

지상기반 초분광 영상을 이용한 탄산염 광산 노두 광물 분포도 작성

손영선[‡] · 이범한 · 김남훈 · 고상모
한국지질자원연구원 DMR 융합연구단

요 약

지상기반 초분광 영상 기술을 이용해 경기광업과 가사리 탄산염암 노두를 대상으로 광물 탐지 성능을 평가하고 광물 분포도를 작성하였다. 연속체 제거 기법은 CO₃, Al-OH에 의한 광물 고유의 흡수 특징을 쉽고 빠르게 탐지할 수 있었지만 세분화된 광물 분류는 어려웠다. 반면 다중 범위 분광특징근사 기법은 백운석, 방해석, 마그네사이트와 같은 탄산염 광물들 뿐만 아니라 고령석, 일라이트와 같은 층상 규산염 광물들을 세부적으로 분류할 수 있었다. 현장 관찰과 암석시료에 대한 X선 회절 분석 및 분광측정 결과들은 초분광 영상을 이용한 탄산염 광물 분류 결과에 대한 높은 정확도를 보여준다. 초분광 영상으로부터 획득되는 분광학적 특징들은 탄산염 광물의 유기물 함량, 입자크기, 분급, 다공성과 같은 물리적, 화학적 특성과 관련이 있기 때문에 초분광 영상 기술은 탄산염 노두를 해석하는데 있어 현장 관찰과 화학분석과 같은 전통적 탐사기법과 함께 상호보완적으로 활용될 수 있을 것이다. 지상기반 초분광 영상 기술은 특히 직접적인 조사가 어려운 높은 수직 노두에 대해 광물 정보를 얻거나 층서 및 구조 분석과 관련된 지질매핑이나 해석을 할 때 효과적으로 사용 될 수 있을 것으로 보인다.

주요어: 지상기반 초분광 영상, 탄산염 광물, 다중 범위 분광특징근사, 연속체 제거

Young-Sun Son, Bum Han Lee, Namhoon Kim and Sang Mo Koh, 2020, Mapping mineral distribution of outcrops in carbonate mines using ground-based hyperspectral imaging. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 6, p. 753-769

ABSTRACT: Ground-based hyperspectral imaging was used to detect minerals and make distribution map of minerals in the carbonate outcrops of Gyeonggi mine and Gasari. The continuum removal technique was effective in quickly and easily detecting the absorption characteristics of minerals by CO₃ and Al-OH, but it was difficult to classify minerals in detail. Multi-range spectral feature fitting was able to distinguish not only carbonate minerals such as dolomite, calcite, and magnesite, but also phyllosilicate minerals such as kaolinite and illite. The results of X-ray diffraction and shortwave-infrared spectroscopy on rock samples supported high accuracy for the classification of carbonate minerals using hyperspectral imaging. The carbonate spectral features from hyperspectral image are related to physical and chemical properties such as organic matter content, particle size, sorting, and porosity. Therefore, hyperspectral imaging technique can be used to interpret carbonate outcrops complementarily with conventional exploration techniques such as field observation and chemical analysis. It is expected that the ground-based hyperspectral imaging technique can be effectively used when obtaining mineral information or geological mapping and interpretation related to stratigraphical and structural analysis, especially for high and vertical outcrops that are difficult to directly access.

Key words: Ground-based hyperspectral imaging, carbonate minerals, multi range spectral feature fitting, continuum removal

(Young-Sun Son, Bum Han Lee, Namhoon Kim and Sang Mo Koh, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

[‡] Corresponding author: +82-42-868-3165, E-mail: sys6564@kigam.re.kr

1. 서론

물질표면과 전자기파에너지에 물리적 상호작용은 특정 파장에서 물질 고유의 전자기파에너지 흡수 특성을 초래할 수 있으며 영상분광분석법(Imaging spectrometry)은 이러한 상호작용을 영상의 형태로 기록해 대상 체의 광물 또는 화학적 조성에 대한 정성적 및 정량적 정보를 얻는데 사용된다(van der Meer and de Jong, 2002; Clark *et al.*, 2003). 많은 광물들은 화학, 물리적 특성에 따라 다르게 빛을 흡수하고 반사하기 때문에 영상분광분석법을 이용하면 물질 표면에서의 광물분포나 구성광물을 확인할 수 있다. 초분광 영상(hyperspectral imaging)은 전자기스펙트럼을 수백 개의 채널로 연속적인 측정을 한다. 이러한 높은 분광해상도(spectral resolution)는 분광학적으로 미묘한 차이를 보이는 광물들을 더 잘 구별할 수 있게 한다. 항공기 및 위성 초분광 영상은 광역적 규모에서 지표에 있는 광물 또는 암석을 탐지 또는 분류 하는데 효과적으로 사용되어 왔다(e.g., Kruse, 1988; Bowers and Rowan, 1996; Crosta *et al.*, 1998; Bierwirth *et al.*, 2002; Gersman *et al.*, 2008; Bedini, 2011; Zimmermann *et al.*, 2016; Naletto *et al.*, 2019). 최근에는 항공 및 위성에서 확인이 어렵고 직접적인 조사가 어려운 노두 수직면에 대해 지질학적 해석, 광물, 암석 분포도 작성 또는 현장조사 자료를 보완하는 목적으로 지상기반 초분광 영상이 많이 활용되고 있다(Kurz *et al.*, 2012; Krupnik *et al.*, 2016; Sun *et al.*, 2017; Beckert *et al.*, 2018). 국내의 경우 밀집된 식생으로 인해 항공 및 위성 초분광 영상을 이용한 지표지질 탐지가 쉽지 않다. 이로 인해 국내 지질자원 분야에서 항공 및 위성 초분광 영상이 활용된 사례(e.g., Choe, 2003; Hyun and Park, 2013)는 많지 않다. 식생에 의한 제약이 많은 항공 및 위성 초분광 영상에 비해 지상기반 초분광 영상은 국내 지질자원 분야에서도 다양하게 활용이 가능할 것으로 보이지만, 국내에서는 아직 지상기반 초분광 영상이 지질자원 분야에 활발하게 활용되고 있지 않다(Son *et al.*, 2020).

탄산염암은 건축자재 및 시멘트 사업에 중요한 천연자원으로 주로 방해석과 백운석으로 구성되어 있다. 탄산염 광물들은 스카른 광상, 저유황형 천열수 광상, 반암형 구리 광상과 관련된 변질광물로도

산출되기 때문에 광상학적 관점에서도 중요하다(Kozak *et al.*, 2004; Rockwell *et al.*, 2008; Zaini *et al.*, 2012). Kurz *et al.* (2012)은 스페인 북서부 석회암 노두에서 다양한 탄산염 광물들을 분류하고 속성작용에 대한 정보를 얻기 위해 초분광 영상을 활용하였으며, 라이다(light detection and ranging; LIDAR) 스캐닝과 통합분석을 통해 탄산염 암석의 부피 정량화에 사용할 수 있는 기하학적으로 정확한 광물 분포도를 작성하였다. Krupnik *et al.* (2016)은 지상기반 초분광 영상을 이용해 미국 텍사스 탄산염암층에 기하학적 및 광물학적 특성을 전통적 탐사 방법으로 확인했던 것 보다 더 미세한 규모로 분석한 바 있으며, Okyay *et al.* (2016)은 미국 남서부 미주리 탄산염암 노두에서 암상을 구분하기 위해 지상기반 초분광 영상을 사용했으며 분석을 통해 규질석회암 형성 과정에 대한 새로운 관점을 제시한 바 있다.

본 연구에서는 백운암과 석회암이 함께 노출되어 있어 지상기반 초분광 영상 분석기술을 평가하기 위한 좋은 조건을 가지고 있는 경기광업과 강원도 정선 가사리에 있는 일부 노두를 대상으로 지상기반 초분광 영상자료를 이용해 탄산염 광물들의 탐지 성능을 평가하고 광물 분포도를 작성하였다. 또한 다른 탄산염 광물 중 하나인 마그네사이트 암석 시료들을 이용한 초분광 영상 분석결과도 함께 제시하였다. 마그네사이트는 북한의 대표적인 광물자원으로 세계 최고 수준의 매장량을 가지고 있는 것으로 알려져 있다(U.S. Geological Survey, 2020). 따라서 국내 탄산염 광물과 관련된 지질자원 분야뿐만 아니라 향후 북한 마그네사이트 광상 탐사에 초분광 영상의 활용 가능성을 함께 검토해 보고자 한다.

2. 연구지역 지질개요

경기광업 일대는 시대 미상의 옥천층군 마전리층과 백악기 석영반암으로 구성된다(그림 1a)(Hong and Choi, 1978). 경기광업에서 탄산염암 분포도가 작성된 노두는 마전리층에 해당된다. 마전리층은 석회규산염암과 결정질 석회암으로 구성되고, 석영반암의 관입으로 인한 스카른대가 형성되어 있다(Hong and Choi, 1978; Kim *et al.*, 2004). 결정질 석회암은 대부분 거정질의 석회암으로 구성되며 세립 또는 중립질 백운암이 불규칙적으로 산출된다(Kim *et al.*, 2004).

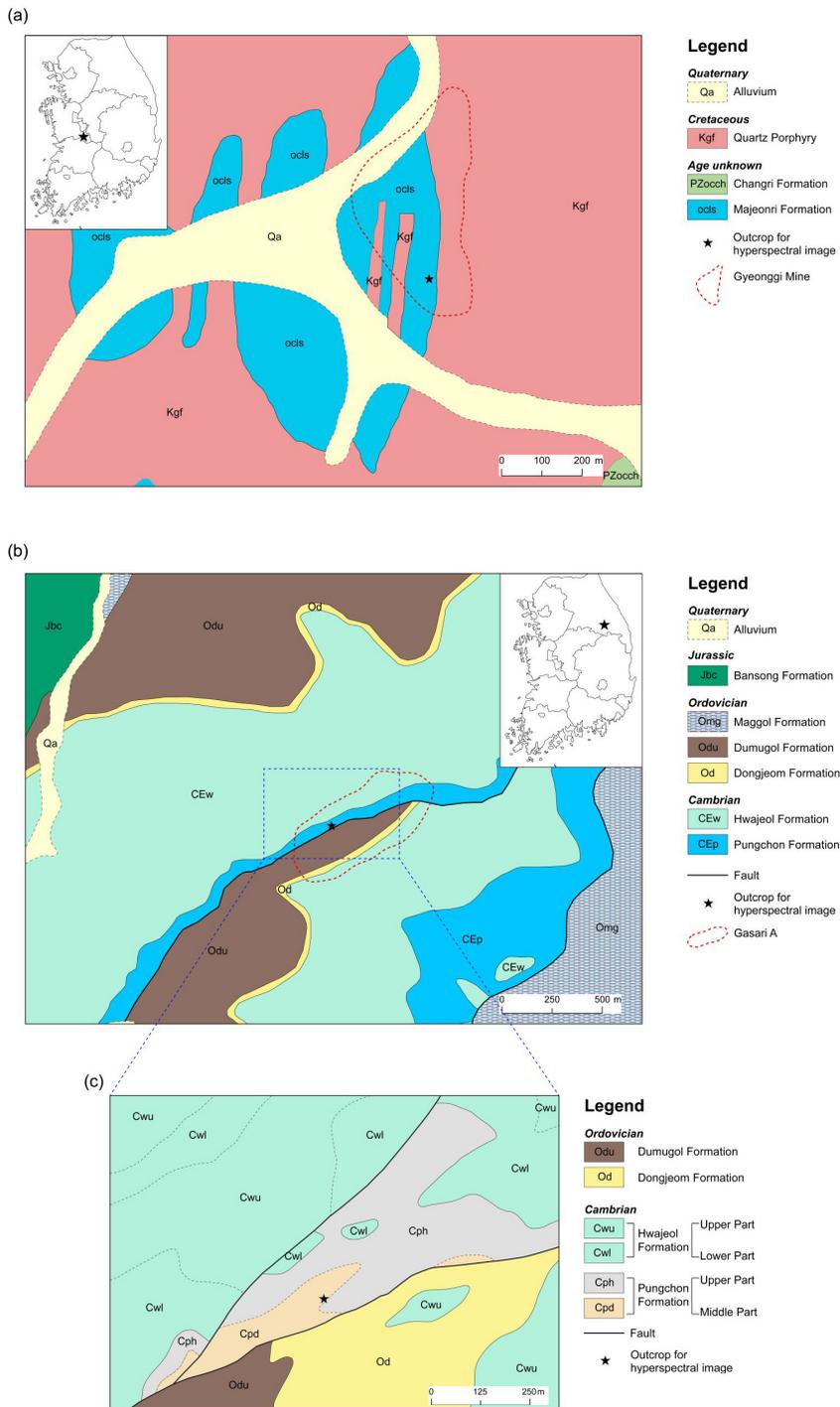


Fig. 1. Geological maps in the vicinity of outcrops where hyperspectral images were taken; (a) Gyeonggi mine area (1:50,000 scale map modified from Hong and Choi, 1978), (b) Gasari A mine area (1:50,000 scale map modified from Geological Investigation Corps of the Taebaeksan Region, 1962) and (c) rectangle area depicted in (b) (1:5,000 scale map modified from Shon *et al.*, 2001). Location of each mine (red dashed line in (a) and (b)) and outcrop for hyperspectral image (asterisk in each map) is indicated.

결정질 석회암 내에 함유된 불순물로는 스키르네대와 함께 수반되는 섬아연석, 방연석, 황철석, 자철석, 능망간석, 갈철석 등의 금속광물과 형석, 석영, 녹니석, 백운모 등이 있다(Kim *et al.*, 2004). 경기광업에서 발달하는 마전리층의 석회암과 백운암은 모두 백색을 띠며 색깔로는 식별이 되지 않지만, 석회암은 거정질을 띠며, 백운암은 중립질 또는 세립질 조직을 띠며 입자의 크기 및 조직적 특성으로 구분되기도 하는데, 이는 재결정작용의 차이로 인해 생긴 결과로 해석된다.

강원도 정선 가사리에 있는 A 광산 일대는 고생대 캄브리아기의 풍촌층, 화절층과 오르도비스기의 동점층, 두무동층으로 구성된다(그림 1b)(Geological Investigation Corps of the Taebaeksan Region, 1962). 가사리 A 광산에서 탄산염광물 분포도가 작성된 노두는 풍촌층과 화절층의 경계부에 위치하며 풍촌층에 해당된다. 풍촌층은 크게 하부 석회암대, 중부 백운암대, 상부 석회암대로 구분한다(Noh *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2016). 풍촌층 중부 백운암대는 일반적으로 회색-암회색의 백운암 또는 백색의 결정질 백운암으로 구성되며 상부 고품위 석회암대와와 경계가 불규칙적이고, 석회규산염 광물들이 수반된다(Noh and Oh, 2005; Noh *et al.*, 2010). 가사리 A 광산 일대의 중부 백운암대는 담회색 내지 암회색의 괴상 백운암으로 구성되고 충상단층 직상부에 단속적으로 발달한다(Shon *et al.*, 2001). 초분광 영상이 촬영된 노두는 담회색 내지 암회색의 백운암이 넓게 분포하고 백색의 석회암이 소규모로 노출된다. 이 노두는 이전 조사자들에 의해 풍촌층 중부 백운암대에 속하는 것으로 보고되었다(그림 1c)(Shon *et al.*, 2001). 이 지역 노두에서 백운암은 회색을 띠지만 석회암은 백색을 보여 색상으로 식별이 가능하다.

가사리 A 광산 노두에서는 한국지질자원연구원 DMR융합연구단이 2019년에 중국 따스차오(Dashiqiao) 마그네사이트 광화대 내 파일로우(Pailou) 광산에서 채취한 시료들을 올려두고 초분광 영상이 촬영되었다. 따스차오 마그네사이트 광화대는 북중국지괴의 동편블록을 가로지르는 자오-랴오-지(Jiao-Liao-Ji) 벨트 내에 포함되고 북한의 대흥-룡양 마그네사이트 광상도 이 자오-랴오-지 벨트에 포함되어 동일한 지체구조적 특성을 보여준다(Koh *et al.*, 2019). 연구에 사용된 시료들은 파일로우 광상의 마그네사이트 광

체에서 채취한 것으로 담홍색 또는 백색을 띠며 일부 불순물로 백운석을 포함하기도 한다.

3. 탄산염 광물의 분광 특성

탄산염 광물의 분광학적 특성들은 많은 연구들을 통해 밝혀졌다(Crowley, 1986; Gaffey, 1986, 1987; Clark *et al.*, 1990; Zaini *et al.*, 2012). 탄산염이온(CO_3^{2-})의 진동과정(vibrational process)은 2300-2340 nm와 2500-2550 nm 사이의 단파장적외(short-wave infrared; SWIR) 대역에서 주요 분광 흡수 특징(spectral absorption feature)들을 만들어내는 반면 흡수 특징 위치와 모양은 결정격자 내에 탄산염이온과 연결된 금속 양이온에 의해 지배된다. 예를 들어 백운석의 탄산염 흡수 특징은 2,320 nm 주변에서 가장 강하며 방해석의 탄산염 흡수 특징은 2,340 nm 주변에서 가장 강하게 나타나기 때문에 백운석과 방해석을 구분할 수 있다. 또 다른 탄산염 광물인 마그네사이트의 흡수 특징 위치는 백운석보다 더 짧은 파장인 2,300 nm 근처에서 발생한다. 이러한 탄산염 흡수 특징은 Mg와 Ca 함량 변화와 관계가 있으며, 이전 연구들에 따르면 탄산염 흡수 특성의 강도는 입자 크기, 분급, 다공성에도 영향을 받는다. 또한 탄산염암에 종종 존재하는 유기물뿐만 아니라 철, 점토, 실리카와 같은 불순물들도 탄산염 흡수 특성에 영향을 줄 수 있다. 입자 크기는 흡수 특성 강도와 관련이 있지만 흡수 특징의 위치와 폭과는 크게 관련이 없는 것으로 밝혀졌다. 백운석과 방해석의 상대적 양 변화는 탄산염암의 흡수 특성의 위치, 깊이 그리고 비대칭성에 영향을 준다(Crowley, 1986; Gaffey, 1986, 1987; Clark *et al.*, 1990; Zaini *et al.*, 2012).

4. 연구방법

4.1 암석시료 분석

초분광 영상에서 광물을 분류하고 분석 결과를 평가하기 위해 암석시료의 화학적 특성과 분광학적 특성을 분석하였다. 분석 시료의 구성 광물을 알아보기 위해 한국지질자원연구원에서 보유한 X-선 회절 분석기(Rigaku SmartLab model)를 이용하였다. 실험에 사용된 시료는 중국의 파일로우 광산 시료 네 개(시료번호 19PL3-1, 19PL13, 19PL13-3, 19PL13-4),

경기광업 시료 다섯 개(20GG-1, 20GG-2, 20GG-3, 20GG-4, 20GG-5), 그리고 가사리 A 광산 시료 네 개(20SW-6, 20SW-6-1, 20SW-7, 20SW-7-1)이다. 분석 시료의 주성분 원소 분석은 한국지질자원연구원 분석센터의 X-선 형광분석기(XRF, MXF-240 model, Shimadzu, Japan)를 사용하였다. 각 시료의 대표적인 부분에서 만든 분말 시료 1.0000 g을 Li₂B₄O₇ 용융제 5.5 g과 혼합하고, 1,100°C에서 10분간 용융한 이후 백금 성형 틀에서 유리구(glass bead)를 제작하여 분석을 실시하였다. 분석 시 각 원소별 검출 한계(wt.%)는 0.02(SiO₂), 0.01(K₂O), 0.02(Na₂O), 0.01(TiO₂), 0.01(MnO), 0.01(P₂O₅)이다.

암석시료 반사 스펙트럼은 350-2,500 nm 분광 대역을 2151개의 밴드로 기록할 수 있는 휴대용 분광계(TerraSpec Halo mineral identifier, ASD)를 사용해 측정하였다. 이 분광계는 350-1,000 nm에서 3 nm, 1,001-1,785 nm에서 9.8 nm, 그리고 1,786-2,500 nm에서 8.1 nm 분광 해상도를 가지며 1 nm 단위로 재 변환되어 신호를 기록한다. 암석시료의 밝기에 따라 설정을 바꿀 수 있으며 어두운 색의 암석시료는 100번, 밝은 색 암석시료는 50번을 15초 이내에 반복측정 하여 스펙트럼을 기록한다.

4.2 초분광 영상 획득 및 전처리

노르웨이 Hypspec에서 개발한 Mjolnir S-620 초분광 영상 시스템을 이용하여 2020년 5월에 경기광

업과 가사리 A 광산 노두를 대상으로 영상을 촬영하였다(그림 2). 이 장비는 970-2,500 nm 사이에서 평균 밴드 폭이 5.1 nm인 최대 300개의 채널로 전자기 스펙트럼을 기록할 수 있으며 촬영조건과 대상에 따라 채널 개수를 조정할 수 있다. 본 연구에서는 300개의 채널로 촬영했으며 1 nm 단위로 재 변환된 스펙트럼이 사용되었다. 영상은 삼각대에 장착된 자동 회전 장치를 이용해 한 개의 수직 라인에서 최대 620개의 화소로 푸쉬브룸 라인 스캐닝(pushbroom line scanning) 방식으로 획득된다. 초분광 영상 스캐닝은 노두에서 약 25 m 거리에서 이루어졌으며 화소(pixel) 당 공간 해상도(spatial resolution)는 약 1.5 cm이다. 반사도를 알고 있는 세 개(5%, 50% 95%)의 반사도 참조판(reflectance reference panel)을 노두 앞면에 배치하고 영상을 스캐닝 하였으며, 초분광 센서 감지기의 신호 통합시간은 95% 반사도 참조판의 화소가 포화되지 않도록 조도에 따라 설정되었다. 스캐닝은 구름이 없고 태양빛이 노두 면을 최대한 직접 비추는 조건에서 이루어졌다. 가사리 A 광산에서는 마그네사이트 탐지 성능도 함께 평가하기 위해 중국의 파일로우 마그네사이트 광산 암석시료들을 노두에 배치하고 영상을 촬영하였다(그림 2).

4.3 초분광 영상 처리

4.3.1 전처리

수치(digital number) 값으로 기록된 원시 영상(raw

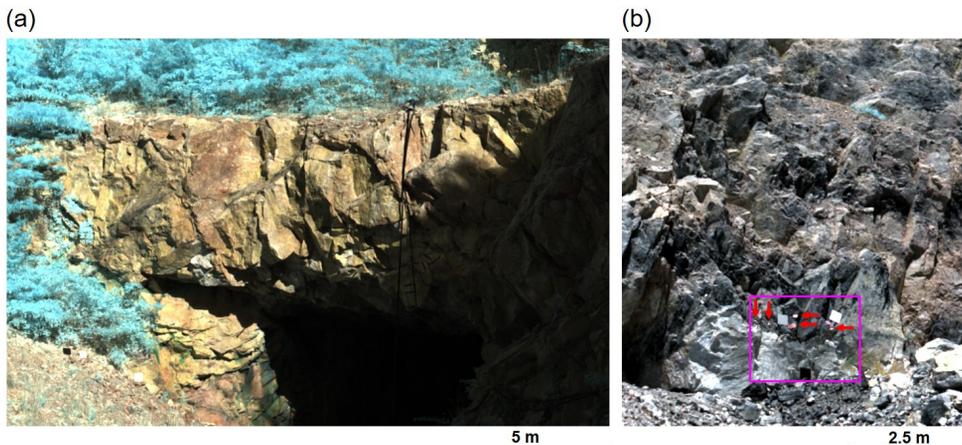


Fig. 2. False colour composite Hypspec Mjolnir S-620 image of (a) Gyeonggi mine and (b) Gasari A mine outcrops, red=band 134 (1650 nm), green=band 51 (1225 nm), blue=band 12 (1026 nm). Red arrows indicate the location of magnesite samples placed on the outcrop. Pink square box corresponds to Figure 7.

data)은 장비 제조사에서 결정한 보정계수(calibration coefficient)를 사용하여 복사휘도(radiance at-sensor) 영상으로 보정했으며, 각 화소의 공간적 그리고 분광적 등록편차(misregistration)로 인해 초분광 센서들에서 발생하기 쉬운 광학적 왜곡(keystone 및 smile 효과; Nieke *et al.*, 2008)들도 제조사에서 제공하는 프로그램으로 보정하였다. 복사휘도 영상에서 대기 효과를 제거하고 반사도(reflectance) 영상으로 변환하기 위해 간단하고 효과적인 경험적 선형보정(empirical line correction) 기법을 사용하였다. 경험적 선형보정 기법은 영상 내에 반사도 값을 알고 있는 대상체로부터 복사휘도 값을 회귀분석 하여 이득(gain)과 편의(offset)를 계산한 후 반사도 변환에 이용한다 (Farrand *et al.*, 1994). 노두 앞면에 배치된 반사도를 알고 있는 세 개의 반사도 참조판을 경험적 선형보정에 사용하였다. 반사도 영상은 고주파 노이즈를 제거하고 신호의 모양과 흡수특징 위치를 유지할 수 있게 2차 다항식으로 네 개 밴드의 윈도우(window)를 사용해 평활화(smoothing) 하였다(Savitzky and Golay, 1964). 대기의 영향을 많이 받거나 탄산염 광물의 흡수 특징이 두드러지지 않는 파장대역은 영상 분석에서 제외하고 탄산염 광물의 흡수 특징이 가장 잘 나타나는 특정 파장대역(2,003-2,453 nm) 밴드들만 분석에 사용하였다. 노두 지질과 관련 없는 화소(그림자, 식생, 반사도 참조 판, 전석)들도 영상분석 전에 제거하였다.

4.3.2 Endmember 선택

촬영된 초분광 영상에서 개별 광물을 분류하기 위해서는 각각의 광물을 대표할 수 있는 endmember 스펙트럼들이 필요하다. Endmember란 물질들에 대한 고유의 분광반사 특성을 보여주는 스펙트럼이다. 영상 분류를 위한 endmember는 실험실 혹은 현장에서 측정된 스펙트럼을 사용할 수 있으며 외국의 여러 대학과 기관들에서 구축한 분광 라이브러리(spectral library) 스펙트럼을 사용할 수도 있다. 기 구축된 분광 라이브러리를 사용하기 위해서는 초분광 영상에서 분류하고자 하는 대상 물질에 대한 정보를 미리 알고 있어야 한다. 또한 초분광 영상이 촬영된 환경과 다른 조건에서 얻어진 스펙트럼을 endmember로 사용할 경우 분류 결과에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 영상으로부터 직접 end-

member를 추출하였다. 영상으로부터 endmember를 추출하기 위해 화소순수도지수(pixel purity index; PPI) 기법(Boardman and Kruse, 2011)을 이용하였다. 먼저 최소 잡음 비율(minimum noise fraction, MNF) 변환을 통해 분광정보를 압축하고 압축된 영상에서 순수한 화소들을 n차원 시각화(n-dimensional visualizer) 도구를 사용해 벡터 공간에 투영하여 가장 끝단에 위치하는 화소들을 endmember로 선택했다.

4.3.3 연속체 제거

흡수 파장 위치, 폭, 깊이와 같은 흡수 특징 변수들은 광물의 물리적, 화학적 특성을 탐지하는데 효과적으로 사용되어 왔다(Kruse, 1988; van der Meer, 2004). 그 중 흡수 특징의 깊이는 순수한 광물 또는 혼합된 광물의 양 또는 입자 크기와 관련이 있다(Clark, 1999). 입자 크기가 비교적 일정하다면 흡수 특징 깊이는 광물의 풍부도에 비례한다. 연속체 제거(continuum removal)를 사용하면 반사 스펙트럼을 정규화 하여 특정 파장 위치에서 흡수깊이를 비교할 수 있다(그림 3). 연속체는 두 개의 특정 파장

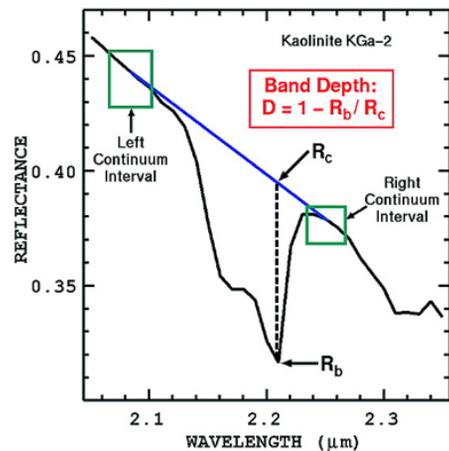


Fig. 3. Concept of the continuum removal used to extract depth from the deepest absorption feature in the spectrum (e.g., kaolinite). The continuum is defined as a series of straight line segments (blue line). The continuum is removed by dividing the reflectance at the band center (R_b) by the corresponding continuum reflectance at the band center (R_c). Feature depth was calculated as 1 minus the continuum removed reflectance (R_b/R_c) at the deepest point of the absorption (from Clark *et al.*, 2003).

Table 1. Endmembers and wavelength range for multi range spectral feature fitting applied to the Hypspx Mjolinir S-620 image of (a) Gyeonggi mine and (b) Gasari A mine outcrops.

| Gyeonggi mine | | Gasari A mine | |
|---------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Endmembers | Wavelength range (nm) | Endmembers | Wavelength range (nm) |
| Calcite 1 | 2095-2187. 2203-2392 | Calcite 1 | 2095-2187. 2203-2392 |
| Calcite 2 | 2095-2187. 2203-2392 | Calcite 2 | 2095-2187. 2203-2392 |
| Calcite 3 | 2095-2187. 2203-2392 | Calcite 3 | 2095-2187. 2203-2392 |
| Calcite + kaolinite | 2126-2239. 2254-2392 | Dolomite 1 | 2111-2172. 2198-2372 |
| Calcite + illite | 2141-2228. 2285-2392 | Dolomite 2 | 2111-2172. 2198-2372 |
| Dolomite | 2111-2172. 2198-2372 | Dolomite 3 | 2111-2172. 2198-2372 |
| Talc | 2254-2351. 2356-2418 | Magnesite | 2070-2157. 2162-2356 |
| Kaolinite | 2126-2239 | Magnesite + talc | 2059-2157. 2162-2356 |
| Illite | 2141-2254 | Illite + calcite | 2152-2264. 2269-2397 |

위치에서 반사 스펙트럼을 연결하는 직선의 볼록 꺾질(convex hull)로 영상에서 각 화소의 반사 스펙트럼을 나누는데 사용된다(Clark *et al.*, 2003). 이 연구에서는 초분광 영상으로부터 추출된 endmember들의 분광적 특성을 고려해 특정 파장 범위에서 연속체를 제거하고 최대 흡수특징 위치에서의 흡수깊이 값을 계산하였다.

4.3.4 다중 범위 분광특징근사

분광특징근사(spectral feature fitting; SFF) 기법은 참조광물과 대상광물의 스펙트럼의 물리적 형태를 평가하여 두 광물의 유사도를 측정한다(Harris, 2006). SFF 적용을 위해서는 먼저 영상에서 추출된 광물 endmember 스펙트럼들에 대해 연속체를 제거하고 최대 흡수 특징 위치에서 흡수 깊이를 계산해야 한다. 그 다음 분석하고자 하는 영상에서 미지의 스펙트럼들에 대해서도 연속체를 제거한 최대 흡수 깊이를 계산하고 endmember 스펙트럼 흡수깊이에 대한 대비(scale) 값을 계산한다. 대비 값이 클수록 광물 endmember 스펙트럼과 영상 스펙트럼 사이에 유사도가 높음을 의미한다. 또한 선택한 파장 영역에서 광물 endmember 스펙트럼과 분석영상에서 알려져 있지 않은 스펙트럼간의 RMS(root mean square) 오차를 계산(그림 4)하고 분석영상에서 대비 값이 크고 RMS 값이 낮은 화소들을 해당 광물로 분류한다. 다중 범위 분광특징근사 기법(multi range spectral feature fitting; MRSFF)은 각 endmember에 대해 여러 파장 범위를 사용하여 SFF를

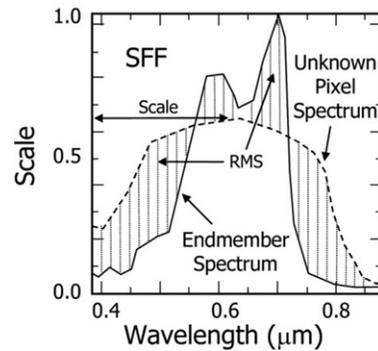


Fig. 4. Concept of the spectral feature fitting (from Harris, 2006).

적용하는 것으로서 여러 파장에서 흡수특징을 가지는 광물 탐지에 유리하다. 이 연구에서는 영상에서 추출된 각각의 endmember 분광특성에 맞는 여러 파장영역을 선택(표 1)하고 MRSFF를 적용한 후 각 endmember에 대한 scale 영상과 RMS 영상의 2차원 산점도(2-d scatter plot)를 사용하여 대화식(interactively)으로 임계값을 결정하고 최종 광물로 분류하였다.

5. 결 과

5.1 암석시료 특성

5.1.1 화학적 특성

XRD 분석 결과 파일로우 마그네사이트 광산 시료는 거의 대부분 마그네사이트로 구성되며, 시료 19PL13에서는 활석이 19PL13-3에서는 백운석이 소량 산출한다(그림 5a). 경기광업 시료는 방해석이 주

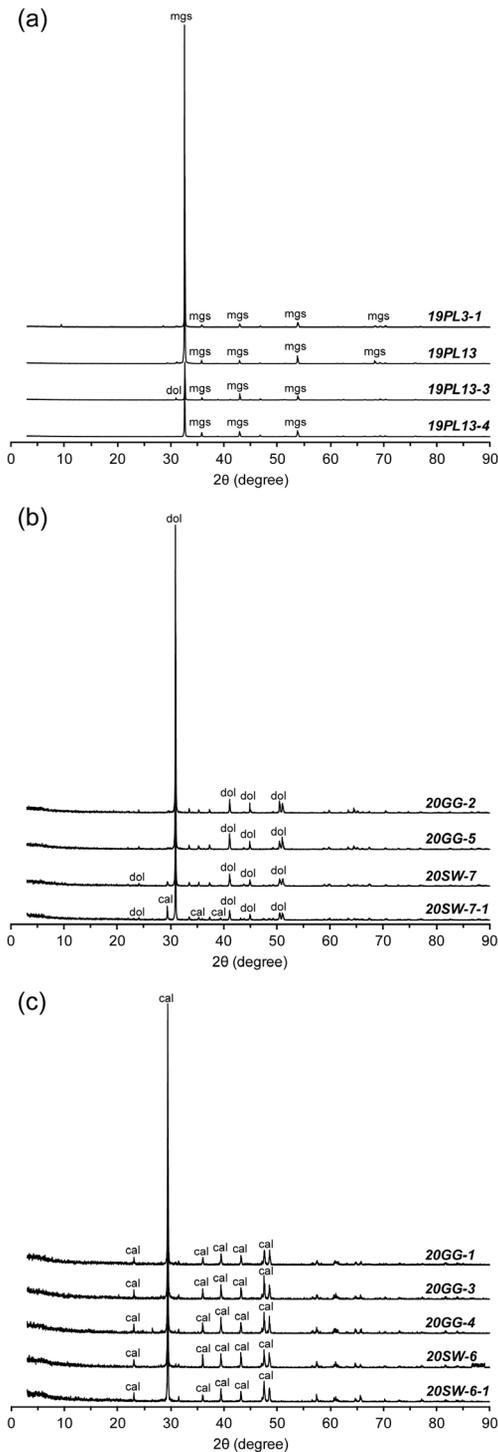


Fig. 5. XRD results of the analyzed samples. (a) magnetite samples from Pailou mine, (b) dolomite samples from Gyeonggi mine and Gasari A mine, and (c) calcite samples from Gyeonggi mine and Gasari A mine.

구성 광물인 시료(20GG-1, 20GG-3, 20GG-4)와 백운석이 주 구성 광물인 시료(20GG-2와 20GG-5)로 구분된다. 그리고 가사리 A 광산 시료는 방해석이 주 구성 광물인 시료(20SW-6과 20SW-6-1)와 백운석이 주 구성 광물인 시료(20SW-7과 20SW-7-1)로 나누어진다(그림 5b와 5c).

표 2는 전암 화학분석 결과를 보여준다. 파일로우 마그네사이트 광산 시료는 MgO 함량(wt. %)이 44.51~47.14의 범위로 분석한 시료 중 가장 높게 나타난다. CaO는 XRD 분석에서 백운석이 검출된 시료(19PL13-3, 3.91)를 제외하면 1 wt.% 이하이며, SiO₂는 하나의 시료(19PL3-1)를 제외하면 0.1 wt.% 이하이다. 경기광업에서 채취한 석회암 시료(20GG-1, 20GG-3, 20GG-4)의 CaO와 MgO의 함량(wt.%)은 각각 54.96~55.86과 0.34~0.77의 범위이고 SiO₂는 0.25~0.66의 범위이다. 백운암 시료(20GG-2, 20GG-5)의 MgO는 19.33과 20.45 wt.%이고 CaO는 31.71과 31.89 wt.%이다. 가사리 A 광산의 석회암 시료(20SW-6과 20SW-6-1)는 CaO 함량은 55.93과 55.96이며, MgO와 SiO₂는 각각 0.26~0.4와 0.04 및 검출 한계(0.01 wt.%)이하로 분석되었다. 백운암 시료(20SW-7, 20SW-7-1)는 MgO와 CaO의 함량은 각각 19.99와 16.76 그리고 31.74와 35.06이며, SiO₂의 함량은 0.26과 0.68이다.

5.1.2 분광학적 특성

파일로우 광산 마그네사이트 시료의 스펙트럼은 19PL3-1을 제외하고 모두 2,300 nm에서 가장 깊은 흡수가 나타나며 2,130 nm에서 두 번째 흡수 특징이 나타난다(그림 6). 시료 19PL13-1의 흡수는 2,310 nm에서 가장 깊게 나타나고 2,130 nm에서 두 번째 흡수 특징이 확인된다. 시료 19PL13-1의 최대 흡수가 나타나는 파장 위치는 다른 마그네사이트 시료들에 비해 10 nm 길며, 2,079, 2,292, 2,395 nm에서 추가 흡수 특징이 관찰된다. 이것은 19PL13-1 시료에 포함된 활석의 분광 특성이 혼합된 결과로 보인다.

백운암에서 나타나는 흡수 특징들은 마그네사이트보다 길고 석회암보다 짧은 파장에서 나타난다(그림 6). 경기광업 백운암 시료(20GG-2, 20GG-5)에서 최대 흡수는 2,322 nm에서 나타나며 2,141 nm에서 두 번째 흡수 특징이 관찰된다. 가사리 A 광산 백운암 시료(20SW-7, 20SW-7-1)의 최대 흡수 위치는 2,325 nm로 경기광업 백운암 시료보다도 3 nm 길며 흡수

Table 2. Whole rock major element compositions of analyzed samples.

| Ore deposits | Pailou mine | | | | Gyeonggi mine | | | | | Gasari A mine | | | |
|--------------------------------|-------------|------------|------------|------------|---------------|-----------|----------|----------|-----------|---------------|------------|-----------|------------|
| Sample No. | 19 PL 3-1 | 19 PL 13 | 19 PL 3-3 | 19 PL 3-4 | 20 GG- 1 | 20 GG- 2 | 20 GG- 3 | 20 GG- 4 | 20 GG- 5 | 20 SW- 6 | 20 SW- 6-1 | 20 SW- 7 | 20 SW- 7-1 |
| Rock type | Magn esite | Magn esite | Magne site | Magne site | Calcite | Dolom ite | Calcite | Calcite | Dolom ite | Calcite | Calcite | Dolom ite | Dolo mite |
| SiO ₂ | 3.41 | 0.09 | 0.08 | 0.09 | 0.66 | 0.01 | 0.58 | 0.25 | 0.51 | <0.01 | 0.04 | 0.26 | 0.68 |
| Al ₂ O ₃ | 0.72 | 0.08 | 0.1 | 0.07 | 0.2 | 0.01 | 0.19 | 0.11 | 0.1 | <0.01 | 0.01 | 0.1 | 0.26 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.4 | 0.64 | 0.23 | 0.52 | 0.32 | 0.37 | 0.31 | 0.12 | 0.88 | 0.02 | 0.05 | 0.48 | 0.71 |
| CaO | 0.58 | 0.71 | 3.91 | 0.59 | 54.96 | 31.71 | 55.27 | 55.86 | 31.89 | 55.96 | 55.93 | 31.74 | 35.06 |
| MgO | 46.13 | 46.71 | 44.51 | 47.14 | 0.77 | 20.45 | 0.46 | 0.34 | 19.33 | 0.26 | 0.4 | 19.99 | 16.76 |
| K ₂ O | 0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 0.08 | <0.01 | 0.06 | 0.04 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 0.04 |
| Na ₂ O | <0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.03 | <0.02 | 0.03 | <0.02 | <0.02 | 0.03 | <0.02 | <0.02 | <0.02 | 0.03 |
| TiO ₂ | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | <0.01 | 0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 0.02 |
| MnO | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 0.01 | 0.06 | <0.01 | 0.01 | 0.1 | 0.12 |
| P ₂ O ₅ | <0.01 | 0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 0.01 | 0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 |
| LOI | 48.67 | 51.87 | 50.73 | 51.83 | 43.1 | 47.34 | 42.92 | 43.32 | 46.78 | 43.34 | 43.44 | 46.84 | 45.88 |
| Total | 99.94 | 100.16 | 99.61 | 100.28 | 100.11 | 99.96 | 99.82 | 100.06 | 99.59 | 99.58 | 99.88 | 99.51 | 99.56 |

깊이는 경기광업 시료에 비해 매우 얇게 나타났다. 경기광업과 가사리 A 광산의 백운암 시료의 CaO와 MgO 성분차이는 크지 않지만, 가사리 A 광산 백운암 시료는 경기광업의 백운암 시료에 비해 높은 Mn 함량을 보이는데(표 2) 이것이 가사리 A 광산 백운암 시료의 얇은 깊이에 흡수와 관련이 있을 수 있다. 탄산염의 내에 Fe와 Mn은 흡수특성을 모호하게 만들 수 있다(van der Meer, 1995). 가사리 A 광산과 경기광업의 백운암 시료는 색과 입자 크기에 차이가 있다. 경기광업의 백운암 시료는 백색에 입자가 상대적으로 큰데 반해 가사리 A 광산의 백운암 시료는 회색에 세립질 입자를 보이는데, 이것이 최대 흡수 위치와 흡수 깊이 차이와 관련이 있을 수 있다. 탄산염의 입자 크기와 불순물은 반사도와 흡수 깊이에 크게 영향을 미친다(Crowley, 1986).

석회암 시료의 흡수 특징은 가장 긴 파장에서 나타난다(그림 6). 경기광업 석회암 시료(20GG-1, 20GG-3, 20GG-4)에서 최대 흡수는 2,339 nm, 두 번째로 큰 흡수 특징은 2,158 nm에서 관찰된다. 경기광업 석회암 시료들 사이에서는 흡수 깊이 차이가 확인되는데 화학적 조성 and 입자 크기에는 큰 차이를 보이지 않았다(표 2). 이러한 흡수 깊이 차이는 시료의 색(유기물 함량)과 관련이 있을 수 있다. 유기물은 매우

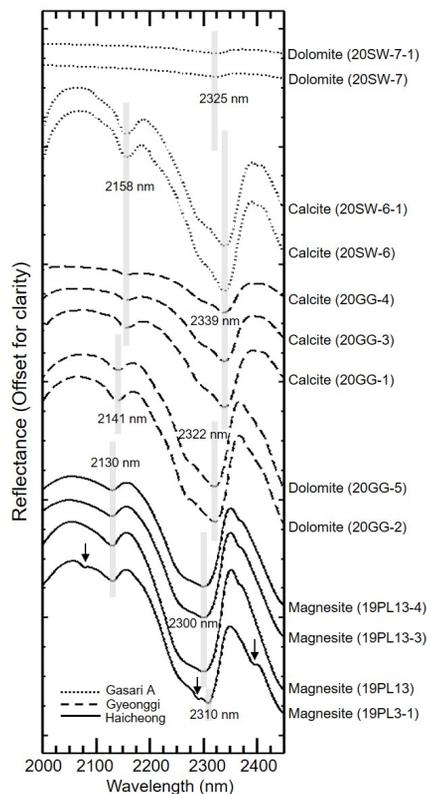


Fig. 6. Reflectance spectra of carbonate rock samples collected from Pailou, Gyeonggi mine, and Gasari A mines.

적은 양(0.01 wt.%)으로도 시료의 밝기 및 흡수 강도에 큰 영향을 미칠 수 있다(Crowley, 1986). 경기광업 석회암 시료들 중 가장 밝은 색 시료(20GG-1)의 흡수 깊이가 가장 컸으며 시료의 색이 어두울수록 흡수 깊이는 감소했다(20GG-3, 20GG-4). 가사리 A 광산 석회암 시료(20SW-6과 20SW-6-1)에서 흡수 특징은 경기광업 석회암 시료와 같은 2,339 nm와 2,158 nm에서 나타난다. 가사리 A 광산 석회암 시료의 흡수는 경기광업 시료들에 비해 상대적으로 더 깊게 나타난다. 두 지역 석회암 시료의 CaO와 MgO 성분 차이는 크지 않지만 가사리 A 광산 시료가 백색에 더 가깝다. 또한 경기광업 시료에 비해 더 적은 불순물(Si, Al, Fe, K)을 포함하고 있다(표 2).

5.2 초분광 영상 분석

5.2.1 Endmember

그림 7은 초분광 영상에서 추출된 endmember들을 보여준다. 경기광업 초분광 영상에서는 총 아홉

개의 endmember가 추출되었다. 먼저 흡수 깊이가 다른 세 개의 방해석 endmember 스펙트럼은 2,157 nm와 2,336 nm에서 주요 흡수 특징이 나타난다(그림 7a). 방해석 endmember 스펙트럼의 흡수 특징 위치와 모양은 경기광업 석회암 시료 스펙트럼들(20GG-1, 20GG-3, 20GG-4)의 흡수 특징(2,158, 2,339 nm)과 유사하다(그림 6). 백운석 endmember 스펙트럼은 2,136, 2,320 nm에서 흡수 특징이 나타나며 백운암 시료 스펙트럼들(20GG-2, 20GG-5)에서 측정된 흡수 특징 위치(2,141, 2,322 nm)와 비슷하다(그림 6). Endmember 스펙트럼과 암석시료 스펙트럼 사이에서 나타나는 약간의 흡수 특징 위치 차이는 초분광 영상 센서와 암석시료 분광 측정 센서의 분광 해상도 차이로 인해 발생할 수 있다(Mjolnir S-620: 5 nm, TerraSpec Halo mineral identifier: 1 nm). 한편 경기광업에서 채취한 암석 시료는 순수한 방해석과 백운석으로 이루어져 있기 때문에 화학분석과 분광측정에서 다른 광물을 확인할 수 없지만 경기광업

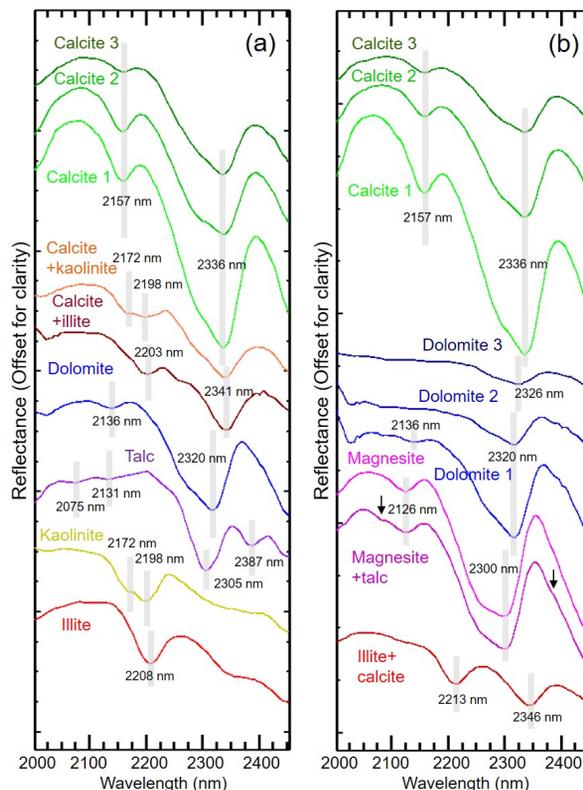


Fig. 7. Endmember spectra used for the multi range spectral feature fitting (MRSFF) mapping of the (a) Gyeonggi mine and (b) Gasari A mine.

노두의 초분광 영상에서는 방해석과 백운석 외에 다른 광물들의 endmember 스펙트럼들이 추출되었다(그림 7a). 이 endmember들은 이전 여러 연구들(Clark *et al.*, 1990; Yang *et al.*, 2001) 그리고 United States Geological Survey (USGS) 분광라이브러리 스펙트럼들(Kokaly *et al.*, 2017)과의 비교 및 흡수 특징 해석을 통해 활석, 고령석, 일라이트 스펙트럼으로 정의되었다. 활석은 2,305 nm에서 가장 깊은 흡수 특징을 나타내며 2,087, 2,131, 2,387 nm에서도 흡수 특징이 나타난다. 고령석은 2,172, 2,198 nm에서 2중 흡수 특징을 보여주며 일라이트는 2,208 nm에서 흡수 특징이 나타난다(Clark *et al.*, 1990; Swayze *et al.*, 2014). 한편 방해석이 고령석, 일라이트와 혼합된 형태의 분광 특징을 보이는 endmember 스펙트럼들도 확인되었다.

가사리 A 광산 초분광 영상에서는 아홉 개의 end-member가 추출되었다(그림 7b). 경기광업과 마찬가지로 흡수 깊이가 다른 세 개의 방해석 endmember 스펙트럼을 선정했으며 주요 흡수 특징 위치는 경기광업 방해석과 같은 2,157, 2,336 nm에서 나타난다. 가사리 A 광산의 백운석 endmember 스펙트럼은 흡수 특징에 따라 세 가지 형태로 구분된다. 첫 번째 백운석 endmember는 2,320 nm에서 깊은 흡수

수 특징을 보이며 2136 nm에서도 흡수 특징을 보이는데 이것은 경기광업 백운석 endmember와 비슷하다(그림 7a). 두 번째 백운석 endmember는 첫 번째 백운석 endmember에 비해 2,320 nm에서 흡수 깊이가 약간 감소하며, 2,136 nm에서 흡수 특징 관찰이 어렵다. 세 번째 백운석 endmember는 첫 번째와 두 번째 endmember에 비해 긴 2,326 nm에서 약한 흡수 특징이 나타나며 전체적으로 평평한 스펙트럼 형태를 보인다. 세 번째 endmember 스펙트럼은 가사리 A 광산 암석 시료 스펙트럼(20SW-7-1, 20SW-7, 그림 6)과 가장 유사하다. 2,126 nm와 2,300 nm에서의 흡수를 보이는 endmember 스펙트럼들은 광산 노두에 배치한 마그네사이트 시료 스펙트럼들(19PL13, 19PL13-3, 19PL13-4, 그림 6)과 거의 일치하며, 2,080 nm와 2,382 nm에서의 약한 추가 흡수 특징(그림 7b)은 활석의 존재와 관련이 있다. 한편 일라이트(2,213 nm)와 방해석(2,346 nm)의 혼합 특징을 보이는 endmember 스펙트럼도 추출되었다.

5.2.2 흡수 깊이

그림 8과 9는 광물의 흡수 특징이 나타나는 특정 파장 위치에서의 흡수 깊이를 계산한 결과 영상이

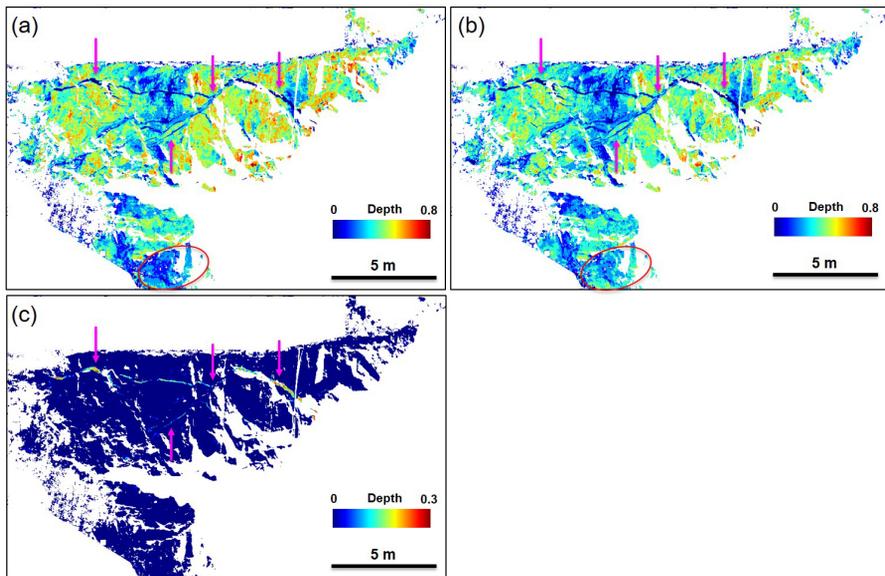


Fig. 8. Images of mineral absorption feature depth for Gyeonggi mine outcrop. Depth image at (a) 2336 nm, (b) 2320 nm, and (c) 2300 nm. Pink arrows indicate fractures and joints. Red circle indicate an area where the absorption depth value is larger at 2320 nm than the absorption depth value at 2336 nm.

다. 흡수 깊이는 초분광 영상에서 추출된 endmember들을 고려해 방해석(2,336nm), 백운석(2,320 nm), 고령석 및 일라이트(2,220 nm)의 주요 흡수 특징 위치에서 계산되었다. 가사리 A 광산에서는 마그네사이트의 주요 흡수 특징 위치(2,300 nm)에서 흡수 깊이를 추가로 계산하였다.

경기광업 노두에서 방해석의 흡수특징과 관련된 2,336 nm에서의 흡수는 단열(fracture)과 단열 주변 일부 그리고 하부층 일부를 제외하고 노두 전체에서 전반적으로 깊게(0.4 이상) 나타난다(그림 8a). 백운석 흡수 특징과 관련된 2,320 nm에서의 흡수 양상은 전체적으로 깊이 값이 약간 감소하긴 하지만 2,336 nm에서의 흡수 양상과 매우 유사하게 나타난다(그림 8b). 2,320 nm와 2,336 nm 모두에서 높은 흡수 깊이 값(0.4 이상)을 보이는 위치에서 영상 스펙트럼들을 확인한 결과 2,336 nm에서 최대 흡수가 나타나는 방해석 스펙트럼들로 확인되었다. 경기광업 노두에서는 방해석이 백운석에 비해 훨씬 깊은 흡수를 가지기 때문에 2,320 nm에서도 백운석에 비해 높은 흡수 깊이 값을 가지는 것으로 나타났다(그림 9). 따라서 특정 파장 위치 한 곳에서 흡수 깊이만으로 백운석과 방해석을 구분하는 것은 어렵다는 것을 알 수 있다. 하지만 노두 하부 일부에서는 2,336 nm에서의 흡수 깊이보다 2,320 nm에서 흡수 깊이

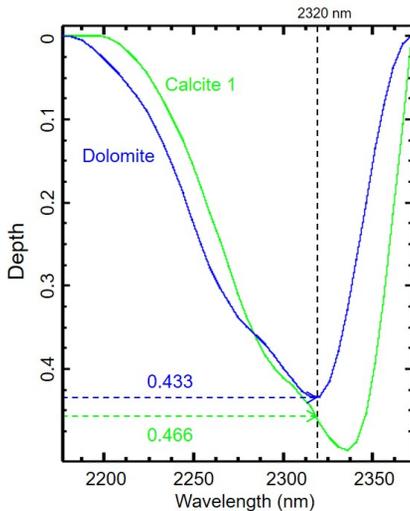


Fig. 9. Comparison of absorption depth at 2320 nm of continuum removed-dolomite and calcite spectra. These spectra are the endmembers extracted from the Gyeonggi mine (Fig. 7a).

가 더 크게 나타나는 영역을 확인할 수 있는데(빨간색 타원, 그림 8a와 8b), 이러한 특징은 백운석이 존재할 가능성이 크다는 것을 의미하며 현장조사에서도 이 위치에서 백운석을 확인할 수 있었다. 2,320, 2,336 nm에서 흡수 깊이 영상에서는 현장에서 관찰하기 어려운 여러 개의 얇은(약 1.5-9 cm 두께) 단열들도 확인시켜 준다(그림 8a와 8b). 이 단열들에서는 2,320, 2,336 nm에서 흡수가 거의 나타나지 않는 반면 2,200 nm에서 상대적으로 깊은 흡수를 보이기 때문에 고령석 또는 일라이트와 같은 층상 규산염 광물과 관련이 있을 것으로 보인다(그림 8c).

가사리 A 광산 노두에서 방해석과 관련된 2,336 nm에서의 흡수는 하부에서 깊게 나타난다(그림 10a). 가사리 A 광산 노두에서 2,336 nm에서의 흡수는 경기광업 노두에서의 2,336 nm 흡수와 비교해서 더 강하게 나타난다. 이것은 석회암 시료들의 분광학적 특성에도 일치하며 방해석의 백색도와 관련이 있을 수 있다(그림 6). 경기광업 노두와 마찬가지로 가사리 A 광산 노두에서도 2,336 nm에서 깊은 흡수를 보이는 영역들은 백운석 흡수 특징과 관련된 2,320

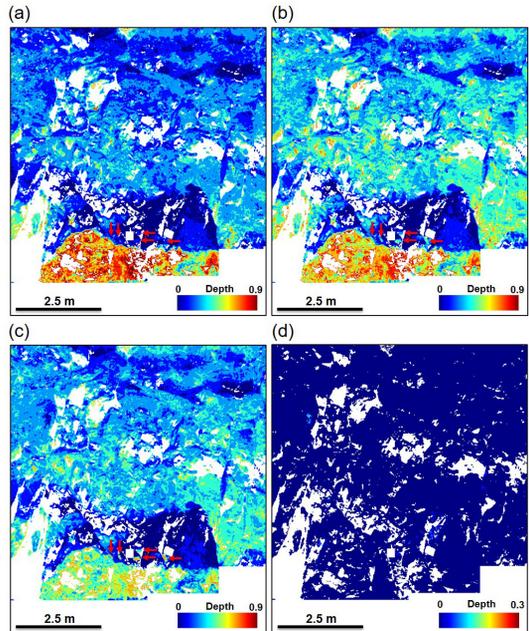


Fig. 10. Images of mineral absorption feature depth for Gasari A mine outcrop. Depth image at (a) 2336 nm, (b) 2320 nm, (c) 2300 nm, and (d) 2220 nm. Red arrows indicate the location of magnesite samples placed on the outcrop.

nm에서도 상당히 깊은 흡수가 발생한다(그림 10b). 이 영역 바로 위로는 2,320 nm와 2,336 nm 모두에서 약한 흡수가 나타나는 영역이 존재하는데 이 위치에서 채취된 암석시료는 암회색의 백운암이며 분광측정에서도 매우 얇은 흡수특징을 나타냈다(20SW-7-1, 20SW-7; 그림 6). 이 영역 위로는 대부분 2,336 nm에서의 흡수 보다 2,320 nm에서 더 깊은 흡수가 나타나기 때문에 백운석의 분포가 예상된다. 그림 10c는 마그네사이트와 관련된 2,300 nm에서의 흡수 깊이를 계산한 결과를 보여준다. 마그네사이트 암석시료가 배치된 위치(빨간색 화살표, 그림 10c)에서 비교적 높은 흡수 깊이 값을 보이지만 방해석과 백운석으로 예상되는 노두 일부에서도 높은 흡수 깊이 값을 보인다. 따라서 2,300 nm에서의 흡수 깊이 차이만으로는 마그네사이트를 방해석, 백운석과 구분하기 어려웠다. 가사리 A 광산 노두에서는 층상 규산염 광물과 관련된 2,220 nm에서의 흡수특징은 거의 나타나지 않았다(그림 10d).

5.2.3 광물 분포도

경기광업 노두의 초분광 영상으로부터 추출된 endmember들(그림 7a; 표 1)을 이용한 MRSFF 적용을 통해 노두에 분포하는 대표적 광물들의 공간적 분포를 확인할 수 있었다(그림 11). MRSFF 분류 결과는 노두의 대부분이 방해석으로 이루어져 있음을 보여주며, 2336 nm에서 흡수 깊이가 다른 세 종류

의 방해석을 구분해서 보여준다. 짙은 녹색으로 표현된 흡수 깊이가 얇은 방해석은 일부 단열과 단열 주변부에 발달하고 있으며, 노두 상부에 비해 하부에서 더 우세한 것으로 나타난다. 이러한 흡수 깊이 차이는 앞서 언급한 것처럼 유기물의 양과 관련이 있을 수 있다. 얇은 흡수를 가지는 석회암 층 아래로는 백운석(파란색)과 활석(보라색)이 우세한 영역이 관찰된다. 이 영역은 주변 석회암 영역과 매우 비슷하기 때문에 현장에서 육안으로는 구분이 어려웠다. 한편 MRSFF 분류 결과에서는 일라이트(빨간색)와 고령석(노란색)으로 이루어진 여러 단열들도 쉽게 확인할 수 있다.

가사리 A 광산 노두의 초분광 영상으로부터 추출된 endmember들(그림 7b; 표 1)을 MRSFF에 적용한 결과 노두의 대부분이 백운석(파란색 계열)으로 분류되었으며 하부에 방해석(녹색 계열)의 분포가 확인된다(그림 12). 가사리 A 광산 노두에서는 현장에서 백운암과 석회암을 암석의 색상으로도 어느 정도 구분할 수 있지만, MRSFF 분류 결과는 백운암과 석회암의 경계면을 보다 분명하게 보여줄 뿐만 아니라 흡수강도 차이를 기반으로 백운석과 방해석을 더욱 세분화해서 보여준다. 경기광업 노두에 대한 MRSFF 분류 결과에서는 2,336 nm에서 상대적으로 얇은 흡수를 보이는 방해석이 많이 확인된 반면 가사리 A 광산 노두에서는 깊은 흡수를 보이는 방해석(밝은 녹색)이 상대적으로 더 많이 확인된다. 또한 경기광

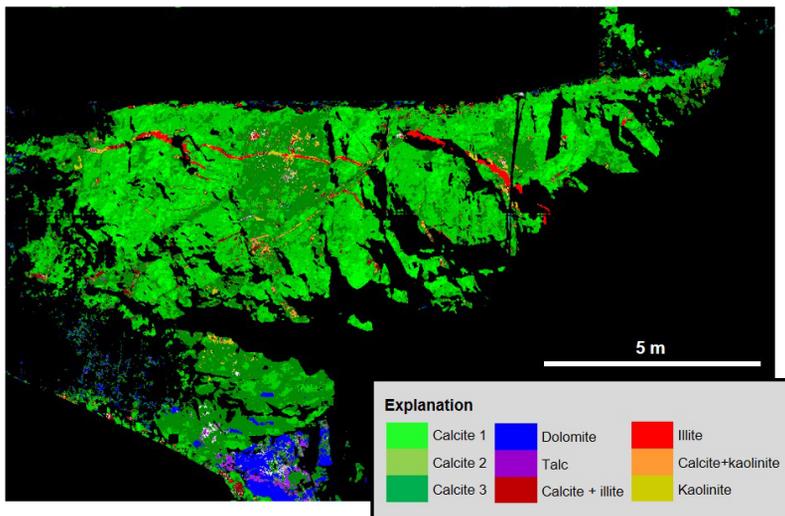


Fig. 11. MRSFF mineral map of the Gyeonggi mine outcrop using image endmembers (Fig. 7a).

업 노두 영상에서는 2,320 nm에서 상대적으로 깊은 흡수를 가지는 백운석 endmember만 추출되었지만 가사리 A 광산 노두에서는 흡수 깊이가 다른 여러 백운석 endmember들이 추출되었다. 가사리 A 광산 노두에 대한 MRSFF 분류 결과는 상대적으로 얇은 흡수 특징을 가지는 백운석(어두운 파란색)이 많이 분포하는 것으로 나타났다. 이러한 결과들은 앞서 방해석과 백운석을 포함하는 암석 시료들을 대상으로 측정한 분광학적 특성들과 잘 일치한다(그림 6). MRSFF 결과에서 어떤 광물로도 할당되지 않은 일부 영역이 나타난다. 이러한 화소들은 분류에 이용된 어떤 endmember들과도 유사하지 않다는 것을 의미하며 주로 석회암 바로 위 영역에서 관찰된다(그림 12). 이 영역은 흡수 깊이가 영상에서도 매우 약한 흡수가 나타났던 곳(그림 10a와 10b)으로 암회색의 백운암이 주로 분포한다(20SW-7-1; 그림 6과 13b).

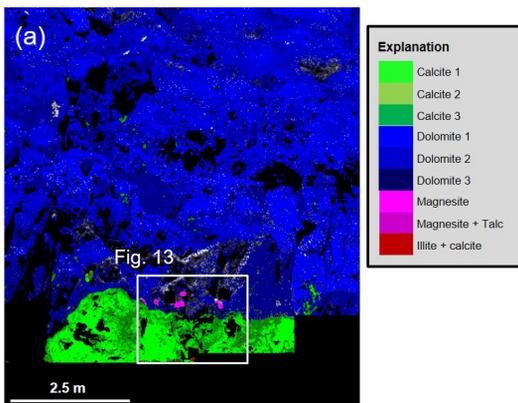


Fig. 12. MRSFF mineral map of the Gasari A mine outcrop using image endmembers (Fig. 7b).

따라서 흡수깊이를 기반으로 하는 MRSFF 분류에서는 어떠한 클래스로도 할당되지 않았다. 마그네사이트는 MRSFF 영상에서 분홍색으로 표현되어 있다(그림 12). 잡음으로 인한 오 분류 화소들이 일부 확인되지만 노두에 배치된 마그네사이트 암석 시료들을 매우 잘 탐지하고 있음을 알 수 있다(그림 13a).

6. 토의 및 결론

본 연구에서는 탄산염 광물에 대한 탐사 및 연구를 위한 접근법 중 하나로 지상기반 초분광 기술의 적용 가능성을 평가하기 위해 경기광업과 가사리 A 광산의 탄산염 노두를 대상으로 초분광 영상 분석을 수행하였다. 초분광 영상에는 상당한 양의 고유 잡음뿐만 아니라 대기효과에 의한 잡음이 포함되었다. 잡음들은 몇 가지 보정을 통해 어느 정도 제거되었다. 분류 결과는 이러한 잡음의 영향을 받을 뿐만 아니라 광량 같은 촬영 조건과 풍화 및 요철과 같은 노두 상태에도 영향을 받는다. 초분광 영상 획득과 분석 결과는 사용자의 지식과 경험에 많이 의존되므로, 초분광 영상을 이용한 정확한 광물 탐지와 분류를 위해서는 영상 획득과 전처리 과정에 대한 신중한 접근이 요구된다. 경기광업과 가사리 A 광산 노두의 전체에 대한 시료 채취가 불가능 하였다. 접근이 가능한 노두에서 채취된 석회암 및 백운암 시료와 초분광 영상 비교를 위한 마그네사이트 시료에 대한 XRD 회절 분석과 분광측정 결과들은 초분광 영상을 이용한 탄산염 광물 분류 결과에 대한 높은 정확도를 뒷받침해 준다. 초분광 영상 분석을 위해 사용된 기법 중 특정 파장 위치에서 흡수깊이를 계

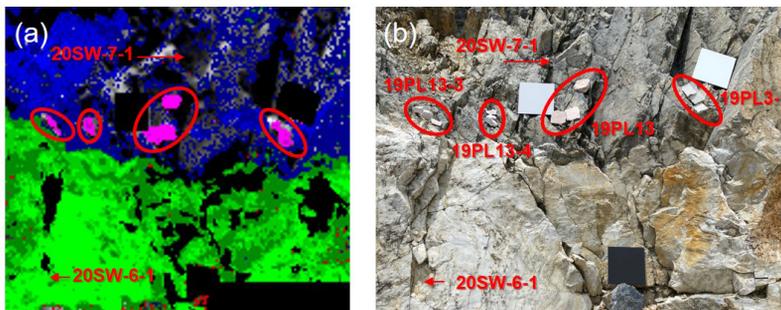


Fig. 13. Subset of the Gasari A mine outcrop. (a) MRSFF mineral map. (b) Field photograph. Red circles indicate the location of magnesite samples placed on the outcrop. Red arrows show the location of calcite (20SW-6-1) and dolomite (20SW-7-1) samples.

산하는 연속체 제거는 CO_3 , Al-OH에 의한 흡수 특징을 구분하는데 효과적이었지만 흡수 특징이 나타나는 파장의 위치가 서로 가까운 방해석, 백운석, 마그네사이트와 같은 탄산염 광물들끼리는 구분할 수 없었다. 연속체 제거 기법은 분석 방법이 쉽고 간단하기 때문에 시료 채취 위치의 선정이나 탄산염암과 비 탄산염암의 구분과 같은 현장에서 빠른 검토가 필요할 때 효과적인 방법으로 여겨진다. 여러 파장 위치에서 광물 고유의 흡수특징과 RMS 오차를 이용하는 MRSFF를 사용해 세분화된 광물 분포도를 작성할 수 있었다. 특히 경기광업 노두에서는 현장에서 눈으로는 식별하기 어려운 방해석과 백운석을 구분하고 고령석과 일라이트로 채워진 다양한 크기의 단열들을 확인할 수 있었다. 게다가 MRSFF를 이용하면 흡광도 차이를 기반으로 방해석과 백운석을 더욱 세분화시켜 분류할 수 있었다. 이러한 정보는 탄산염 광물의 유기물 함량, 입자 크기, 분급, 다공성과 같은 특성과 관련이 있기 때문에 탄산염 노두에 대한 지질학적 해석에 도움이 될 수 있다.

일반적으로 초분광 영상 기술만으로 노두의 지질을 이해하고 해석하는 것에는 한계가 있지만, 이는 현장 관찰과 화학분석 자료와 함께 병행하면 보다 유용하게 사용될 수 있다. 노두에 대한 지질학적 해석이나 정보획득을 위해 지상에서 촬영한 초분광 영상을 활용하는 것은 몇 가지 이점이 있다. 첫째, 시간과 비용이 많이 소모되는 화학분석 없이도 노두에서 고해상도의 광물 분포 양상을 빠르고 정확하게 확인할 수 있다. 두 번째는 직접 접근이 어려운 영역에 대해 상세하고 신뢰할 수 있는 광물 정보를 제공할 수 있다는 점이다. 예를 들어 도로 사면이나 노천 광산에서 점토광물의 유형과 풍부도를 탐지하는 것은 잠재적인 사면 붕괴 위험성을 평가하는데 도움이 될 수 있다. 점토층은 물을 흡수하면 최대 4배 부피가 팽창할 수 있으며, 특히 스멕타이트 그룹의 점토 광물의 부피 팽창 가능성이 가장 크다(Goetz *et al.*, 2001). 육안으로 현장에서 점토의 유형을 결정하는 것은 쉽지 않으며 접근이 어려운 위치에서 발달하고 있는 층들에 대한 직접적인 조사는 안전성에 문제가 있다.

지상기반 초분광 영상을 라이더 스캐닝과 함께 사용하면 높은 정확도의 3차원 지질모델을 만들 수 있다(Kurz *et al.*, 2013). 이러한 방법은 특히 직접적인 조사가 어려운 높은 수직 노두 면에 대한 광물 정

보뿐만 아니라 층서 및 구조 분석 등을 위한 위치 정보 기반의 수치화된 지질매핑을 수행할 수 있다. 또한 무인기 기반의 초분광 영상 사용은 넓은 지역에 대한 지표 지질 정보를 빠른 시간 안에 획득할 수 있는 효과적인 방법이다. 외국의 경우 전통적인 방법으로는 획득하기 어려운 지질 정보를 얻거나 조사시간을 단축시키기 위해 실험실/지상/항공 초분광 영상을 이용한 다양한 지질학적 활용이 시도되고 있다. 우리나라의 경우 복잡한 지형과 풍부한 식생으로 인한 제약이 있지만, 신속한 탐사결과와 도출 및 광역적인 지질 분포 파악에 대한 초분광 영상 탐사의 장점은 국내 지질자원 탐사 또는 향후 북한 지역에 대한 광역적인 지질자원 탐사에서도 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2020년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회 융합연구단사업(No. CRC-15-06-KIGAM)의 지원을 받아 수행되었습니다. 노두 안내와 시료 채취에 도움을 주신 장재호 이사님(가사리 A 광산), 민광기 이사님(경기광업)께 감사드립니다.

REFERENCES

- Beckert, J., Vandeginste, V., McKean, T.J., Alroichidi, A. and John, C.M., 2018, Ground-based hyperspectral imaging as a tool to identify different carbonate phases in natural cliffs. *International Journal of Remote Sensing*, 39, 4088-4114.
- Bedini, E., 2011, Mineral mapping in the Kap Simpson, Central EAST Greenland, using HyMap and ASTER remote sensing data. *Advance in Space Research*, 47, 60-73.
- Bierwirth, P., Huston, D. and Blewett, R., 2002, Hyperspectral mapping of mineral assemblages associated with gold mineralization in the Central Pilbara, Western Australia. *Economic Geology*, 97, 819-826.
- Boardman, J.W. and Kruse, F.A., 2011, Analysis of imaging spectrometer data using N-dimensional geometry and a Mixture-Tuned Matched Filtering approach. *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing*, 49, 4138-4152.
- Bowers, T.L. and Rowan, L.C., 1996, Remote mineralogic

- and lithologic mapping of the ice river alkaline complex, British Columbia, Canada, using AVIRIS data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62, 1379-1385.
- Choe, E.Y., 2003, Mapping geological materials by analyzing the spaceborne hyperspectral image. M.S. thesis, Chonnam National University, Gwangju, 57 p (in Korean with English abstract).
- Clark, R.N., 1999, Spectroscopy of rocks, and minerals and principles of spectroscopy. In: Renz, A.N. and Ryerson, R.A., (third eds.), *Remote Sensing for the Earth Sciences, Manual of Remote Sensing*. John Wiley & Sons, New York, 3-58.
- Clark, R.N., King, T.V.V., Klejwa, M., Swayze, G.A., Vergo, N., 1990, High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95, 12653-12680.
- Clark, R.N., Swaze, G.A., Wise, R., Livo, K.E., Kokaly, R.F., Sutely, S.J., Dalton, J.B., McDougal, R.R. and Gent, C.A., 2003, *Imaging Spectroscopy; Earth and Planetary Remote Sensing with the USGS Tetracorder and Expert Systems*. *Journal of Geophysical Research*, 108, 5131.
- Crosta, A.P., Sabine, C. and Taranik, J.V., 1998, Hydrothermal alteration mapping at bodie, california, using AVIRIS hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment*, 65, 309-319.
- Crowley, J.K., 1986, Visible and near-infrared spectra of carbonate rocks: reflectance variations related to petrographic texture and impurities. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91, 5001-5012.
- Farrand, W.H., Singer, R.B. and Merenyi, E., 1994, Retrieval of apparent surface reflectance from AVIRIS data-a comparison of empirical line, radiative-transfer and spectral mixture methods. *Remote Sensing of Environment*, 47, 311-321.
- Gaffey, S.J., 1986, Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35-2.55 microns): calcite, aragonite, and dolomite. *American Mineralogist*, 71, 151-162.
- Gaffey, S.J., 1987, Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35-2.55 um): anhydrous carbonate minerals. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92, 1429-1440
- Geological Investigation Corps of the Taebaeksan Region, 1962, *Geologic Atlas of Taebaegsan Region*. The Geological Society of Korea, 107 p.
- Gersman, R., Ben-Dor, E., Beyth, M., Avigad, D., Abraha, M. and Kibreab, A., 2008, Mapping of hydrothermally altered rocks by the EO-1 Hyperion sensor, Northern Danakil Depression, Eritrea. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 3911-3936.
- Goetz, A.F.H., Chabrilat, S. and Lu, Z., 2001, Field reflectance spectrometry for detection of swelling clays at construction sites. *Field Analytical Chemistry and Technology*, 5, 143-155.
- Harris, A.T., 2006, Spectral mapping tools from the earth sciences applied to spectral microscopy data. *Cytometry Part A*, 69A, 872-879.
- Hong, S.H. and Choi, W.C., 1978, Explanatory text of the geological map of Geumsan sheet (1:50,000). Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources, 66 p (in Korean and English).
- Hyun, C.U. and Park, H.D., 2013, Limestone mapping in Gangwon area, South Korea using EO-1 Hyperion hyperspectral satellite imagery. *Journal of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 50, 44-55.
- Kim, R.H., Sohn, S.W. and Lee, H.K., 2004, Report of the intensive survey on limestone in Geumsan area. Korea Resources Corporation, 151 p (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.-H., Kim, G.B., Choi, S.-G. and Kim, C.S., 2016, SWIR application for the identification of high-grade limestones from the upper Pungchon formation. *Economic and Environmental Geology*, 49, 335-347.
- Koh, S.-M., Lee, G., Yu, B., Kim, N. and Lee, B.H., 2019, Geology and mineralization on the northern part of Korean peninsula. Korea Institute of Geology and Mineral Resources, 324 p (in Korean).
- Kokaly, R.F., Clark, R.N., Swayze, G.A., Livo, K.E., Hoefen, T.M., Pearson, N.C., Wise, R.A., Benzell, W.M., Lowers, H.A., Driscoll, R.L. and Klein, A.J., 2017, USGS Spectral Library Version 7 (Data Series 1035). U.S. Geological Survey, 61 p.
- Kozak, P.K., Duke, E.F. and Roselle, G.T., 2004, Mineral distribution in contact-metamorphosed siliceous dolomite at Ubehebe Peak, California, based on airborne imaging spectrometer data. *American Mineralogist*, 89, 701-713.
- Krupnik, D., Khan, S.D., Okyay, U., Hartzell, P. and Zhou, H., 2016, Study of Upper Albian rudist buildups in the Edwards Formation using ground-based hyperspectral imaging and terrestrial laser scanning. *Sedimentary Geology*, 345, 154-167.
- Kruse, F.A., 1988, Use of airborne imaging spectrometer data to map minerals associated with hydrothermally altered rocks in the northern grapevine mountains, Nevada, and California. *Remote Sensing of Environment*, 24, 31-51.
- Kurz, T.H., Buckley, S.J. and Howell, J.A., 2013, Close-range hyperspectral imaging for geological field studies: work-

- flow and methods. *International Journal of Remote Sensing*, 34, 1798-1822.
- Kurz, T.H., Dewit, J., Buckley, S.J., Thurmond, J.B., Hunt, D.W. and Swennen, R., 2012, Hyperspectral image analysis of different carbonate lithologies (limestone, karst and hydrothermal dolomites): the Pozalagua Quarry case study (Cantabria, North-west Spain). *Sedimentology*, 59, 623-645.
- Naletto, J.L.C., Perrotta, M.M., Costa, F.G. and Souza Filho, C.R., 2019, Point and imaging spectroscopy investigations on the Pedra Branca orogenic gold deposit, Troia Massif, Northeast Brazil: implications for mineral exploration in amphibolite metamorphic grade terrains. *Ore Geology Reviews*, 107, 283-309.
- Nieke, J., Schlapfer, D., Dell'Endice, F., Brazile, J. and Itten, K.I., 2008, Uniformity of imaging spectrometry data products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46, 3326-3336.
- Noh, J.H., Lee, H.-K., Lee, H.C., Park, J.-R., Jang, B.-G., Yoon, W.S., Jeong, U.J., Kim, C.S., Im, B.-R., Mo, W., Min, S.H. and Oh, Y., 2010, Report of the intensive survey on limestone in Jeongseon-Nam area. Korea Resources Corporation, 151 p (in Korean with English abstract).
- Noh, J.H. and Oh, S.J., 2005, Hydrothermal alteration of the Pungchon limestone and the formation of high-Ca limestone. *Journal of the Geological Society of Korea*, 41, 175-197 (in Korean with English abstract).
- Okyay, Ü., Khan, S., Lakshmikantha, M. and Sarmiento, S., 2016, Ground-based hyperspectral image analysis of the lower mississippian (Osagean) reeds spring formation rocks in Southwestern Missouri. *Remote Sensing*, 8, 1018.
- Rockwell, B.W. and Hofstra, A.H., 2008, Identification of quartz and carbonate minerals across northern Nevada using ASTER thermal infrared emissivity data-Implications for geologic mapping and mineral resource investigations in well-studied and frontier areas. *Geosphere*, 4, 218-246.
- Savitzky, A. and Golay, M.J.E., 1964, Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 36, 1627-1639.
- Shon, G.S., Park, C.K., Sur, K.H. and Shon, S.W., 2001, Report of the Intensive survey on limestone in Jeongseon-Sindong area. Korea Resources Corporation, 114 p (in Korean with English abstract).
- Son, Y.S., Lee, B.H., Kim, N.H. and Koh, S.M., 2020, Evaluating detection for carbonates using ground based-hyperspectral sensor. *Proceedings of the Annual Joint Conference, The Petrological Society of Korea and the Mineralogical Society of Korea*, August 20, Korea, 123-125 (in Korean).
- Sun, L., Khan, S.D., Sarmiento, S., Lakshmikantha, M.R. and Zhou, H., 2017, Ground-based hyperspectral imaging and terrestrial laser scanning for fracture characterization in the Mississippian Boone Formation. *International Journal of Applied Earth Observation Geoinformation*, 63, 222-233.
- Swayze, G.A., Clark, R.N., Goetz, A.F., Livo, K.E., Breit, G.N., Kruse, F.A., Sutley, S.J., Snee, L.W., Lowers, H.A., Post, J.L., Stoffregen, E.R. and Ashley, P.R., 2014, Mapping advanced argillic alteration at cuprite, Nevada, using imaging spectroscopy. *Economic Geology*, 109, 1179-1221.
- U.S. Geological Survey, 2020, Mineral commodity summaries 2020: U.S. Geological Survey, 200 p. <https://doi.org/10.3133/mcs2020>.
- van der Meer, F., 1995, Spectral reflectance of carbonate mineral mixtures and bidirectional reflectance theory: quantitative analysis techniques for application in remote sensing. *Remote Sensing Reviews*, 13, 67-94.
- van der Meer, F., 2004, Analysis of spectral absorption features in hyperspectral imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5, 55-68.
- van der Meer, F. and de Jong, S.M., 2002, *Imaging Spectrometry: Basic Principles and Prospective Applications*. Springer, Dordrecht, 425 p.
- Yang, K., Browne, P.R.L., Huntington, J.F., Walshe, J.L., 2001, Characterising the hydrothermal alteration of the Broadlands-Ohaaki geothermal system, New Zealand, using short-wave infrared spectroscopy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 106, 53-65.
- 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*, 4, 987-1003.
- Zimmermann, R., Brandmeier, M., Andreani, L., Mhopjeni, K. and Gloaguen, R., 2016, Remote sensing exploration of Nb-Ta-LREE-enriched carbonatite (Epembe/Namibia). *Remote Sensing*, 8, 11-17.

Received : September 25, 2020

Revised : October 26, 2020

Accepted : November 4, 2020