

지질자원 탐사를 위한 원격탐사 영상의 처리기법 및 활용 검토

손영선¹⁾ · 김광은²⁾ · 윤왕중^{1)*}

A Review of Remote Sensing Techniques and Applications for Geoscience and Mineral Resources

Young-Sun Son, Kwang-Eun Kim and Wang-Jung Yoon*

(Received 10 June 2015; Final version Received 18 July 2015; Accepted 24 August 2015)

Abstract : This study was examined for the characteristics of optical sensors and applications in remote sensing for the geoscience and mineral resources. The image processing methods for mineral and ore exploration were tested in the Cuprite, Nevada. Early remote sensing techniques were used for mineral and ore exploration. More recently, remote sensing is used for interpretation of geologic structure, oil and gas exploration, environmental assessment of mining, with integrated analysis of radar image, geophysical, geochemical and geological data, using GIS. Hyperspectral image with hundreds of spectral bands can appear substantially correct spectra acquired in the field. This led to development of new image analysis techniques to obtain more accurate surface geological information. Remote sensing is likely to be an effective first step for mineral exploration in africa, central asia and polar regions where direct access to field survey is difficult for political and geographical reasons.

Key words : Remote sensing, Geoscience and mineral resources exploration, Hydrothermal alteration, Multispectral imaging, Hyperspectral imaging

요약 : 이 연구에서는 지질자원 원격탐사에 활용되고 있는 광학센서들의 특성과 활용사례 등을 검토하였다. 또한 광물자원 및 광상탐사를 위해 활용되고 있는 주요 영상처리 기법들을 훈련지역에 실제로 적용해보고 각 기법의 특성을 고찰하였다. 초기 지질자원 원격탐사 기술은 광물 및 광상 탐사에 주로 활용되었으며, 최근에는 광학영상 뿐만 아니라 레이더 영상, 지구물리, 지구화학, 지질자료 등을 GIS를 사용해 통합 분석함으로써 지질구조 해석, 석유가스 탐사, 광산개발에 따른 환경평가 등에 활용하고 있다. 수백 개의 분광밴드로 구성된 초분광 영상은 실제 지상에서 획득된 분광스펙트럼과 거의 유사하게 나타낼 수 있다. 이로 인해 보다 정확한 지표지질 정보를 얻기 위한 새로운 초분광 영상 분석기법들이 개발되고 있다. 원격탐사 기술은 중앙아시아, 아프리카, 극지와 같은 환경적 문제나 정치적인 문제로 현장 접근이 어려운 지역에 자원탐사에 대한 기초자료 확보에 효율적인 기여를 할 수 있을 것으로 판단되며, 이를 위해 국내에서도 지질자원 원격탐사 활용을 위한 보다 다양한 연구가 필요할 것으로 보인다.

주요어 : 원격탐사, 지질자원 탐사, 열수변질작용, 다중분광 영상, 초분광 영상

서론

원격탐사는 센서 시스템을 이용하여 대상 매질에 직접적인 접촉 없이 전자기파 에너지에 대한 상호작용을 영상의 형태로 기록하는 것이다. 다양한 목적에 맞는 항공 또는 위

성 원격탐사 센서 시스템들이 개발되면서 그에 따른 영상 처리 기법들도 함께 발전해 왔다. 원격탐사 센서는 태양 에너지를 주로 이용하는 수동형(광학) 센서와 자체 에너지원을 가지고 있는 합성개구레이더(Synthetic Aperture Radar, SAR) 또는 LiDAR(Light Detection And Ranging)와 같은 능동형 센서로 나눌 수 있다. 광학 센서는 주로 가시광선(visible)에서 중적외선(mid infrared, MIR) 또는 열적외선(thermal infrared, TIR)까지의 비교적 짧은 파장의 에너지를 측정하게 되는데, 이 파장범위에서는 광물 및 암석 고유의 분광학적 특성이 잘 나타난다. 따라서 위성 또는 항공기에 탑재된 광학 센서를 통해 촬영된 영상자료의 분석을 통

1) 전남대학교 에너지자원공학과

2) 한국지질자원연구원 광물자원연구본부

*Corresponding Author(윤왕중)

E-mail: wjyoon@jnu.ac.kr

Address: Department of Energy & Resources Engineering,
Chonnam National University

해 지표에 존재하는 광물 또는 암석을 탐지하고 분류할 수 있게 된다. 극초단파(microwave)를 이용하는 능동형 원격 탐사 센서의 경우 대기를 투과하는 특성이 있어 구름과 같은 기상조건에 제약을 받지 않으며, 지표면의 형태 및 물리적 특성에 민감하기 때문에 지표의 구조적 또는 지형적 특성을 해석하는데 특히 유리하다. 하지만 개별적 광물의 분광학적 특성 탐지는 불가능하다. 최근 원격탐사 기술은 광학 영상과 SAR 영상을 복합적으로 이용하거나 수치표고 모델(DEM) 자료, 지구물리탐사 자료 및 지구화학 자료 등을 지리정보시스템(GIS)과 통합 분석함으로써 지질자원 분야에서 폭넓게 활용되고 있다(Schetselaar *et al.*, 2000; Khan *et al.*, 2007; Benoit *et al.*, 2010).

이 연구에서는 지질자원 원격탐사에 활용되고 있는 센서 시스템 중 주로 광학 센서 시스템들의 특성과 광물자원 및 광상탐사를 위한 원격탐사 기술의 기본원리에 대해 정리하였다. 원격탐사 영상을 이용한 광물탐지 및 분류를 위한 주요 영상처리 기법들을 검토하기 위해 훈련지역에 실제 적용해 보고 각 기법의 특성들을 고찰하였으며, 광물자원 탐사를 위한 원격탐사 활용연구 외에 다양한 지질자원 원격탐사 활용연구들을 검토하였다. 마지막으로 지질자원 분야에서의 원격탐사의 역할과 함께 향후 과제와 발전 방향에 대해 검토함으로써, 지질자원 원격탐사 활용 기술에 대한 전반적인 정보를 제공하고자 한다.

훈련지역 지질

미국 네바다(Nevada) 주에 위치한 쿠프라이트(Cuprite) 지역은 열수작용(hydrothermal)을 받은 변질대들이 광범위하게 지표면에 노출되어 있어 지질학적 원격탐사 연구에 훈련지역으로 많이 사용되어 왔다(Fig. 1)(Ashley and Abrams, 1980; Kruse *et al.*, 1990; Rowan *et al.*, 2003). 이 지역의 캄브리아가기 사암에서는 과거 금, 구리, 은 등이 산출되었으며, 제3기 응회암질 암석과 화산회류 응회암에서는 황이 산출되었다(Fig. 1(a)). 이 지역에서 나타나는 열수변질암은 크게 세 가지로 구분되는데 규화작용(silicified), 단백질화작용(opalized), 아질리작용(argillized) 변질대가 있다(Fig. 1(b)). 강한 변질작용을 받은 동쪽 중앙부 규화대에서는 주로 석영이 산출되고 방해석, 고령석, 명반석이 일부 산출된다. 단백질화대에서는 명반석, 고령석, 단백질, 디카이트(dickite), 엽납석, 방해석, 버딩토나이트(buddingtonite), 백운모, 몬모릴로나이트(montmorillonite), 철백반석이 산출된다. 약하게 나타나는 아질리 변질대에서는 고령석, 단백질, 몬모릴로나이트 등이 산출되며, 갈철석이 풍부하게 분포한다(Rowan *et al.*, 2003). 본 연구에서는 쿠프라이트 지역의 다중분광 영상과 초분광 영상을 사용해 기존에 알

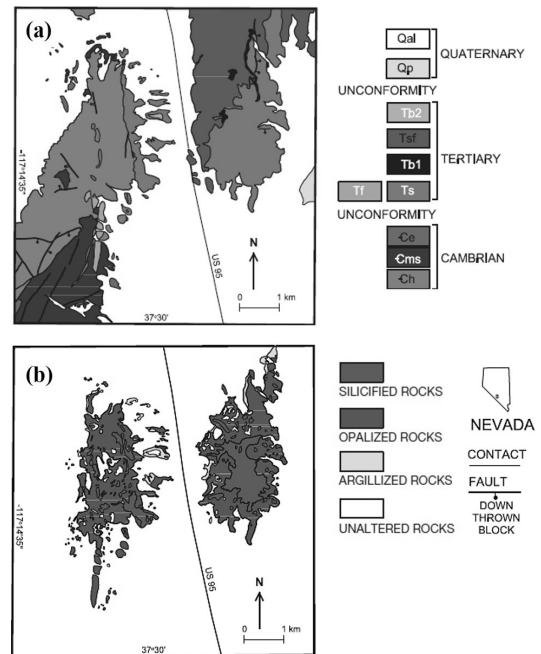


Fig. 1. Generalized (a) geologic map and (b) alteration distribution map of the Cuprite mining district, Nevada (from Rowan *et al.*, 2003).

려진 주요 영상처리 기법들을 적용하여 훈련지역의 변질대 및 광물을 분류해 보고 각 기법의 특성을 고찰하였다.

광학 센서 시스템의 종류 및 특성

광학 센서 시스템은 분광해상도(spectral resolution)에 따라 다중분광(multispectral) 센서와 초분광(hyperspectral) 센서로 구분할 수 있다. 다중분광 센서는 10여개 안팎의 분광 밴드를 기반으로 대상 매질의 분광학적 특성을 기록하는데 반해 초분광 센서는 일반적으로 100여개 이상의 분광 밴드를 가지고 매질의 분광학적 특성을 조금 더 세밀하게 관찰한다. 이 연구에서는 원격탐사 센서들 중 지질자원 분야에서 많이 활용되고 있는 광학 센서의 종류와 특성을 다중분광 센서와 초분광 센서로 나누어 소개한다(Fig. 2).

다중분광 센서

다중분광 센서는 주로 인공위성에 탑재되어 지구를 관측하는데 사용된다. 특징은 관측 폭이 넓고, 주기적으로 전 지구적 영상자료가 확보되기 때문에 연구에 필요한 영상자료를 쉽게 획득할 수 있다. 초분광 영상에 비해 분광해상도가 낮기 때문에 분광학적 특성이 비슷한 물질에 대한 분류 정확도가 떨어지는 단점이 있다.

Landsat 위성에 탑재된 다중분광 센서들은 원격탐사 역사에서 가장 중요한 다중분광 센서 시스템 중 하나로, Landsat 센서 시스템의 관측 폭(swath width)은 185 km이다. 1972년 미국항공우주국(NASA)에 의해 Landsat 위성 1호(MSS 센서 탑재)가 처음 발사된 후 Landsat 8호(OLI 및 TIRS 센서 탑재)까지 오랜 시간을 자료에 연속성을 유지하며 지구관측 영상을 제공해 왔다. 특히 Landsat 4호와 5호에 탑재된 TM(Thematic Mapper) 센서부터 분광해상도, 시간해상도, 공간해상도가 크게 향상되기 시작 했다. TM 센서는 0.45-0.86 μm 파장범위의 가시근적외선(visible/near infrared, VNIR) 밴드 4개와 1.55-2.35 μm 파장범위의 단파장적외선(short wave infrared, SWIR) 밴드 2개로 구성되어 있으며, 10.4-12.5 μm 파장범위의 TIR 밴드 1개로 이루어져 있다. 공간해상도는 VNIR과 SWIR 밴드는 30 m, TIR 밴드는 120 m이다. Landsat 7호에는 기존의 TM 센서보다 발전된 ETM⁺(Enhanced Thematic Mapper⁺) 센서가 탑재되었는데 ETM⁺는 TM에 비해 TIR 밴드에서 공간해상도가 향상되고(TM: 120 m, ETM⁺: 60 m), 0.52-0.90 μm 파장범위에 공간해상도가 15m인 전정색(panchromatic) 밴드가 추가 되었다. 가장 최근에 발사된(2013년 2월) Landsat 8호에는 OLI(Operational Land Imager)와 TIRS(Thermal Infrared Sensor) 두 개의 센서가 탑재되어 있다. OLI 센서는 30m 공간해상도를 가진 VNIR 밴드 5개(0.433-0.885

μm)와 SWIR 밴드 2개(1.56-2.30 μm), 공간해상도 15 m의 전정색 밴드 1개(0.50-0.68 μm)로 구성되어 있으며, 권운(cirrus)을 탐지하기 위해 30 m 공간해상도의 밴드 1개(1.36-1.38 μm)가 새롭게 추가되었다. TIRS는 10.30-12.50 μm 파장범위에 두 개의 밴드로 구성되어 있다. TIRS 밴드의 공간해상도는 100 m로 60 m 공간해상도를 가지는 ETM⁺에 비해 공간해상도가 낮아졌지만 기존의 Landsat 센서들이 한 개의 밴드로 관측하던 TIR 파장영역을 두 개의 밴드로 나누어 관측할 수 있게 되었다. Landsat 8호 센서는 TM과 ETM⁺ 센서에 비해 방사해상도가 향상되었으며, 높은 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)를 제공한다.

프랑스의 CNES(Centre National d'Etudes Spatiales)에 의해 개발된 SPOT 위성은 1986년 1호가 발사된 후 2012년에 6호, 2014년에 7호가 발사되었다. SPOT 6호와 7호는 같은 궤도와 고도에서 하루 차이로 같은 장소를 재방문해 영상을 획득할 수 있다. SPOT 영상의 가장 큰 특징 중 하나는 VNIR에서의 높은 공간해상도에 있다. SPOT 6호와 7호에 설계된 VNIR 밴드(0.45-0.89 μm)의 공간해상도는 8 m이며, 전정색 밴드의 공간해상도는 1.5 m에 불과하다(Fig. 2). 또한 지상에서 위성센서의 각도조절이 가능해 동일지역을 다른 각도로 촬영함으로써 입체(stereo)영상 제작이 가능해 지형도 제작에 이용된다.

ASTER 센서는 미국과 일본에 협력으로 EOS-Terra 위

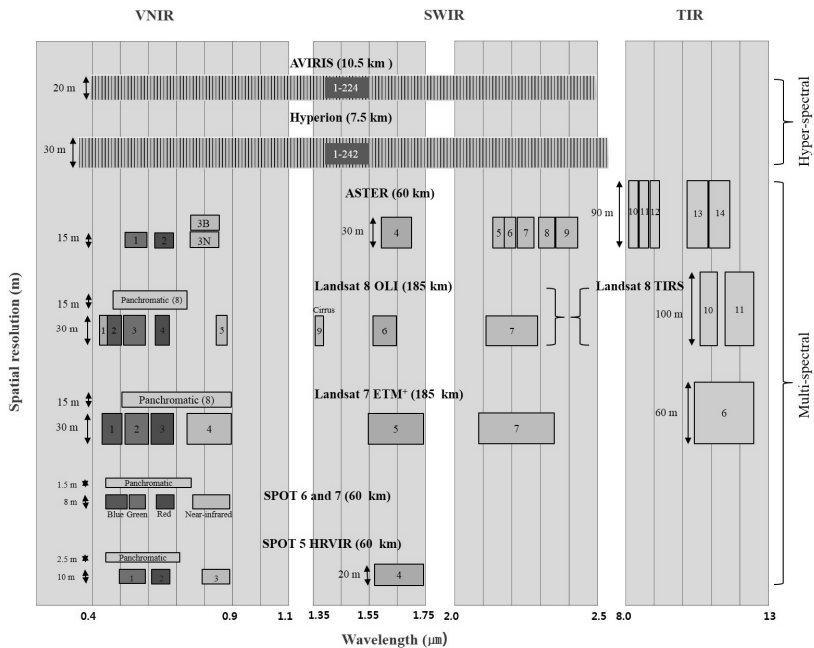


Fig. 2. Representative optical remote sensing systems for geoscience and mineral exploration.

성에 탑재되어 1999년 발사되었다. ASTER의 관측 폭은 60 km이며 15 m 공간해상도의 VNIR 4개 밴드(0.52 ~ 0.86 μm)와 30 m 공간해상도의 SWIR 5개 밴드(1.60 ~ 2.43 μm), 90 m 공간해상도의 TIR 5개 밴드(8.125 ~ 11.65 μm)로 구성되어 있다. VNIR 3번 밴드는 연직으로 관측하는 3N 밴드와 후방으로 관측하는 3B 밴드 두 개의 밴드로 구성되어 있으며, 이를 이용해 입체영상 제작이 가능하다. ASTER 입체영상으로 제작된 GDEM(Global Digital Elevation Model) 자료는 무료로 제공된다(<http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>). ASTER 영상은 연구 목적에 맞게 전처리(preprocessing) 과정을 거친 영상들을 이용할 수 있다. Level 1A는 기하보정과 방사보정을 거치지 않은 원시(raw)영상이며 Level 1B 영상은 기하보정 및 복사보정을 거친 복사휘도(radiance-at-sensor) 영상이다. Level 2B 영상들은 표면반사율(2B05), 표면휘도(2B01), 표면온도(2B03), 표면방사율(2B04) 영상 등이 있으며, Level 3A 영상은 정사보정이 적용된 영상이다. ASTER 영상에서는 crosstalk 현상으로 인한 왜곡현상이 나타난다. Crosstalk 현상은 SWIR 4번 밴드 감지기로 입사하는 빛 일부가 누출 되 근접해 있는 밴드 감지기들로 들어가 실제 빛의 밝기 값을 왜곡시키는 현상이다. Crosstalk 현상이 보정되지 않은 ASTER 영상에서는 4번 밴드의 반사도 값이 실제 반사율 값에 비해 너무 작게 나타나고 9번 밴드의 반사율 값은 너무 높게 나타나게 된다(Iwasaki and Tonooka, 2005). 이러한 현상은 SWIR 밴드에서 반사율 값을 왜곡해 광물의 오 분류를 일으킬 수 있기 때문에 보정이 필요하다. Japan Space Systems에서는 crosstalk 현상에 대한 보정 프로그램을 제공하고 있다(http://gds.aster.ersdac.jspacesystems.or.jp/gds_www2002/index_e.html).

초분광 센서

현재 활용되고 있는 초분광 영상은 대부분 항공탑재 센서를 통해 획득된 자료들이다. 항공 초분광 영상은 위성에서 획득되는 다중분광 영상에 비해 높은 공간해상도와 SNR로 지표매질에 대한 보다 세분화된 분광 정보를 제공한다. 반면에 일부 지역에 국한되어 영상자료의 획득이 가능하고 관측 폭이 좁다. 지질자원 탐사 분야에서 많이 활용되는 항공탑재 초분광 센서로는 1987년 NASA의 제트추진연구소(Jet Propulsion Laboratory, JPL)가 개발한 AVIRIS(Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer)가 있다. AVIRIS는 1983년에 개발된 AIS(Airborne Imaging Spectrometer) 센서를 개량한 모델로, 0.4 ~ 2.5 μm 파장 범위에 224개의 연속된 밴드로 구성되어 있다. AVIRIS는 1987년부터 사용되기 시작해서 몇 번의 성능 개선을 통해 지금까지 사용되고 있으며, 주로 북미, 유럽, 남미 지역에서

이용되고 있다. AVIRIS 외에도 몇몇 상업용 초분광 센서들이 개발되었으며, 대표적으로 HyMap(Hyperspectral Mapper), CASI(Compact Airborne Spectrographic Imager), AISA(Airborne Imaging Spectrometer for Application), DAIS(Digital Airborne Imaging Spectrometer) 등이 있다. HyMap은 호주의 Integrated Spectroscopy社에 의해 개발되었으며, 0.45 ~ 2.50 μm 파장범위에 128개의 연속된 밴드를 가지고 있다(SNR > 500:1). 캐나다의 ITRES社에 의해 1989년에 개발된 CASI는 0.38 ~ 1.05 μm 파장범위에 288개의 밴드로 구성되어 있으며, 비슷한 시스템으로 SWIR 센서인 SASI(0.95 ~ 2.45 μm ; 100개 밴드), MIR 센서인 MASI(3.0 ~ 5.0 μm ; 64개 밴드) 그리고 TIR 센서인 TASI(8.0 ~ 11.5 μm ; 32개 밴드)가 있다. Aisa는 핀란드의 Specim社에서 개발된 초분광 센서로 다루는 파장대역에 따라 여러 모델이 있다(e.g. AisaEAGLE, 0.40 ~ 0.97 μm , 488개 밴드; AisaHAWK, 0.97 ~ 2.50 μm , 254개 밴드). 미국의 GER社에 의해 개발된 DAIS-7915(Digital Airborne Imaging Spectrometer)는 0.4 ~ 12.6 μm 파장범위에 79개의 밴드로 구성되어 있으며, 공간해상도는 비행기의 고도에 따라 5 m에서 20 m로 달라진다.

NASA의 EO-1 위성에 탑재된 Hyperion은 VNIR과 SWIR 파장영역에서 연속된 밴드를 가진 최초의 위성 초분광 센서이다. Hyperion은 0.357 ~ 2.576 μm 파장범위에 242개 밴드로 구성되어 있으며, 30 m의 공간해상도를 갖는다. 이러한 분광범위와 밴드구성은 광물탐지 또는 분류에 적합하다. 하지만 Hyperion은 영상촬영이 주기적으로 이루어지지 않고, 일부 지역을 대상으로만 촬영이 이루어져 영상공급이 제한적이다. 또한 영상의 질에서 몇 가지 문제점이 발견되어 영상의 활용을 위해서는 추가적인 여러 보정작업들이 필수적이다. Hyperion 영상에서 나타나는 줄무늬(striping) 잡음은 특정 라인에 화소(pixel)들이 주변 화소에 비해 비정상적으로 낮은 밝기 값으로 나타나는 현상으로, 특히 이러한 현상은 VNIR의 일부 밴드들과 SWIR 밴드들에서 많이 나타난다. Hyperion 영상은 줄무늬 잡음 외에도 smile 현상에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. Smile 현상은 개별 밴드 영상에서는 나타나지 않고, 영상에 잡음을 줄이고 개별 화소분류를 위해 수행하는 최소잡음비율(Minimum Noise Fraction, MNF) 변환 영상 중 첫 번째 MNF 영상에서 밝기 값에 변화가 생기면서 나타난다. 이러한 현상들은 화소에 스펙트럼에 변화를 일으키고 분류결과에 정확도를 떨어뜨릴 수 있다. Hyperion 영상에서 발견되는 이러한 현상들은 제안된 몇몇 알고리즘에 의해 보정이 가능하다(Datt *et al.*, 2003).

TIR 파장영역의 복사에너지를 탐지하기 위한 항공탑재 센서들도 꾸준히 개발되고 운용되어 왔다. 1980년 초에

NASA에 의해 개발된 TIMS(Thermal Infrared Multispectral Scanner)는 8.2 ~ 12.6 μm 파장범위에 6개의 밴드로 구성되어 있으며, 초분광 영상보다는 다중분광 영상에 가깝다. 최근에는 여러 상업용 초분광 TIR 센서들이 개발되고 있다. AisaOWL는 핀란드 Specim社에 의해 개발된 Aisa 센서 모델 중 하나로 8 ~ 12 μm 파장 범위에 84개의 밴드로 구성되어 있다. 미국의 Aerospace Corporation에 의해 개발된 SEBASS(Spatially Enhanced Broadband Array Spectrograph System)는 7.5 ~ 13.5 μm 파장범위 사이에 128개의 밴드로 구성되어 있으며, SNR이 높은 것이 특징이다(대략 2000:1). 능동형 광원으로서 탄산가스레이저(CO₂ laser)를 이용한 TIR 항공분광센서 MIRACO₂LAS(Midinfrared Airborne CO₂ Laser System)도 개발 운용되었다. 호주의 CSIRO에서 1989년 처음 운용된 이 센서는 9.1 ~ 11.2 μm 파장범위에 100개의 밴드로 구성되어 있으며, 입사된 탄산가스레이저가 지표면에서 후방산란(backscatter)된 반사 값을 측정하게 된다. 아쉽게도 아직까지 TIR 파장영역을 관측하는 위성 초분광 센서 시스템은 존재하지 않는다.

광물 및 암석의 분광학적 특성

광물과 암석에 나타나는 분광학적 특성들은 그동안 여러 연구들을 통해 밝혀졌으며(Hunt, 1977; Gaffey, 1986; Salisbury *et al.*, 1991), 이러한 분광학적 특성은 원격탐사를 이용해 광물과 암석 탐지를 가능하게 한다. 여러 연구기관들에서 광물과 암석의 분광학적 정보를 분광라이브러리(spectral library) 형태로 구축하여 제공하고 있으며, 대표

적으로 미국지질조사소(U.S. Geological Survey, USGS), JPL, 존홉킨스대학(John Hopkins University), ASTER 분광라이브러리 등이 있다. 국내에는 한국지질자원연구원(KIGAM)에서 구축한 분광라이브러리가 있다.

광물 또는 암석의 표면에 전자기 복사에너지가 입사하면 일부 파장의 빛은 광물의 입자내로 흡수되고 다른 파장의 빛들은 투과되거나 반사된다. 입사하는 빛의 세기에 매질(광물 또는 암석)로부터 반사되는 빛의 세기의 비를 반사율(reflectance)이라고 하는데, 이러한 반사율은 광물의 물리적, 화학적 특성에 따라 고유의 반사 스펙트럼으로 나타난다. 광물과 암석의 분광 반사율은 지상에서 분광계(spectrometer)를 통해 측정할 수 있으며, 원격탐사 영상을 통해 지표에 분포하는 광물과 암석의 분광학적 특성을 탐지할 수 있다.

광물의 결정격자나 화학적 성분에 의해 전자기 복사에너지와 상호작용을 일으키게 되고, 광물 분자 내에서 진동과정(vibrational process)과 전자과정(electronic process) 등이 나타난다. 철 광물에 빛이 입사하면 철 광물에 포함된 제 2철(ferric, Fe³⁺) 이온과 제 1철(ferrous, Fe²⁺) 이온에 의해 결정장 효과(crystal field effect)와 전하이동 효과(charge transfer effect)와 같은 일련의 전자과정 등이 나타나게 되고, VNIR 파장영역(0.4-1.1 μm)에서 특징적인 흡수 스펙트럼이 나타난다(Fig. 3(a)). 반면에 입사된 복사에너지에 의해 분자 또는 결합되어 있는 핵들이 미묘하게 움직이게 되면서 나타나는 진동과정은 SWIR(1.1-2.5 μm)과 TIR(8-13 μm) 파장영역에서 광물 고유의 흡수특징들을 만들어 낸다. 특히 점토광물, 황산염광물 또는 탄산염광물에 포함된 물

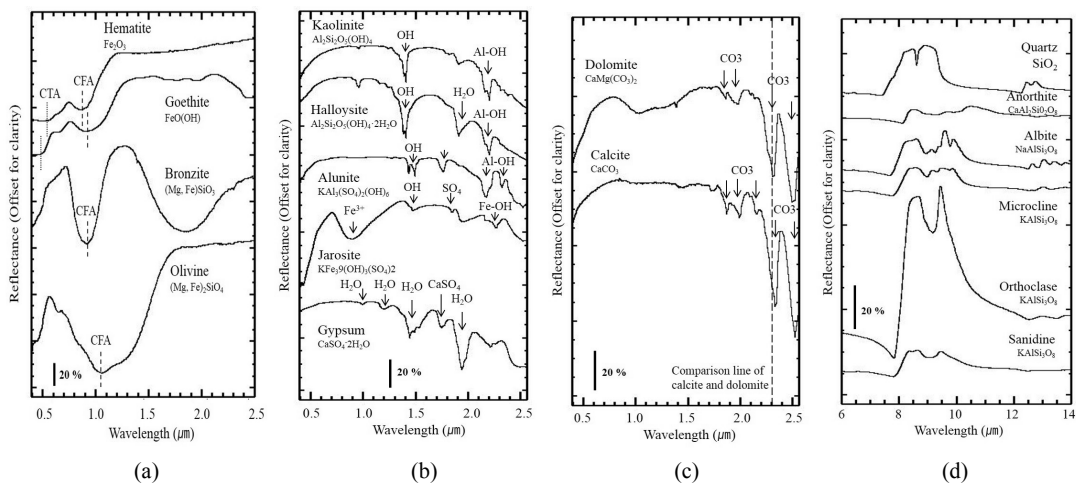


Fig. 3. Reflectance spectra of (a) some iron minerals showing the change in absorption position by CFA (crystal field absorption) and CTA (crystal transfer absorption), (b) some hydroxyl and sulfate minerals, (c) some carbonate minerals, (d) some silicate minerals. all spectra are from USGS spectral library (Clark *et al.*, 2007).

Table 1. Representative mineral groups by spectral features

Wavelength region	Representative mineral group	Cause of features
VNIR 0.4-1.1 μm	Iron oxides (hematite, goethite), iron hydroxide (limonite), sulfates (jarosite)	Electronic process: charge transfer and crystal field absorption effects
SWIR 1.1-2.5 μm	Phyllosilicates (clay mineral), sulfates (alunite, jarosite), carbonates (calcite, dolomite), etc	Vibrational process: overtone of OH stretch, combination of OH stretch and H-O-H bend, combination of OH stretch and metal-OH bend, combination and overtones of the CO ₃ fundamentals
TIR 8-14 μm	Tectosilicates (quartz, feldspar), carbonates, etc	Vibrational process: Si-O-Si stretch, Si-O fundamentals, free CO ₃ ²⁻ stretch

(H₂O)과 수산기(OH), 탄산염(CO₃) 등에 의해 특정 파장대역에서 분광학적 특징들이 나타나고, 이를 바탕으로 광물을 식별할 수 있게 된다(Fig. 3(b) and 3(c)). 한편 장석류와 석영과 같은 일부 규산염 광물 또는 암석은 SWIR 파장대역에서는 흡수특징이 잘 나타나지 않고, 원소성분(Si, O)과 그 결정 구조에 의해 TIR 파장대역에서 고유한 분광학적 특징들이 나타난다(Fig. 3(d)). Table 1은 VNIR, SWIR, TIR 파장대역에서 나타나는 광물의 고유한 분광특성에 따라 주요 광물 군을 분류한 것이다.

다중분광 영상의 활용

열수변질광물 탐지 및 분류

광물광상은 일반적으로 열수변질작용과 밀접한 관련이 있다. 지표에 존재하는 변질작용을 받은 암석의 노두를 찾

고 분석함으로써 많은 새로운 광상들이 발견되었다. 광물 자원 탐사를 위한 원격탐사 영상의 활용은 주로 기반암이 노출된 지역에서 열수변질대의 위치를 찾고, 지표에서 열수변질광물들의 분포 양상을 확인하는데 이용되어 왔다. 열수변질작용은 접촉교대작용이나 열수가 모암과 접촉하거나 충전작용이 일어날 때 모암이 열에 의해 변질작용을 받게 되면서 발생한다. 이렇게 생성된 변질대의 크기는 수십 cm에서 수십 km까지 나타나며, 일반적으로 변질대는 광상의 부존 위치보다 훨씬 넓게 분포하기 때문에 잡두광체를 탐사하는데 중요한 도구가 된다.

Lowell과 Guilbert(1970)는 산 마뉴엘 칼라마쥬(San Manuel-Kalamazoo) 광상의 수평적, 수직적 변질 작용 및 광화작용의 특징을 바탕으로 반암구리 광상에서 나타나는 일반적인 열수변질 모델을 제시하였다(Fig. 4(a)). 광맥 중심부에서부터 외벽으로 갈수록 포타식(potassic)-필릭(phylic)-

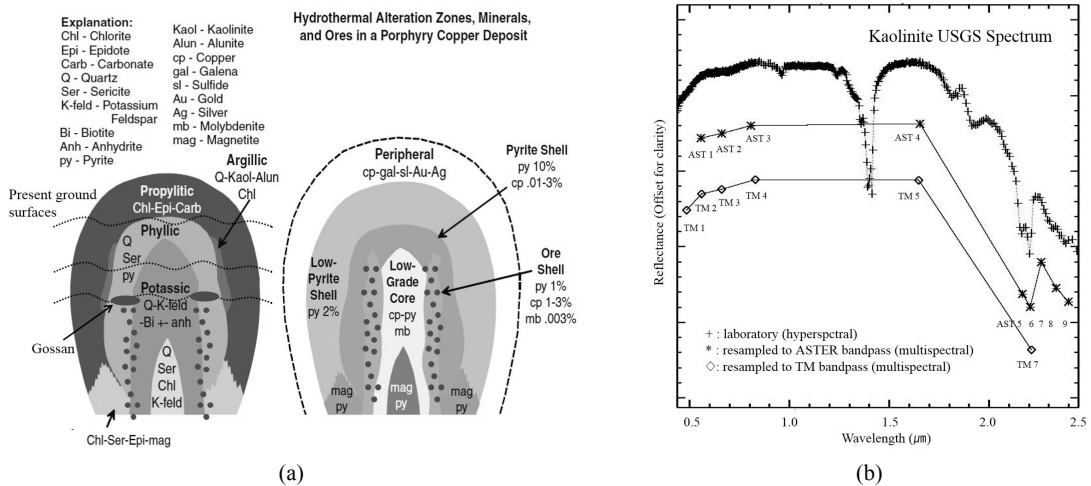


Fig. 4. (a) Schematic cross section of hydrothermal alteration zones and (b) mineralization zones associated with porphyry copper deposit (modified from Lowell and Guilbert, 1970). (b) Laboratory spectrum of kaolinite resampled to Landsat TM and ASTER bandpasses.

아질릭(argillic)-프로필리틱(propylitic) 변질대가 연속적으로 발달하며, 각각의 변질대는 특정 광물 군들이 함께 나타나는 경향이 있다. 원격탐사 영상을 이용한 광물 탐지는 주로 이러한 열수변질대에서 산출되는 주요 광물들 중 뚜렷한 분광학적 특성이 나타나는 철 광물(적철석, 자철석, 철백반석), 수산기 광물(점토광물, 운모), 황산염 광물(명반석), 탄산염 광물(방해석, 돌로마이트) 등을 대상으로 한다(Fig. 3). 열수변질대의 광맥 중심부에서 주로 나타나는 칼륨 변질대에서는 석영, 칼륨장석, 흑운모 등이 주로 산출되며, 칼륨 변질대 중에서도 가장 강한 변질 작용을 받은 압주(stock)에서는 석영, 견운모, 녹니석, 칼륨장석 등이 많이 나타난다. 칼륨 변질대 다음으로 나타나는 변질대는 필릭 변질대로 주로 석영, 견운모, 황철석 등이 산출된다. 필릭 변질대는 일반적으로 광석 분포영역(ore shell) 일부분을 포함하며 대부분 강한 황철석 광화작용이 함께 나타난다. 필릭 변질대 안쪽에서는 견운모가 가장 우세하게 나타나며 변질대 외곽쪽에서 점토광물과 일라이트와 같은 가수운모(hydrous mica) 등이 산출된다. 광석 분포 영역에서는 황동석, 몰리브덴, 황철석과 다른 금속 황화물 등이 산출된다. 대부분의 광석은 칼륨 변질대와 필릭 변질대 사이의 원통형 영역에서 나타나며 구리 함량은 일반적으로 1%나 그 미만 정도로 여겨진다. 이 광석지역이 침식작용에 의해 노두가 드러나면 황철석이 산화되고 갈철석으로 바뀌면서 갈색이나 암갈색을 띠게 되는데 이를 고산(gossan)이라고 한다. 필릭 변질대에 비해 좁은 공간적 범위에 분포하는 아질릭 변질대에서는 석영, 고령석, 명반석, 몬모릴로나이트 등이 산출되며, 고령석이 가장 일반적인 광물이다. 프로필리틱 변질대는 가장 넓은 범위에서 나타나고 가장 약한 변질 작용을 받는다. 또한 여러 모암으로 구성되어 있기 때문에 산출되는 광물들이 다른 변질대에 비해 다양하다. 프로필리틱 변질대에서 일반적으로 산출된다고 알려진 광물은 녹립석, 녹니석, 탄산염 광물들로 광물 탐사에서 중요도는 다른 열수변질대에 비해 떨어진다. 원격탐사 영상은 각각의 열수변질대에서 산출되는 주요 광물들의 분광학적 특성에 기초해 변질대를 탐지하거나 구분하는데 이용된다. 이암, 세

일, 점토암과 같은 퇴적암들이 풍화작용을 받아 생긴 쇠암질의 점토광물들은 열수변질작용에 의해 생성되는 점토광물들과 분광학적 특성이 같기 때문에 열수변질 광물로 혼동되어 나타날 수 있다(Mars and Rowan, 2006). 이러한 퇴적암 지역은 미리 영상분석에서 제외하거나 실제 현장조사를 통해 영상분석 결과를 확인해야 한다. 열수변질대를 탐지하고 광물을 분류하기 위해 주로 사용된 광학 다중분광 영상으로는 Landsat 영상과 ASTER 영상이 있다.

Landsat 영상의 활용 및 분석기법

Landsat 영상은 열수변질대를 탐지하는데 유리한 파장 범위의 밴드들로 구성되어 있어 오래 동안 열수변질대 탐지에 활용되어 왔다. 밴드비율 기법(band ratio)은 변질대 탐지를 위한 전통적 영상처리 기법 중 하나로 초기 항공영상과 Landsat MSS 영상 분석 때부터 적용되어 왔다(Rowan *et al.*, 1977; Goetz and Rowan, 1981). 밴드비율 기법은 한 밴드의 강도 값을 다른 밴드의 강도 값으로 나눈으로써 변질광물과 비 변질광물 지역의 분광특성 차이를 강조시키는 기법이다. 예를 들어 열수변질대에서 나타나는 변질광물 중 고령석과 같은 점토광물은 일반적으로 TM 5번 밴드(1.55-1.75 μm)에서 높은 분광반사율을 보이며, TM 7번 밴드(2.08-2.35 μm)에서는 낮은 반사율을 보인다(Fig. 4(b)). 이러한 특성을 이용하여 TM 5번 밴드 영상을 TM 7번 밴드 영상으로 나누면 점토광물이 분포하는 지역은 그렇지 않은 지역에 비해 상대적으로 높은 밴드 비 값을 보이고 영상에서 밝게 표현된다. TM 7번 밴드와 TM 5번 밴드의 비는 주로 점토광물 또는 황산염 광물에 포함된 수산기(hydroxyl)에 의한 분광 흡수특성을 강조시키기 위해 사용되었다. 반면에 철을 포함하고 있는 적철석, 침철석과 같은 산화철 광물과 철백반석과 같은 일부 황산염 광물은 일반적으로 TM 3번 밴드(0.63-0.69 μm)에서 높은 반사율을 보이며, TM 1번 밴드(0.45-0.52 μm)에서는 낮은 반사율을 보인다. 따라서 함철광물의 분광학적 특성을 강조시키기 위해서 TM 3번 밴드 영상을 TM 1번 밴드 영상으로 나누게 된다. 밴드비율 기법의 장점은 지형기복과 복사조도에 따

Table 2. Representative Landsat TM band ratios for enhancing mineral features

Target	TM band ratio	Reference
Leached and oxidized iron bearing minerals	3/1	
Opaque phases (serpentinite)	5/1	
Hydrous minerals, clay minerals, phyllic alteration	5/7	Abrams <i>et al.</i> , 1983; Sultan <i>et al.</i> , 1987; Sabins, 1997; Harris <i>et al.</i> , 1998; Abdelsalam <i>et al.</i> , 2000
Fe-bearing aluminosilicates	5/4 \times 3/4	
Hydroxyl minerals	4/5	

른 환경적 조건에 의한 영향을 줄일 수 있다고 알려져 있다. Fig. 5(a)와 5(b)는 혼련지역인 쿠프라이트 지역에 밴드비율 기법을 적용한 결과이다. 밝게 보이는 지역이 밴드비율 값이 큰 지역으로 각각 철 광물과 점토광물이 분포할 가능성이 큰 지역이다. 이외에도 다양한 TM 밴드비율 조합들이 Landsat 영상으로부터 여러 광물의 분광학적 특성을 추출하기 위해 사용되었다(Table 2).

Chavez 등(1982)은 Landsat 영상에서 세 개의 밴드를 선택하여 RGB 색 합성 영상을 만들 때 최대의 정보(분산 값)

를 가지는 조합을 찾기 위해 최적지수인자(Optimum Index Factor, OIF)를 개발하였다. Prinz(1996)는 TM 영상의 최적의 RGB 색 합성 밴드조합을 찾기 위해 OIF 값을 계산했을 때, TM 1번 밴드, 5번 밴드, 7번 밴드를 사용하여 색 합성할 경우 가장 많은 지질학적 정보를 포함하고 있는 것을 확인하였다. Fig. 5(c)는 쿠프라이트 지역에 TM 5번, 7번, 1번 밴드를 이용하여 RGB 색 합성한 영상으로 점토광물 등을 포함하는 열수변질지역이 핑크색으로 표현되고 있다. OIF 값은 다음과 같이 계산할 수 있다.

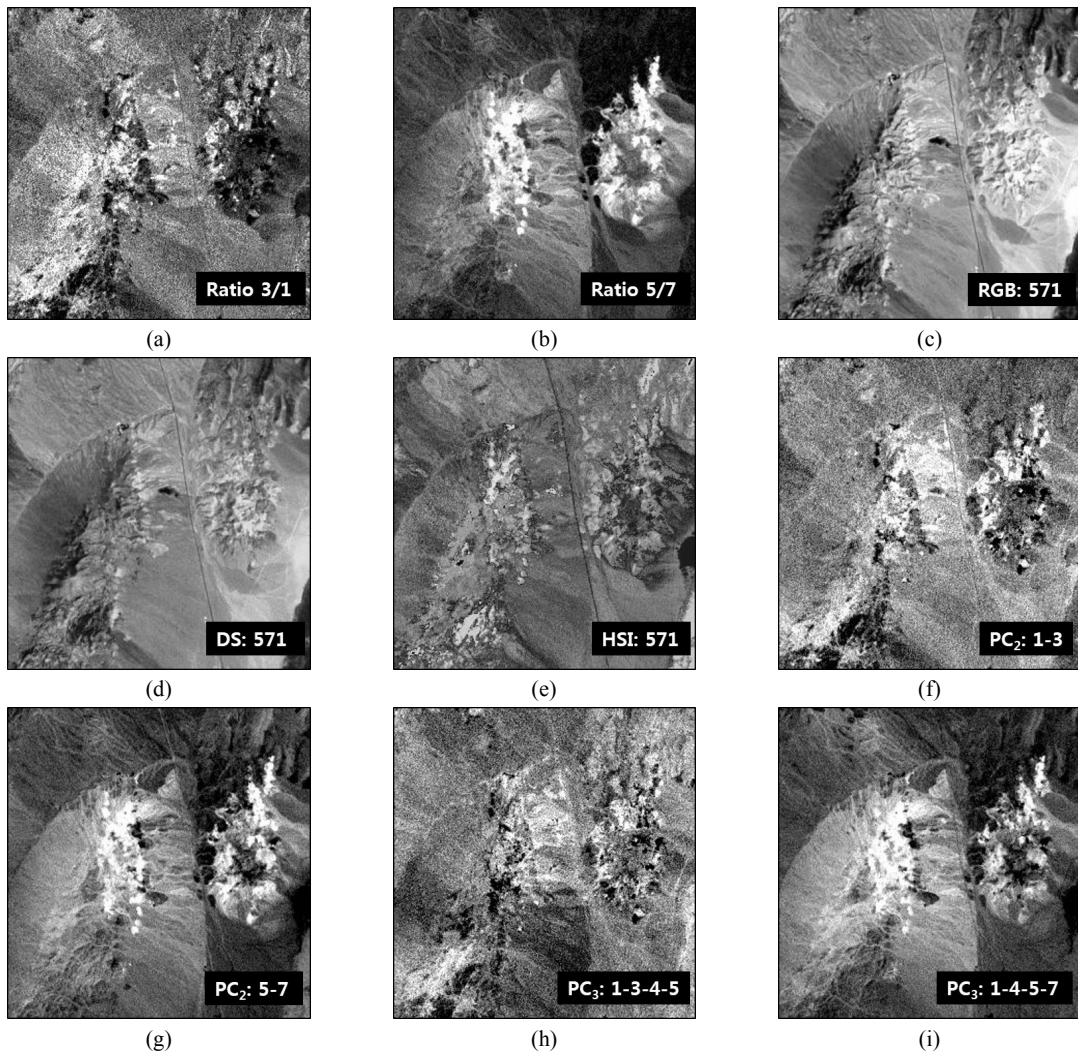


Fig. 5. Example results of image processing of Landsat TM at Cuprite, Nevada. (a) TM band ratio 3/1 image and (b) TM band ratio 5/7 image with higher ratio values shown in brighter tones. (c) TM band 5(red)-7(green)-1(blue) color composite image. (d) TM band 5-7-1 decorrelation stretching image. (e) TM band 5-7-1 HSI transform image. (f) PC_2 image of TM band 1-3, (g) PC_2 image of TM band 5-7, (h) PC_3 image of TM band 1-3-4-5 and (i) PC_3 image of TM band 1-4-5-7.

$$OIF = \sum \sigma_k / \sum |\gamma_i| \quad (1)$$

여기서 σ_k 는 밴드 k 에 대한 표준편차 $|\gamma_i|$ 는 평가되는 세 밴드 중 2개 사이의 상관계수의 절대 값이다. OIF의 값이 클수록 3개의 밴드조합이 상관관계는 최소가 되고 정보(분산)의 양은 커진다. 한편 단일밴드를 사용하는 대신 밴드비율 영상을 사용하여 RGB 색 합성함으로써 변질대의 특성을 강조시키기도 한다.

비상관화 확장(decorrelation stretching), HSI 변환, 주성분 분석(Principal Component Analysis, PCA) 기법 등은 영상에서 변질광물 또는 지질학적 특성을 강조하기 위해 사용되어져 왔다. PCA는 서로 상관성이 높은 영상 밴드들을 서로 상관관계가 없는 밴드들로 재조합하는 기법이며, 비상관화 확장은 PCA 기법에 기초한 영상 강조 기법이다. HSI는 영상 분석에서 일반적으로 사용되는 RGB 색상 체계 대신 색상(hue), 채도(saturation), 명도(intensity)로 영상을 표현함으로써 영상의 대비를 강조시키는 기법이다. Gillespie 등(1986)은 비상관화 확장과 HSI 변환기법이 영상에서 지질매체에 대한 특징들을 강조시키는데 효과적임을 확인하였다. Fig. 5(d)와 5(e)는 쿠프라이트 지역에 각각 비상관화 확장기법과 HSI 변환기법을 적용한 결과 영상으로 앞서 RGB 색 합성과 마찬가지로 TM 5번, 7번, 1번 밴드를 이용하였다. RGB 색 합성 결과(Fig. 5(c)) 핑크색으로 나타난 변질광물의 분포지역이 비상관화 확장 기법과 HSI 변환 기법을 적용한 결과 영상에서는 시각적으로 더 강조되어 나타남을 확인할 수 있다. Crosta와 Moor(1989)는 PCA를 통한 고유벡터(eigenvector) 행렬 값과 산화철 광물의 분광학적 특성 사이의 관계를 이용한 FPCS(feature-oriented principal component selection) 기법을 개발하였다. Chavez와 Kwarteng(1989)은 전체 밴드를 사용하는 대신 두 개의 TM 밴드만을 선택하여 PCA를 수행하였으며, 이를 통해 TM 1번 밴드와 TM 3번 밴드를 이용한 제2주성분(PC₂) 밴드는 제2철 광물과 상관성이 높은 분산정보를 담고 있고 TM 5번 밴드와 TM 7번 밴드를 이용한 제2주성분(PC₂) 밴드는 수산기 광물과 상관성이 높은 분산정보를 담고 있음을 확인하였다. Fig. 5(f)와 5(g) TM 밴드 2개를 선택(TM 1번 밴드와 3번 밴드, TM 5번 밴드와 7번 밴드)하여 PCA 기법을 적용한 결과로 밝게 보이는 지역이 각각 산화철 광물, 점토광물과 상관성이 큰 지역이다. 한편 Fraser(1991)는 두 개의 TM 밴드를 선택하는 대신 두 개의 TM 밴드비율 영상(TM 밴드비율 3/1 영상과 4/1 영상 선택 또는 TM 밴드비율 4/5 영상과 5/7 영상 선택)을 이용하여 PCA를 수행하였으며, 이 경우 변질광물이 분포하는 지역의 특성을 더 강조시킬 수 있다고 하였다. Loughlin(1991)은 식생과 같은 다른 물질에 의한 영향을 제거하기 위해 네 개의

TM 밴드를 선택하여 PCA를 수행하였다. 그 결과 TM 1번, 3번, 4번, 5번 밴드의 제3주성분(PC₃) 또는 제4주성분(PC₄) 밴드에서 제2철 광물이 탐지되고 TM 1번, 4번, 5번, 7번 밴드의 제3주성분(PC₃) 또는 제4주성분(PC₄) 밴드에서 수산기 광물과 탄산염 광물지역이 탐지됨을 확인하였다. Fig. 5(h)와 5(i)는 TM 밴드 4개를 선택하여 PCA 기법을 적용한 결과로 영상에서 밝게 나타나는 지역이 각각 철 광물, 점토광물과 상관성이 큰 지역이다. Carranza와 Hale(2002)은 TM 영상과 DEM 자료를 이용해 PCA 기법과 감독분류를 적용하여 식생이 밀집된 지역에서 정확도가 크게 향상된 열수변질도를 작성하였다. PCA 기법은 사용이 비교적 간단하고 정확해 광물탐지 목적으로 최근까지도 많이 활용되고 있다(Liu *et al.*, 2013). Harris 등(1998)은 TM 영상과 암석지화학적 자료를 함께 사용해 GIS 모델링을 통해 열수변질도를 작성하였으며, Ott 등(2006)은 변질대를 탐지하고 새로운 광상 부존 가능지역을 찾기 위해 TM 영상, DEM 자료, 지질도, 항공자력탐사 자료들을 기초로 GIS 분석을 실시하였다.

ASTER 영상의 활용 및 분석기법

ASTER 영상은 지난 15여 년 간 지질자원 원격탐사분야에서 가장 폭 넓게 활용된 영상이다. 다른 다중분광 영상에 비해 높은 분광해상도를 가지는 것이 특징이며, 특히 SWIR과 TIR 파장범위에서 여러 개의 분광밴드를 가지고 있어 비교적 정확하게 열수변질 광물 탐지가 가능하다. 열수변질 광물 탐지를 위한 ASTER 영상 분석에는 주로 Landsat 영상에 사용된 밴드비율, PCA와 같은 기존의 영상 처리 기법들이 이용되었다. 하지만 ASTER 영상은 Landsat 영상에 비해 많은 수의 분광밴드로 구성되어 있기 때문에 다양한 밴드를 선택하고 조합하는 것들이 가능해졌으며, 이로 인해 보다 다양한 광물들을 구분할 수 있게 되었다. 예를 들어 Landsat 영상은 두 개의 밴드를 이용해 밴드비율 영상을 만들어 철 광물과 점토광물 정도를 구분할 수 있었다면 ASTER 영상의 경우 여러 밴드들을 더하거나 곱하고 나눴으로써, 점토광물을 고령석과 운모 등으로 세분화하여 구분할 수 있게 되었다. Table 3은 열수변질 광물 또는 변질 암석의 탐지를 위해 여러 연구들에서 제안된 ASTER 영상의 밴드비율과 밴드조합들이다. Fig. 6(a)~(d)는 쿠프라이트 지역의 ASTER 영상에 몇몇 밴드조합을 적용한 결과이다. 밝게 보이는 지역들은 각각의 밴드조합에 따른 변질광물 특성이 강하게 나타나는 지역이며, 그 중 Fig. 6(b)는 고령석과 같은 아질릭 변질광물 추출을 위한 ASTER (4×7)/(5×5) 밴드조합이 적용된 결과영상이다. 고령석은 ASTER 밴드 4번과 7번에서 높은 반사율을 보이며 밴드 5번에서 낮은 반사율 값을 보이기 때문에(Fig. 4(b)) 이러한

Table 3. Representative ASTER band ratios and band combinations for enhancing mineral features

Target	ASTER band ratio or band combination	Reference
Iron minerals or Iron-rich rocks using VNIR bands		
Ferric iron, Fe ³⁺ (hematite, goethite)	2/1	Rowan and Mars, 2003
Ferrous iron, Fe ²⁺	1/2	Rowan <i>et al.</i> , 2005
	5/3	
Altered-minerals or -rock using SWIR bands		
Pyrophyllite	(4×7)/5 ²	Ninomiya <i>et al.</i> , 2005
Argillic (kaolinite, alunite)		Son <i>et al.</i> , 2012
Pyrophyllite	(4×6)/5 ²	Lee <i>et al.</i> , 2009
Al-OH(muscovite or illite)	(5+7)/6	Rowan and Mars, 2003
	(4+7)/6 ²	Rowan <i>et al.</i> , 2005
Montmorillonite and mica	(4×7)/6 ²	Ninomiya <i>et al.</i> , 2005
Ca, Mg-CO ₃ (dolomite)	(6+8)/7	Rowan and Mars, 2003
Bauxite	(5×8)/7 ²	Guha <i>et al.</i> , 2013
Ca-CO ₃ (limestone)	(7+9)/8	Rowan and Mars, 2003
Mg-OH (chlorite, hornblende), Carbonate (calcite)	(6+9)/8	Hewson <i>et al.</i> , 2005
Calcite	(6×9)/8 ²	Lee <i>et al.</i> , 2008
Propylitic (epidote, chlorite, calcite)	(5×9)/8 ²	Son <i>et al.</i> , 2012
Fe,Mg-OH	(7×9)/8 ²	Rowan <i>et al.</i> , 2005
Silicate minerals or igneous rocks using TIR bands		
Quartz or quartzose rock	13/12	Rowan <i>et al.</i> , 2005
	11 ² /(10×12)	Ninomiya <i>et al.</i> , 2005
Siliceous rock	14/12	Rowan <i>et al.</i> , 2006
lava flow		Thurmond <i>et al.</i> , 2006
Carbonate rock	13/14	Ninomiya <i>et al.</i> , 2005
	(12+14)/13 ²	Rowan <i>et al.</i> , 2005
Mafic-ultramafic rock	(12×14)/13 ²	Ninomiya <i>et al.</i> , 2005

분광학적 특성을 강조시킴으로써 고령석을 탐지하게 된다. Mars와 Rowan(2006)은 다중 밴드비율 기법과 경험적 임계값(threshold value) 설정을 통한 밴드비율논리연산자(Band Ratio Logical Operator, BRLO) 모델을 개발하였으며, 아질릭 변질암과 필릭 변질암을 탐지하는데 사용하였다. Crosta 등(2003)은 Landsat 영상분석에 적용했던 PCA 기법을 ASTER 영상에 적용하여 변질광물을 분류하였다. ASTER는 SWIR에서 여러 개의 분광밴드를 가지고 있기 때문에 PCA를 위한 밴드선택이 다양해졌으며, 이를 통해 보다 다양한 광물들을 분류할 수 있게 되었다. Crosta 등(2003)은 명반석 탐지를 위해 ASTER 1번, 3번, 5번, 7번 밴드를 사용하여 PCA를 수행하였으며, 일라이트(ASTER 1

번, 3번, 5번, 6번 밴드), 고령석+스펙타이트(ASTER 1번, 4번, 6번, 9번 밴드), 고령석(ASTER 1번, 4번, 6번, 7번 밴드) 탐지를 위한 PCA 밴드선택 방법도 제시하였다. Fig. 6(e) ~ (g)는 특정 ASTER 밴드들을 선택해 PCA를 적용한 결과 영상들이다.

ASTER 영상은 다른 다중분광 센서에 비해 많은 수의 분광밴드를 가지고 있기 때문에 초분광 영상 분류를 위한 영상처리 기법의 적용이 가능하다. Rowan 등(2003)은 초분광 영상 분류에 많이 사용되는 정합필터링(matched filtering) 기법을 ASTER 영상에 적용해 광물분류를 시도한 결과, 초분광 영상의 분류 결과와 비슷한, 신뢰할 만한 분류 결과를 얻을 수 있었다. 그 외에도 여러 연구를 통해 ASTER 영상

을 이용한 광물분류에 초분광 영상 분석 기법이 효과적임이 확인되었다(Rowan *et al.*, 2005; Ducart *et al.*, 2006). 하지만 ASTER 영상은 고령석과 명반석 또는 방해석과 돌로마이트와 같은 분광학적 흡수특성이 비슷하게 나타나는 몇몇 광물들 간에는 오 분류를 일으키거나 초분광 영상에 비해 정확도가 떨어지는 한계점이 있다(Mars and Rowan, 2010). 그럼에도 불구하고 ASTER 영상은 초분광 영상에 비해 넓은 지역을 한 번에 탐지할 수 있고 영상의 획득이 비

교적 쉬어 광물의 탐지 및 분류를 위해 많이 활용되어 왔다. Hubbard와 Crowley(2005)는 부분화소분류를 통한 보다 정확한 광물분류를 위해 VNIR 파장대역에서 많은 밴드를 가지는 ALI 영상과 SWR에서 많은 밴드를 가진 ASTER 영상을 통합하여 13개의 분광밴드를 사용해 광물 분포도를 작성한 바 있다. Fig. 6(h)와 6(i)는 초분광 영상 분류에 많이 사용되는 분광각매퍼(Spectral Angle Mapper, SAM) 기법과 정합필터링 기법을 사용하여 쿠프라이트 지역에 대한

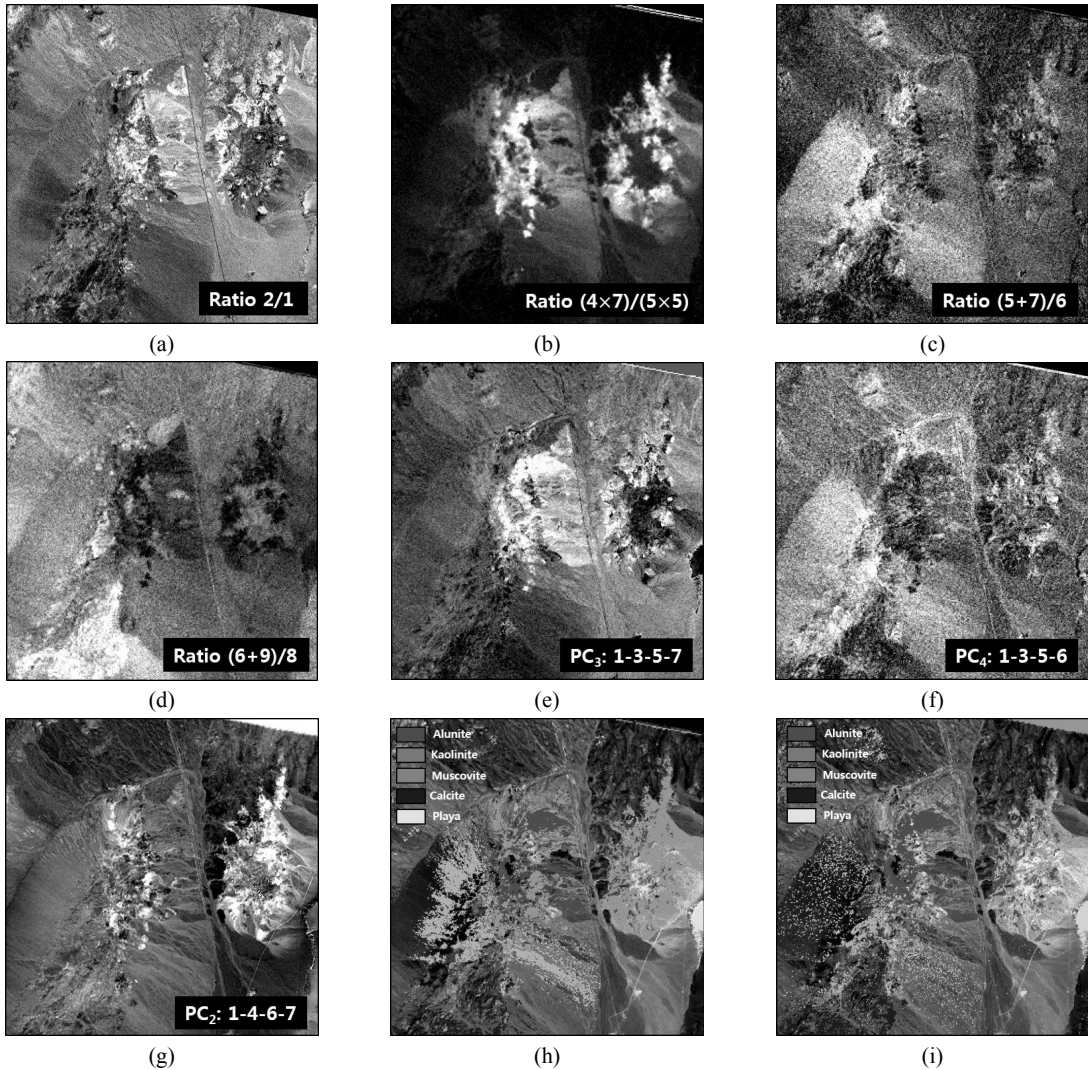


Fig. 6. Example results of image processing of ASTER at Cuprite, Nevada. (a) ASTER band ratio 2/1 image, (b) ASTER band ratio $(4 \times 7) / (5 \times 5)$ image, (c) ASTER band ratio $(5+7) / (6)$ image, (d) ASTER band ratio $(6+9) / (8)$ image with higher ratio values shown in brighter tones. (e) PC₃ image of ASTER band 1-3-5-7, (f) PC₄ image of ASTER band 1-3-5-6, (g) PC₂ image of ASTER band 1-4-6-7. (h) ASTER SAM classification map. (i) ASTER matched filtering classification map.

광물 분포도를 작성한 결과이다.

최근에는 수 십 장부터 수 천 장에 이르는 ASTER 영상을 사용하여 수백 km 이상의 광역지역을 대상으로 한 변질광물 및 변질암석의 분포도 작성이 시도되고 있다. Hewson 등(2005)은 ASTER 영상 30장을 이용하여 52,000 km²에 이르는 호주 Broken Hill-Curnamora 지역에 대한 광물 분포도를 작성하였으며, Mars와 Rowan(2006)은 ASTER 영상 62장을 사용하여 이란 Zargos 화산호 전체 지역에 대한 변질암 분포도를 작성하였다. Laukamp 등(2012)은 ASTER 영상 4000여장을 이용하여 호주 대륙 전체에 대한 지표 변질광물 분포도 작성 프로젝트를 진행하고 있다. 한편 석유나 가스의 미세누출(microseep)에 의해 나타나는 지표광물에 변질적 특성이나 분광특성 변화를 관측하기 위해서도 ASTER 영상이 사용된 바 있다(Fu *et al.*, 2007; Petrovic *et al.*, 2008).

암석분류

원격탐사 영상은 지표에 존재하는 변질광물이나 변질작용과 관련된 암석의 탐지뿐만 아니라 일반적인 지표 암석에 대한 정보를 얻고 암석을 구분하는데 사용되었다. 과거에는 항공영상의 단순 사진 판독을 통한 암석 구분이 이루어졌다. 예를 들어 원격탐사 영상을 통해 습곡작용 또는 단층작용에 의해 외부에 노출된 퇴적암 지역에서 길고 연속적으로 발달한 층리면을 확인하거나 영상에서 나타나는 색상의 차이를 통해 지표에 노출된 암석들을 구분하였다. 과거에 비해 Landsat과 ASTER와 같은 다중분광 위성 센서의 공간해상도와 분광해상도가 발전하면서 다중분광 영상은 밴드비율, 밴드조합, PCA 기법 등을 통해 광역지역에 대한 암석분류나 개선된 새로운 지질도를 작성하는데 이용되었다. Leverington(2010)은 신경망(neural network) 기법을 이용한 TM 영상의 분석을 통해 퇴적암 지역의 암석단위 구분을 시도하였다. Leverington과 Moon(2012)은 SMA(Spectral Mixture Analysis) 기법과 신경망 기법을 이용한 TM 영상의 분석을 통해 오피올라이트 지역에 암석분류를 수행하였으며, Li 등(2011)은 TM 영상의 질감(texture)적 특성과 지식 기반 시스템(knowledge based system)을 이용하여 암석의 분류를 시도하고 분류 정확도가 향상됨을 확인하였다. 최근에는 지형이 험준하고 구조적으로 복잡한 지역에서 암석분포를 확인하기 위해 분광해상도가 뛰어난 ASTER 영상이 많이 사용되었으며(Gomez *et al.*, 2005; Khan and Mahmood, 2008), Bertoldi 등(2011)은 ASTER 영상에 밴드 비율 기법과 PCA를 적용해 식생이 밀집해 있고 지형이 험준한 히말라야 지역에서 기존에 확인되지 않은 110 km² 크기의 새로운 화강암류(granitoid) 암체를 발견하였다. 다중분광 영상은 암석분류

외에도 암석의 경계면을 추출하기 위해 사용되기도 했다. Salati 등(2011)은 암석의 경계면을 영상에서 자동추출하기 위한 RTM(Rotation variant Template Matching) 알고리즘을 개발하였으며, 이를 ASTER 영상에 적용한 결과 신뢰할만한 결과를 얻을 수 있었다.

지표 암석 구분을 위해서 극초단파를 이용하는 레이더(radar) 영상을 사용할 수도 있다. SAR 영상을 분석해보면 상대적으로 신선한 층적광상은 거친 지표면으로 인해 모든 편파(polarization)에 강한 반응을 보이는 반면에 상대적으로 오래 전 시기에 형성된 층적광상은 비교적 편평한 표면 특성에 따라 약한 반응을 보인다. 또한 증발광상에서는 수분함량 정도에 따라 다른 편파 특성을 보이며, 퇴적암 지역에서는 풍화정도에 따라 다른 특징적인 편파 신호를 보인다(Evans *et al.*, 1988). 레이더 영상은 광학영상과 함께 융합되어 사용되기도 한다. Blom과 Daily(1982)는 레이더 영상인 Seasat 영상과 광학 영상인 Landsat 영상의 통합(co-register) 분석을 수행했을 때 Landsat 영상만을 사용한 암석분류 결과보다 정확도가 크게 향상됨을 확인하였다. 특히 레이더 영상의 몇 가지 질감(texture) 분석을 수행한 결과 암석의 분류 정확도를 14% 이상 높이는 효과를 얻었다. Wiart 등(2000)은 JERS-1 SAR 영상과 TM 영상을 사용하여 아프리카 에리트레아(Eritrea)에 위치한 Dubbi 화산에서 화산 폭발과 분출에 의한 여러 지질 단위들을 구분하였다. TM-SAR 영상의 융합을 통한 PCA를 수행결과 1861년에 형성된 부석광상의 규모를 확인하였으며, SAR 영상의 L-밴드(수평편파)를 이용하여 테프라(tephra) 광상 아래 드러나 있지 않던 오래된 용암류의 존재를 확인하였다. 이러한 분석을 통해 Dubbi 화산 지역의 용암류를 시기별로 구분함으로써 개선된 지질도를 만들 수 있었다. 레이더를 이용한 영상들은 대기에 영향을 받지 않기 때문에 열대지역에서도 활용이 가능하고 식생이 피복된 지역에서도 지형적 특성을 파악할 수 있다는 장점이 있어 광학영상과 함께 지질학적 연구에 함께 많이 활용되고 있다. 최근에는 보다 정확한 암석분류 및 지표 지질 단위를 구분하기 위해 원격탐사 영상 자료와 함께 지질도, 지화학자료, 지구물리 탐사자료(e.g. 항공자력, 항공감마선)와 같은 여러 자료들을 GIS를 활용해 통합 분석하는 연구들이 이루어지고 있다(Schetselaar *et al.*, 2000; Khan *et al.*, 2007). Benoit 등(2010)은 2~4년에 한번 씩 분출하는 콩고민주공화국 서쪽의 Nyamulagira 화산지역을 대상으로 여러 시기의 광학영상(TM, ETM⁺, ASTER)과 레이더 영상(ENVISAT, ERS, JERS)을 GIS를 활용해 분석함으로써 분화시기(1938년부터 2010년까지)에 따른 새로운 용암류 분포도를 작성한 바 있다.

일부 구산염 광물(석영, 장석류, 휘석류)들과 이러한 광

물들로 주로 구성된 화성암의 경우 VNIR과 SWIR 파장대역에서 분광학적 특징이 나타나지 않으며, 대신에 Si-O 결합길이에 의한 진동으로 인해 TIR 파장대역(8-12 μm)에서 분광학적 특징이 나타난다(Lyon, 1965; Fig. 3(d)). 많은 연구들을 통해 TIR 파장영역에서 광물과 암석의 실험실 분광특성이 이루어지고 이를 통해 광물과 암석들의 분광정보가 수집되었으며(Salisbury and D'Aria, 1992; Christensen *et al.*, 2000), 이러한 분광정보는 원격탐사분야에 폭 넓게 활용되었다. 1970년대 중반부터 TIR 영상을 이용한 암석 구분이 시도됐으며, 주로 항공탐재 다중분광 센서에 포함된 TIR 밴드가 이용되었다(Khale and Rowan, 1980; Goetz and Rowan, 1981). 그 후 6개의 TIR 밴드만으로 구성된 TIMS 항공센서가 개발되면서 본격적으로 암석분류에 TIR 영상이 활용되기 시작했다(Khale and Goetz, 1983; Gillespie, 1992). TIR 밴드를 가진 다중분광 위성영상으로는 Landsat 영상과 ASTER 영상이 있다. Landsat 영상(TM 과 ETM⁺)은 TIR 파장대역에서 1개의 밴드로만 지표를 관측할 수 있다. 반면에 ASTER 영상은 5개의 TIR 밴드로 구성되어 있기 때문에 다양한 암석 구분이 가능하다. TIR 파장대역에서 화성암의 방사율(emissivity)은 SiO₂ 함량과 밀접한 관련이 있다. 특히 SiO₂ 성분이 많이 포함된 규장질(felsic) 광물 또는 암석은 상대적으로 짧은 파장대역(8-10

μm)에서 낮은 방사율 값을 보이고 SiO₂ 성분의 함량이 적은 고철질(mafic) 광물 또는 암석은 상대적으로 긴 파장대역(10-12 μm)에서 낮은 방사율 값을 보인다(Fig. 7(a)). Ninomiya 등(2005)은 이러한 분광특성을 이용하여 석영질 암석과 고철질 암석 탐지를 위한 ASTER 영상의 밴드비율 조합을 이용한 지수 모델을 제안하였다. 석영지수(Quartz Index, QI)는 ASTER TIR 밴드 (11×11)/(10×12) 조합을 사용하는데 이는 석영이 일반적으로 ASTER 11번 밴드(8.475-8.825 μm)에서 높은 방사율을, ASTER 10번(8.125-8.475 μm), 12번(8.925-9.275 μm) 밴드에서 낮은 방사율을 보이는 특징을 이용한 것이다(Fig. 7(a)). 고철질 지수(Mafic Index, MI)는 고철질 광물이 일반적으로 ASTER 13번 밴드(10.25-11.65 μm)에서 낮은 방사율을 그리고 ASTER 12번(8.925-9.275 μm), 14번(10.95-11.65 μm) 밴드에서 높은 방사율을 보이는 특징을 이용해 ASTER TIR 밴드(12×14)/(13×13) 조합을 사용하였다. Son 등(2014a)은 ASTER 영상에 새로운 BRLO 모델을 사용하여 규장질 암석 중 석영질 암석과 알칼리 암석 지역에 대한 구분을 시도하였다(Fig. 7). 이러한 방법 외에도 ASTER TIR 영상을 이용한 암석 구분을 위해 몇몇 밴드 비율과 밴드연산 방법이 제안되었으며(Table 3), 비상관화 확장, SAM, 정합필터링과 같은 여러 영상분석 기술들이 ASTER TIR 영상을 이

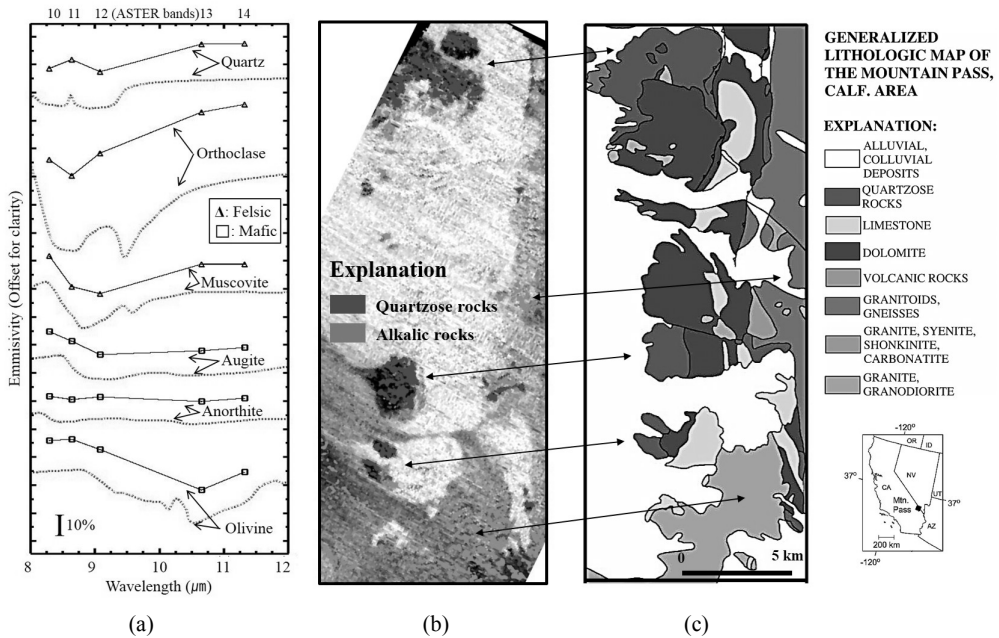


Fig. 7. (a) Laboratory TIR emissivity spectra of representative silicate minerals from the JHU spectral Library (Salisbury *et al.*, 1991). The upper spectrum of each spectral pair is a spectrum resampled to ASTER bandpasses. (b) Lithologic map at the Mountain Pass, California, using ASTER TIR BRLO models (from Son *et al.*, 2014a). (c) Lithologic map (from Rowan *et al.*, 2003).

용한 암석 분류에 사용되었다(Rowan and Mars, 2003; Rowan *et al.*, 2005, 2006). Thurmond 등(2006)은 용암류를 유문암 또는 현무암 등과 구분하기 위해 ASTER TIR 영상의 밴드비율을 이용하였으며, 레이더 영상의 후방산란된 에너지 값을 이용하여 지표면의 거칠기 정도를 파악해 오래된 용암류와 비교적 최근에 형성된 용암류 지역을 구분하였다. 여기에 DEM 자료에 광학영상과 레이더 영상을 융합해 3차원 지질도를 작성하였다. ASTER TIR 영상은 암석분류 뿐만 아니라 화산활동 감시(Pieri and Abrams, 2004; Carter and Ramsey, 2009) 하거나 사구지역(dune field) 광물의 분포경향과 이동경로 파악(Scheidt *et al.*, 2011)하는 데에도 활용된 바 있다.

지형 및 구조적 특성 탐지

지구의 암층은 지각변동에 의해 끊임없이 변형된다. 이때 형성된 습곡, 단층, 절리, 층리, 암맥, 암석경계면, 전단대와 같은 지각구조에 의해 지표에서 나타나는 선형적인 구조를 선구조 또는 리니어먼트(lineament)라고 한다. 이러한 선형적인 구조들은 광물광상 형성과 밀접한 관련이 있으며, 광물광상 탐사에 있어 기초자료로 많이 활용된다. 지표에서 선구조는 수 cm 규모의 절리부터 수천 km의 규모의 단층선까지 다양하게 나타난다. 비교적 작은 규모의 선구조는 항공사진만으로 판독이 가능하고 비교적 큰 규모의 선구조는 위성영상으로 관측할 수 있다. 만일 수 백 km 이상의 선구조라면 위성영상을 이용한 모자이크 영상을 제작하여 관측할 수 있다. 먼저 위성영상을 사용하여 광역적 구

모의 지질구조를 파악하고 보다 좁은 규모의 관심지역의 지질구조는 보다 세밀한 관측이 가능한 항공사진을 이용해 분석할 수도 있다. 이러한 선구조는 지형적인 특성 또는 수계 특성 과도 밀접한 관련이 있다. Ramasamy 등(2011)은 IRS 모자이크 영상을 이용해 인도 남부 전체 지역에 단층과 선구조와 관련된 수계이상(drainage anomaly)을 관찰하고 이 지역에서 앞으로 일어날 구조적 변화를 예측하는데 활용하였다. 원격탐사 영상을 이용한 선구조 추출방법으로 초기에는 주로 육안 판독이 이루어졌다(Caran *et al.*, 1981). 하지만 영상에 육안 판독을 통한 선구조 추출은 연구자의 주관적 판단에 의존해야 하며 시간이 많이 소요되는 단점이 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 자동 선구조 추출 기법들이 여러 연구를 통해 제안되었으며, 빠른 시간 내에 객관적인 선구조 추출이 가능해졌다(Wang and Howarth, 1990; Koike *et al.*, 1995; Costa and Starkey, 2001).

구조적으로 복잡한 지역이나 보다 세밀한 지질구조를 파악하기 위해 광학영상은 레이더 영상과 지구물리탐사자료(e.g. 항공 자력탐사), 현장조사 자료와의 통합분석이 이루어졌다. Chernicoff 등(2002)은 아르헨티나 북서부 지역에서 나타나는 선구조와 마그마 활동 그리고 광화작용 간에 관계를 조사하기 위해 TM 영상과 항공자력탐사 자료 그리고 기존의 지질학적 자료를 함께 분석한 바 있다. 레이더 영상은 입체 촬영 방식이기 때문에 선구조와 같은 구조적 특성과 지형적 특성 탐지에 유리하다. Kusky와 Ramadan (2002)은 이집트 남동부 사막지역에 위치한 신원생대 광화

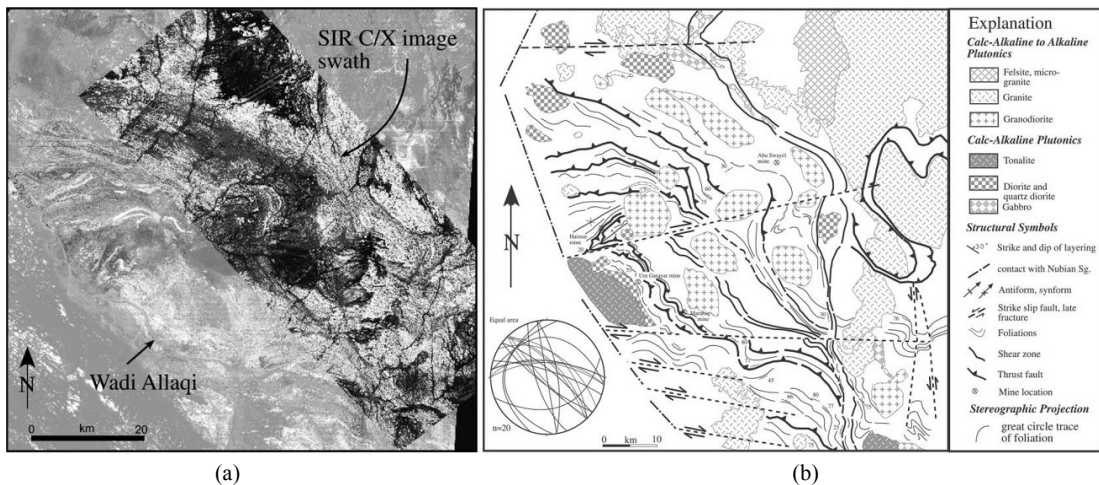


Fig. 8. (a) Landsat TM ratio RGB image with SIR C/X swath of the western part of the Allaqi suture, South Eastern Desert, Egypt. The TM ratio image reveals rock types remarkably well, whereas the SIR C/X imagery shows structures better than the TM imagery. (b) Structural interpretation map of the western part of the Allaqi suture. The map was made based on field mapping and interpretation of Landsat TM and SIR-C/X SAR data (from Kusky and Ramadan, 2002).

대의 구조지배(structural control)를 조사하기 위해 TM 영상과 SIR-C/X SAR, 현장조사 자료를 통한 통합분석을 수행하였다(Fig. 8). 이 연구에서는 TM 영상의 밴드비율을 사용해 암석을 구분하였으며, SAR 영상의 L 밴드 영상을 이용해 광화대의 엽리구조, 습곡, 단층 등의 운곽을 확인하였다. 또한 SAR Chh-Lhh-Lhv 밴드의 RGB 색합성 영상을 통해 원형구조의 화강암체 등을 확인함으로써 새로운 지질 구조도를 작성하였다. SPOT 영상은 다른 다중분광 영상에 비해 높은 공간해상도와 입체촬영 영상으로 인해 지질구조를 파악하는데 효과적으로 사용되었다. Korme 등(1997)은 TM 영상과 SPOT 영상을 사용해 에티오피아 열곡대 내 신장단열대(extension fracture)와 화도(volcanic vent)와 같은 구조적 특성을 확인하고 지구 역학적(geodynamic) 관계를 해석 하였으며, Saintot 등(1999)은 TM 영상, SPOT 영상, 항공사진을 사용해 크립반도 서부지역과 남부지역의 대규모 습곡, 단층과 같은 지체구조적(tectonic structure) 특성을 분석하였다. SPOT 영상은 지진, 사구, 빙하의 이동 등에 의해 나타날 수 있는 지형변위(terrain displacement)를 측정하는데도 사용된 바 있다(Crippen and Blom, 1991; Leprince *et al.*, 2007).

지형(landform or topography)은 지표면의 기복형태를 말하며 그 지역의 지질구조를 반영한다. 이러한 지형을 표현하기 위해 가장 많이 사용되는 자료가 DEM이다. DEM은 영상을 구성하는 각 픽셀마다 지표의 고도 값이 기록된 자료로 Lidar, 레이더 영상, 항공 또는 위성 입체영상으로부터 만들어진다. 대표적인 DEM으로는 레이더 영상을 통해 제작된 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)과 ASTER 영상을 통해 제작된 GDEM이 있다. Gani와 Abdelsalam (2006)은 SRTM, ASTER DEM 자료를 RADARSAT 영상과 ASTER 영상과 결합하여 분석함으로써 에티오피아 Nile 지역의 지형학적, 암석학적, 구조적 특징들을 함께 조사하였다. 지형자료들은 선구조와 같은 지질구조 추출을 위해 광학영상과 함께 분석되기도 한다. Masoud와 Koike (2006)는 ETM⁺ 영상과 SRTM 자료에 선구조 자동추출 기법을 적용하여 이집트 서부사막 시와(Siwa) 지역에서 나타나는 선구조를 추출하고 선구조의 공간적 분포와 수문지질학적 환경과의 관계 등을 분석하였다. Kwatli 등(2012)은 시리아에 위치한 화산지역에 대한 형태-구조학적인 분석을 위해 ETM⁺ 영상과 SRTM 자료를 사용하였다. Kruz 등(2007)은 에티오피아 열곡대를 따라 나타나는 단층과 분석구(cinder cone), 화구(volcanic cone)와 같은 지질구조의 변형 정도와 특성들을 조사하기 위해 TM 영상과 항공 입체영상으로 만든 고해상도의 DEM 자료를 사용하였다. 운석의 충돌로 인해 나타나는 충돌 분화구와 같은 지질구조

를 조사하기 위해 원격탐사 영상과 지형자료가 함께 사용되기도 한다. 예를 들어 Prinz(1996)은 ERS-1 고도(altimeter) 자료를 이용해 DEM 자료를 생성한 후 호주 Gosses Bluff 충돌 분화구(impact crater)와 그 주변 지형에서 나타나는 구조적 특성을 조사하였다. Buchner와 Schmieder(2007)는 내전으로 인해 접근이 불가능한 차드(Chad)에 위치한 Mousso 지역의 지질구조를 조사하기 위해 ETM⁺ 영상과 SRTM 자료를 사용해 분석하였다. 그 결과 이 지역이 호주 Gosses Bluff 분화구와 같은 다른 여러 운석충돌 분화구들과 비슷한 지질구조를 보임을 확인하였으며, 강한 침식작용을 받은 중간 규모의 충돌 분화구로 판단하였다. Fu 등(2004)은 2003년 이란의 Bam 지역에서 발생해 4만 명 이상의 사망자를 낸 진도 6.6 지진의 원인이 된 활성단층 지역의 지형학적, 기하학적 특징을 지진 전과 후의 ASTER 정사영상과 DEM 영상을 이용해 조사하였다. 이를 통해 이 활성단층의 활동 메카니즘을 규명하고 활성단층 평가를 위한 위성영상의 활용 가능성을 제시한 바 있다.

초분광 영상의 활용

초분광 영상의 정의 및 특징

초분광 영상(hyperspectral imaging)이란 용어는 영상분광측정(imaging spectrometry)의 초기 기술들을 논의하는 과정에서 처음 명명되었다(Goetz *et al.*, 1985). 영상분광측정이란 전자기 스펙트럼의 자외선, 가시광선, 적외선 영역에서 연속적인 수많은 분광밴드를 이용해 영상자료 각각의 화소에 대한 좁은 파장범위의 분광스펙트럼 정보를 수집하는 것을 말한다. 외국의 경우 초분광 영상과 영상분광측정이라는 용어가 함께 사용되고 있으며, 국내에서는 초분광 영상이란 용어가 사용 빈도가 더 높은 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 2005). 다중분광 영상과 초분광 영상의 가장 큰 차이점 중 하나는 분광밴드의 수에 있다. 100여개 이상의 밴드에 0.01 μm 의 좁은 밴드 폭으로 이루어진 초분광 영상은 영상의 각각의 화소로부터 야외 또는 실험실에서 분광계로 측정된 대상체의 실제 분광스펙트럼과 거의 유사한 형태의 분광스펙트럼을 얻을 수 있다. 반면에 다중분광 영상의 경우 10여개 안팎의 밴드에 0.1 μm 정도의 밴드 폭으로 이루어져 있기 때문에 대상체의 완전한 분광스펙트럼을 나타내는 데에는 한계가 있다(Fig. 4(b)). 초분광 영상으로 분류하기 위한 최소한의 밴드수가 정해진 것은 아니다. 초분광 영상에서 가장 중요한 점은 밴드의 개수 보다는 얼마나 연속적인 분광밴드 자료를 획득함으로써 특정 범위의 좁은 파장에서 나타나는 대상체의 분광 특징들을 잘 감지할 수 있는가에 있다(Goetz, 2009).

전처리 및 영상분류 기법

초분광 영상의 각각의 화소에 대한 정확한 분광스펙트럼을 얻기 위해서는 영상의 전처리(preprocessing) 과정이 매우 중요하다. 몇몇 검토연구들을 통해 복사보정을 포함한 초분광 영상의 전처리에 관한 일련의 과정들을 확인할 수 있다(Kohler *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2005; Schaepman *et al.*, 2009). 대부분의 경우 초분광 영상은 센서에서의 복사휘도 값 영상으로 제공되며, 이러한 영상은 기하보정 및 대기보정이 필수적이다. 초분광 센서를 탑재한 항공기에는 정확한 지리좌표 측정을 위한 GPS와 정확한 좌표 부여를 위한 항공기의 고도 정보를 제공하는 관성항법장치(inertial navigation system)가 함께 탑재되어 있어 기하학적 보정을 위한 정보를 제공 받을 수 있다. 대부분의 광학영상은 대기에 의한 산란 및 흡수에 의한 대기효과가 발생한다. 이를 보정하기 위해 방사전달모델에 기초한 절대보정 기법 또는 현장분광 측정값을 이용한 경험적 선형보정 기법 등을 사용하게 된다.

초분광 영상은 다중분광 영상에 비해 훨씬 높은 분광해상도로 각 화소에 대한 분광스펙트럼을 기록하기 때문에 지표를 구성하고 있는 각각의 물질들에 대한 보다 정확하고 세밀한 정보획득이 가능하다. 따라서 초분광 영상을 이용해 지표물질들을 세분화 시켜 분류하기 위한 영상처리 기법들도 함께 발전해 왔다. 초분광 영상 분류기법들은 그 특징에 따라 크게 몇 가지로 구분할 수 있다. van der Meer (2006)는 초분광 영상 분류 기법을 크게 분광정합(spectrum matching) 기법과 부분화소(subpixel) 기법으로 구분하였으며, Mustard와 Sunshine(1999)은 크게 특징매핑(feature mapping), 풀스펙트럼매핑(full spectral mapping), 혼합모델링(mixture modeling) 기법으로 구분하였다. 여기에서는 여러 가지 영상처리 기법들 중 광물 분류에 많이 사용되는 기법들을 특징매핑, 풀스펙트럼매핑, 혼합모델링으로 구분하여 소개한다.

특징매핑은 특정 파장구간에서 나타나는 광물의 흡수특징을 이용하는 것이 특징이며 크게 세 가지 접근 방법이 있다. 첫 번째는 특정 광물의 스펙트럼에서 흡수특징이 나타나는 위치, 흡수 강도, 흡수 스펙트럼의 모양을 이용한 분류 방법이다. 이 방법은 지식기반 전문가 시스템(knowledge-based expert system) 이라고도 불리 우며, 실험실에서 측정된 광물 스펙트럼에 연속체(continuum) 성분을 제거한 후 흡수 깊이와 넓이, 대칭성을 계산한 다음, 그 결과를 영상에 대입해 광물을 분류하게 된다(Kruse *et al.*, 1993a). 연속체 성분이 제거된 스펙트럼의 흡수 깊이는 다음의 식으로부터 계산되어진다(Clark and Roush, 1984).

$$D = 1 - R_b / R_c \quad (2)$$

여기에서 D 는 흡수 스펙트럼의 깊이, R_b 는 제거된 연속체 성분에서 최소반사율 값, R_c 는 R_b 에서의 연속체 반사율 값이다. 특징매핑에 있어 두 번째 방법은 영상에서 나타나는 연속체가 제거된 각각의 흡수 스펙트럼을 연속체가 제거된 참조분광라이브러리 또는 실험실 스펙트럼과 최소자승법을 이용하여 비교하는 방법이다. 이 방법은 전문가 시스템을 조금 더 발전시킨 것으로서 프로그램화 되었으며, Tetracorder라는 이름으로 불리운다(Clark *et al.*, 2003). 영상처리 프로그램인 ENVI에서는 SFF(Spectral Feature Fitting)이라는 이름으로 탑재되어 있다. 세 번째는 가우시안 모델을 사용하는 방법이 있다. 가우시안 모델은 여러 광물의 분광 특성이 혼합된 스펙트럼을 디콘볼루션(deconvolution)함으로써 구성 광물을 확인하고 화학적, 물리적 정보 등을 얻는데 이용되었다(Sunshine *et al.*, 1990).

광물의 흡수특성을 이용한 특징매핑은 광물을 탐지하는데 효과적인 방법 중 하나이다. 하지만 흡수 특징이 나타나는 특정 파장영역에 대해서만 초점을 맞추고 있기 때문에 나머지 파장영역에서의 특징에 대해서는 고려되지 않는 단점이 있다. 특징매핑은 특히 특징적인 흡수특성이 나타나지 않고 완만한 스펙트럼 형태를 보이는 일부 광물과 암석 분류에 적용하기 어렵다. 이러한 관점에서 넓은 파장대역의 전체 스펙트럼을 비교할 수 있는 풀스펙트럼 매핑 기법들이 개발되었다. 전체 분광 스펙트럼을 고려한 풀스펙트럼 매핑기법은 두 가지 형태로 구분할 수 있다. 첫 번째는 분광학적 유사도를 측정하는 방법으로, 전체 영상에서 각각의 화소들을 특정 광물의 참조(reference) 분광 스펙트럼과 비교하여 유사도를 평가하게 된다. 참조 분광 스펙트럼으로는 현장이나 실험실에서 측정된 특정 광물의 스펙트럼이나 영상에서 추출한 스펙트럼을 사용할 수 있다. 유사도를 평가하는 방법으로 Binary Encoding 기법(Kruse *et al.*, 1990)과 SAM(Kruse *et al.*, 1993b) 기법이 있다. 이 중 SAM은 원격탐사 영상을 이용한 광물 및 암석 분류에 가장 많이 사용된 기법 중 하나로, 두 스펙트럼을 n 차원 공간에서의 벡터로 가정한 후 두 벡터간의 각도를 계산하여 유사도를 측정하게 된다. 최근에는 확률론적 측정을 통해 유사도를 비교하는 SID(Spectral Information Divergence) 기법이 제안되었으며, SID는 SAM 기법에 비해 효과적이라고 알려져 있다(Chang, 2000). 그 외에도 초분광 영상과 참조 스펙트럼 간에 상호상관 값을 계산하여 분석하는 CCSM(Cross Correlogram Spectral Matching) 기법이 제안된 바 있다(van der Meer and Bakker, 1997). 풀스펙트럼 매핑의 두 번째 방법으로는 분광탐지 기법이 있다. 분광탐지 기법은 찾고자 하는 관심물질의 분광 스펙트럼 신호는 최대화 시키는 반면에 모든 배경 스펙트럼 신호는 억제 시키는 방식으로 처리된다. 분광탐지 기법은 정합필터링

이라고도 불리는데 원래 정합필터링은 신호처리 분야에서 목표 신호 탐지를 위해 많이 사용되던 방법이다(North, 1963). 분광탐지 기법과 유사도 측정 기법과의 가장 큰 차이점은 분광탐지 기법은 배경신호를 고려하는데 반해 유사도 측정 기법은 배경신호를 고려하지 않는다는 점에 있다. 한편 분광탐지 알고리즘을 이용한 보다 발전된 몇몇 기법들이 제시되었다. Harsanyi와 Chang(1994)은 목표신호와 알려져 있지 않은 배경신호가 혼합되어 나타날 때 특정 물질의 신호를 탐지하기 위해 직교 부공간 투영(orthogonal subspace projection)을 이용한 LPD(Low Probability Detection)기법을 개발하였다. 이 외에도 FBA(Foreground Background Analysis; Smith *et al.*, 1994) 기법과 CEM(Constrained Energy Minimization; Farrand and Harsanyi, 1997) 기법이 초분광 영상처리를 위해 개발되었으며, 두 기법 모두 배경신호는 최소화하면서 목표신호는 최대화시킬 수 있는 벡터 w 를 사용한다는 점에서 비슷하다. FBA 기법은 배경신호에 대한 정보가 분석자에 의해 미리 결정되어 있어야 하며, CEM 기법은 목표신호에 대한 정보만 주어지면 알려져 있지 않은 배경신호는 영상으로부터 추정할 수 있다는 점에 차이가 있다. 주로 전기공학 분야에서 활용되어 온 정합필터링 기법은 초분광 영상에 적용할 경우 혼합 화소에 따른 문제로 종종 오류 검출을 일으킨다. Boardman(1998)은 이러한 문제점을 개선하기 위한 MTMF(Mixture Tuned Matched Filtering) 기법을 개발하였으며, 이 기법은 혼합모델링 기법과 정합필터링 기법을 결합해 혼합화소에 따른 문제를 개선시켰다. MTMF 기법의 기본 개념과 원리 그리고 처리방법 등은 Boardman과 Kruse(2011)을 통해 자세하게 검토된 바 있다.

혼합모델링 기법은 부분화소(subpixel), 선형분광혼합(linear spectral unmixing, LSU), 분광혼합분석(spectral mixture analysis, SMA)이라고도 불린다. 원격탐사 영상을 이루고 있는 각각의 화소들은 특정 공간 면적을 대표하는 복사휘도 또는 분광반사도 값으로 기록되며, 실제로 이 화소 값은 여러 물질이 혼합되어 나타나는 대표 값이다. 혼합모델링 기법의 기본원리는 하나의 화소 내에 혼합되어 있는 각각의 순수한 고유물질들에 대한 상대적 점유비(abundance 또는 fraction)를 계산하는 것이다. 이 때의 순수한 고유물질을 endmember라고 부른다. 원격탐사 영상에 한 화소에서 나타나는 혼합된 신호로부터 endmember들의 상대적 점유비를 계산하기 위한 많은 노력들이 이어져 왔다(Mustard and PETERS, 1987; Gillespie *et al.*, 1990). 혼합모델링에 기본 전제는 하나의 화소가 대표하는 지표면이 서로 다른 분광특성을 가진 몇 개의 endmember로 구성되어 있어야 한다는 것이다(e.g. 식생, 토양, 물, 또는 서로 다른 광물 및 암석). 만약 각각의 endmember들이 독립적으

로 존재하고 서로 영향을 미치지 않는다고 가정하면 하나의 화소 값은 선형적인 조합으로 나타나게 된다. 반면에 endmember들 간에 서로 영향을 미치게 되면 하나의 화소 값은 비선형적인 조합으로 나타나게 되며, 이들의 점유비를 계산하는 것은 좀 더 복잡해지게 된다. 비선형적 혼합효과와 복잡성에 따라, 현재 대부분의 혼합모델링 기법은 선형적 혼합모델이지만 비선형적 혼합효과에 관한 연구들도 꾸준히 이루어지고 있다(Mustard and PETERS, 1987; Hapke, 1993). 혼합모델링 기법의 처리과정은 먼저 고유의 분광특성을 가진 endmember들을 선택한 후, 영상에 포함된 혼합 화소들을 각각의 endmember 점유비로 분해하게 된다. 혼합모델링에서 endmember의 선택 방법은 크게 두 가지가 있다. 첫 번째는 분석자가 조사지역 또는 실험실에서 분광계로 직접 측정된 스펙트럼을 사용하거나 기존의 분광라이브러리에서 스펙트럼을 선택해 endmember로 사용할 수 있다. 하지만 이 방법으로 선택된 endmember의 스펙트럼은 영상이 획득 될 당시와 다른 환경적 조건에서 얻어진 스펙트럼으로서 실제 영상에서 나타나는 스펙트럼과 차이가 날 수 있어 분석결과에 영향을 미칠 수 있다. 이에 대한 대안으로 영상에서 직접 endmember를 추출하기 위한 여러 방법들이 제시되고 있다. 대표적인 방법들로는 PPI(Pure Pixel Index; Boardman, 1993), IEA(Iterative Error Analysis; Neville *et al.*, 1999), N-FINDR(Winter, 1999), AMEE(Automated Morphological Endmember Extraction; Plaza *et al.*, 2002) 등이 있다. 이중 일반적으로 가장 많이 사용되는 방법으로 PPI가 있다. PPI는 영상으로부터 분광학적으로 가장 순수한 화소를 찾아서 이를 endmember로 선택하는 방법이다. PPI로 endmember를 결정하는 과정은 먼저 PCA나 MNF 변환을 통해 분광정보를 압축하고, 압축된 영상에 화소들을 n 차원 공간에서 반복적으로 투영하여 가장 끝단에 위치하는 화소들을 가장 순수한 화소로 판단하고 이를 endmember로 결정하게 된다. Fig. 9(a)는 큐프라이트 지역의 AVIRIS 영상으로 MNF와 PPI를 통해 추출한 순수한 화소들을 n 차원 공간에서 분석하여 7개의 광물 endmember를 선정하였다(Fig. 9(b)). 이렇게 선정된 endmember를 사용해 정합필터링 기법을 적용함으로써 큐프라이트 지역에 분포하는 광물의 분포 양상을 확인하였다(Fig. 10).

활용분야

지질자원 분야에서 초분광 영상은 다중분광 영상과 마찬가지로 주로 지표에 분포하는 광물을 분류하고 광물 탐사를 위한 예비적 조사로서 지표면의 구성 정보를 얻는데 이용되었다. 그 중에서도 변질대적 특성이 잘 나타나고 고유의 분광학적 흡수 특징이 잘 나타나는 규산염 광물, 철 광물, 탄산염 광물 등이 많이 분포하고 있는 천연수형 또는 반암

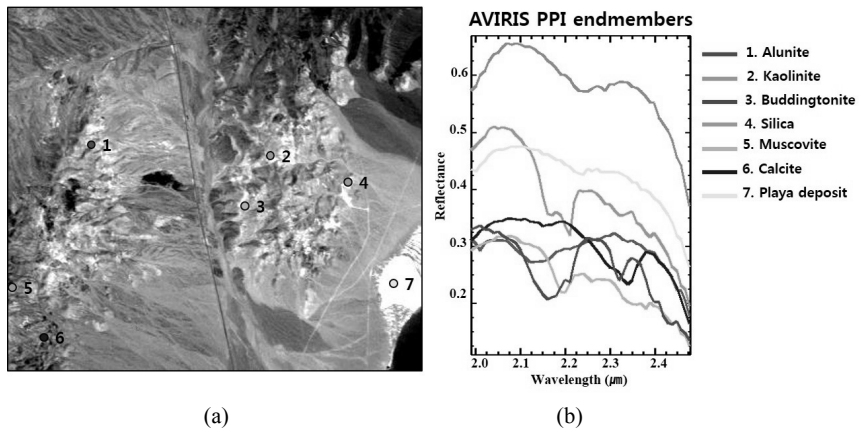


Fig. 9. (a) AVIRIS image of the Cuprite, Nevada showing the location of (b) the PPI image endmember spectra.

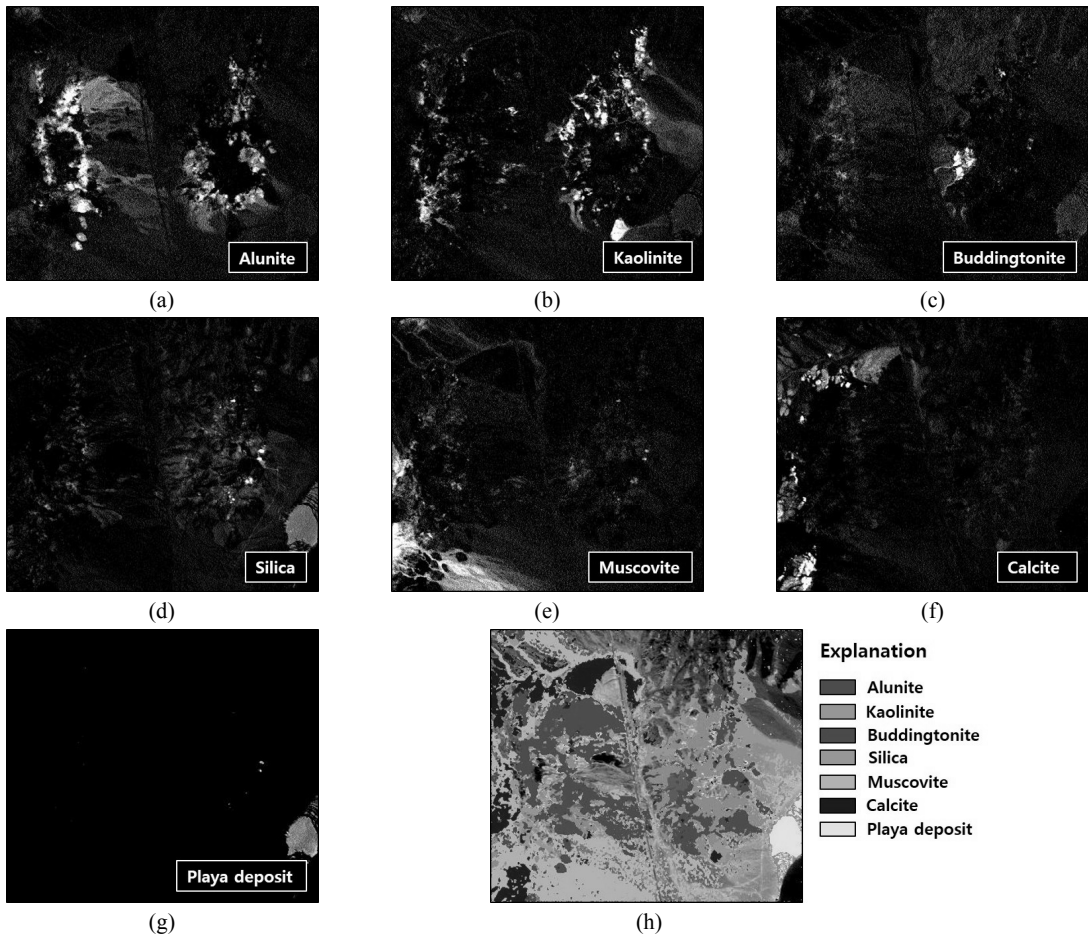


Fig. 10. (a)-(g) Matched filtering score images. The pixels with higher MF score are expressed as close to white. (h) Classification map of the Cuprite, Nevada using PPI image endmembers in Fig. 9b. Each endmember class is thresholded by empirical value.

형 구리-금 광상(Crosta *et al.*, 1998; Bierwirth *et al.*, 2002; Gersman *et al.*, 2008) 형태의 광상지에서 가장 많이 활용되었다. 그 외에도 알칼리성 복합체(Bowers and Rowan, 1996)나, 스퀴른 광상과 희토류 금속 광상(Rowan and Mars, 2003), 초고철질 복합체(Rowan *et al.*, 2004)와 같은 다른 여러 유형의 광상지에 지표광물 및 암석 분포를 확인하기 위해 초분광 영상이 이용되었다. 또한 직접적 접근이 어려운 극지 지역에 광물탐사를 위한 기초탐사로서 초분광 영상이 사용되었으며(Bedini 2009; 2011), 최근에는 지열 에너지와 관련한 활성 열수변질 작용을 조사하기 위해 초분광 영상을 지구화학 자료, 실험실 분광측정 자료 등과 함께 활용한 연구들이 수행되고 있다(Martini *et al.*, 2003; Kratt *et al.*, 2010; Calvin *et al.*, 2015). 뿐만 아니라 초분광 영상은 팽창성 토양(expansive soil)의 공간적 분포를 파악하거나(Chabrilat *et al.*, 2002) 열대 토양의 광물적, 화학적 성분과 지형 간에 상호 관련성을 파악하는 데에도 이용된 바 있다(Galvão *et al.*, 2008).

초분광 영상은 석유·가스 분야에서도 활용되어 왔다. van der Meer 등(2002)은 지표에서 다양하게 나타날 수 있는 석유·가스 유출 징후(붉은 퇴적암층, 변질광물, 탄산염 광물, 식생 스트레스 지수)탐지를 위한 원격탐사 영상의 활용 가능성에 관해 검토한 바 있으며, Kuhn 등(2004)은 탄화수소를 포함한 모래가 일반적인 모래에 비해 1.73 μm 파장에서 분광흡수 특징이 나타나는 점을 이용하여, 초분광 영상을 이용한 탄화수소 탐지 지수모델(Hydrocarbon Index)을 제안한 바 있다. 그 외에도 초분광 영상을 이용해 해상에서 유출된 기름을 탐지 하고 분광계를 사용해 석유를 포함하고 있는 모래에 대한 분광학적 특성을 조사하고 (Andreoli *et al.*, 2007), 오일샌드에 분광학적 특성을 이용해 오일샌드에 포함된 비튜멘(bitumen) 함량을 평가한 연구 등이 수행된 바 있다(Lyder *et al.*, 2010).

초분광 영상은 광산 개발 후 발생하는 여러 환경적 문제를 조사할 목적으로도 자주 활용되었다. 그 중 하나가 광미(mine tailing)에 의한 환경적 오염 발생 문제이다. 갱내 또는 선광 후 매립해 놓은 광산 폐석이나 노천 개발 후 방치된 광산 등에 포함된 황철석과 같은 황화 광물이 산소를 포함하는 갱내의 물 또는 빗물 등과 반응하여 용해 및 산화하게 되고 여기에 금속 이온이 산화 및 침전되면서 물을 산성화시킨다. 이 물은 주변 지하수에 이동하여 산성광산배수(acid mine drainage, AMD)를 만들거나 토양을 오염시키게 된다. 초분광 영상은 이러한 광산 주변 지역의 지표에서 산화철(e.g. 철백반석 또는 자철석) 광물의 공간적 분포 경향을 파악하고 지화학적 조사를 병행하여 AMD와 관련해 환경적 오염 정도를 평가하는데 이용된다(Ferrier, 1999; Swayze *et al.*, 2000; Mars and Crowley, 2003; Riaz and

Muller, 2010). 한편 Swayze 등(2009)은 자연적으로 환경에 존재하며 각종 암을 유발하고 인체에 해로운 석면(asbestos)계 섬유상 광물인 사문석, 투각섬석의 공간적 분포를 확인하기 위해 AVIRIS 영상을 사용하여 분석하였다.

앞서 언급된 초분광 영상의 활용은 대부분 AVIRIS 또는 HyMap 항공영상을 이용하였다. 현재 이용할 수 있는 위성 초분광 영상으로는 Hyperion 영상이 유일하며, 이마저도 영상촬영이 주기적으로 이루어지지 않아 관심 대상 지역에 영상을 획득하기가 쉽지 않다. 또한 항공 초분광 영상에 비해 낮은 SNR과 센서의 결합에 의한 노이즈로 여러 추가적인 보정작업이 필수적이다. 그럼에도 불구하고 Hyperion 영상은 정확한 대기보정과 잡음 보정을 통해 지표광물 또는 암석에 대해 비교적 정확한 정보를 제공해 왔다(Kruse *et al.*, 2003; Hubbard and Crowley, 2005).

시추코어 또는 모암 샘플에 영상화 기술은 초분광 영상이 새롭게 활용되고 있는 분야 중 하나이다. 이 기술은 현장에서 획득한 시추코어 또는 모암 샘플을 실험실 환경에서 분광계 또는 초분광 센서로 측정해 영상화 시키고 이를 분석하는 것으로(Kruse, 1996; Bolin and Moon, 2003), 이 기술의 가장 큰 장점 중 하나는 지표면의 수평적 정보만을 제공하는 항공 또는 위성 초분광 영상에서는 확인할 수 없는 지층의 층서학적 정보를 얻을 수 있다는 점이다(Ragona *et al.*, 2006). 이 기술은 샘플을 파괴하지 않고도 쉽고 빠르게 금속광물의 품위를 평가하고 유용광물과 무용광물을 구분하는데 이용할 수 있기 때문에 앞으로 광산개발 과정에서 다양하게 쓰일 수 있을 것으로 기대되고 있다.

논 의

지질자원 원격탐사의 역할과 한계

지질자원 분야에서 원격탐사 영상은 오래전에 제작된 지질도를 수정하거나 새로운 조사 지역에 대한 지질도를 작성하는데 사용되었다. 실제 근접 거리에서는 확인하기 어려운 암석층의 큰 경계면이나 구조적 특성들은 원격탐사 영상에서 나타나는 미묘한 색상의 차이나 패턴의 차이를 이용해 구분할 수 있으며, 영상분석을 통해 지표에서 나타나는 열수변질대적 특성도 현장에서 보다 쉽게 관찰할 수 있다. 특히 지형이 험준해 직접적인 현장 접근이 어려운 지역이나 사막 또는 극지 환경 지역에 대한 기초탐사로서 원격탐사 영상의 활용이 많이 이루어졌다. 광상은 대규모 선구조를 따라 나타날 수 있고, 광상 생성구(metallogenic province)와 같은 광범위한 규모에서 넓게 분포할 수 있다. 따라서 이러한 지역에서는 관측 폭이 넓은 다중분광 영상을 이용하여 개략적인 지표지질 조사를 비교적 저렴한 비용으로 빠르게 수행할 수 있으며, 기존에 알려진 광상지 외

에도 기존의 광상지와 비슷한 특성을 보이는 잠재적 광상지를 탐지할 수도 있다. 이를 통해 이상대(anomaly) 지역이 관측된다면, 이 지역을 대상으로 항공 또는 위성 초분광 영상을 이용하여 보다 세밀하게 지표의 특성을 관찰할 수 있다. 원격탐사 영상에서 관찰되는 변질대적 특성은 지표에서 나타나는 특성에 불과하고 이러한 변질대적 이상대가 직접적으로 광상으로 연결되지 않을 수 있지만 시추지점 선정과 같은 유용한 기초적 정보를 제공할 수 있을 것이다. 그 이유는 모든 변질대가 광상으로 바로 연결되지는 않지만 많은 유용 광물 광상들에서는 변질대적 특성이 관찰되고 있기 때문이다.

앞서 언급한 바와 같이 원격탐사 영상을 이용한 광물자원 탐사의 가장 큰 한계점은 지표에서 나타나는 분광 특성만을 이용한다는 점이다. 많은 광상들이 새로 발견되고 개발되어 감에 따라 지표에서 이상적 특성이 나타나는 새로운 광상을 찾는 것은 점점 더 어려워지고 있다. 따라서 최근에는 원격탐사 영상 분석이 가지는 이러한 한계점을 극복하기 위해 지구물리탐사, 지구화학탐사, 기존의 지질 주제도, DEM 자료와 같은 여러 자료들과 원격탐사 영상을 통합적으로 분석하는 방법들이 제시되고 있다. 이러한 여러 종류의 자료들을 원격탐사 영상자료와 함께 GIS를 이용하여 통합분석을 통해 광물탐사에 정확도를 높이고 단일 분석 방법이 가질 수 있는 한계점을 극복하려는 많은 노력들이 계속해서 이루어지고 있다.

원격탐사 기술은 지질자원 분야 중에서도 주로 광업 분야에서 활용되어 왔으며, 상대적으로 석유가스 분야에서 활용은 많지 않은 편이었다. 하지만 최근 석유가스 분야에서도 고해상도의 초분광 영상과 LiDAR와 무인항공기(UAV) 등을 이용한 다양한 활용연구들이 이루어지고 있다. 또한 자원개발에 따른 환경적 변화를 감시하고 예측하기 위해 지구화학, 수문학 등과 같은 다른 여러 학문적 분야들과 연계된 연구들이 이루어지고 있다. 원격탐사 기술은 지구관측 목적 외에도 행성지표 탐사를 위해 이용되고 있으며, 최근에는 화성에 대한 지표지질 탐사를 위해 OMEGA(Observatoire pour la Mineralogie, 2003년 발사)와 CRISM(Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars; 2005년 발사)과 같은 위성 초분광 센서 시스템이 개발되었다. OMEGA 영상과 CRISM 영상을 분석한 결과 화성표면에서 열수변질작용과 풍화작용에 의해 생성된 다양한 광물들(e.g. 층상규산염, 황산염)이 확인 되었으며, 특히 화성표면에서 확인된 수산기 광물의 존재는 화성의 초기 대기환경과 과거 화성에 존재했던 물과 관련된 중요한 단서로 여겨지고 있다(Poulet *et al.*, 2005; Pelkey *et al.*, 2007; Ehlmann *et al.*, 2009). 이러한 흐름으로 볼 때, 앞으로 원격탐사 기술은 과거 단순하게 지구표면에 존재하는 광물 및

암석을 탐지하고 분류하는 것에 그치지 않고, 지질자원 전 분야에 걸쳐서 점점 더 다양하고 폭 넓게 활용될 것으로 판단된다.

차세대 센서 시스템

지질자원 분야에서 지난 15년간 가장 많이 활용된 원격탐사 영상으로는 항공 초분광 영상인 AVIRIS와 HyMap, 다중분광 위성영상인 ASTER와 Landsat TM, ETM⁺ 영상을 들 수 있다. 항공 초분광 영상의 경우 높은 분광해상도를 가지고 있고, 비교적 SNR이 높은 영상자료를 획득할 수 있는 장점이 있다. 하지만 특정 지역에 대한 조사가 필요할 경우 항공기를 띄워 자료를 획득해야 하기 때문에 관심지역에 영상 자료를 빠르게 이용할 수 없으며, 관측 폭 또한 좁기 때문에 광범위한 지역에 대한 조사가 필요할 경우 효율성이 떨어진다. 위성 초분광 영상인 Hyperion 영상이 있긴 하지만 주기적인 촬영이 이루어지고 있지 않고 있고 SNR이 좋지 않은 문제가 있다. 그에 반해 ASTER와 Landsat 영상의 경우 초분광 영상에 비해 분광해상도는 떨어지지만 이미 전 지구적 관측 자료가 확보되어 있어 전 세계 대부분의 지역에 대한 영상자료를 쉽고 빠르게 이용할 수 있고 관측 폭 또한 넓은 장점이 있다. 하지만 Landsat TM, ETM⁺ 영상은 개별 광물 탐지를 목적으로 사용하기에는 부족한 분광 밴드 수를 가지고 있으며, ASTER 영상은 SWIR 센서의 문제로 2008년 4월 이후의 영상은 이용할 수 없게 되었다. 현재 지질자원 분야에서 새롭게 활용할 수 있는 다중분광 위성 영상으로는 2013년에 발사된 Landsat 8호 영상이 있지만 TIR 밴드를 제외하고는 기존의 Landsat 영상과 밴드 수에서 큰 차이를 보이지 않기 때문에 활용에 한계가 있다. 가장 최근에는 미국의 Digital Globe 사에서 2014년 8월에 발사한 WorldView-3가 궤도진입에 성공하였다. WorldView-3 영상은 8개의 VNIR 밴드(0.425-0.950 μm)와 8개의 SWIR 밴드(1.210-2.330 μm)를 포함하는 16개의 밴드에 1개의 전정색 밴드와 대기관측을 위한 12개의 CAVIS 밴드가 추가로 구성되어 있다. 특히 SWIR 밴드의 공간해상도가 수직 촬영 시에 3.7 m에 불과하기 때문에 앞으로 지질자원 분야에서 ASTER 영상의 역할을 대신해 폭넓게 활용될 수 있을 것으로 기대되고 있다. 이 외에도 향후 10년 이내에 여러 종류의 새로운 다중분광 및 초분광 위성 센서들이 발사될 계획에 있다(Table 4). 이 계획들이 예정대로 진행된다면 몇 년 이내에 전 지구적 관측 자료가 주기적으로 제공되는 위성 초분광 영상을 이용할 수 있을 것으로 보인다. 이를 통해 보다 정확하고 세밀하게 지구를 관측할 수 있게 될 것이며, 지질자원 분야에서 원격탐사 기술이 보다 다양하고 폭넓게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Table 4. Representative future multi- and hyper-spectral sensors

Sensor	HISUI	Sentinel-2	EnMAP	HypSIRI
Developing country	METI, Japan	European Space Agency	DLR and GFZ, Germany	NASA, USA
Launch schedule	2016 or later	2A: 2015. 04 2B: 2016	2017	2020 or later
Swath	MI*: 90 km HI**: 30 km	290 km	30 km	145 km
Spatial resolution	MI: 5 m HI: 30 m	10, 20, 60 m	30 m	60 m
Spectral coverage	MI: 0.45~0.90 μm HI: 0.4~2.5 μm	0.44~2.19 μm	0.42~2.45 μm	VSWIR: 0.38~2.50 μm TIR: 8~12 μm
Number of band	MI: 4 HI: 185	13	232	> 200
SNR	MI: > 200 HI: > 300~450	50~174	150~400	400 (approximately)
Radiometric resolution	MI: 12 bit HI: 12 bit	12 bit	14 bit	14 bit

*MI: Multispectral Imager

**HI: Hyperspectral Imager

결 론

본 연구에서는 지질자원 분야에서 활용될 수 있는 원격탐사 센서 시스템에 특성과 주요 영상처리 기법들을 혼련 지역에 적용 검토해 보았다. 또한 초기 지질자원 원격탐사 기술의 활용부터 최근의 활용 흐름까지를 검토하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 초기 지질자원 원격탐사 기술은 광학 영상 중 다중분광 위성 영상과 항공 초분광 영상을 이용한 광물·광상 탐사에 주로 활용되었다. 하지만 최근 SAR, LiDAR와 같은 기존의 광학영상의 한계를 보완할 수 있는 능동형 센서 시스템 뿐만 아니라, 공간적 분광적 해상도가 크게 향상된 다중분광 센서와 초분광 센서 시스템들이 개발되고, GIS를 이용한 통합적 분석도 가능해 졌다. 이를 통해 원격탐사 기술은 앞으로도 광물 및 광상 탐사뿐만 아니라 암석학, 구조지질, 자원개발에 따른 환경평가, 석유 가스 탐사, 행성지질 등 여러 분야에서 보다 다양하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.
2. 원격탐사 영상의 분광해상도가 점점 높아짐에 따라 실제 지상에서의 분광특성과 거의 유사한 영상자료를 얻을 수 있게 되었다. 이에 따라 영상의 각각의 화소 내에 존재하는 여러 구성물질에 대한 개별적 정보를 얻기 위해 분광혼합모델 기법들이 개발되었다. 특히 수백 개의 분광밴드로 구성된 초분광 영상 기술이 계속 발전하면

서 그에 적합한 영상처리 기법 개발을 위한 노력들이 이어져왔다. 하지만 기존에 제시된 분광혼합모델들은 혼합된 신호에서 각각의 물질을 정확하게 규명하는데 아직 한계를 가지고 있다. 원격탐사 영상을 이용한 정확한 광물 탐지와 분류를 위해서 기존의 문제점을 극복할 수 있는 분광혼합모델을 개발하기 위한 보다 많은 연구가 필요할 것으로 보인다.

3. 지질자원 원격탐사와 관련된 연구들은 대부분 미국, 호주, 중앙아시아, 아프리카, 남미 지역의 건조 또는 반 건조 지역이나 식생의 발달이 미약한 지역을 대상으로 이루어져 왔다. 이에 반해 국토의 대부분이 식생이 밀집해 있는 국내의 경우 상대적으로 지질자원 원격탐사 분야에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있지 않는 실정이다. 하지만 최근 국내에서도 몇몇 지역을 대상으로 지질자원 원격탐사 활용연구가 이루어지고 있고(Son *et al.*, 2011, 2014b; Hyun and Park, 2013), 해외자원 개발에 대한 관심이 높아지면서 기초탐사로서의 원격탐사 기술에 활용 가능성에 대한 관심도 커지고 있다. 원격탐사 기술은 중앙아시아, 아프리카, 극지와 같은 환경적 문제나 정치적인 문제로 현장 접근이 어려운 지역에 대한 자원개발 탐사에 기초자료를 확보하는 데에 매우 효율적인 기여를 할 수 있을 것으로 판단되며, 이를 위해 국내에서도 지질자원 원격탐사 활용을 위한 보다 다양한 연구가 필요할 것으로 보인다.

사 사

이 논문은 2013년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- Abdelsalam, M.G., Stern, R.J. and Berhane, W.G., 2000, "Mapping Gossans in Arid Regions with Landsat TM and SIR-C Images: the Beddaho Alteration Zone in Northern Eritrea," *J. of African Earth Sciences*, Vol. 30, No. 4, pp. 903-916.
- Abrams, M.J., Brown, D., Lepley, L. and Sadowski, R., 1983. "Remote Sensing for Porphyry Copper Deposits in Southern Arizona," *Economic Geology*, Vol. 78, No. 4, pp. 591-604.
- Andreoli, G., Bulgarelli, B., Hosgood, B. and Tarchi, T., 2007, *Hyperspectral Analysis of Oil and Oil-Impacted Soils for Remote Sensing Purposes*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, p. 34.
- Ashley, R.P. and Abrams, M.J., 1980, *Alteration Mapping Using Multispectral Images - Cuprite Mining District, Esmeralda County, Nevada*, U.S. Geological Survey, Open-File Report 80-367.
- Bedini, E., 2009, "Mapping Lithology of the Sarfartoq Carbonatite Complex, Southern West Greenland, Using HyMap Imaging Spectrometer Data," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 113, No. 6, pp. 1208-1219.
- Bedini, E., 2011, "Mineral Mapping in the Kap Simpson, Central EAST Greenland, Using HyMap and ASTER Remote Sensing Data," *Advance in Space Research*, Vol. 47, No. 1, pp. 60-73.
- Benoit, S., Christelle, W. and Nicolas, d'O., 2010, "A New Map of the Lava Flow Field of Nyamulagira (D.R. Congo) from Satellite Imagery," *J. of African Earth Sciences*, Vol. 58, No. 5, pp. 778-786.
- Bertoldi, L., Massironi, M., Visonà, D., Carosi, R., Montomoli, C., Gubert, F., Naletto, G. and Pelizzo, M.G., 2011, "Mapping the Buraburi Granite in the Himalaya of Western Nepal: Remote Sensing Analysis in a Collisional Belt with Vegetation Cover and Extreme Variation of Topography," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 115, No. 5, pp. 1129-1144.
- 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*, Vol. 97, No. 4, pp. 819-826.
- Blom, R.G. and Daily, M., 1982, "Radar Image Processing for Rock-type Discrimination," *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 20, No. 3, pp. 343-351.
- Boardman, J.W., 1993, "Automating Spectral Unmixing of AVIRIS Data Using Convex Geometry Concepts," *Summaries of the 4th annual JPL Airborne Geoscience Workshop*, JPL Publication 93-26, Vol. 1, pp. 11-14.
- Boardman, J.W., 1998, "Leveraging the High Dimensionality of AVIRIS Data for Improved Sub-Pixel Target Unmixing and Rejection of False Positives: Mixture Tuned Matched Filtering," *Summaries of the 7th JPL Airborne Geoscience Workshop*, JPL Publication 97-21, Vol. 1, pp. 55-56.
- 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*, Vol. 49, No. 11, pp. 4138-4152.
- Bolin, B.J. and Moon, T.S., 2003, "Sulfide Detection in Drill Core from the Stillwater Complex Using Visible/Near-Infrared Imaging Spectroscopy," *Geophysics*, Vol. 68, pp. 1561-1568.
- 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*, Vol. 62, No. 12, pp. 1379-1385.
- Buchner, E. and Schmieder, M., 2007, "Mouso Structure: a Deeply Eroded, Medium-Sized, Complex Impact Crater in Northern Chad?," *J. of African Earth Sciences*, Vol. 49, No. 3, pp. 71-78.
- Calvin, W.M., Littlefield, E.F. and Kratt, C, 2015 "Remote Sensing of Geothermal-Related Minerals for Resource Exploration in Nevada," *Geothermics*, Vol. 53, pp. 517-526.
- Caran, C., Woodruff, C.M. and Thompson, E.J., 1981, "Lineament Analysis and Inference of Geologic Structure-examples From the Balcones/Ouachita Trend of Texas," *Transactions of the Gulf Coast Association of Geological Societies*, Vol. 32, No. 2-4, pp. 59-69.
- Carranza, E.J.M. and Hale, M., 2002, "Mineral Imaging with Landsat Thematic Mapper Data for Hydrothermal Alteration Mapping in Heavily Vegetated Terrane," *International J. of Remote Sensing*, Vol. 23, No. 22 pp. 4827-4852.
- Carter, A.J. and Ramsey, M.S., 2009, "ASTER- and Field-Based Observations at Bezymianny Volcano: Focus on the 11 May 2007 Pyroclastic Flow Deposit," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 113, No. 10, pp. 2142-2151.
- Chabrilat, S., Goetz, A.F.H., Krosley, L. and Olsen, H.W., 2002, "Use of Hyperspectral Images in the Identification

- and Mapping of Expansive Clay Soils and the Role of Spatial Resolution,” *Remote Sensing of Environment*, Vol. 82, No. 2-3, pp. 431-446.
- Chang, C-I., 2000, “An Information Theoretic Approach to Spectral Variability, Similarity, and Discrimination for Hyperspectral Image Analysis,” *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 46, No. 5, pp. 1927-1932.
- Chavez, P.S. and Kwarteng, A.Y., 1989, “Extracting Spectral Contrast in Landsat Thematic Mapper Image Data Using Selective Principal Component Analysis,” *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 55, No. 3, pp. 339-348.
- Chavez, P.S., Berlin, G.L. and Sowers, L.B., 1982, “Statistical Methods for Selecting Landsat MSS Ratios,” *J. of Applied Photographic Engineering*, Vol. 8, No. 1, pp. 23-30.
- Chernicoff, C.J., Richards, J.P. and Zappettini, E.O., 2002, “Crustal Lineament Control on Magmatism and Mineralization in Northwestern Argentina: Geological, Geophysical, and Remote Sensing Evidence,” *Ore Geology Reviews*, Vol. 21, No. 3-4, pp. 127-125.
- Christensen, P.R., Bandfield, J.L., Hamilton, V.E., Howard, D.A., Lane, M.D., Piatek, J.L., Ruff, S.W. and Stefanov, W.L., 2000, “A Thermal Emission Spectral Library of Rock-forming Minerals,” *J. of Geophysical Research*, Vol. 105, No. E4, pp. 9735-9739.
- Clark, R.N. and Roush, T.L., 1984, “Reflectance Spectroscopy: Quantitative Analysis Techniques for Remote Sensing Applications,” *J. of Geophysical Research*, Vol. 89, No. B7, pp. 6329-6340.
- Clark, R.N., Swaze, G.A., Wise, R., Iivo, K.E., Kokaly, R.F., Sutley, 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,” *J. of Geophysical Research*, Vol. 108, No. E12, 5131.
- Clark, R.N., Swaze, G.A., Wise, R., Iivo, E., Hoefen, T., Kokaly, R. and Sutley, S.J., 2007, *USGS Spectral Library splib06a.*, U.S. Geological Survey, Digital Data Series 231.
- Costa, R.D. and Starkey, J., 2001, “PhotoLin: a Program to Identify and Analyze Linear Structures in Aerial Photographs, Satellite Images and Maps,” *Computer and Geosciences*, Vol. 27, No. 5, pp. 527-534.
- Crippen, R.E. and Blom, R.G., 1991, “Measurement of Subresolution Terrain Displacements Using SPOT Panchromatic Imagery,” *Proc. of the IGARSS*, Espoo, Finland, June 3-6, pp. 1667-1670.
- Crosta, A.P. and Moore, J.M., 1989, “Enhancement of Landsat Thematic Mapper Imagery for Residual Soil Mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: a Prospecting Case History in Greenstone Belt Terrain,” *7th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology*, Calgary, Canada, pp. 1173-1187.
- Crosta, A.P., Sabine, C. and Taranik, J.V., 1998, “Hydrothermal Alteration Mapping at Bodie, California, Using AVIRIS Hyperspectral Data,” *Remote Sensing of Environment*, Vol. 65, No. 3, pp. 309-319.
- Crosta, A.P., Souza Filho, C.R., Azevedo, F. and Brodie, C., 2003, “Targeting Key Alteration Minerals in Epithermal Deposits in Patagonia, Argentina, Using ASTER Imagery and Principal Component Analysis,” *International J. of Remote Sensing*, Vol. 24, No. 21, pp. 4233-4240.
- Datt, B., McVicar, T.R., Van Niel, T.G. and Jupp, D.L.B., 2003, “Preprocessing EO-1 Hyperion Hyperspectral Data to Support the Application of Agricultural Indexes,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, No. 6, pp. 1246-1259.
- Ducart, D.F., Crosta, A.P. and Filho, C.R.S., 2006, “Alteration Mineralogy at the Cerro La Mina Epithermal Prospect, Patagonia, Argentina: Field Mapping, Short-wave Infrared Spectroscopy, and ASTER Images,” *Economic Geology*, Vol. 101, No. 5, pp. 981-996.
- Ehlmann, B.L., Mustard, J.F., Swayze, G.A., Clark, R.N., Bishop, J.L., Poulet, F., Marais, D.J.D., Roach, L.H., Milliken, R.E., Wray, J.J., Barnouin-JHA, O. and Murchie, S.L., 2009, “Identification of Hydrated Silicate Minerals on Mars Using MRO-CRISM: Geologic Context Near Nili Fossae and Implications for Aqueous Alteration,” *J. of Geophysical Research*, Vol. 114, No. E00D08.
- Evns, D.L., Farr, T.G., Ford, J.P., Thompsn, T.W. and Werner, C.L., 1988, “Multipolarization Radar Images for Geologic Mapping and Vegetation Discrimination,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 24, No. 2, pp. 246-257.
- Farrand, W.H. and Harsanyi, J.C., 1997, “Mapping the Distribution of Mine Tailings in the Coeur d'Alene River Valley, Idaho, through the Use of a Constrained Energy Minimization Technique,” *Remote Sensing of Environment*, Vol. 59, No. 1, pp. 64-76.
- Ferrier, G., 1999, “Application of Imaging Spectrometer Data in Identifying Environmental Pollution Caused by Mining at Rodaquilar, Spain,” *Remote Sensing of Environment*, Vol. 68, No. 2, pp. 125-137.
- Fraser, S.J., 1991, “Discrimination and Identification of Ferric Oxides Using Satellite Thematic Mapper Data: A Newman Case Study,” *International J. of Remote Sensing*, Vol. 12, No. 3, pp. 635-641.

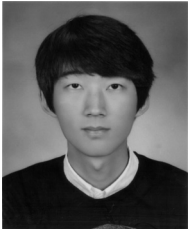
- Fu, B., Ninomiya, Y., Lei, X., Toda, S. and Awata, Y., 2004, "Mapping Active Fault Associated with the 2003 Mw 6.6 Bam (SE Iran) Earthquake with ASTER 3D Images," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 92, No. 2, pp. 153-157.
- Fu, B., Zheng, G., Ninomiya, Y., Wang, C. and Sun, G., 2007, "Mapping Hydrocarbon-induced Mineralogical Alteration in the Northern Tian Shan Using ASTER Multispectral Data," *Terra Nova*, Vol. 19, No. 4, pp. 225-231.
- 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*, Vol. 71, No. 1-2, pp. 151-162.
- Galvão, L.S., Formaggio, A.R., Couto, E.G. and Roberts, D.A., 2008, "Relationships Between the Mineralogical and Chemical Composition of Tropical Soils and Topography from Hyperspectral Remote Sensing Data," *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 63, No. 2, pp. 259-271.
- Gani, N.D.S. and Abdelsalam, M.G., 2006, "Remote Sensing Analysis of the Gorge of the Nile, Ethiopia with Emphasis on Dejen-Gohatsion Region," *J. of African Earth Sciences*, Vol. 44, No. 2, pp. 135-150.
- 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 J. of Remote Sensing*, Vol. 29, No. 13, pp. 3911-3936.
- Gillespie, A.R., 1992, "Spectral Mixture Analysis of Multispectral Thermal Infrared Images," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 42, No. 2, pp. 137-145.
- Gillespie, A.R., Kahle, A.B. and Walker, R.E., 1986, "Color Enhancement of Highly Correlated Images. I. Decorrelation and HSI Contrast Stretches," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 20, No. 3, pp. 209-235.
- Gillespie, A.R., Smith, M.O., Adams, J.B., Willis, S.C., Fischer, A.F.III., and Sabol, D.E., 1990, "Interpretation of Residual Image: Spectral Mixture Analysis of AVIRIS Images, Owens Valley, California," *Proc. of the 2nd AVIRIS workshop*, JPL, Pasadena, California, June 4-5, pp. 243-270.
- Goetz, A.F.H., 2009, "Three Decades of Hyperspectral Remote Sensing of the Earth: A Personal View," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 119, Supplement 1, pp. S5-S16.
- Goetz, A.F.H. and Rowan, L.C., 1981, "Geological Remote Sensing," *Science*, Vol. 211, No. 4484, pp. 781-791.
- Goetz, A.F.H., Vane, G., Solomon, J.E. and Rock, B.N., 1985, "Imaging Spectrometry for Earth Remote Sensing," *Science*, Vol. 228, No. 4704, pp. 1147-1153.
- Gomez, C., Delacourt, C., Allemand, P., Ledru, P. and Wackerle, R., 2005, "Using ASTER Remote Sensing Data Set for Geological Mapping, in Namibia," *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 30, No. 1-3, pp. 97-108.
- Guha, A., Sing, V.K., Parveen, R., Kumar, K.V., Jeyaseelan, A.T. and Rao, E.N.D., 2013, "Analysis of ASTER Data for Mapping Bauxite Rich Pockets within High Altitude Lateritic Bauxite, Jharkhand, India," *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 21, pp. 184-194.
- Hapke, B., 1993, *Theory of Reflectance and Emittance of Spectroscopy*, Cambridge University Press, Cambridge, p. 455.
- Harris, J.R., Rencz, A.N., Ballantyne, B. and Sheridan, C., 1998, "Mapping Altered Rocks Using Landsat TM and Lithogeochemical Data: Sulphurets-Brucejack Lake District, British Columbia, Canada," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 64, No. 4, pp. 309-322.
- Harsanyi, J.C. and Chang, C-I., 1994, "Hyperspectral Image Classification and Dimensionality Reduction: An Orthogonal Subspace Projection Approach," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 32, No. 4, pp. 779-785.
- Hewson, R.D., Cudahy, T.J., Mizuhiko, S., Ueda, K. and Mauger, A.J., 2005, "Seamless Geological Map Generation Using ASTER in the Broken Hill-Curnamona Province of Australia," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 99, No. 1-2, pp. 159-172.
- Hubbard, B.E. and Crowley, J.K., 2005, "Mineral Mapping on the Chilean-Bolivian Altiplano Using Co-orbital ALI, ASTER and Hyperion Imagery: Data Dimensionality Issues and Solution," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 99, No. 1-2, pp. 173-186.
- Hunt, G.R., 1977, "Spectral Signatures of Particulate Minerals in the Visible and Near Infrared," *Geophysics*, Vol. 42, No. 3, pp. 501-513.
- Hyun, C.U. and Park, H.D., 2013, "Limestone Mapping in Gangwon Area, South Korea Using EO-1 Hyperion Hyperspectral Satellite Imagery," *J. of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 50, No. 1, pp. 44-55.
- Iwasaki, A. and Tonooka, H., 2005, "Validation of a Crosstalk Correction Algorithm for ASTER/SWIR," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 43, No. 12, pp. 2747-2751.
- Kahle, A.B. and Rowan, L.C., 1980, "Evaluation of Multispectral Middle Infrared Aircraft Images for Lithologic Mapping in the East Tintic Mountains, Utah," *Geology*, Vol. 8, No. 5, pp. 234-239.

- Kahle, A.B. and Goetz, A.F.H., 1983, "Mineralogic Information from a New Thermal Infrared Multispectral Scanner," *Science*, Vol. 222, No. 4619, pp. 24-27.
- Khan, S.D. and Mahmood, K., 2008, "The Application of Remote Sensing Techniques to the Study of Ophiolites," *Earth-Science Reviews*, Vol. 89, No. 3-4, pp. 135-143.
- Khan, S.D., Mahmood, K. and Casey, J.F., 2007, "Mapping of Muslim Bagh Ophiolite Complex (Pakistan) Using New Remote Sensing, and Field Data," *J. of Asian Earth Sciences*, Vol. 30, No. 2, pp. 333-343.
- Kim, S.H., Lee, K.S., Ma, J.L. and Kook, M.J., 2005, "Current Status of Hyperspectral Remote Sensing: Principle, Data Processing Techniques, and Applications," *Korean J. of Remote Sensing*, Vol. 21, No. 4, pp. 341-369.
- Kohler, D.D.R., Bissett, W.P., Steward, R.G. and Davis, C.O., 2004, "New Approach for the Radiometric Calibration of Spectral Imaging Systems," *Optics Express*, Vol. 12, No. 11, pp. 2463-2477.
- Koike, K., Nagano, S. and Ohmi, M., 1995, "Lineament Analysis of Satellite Images Using a Segment Tracing Algorithm (STA)," *Computer and Geosciences*, Vol. 24, No. 6, pp. 573-583.
- Korme, T., Chorowicz, J., Collect, B. and Bonavia, F., 1997, "Volcanic Vents Rooted on Extension Fractures and Their Geodynamic Implications in the Ethiopian Rift," *J. of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 79, No. 3-4, pp. 206-222.
- Kratt, C., Calvin, W.M. and Coolbaugh, M.F., 2010, "Mineral Mapping in the Pyramid Lake Basin: Hydrothermal Alteration, Chemical Precipitates and Geothermal Energy Potential," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 114, No. 10, pp. 2297-2304.
- Kruse, F.A., 1996, "Identification and Mapping of Minerals in Drill Core Using Hyperspectral Image Analysis of Infrared Reflectance Spectra," *International J. of Remote Sensing*, Vol. 17, No. 9, pp. 1623-1632.
- Kruse, F.A., Kierein-Young, K.S. and Boardman, J.W., 1990, "Mineral Mapping at Cuprite, Nevada with a 63-Channel Imaging Spectrometer," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 56, No. 1, pp. 83-92.
- Kruse, F.A., Lefkoff, A.B. and Dietz, J.B., 1993a, "Expert System-Based Mineral Mapping in Northern Death Valley, California/Nevada, Using the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS)," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 44, No. 2-3, pp. 309-336.
- Kruse, F.A., Lefkoff, A.B., Boardman, J.W., Heidebrecht, K.B., Shapiro, A.T., Barloon, P.J. and Goetz, A.F.H., 1993b, "The Spectral Image Processing System (SIPS)-Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 44, No. 2-3, pp. 145-163.
- Kruse, F.A., Boardman, J.W. and Huntington, J.F., 2003, "Comparison of Airborne Hyperspectral Data and EO-1 Hyperion for Mineral Mapping," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, No. 6, pp. 1388-1400.
- Kruz, T., Gloaguen, R., Ebinger, C., Casey, M. and Abebe, B., 2007, "Deformation Distribution and Type in the Main Ethiopian Rift (MER): A Remote Sensing Study," *J. of African Earth Sciences*, Vol. 48, No. 2-3, pp. 100-114.
- Kuhn, F., Oppermann, K. and Horig, B., 2004, "Hydrocarbon Index - An Algorithm for Hyperspectral Detection of Hydrocarbons," *International J. of Remote Sensing*, Vol. 25, No. 12, pp. 2467-2473.
- Kusky, T.M. and Ramadan, T.M., 2002, "Structural Controls on Neoproterozoic Mineralization in the South Eastern Desert, Egypt: an Integrated Field, Landsat TM, and SIR-C/X SAR Approach," *J. of African Earth Sciences*, Vol. 35, No. 1, pp. 107-121.
- Kwatli, M.A., Gillot, P.Y., Zeyen, H., Hildenbrand, A. and Gharib, I.A., 2012, "Volcano-tectonic Evolution of the Northern Part of the Arabian Plate in the Light of New K-Ar Ages and Remote Sensing: Harrat Ash Shaam Volcanic Province (Syria)" *Tectonophysics*, Vol. 580, No. 10, pp. 192-207.
- Laukamp, C., Caccetta, M., Collings, S., Cudahy, T., Thomas, M., Ong, C. and Haest, M., 2012, "Continent-scale Mineral Information from ASTER Multispectral Satellite Data," *Proc. of the IGARSS, Munich, July 22-27*, pp. 7553-7556.
- Lee, H.J., Chi, K.H. and Jang, D.H., 2008, "Extraction of Pyrophyllite Mine using Characteristics of Spectral Reflectance of ASTER Satellite Imageries," *J. of The Korean Geomorphological Association*, Vol. 15, No. 3, pp. 49-60.
- Lee, H.J., Kim, I.J., Chi, K.H., Kim, E.J. and Jang, D.H., 2009, "Extraction Model of Non-metallic Mine Using Multi-spectral ASTER SWIR Data," *J. of The Korean Geomorphological Association*, Vol. 16, No. 3, pp. 77-86.
- Leprince, S., Barbot, S., Ayoub, F. and Avouac, J.P., 2007, "Automatic and Precise Orthorectification, Coregistration, and Subpixel Correlation of Satellite Images, Application to Ground Deformation Measurements," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 45, No. 6, pp. 1529-1558.
- Leverington, D.W., 2010, "Discrimination of Sedimentary Lithologies Using Hyperion and Landsat Thematic Mapper Data: A Case Study at Melville Island, Canadian High

- Arctic," *International J. of Remote Sensing*, Vol. 31 No. 1, pp. 233-260.
- Leverington, D.W. and Moon, W.M., 2012, "Landsat-TM-Based Discrimination of Lithological Units Associated with the Purtuniqu Ophiolite, Quebec, Canada," *Remote Sensing*, Vol. 4 No. 5, pp. 1208-1231.
- Li, N., Frei, M. and Altermann, W., 2011, "Textural and Knowledge-based Lithological Classification of Remote Sensing Data in Southwestern Prieska sub-basin, Transvaal Supergroup, South Africa," *J. of African Earth Sciences*, Vol. 60, No. 4, pp. 237-246.
- Liu, L., Zhou, J., Jiang, D., Zhuang, D., Mansaray, L.R. and Zhang, B., 2013, "Targeting Mineral Resources with Remote Sensing and Field Data in the Xiemisitai Area, West Junggar, Xinjiang, China," *Remote Sensing*, Vol. 5, No. 7, pp. 3156-3171.
- Loughlin, W.P., 1991. "Principal Component Analysis for Alteration Mapping," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 57, No. 9, pp. 1163-1169.
- Lowell, J.D. and Guilbert, J.M., 1970, "Lateral and Vertical Alteration-Mineralization Zoning in Porphyry Ore Deposits." *Economic Geology*, Vol. 65, No. 4, pp. 373-408.
- Lyder, D., Feng, J., Rivard, B., Gallie, A. and Cloutis, E., 2010, "Remote Bitumen Content Estimation of Athabasca Oil Sand from Hyperspectral Infrared Reflectance Spectra Using Gaussian Singlets and Derivative of Gaussian Wavelets," *Fuel*, Vol. 89, No. 3, pp. 760-767.
- Lyon, R.J.P., 1965, "Analysis of Rocks by Spectral Infrared Emission (8 to 25 microns)," *Economical Geology*, Vol. 60, No. 4, pp. 715-736.
- Mars, J.C. and Crowley, J.K., 2003, "Mapping Mine Wastes and Analyzing Areas Affected by Selenium-Rich Water Runoff in Southeast Idaho using AVIRIS Imagery and Digital Elevation Data," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 84, No. 3, pp. 422-436.
- Mars, J.C. and Rowan, L.C., 2006, "Regional Mapping of Phyllic- and Argillic-Altered Rocks in the Zagros Magmatic Arc, Iran, Using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer (ASTER) Data and Logical Operator Algorithms," *Geosphere*, Vol. 2, No. 3, pp. 161-186.
- Mars, J.C. and Rowan, L.C., 2010, "Spectral Assessment of New ASTER SWIR Surface Reflectance Data Products for Spectroscopic Mapping of Rocks and Minerals," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 114, No. 9, pp. 2011-2025.
- Martini, B.A., Silver, E.A., Pickles, W.L. and Cocks, P.A., 2003, "Hyperspectral Mineral Mapping in Support of Geothermal Exploration: Examples from Long Valley Caldera, CA and Dixie Valley, NV, USA," *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 27, pp. 657-662
- Masoud, A. and Koiker, K., 2006, "Tectonic Architecture Through Landsat-7 ETM+/SRTM DEM-derived Lineaments and Relationship to the Hydrogeologic Setting in Siwa Region, NW Egypt," *J. of African Earth Sciences*, Vol. 46, No. 4-6, pp. 467-477.
- Mustard, J.F. and Pieters, C.M., 1987, "Quantitative Abundance Estimates From Bidirectional Reflectance Measurements," *J. of Geophysical Research*, Vol. 92, No. B4, pp. E617-E626.
- Mustard, J.F. and Sunshine, J.M., 1999, *Spectral Analysis for Earth Science: Investigation Using Remote Sensing Data*. In: Rencz, A.N. (Ed.), *Remote Sensing for the Earth Sciences*, John Wiley, New York, pp. 251-306.
- Neville, R.A., Staenz, K., Szeredi, T., Lefebvre, J. and Hauff, P., 1999 "Automatic Endmember Extraction from Hyperspectral Data for Mineral Exploration," *Proc. of the 4th International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition/21st Canadian Symposium on Remote Sensing*, Ottawa, Ontario, Canada, June 21-24, pp. 891-896.
- Ninomiyama, Y., Fu, B. and Cudahy, T.J., 2005, "Detecting Lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer (ASTER) Multispectral Thermal Infrared Radiance-at-sensor Data," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 99, No. 1-2, pp. 127-139.
- North, D.O., 1963, "An Analysis of the Factors Which Determine Signal/Noise Discrimination in Pulsed-Carrier Systems," *Proc. of the IEEE*, Vol. 51, No. 7, pp. 1016-1027.
- Ott, N., Kollersberger, T. and Tassara, A., 2006, "GIS Analyses and Favorability Mapping of Optimized Satellite Data in Northern Chile to Improve Exploration for Copper Mineral Deposits," *Gosphere*, Vol. 2, No. 4, pp. 236-252.
- Pelkey, S.M., Mustard, J.F., Murchie, S., Clancy, R.T., Wolff, M., Smith, M., Milliken, R., Bibring, J.P., Gendrin, A., Poulet, F., Langevin, Y. and Gondet, B., 2007, "CRISM Multispectral Summary Products: Parameterizing Mineral Diversity on Mars from Reflectance," *J. of Geophysical Research*, Vol. 112, No. E08S14.
- Petrovic, A., Khan, S.D. and Chafetz, H.S., 2008, "Remote Detection and Geochemical Studies for Finding Hydrocarbon-Induced Alterations in Lisbon Valley, Utah," *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 25, No. 8, pp. 696-705.
- Pieri, D. and Abrams, M., 2004, "ASTER Watches the World's Volcanoes: a New Paradigm for Volcanological Observations from Orbit," *J. of Volcanology and Geothermal*

- Research*, Vol. 135, No. 1-2, pp. 13-28.
- Plaza, A., Martinez, P., Perez, R. and Plaza, J., 2002, "Spatial/Spectral Endmember Extraction by Multidimensional Morphological Operations," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 40, No. 9, pp. 2025-2041.
- Poulet, F., Bibring, J.P., Mustard, J.F., Gendrin, A., Mangold, N., Langevin, Y., Arvidson, R.E., Gondet, B., Gomez, C. and Omega, T., 2005, "Phyllosilicates on Mars and Implications for Early Martian Climate," *Nature*, Vol. 438, pp. 623-627.
- Prinz, T., 1996. "Multispectral Remote Sensing of the Gosses Bluff Impact Crater, Central Australia (NT) by Using Landsat-TM and ERS-1 Data," *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 51, No. 3, pp. 137-149.
- Ragona, D., Minster, B., Rockwell, T. and Jussila, J., 2006, "Field Imaging Spectroscopy: a New Methodology to Assist the Description, Interpretation, and Archiving of Paleoseismological Information from Faulted Exposures," *J. of Geophysical Research*, Vol. 111, No. B10309.
- Ramasamy, S.M., Kumanan, C.J., Selvakumar, R. and Saravanavel, J., 2011, "Remote Sensing Revealed Drainage Anomalies and Related Tectonics of South India," *Tectonophysics*, Vol. 501, No. 1-4, pp. 41-51.
- Riaza, A. and Muller, A., 2010, "Hyperspectral Remote Sensing Monitoring of Pyrite Mine Wastes: A Record of Climate Variability (Pyrite Belt, Spain)," *Environmental Earth Sciences*, Vol. 61, No. 3, pp. 575-594.
- Rowan, L.C. and Mars, J.C., 2003, "Lithologic Mapping in the Mountain Pass, California Area Using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer (ASTER) data," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 84, No. 3, pp. 350-366.
- Rowan, L.C., Goetz, A.F.H. and Ashley, R.P., 1977, "Discrimination of Hydrothermal Altered and Unaltered Rocks in Visible and Near Infrared Multispectral Images," *Geophysics*, Vol. 42, No. 3, pp. 522-535.
- Rowan, L.C., Hook, A.J., Abrams, M.J. and Mars, J.C., 2003. "Mapping Hydrothermally Altered Rocks at Cuprite, Nevada, Using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer (ASTER), a New Satellite-Imaging System," *Economic Geology*, Vol. 98, No. 5, pp. 1019-1027.
- Rowan, L.C., Simpson, C.J. and Mars, J.C., 2004, "Hyperspectral Analysis of the Ultramafic complex and Adjacent Lithologies at Mordor, NT, Australia," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 91, No. 3-4, pp. 419-431.
- Rowan, L.C., Mars, J.C. and Simpson, C.J., 2005, "Lithologic Mapping of the Mordor, NT, Australia Ultramafic Complex by Using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 99, No. 1-2, pp. 105-126.
- Rowan, L.C., Schmidt, R.G. and Mars, J.C., 2006, "Distribution of Hydrothermally Altered Rocks in the Reko Diq, Pakistan Mineralized Area Based on Spectral Analysis of ASTER Data," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 104, No. 1, pp. 74-87.
- Sabins, F.F., 1997, *Remote Sensing-Principles and Interpretation*, Third Ed., Waveland Press, Inc., Long Grove, Illinois, US, p. 494.
- Saintot, A., Angelier, J. and Chorowicz, J., 1999, "Mechanical Significance of Structural Patterns Identified by Remote Sensing Studies: a Multiscale Analysis of Tectonic Structures in Crimea," *Tectonophysics*, Vol. 313, No. 1-2, pp. 187-218.
- Salati, S., van Ruitenbeek, F.J.A., van der Meer, F.D. and Tangestani, M.H., 2011, "Lithological Mapping and Fuzzy Set Theory: Automated Extraction of Lithological Boundary from ASTER Imagery by Template Matching and Spatial Accuracy Assessment," *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 13, pp. 753-765.
- Salisbury, J.W. and D'Aria, D.M., 1992, "Emissivity of Terrestrial Materials in the 8-14 μm Atmospheric Window," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 42, No. 2, pp. 83-106.
- Salisbury, J.W., Walter, L.S., Vergo, N. and D'Aria, D.M., 1991, *Infrared (2.1-25 micrometers) Spectra of Minerals*, Johns Hopkins University Press, Baltimore, p. 294.
- Schaepman, M.E., Ustin, S.L., Plaza, A.J., Painter, T.H., Verrelst, J. and Liang, S.L., 2009, "Earth System Science Related Imaging Spectroscopy-An Assessment," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 113, Supplement 1, pp. S123-S137.
- Scheidt, S., Lancaster, N. and Ramsey, M., 2011, "Eolian Dynamics and Sediment Mixing in the Gran Desierto, Mexico, Determined from Thermal Infrared Spectroscopy and Remote-sensing Data," *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 123, No. 7-8, pp. 1628-1644.
- Schestselaar, E.M., Chung, C-J.F. and Kim, K.E., 2000, "Integration of Landsat TM, Gamma-Ray, Magnetic, and Field Data to Discriminate Lithological Units in Vegetated," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 71, No. 1, pp. 89-105.
- Smith, M., Roberts, D., Hill, J., Mehl, W., Hosgood, B., Verdebout, J., Schmuck, G., Koehler, C. and Adams, J., 1994, "A New Approach to Quantifying Abundances of

- Materials in Multispectral Images,” *Proc. of the IGARSS*, Pasadena, Canada, August 8-12, pp. 2372-2374.
- Son, Y.S., Kang, M.K. and Yoon, Y.J., 2011, “Study of the Pyrophyllite Deposit Characteristics in Nohwa-do Using ASTER Image,” *J. of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 48, No. 3, pp. 335-350.
- Son, Y.S., Kang, M.K. and Yoon, Y.J., 2012, “Regional Mapping of Alteration of the Oyu Tolgoi Cu-Au Deposit in Molgolia Using Band Math Method with ASTER Image,” *J. of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 49, No. 2, pp. 157-165.
- Son, Y.S., Kang, M.K. and Yoon, W.J., 2014a, “Lithological and Mineralogical Survey of the Oyu Tolgoi Region, Southeastern Gobi, Mongolia using ASTER Reflectance and Emissivity Data,” *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 26, pp. 205-216.
- Son, Y.S., Kang, M.K. and Yoon, Y.J., 2014b, “Pyrophyllite Mapping in the Nohwa Deposit, Korea, Using ASTER Remote Sensing Data,” *Geosciences J.*, Vol. 18, No. 3, pp. 205-216.
- Sultan, M., Arvidson, R.E., Sturchio, N.C. and Guinness, E.A., 1987, “Lithologic Mapping in Arid Regions with Landsat Thematic Mapper Data: Meatiq Dome, Egypt,” *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 99, No. 6, pp. 748-762.
- Sunshine, J.M., Pieters, C.M. and Pratt, S.F., 1990, “Deconvolution of Mineral Absorption bands: An Improved Approach,” *J. of Geophysical Research*, Vol. 95, No. B5, pp. 6955-6966.
- Swayze, G.A., Smith, K.S., Clark, R.N., Sutley, S.J., Pearson, R.M., Vance, J.S., Hageman, P.L., Briggs, P.H., Meier, A.L., Singleton, M.J. and Roth, S., 2000, “Using Imaging Spectroscopy to Map Acidic Mine Waste,” *Environmental Science and Technology*, Vol. 34, No. 1, pp. 47-54.
- Swayze, G.A., Kokaly, R.F., Higgins, C.T., Clinkenbeard, J.P., Clark, R.N., Lowers, H.A. and Sutley, S.J., 2009, “Mapping Potentially Asbestos-Bearing Rocks Using Imaging Spectroscopy,” *Geology*, Vol. 37, No. 8, pp. 763-766.
- Thurmond, A.K., Abdelsalam, M.G. and Thurmond, J.B., 2006, “Optical-Radar-DEM Remote Sensing Data Integration for Geological Mapping in the Afar Depression, Ethiopia,” *J. of African Earth Sciences*, Vol. 44, No. 2, pp. 119-134.
- van der Meer, F., 2006, “The Effectiveness of Spectral Similarity Measures for the Analysis of Hyperspectral Imagery,” *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 8, pp. 3-17.
- van der Meer, F. and Bakker, W., 1997, “Cross Correlogram Spectral Matching: Application to Surface Mineralogical Mapping by Using AVIRIS Data from Cuprite, Nevada,” *Remote Sensing of Environment*, Vol. 61, No.3, pp. 371-382.
- van der Meer, F., van Dijk, P., van der Werff, H. and Yang, H., 2002, “Remote Sensing and Petroleum Seepage: A Review and Case Study,” *Terra Nova*, Vol. 14, No. 1, pp. 1-17.
- Wang, J. and Howarth, P.J., 1990, “Use of the Hough Transform in Automated Lineament Detection,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 28, No. 4, pp. 561-566.
- Wiat, P.A.M., Oppenheimer, C. and Francis, P., 2000, “Eruptive History of Dubbi Volcano, Northeast Afar (Eritrea), Revealed by Optical and SAR Image Interpretation,” *International J. of Remote Sensing*, Vol. 21, No. 5, pp. 911-936.
- Winter, M.E., 1999, “N-FINDR: An Algorithm for Fast Autonomous Spectral End-member Determination in Hyperspectral Data,” *Proc. of the Imaging Spectrometry V*, 266, SPIE, Denver, Colorado, July 18.



손 영 선

2009년 전남대학교 에너지자원공학과 공
학사
2011년 전남대학교 에너지자원공학과 공
학석사
2015년 전남대학교 에너지자원공학과 공
학박사

현재 전남대학교 에너지자원공학과 시간강사
(E-mail; sys6564@naver.com)



김 광 은

1985년 서울대학교 자원공학과 공학사
1987년 서울대학교 자원공학과 공학석사
1993년 서울대학교 자원공학과 공학박사

현재 한국지질자원연구원 광물자원연구본부 책임연구원
(E-mail; kimke@kigam.re.kr)

윤 왕 중

현재 전남대학교 에너지자원공학과 교수
(本學會誌 第52卷 第2号 参照)
