

단파장적외선 분광분석법을 이용한 광물동정과 현장적용성

김창성^{1*} · 김용휘¹ · 최선규¹ · 고광범² · 한경수³

¹고려대학교 지구환경과학과, ²한국광물자원공사 자원개발기술팀, ³한국광물자원공사 자원처리기술팀

Mineral Identification and Field Application by Short Wave Infrared (SWIR) Spectroscopy

Chang Seong Kim^{1*}, Yong-Hwi Kim¹, Seon-Gyu Choi¹, Kwang-Beom Ko² and Kyeong-Soo Han³

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Seoul 02841, Korea

²Mining and Geotechnical Team, Korea Resources Corporation (KORES), Gangwon 26464, Korea

³Mineral Processing Team, Korea Resources Corporation (KORES), Gangwon 26464, Korea

(Received: 30 December 2016 / Revised: 13 February 2017 / Accepted: 20 February 2017)

The analytical conditions including surface state, moisture effect, and device condition were investigated for applying Short Wave Infrared(SWIR) spectroscopy to the field survey. Among the three surface state of samples (exposed surface, cutting face and powder), both spectra from the exposed surface and cutting face are almost identical whereas spectral variation was detected in powder sample. Over 24-hours-drying of the wet sample at room temperature, the samples show a similar spectrum with that of dry condition. The result suggests that outcrop samples might be dried for 24 ~ 48 hours depending on the wetness of outcrop. The bright minerals could produce stable spectra with 10 times measurements as default value of the device under SWIR spectroscopy but the dark minerals would require about 10 seconds, which corresponds to 100 times measurements to get the reliable spectra. The position and shape 2,160 ~ 2,330 nm and/or other spectral features of hydrothermal alteration minerals by SWIR spectroscopy could be used for a classification of hydrothermal alteration zone in the field. Absorption peaks in 2,160 ~ 2180 nm are useful for identifying (advanced) argillic zone by spectral characteristics of kaoline, dickite, pyrophyllite, and alunite. Absorption peaks in 2,180 ~ 2,230 nm are able to define muscovite, sericite, and smectite, which are key alteration minerals in phyllic zone. Absorption peaks in 2,230 ~ 2,270 nm can be used to recognize prophylic zone where chlorite and epidote occur. Absorption peaks of other principle minerals such as talc, serpentine, amphibole, and carbonate group are mainly detected within the wave length of 2,270 ~ 2,330 nm. This result indicates that the spectra of these minerals need to be carefully interpreted.

Key words : short wave infrared (SWIR), hydrothermal alteration zone, mineral identification, surface state effect, moisture effect

단파장적외선 분광분석법을 현장에 적용하여 일정한 스펙트럼을 획득할 수 있는 시료의 표면상태, 수분함유 정도 및 분석조건에 대하여 검토하였다. 자연면, 절단면, 분말의 표면상태 중 자연면과 절단면은 거의 유사한 스펙트럼이 획득되었으며, 분말상태의 시료에서는 스펙트럼의 변화가 인지된다. 수분이 함유된 시료는 24시간 이상 상온 건조 후 측정 시 일정한 스펙트럼을 얻을 수 있으므로, 현장에서의 여건에 따라 24 ~ 48시간의 건조시간이 필요할 것이다. 밝은 색 광물의 경우 기기의 기본 값인 10회 반복측정으로도 안정적인 스펙트럼의 획득이 가능하였으나, 어두운 색의 광물은 100회에 해당하는 10초 정도의 분석시간이 필요할 것으로 판단된다. 열수변질대 탐사 시, 2,160 ~ 2,330 nm

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 original work is properly cited.

*Corresponding author: cskim72@korea.ac.kr

영역에서의 흡수피크 위치 및 형태를 기준으로, 그 외의 스펙트럼 특징들을 이용하면 대략적인 열수변질대 분대가 현장에서 가능할 것으로 판단된다. 2,160 ~ 2,180 nm는 고령석, 디카이트, 엽납석 및 명반석에 의해 (고)점토대 ((advanced) argillic zone)로, 2,180 ~ 2,230 nm의 흡수피크는 백운모, 견운모 및 스�멕타이트에 의해 견운모대 (phyllitic zone), 2,230 ~ 2,270 nm 영역의 흡수피크는 녹니석 및 녹엽석에 의해 프로필리틱대 (prophyllitic zone)로 구분 가능하다. 2,270 ~ 2,330 nm 영역에서는 명반석, 활석, 사문석, 각섬석, 탄산염광물 등 다양한 광물의 흡수피크가 나타나므로, 보다 더 세밀한 스펙트럼 해석이 요구된다.

주요어 : 단파장적외선, 열수변질대, 광물동정, 표면상태효과, 수분효과

1. 서 언

단파장적외선(short wave infrared; SWIR)은 일반적으로 1,400 ~ 3,000 nm의 파장영역으로 정의되고 있으나, 연구 분야에 따라 파장 영역에 있어 다소 차이를 보인다. 자원탐사 분야에서는 주로 파장 1,300 ~ 2,500 nm 사이의 파장대를 이용한다. 본 영역은 주로 규산염광물에서의 Al-OH, Mg-OH, Fe-OH 결합 및 H₂O, CO₂, SO₄ 등 각종 작용기에 의한 전자기파의 흡수현상이 양호하게 나타나는 영역이다(AusSpec International Ltd., 2008). 일반적으로 분자진동에 의한 적외선의 흡수는 중적외선 영역에서 발생하며, 이들의 배수진동 및 결합진동이 단파장적외선 영역에 해당한다. 과거에는 단파장적외선의 짧은 파장범위 및 복잡한 흡수피크의 형성기작과 함께, 수분 흡수피크에 의한 광물 흡수피크의 상쇄와 기기 분해능의 부족 등 여러 가지 원인으로 인해 현장적용에 다소 어려움이 있었으나, 1990년대 이후 자체광원을 사용하는 휴대용 기기의 발달에 따라 광물자원 탐사에 상당히 적극적으로 적용되고 있다(Herrmann *et al.*, 2001; Keshava, 2003; Kuosmanen *et al.*, 2005; Dilles, 2012; Harraden *et al.*, 2013; Swayze *et al.*, 2014). 특히, 천열수 광상과 반암형 광상에서는 다양한 변질대가 넓게 분포하고 있어, 변질광물상에 의한 변질대 공간적 분포특성에 적용하여 광체의 중심부를 추정하는 중요한 탐사 기법으로 활용하고 있다(Halley *et al.*, 2015).

또한, 최근 SWIR 분석기술 및 분석기기의 발달은 광물 동정뿐만 아니라 함유규산염광물의 고용체 조성 차이에서 기인한 스펙트럼의 미세한 변화까지도 연구의 대상이 되고 있다(Zaini *et al.*, 2012). 국내에서는 2000년대 초반 기기의 도입과 함께 분석원리 및 적용 가능성에 대하여 보고된 바 있으나(Pak *et al.*, 2001; Song *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2002), 해석기술 및 실제 현장에 적용한 사례는 일부 광산에 국한되었다. 최근 분석 해상도가 향상되고 분석영역을 가시-근적외

선까지 확대한 분석기기가 보급됨에 따라 스펙트럼 분석, 분석 알고리즘의 해석 및 현장적용을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다(Jeong *et al.*, 2014, 2016; Kim *et al.*, 2015; Ko *et al.*, 2015).

이와 같은 연구의 일환으로 본 연구에서는 최근 보급되고 있는 ASD 사의 TerraSpec 4 Hi-Res Mineral Analyser를 이용하여 다양한 현장조건 변화에 따라 얻어지는 스펙트럼의 변화를 예측하고 이를 제거함으로써 일정한 스펙트럼의 획득을 도모하고자 한다. 일정한 스펙트럼의 획득은 스펙트럼 분석을 통한 정량분석 실용화에 매우 중요한 요소로 작용할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 주요 변질광물의 흡수스펙트럼 특성을 이용하여 현장에서 1차적으로 변질광물상 및 이에 따른 변질대를 구분하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 주요 변질광물의 단파장적외선 분광스펙트럼 특성

주요 열수변질대 분대의 기준이 되는 대표 변질광물들 중 단파장적외선에 반응하는 광물들은 고령석, 디카이트(dickite), 엽납석(pyrophyllite), 일라이트(illite), 녹니석, 녹엽석, 각섬석류, 스�멕타이트류, 운모류 등의 규산염광물과 석고, 명반석(alunite)류 등의 황산염광물, 그리고, 방해석, 백운석 등의 탄산염광물로 대표된다. 단파장적외선 분광분석을 통해 상기 광물들을 구분하기 위해서는 먼저 각 광물들의 스펙트럼 특성을 이해해야 한다. 또한, 일부 점토류 및 고용체관계의 광물들은 성분 및 구조(특히, 결정도) 변화에 따라 스펙트럼이 다소 변화할 수 있어, 국내에서 산출하는 광물들의 스펙트럼을 파악하기 위해 총 17개 지역 열수변질대에서 22개의 시료를 채취하여 분석 후 해외 자료들과 비교분석 하였다. 다만, 순수한 고령석과 스�멕타이트 광물은 국내에서 확보 불가능하여, 기존의 표준시료(고령석: KGa-1, KGa-2; 스�멕타이트: 미국 루이지애나주, 일본 야마가타현)를 사용하였다. 전라남도 해남지역을

중심으로 국내에서 산출된다고 알려진 고령석은 모두 열수기원의 디카이트에 해당한다. 참고적으로 국내에서 산출하는 할로이사이트(halloysite)를 함께 비교하였다.

2.1. 규산염광물

고령석군(kaolin group): 고령석군은 2팔면체형 1:1 층상규산염광물이며, 구조에 따라 고령석(kaolinite), 할로이사이트(halloysite), 디카이트(dickite), 나크라이트(nacrite)로 구분된다. 이들은 전반적으로 유사한 형태의 단파장적외선 스펙트럼을 갖고 있으나, 각각의 흡수피크 위치 및 형태에서 차이점이 발견된다. 고령석과 할로이사이트, 디카이트와 나크라이트가 서로 유사한 흡수피크의 위치를 갖고 있으며, 이들 중 고령석과 디카이트의 스펙트럼을 제시하였다(Fig. 1). 4 광물 모두 1,400 nm와 2,200 nm 부근에서 2중의 흡수피크(숄더 포함)를 보이며, 이 중 짧은 파장 쪽의 흡수피크 위치에 따라 구분이 가능하다(Cudahy, 1997). 특히, 2,200 nm 부근의 흡수피크에서 확인한 차이를 보이는데, 고령석과 할로이사이트는 2,160 nm 부근(2,167 nm)에, 디카이트와 나크라이트는 2,180 nm 부근(2,180 nm)에 흡수피크가 위치한다(Cudahy, 1997).

실험에 사용된 고령석군의 모든 광물에서 1,415 nm와 2,207 nm의 흡수피크가 확인되며, 고령석과 할로이사이트는 1,395 nm와 2,165 nm에서, 디카이트는 1,382 nm와 2,180 nm에서 두 번째 흡수피크가 나타나는 결과를 얻었다. 고령석과 할로이사이트는 흡수피크의 위치가 매우 유사하기 때문에 피크의 형태를 이용하여 구분해야 한다. 고령석은 결정도에 따라 높은 결정도를 갖는 경우 2,165 nm 부근의 흡수피크가 명확하게 나타나는 반면, 결정도가 낮은 경우 피크의 형태가 불명확해지는 경향을 보인다(Cudahy, 1997). 할로이사이트는 완전히 피크의 형태를 잃어버리고 숄더의 형태로 변화하게 된다. 이와 같은 현상은 1,400 nm 부근의 흡수피크에서도 인지할 수 있으나, 2,200 nm 부근의 흡수피크 형태 변화와 비교하여, 비대칭적 변화양상을 보인다.

엽납석(pyrophyllite): 엽납석은 2:1구조를 갖는 규산염광물 중 2팔면체의 대표적인 광물이다. 엽납석은 다른 변질광물에 비하여 상대적으로 고온 조건에서 안정된 광물이며, 일반적으로 높은 결정도와 비교적 단순한 조성 특징을 갖는다. 따라서 흡수피크가 상당히 좁고 깊은 특징을 보인다(Fig. 1). 측정된 엽납석의 단파장적외선 스펙트럼은 1,394 nm, 2,167 nm, 2,320 nm의 깊은 흡수피크와 함께 2,066 nm, 2,080 nm의 2중 흡수피

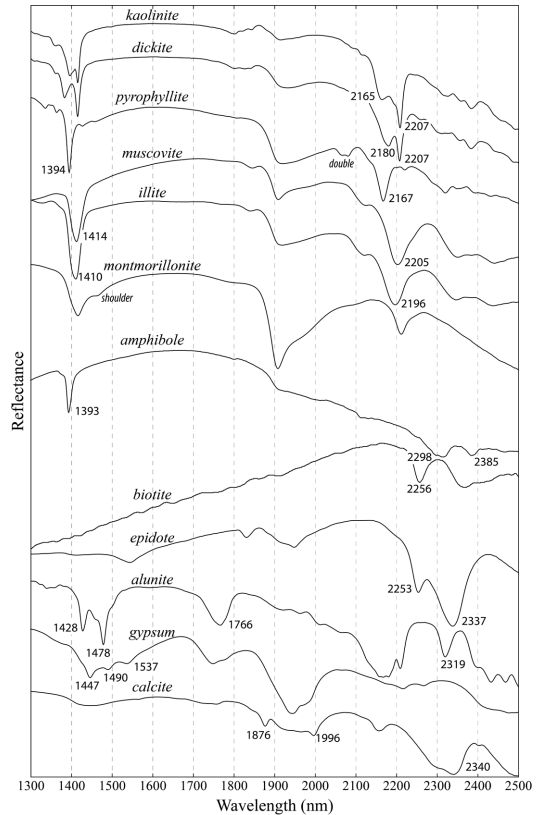


Fig. 1. Short wave infrared (SWIR) reflectance spectra for representative alteration minerals.

크가 특징적이다. 2,320 nm의 흡수피크는 짧은 파장 쪽에 숄더 형태가 나타나 비대칭적인 형상을 보인다.

운모군(mica group): 백운모, 일라이트(견운모), 흑운모가 대표적이다. 이 중 백운모와 일라이트(견운모)는 단파장적외선 영역에서 구분이 불가능하기 때문에 동일 유형으로 간주하여 백운모류(white mica)로 언급하기로 한다. 백운모류는 1,410 nm 부근과 2,180 ~ 2,228 nm의 단일 흡수피크가 특징적이며, 그 외에 2,114 nm, 2,342 nm, 2,435 nm에서 소규모의 흡수피크가 관찰된다(AusSpec International Ltd., 2008). 또한, 1,900 nm의 수분에 의한 흡수피크가 관찰되는데, 이 흡수피크의 크기를 이용하여 백운모와 일라이트를 구분할 수 있는 것으로 보고되기도 하나(AusSpec International Ltd., 2008), 수분 함유 정도는 다양할 수 있으므로 명확한 구분의 근거는 아닌 것으로 판단된다. 국내 철원지역의 백운모는 1,414 nm와 2,205 nm의 주 흡수피크와 함께, 2,119 nm, 2,348 nm, 2,436 nm에서 흡수피크가 인지된다. 일라이트는 산출지에 따라 다

소간 상이한 흡수피크 위치를 갖는다. 보배광산 일라이트는 1,410 nm와 2,196 nm에서, 봉화지역 일라이트는 1,411 nm와 2,201 nm에서, 김해광산 일라이트는 1,414 nm와 2,206 nm에서 양양광산의 일라이트는 1,414 nm, 2,209 nm에서 주 흡수피크가 관찰된다.

흑운모는 검은 색을 띠고 있어 단파장적외선에 대한 반사도가 불량하다. 흑운모 내 Fe와 Mg 성분에 의해 2,256 nm와 2,350 ~ 2,360 nm의 흡수피크가 나타나지만, 상대적으로 2,350 ~ 2,360 nm의 흡수피크는 형태적으로 명확하지 않다. 일반적으로 흑운모는 VNIR 영역과 함께 확인이 가능하다(AusSpec International Ltd., 2008).

스멕타이트(smectite): 대표적 광물인 몬모릴로나이트(montmorillonite)는 Na-유형과 Ca-유형으로 구분되며, 전반적으로 백운모류와 유사한 스펙트럼 특성을 보이고 있으나, 수분에 의한 1,900 nm 부근의 흡수피크가 상대적으로 크고, 피크들의 폭이 넓은 특징을 갖는다. 또한, 백운모와 일라이트에서 존재하는 2,345 nm와 2,435 nm의 흡수피크가 나타나지 않는 특징을 보인다. Na-몬모릴로나이트에 비하여 Ca-몬모릴로나이트의 흡수피크가 장파장 쪽으로 약 3 ~ 5 nm 이동하는 양상을 보인다. 운모류에서는 Na가 K를 치환할수록 흡수피크의 파장이 짧아지는 특징을 보이는 것으로 알려져 있으나(Scott and Yang, 2008), 몬모릴로나이트는 다양한 형태의 조성변화가 가능하므로, 여러 가지 가능성을 검토할 필요가 있다고 사료된다.

각섬석(amphibole): Mg 끝성분인 투각섬석을 사용하였으며, 충청남도 광천광산과 춘천 옥 광산에서 채취하였다. 춘천 옥은 주로 미립 투각섬석으로 구성되며, FeO 함량이 대부분 0.5 wt. %이하로서 거의 순수한 조성(#Mg>0.99)을 보인다(Noh and Cho, 1993; Noh *et al.*, 1995). 투각섬석은 1,393 nm, 2,315 nm, 2,385 nm 등 대부분의 흡수피크 위치가 활석과 오차범위 내에서 유사하므로, 2,298 nm의 흡수피크를 이용하여 구분한다.

녹염석(epidote): 강원도 정선의 거도광산과 충청북도 충주의 충주광산에서 채취하였다. Fe-OH의 2,253 nm 일차 흡수피크와 Al-OH의 2,337 nm 이차 흡수피크로부터 동정이 가능하며, 1,545 nm와 1,831 nm의 흡수피크가 특징적이다.

2.2. 황산염광물

명반석(alunite): 천연수 광상의 고점토 변질대(advanced argillic alteration zone)의 매우 중요한 지시 광물로, 이들의 분포와 성분은 열수조건의 위치와

강도를 반영한다(Hedenquist *et al.*, 2000, Deyell and Dipple, 2005). 또한 세립의 명반석은 퇴적환경 또는 낮은 온도조건에서도 형성되기는 하지만, 대부분의 명반석 맥은 열수환경에서 형성된다(Bishop and Murad, 2005). 국내 명반석 산출지는 전라남도도와 경상남도도의 극히 일부지역에 국한되어 있으며, 총 12개의 산출지가 보고된다(Cho and Moon, 1978). 명반석은 해남의 성산광산과 진도의 가사도 광산에서 채취된 시료를 사용하였으며, 이 중 가사도 광산에서 채취된 명반석 시료는 분말 상태로 측정하였다.

명반석은 일반적으로 OH의 배수 진동(overtone vibration)에 의하여 1,430 nm와 1,480 nm 부근에서 약 50 nm 간격의 2중 흡수피크를 나타내는 특징을 보이며, Al-OH의 결합진동(combination vibration)에 의하여 약 1,760 nm와 2,160 nm에서 넓은 폭의 흡수피크와 2,324 nm에서 대칭적인 흡수피크가 나타난다(AusSpec International Ltd., 2008, Swayze *et al.*, 2014). 철명반석(jarosite)은 철에 의한 영향이 스펙트럼에 반영되는 반면, 명반석의 흡수스펙트럼은 황산염, 수산기, 금속-산소 결합 및 격자의 진동에 의한 영향만이 반영된다(Bishop and Murad, 2005). 또한, 명반석은 K에 대하여 Na함량이 증가함에 따라 흡수피크의 파장이 긴 쪽으로 이동하는 경향을 보이며, 1,480 nm 부근의 흡수피크 위치와 Na 함량과는 1,477 ~ 1,496 nm 사이에서 선형의 상관관계가 있는 것으로 보고된 바 있다(Swayze *et al.*, 2014).

국내 광산에서 채취된 명반석의 스펙트럼은 이와 매우 유사한 양상을 보이는데, 1,428 nm와 1,478 nm의 2중 흡수피크 및 1,766 nm, 2,319 nm의 흡수피크가 뚜렷이 관찰된다(Fig. 1). 가사도 광산 명반석은 Na 함량이 거의 없는 순수한 K-명반석으로(Kim *et al.*, 2002), 1,478 nm의 흡수피크 위치는 기존에 보고된 K-명반석의 흡수피크 위치와 잘 일치하는 결과이다. 또한, 성산광산 명반석의 흡수파장 위치가 옥출광산의 명반석과 동일한 위치로 확인되었으며, 성산광산의 명반석은 K-명반석으로 해석된다.

석고(gypsum): 경석고(anhydrite)와 석고는 주로 증발환경에서 생성되는 광물이지만, 천연수/산암형 광상에서 자주 발견되는 부수광물이다. 경석고는 단파장적외선 영역에서 특징적인 흡수패턴이 나타나지 않는 반면(Bishop *et al.*, 2014), 석고는 특징적인 형태의 스펙트럼을 갖고 있으므로, 석고에 대한 스펙트럼을 제시하고자 한다. 본 연구에서는 캐나다 럭키마이크광상(Lucky Mike Prospect)의 시추탐사를 통하여 얻어진

결정질 석고와 중국 스카른 철광에서 얻은 결정질 석고를 대상으로 측정하였다. 채취된 시료는 투명한 결정 형태를 갖고 있어 결정상에서는 반사광을 이용하는 TerraSpec에서 스펙트럼 획득에 어려움이 있어 분말로 파쇄 후 스펙트럼을 획득하였다. 석고의 스펙트럼은 1,500 nm 부근의 3개 흡수피크가 특징적이다(Fig. 1). 이들은 1,449 nm, 1,490 nm, 1,535 nm에서 주로 나타나며, 파장이 증가할수록 흡수피크의 깊이는 감소하는 경향을 보인다(AusSpec International Ltd., 2008). 측정된 시료에서도 동일한 패턴의 흡수피크 형태를 확인할 수 있었으며, 흡수피크의 위치는 1,447 nm, 1,490 nm, 1,537 nm로 첫 번째와 세 번째 흡수피크가 2 nm 가량 차이를 보이지만, 이는 본 기기의 측정 단위가 2 nm임을 감안할 때 동일한 것으로 간주된다. 그 외에 포함된 물에 의한 1,750 nm, 1,944 nm의 넓은 흡수피크가 인지된다.

2.3. 탄산염광물

방해석군의 방해석, 마그네사이트 및 백운석군의 백운석이 포함된다. 방해석은 국내 울산광산과 캐나다 럭키마이크광산에서 채취되었으며, 백운석은 강원도 정선 지역의 충무광산에서, 그리고, 마그네사이트는 북한의 검덕광산에서 채취된 시료를 사용하였다. 탄산염광물은 주로 1,900 nm 부근과 2,300 nm 부근의 두 흡수피크가 특징적이다(Fig. 1). 다만, 1,900 nm 부근의 흡수피크는 2,300 nm 부근의 흡수피크에 비하여 크기가 작고, 그 위치가 수분에 의한 흡수피크와 유사하여 종종 나타나지 않는 경우가 있다. 따라서, 탄산염광물의 존재를 확인하기 위해서는 2,300 nm 부근의 흡수피크를 주로 사용하며, 본 흡수피크는 일반적인 규산염광물과 달리 짧은 파장 쪽에 솔더를 갖는 비대칭적인 형태를 갖고 있어 크기가 작더라도 탄산염광물의 존재를 확인할 수 있다.

방해석, 백운석, 마그네사이트는 전반적으로 유사한 스펙트럼 형태를 보이고 있으나, 광물을 구성하는 양이온인 Ca 성분과 Mg 성분의 상대적 함량 차이에 따라 2,300 nm 부근의 흡수피크 위치 및 형태에서 서로 구분되는 특징을 보인다. Ca 성분으로 구성된 방해석은 2,340 nm에서, Ca와 Mg 성분을 갖고 있는 백운석은 2,320 nm에서, Mg 성분으로 구성된 마그네사이트는 2,299 nm에서 흡수피크가 위치하고 있어, 이들의 흡수피크 위치에 의하여 각 광물의 구분이 가능하다. 이러한 결과는 Kim *et al.* (2016)이 제시한 방해석과 백운석 간의 함량에 따른 흡수피크의 위치 변화와 잘 일

치하고 있다. 탄산염광물을 다량 포함한 암석(석회석 광석 등)은 1,900 nm 부근의 흡수피크 형태를 통하여 광물 조성을 판단할 수 있으며, 방해석은 1,925 nm를 중심으로 1,876 nm와 1,996 nm에서 소규모의 흡수피크가 관찰되는 반면, 백운석과 마그네사이트는 1,938 nm에서 폭 넓은 단일의 흡수피크를 관찰할 수 있다. 이와 같은 흡수피크의 형태 구분은 현장에서 흡수피크의 정확한 위치를 확인하기 어려운 조건에서 사용 가능할 것으로 판단된다.

3. 분석조건에 따른 스펙트럼의 변화

3.1. 표면상태

단파장적외선 분광분석은 대상 시료에 주사된 전자기파에 대하여 파장별로 반사되는 양을 측정하는 분석 방법으로서 시료 표면의 굴곡 정도에 따라 산란현상 등에 의하여 반사되는 파장의 양적 변화가 예상된다. 이러한 시료 표면의 요철상태에 따라 취득된 반사 스펙트럼의 차별성을 확인하기 위하여 표면상태 분석을 수행하였다. 대상 시료는 전라남도 완도지역 노화도광산의 엽납석, 전라남도 해남지역 성산광산의 명반석과 딕카이트, 경상북도 봉화지역의 견운모, 경기도 철원지역에서 채취한 흑운모를 사용하였다. 분석은 자연 상태에서 노출되는 상태와 같은 굴곡진 요철면(exposed surface), 암석절단기의 절단면(cutting face), 그리고 #200 이하의 분말상태(powder)의 3가지 표면 상태를 비교하였으며, 수분의 효과를 제거하기 위하여 48시간 이상 상온 건조 후 분석하였다. 한편, 흑운모는 페그마타이트에서 산출되는 거정의 판상 흑운모를 사용하였으며, 이는 자연 노출면과 절단면이 동일하여 자연 상태 및 분말의 두 조건에서 수행되었다.

자연면에서보다 자른면이, 자른면에서보다 분말상태에서 전체적인 반사도가 높아지는 경향성을 보인다(Fig. 2). 이는 자연 상태의 요철면과 비교하여 절단면에서 산란현상이 감소하여 반사도가 상대적으로 증가한 결과로 해석된다. 특히, 분말 상태에서는 자연면에 비교하여 반사도가 20 ~ 80% 증가하였으며, 이는 분말 상태의 시료에서 상대적으로 색상이 밝아진 결과로 해석된다. 명반석, 엽납석, 곁령석 및 견운모의 조흔색은 모두 백색으로 전반적으로 90% 정도의 반사도를 보이며, 흑운모의 조흔색은 암회색으로 40%의 반사도를 갖는다. 이와 같은 결과는 탄산염광물인 석회석과 백운석에서도 인지되는데, 500 μm 에서 45 μm 까지 단계적으로 입도 분석한 결과, 입자 크기가 작아질수록

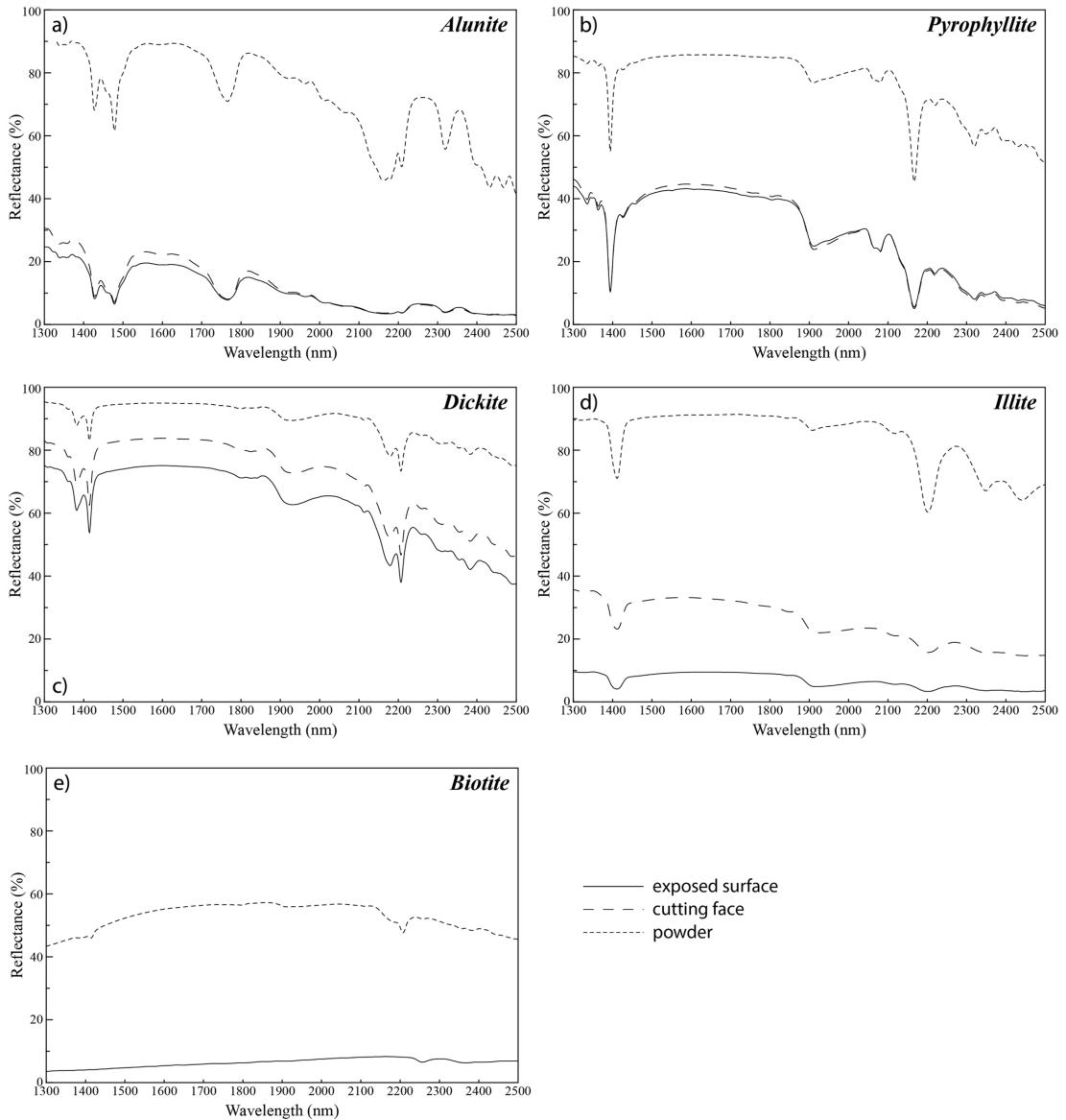


Fig. 2. SWIR reflectance spectra based on the surface states of alunite (a), pyrophyllite (b), dickite (c), illite (d), and biotite (e).

반사도가 증가하는 경향을 보인다(Zaini *et al.*, 2012).

딕카이트에서는 분말상태의 흡수피크 깊이가 암석 상태와 비교하여 상대적으로 작아지는 반면(Fig. 2c), 이외의 모든 광물(명반석, 엽납석, 일라이트, 흑운모)에서 암석상태에서보다 분말상태의 흡수피크 깊이가 증가하는 현상이 나타난다(Fig. 2a,b,d,e). 입도에 따른 흡수 피크의 깊이(강도)는 일반적으로 암석 상태에서보다 분말 입자 상태에서, 그리고 250 μm 이하의 분말시료에서는 입자의 크기가 작아질수록 흡수피크의 깊이는

감소하는 것으로 보고되어 있으며, 이는 입자 사이에서의 산란에 의하여 적외선의 투과 깊이가 작아지는 영향으로 해석된다(AusSpec International Ltd., 2008, Zaini *et al.*, 2008). 즉, 딕카이트에서 관찰되는 분말시료에서의 흡수피크의 크기 감소 현상이 일반적인 경우이며, 이외의 광물에서 나타나는 크기 증가는 다른 요인에 의한 현상으로 해석할 필요가 있다. 일라이트에서 약 10%의 최대 반사도를 보이는 자연면 상태에서 보다 약 37%의 최대 반사도를 갖는 자연면 상태에서 흡

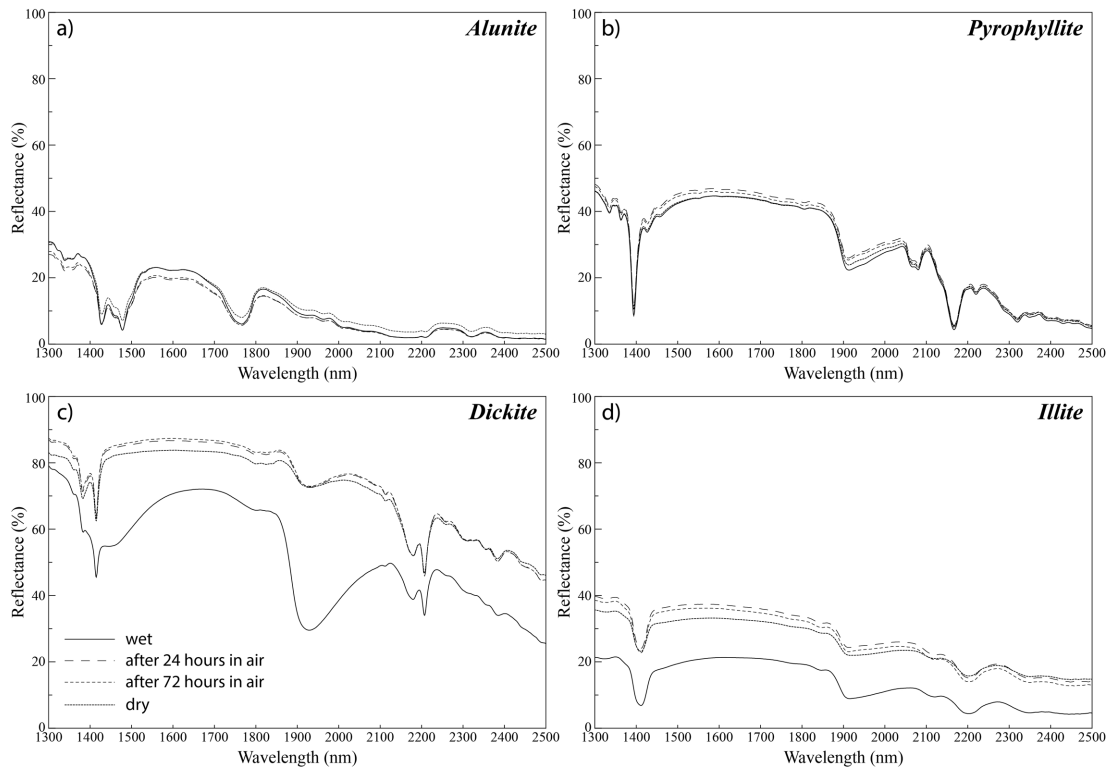


Fig. 3. SWIR reflectance spectra based on the water content of alunite (a), pyrophyllite (b), dickite (c), and illite (d).

수피크가 현저히 증가하는 양상이 관찰되며(Fig. 2d), 이로부터 전체적인 반사도가 매우 낮은 경우, 전체 반사도가 감소함에 따라 흡수피크의 크기도 함께 감소하는 것으로 해석이 가능할 것으로 판단된다. 유사한 결과가 명반석과 엽납석에서도 관찰되는데, 1,400 nm 부근의 흡수피크는 약 65%의 차이(자연면:분말=25%:90%)를 보이는 명반석에 비해 약 40%의 차이(자연면:분말=45%:85%)를 보이는 엽납석의 흡수피크 크기 차이가 현저히 줄어드는 결과를 보인다. 따라서, 디카이트를 제외한 명반석, 엽납석, 일라이트, 흑운모의 스펙트럼에서 암석상태에 비해 분말상태의 흡수피크 크기가 증가하는 것은 암석상태에서의 전반적인 반사도가 매우 낮은 결과로 해석된다.

3.2. 수분함유

앞서 언급한 바와 같이 단파장적외선 영역인 1,300 ~ 2,500 nm의 파장대에서 인지되는 흡수피크는 주로 수분(H₂O) 및 광물 내에서 수산기(OH)와 양이온 사이의 결합 구조에 기인한다. 따라서 흡착수, 결정수 등 시료에 포함된 수분은 스펙트럼에 상당한 영향을 끼친

다. 1,400 nm와 1,900 nm 부근에서 나타나는 수분에 의한 흡수피크는 결정구조상 팔면체에 위치한 수산기와 양이온에 의한 흡수피크에 비하여 넓고 비대칭적이기 때문에 대상 광물의 특성피크를 상쇄시키는 결과로 나타난다(AusSpec International Ltd., 2008). 이와 같이 광물에 포함된 수분에 의한 영향을 파악하기 위하여 수분함량에 따른 스펙트럼의 변화 상태를 다양한 조건에서 측정하였다. 실험에 사용된 광물은 표면 상태에 따른 SWIR 스펙트럼의 변화 분석에서 사용된 다섯 광물 중, 흑운모를 제외한 명반석, 엽납석, 디카이트, 견운모의 4 종이며, 자연면을 대상으로 하였다. 실험은 먼저 마른 상태에서 측정 후, 시료를 약 30분간 물에 담가두었다가 꺼낸 뒤 바로 측정(젖은 상태)하였으며, 이후 24시간 및 72시간 상온 건조 후 측정 등 4 단계로 진행하였다. 바로 측정 시에는 표면에 묻어 있는 물의 영향을 제거하기 위하여 표면을 마른 티슈로 닦아 표면의 물기만 제거한 후 측정하였다.

상기 4 종의 광물 중 명반석과 엽납석은 젖은 상태와 마른 상태에서 스펙트럼의 변화가 거의 미미하였으나, 고령석과 견운모는 상당한 차이가 인지된다(Fig. 3). 고

령석과 견운모의 전체적인 반사도가 마른 상태보다 젖은 상태에서 약 10% 내외로 저하되고 있으며, 이는 시료에 포함된 물에 의한 산란현상으로 해석할 수 있다. 이는 젖은 상태와 마른 상태에서 1,900 nm 부근의 물 흡수피크가 명반석 및 엽납석에서는 거의 변화가 없는 반면, 고령석 및 견운모에서는 확연한 변화를 보이고 있는 것으로부터 확인할 수 있다. 고령석의 스펙트럼은 젖은 상태 측정 결과 1,400 nm와 1,900 nm에서 넓은 수분(H₂O) 흡수피크가 확연하게 인지되고 있으며, 이들 물 흡수피크에 의하여 고령석의 고유 피크의 형태를 알아볼 수 없을 정도로 스펙트럼의 변화가 야기된다(Fig. 3c).

3.3. 반복측정

대부분의 분석 방법들이 분석 시간을 조절할 수 있는 기능을 보유하고 있는 것과 유사하게 단파장적외선 분광분석기는 측정의 횟수를 조절하여 스펙트럼의 신호대잡음비(signal noise ratio; SNR)를 조절하도록 하고 있다. 실험에 사용된 TerraSpec 4 Hi-Res Mineral Analyser는 1회 측정 소요시간이 0.1초이며, 기본적으로

로 10회 측정치의 평균값을 사용하도록 하고 있다. 실험은 밝은 색의 고령석과 어두운 색의 흑운모를 대상으로 하였으며, 측정 횟수를 증가시켜가면서 얻어지는 스펙트럼의 변화양상을 비교하였다. 고령석은 4회 측정 이후, 흑운모는 100회 측정 이후 일정한 스펙트럼을 얻을 수 있었다(Fig. 4). 따라서, 흑운모 등의 어두운 광물을 측정할 경우 반복측정 횟수의 조정이 필요할 것이다.

4. 단파장적외선 스펙트럼을 이용한 광물 판별

단파장적외선에서 구분 가능한 광물은 주로 점토/운모/각섬석류를 포함하는 함수규산염광물이며, 그 외에 황산염 및 탄산염 광물 등이 포함된다. 특히, 고령석군, 엽납석, 견운모, 명반석, 녹니석, 녹염석 등 열수변질대의 특징적인 변질광물은 대부분 수산기(OH)를 포함하고 있어 2,160 ~ 2,330 nm 영역에서 주 흡수피크가 나타나며, 광종에 따라 흡수피크의 위치가 세분되는 특징을 보인다(Fig. 5). AusSpec International Ltd. (2008)는 이 파장대를 6개 영역으로 세분하였으며, 각 광물

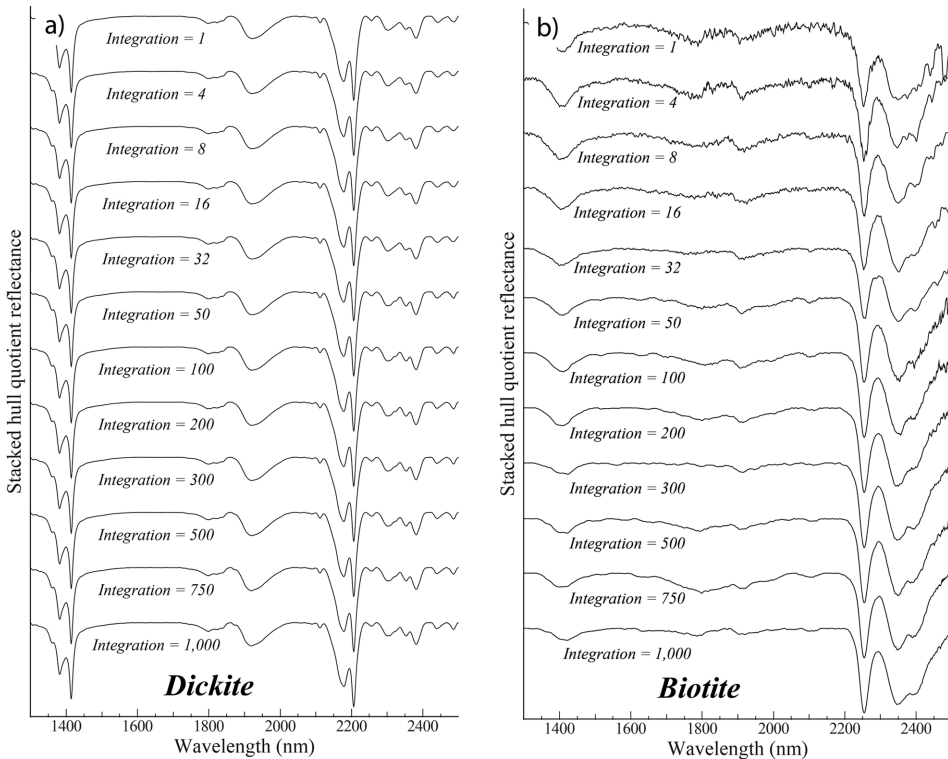


Fig. 4. Stacked SWIR reflectance spectra by integration of dickite (a), and biotite (b).

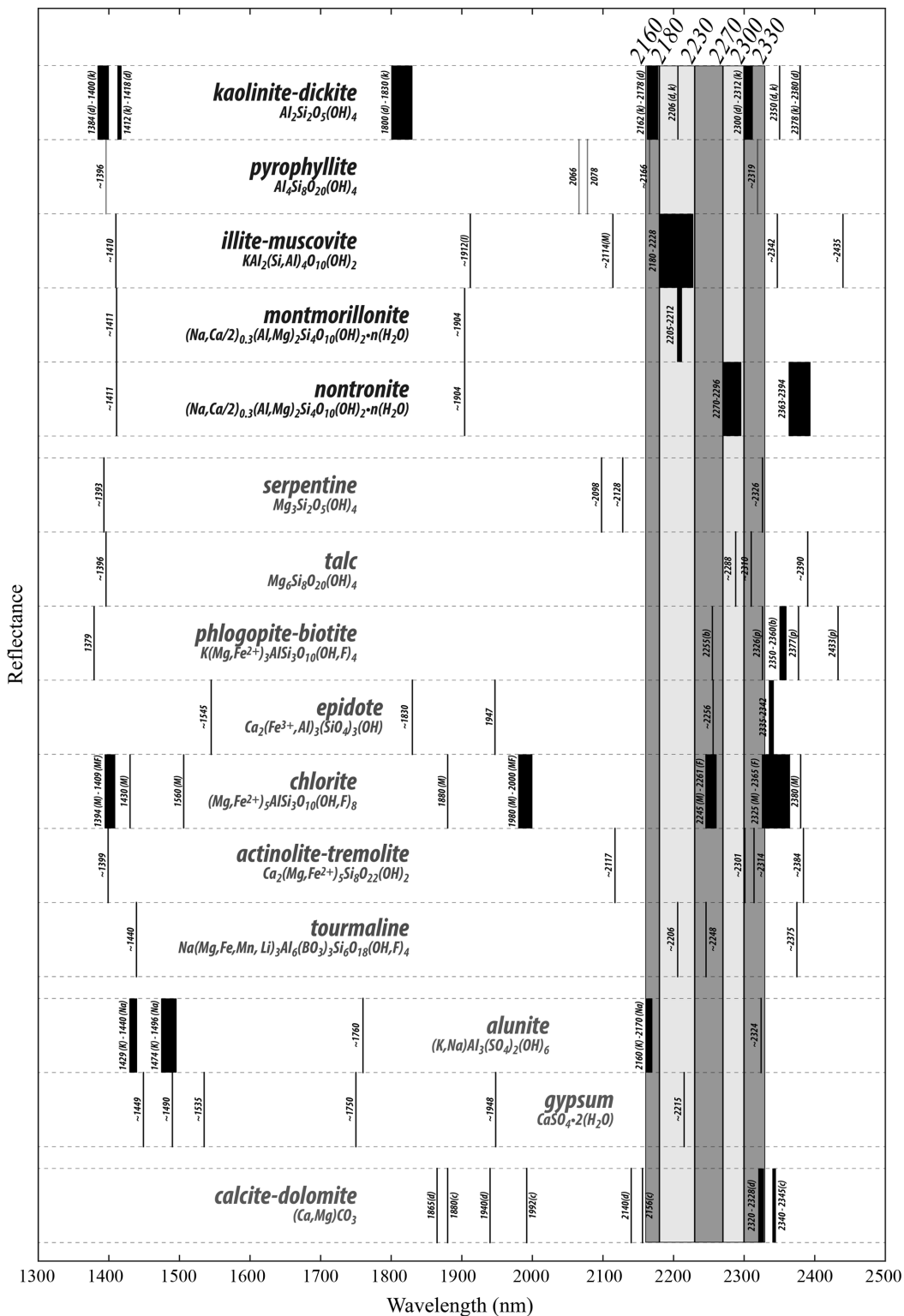


Fig. 5. Locations of the major absorption peaks in representative alteration minerals and the ranges of the each spectral group.

의 최대 피크가 나타나는 파장만을 이용하여 그룹화 하였으며, 이들로부터 개별 스펙트럼과 비교하여 광물의 인지가 가능하도록 한 바 있다. 본 연구에서는 흡수피크의 위치를 2,160 ~ 2,180 nm, 2,180 ~ 2,230 nm, 2,230 ~ 2,270 nm, 2,270 ~ 2,300 nm, 2,300 ~ 2,330 nm의 5 영역으로 세분하였으며, 최대 흡수피크의 위치만이 아니라 형태를 조합함으로써 야외 현장에서 주요 광물 및 개략적인 변질대의 구분이 가능한 방법을 제시한다(Fig. 6). 시료는 48시간 이상 상온 건조

하여 수분의 효과를 제거하였으며, 분석 위치는 깨진 면 중에서 되도록 평평한 부분을 선택하였다.

4.1. 2,160 ~ 2,180 nm

명반석, 엽납석, 고령석군이 주로 이 영역에서 반응한다. 따라서 이 영역에 흡수피크가 존재할 경우 점토-고점토 변질대로 인지된다. 명반석은 2,170 nm를 중심으로 전 영역에 걸친 넓고 둥근 형태의 흡수피크가 특징적이다. 2,210 nm에 작은 흡수피크를 수반하기도 한

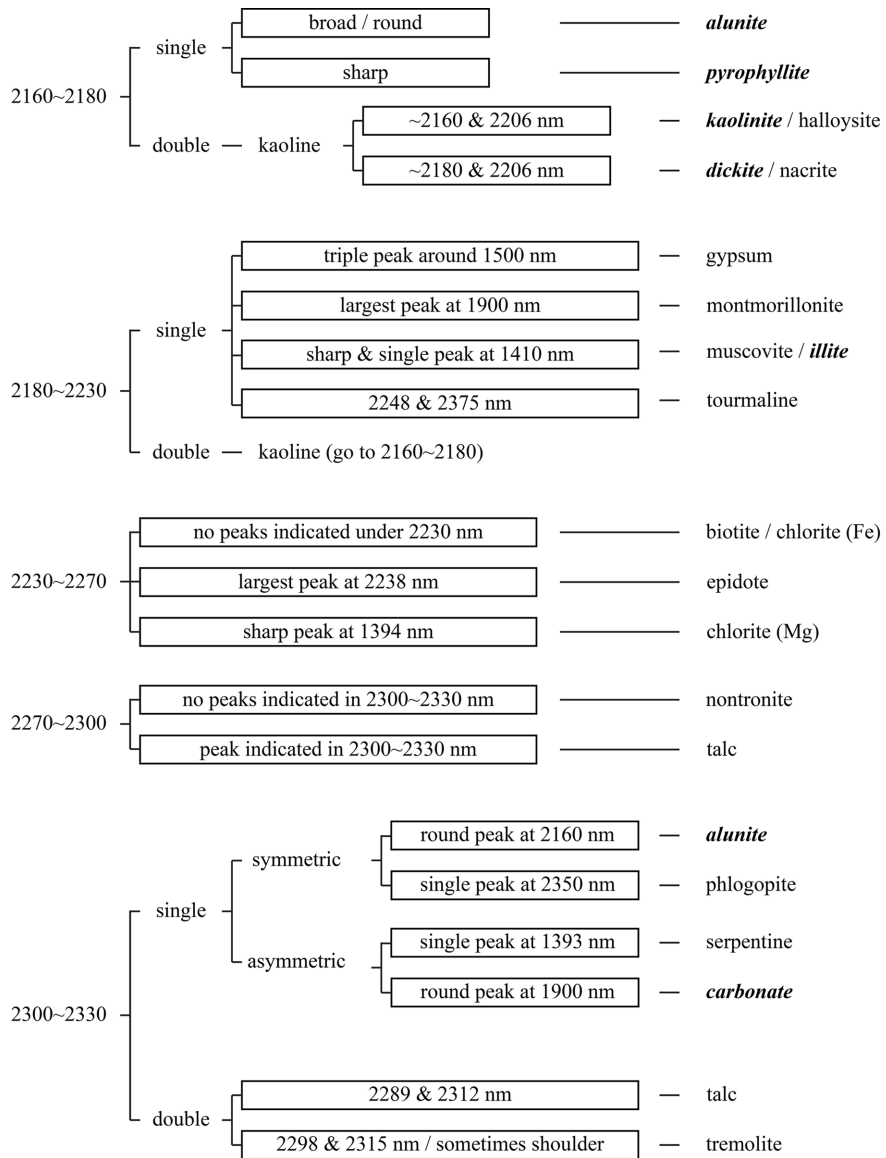


Fig. 6. Mineral identification chart on the basis of shapes and absorption peaks of SWIR spectra.

다. 이와 함께, 1,478 nm의 2중 흡수피크와 2,319 nm의 대칭적인 흡수피크를 이용하여 명반석의 존재를 확인할 수 있다. 엽납석은 2,166 nm에서의 날카로운 단일피크가 특징적이다. 1,394 nm에서도 유사한 형태의 흡수피크가 관찰되며, 2,319 nm의 흡수피크는 단파장 쪽에 솔더를 수반하는 비대칭적 형태를 갖는다. 시료 내 엽납석 함유 비율이 높은 경우 2,066 nm와 2,080 nm이 2중 흡수피크를 관찰할 수 있다. 고령석군은 2,160 ~ 2,180 nm 사이와 2,206 nm / 1,382 ~ 1,395 nm와 1,415 nm의 두 개의 2중 흡수피크가 특징적이다. 장파장 쪽의 2,206 nm, 1,415 nm는 고정된 반면, 단파장 쪽의 피크는 고령석, 할로이사이트는 2,160 nm, 1,395 nm에서, 디카이트, 나크라이트는 2,180 nm, 1,382 nm에 흡수피크가 위치하여 광물에 따라 차이를 보인다.

4.2. 2,180 ~ 2,230 nm

주로 2팔면체 광물에 해당하는 백운모, 일라이트, 몰모틸로나이트와 전기석, 석고, 고령석군이 포함된다. 고령석군은 2,160 ~ 2,180 nm에서도 흡수피크가 나타나므로, 본 영역에서만 흡수피크가 인지되는 경우 견운모 변질대를 의미하는 것으로 해석할 수 있다. 백운모/일라이트는 성분이 동일하여 단파장적외선에서 구분할 수 없다. 2,180 ~ 2,228 nm 사이에서 대칭적인 단일 흡수피크가 특징적이며, 이와 유사한 크기의 날카로운 흡수피크가 1,410 nm를 중심으로 확인된다. 1,900 nm의 흡수피크는 크기가 다양하지만, 앞선 2개의 흡수피크보다 작다. 몬모틸로나이트는 전반적으로 백운모/일라이트와 유사한 흡수피크의 위치를 갖고 있으나, 다른 흡수피크에 비해 흡수피크의 크기가 매우 큰 특징을 갖는다. 또한, 2,347 nm, 2,437 nm의 소규모 흡수피크의 크기가 현저히 줄어든다. 전기석은 2,203 nm, 2,248 nm, 2,304 nm, 2,375 nm의 연속된 4개 흡수피크에 의해 구분된다. 양이 적을 때에는 2,304 nm의 흡수피크는 나타나지 않을 수도 있다. 석고는 황산염광물로, 여타의 규산염광물과는 확연히 구분되는 스펙트럼 특성을 보인다. 2,216 nm를 중심으로 양쪽에 작은 피크 또는 솔더를 갖는다. 1,500 nm 부근의 3개의 연속된 흡수피크가 특징적이며, 이들 중 가장 짧은 파장위치의 흡수피크가 가장 크고, 파장이 길어질수록 크기가 줄어든다. 고령석군은 2,160 ~ 2,180 nm 사이의 흡수피크와 함께 2중 흡수피크로 쉽게 구분된다.

4.3. 2,230 ~ 2,270 nm

3팔면체 광물이 반응하는 영역에 해당한다. 모두 어

두운색 광물로 명확한 흡수피크의 구분은 쉽지 않다. 본 영역에서 반응하는 광물은 흑운모, 녹니석, 녹립석이 해당하므로, 프로필리티크 변질대로 해석될 수 있다. 흑운모는 전반적으로 흡수피크의 크기가 작아 단파장적외선 영역에서 존재여부를 판단하기 어려우므로, 가시-근적외선(visible-near infrared: VNIR)영역에서의 스펙트럼을 함께 고려해야 한다. 녹니석은 Fe-녹니석과 Mg-녹니석이 각각 다른 스펙트럼 특성을 보인다. Fe-녹니석은 2,261 nm와 2,360 nm의 2중 흡수피크가 나타나며, 그 외에 뚜렷한 흡수피크는 인지되지 않는다. Mg-녹니석은 1,394 nm, 2,245 nm, 2,325 nm에서의 상대적으로 다양한 흡수피크가 인지된다. 1,394 nm의 날카로운 흡수피크가 특징적이다. 녹립석은 본 영역에서의 흡수피크와 함께 2,338 nm 부근에서의 넓은 흡수피크가 특징적이며, 이 피크의 크기가 가장 크다.

4.4. 2,270 ~ 2,300 nm

논트로나이트와 활석이 주로 반응하는 영역이다. 논트로나이트는 몬모틸로나이트의 이종으로 몬모틸로나이트 구조 내의 알루미늄 이온(Al^{3+})이 철 이온(Fe^{3+})으로 치환된 광물이므로, 2팔면체에 속하지만 본 영역에서 흡수피크가 나타난다. 본 영역에서 흡수피크가 나타나는 광물은 상기 두 광물만이 해당되며, 이 중 2,300 ~ 2,330 nm 영역에서 흡수피크가 나타나는 경우 활석으로, 나타나지 않는 경우는 논트로나이트로 인정된다.

4.5. 2,300 ~ 2,330 nm

본 영역은 Al-OH, Mg-OH, CO_3 등에 의한 다양한 진동에 반응하는 영역이므로 여러 가지 광물의 흡수피크가 포함된다. 해당 광물로 금운모, 사문석, 활석, 투각섬석 등 규산염광물과 함께, 명반석, 탄산염광물들이 포함되는 복잡한 양상을 보인다. 단일 피크와 2중 피크로 나뉘며, 단일피크는 다시 대칭/비대칭으로 구분된다. 단일-대칭피크는 명반석과 금운모이며, 명반석은 2,160 ~ 2,180 nm 영역에서의 흡수피크와 함께 구분된다. 금운모는 2,350 nm의 단일 흡수피크가 특징적이다. 비대칭 흡수피크는 사문석과 탄산염광물이며, 1,393 nm의 흡수피크와 함께 사문석을 구분할 수 있다. 탄산염광물은 1,900 nm의 넓은 흡수피크가 나타나지만, 시료 내 함량비가 낮은 경우 인지하기 힘든 경우도 있으므로 주의해야 한다. 2중 흡수피크는 활석과 투각섬석에 해당하며, 활석은 2,270 ~ 2,300 nm 영역의 흡수피크와 함께 구분된다. 투각섬석은 2,298 nm와 2,315 nm

의 2중 흡수피크가 특징적이며, 때때로 슬더의 형태를 띠기도 한다.

5. 토의 및 결론

단파장적외선은 각종 제품들의 검사, 식별 및 분류, 감시, 위조 방지, 공정 품질 제어 등을 포함한 다양한 용도에 사용되고 있는 전자기파 영역으로, 자원탐사분야에서는 다른 분석법에 비해 비교적 최근에 적용되기 시작한 분야이다. 현재에도 지속적으로 기기의 발전이 진행됨과 함께, 현장적용성 증대를 위한 기초 및 응용 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히, 열수변질광물은 상대적으로 저온의 열수가 다량 포함된 환경에서 형성되므로, 단파장적외선을 적용하는데 매우 적합한 광물들로 알려져 있다. 따라서, 탐사현장에서 이들 열수변질광물들을 간단하고 정확하게 식별하기 위한 스펙트럼 해석 알고리즘에 대한 연구가 지속되고 있다. 이와 같이 수치화된 알고리즘에 적용하여 정성-정량적 분석을 수행하기 위해서는 일정한 조건에의 스펙트럼 획득이 필요하며, 광물로부터의 스펙트럼 이외에 노이즈를 최소화할 필요가 있다.

단파장적외선은 수분에 매우 민감하기 때문에, 과거 태양광을 이용했을 때에는 습도 등 주변 환경의 변화로 인해 일정한 스펙트럼을 얻기 쉽지 않았으나, 1990년대 후반 자체 광원을 사용하는 기기 개발로 야외에서도 어느 정도 일정한 스펙트럼 획득이 가능하게 되었다. 다만, 광원으로부터 조사된 빛이 시료로부터 반사되는 현상을 관찰하는 분석방법의 특성 상, 시료의 상태에 따른 스펙트럼의 변화를 예상할 수 있으며, 이들을 최소화하기 위한 분석 조건의 표준화가 필요하다.

시료 상태 및 분석조건에 대한 검토 결과 현장에서

단파장적외선 분석 시 굴곡진 자연 노출면을 비운 뒤 24 ~ 48시간 이후에 10 ~ 100회의 반복측정으로 분석한다면 거의 일정한 스펙트럼의 획득이 가능한 것으로 판단된다. 대부분의 분광분석은 배경값(background value)을 갖고 있으며, 이들에 의해 피크의 형태가 왜곡되고 작은 피크들은 구분이 불가능한 경우도 발생한다. 이와 같은 배경값의 영향을 제거해 주는 과정을 hull correction이라 하며, 그 중 피크 값을 배경값으로 나누어 주는 방식을 hull quotient correction이라 한다. 이 방식은 상대적으로 피크의 크기를 증폭시켜 보이지 않던 작은 피크도 확인 가능하도록 하는 장점을 갖는다. 표면상태의 경우 굴곡진 자연면과 평형한 자연면에서 거의 유사한 스펙트럼을 얻을 수 있었다. 덕카이트와 견운모는 전체적인 반사도 차이를 보이지만, normalized hull quotient 반사스펙트럼에서 보는 바와 같이 자연면과 절단면의 스펙트럼의 형태는 거의 유사하다(Fig. 7). 분말의 스펙트럼에서는 흡수피크들의 크기 비율이 달라지는 등 스펙트럼의 형태가 상당히 달라지는 결과를 보인다. 특히, 견운모의 경우 분말시료의 스펙트럼에서 각 흡수스펙트럼의 크기 순서가 자연면 및 절단면과 달라지는 현상이 나타나기도 한다(Fig. 7b). 이와 같은 현상은 광물의 분말화에 의해 입자들 사이에서 발생하는 적외선의 산란 현상에 의한 것으로 해석된다(AusSpec International Ltd., 2008, Zaini *et al.*, 2008). 종합하면 현장에서 단파장적외선 스펙트럼 획득 시에는 자연면 그대로 적용하여도 별다른 문제점이 없을 것으로 판단되며, 특별한 경우가 아니고서는 분말시료에 대한 분석은 자제하는 것이 필요할 것이다.

단파장적외선 영역에서 수분에 의한 흡수피크는 매우 크고 광범위하기 때문에, 불필요한 수분의 함유는

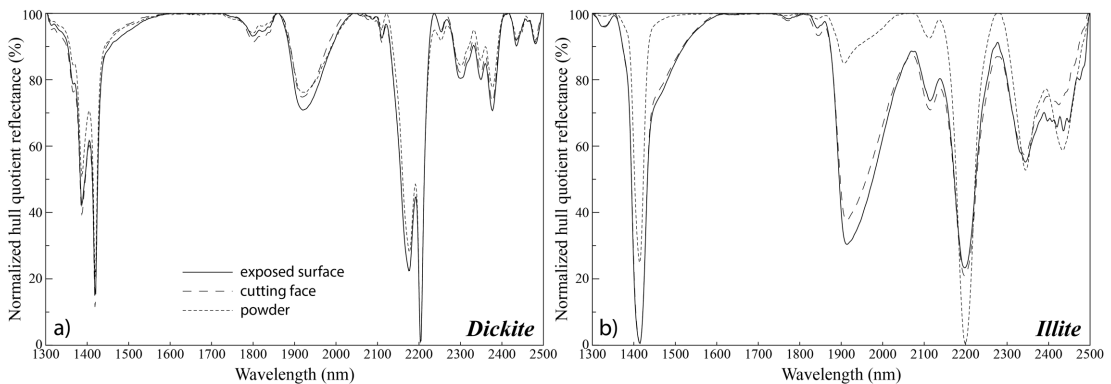


Fig. 7. Normalized hull quotient SWIR reflectance spectra based on the surface states of dickite (a), and illite (b).

단파장적외선 스펙트럼에 매우 큰 영향을 끼치게 된다. 이는 단파장적외선 분광분석기에 자체 광원을 사용하기 시작한 이유이기도 하다(Huff, 2008). 이와 같은 함수 효과는 24시간 정도 상온에서 건조 조건에서 거의 상쇄되어 원래의 스펙트럼 특성으로 복원되는 것을 확인하였다(Fig. 3). 이 결과는 실험실에서 얻은 결과이므로, 현장조사 시에는 많은 비가 온 다음, 노두 표면의 수분이 건조될 수 있도록 하루에서 이틀 정도의 시간이 경과한 후 측정하는 것이 정확한 반사스펙트럼 자료를 획득할 수 있다고 사료된다.

연구에 사용된 기기는 TerraSpec 4 Hi-Res Mineral Analyser는 1회 측정 시간이 0.1초이며, 반복측정의 기본 값으로 10회 측정하여 1초의 분석시간이 소요된다. 이와 같은 반복측정 횟수는 사용자가 조절가능하며, 그 횟수는 무제한이다. 디카이트와 같은 밝은 색의 광물은 단파장적외선에 좋은 반사도를 보이므로, 기본 10회의 반복측정으로 일정한 스펙트럼을 얻을 수 있으나, 흑운모와 같은 어두운 색의 광물은 전반적인 반사도의 부족에 의해 신호에 대한 잡음의 비율(SNB)이 증가하여 스펙트럼의 잡음이 상당히 관찰된다(Fig. 4). 100회(10초) 이상의 반복측정에서 잡음이 거의 상쇄되는 결과를 얻을 수 있었으며, 이로부터 어두운 색의 광물 또는 암석을 측정할 경우 기기의 반복측정 횟수 조정이 필요할 것으로 판단된다.

단파장적외선 영역은 물질을 구성하고 있는 분자의 운동에 의한 에너지의 흡수가 일어나는 파장대이므로, 반사스펙트럼에서의 흡수피크는 광물의 구조적 특징보다는 구성원소의 종류에 따라 결정되며, 광물 내의 결합은 부차적인 요소가 된다. 광상 형성과 관련된 열수 변질대는 광화 유체에 의한 원소의 이동과 이와 관련된 광물의 붕괴 및 형성과정에 의해 만들어지므로, 단파장적외선에 의한 광상탐사를 통하여 효과적인 결과를 얻을 수 있다. 특히, 주요 변질광물인 함수규산염광물에서의 단파장적외선 스펙트럼은 2,160 ~ 2,330 nm 구간에서 주요 흡수피크들이 나타나고 있어, 이 구간을 세분하여 광물의 구분을 통한 변질대 특정이 가능한 것으로 판단된다(Fig. 6). 결론적으로, 2,160 ~ 2,180 nm에서는 고령석군, 엽납석, 명반석의 흡수피크가 나타나므로 고점토대(advanced argillic zone) 또는 점토대(argillic zone)로, 2,180 ~ 2,230 nm 구간은 주로 백운모 또는 견운모 및 스�멕타이트의 흡수피크에 의해 견운모대(phylic zone)로의 고려가 가능할 것이다. 또한, 2,230 ~ 2,270 nm 구간은 주로 녹니석과 녹염석의 흡수피크로 인해 프로필리틱대(prophyllitic

zone)로 간주될 수 있다. 2,270 ~ 2,330 nm 영역은 명반석, 활석, 사문석, 각섬석, 탄산염광물 등 다양한 광물의 흡수피크가 나타나므로, 보다 더 세밀한 스펙트럼 해석이 요구된다.

사 사

본 연구는 2016년도 한국광물자원공사의 '광물감정을 위한 단파장 적외선 표준 스펙트럼 DB 구축'과제와 자원개발특성화대학사업의 '광물자원 탐사·개발'과제에서 지원한 연구이며, 이에 감사를 드립니다.

References

- AusSpec International Ltd. (2008) Geologically-based spectral analysis guides for mineral exploration (volume 1). AusSpec International Ltd., Sydney, 189p.
- Bishop, J.L. and Murad, E. (2005) The visible and infrared spectral properties of jarosite and alunite. *American Mineralogist*, v.90, p.1100-1107.
- Bishop, J.L., Lane, M.D., Dyar, M.D., King, S.J., Brown, A.J. and Swayze, G.A. (2014) Spectral properties of Ca-sulfates: Gypsum, bassanite, and anhydrite. *American Mineralogist*, v.99, p.2015-2115.
- Cho, H.I. and Moon, H.-S. (1978) Alunite deposits in Korea. Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources, Seoul, 105p.
- Cudahy, T.J. (1997) PIMA-II spectral characteristics of natural kaolins. Australian Mineral Industries Research Association Ltd., CSIRO/AMIRA Project P435, 62p.
- Deyell, C.L. and Dipple, G.M. (2005) Alunite natroalunite solid-solutions - equilibrium mineral fluid calculations and their application to the El Indio-Pascua Belt (Chile-Argentina). *Chemical Geology*, v.215, p.219-234.
- Dilles, J.H. (2012) Footprints of porphyry Cu deposits: Vectors to the hydrothermal center using mineral mapping and litho geochemistry. USGS, 580p.
- Halley, S., Dilles, J.H. and Tosdal, R.M. (2015) Footprints: Hydrothermal alteration and geochemical dispersion around porphyry copper deposits. SEG Newsletter, v.100, p.1 and 12-17.
- Harraden, C.L., McNulty, B.A., Gregory, M.J. and Lang, J.R. (2013) Shortwave infrared spectral analysis of hydrothermal alteration associated with the pebble porphyry copper-gold-molybdenum deposit, Iliamna, Alaska. *Economic Geology*, v.108, p.483-494.
- Hauff, P.L. (2008) An overview of VIS-NIR-SWIR field spectroscopy as applied to precious metals exploration. Spectral International Inc, 71p.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A. and Gonzales-Urien, E. (2000) Exploration for epithermal gold deposits. In Hagemann, S.G. and Brown, P.E.(eds.) *Gold in 2000. Reviews in economic geology*, v. 13, p. 245-277.
- Herrmann, W., Blake, M., Doyle, M., Huston, D., Kam-

- prad, J., Merry, N. and Pontual., S. (2001) Short wave-length infrared (SWIR) spectral analysis of hydrothermal alteration zones associated with base metal sulfide deposits at Rosebery and Western Tharsis, Tasmania, and Highway-Reward, Queensland. *Economic Geology*, v.96, p.939-955.
- Jeong, Y.S., Yu, J., Koh, S.M. and Heo, C.H. (2014) Spectroscopy of skarn minerals in Dangdu Pb-Zn deposit and assessment of skarn exploration approaches employing portable spectrometer. *J. Miner. Soc. Korea*, v.27, p.135-147.
- Jeong, Y.S., Yu, J., Koh, S.M., Heo, C.H. and Lee, J. (2016) Spectral characteristics of minerals associated with skarn deposits: a case study of Weondong skarn deposit, South Korea. *Geosciences Journal*, v.20, p.167-182.
- Keshava, N. (2003) A survey of spectral unmixing algorithms. *Lincoln Laboratory Journal*, v.14, p.55-78.
- Kim, C.S., Pak, S.-J., Choi, S.-G., Kim, Y.-D. and Chi, S.-J. (2002) Application of short-wave infrared spectral analysis to define hydrothermal alteration zones in exploration. *The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, v.39, p.231-241.
- Kim, Y.-H., Choi, S.-G., Kim, C.S., Ko, G.B. and Kang I.M. (2015) The application of phyllosilicate mineral standardization by using VNIR-SWIR portable spectrometer. *Joint Conference of the Geological Science & Technology of Korea*, KSEEG, Gwangju, April 22-24, p.22-23.
- Kim, Y.H., Kim, G.B., Choi, S.-G., Kim, C.S. and Kim, H. (2016) Short-wave infrared spectroscopic analysis application for the identification of high-grade limestones from the Upper Pungchon Formation. *Joint Conference of the Geological Science & Technology of Korea*, The geological society of Korea, Pyeongchang, October 26-29, pp.138.
- Ko, G.B., Kang, H.-J., Kim, C.S. and Choi, S.-G. (2015) Spectroscopic analysis technique of the finite number of spectroscopic models by mineral combination type. *Joint Conference of the Geological Science & Technology of Korea*, KSEEG, Gwangju, April 22-24, pp.191.
- Kuosmanen, V., Laitinen, J., Eilu, P. and Ojala, J. (2005) Study of alteration indications using VSWIR reflectance of drillcores from the Härmänkylä gold prospect, Kuhmo, NE Finland. *Geologica Survey of Finland*, 26p.
- Noh, J.H. and Cho, H.G. (1993) Mineralogical characterization of the Chuncheon Neprite: Mineral facies, mineral chemistry, and pyribole structure. *J. Miner. Soc. Korea*, v.6, p.57-79.
- Noh, J.H., Cho, H.G. and Choi, J.B. (1995) Crystal chemistry and paragenesis of calc-silicate minerals from meta-sedimentary rocks in Chuncheon area: (1) Occurrence, mineralogy, and paragenesis. *J. Miner. Soc. Korea*, v.8, p.57-72.
- Pak, S.-J., Choi, S.-G., Kim, C.S. and Lee, D.E. (2001) Application of short-wave infrared spectroscopy to define alteration zones associated with the Mugeug Au-Ag deposit, Korea. *Conference of the Korean Society of Economic and Environmental Geology*, KSEEG, Hanyang Univ., Ansan, April 27-28, p.253-255.
- Scott, K.M and Yang, K. (1997) Spectral reflectance studies of white micas. *Australian Mineral Industries Research Association Ltd., CSIRO/AMIRA Project P435*, 35p.
- Song, Y.S. (2001) Gold-silver mineralization in the Suryun mine: Application of short-wave infrared spectroscopy to the study of hydrothermal alteration. *Ms Thesis (unpublished)*, Korea University, Seoul, Korea. 91p.
- Swayze, G.A., Clark, R.N., Goetz, A.F.H., Livo, K.E., Breit, G.N., Kruse, F.A., Stutley, S.J., Snee, L.W., Lowers, H.A., Post, J.L., Stoffregen, R.E. and Ashley, R.P. (2014) Mapping advanced argillic alteration at Cuprite, Nevada using imaging spectroscopy. *Economic geology*, v.109, p.1179-1221.
- Zaini, N., van der Meer, F. and van der Werff, H. (2012) Effect of grain size and mineral mixing on carbonate absorption features in the SWIR and TIR wavelength regions. *Remote Sensing*, v.4, p.987-1003.