

당두 연-아연 광상의 스카른 광물의 분광학적 특성과 휴대용 분광계의 스카른 탐사 가능성에 대한 고찰

Spectroscopy of Skarn Minerals in Dangdu Pb-Zn Deposit and Assessment of Skarn Exploration Approaches Employing Portable Spectrometer

정 용 식(Yong Sik Jeong)¹ · 유 재 형(Jaehyung Yu)^{1*} · 고 상 모(Sang-Mo Koh)² ·
허 철 호(Chul-Ho Heo)²

¹충남대학교 지질환경과학과

(Department of Geology and Earth Environmental Sciences, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

²한국지질자원연구원 광물자원연구본부 광물자원연구실

(Mineral Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea)

요약 : 당두광상에서 산출되는 스카른 광물 및 섬아연석에 대한 분광분석을 실시하고 XRD 분석 및 편광현미경 관찰을 통해 휴대용 분광계를 이용한 스카른 광상 광물자원탐사에 있어서 효율성에 대해 고찰하였다. 그 결과, 단사휘석(회철휘석, 투휘석, 보통휘석), 석류석(회철석류석, 회반석류석), 녹립석, 방해석, 녹니석 및 섬아연석이 산출됨을 확인하였으며, 단사휘석, 석류석, 녹립석, 섬아연석의 경우 해당 광물의 단일표준분광정보와 매우 일치하는 반면, 녹니석은 방해석 및 단사휘석과 혼합된 형태의 분광특성이 나타난다. 분광특성분석과 XRD 분석 및 현미경관찰을 통한 교차검증 결과, 단사휘석, 석류석, 녹립석의 경우 80% 이상의 일치성을 보인 반면, 섬아연석, 녹니석, 방해석의 경우 50% 이하의 일치성을 보인다. 따라서 휴대용 분광계를 이용한 스카른 광상 탐사 시 단사휘석, 석류석, 녹립석의 정보제공에 효과적인 반면, 섬아연석, 녹니석, 방해석의 경우 부수적인 자료로 활용하는 것이 적절할 것으로 생각된다. 녹니석이나 방해석의 경우 효과적인 탐지를 위해서는 충분한 함량이 뒷받침되어야 할 것이다.

주요어 : 당두광상, 스카른 광상, 분광분석, 휴대용 분광계, 광물자원탐사

ABSTRACT : This study analyzed spectroscopic methods for characterization of skarn minerals and sphalerite occurring in Dangdu ore deposit, and effectiveness of portable spectrometer in skarn mineral resources exploration is discussed. The spectroscopic analyses identified clinopyroxene, garnet, epidote, calcite, chlorite and sphalerite where spectral curves of clinopyroxene, garnet, epidote, and sphalerite show single mineral spectral characteristics and those of chlorite are in a mixed form with calcite and clinopyroxene. The assessment of spectroscopic analyses based on XRD analysis and microscopic observation reveals that clinopyroxene, garnet, epidote correspond well with more than 80% of detection,

*Corresponding author: +82-42-821-6426, E-mail: jaeyu@cnu.ac.kr

but sphalerite, chlorite, and calcite showed below 50% of detection rate. It is expected that skarn deposit exploration using a portable spectrometer is more effective in detection of clinopyroxene, garnet, and epidote whereas spectroscopic data of sphalerite, chlorite, and calcite needs to be utilized as a supplementary data. For the effective detection of chlorite and calcite, their content in the samples needs to be sufficient.

Key words : Dangdu ore deposit, skarn deposit, spectroscopy, portable spectrometer, mineral resources exploration

서 언

휴대용 분광계는 광물자원탐사에 있어 현장에서 광물 확인에 유용하고, 특히 변질대 탐사에 탁월한 성능을 발휘하여 근대에 들어 광물자원 탐사 분야에 가장 큰 기여를 한 기술 중 하나로 여겨지고 있다. 일반적으로 가시광선-근적외선-단파적외선(VNIR-SWIR) 파장영역을 제공하는 분광계의 분광특성분석은 광물의 색, 광물을 이루는 분자결합구조, 원소의 종류, 광물의 결정도 등에 따라 나타나는 고유의 흡광특성 및 분광패턴을 기반으로 하며, 특히 단파적외선 파장영역에서 광물의 화학적 성분(OH, H₂O, NH₄, Al-OH, Fe-OH, Mg-OH, CO₃)에 따라 고유의 분광특성이 나타나는 것으로 잘 알려져 있다(Thompson *et al.*, 1999; Hauff, 2008; Kerr *et al.*, 2011; Pontual *et al.*, 2012).

이미 광물탐사분야의 선진국에서는 분광계를 활용하여 천열수 광상, 중열수 광상, 반암동광상, VMS, 킴벌라이트 등 관입암체와 연관된 환경에서 동반되는 칼륨 변질작용, 프로필리틱 변질작용, 필릭 변질작용, 이질-강이질 변질작용, 스카른화, 그라이젠화 등의 변질대 광물들을 대상으로 하는 분광학적 특성 연구뿐만 아니라(Thompson and Thompson, 1996; Thompson *et al.*, 1999; Hauff, 2008), 열수 변질대를 대상으로 분광계를 활용하는 광물탐사연구가 활발하게 진행되어 왔다(Thompson *et al.*, 1999; Yang *et al.*, 2000; Herrmann *et al.*, 2001; Sun *et al.*, 2001; Yang *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2002; Hinchey, 2011; Kerr *et al.*, 2011; Sonntag *et al.*, 2012; Zadeh *et al.*, 2014).

그러나 국내에서는 단파적외선을 이용한 열수변질광물의 신뢰도에 대한 연구(Kim *et al.*, 2002) 이외에는 분광분석을 이용한 광물탐사관련 연구 및 보고가 미비하며, 탐사분야에 있어 분광계의 활용도가 낮다. 뿐만 아니라 열수변질대의 변질광물

들을 대상으로 하는 분광계 적용 연구 사례에 비해 스카른 변질대를 대상으로 하는 분광학적 연구가 매우 드물다. 따라서 본 연구는 당두 연-아연 광상의 스카른 변질대로부터 채취한 대표 샘플을 대상으로 스카른 광물의 분광학적 특성을 확인하고, 또한 분광계로부터 확인한 광물들을 XRD 분석과 현미경 관찰을 통해 교차 검증을 실시함으로써 스카른 탐사에 있어 휴대용 분광계의 효율성에 대해 고찰하고자 한다.

연구지역

당두광상의 지질 및 광상개요

당두 연-아연 광상은 행정구역상 충청북도 제천시 금성면 중전리(북위 37°02' 59", 동경 128°11' 24")에 위치하는 스카른형(Pb-Cu-Zn-Ag) 광상이다. 연구지역은 선캄브리아기 기반암인 변성암류, 오르도비스기의 돌로마이트, 석회암, 석회규산염암, 혼펠스, 그리고 이를 관입한 중생대 쥐라기와 백악기의 화강암류 및 암맥들로 구성된다(Fig. 1). 선캄브리아기의 변성암류는 편암 및 천매암으로 구성되며, 당두광상의 서측, 중앙부, 동측에 분포한다. 오르도비스기의 퇴적암류는 홍월리 층에 속하는 돌로마이트와 삼태산층에 속하는 석회암, 석회규산염암, 혼펠스로 구성되며, 당두광상을 중심으로 동서 방향으로 넓게 분포한다(Fig. 1). 또한 당두광상의 북측에는 쥐라기 제천화강암이 남측에는 백악기 무암사 화강암이 각각 분포된다(Fig. 1). 특히 무암사 화강암의 경우 당두광상의 광화작용과 관련된 것으로 고려된다(Yun *et al.*, 1986). 당두광상은 삼태산층 석회암 내에 부존되어 있으며, 석회암층 내 열극을 따라 N20~40°W 방향으로 교대환 스카른 광상이다(Lim *et al.*, 2013).

기존의 연구에 의해 보고된 광체는 상부에 위치

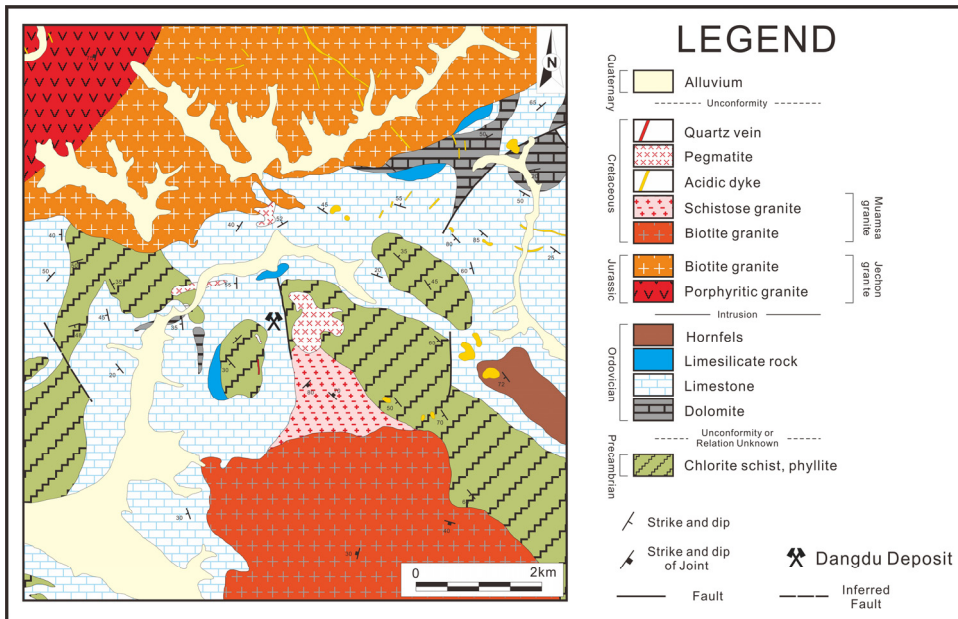


Fig. 1. Geologic map of Dangdu deposit (modified from Lim et al. 2013).

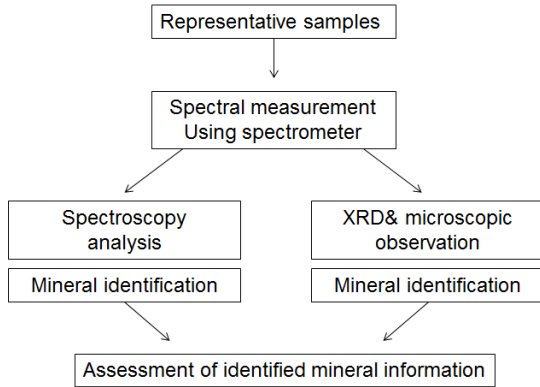


Fig. 2. Flow of methods conducted in this study.

하는 -30 m level 갱도에 간이승강기로부터 각각 5 m, 40 m, 120 m 지점에 3개의 광체가 확인되었으며, 하부에 위치하는 -63 m level 갱도의 경우 갱도 막장 부근에 한 개의 광체가 확인된 바 있다 (Lim et al., 2013). 이들 광체에서 주로 산출되는 주 광석광물로는 섬아연석, 황동석, 자류철석, 자철석, 황철석 등이 있으며, 광체 주변에 분포하는 모암은 모두 스키르화 되어있다. 특히 이들의 배태상과 광체의 형태를 볼 때 스키르화작용과 광화작용은 동시기에 이루어진 것으로 보고된 바 있다

(Lim et al., 2013). 또한 나머지 구간은 석회암과 혼펠스화된 셰일이 협재 되어 있는 것으로 확인된다(Lim et al., 2013). 당두광상의 스키르대는 스키르 광물과 광석광물의 조합 및 산출빈도에 따라 광체 중심부에서 외곽부로 갈수록 녹렴석-단사회석대, 녹렴석-단사회석-녹니석대, 녹렴석-석류석-단사회석대로 분류 된다(Lim et al., 2013). 산출되는 주 스키르 광물은 녹렴석, 휘석, 석류석, 녹니석, 투각섬석, 석영, 방해석이며, 광체 중심부에서 녹렴석과 휘석의 산출빈도가 높고, 광체 외곽부로 갈수록 석류석의 산출빈도가 높아지는 경향을 보인다 (Lim et al., 2013).

연구방법

당두광상에서 산출되는 스키르 광물의 분광특성 및 그 신뢰도를 고찰하기 위해, 본 연구는 스키르 시료에 대해 휴대용 분광계를 이용하여 가시광선, 근적외선, 및 단파적외선 분광특성분석을 실시하였고, 그 결과를 현미경 및 XRD 분석결과와 비교분석하여 분광분석결과를 검증하였다(Fig. 2).

앞에서 이미 기술한 바와 같이 당두광상에는 -30 m level과 -63m level에 입갱이 가능한 갱도가 존재하며 상부갱도에 3개의 광체, 그리고 하부 갱도에

1개의 광체가 확인되었다. 본 연구는 이 중 상부의 1개 광체, 하부의 1개 광체 등 총 2개의 광체 주변에 분포하는 스카른대의 시료와 당두광산 시추결과 보고서(KORES, 2012)에서 다루었던 12-2호공의 35 m 깊이에서 채취한 시료를 대상으로 하였다. -30 m level에서 선정된 시료는 간이승강기로부터 5 m 지점에 부존하는 광체 부근의 외벽에서 채취한 시료로써 기존의 연구(Lim *et al.*, 2013)에서 녹렴석-단사회석-녹니석대와 녹렴석-단사회석대에 해당하는 시료이며, 갱도 -63 m level에서 선정된 시료는 막장의 광체 주변부에 존재하는 녹렴석-단사회석-녹니석대의 시료에 해당한다. 또한 12-2호공 35 m 깊이에서 채취한 시료는 녹렴석-석류석-단사회석대의 시료이다.

각 스카른대를 대표하는 시료들에 대한 분광분석을 실시하기 위하여 Analytical Spectral Device (ASD)사의 Labspec 5100 분광계를 사용하였다. 본 기기는 350-2500 nm 파장영역에서 3-6 nm 분광해상도를 가지는 반사율 스펙트럼을 제공하며, 촬영대상의 표면에 바로 촬영할 수 있는 light-probe 방식과 파우더 시료를 촬영하는 mug-light 방식을 선택하여 사용할 수 있다. 본 연구에서는 시료의 슬랩면에서 촬영할 수 있는 light-probe 방식을 사용하였다. 촬영된 슬랩면의 분광곡선은 The Spectral Geologist 7.5(TSG 7.5)와 ENVI 4.8 소프트웨어를 활용하여 USGS (United States Geological Survey) 분광라이브러리 06과 JPL(Jet Propulsion Laboratory, NASA) ASTER 분광라이브러리 ver.2.0가 제공하는 표준 분광정보와 비교분석하였으며, 이를 통해 연구대상 시료에 존재하는 광물의 확인 및 분광특성을 정의하였다. 일반적으로 기존의 소프트웨어는 임의의 촬영된 분광곡선과 유사한 분광특성을 가지는 광물 확인 및 해석에 있어 매우 효과적인 기능을 제공하는 것으로 알려져 있으나, 소프트웨어가 제공하는 정보가 항상 신뢰할 만한 결과를 낼 수 없는 경우도 빈번하다(Kerr *et al.*, 2011). 따라서 본 연구에서는 보다 효과적인 분광분석을 위해서 소프트웨어가 제공하는 결과에 대해 반사율 분광곡선 비교 및 Hull-quotient 분광곡선비교를 적절히 선택하여, 연구대상 시료의 분광특성구분이 용이하도록 각각의 스펙트럼정보를 정밀하게 비교하였다. Hull-quotient 분광곡선의 경우, 반사율 분광자료에서 나타나는 흡광특성의 효과를 향상시키는 보정을 실시한 분광곡선으로, 임의의 반사율 분광곡선

에서 나타나는 흡광특성의 구별이 용이하지 않을 경우, Hull 보정을 통해 강조시킴으로써, 분광특성 분석을 통한 광물의 확인에 있어 매우 유용하게 이용되는 보정방법이다(Pontual *et al.*, 2012)

당두광산에서 산출되는 스카른 광물들에 대한 분광분석의 효율성을 검증하기 위하여 분광분석을 실시한 슬랩면에 대해 각각 박편을 제작하여 편광 현미경을 통한 광물관찰을 실시하고, 분말시료를 제작하여 한국지질자원연구원의 Rigaku사 SmartLab 모델을 통해 XRD(X-ray diffraction) 분석을 수행하였다. 이를 통해 휴대용 분광계를 이용하여 탐사에 활용 가능한 스카른 광물들에 대해 검증하여, 분광특성분석의 효율성에 대하여 고찰하였다.

결과 및 토의

분광특성분석

본 연구에서는 분광특성분석을 활용한 광물정보의 구분을 위해 흡광위치, 반사율 강도, 흡광특성의 형태 및 전체적인 분광곡선의 패턴을 고려하였으며(Thompson *et al.*, 1999), 분광라이브러리로부터 얻은 광물의 단일표준분광곡선을 시료의 분광자료와 직접 비교하여 광물정보를 추출하였다. 하지만 채취된 시료의 분광계 촬영 시 촬영 시료에 존재하는 광물은 단일광물이 아닌 혼합된 형태로 존재할 수 있으므로, 본 연구에서는 분광특성분석을 통한 광물정보추출에 있어 광물의 혼합비율에 따른 영향뿐만 아니라 일정 파장영역에서 반사율 강도 및 흡수정도가 강한 광물들의 분광특성이 함께 반영될 수 있음을 고려하였다(Thompson *et al.*, 1999; Kerr *et al.*, 2011). 또한 시료의 분광자료에서 나타나는 반사율 강도가 다소 약해 뚜렷한 분광특성을 확인하기 어려운 경우 반사율 분광곡선정보 뿐만 아니라 Hull-quotient 분광곡선정보를 참고하여 분광정보를 비교하였다.

연구지역에서 산출되는 스카른 광물들의 분광특성을 분석해 본 결과, 분광정보가 단일 분광곡선으로 나타나는 경우와 여러 광물들이 혼합된 형태로 나타나는 경우를 확인할 수 있었다. 이는 시료에 분포하는 광물이 순수한 단일광물이 아닌 다양한 스카른 광물들의 조합으로 분포하는 원인일 것으로 사료된다. 따라서 동일시료 내에서도 분광계를 이용하여 촬영하는 부분에 따라서 다양한 분광곡선을 확인할 수 있으며, 본 연구에서는 각 시료 중

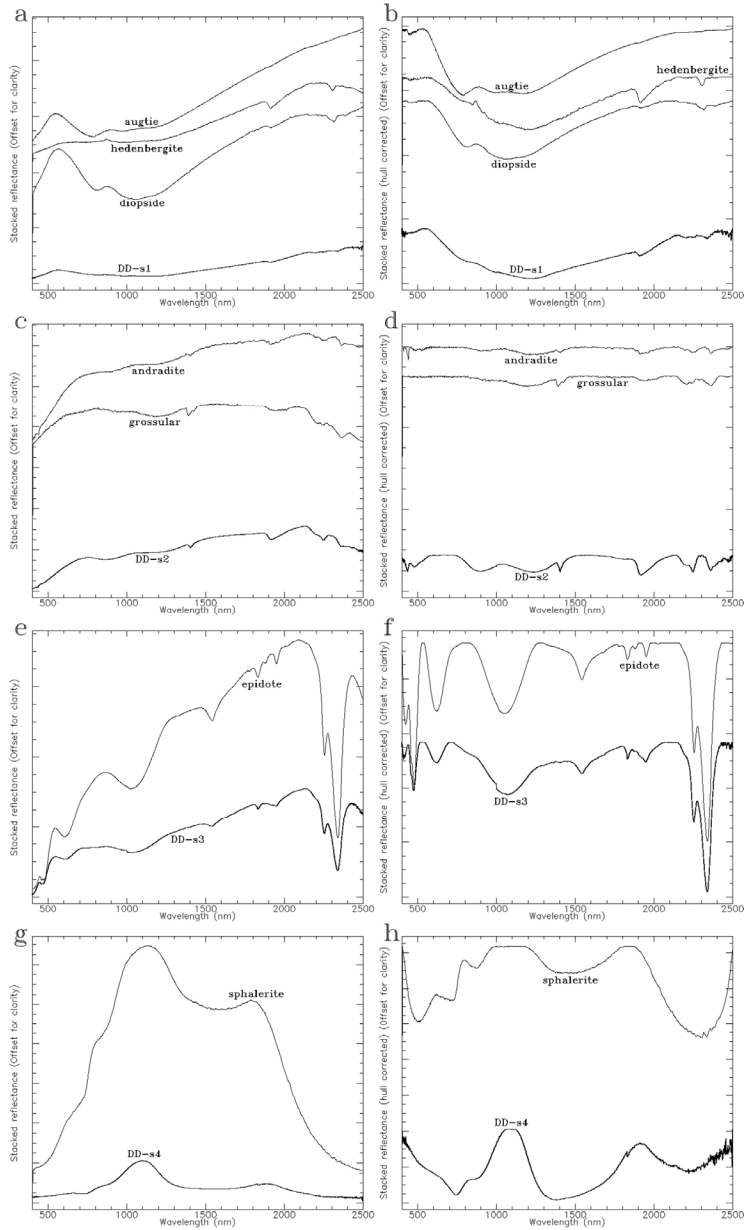


Fig. 3. VNIR-SWIR stacked plot with representative spectra of skarn minerals and sphalerite showing single mineral spectral characteristics in Dangdu ore deposit compared with reference spectra from standard library data; (a) Reflected spectrum of DD-s1 corresponded with reference spectra of augite, hedenbergite, and diopside. (b) Stacked hull corrected spectrum of DD-s1 and reference spectra of augite, hedenbergite, and diopside. (c) Reflected spectrum of DD-s2 sample and reference spectra of garnet (andradite and grossular). (d) Stacked hull corrected spectra of DD-s2 and spectra of reference garnet (andradite and grossular). (e) Reflected spectra of DD-s3 and reference epidote. (f) Hull corrected spectra of DD-s3 and reference epidote. (g) Reflected spectrum of DD-s4 and reference sphalerite. (h) Hull corrected spectra of DD-s4 and reference sphalerite.

단일분광곡선 형태로 광물정보가 나타나는 곡선을 s(single, 예 DD-s1), 혼합된 형태로 나타나는 곡선을 m(mixed, 예 DD-m1)으로 명명하였다.

연구 대상 시료 중 단일분광곡선의 특징을 나타내는 광물로는 단사휘석(회철휘석, 투휘석, 보통휘석), 석류석(회철석류석, 회반석류석), 녹렴석, 섬아연석으로, 각각 DD-s1, DD-s2, DD-s3, DD-s4 시료의 분광곡선에서 관찰되었다. 이들의 분광곡선을 분광라이브러리의 단사휘석, 석류석, 녹렴석, 섬아연석의 표준분광곡선과 비교해 본 결과 이들의 전반적인 흡광특성과 반사율의 분포가 매우 유사함을 확인하였다(Fig. 3). 회철휘석(hedenbergite), 투휘석(diopside), 보통휘석(augite)의 반사율 표준분광곡선을 살펴보면, 공통적으로 700 nm 부근에서 급격한 음의 기울기를 보이다 800 nm과 1100 nm 부근에서 특징적인 흡광특성을 보이며, 이를 기점으로 파장이 증가함에 따라 반사율이 증가하는 경향을 보인다(Fig. 3a). 특히 회철휘석과 투휘석은 보통휘석과는 다르게 1900 nm에서 흡광 후 완만한 양의 기울기를 나타내는 특징과 2300 nm 부근에서의 흡광특성이 특징적이다(Fig. 3a). 특히 근적외선 영역인 800 nm 및 1100 nm 부근에서 관찰되는 흡광특성은 광물 내에 존재하는 철(Fe)성분에 의해 나타나는 고유의 분광특성으로, 단사휘석의 구분에 있어 유용한 특징이다(Hauff, 2008; Pontual *et al.*, 2012). 그러나 반사율 분광곡선의 분광특성을 이용하여 비교할 경우, 연구대상 시료인 DD-s1의 반사도 강도가 표준시료와 비교했을 때 상대적으로 작으므로, 연구시료의 분광곡선과 표준분광곡선과의 비교분석이 상대적으로 어려울 수 있었으나(Fig. 3a), 이들 분광곡선을 Hull-quotient 분광곡선으로 변환하여 살펴본 결과, 연구시료의 흡광특성이 단사휘석의 표준분광특성과 가시광선-근적외선-단파적외선영역에 걸쳐 일치함을 확인하였다(Fig. 3b).

석류석의 반사율 표준분광곡선은 회철석류석(Andradite)과 회반석류석(Grossular)이 공통적으로 1200 nm, 1400 nm, 1900 nm, 2250 nm, 2360 nm 부근에서 흡광특성을 보이며, 회철석류석에서 철(Fe)성분에 기인한 450 nm 및 900 nm의 흡광특성이 더 잘 나타나는 특징을 갖는다(Fig. 3c) (Hauff, 2008). 이들 분광특성 중 근적외선영역에서 나타나는 흡광특성의 경우, 단사휘석의 경우와 마찬가지로 철성분에 의해 기인한 것이나, 이들의 흡광위치는 단사휘석에 비해 장파장영역으로 다소 시프트

된 형태를 보인다(Fig. 3a, 3c). 회철석류석의 전체적인 반사율 분광패턴은 400-700 nm까지 급격한 양의 기울기를 보이다 근적외선에서 단파적외선영역인 2150 nm까지 완만한 양의 기울기를 보인 후 반사율이 감소하는 특징을 나타낸다(Fig. 3c). 회반석류석(Grossular)의 반사율곡선은 전체적으로 회철석류석과 유사하나 400-700 nm 구간에서 더 완만한 기울기를 보인다(Fig. 3c). 연구대상시료인 DD-s2 분광정보를 살펴보면, 전체적인 분광반사율은 회철석류석과 유사하나 파장이 짧은 가시근적외선 영역의 분광반사율은 회반석류석의 분광반사곡선과 흡사한 특징을 가지며, 흡광특성의 경우 회철석류석과 회반석류석의 공통적인 흡광특성과 회철석류석의 특징인 가시근적외선 영역의 450 nm와 900 nm의 흡광특성이 관찰된다(Fig. 3c, 3d). 이는 연구대상시료의 분광곡선이 회철석류석과 회반석류석의 정보를 함께 가지고 있는 것으로, 시료 내에 두 종류의 석류석이 모두 존재할 수 있음을 지시한다.

녹렴석의 반사율 표준분광곡선을 살펴보면 400 nm, 460 nm, 610 nm, 1030 nm, 1540 nm, 1830 nm, 1950 nm, 2250 nm, 2340 nm 부근에서 뚜렷한 흡광특성이 나타나며, 특히 근적외선 영역에서 넓고 강하게 나타나는 흡광특성과, 단파적외선 후 반영역에서 ‘doublet’ 형태로 나타나는 흡광특성이 두드러진다(Fig. 3e). ‘doublet’ 형태의 분광특성은 인접한 위치에서 발생하는 흡광특성에 의해 나타나는 분광학적 현상으로, 특정구성성분의 함량 변화, 결정도, 물 함유량 변화 등에 의해 그 형태가 달라지며, 이들 특징은 대표적으로 고령토, 명반석, 녹니석, 녹렴석 등의 광물을 구별하는데 유용하다(Kim *et al.*, 2002; Hauff, 2008; Kerr *et al.*, 2011). 연구대상 시료인 DD-s3 분광정보의 경우 전체적인 분광반사율이 녹렴석 표준분광곡선정보에 비해 근적외선과 단파적외선 영역에서 기울기가 다소 약한 것을 제외하면 전체적인 분광반사율 및 흡광특성이 거의 동일함을 확인할 수 있다(Fig. 3e, 3f). 특히 녹렴석의 주요 구성성분인 철(Fe)에 의한 넓은 흡광특성이 1030 nm 부근에서 잘 나타나며(Hauff, 2008), 단파적외선 영역에서 녹렴석만의 주요특성으로 알려진 1540 nm, 1830 nm, 1950 nm, 2250 nm, 2340 nm 부근에서의 흡광특성이 매우 일치한다(Fig. 3e, 3f)(Pontual *et al.*, 2012).

당두광상의 주 광석광물인 섬아연석의 반사율 표준분광곡선은 가시근적외선영역인 400-1100 nm

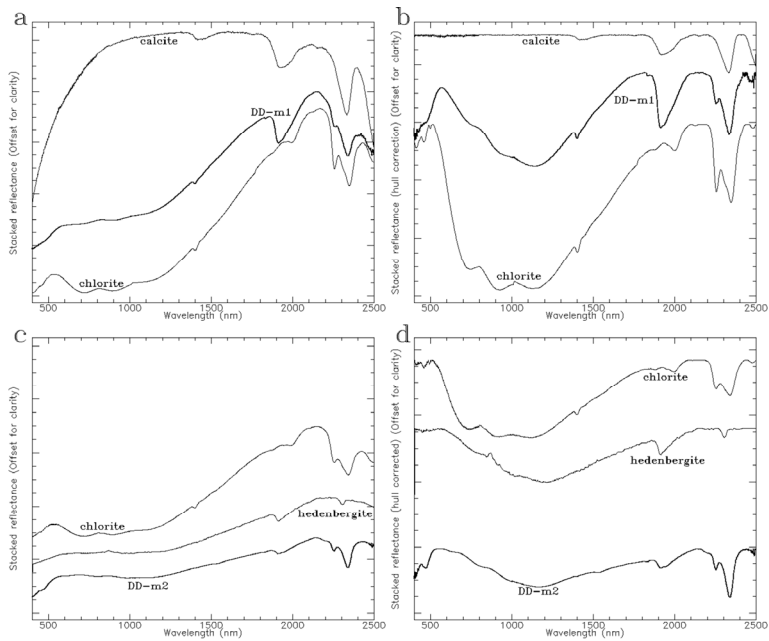


Fig. 4. VNIR-SWIR representative spectra of skarn minerals showing mixed spectral characteristics in Dangdu deposit compared with reference spectra from standard library data. (a) Reflected spectrum of DD-m1 and reference spectra of calcite and chlorite. (b) Hull corrected spectra of DD-m1 and reference calcite and chlorite. (c) Reflected spectrum of DD-m2 and reference spectra of chlorite and hedenbergite. (d) Hull corrected spectra of DD-m2 and reference chlorite and hedenbergite.

구간에서 급격한 양의 기울기보이다 1100 nm를 기준으로 음의 기울기로 감소하는 형태를 보이다 1500 nm를 기준으로 넓은 흡광특성을 관찰할 수 있으나, 다른 광물들과는 다르게 반사율곡선에서는 섭아연석의 흡광특성의 강도가 약해 구분이 상대적으로 용이하지 않을 수 있다(Fig. 3g). 따라서 이를 Hull-quotient 분광곡선으로 변환할 경우 550 nm, 750 nm, 900 nm, 1500 nm, 2300 nm 부근에서 나타나는 흡광특성을 확연히 구분할 수 있다(Fig. 3h). 연구시료 중 DD-s4 시료의 분광정보와 섭아연석 표준분광정보를 비교해 본 결과, 분광반사율의 경우 상대적으로 그 강도가 미약하나 1100 nm의 분광정점과 1500 nm의 넓은 흡광반사율의 유사성을 확인할 수 있으며, 특히 Hull-quotient 분광곡선의 경우 흡광특성의 비교가 용이하였고, 550 nm, 750 nm, 900 nm, 1500 nm, 2300 nm 부근에서 흡광특성의 유사함을 관찰하였다(Fig. 3g, 3h).

분광곡선이 여러 광물들이 혼합된 형태로 나타나는 경우, 분광곡선의 반사율곡선과 흡광특성이 존재광물의 특징을 혼합하여 나타나므로, 각 특성

이 어느 광물로 기인한 것인지를 구분하는 작업이 필수적이다. 연구대상 시료인 DD-m1의 경우, 분광곡선정보로부터 녹니석과 방해석이 혼합된 분광특성이 함께 나타나는 것을 확인하였다. 녹니석의 표준분광곡선을 살펴보면 730 nm, 930 nm, 1160 nm 부근에서의 넓은 흡광특성과 1400 nm, 2000 nm, 2260 nm, 2340 nm 부근에서의 흡광특성이 나타나며, 반사율분포는 550 nm에서 정점을 이룬 후 700nm까지 감소하다 점진적으로 증가하여 2200 nm 부근에서 가장 높은 반사율을 보인다(Fig. 4a). 특히 녹니석의 흡광특성은 철(Fe) 성분에 기인한 730 nm, 930 nm, 1160 nm 부근에서의 넓은 흡광특성과 2260 nm, 2340 nm 부근에서의 ‘doublet’ 형태의 흡광특성이 특징적이다(Fig. 4b)(Pontual *et al.*, 2012). 또한 모암을 이루는 주 광물인 방해석 표준분광곡선의 흡광특성은 1400 nm, 1900 nm, 2340 nm 부근에서 나타나며, 반사율 표준곡선에서 400-1300 nm까지 양의 기울기로 반사율이 상승하다가 이후의 영역에서 서서히 감소하는 분광패턴을 보인다(Fig. 4a, Fig. 4b). 연구

Table 1. Mineralogical interpretation of spectroscopy conducted on representative samples from skarn zone in Dangdu deposit (bold: obtained by single+mixture signature, underscore: obtained by single signature only, (): obtained by mixture signature only)

Sample NO.	Spectroscopy
DD-1	cpx, <u>gt</u> , <u>sp</u> , (chl)
DD-2	cpx, <u>gt</u> , <u>ep</u> , (calc, chl)
DD-3	cpx, <u>gt</u> , <u>ep</u> , (calc, chl)
DD-4	cpx, <u>gt</u> , <u>sp</u> , (chl)
DD-5	cpx, <u>gt</u> , <u>ep</u> , <u>sp</u> , (calc, chl)
DD-6	cpx, <u>gt</u> , <u>ep</u> , (calc, chl)

Abbreviations = calc: calcite, chl: chlorite, cpx: clinopyroxene, ep: epidote, gt: garnet, sp: sphalerite.

대상 시료인 DD-m1의 분광정보를 비교해본 결과 1900 nm에서의 흡광특성을 제외하고 전체 파장영역에 걸쳐 녹니석의 흡광특성과 매우 일치하는 것을 확인하였으며, 1900 nm에서의 흡광특성은 방해석의 영향이 반영된 것임을 알 수 있다(Fig. 4a, Fig. 4b). 또한 2340 nm에서 나타나는 방해석의 흡광특성이 같은 위치에서 녹니석과의 흡광특성과 중첩되어 나타난 것으로 사료된다(Fig. 4a, Fig. 4b). 반사율 분포패턴의 경우, 흡광특성과 마찬가지로 전체적으로 녹니석의 반사율 분포와 유사하나 방해석의 근적외선영역의 완만한 반사율 상승패턴의 영향으로 근적외선 영역에서 녹니석보다 상대적으로 완만한 반사율 상승패턴을 보인다(Fig. 4a).

연구대상 시료 DD-m2의 분광정보로부터 녹니석과 단사회석의 분광특성이 혼합되어 나타나는 것을 확인하였다. 앞서 언급된 바와 같이 녹니석의 표준분광곡선의 경우 730 nm, 930 nm, 1160 nm 부근에서의 넓은 흡광특성과 1400 nm, 2000 nm, 2260 nm, 2340 nm, 2480 nm 부근에서의 흡광특성이 대표적인 흡광특성이며, 회철회석의 경우 800 nm, 1100 nm 부근에서 넓게 나타나는 흡광특성 및 1900 nm, 2300 nm 부근에서의 흡광특성이 대표적인 특징이다(Fig. 4c, Fig. 4d). 회철회석의 반사율표준곡선은 녹니석에 비해 가시근적외선 영역에서 상대적으로 완만하게 상승하며, 녹니석과 같은 두드러진 정점이 없다(Fig. 4c). 연구대상 시료인 DD-m2의 분광곡선을 살펴보면 470 nm, 800 nm, 1100 nm, 1900 nm, 2260 nm, 2340 nm 부근에서 확인한 흡광특성을 가지고 있으며, 400-600 nm 구간에서 급격한 양의 기울기 반사율을 보인다

소폭 하락한 후 단파적외선의 단파장 영역에서 다시 상승하다 단파적외선의 장파장 영역에서 다시 감소하는 패턴을 보인다(Fig. 4c, 4d). 전체적인 파장영역에서의 분광패턴은 녹니석과 단사회석과 비교하여 비슷한 패턴을 보이지만, 대표적인 흡광특성 및 흡광형태를 고려하였을 때, 가시광선-근적외선영역에서 철(Fe)성분에 의해 반영되는 흡광특성이 단사회석과 매우 유사하며, 1900 nm 부근에서 나타나는 흡광특성 역시 단사회석과 일치한다(Fig. 4c, Fig. 4d). 하지만 단파적외선영역의 장파장에서 나타나는 ‘doublet’ 형태의 흡광특성은 녹니석과 일치한다(Fig. 4c, Fig. 4d). 특히 doublet 형태의 흡광특성 중 2340 nm의 경우, 녹니석의 doublet에 회철회석의 흡광특성이 중첩되어 녹니석의 doublet보다 확연한 흡광특성을 보인다(Fig. 4c, Fig. 4d).

당두광상 스카른대에서 채취한 연구대상 시료들로부터 얻은 분광정보는 단일 분광정보만으로 광물을 확인할 수 있는 경우와 여러 광물들이 혼합된 형태의 분광정보를 가지는 경우로 분류되었으며, 이를 바탕으로 전체 연구대상시료 중 6개의 대표 시료(DD-1, DD-2, DD-3, DD-4, DD-5, DD-6)를 선정하여, 분광특성분석을 이용한 스카른 광물 탐사를 실시한 결과, 각각 단일분광정보 및 혼합된 형태의 분광정보로부터 단사회석, 석류석, 섬아연석, 녹니석, 방해석, 녹립석을 확인하였다(Table 1). 단사회석의 경우 단일분광정보 및 혼합된 분광정보의 특성분석을 통해 모든 대표시료에서 확인되었으며, 석류석은 주로 단일분광정보로부터 추출된 광물로서 단사회석과 마찬가지로 모든 시료에서 확인되었다(Table 1). 또한 섬아연석은 단일분광정보를 통해 추출된 광석광물로 DD-1, DD-4, DD-5

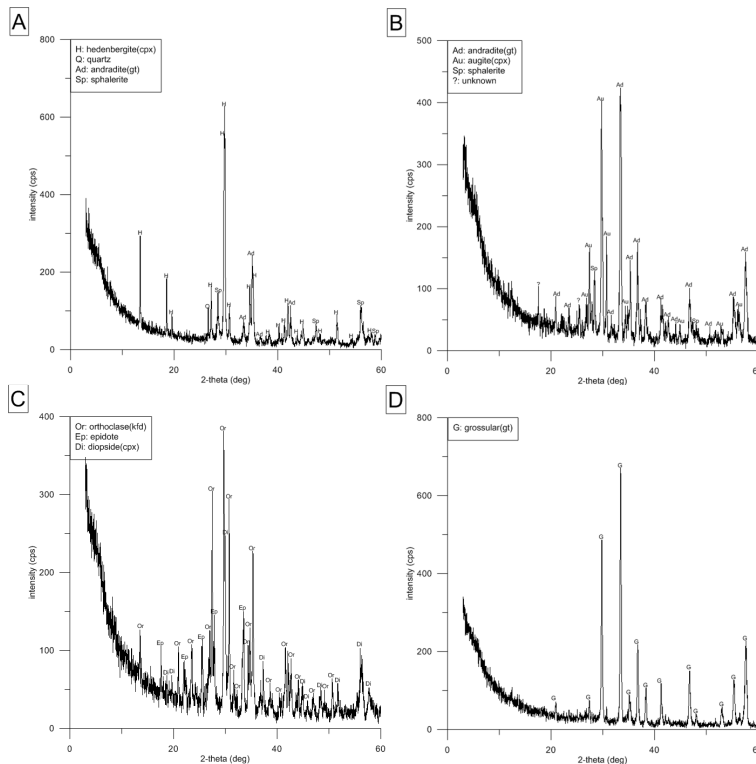


Fig. 5. XRD analysis results of skarn samples from Dangdu deposit. (A) shows clinopyroxene(hedenbergite)-quartz-garnet(andradite)-sphalerite skarn assemblages, (B) also includes garnet(andradite)-clinopyroxene (augite)-sphalerite skarn assemblages. (C) is represented by orthoclase, epidote, and clinopyroxene(diopside). (D) presents garnet(grossular) information.

시료에서 확인되었으며, 녹렴석 역시 마찬가지로 단일분광정보를 통해 DD-2, DD-3, DD-5, DD-6 시료에서 확인되었다(Table 1). 녹니석은 주로 혼합된 분광정보를 통해 확인된 광물로써, 단사휘석 및 석류석과 마찬가지로 모든 대표시료에서 분광 특성분석을 통해 확인되었으며, 방해석의 경우 주로 녹니석과 혼합된 분광형태로 추출된 광물로, DD-2, DD-3, DD-5, DD-6 시료에서 녹니석과 함께 확인되었다(Table 1).

XRD 분석 및 편광현미경 관찰을 통한 교차검증

전체 연구대상시료 중 6개의 대표시료(DD-1, DD-2, DD-3, DD-4, DD-5, DD-6)를 선정하여, 분광특성분석을 바탕으로 스카른 광물 탐사를 실시한 결과로부터 확인된 각 스카른 광물 및 광석광물을 대상으로, XRD 분석과 편광현미경관찰 결과를 비교분석하여 광물정보의 일치성을 조사함으로써,

분광특성분석결과를 검증하였다.

단사휘석의 경우 단일분광정보 및 혼합된 분광정보의 특성으로 모든 대표시료에서 확인되었으며, 이들 시료에 대해 XRD 분석을 실시한 결과, DD-5를 제외한 모든 시료에서 단사휘석이 산출됨을 인지하였고, 회철휘석-석영-회철석류석-섬아연석, 회철석류석-보통휘석-섬아연석, 정장석-녹렴석-투휘석 조합의 형태로 확인되었다(Fig. 5A, 5B, 5C). 또한 현미경 관찰결과 모든 시료에서 단사휘석을 확인하였으며(Table 2), 단사휘석-석류석-섬아연석 및 단사휘석-녹렴석 조합을 이루며 산출된다(Fig. 6B, 6C, 6D, 6E, 6F). 단사휘석의 산출상태는 자형, 반자형 및 주상형태의 다양한 형태로 약 50 μm 부터 500 μm 이상의 크기로 분포하는 경향을 보였다(Fig. 6). 또한 XRD 분석결과 및 현미경관찰결과를 상호보완적으로 비교하여 분광특성분석결과와의 일치성 조사결과, 단사휘석은 100% 일치성을 보였다(Table 2).

Table 2. Assessment of spectroscopic approaches in Skarn mineral exploration in Dangdu ore deposit by comparison with XRD analysis and microscopic observation

Identified minerals	Sample No.	Confirmed at spectroscopy	Confirmed at XRD	Confirmed at microscopy
Clinopyroxene	DD-1	○	○	○
	DD-2	○	○	○
	DD-3	○	○	○
	DD-4	○	○	○
	DD-5	○	×	○
	DD-6	○	○	○
Garnet	DD-1	○	○	○
	DD-2	○	○	○
	DD-3	○	×	×
	DD-4	○	○	○
	DD-5	○	○	○
	DD-6	○	○	○
Chlorite	DD-1	○	×	○
	DD-2	○	×	×
	DD-3	○	×	×
	DD-4	○	×	○
	DD-5	○	×	○
	DD-6	○	×	×
Epidote	DD-1	×	×	×
	DD-2	○	×	○
	DD-3	○	○	○
	DD-4	×	×	×
	DD-5	○	×	×
	DD-6	○	×	○
Calcite	DD-1	×	×	○
	DD-2	○	×	×
	DD-3	○	×	×
	DD-4	×	×	○
	DD-5	○	×	○
	DD-6	○	×	×
Sphalerite	DD-1	○	○	○
	DD-2	×	○	○
	DD-3	×	×	○
	DD-4	○	○	○
	DD-5	○	×	○
	DD-6	×	○	○

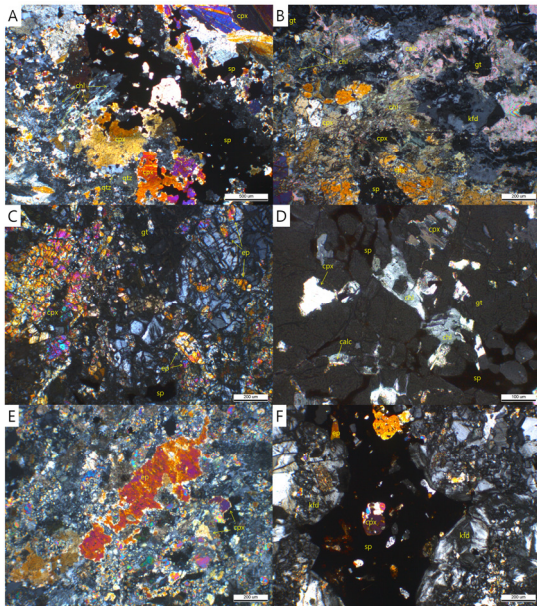


Fig. 6. Microphotographs of skarn minerals occurrence of Dangdu deposit. (A) Different crystal types of clinopyroxene coexisting with chlorite, quartz, and sphalerite in DD-1 sample. (B) A small amount of chlorite and calcite veinlet are coexisting with garnet, k-feldspar, and clinopyroxene in DD-5 sample. (C) Aggregates of clinopyroxene are coexisting with garnet, epidote, and sphalerite in DD-2 sample. (D) Large garnet crystal is coexisting with clinopyroxene, sphalerite, calcite, and chlorite in DD-4 sample. (E) Epidote coexisting with clinopyroxene in DD-6 sample. (F) Sphalerite is coexisting with clinopyroxene, k-feldspar, and epidote in DD-3 sample. Abbreviations = calc: calcite, chl: chlorite, cpx: clinopyroxene, ep: epidote, gt: garnet, kfd: k-feldspar, sp: sphalerite, qtz: quartz.

석류석은 주로 단일분광정보를 기반으로 모든 시료에서 확인되었으며(Table 1), XRD 분석결과 DD-3 시료를 제외한 모든 시료에서, 회철회석-석영-회철석류석-섬아연석, 회철석류석-보통회석-섬아연석 조합의 형태 및 회반석류석으로 산출된다(Fig. 5A, 5B, 5D). 이와 같은 결과는 현미경관찰에서도 대동소이하게 DD-3 시료를 제외한 모든 시료에서 석류석이 확인되며(Table 2), 주로 단사회석 및 섬아연석과 함께 관찰된다. 석류석의 산출 상태는 자형 혹은 반자형 형태를 가지는 석류석 결정이 작게는 200 μm , 큰 결정의 경우 1000 μm 이

상의 비교적 큰 입자크기로 분포한다(Fig. 6B, 6C, 6D). 이를 종합하여 볼 때, 연구대상시료에서 분광 분석을 통해 확인된 6개의 시료 중 5개에서 석류석이 산출됨이 확인되었으며, 83%의 일치성을 보였다(Table 2).

녹렴석의 경우 주로 단일분광정보를 통해, DD-2, DD-3, DD-5, DD-6 시료에서 확인되었으나(Table 1), XRD 분석결과와 비교한 결과, DD-3 시료에서만 단사회석-녹렴석-정장석 조합의 형태로 확인되었다(Fig. 5C). 그러나 현미경 관찰결과 DD-5 시료를 제외한, 나머지 DD-2, DD-3, DD-6 시료에서 녹렴석이 관찰되었다(Table 2). 이들은 자형 및 반자형의 결정형을 가지고 약 100-1000 μm 크기 분포로, 주로 단사회석과 함께 산출된다(Fig. 6C, 6E, 6F). XRD 분석과 현미경관찰결과를 통해 살펴 본 녹렴석의 분광분석결과는 83%의 일치성을 보였다(Table 2).

녹니석의 경우 본 연구에서 대표적으로 혼합된 분광정보를 통해 확인된 광물로써, 단사회석 및 석류석과 마찬가지로 모든 대표시료에서 확인되었다(Table 1). 그러나 녹니석은 XRD 분석을 통해서 확인되지 않았으며, DD-1, DD-4, DD-5 시료에서 현미경관찰을 통해서만 확인되었다(Table 2). 특히 현미경 관찰결과 소량의 녹니석이 섬유상의 형태로 단사회석-섬아연석-석영, 석류석-단사회석-섬아연석-정장석, 석류석-단사회석-섬아연석 조합으로 관찰되었다(Fig. 6A, 6B, 6D). 분광분석과 현미경관찰결과를 비교한 결과 녹니석은 50%의 일치성을 보였다(Table 2).

방해석 역시 혼합된 분광정보만 추출된 광물로, 분광특성분석결과 DD-2, DD-3, DD-5, DD-6 시료에서 확인되었으며, 주로 녹니석과 함께 확인되었다(Table 1). 그러나 녹니석과 마찬가지로 XRD 분석결과에서는 방해석을 확인할 수 없었고, 현미경 관찰결과 DD-5 시료에서 일치성을 보였으며(Table 2), 소량의 방해석이 주로 녹니석과 함께 세맥의 형태로 관찰되었다(Fig. 6B). 또한 현미경분석결과와의 일치성 조사결과, 방해석이 16%의 일치성을 보였다(Table 2).

단일분광정보를 통해 확인된 당두광상의 주 광석광물인 섬아연석은 DD-1, DD-4, DD-5 시료에서 확인되었으며(Table 1), XRD 분석결과와 비교한 결과, DD-1, DD-4 시료에서 일치하였으나, DD-5 시료에서는 확인하지 못하였다(Table 2). 그러나 다른 광물들과는 다르게 XRD 분석결과 및

결 론

현미경하에서는 모든 시료에서 섬아연석이 산출됨을 확인이 되었으나, 분광분석을 통해서서는 3개의 시료에서만 확인이 되어, 분광정보만으로 이들의 산출상태를 확인하는 데 약 50%의 일치성을 보임을 인지하였다(Table 2). 섬아연석의 경우 XRD 분석결과에서 단사휘석 및 석류석과 함께 산출되는 형태로 확인되었으며(Fig. 5A, 5B), 현미경관찰에서도 단사휘석 및 석류석과 함께 섬아연석이 관찰되며, 약 200-1000 μm 크기의 비교적 큰 입자 크기로 분포한다(Fig. 6A, 6C, 6D, 6F).

분광특성분석을 통해 추출된 광물들의 일치성을 조사한 결과, 단사휘석, 석류석, 녹렴석의 경우 80% 이상의 일치성을 보였으며, 스키른 광상의 주요 스키른 광물인 단사휘석, 석류석, 녹렴석의 정보제공에 있어 상당히 유용한 정보를 제공할 것으로 사료된다. 그러나 50% 이하의 일치성을 보였던 섬아연석, 녹니석, 방해석의 경우, 보다 정확한 정보제공을 위해 XRD 분석, EPMA 분석 및 현미경관찰 등 기존의 정밀분석방법을 통한 검증이 동반되어야 할 것으로 판단된다. 현미경관찰을 통해 각 광물들의 산출양상 및 입자크기로 미루어 보았을 때, 소량의 섬유상 형태로 확인되는 녹니석과 세맥 형태로 관찰되는 방해석은 다른 광물들에 비해 상대적으로 그 양이 많지 않았으며, 따라서 본 연구의 분광특성분석을 통한 광물정보추출 시, 상대적으로 높은 일치성을 보이기 어려웠을 것으로 사료된다. 특히 녹니석과 방해석의 경우 낮은 반사율을 가지는 대표 광물로서, 이들의 존재를 분광분석을 통해 정확히 확인하기 위해서, 요구되는 함량은 적어도 전체의 20% 이상인 경우가 용이하다(Thompson *et al.*, 1999). 보다 확실한 검증을 위해 다른 광상에서 산출되는 스키른 및 광석광물에 대하여 보다 많은 시료에 대한 고찰이 이루어져야 할 것으로 기대된다.

이 밖에도 조암 광물인 정장석과 석영이 XRD 분석 및 현미경관찰을 통해 확인되었으나(Fig. 5, Fig. 6), 분광특성분석으로부터 해당 광물의 정보를 추출하기는 어려웠다. 일반적으로 대부분의 무수 규산염광물인 석영과 장석류 광물들은 가시광선-근적외선-단파적외선 영역에서 두드러지는 분광특성이 작아 분광분석을 통한 광물정보 추출에 있어서 어려움을 가지는 것으로 알려져 있으며(Kerr *et al.*, 2011), 따라서 분광분석을 통해 정장석 및 석영의 정보추출에 있어 효율성이 많이 떨어질 것으로 판단된다.

본 연구는 당두광상에서 산출되는 스키른 광물 및 섬아연석에 대한 분광분석을 실시하고 XRD 분석 및 편광현미경 관찰을 통해 휴대용 분광계를 이용한 스키른 광상 탐사에 있어서 효율성에 대해 고찰하였다. 그 결과, 단사휘석(회철휘석, 투휘석, 보통휘석), 석류석(회철석류석, 회반석류석), 녹렴석, 방해석, 녹니석 및 섬아연석이 산출됨을 확인하였으며, 단사휘석, 석류석, 녹렴석, 섬아연석의 경우 해당 광물의 단일표준분광정보와 매우 일치하는 반면, 녹니석은 방해석 및 단사휘석과 혼합된 형태의 분광특성이 나타난다. 분광분석을 통한 스키른 광물의 확인은 반사율곡선의 경향과 흡광특성을 기반으로 이루어지며, 단사휘석의 흡광특성은 800 nm 및 1100 nm에서 철성분에 의해 나타나는 흡광특성이 특징적이다. 석류석은 450 nm, 900 nm, 1200 nm, 1400 nm, 1900 nm, 2250 nm, 2360 nm 부근에서 흡광특성이 존재하며, 녹렴석은 400 nm, 460 nm, 610 nm, 1030 nm, 1540 nm, 1830 nm, 1950 nm, 2250 nm, 2340 nm 부근에서 뚜렷한 흡광특성과 단파적외선 영역에서 ‘doublet’ 형태의 분광특성이 특징적이다. 섬아연석의 경우 스키른 광물들에 비해 흡광특성의 강도가 약하여 Hull-quotient 분광곡선으로 변환할 경우 550 nm, 750 nm, 900 nm, 1500 nm, 2300 nm 부근에서 나타나는 분광특성을 확연히 구분할 수 있다. 녹니석과 방해석이 혼합되어 산출되는 분광특성은 전체적으로 녹니석의 흡광특성인 철(Fe)성분에 기인한 730 nm, 930 nm, 1160 nm 부근에서의 넓은 흡광특성과 2260 nm, 2340 nm 부근에서의 ‘doublet’ 형태의 흡광특성이 확연히 관찰되며, 방해석의 1900 nm에서의 흡광특성이 혼합된 양상을 보인다. 녹니석과 단사휘석의 분광특성이 혼합되어 나타나는 경우 가시근적외선 영역에서는 단사휘석의 분광특성과 매우 유사한 반면 단파적외선 영역에서는 녹니석의 doublet이 확인되는 것이 특징적이다. 분광특성분석을 통해 추출된 광물에 대해 XRD 분석 및 현미경관찰을 통한 교차검증 결과, 단사휘석, 석류석, 녹렴석의 경우 80% 이상의 일치성을 보인 반면, 섬아연석, 녹니석, 방해석의 경우 50% 이하의 일치성을 보인다. 따라서 휴대용 분광계를 이용한 스키른 광상 탐사 시 단사휘석, 석류석, 녹렴석의 정보 제공에 효과적일 것으로 사료된다. 그러나 섬아연석, 녹니석, 방해석의 경우, 휴대용 분광계의 분석

결과를 부수적인 자료로 활용하는 것이 적절할 것으로 생각된다. 특히 녹니석이나 방해석의 경우 상대적으로 낮은 반사율로 인해 효과적인 탐지를 위해서는 충분한 함량이 뒷받침되어야 할 것이다. 또한 조암광물에 해당하는 정장석이나 석영의 확인에는 분광분석이 효과적이지 않을 것이라 판단된다.

사 사

본 논문을 심사해 주신 심사위원들에게 감사드린다. 이 연구는 충남대학교 학술 연구비에 의해 지원되었다.

참고문헌

- Hauff, P. (2008) An overview of VIS-NIR-SWIR field spectroscopy as applied to precious metals exploration. Arvada, Colorado: Spectral International Inc., 80001 303 403 8383.
- Herrmann, W., Blacke, M., and Doyle, M. (2001) Short wavelength infrared (SWIR) spectral analysis of hydrothermal alteration zones associated with based metal sulfide deposits at Rosebery and Western Tharsis, Tasmania, and Highway-Reward, Queensland. *Economic Geology*. Vol. 96, 939-955.
- Hinchey, J.G. (2011) Visible/infrared spectroscopy (VIRS) of Volcanogenic massive sulphide hydrothermal alteration products, Tulks volcanic belt, Central Newfoundland: An additional exploration technique? Geological Survey, Report 11-1, pp. 97-108.
- Kerr, A., Rafuse, H., Sparkes, G., Hinchey, J., and Sandeman, H. (2011) Visible/infrared spectroscopy (VIRS) as a research tool in economic geology: background and pilot studies from Newfoundland and Labrador. Geological Survey, Report 11-1, pp. 145-166.
- Kim, S.C., Park, 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. *Journal of the Korean Institute of Mineral and Energy Resources Engineers*. Vol. 39, No. 4, pp. 231-241 (in Korean with English abstract).
- KORES. (2012) Report of drilling survey on the Dangdu(Au-Ag) deposit.
- Lim, O., Yu, J., Koh, S.M., and Heo, C.H. (2013) Mineralogy and chemical compositions of Dangdu Pb-Zn deposit (in Korean with English abstract).
- Pontual, S., Gamson, P., and Merry, N. (2012) Spectral interpretation field manual: Spectral Analysis Guides for Mineral Exploration, G-Mex Version 3.0. AusSpec International Pty. Ltd. Vol. 1.
- Sonntag, I., Laukamp, C., and Hagemann, S.G. (2012) Low potassium hydrothermal alteration in low sulfidation epithermal systems as detected by IRS and XRD: An example from the Co-O mine, Eastern Mindanao, Philippines. *Ore Geology Reviews*. 45, 47-60.
- Sun, Y., Seccombe, P.K., and Yang, K. (2001) Application of short-wave infrared spectroscopy to define alteration zones associated with the Elura zinc-lead-silver deposit, NSW, Australia. *Journal of Geochemical Exploration*. 73, 11-26.
- Thompson, A.J.B., Hauff, P.L., and Robitaille, A.J. (1999) Alteration mapping in exploration: application of short-wave infrared (SWIR) spectroscopy. *Society of Economic Geologists. Newsletter*, 39, 16-27.
- 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, 119 p.
- Yang, K., Huntington, J.F., Browne, P.R.L., and Ma, C. (2000) An infrared spectral reflectance study of hydrothermal alteration minerals from the Te Mihi sector of the Wairakei geothermal system, New Zealand. *Geothermics*. 29, 377-392.
- Yang, K., Browne, P.R.L., Huntington, J.F., and 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.
- Yun, S.K., Kim, K.H., and Woo, J.S. (1986) Studies on geology and mineral resources of the Okcheon belts-Mineralization in the vicinity of the Muamsa granite stock-. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, v. 19, p. 3-17 (in Korean with English abstract).
- Zadeh, M.H., Tangestani, M.H., Roldan, F.V., and Yusta, I. (2014) Spectral characteristics of minerals in alteration zones associated with porphyry copper deposits in the middle part of Kerman copper belt, SE Iran. *Ore Geology Reviews*. 62, 191-198.

접수일(2014년 9월 3일), 수정일(1차 : 2014년 9월 18일),
게재확정일(2014년 9월 20일), 책임편집위원 : 장윤득