
LIB_SPECTRA:	splib06a r 91			g.s.=

USGS spectral library에서 제공하는 자료를 살펴 보면 각 광물의 분광학적 분석을 실시한 시료에 대한 자세한 기재를 제공하고 각 스펙트럼 영역에 대한 반사도를 8 nm의 분광해상도로 문서 형식과 그래프 형식으로 제공한다. 시료의 기재 사항으로는 광물의 이름과 화학식, 채취장소, 채취단체, 시료에 대한 스펙트럼이 발표된 참고문헌, 시료사진, EM 등의 화학분석에 의한 자세한

화학조성, 미량원소의 종류, 현미경관찰사항 등의 정보를 제공한다. 표 3은 Actinolite 중 순도가 가장 높은 시료에 대한 기재사항을 보여준다. 그림 7에는 표 3에 정리된 Actinolite에 대한 문서형태와 그래프형태의 spectral signature를 정리하였다.

● 결론

분광학을 이용한 광물자원 탐사는 현대문명 발달에 따른 광물자원 탐사에 기여도가 가장 큰 기술의 하나로 선진국에서 활발하게 이용되고 있는 기법이다. 가시광선과 적외선을 이용한 반사분광학은 특정한 물질의 원자 및 분자구조의 특성에 따라 흡수되는 에너지의 레벨이 다르게 나타나고, 각 에너지레벨에 상응하는 파장의 종류가 다름에 따라 반사도가 다르게 나타나는 원리를 이용한 광물 및 암석 식별 방법으로 현장에서 유사하게 보이는 변질 광물의 이해 및 다른 광물과의 혼합정도를 인지하는 데 유용하게 활용된다. 상대적으로 짧은 파장을 갖는 가시광선(Visible-Near Infrared)을 이용한 반사분광법은 chlorite나 철광물, 희토류광물 등을 인지하는데 유용하며, 근적외선(Short-wave infrared)을 이용한 반사분광법은 광물 및 암석의 구분에 매우 중요한 파장의 영역으로 광화작용을 지시하는 변질대와 연관된 광물들을 인지하는데 탁월한 효과를 갖는다. 반사분광법을 이용한 광물자원 탐사에 있어서는 기준이 될 수 있는 자료의 양과 정확도가 매우 중요한 요소로 고려되어야 하며, 현재 이용되는 자료 중 가장 많이 쓰이는 자료는 USGS에 의해 2007년에 편찬된 spectral library가 대표적이다. 이 자료는 상당량의 광물, 암석, 광물혼합물, 식물, 인조물질, 액체 등에 대한 자세한 시료기재와 화학

```

USGS Digital Spectral Library splib06a
Clark and others 2007, USGS, Data Series 231.

For further information on spectrscopy, see: http://speclab.cr.usgs.gov

ASCII Spectral Data file contents:
line 15 title
line 16 history
line 17 to end: 3-columns of data:
      wavelength      reflectance      standard deviation
(standard deviation of 0.000000 means not measured)
(-1.23e34 indicates a deleted number)
-----
Actinolite HSI16_3B      #IRIEb AREF
copy of splib05a r 66
0.205100      -1.23e34      0.009096
0.213100      0.033701      0.001704
0.221100      0.035717      0.000932
0.229100      0.035481      0.000850
0.236100      0.035345      0.000794
0.242100      0.034786      0.000710
0.248100      0.033701      0.000703
0.253600      0.033403      0.000690
0.259600      0.033197      0.000683
0.263600      0.033780      0.000671
0.268600      0.032683      0.000657
0.273100      0.033050      0.000701
0.277100      0.034391      0.000695
0.281100      0.034719      0.000676
0.285100      0.036169      0.000640
0.289100      0.036163      0.000755
0.293100      0.037872      0.000802
0.297100      0.040492      0.000796
0.301100      0.043035      0.000754
0.305100      0.045426      0.000669
0.309100      0.048299      0.000672
0.313100      0.051189      0.000697
0.317100      0.055140      0.000911
0.321100      0.060014      0.000913
0.325100      0.063671      0.000911
    
```

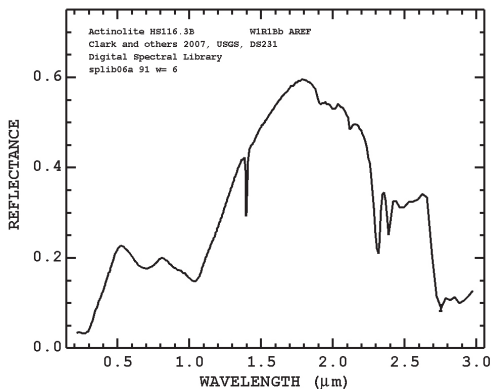


그림 7. 미국 USGS spectral library splib06a에서 제공하는 두 가지 포맷의 분광특성의 예; Actinolite (ID: HSI16) (Clark et al., 2007).

조성을 제공하여 이들 시료에 대한 전자기파의 반사도를 8 nm의 해상도로 제공한다.

참고문헌

- Hunt, G. R. (1977) Spectral signature of particulate minerals in the visible and near infrared, *Geophysics*, 42: 501-513.
- Goetzl, A. F., Rowan, L. C., Kingston, M.J.. (1982) Mineral Identification from orbit: Initial results from the Shuttle Multispectral Infrared Radiometer, *Science*, 218: 1020-1024.
- Clark, R.N., Swayze, G.A., Wise, R., Livo, E., Hoefen, T., Kokaly, R., Sutley, S.J.. (2007) USGS digital spectral library splib06a: U.S. Geological Survey, Digital Data Series 231, <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06>.
- Thompson, A.J.B., and Thompson, J.F.H.. (1996) Atlas of alteration: A field and petrographic guide to hydrothermal alteration minerals: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, 119p.
- Thompson, A. J. B., Hauff, P. L., and Robitaille, A.. (1999) Alteration Mapping in Exploration: Application of Short-Wave Infrared (SWIR) Spectroscopy, *SEG Newsletter*, 1999, Number 39, Society of Economic Geologists, Littleton, CO, USA.
- Hauff, P. An overview of VIS-NIR-SWIR field spectroscopy as applied to precious metals exploration, internet article, http://www.pimausa.com/Case_Studies.html.