

EO-1 Hyperion 초다분광 위성영상을 이용한 강원도 지역 석회암 탐지

현창욱¹⁾ · 박형동^{2)*}

Limestone Mapping in Gangwon Area, South Korea Using EO-1 Hyperion Hyperspectral Satellite Imagery

Chang-Uk Hyun and Hyeong-Dong Park*

Abstract : This study presents approaches for limestone mapping in Gangwon area using EO-1 Hyperion hyperspectral satellite imagery. Limestone potential index formula was developed for fast and effective limestone detection, with utilization of intrinsic spectral absorption features within short-wave infrared wavelength region selected in reflectance spectra of carbonate minerals and spectra measured on samples collected in field. The limestone potential index was mapped on water, vegetation and snow land-covers removed area, and limestone open-pit mining sites, exposed slopes around road, vegetation removed construction sites, and few bare ground areas showed high index values. To apply partial unmixing matched filtering method for sub-pixel abundance mapping, spectrally pure end-member was extracted from the imagery. The partial unmixing result showed similar limestone distribution to the limestone potential index mapping result but slightly improved, with verification using high-spatial-resolution aerial photographs.

Key words : Remote sensing, Hyperspectral, Limestone, Satellite imagery, Spectral reflectance

요 약 : 본 연구에서는 EO-1 Hyperion 초다분광 위성영상을 사용하여 강원도 지역을 대상으로 석회암 탐지를 수행하였다. 지표 석회암 탐지를 위하여 탄산염 광물 분광반사도의 단파장적외선 영역에서 나타나는 고유한 흡광특성을 이용하여 신속하고 효과적으로 석회암 분포를 강조할 수 있는 석회암 잠재지수를 개발하였다. 영상의 전처리 단계에서 수계, 식생 및 눈 피복이 제거된 영역에 한정하여 석회암 잠재지수 지도를 작성한 결과 석회암 노천채광 현장, 도로변 암반노출 사면, 식생이 제거된 건설현장 및 일부 나대지에서 높은 잠재지수가 나타났다. 분광학적으로 순수한 석회암 반사도를 영상에서 추출하고 탐지 대상의 화소 내 분포비율을 산정할 수 있는 부분 분광혼합 분석기법인 정합 필터링의 기준자료로 사용하였다. 부분 분광혼합 분석결과에서 석회암 잠재지수 분석결과와 유사한 지점에서 석회암의 분포가 강조되었지만 고해상도 항공사진과의 비교분석을 통하여 석회암 잠재지수보다 정밀한 탐지가 수행되었음을 확인하였다.

주요어 : 원격탐사, 초다분광, 석회암, 위성영상, 분광반사도

서 론

초다분광(hyperspectral) 원격탐사에서는 백여 개가 넘는 좁고 연속된 파장영역에서 대상체로부터 반사된 전자

기파 에너지를 측정하고 분석함으로써 구성물질의 종류에 대한 정성적인 정보와 함량에 대한 정량적인 정보를 복합적으로 규명할 수 있다. 지질을 구성하는 광물과 암석 중 산화철이나 탄산염, 수산화물, 점토류 등을 포함하는 경우 가시광, 근적외선 및 단파장적외선인 400-2500 nm의 파장영역에서 분자진동 및 전자전이, 전하이동 등의 현상으로 인하여 구성 광물별로 고유한 에너지 흡수 특성이 나타나고(Clark *et al.*, 1990) 이러한 고유 흡광특성의 탐지를 통하여 특정 광물 및 암석에 대한 분석과 탐사가 이루어진다. 항공기나 인공위성에 탑재한 센서에서 획득된 초다분광 영상을 활용하면 넓은 탐사 대상영역 내의 화소로 표현되는 모든 지점에서 실험실에서 개

2012년 12월 4일 접수, 2013년 1월 2일 심사완료
2013년 2월 14일 게재확정

1) Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Alberta, Canada

2) 서울대학교 에너지시스템공학부

*Corresponding Author(박형동)

E-mail; hpark@snu.ac.kr

Address; Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

별 시료를 사용한 결과와 유사하게 정성적 및 정량적 정보의 기록과 분석이 가능한 장점이 있다.

지질을 대상으로 원격탐사 기법을 적용하는 경우 지표에 드러나 있는 기반암이나 노두에 대한 탐사를 수행하고 주제도를 작성하는 방식이 사용되어 왔고, 지질의 지표 노출정도에 비례하여 지질에 대한 정보가 획득이 된다. 따라서 건조지역이나 사막과 같이 식생 및 수계가 거의 존재하지 않는 미국 네바다의 Cuprite 지역을 대상으로 AVIRIS(Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer) 항공기 탑재 센서에서 획득된 영상을 사용하거나(Kruse *et al.*, 2003) 호주 북부의 Mordor Pound 지역을 대상으로 HyMap(Hyperspectral Mapper) 항공기 탑재 센서를 사용한 경우(Rowan *et al.*, 2004), 또는 캐나다 북부(Harris *et al.*, 2005, 2010) 및 그린란드(Bedini, 2009) 등 식생이 드문 고위도 지역에서 초다분광 원격탐사 기법을 적용한 지질탐사가 효과적으로 수행된 바 있다.

국내에서도 초다분광 원격탐사 기법을 적용하여 암석 시료를 대상으로 지상 현장에서 분석을 수행한 사례가 있고(Chi and Lee, 2007; Hyun and Park, 2007, 2010), ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) 다중분광(multispectral) 위성영상을 사용하여 전라남도 완도군 노화도의 납석광상 분광 특성 분석(Son *et al.*, 2011), 양산단층 주변 열수변질대 내 점토광물 추출(Lee *et al.*, 2009) 및 해남지역 강고령 토변질 암석 식별(Lee *et al.*, 2011)에 대한 연구사례가 있다. 하지만 국내에서는 지표를 덮고 있는 산림피복이 원격탐사 기법을 이용한 지질탐사를 방해하는 요인으로 작용하고 있다. 또한 앞서 언급한 해외의 지질탐사 사례들에서는 항공기 탑재 센서를 사용하여 공간해상도가 고 해상도이며 신호 대 잡음비가 높은 고품질의 영상을 획득하고 분석에 이용한 반면 국내에는 암석 및 광물들의 주요 분광특성이 다수 위치한 단파장적외선 영역을 탐지할 수 있는 초다분광 항공센서의 부재로 인하여 지난 2000년부터 사용이 시작된 미국 항공우주국의 EO-1 (Earth Observing-1) 위성에 탑재된 Hyperion 초다분광 센서로부터 획득된 영상이 현재 이용 가능한 초다분광 영상자료이다. 하지만 Hyperion 영상은 가시광 파장영역에서 신호 대 잡음비(signal to noise ratio)가 최대 약 190인 특성을 가지며(Pearlman *et al.*, 2003), 항공기 탑재 초다분광 센서인 AVIRIS나 HyMap의 경우 최대 신호 대 잡음비가 각각 약 1100과(Green *et al.*, 1998) 1700인 것과 비교하였을 때(Cocks *et al.*, 1998) 상대적으로 많은 노이즈가 영상에 포함되어 있기 때문에 분석 과정에서 노이즈 제거에 대한 고려 및 노이즈가 분석결과에 미치는 영향에 대한 평가가 필수적이다. EO-1 위성

은 지상 705 km의 궤도상에서 운용되기 때문에(Pearlman *et al.*, 2003) 통상적으로 20 km 이하의 고도에서 20 m 이하의 공간해상도로 영상을 취득하는 항공기 탑재 센서에 비하여 상대적으로 저해상도인 공간해상도가 30 m인 영상이다. 따라서 화소의 크기 특성으로 인한 지표피복들의 개별 화소 내 혼합효과에 대한 고려 역시 필요하다.

본 연구에서는 Hyperion 센서에서 취득한 초다분광 영상을 사용하여 강원도 지역에서 석회암 탐지를 시도하였다. 국내의 지표피복 특성 및 영상획득 시기로부터 결정되는 계절적 요인을 고려하여 제작한 수계, 산림 및 눈에 대한 마스크를 이용하여 분석대상이 아닌 지표피복을 우선적으로 제거한 후, 석회암 구성광물 고유의 에너지 흡수파장을 이용하여 석회암의 분광반사특성을 강조할 수 있도록 개발한 석회암 잠재지수 연산식을 이용하여 석회암 분포지도를 작성하였다. 또한 다양한 지표피복들의 개별 화소 내 혼합을 고려한 부분 분광혼합(partial spectral unmixing) 분석법을 이용하여 석회암 탐지를 수행하였다.

대상지역 위치 및 지질

분석 대상지역은 동해안에 인접한 강원도 동해시부터 삼척 및 태백 지역을 가로지르며 경상북도 봉화군 일부를 포함하는 폭 7.5 km, 길이 약 50 km의 영역이다(Fig. 1). 지표의 대부분은 산림으로 피복되어 있고 농가, 경작지, 도로, 도심지, 석회암 노천광산 및 소규모 나대지가 대상지역 내에 분포하고 있다.

강원도 지역에는 고생대 캄브리아기부터 오르도비스기에 이르는 조선누층군에서 석회암이 산출된다(Noh and Oh, 2005). 분석 대상지역 내에서 석회암의 분포를 확인하기 위하여 1:50,000 축척의 삼척, 고사리 및 장성도폭 수치지질도에 기록된 석회암을 포함하는 층서의 분포를 도시하였다(Fig. 1). 대상지역에는 조선누층군 하부층부터 상부층의 순으로 묘봉층, 풍촌층, 화절층, 두무동층 및 막골층에서 석회암이 산출되는 것으로 확인된다. 고품위 석회석의 경우 주로 조선누층군의 하부층인 동점층 하위의 풍촌층에 주로 부존하는 것으로 알려져 있다(Noh and Oh, 2005).

초다분광 위성영상 및 분광반사특성 측정자료

분석에 사용된 초다분광 위성영상은 EO-1 Hyperion 센서에서 2012년 2월 17일에 취득되었다. 영상은 355.6-2577.1 nm의 파장영역에서 약 10 nm의 파장폭으로 취득된 총 242개의 밴드에 대한 개별 영상들이 30 m

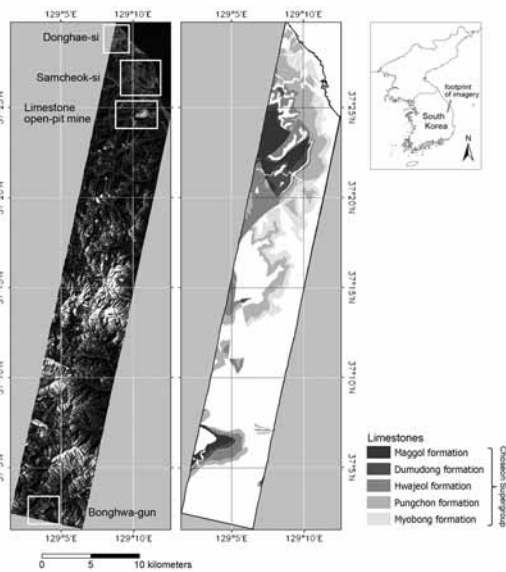


Fig. 1. Location, true color composite image and geology of study area.

의 공간해상도와 16 bit의 방사해상도로 기록되어 있고, L1Gst 수준의 기본적인 방사보정 및 기하보정이 수행된 자료이다. 영상의 폭은 약 7.5 km, 길이는 약 100 km이며 영상 내에 포함된 바다에 해당하는 영역은 분석에서 제외하였다(Fig. 1).

석회암을 구성하는 탄산염 광물인 방해석(calcite)과 백운석(dolomite)에 대하여 미국 지질조사소(U.S. Geological Survey)에서 구축한 분광 라이브러리(spectral library)에서 분광반사도를 선택한 후 초다분광 영상을 구성하는 밴드의 파장영역에 한정하여 분석을 수행하였다. 또한 강원도 삼척과 정선 지역에서 수집한 석회암 시료에 대하여 ASD(Analytical Spectral Devices)사의 FieldSpec[®]3 분광계(spectrometer)를 사용하여 350-2500 nm의 파장영역에서 반사도 정보를 측정하고 석회암의 분광반사특성 분석에 사용하였다.

초다분광 위성영상 분석방법

초다분광 영상의 전처리 및 석회암 탐지과정을 포함하는 모든 분석과정은 Fig. 2와 같다. 영상의 분석에는 Exelis사의 ENVI 4.8 (ENvironment for the Visualization of Images) 소프트웨어를 사용하였다.

석회암 잠재지수 개발

미국 지질조사소의 분광 라이브러리에서 선택한 탄산

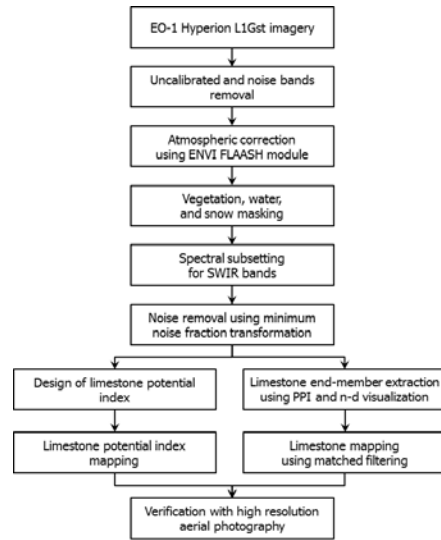


Fig. 2. Workflow chart for the processing used during this study.

염 광물 및 강원도 지역의 암석시료에서 측정된 분광반사도 자료에 대하여 평균 반사도를 계산하여 정규화를 수행한 후, 가장 두드러진 흡광특성을 선택하여 석회암 잠재지수(limestone potential index) 개발에 사용하였다. 석회암 잠재지수는 반사도 곡선 중 석회암 구성광물의 에너지 흡수특성으로 인하여 발생하는 최저 반사도 및 최저 반사도 지점 전후에 인접한 파장영역에서 기본적인 배경 반사도인 완만하고 높은 반사도 곡선형태를 뚜렷하게 나타내는 두 지점(shoulder)을 선택한 후 두 지점 사이에 위치한 흡광특성과의 반사도 차이를 강조함으로써 석회암 구성광물에 의한 에너지 흡수특성을 극대화할 수 있도록 수식으로 개발하고, 수식으로부터 산출되는 수치를 석회암의 상대적 분포가능성을 지시하는 잠재지수로 사용하였다. 기본적으로 밴드비율 연산기법에 기초를 둔 지수 산정법이지만 분광해상도가 우수한 초다분광 영상을 사용함으로써 좁은 파장영역에 나타나는 석회암 광물의 고유한 에너지 흡수특성만을 한정하여 신속하고 효율적인 연산으로 강조할 수 있는 것이 장점이다.

초다분광 위성영상 전처리

분석에 사용된 Hyperion 초다분광 영상은 총 242개의 밴드에 대한 개별 영상들로 구성되어 있다. 이 중에서 보정이 이루어지지 않은 44개 밴드 및 중복된 파장영역에서 획득된 2개 밴드를 우선적으로 제거하고(Beck *et al.*, 2003), 대기 중 수증기 등 수분에 의한 흡광현상이 나타나는 파장영역인 1400 nm 및 1900 nm 부근에 위치한

Table 1. Water, vegetation and snow indices for masking of water, vegetation and snow land-covers

Index	Original formula	Reference	Hyperion band input
Normalized difference water index (NDWI)	$NDWI = (Green - NIR^*) / (Green + NIR)$	Xu, 2006	Green: 569.3 nm, NIR: 823.7 nm
Normalized difference vegetation index (NDVI)	$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$	Tucker, 1979; Jackson <i>et al.</i> , 1983	NIR: 962.9 nm, Red: 630.3 nm
Normalized difference snow index (NDSI)	$NDSI = (Green - SWIR^{**}) / (Green + SWIR)$	Hall <i>et al.</i> , 1995	Green: 569.3 nm, SWIR: 1648.9 nm

*near infrared

**short-wave infrared

밴드에 대하여 Datt 등(2003)이 제시한 대기 중 수분으로부터 영향을 받는 밴드를 참고하여 추가적으로 제거한 후, 선별된 176개의 밴드로 구성된 영상에 대하여 대기 보정을 수행하였다. 대기보정 결과 영상에는 10,000의 수치가 100%의 반사도를 나타내도록 보정계수를 곱하였다.

수계, 식생 및 지질은 가시광 및 적외선 영역에서 서로 상이한 반사특성을 나타낸다. 지질 외의 영역은 본격적인 석회암 탐지를 위한 분석 이전에 각각의 피복에 특화된 지수(index)를 이용하여 해당 피복만을 강조하는 마스크를 제작하고 분석 영역에서 제외시켰다(Table 1). 사용된 지수는 normalized difference water index(NDWI), normalized difference vegetation index(NDVI) 및 normalized difference snow index(NDSI)로 기본적으로 초다분광 영상보다 밴드폭이 넓은 다중분광 영상을 대상으로 개발되었다. 본 연구에서는 각 지수에 입력자료로 사용되어 온 다중분광 영상 밴드의 파장영역 내에 포함되는 Hyperion 영상 밴드를 선택하여 지수 계산에 입력하였고 각 지수별 세부 입력 밴드는 Table 1에 제시하였다.

서론에서 언급한 바와 같이 Hyperion 영상의 신호 대 잡음 비율은 다른 다중분광 위성영상이나 항공센서에서 취득한 자료에 비하여 낮은 190에서 40 사이이며 파장이 길어지는 경우 신호 대 잡음 비율은 점점 낮아지는 경향을 보여서 2000 nm 이상의 단파장적외선 영역에서는 50 이하의 신호 대 잡음 비율이 나타난다(Pearlman *et al.*, 2003). 파장별 영상에서도 선형 및 다수의 불규칙 노이즈를 육안으로 확인할 수 있고 이러한 노이즈의 제거를 위하여 MNF(minimum noise fraction) 변환을 수행하였다. MNF 변환은 연속된 2회의 주성분변환으로 구성되며 노이즈 제거 및 밴드의 수를 감소시켜 연산속도와 효율을 높이는 장점이 있다(Green *et al.*, 1988; Boardman and Kruse, 1994).

석회암 분포지도 작성

석회암 분포지역을 강조하여 지도화하기 위하여 먼저 석회암 잠재지수를 적용하였다. 석회암 잠재지수는 특정 대상의 분광특성을 강조할 수 있도록 소수의 밴드를 사용하여 산술 연산을 수행하는 밴드비율 기반의 기법이기 때문에 개별 화소마다 석회암 구성광물의 특징적인 흡광 특성이 강조된 지수가 신속하게 지정되고 수치의 크고 작음에 따른 밝기 차이로 영상화가 이루어짐으로써 석회암의 상대적 분포 가능성 및 공간적 분포 경향을 확인할 수 있다. 밴드비율 기반의 기법은 주로 다중분광 영상의 분석을 목적으로 개발되고 사용되어왔지만 좁은 폭으로 나타나는 대상별 고유한 흡광특성을 보다 세밀하게 탐지할 수 있는 초다분광 영상에 적용할 경우 특정 대상에 한정된 효율적인 탐지를 수행할 수 있다.

분석에 사용한 영상은 공간해상도가 30 m이기 때문에 개별 화소 내에 토양이나 암석과 같은 지질매체뿐만 아니라 식생, 도로, 건축물 및 수계 등 다양한 종류의 지표 피복이 혼재되어 있다. 이와 같은 상황에서 개별 화소 내에 일부 존재하는 대상을 탐지하기 위하여 분광 혼합분석을 적용하였다. 분광 혼합분석에 입력될 기준 반사도는 PPI(pixel purity index) 분석법과 n-차원 가시화(n-dimensional visualization) 기법을 이용하여 추출하였다. PPI 분석은 영상을 구성하는 화소들을 반복적으로 임의 방향의 벡터에 투영하고 벡터상에서 극대 또는 극소의 지점에 투영된 횡수를 지수로서 산정한다. PPI가 큰 수치의 화소일수록 화소들로 구성된 군집에서 바깥쪽에 위치하며, 다른 피복과 혼합되지 않은 상대적으로 순수한 단일 피복으로만 구성된 화소로 간주된다(Boardman, 1994; Boardman *et al.*, 1995). n-차원 가시화에서는 PPI 연산결과에서 선택된 상위의 PPI 수치를 갖는 화소들을 n-차원(n: 밴드수)의 공간상에 도시한 후 화소들로 구성된 군집의 형태를 기반으로 분석자가 군집 내 화소 위치의 적절성을 판단하여 최종적으로 분류기준 화소를 선택

하게 된다.

본 연구에서는 분광혼합 분석법 중 부분 분광혼합 분석법인 정합 필터링(matched filtering)을 사용하였다. 가장 기본적인 분광혼합 분석법인 선형 분광혼합 분석이 화소 내에 존재하는 모든 지표피복의 종류 및 분광특성에 대한 정보를 필요로 하는 것과는 달리, 선택된 대상의 분광정보를 강조하고 배경 신호를 억제함으로써 대상을 탐지하고 또한 화소 내 분포 면적을 결정할 수 있다. 화소마다 지정되는 정합 필터링 분석결과(matched filtering score)는 분류기준 반사도와 정확히 일치하는 화소일 경우 1이 지정되고 화소 내에 탐지대상 피복이 차지하는 비율에 따라서 0과 1사이의 수치가 지정된다(Harsanyi and Chang, 1994; Boardman *et al.*, 1995). 정합 필터링은 개별 화소 내 불균질 분포대상의 정량 탐지능력 및 입력 자료의 간소함으로 인하여 지표 지질조사를 목적으로 효과적으로 적용되어왔다(Rowan *et al.*, 2004; Vaughan *et al.*, 2005; Bedini, 2011).

석회암 잠재지수 및 정합 필터링을 이용하여 작성된 석회암 분포지도의 검증과 평가를 위하여 위성영상과 근접한 시기에 획득된 고해상도 항공사진을 이용하였다. 항공사진은 2011년 5월에 획득되었으며, 30 m의 공간해상도인 Hyperion 영상의 분석결과를 평가하기에 충분한 0.25 m 공간해상도의 자료이다.

결과 및 논의

석회암 구성광물 분광반사특성 분석

석회암을 구성하는 탄산염 광물인 방해석과 백운석에는 기본 흡수(fundamental absorption) 진동수(ν_1 - ν_4)의 배음(overtone)과 조합(combination) 밴드가 1.0-2.5 μm 사이의 단파장적외선 영역에 나타나는 것으로 알려져 있다(Table 2). 이 중 강한 흡수밴드는 $\nu_1 + 2\nu_3$ 인 2.50-2.55 μm

와 $3\nu_3$ 인 2.30-2.35 μm 에 위치한다. 이 외에 $\nu_1 + 2\nu_3 + \nu_4$ 또는 $3\nu_1 + 2\nu_4$ 인 2.12-2.16 μm , $2\nu_1 + 2\nu_3$ 인 1.97-2.00 μm 및 $\nu_1 + 3\nu_3$ 인 1.85-1.87 μm 등의 위치에서 약한 흡수밴드가 관찰된다(Hunt and Salisbury, 1971; Clark *et al.*, 1990). 방해석과 백운석은 유사한 위치에서 흡광특성이 나타나지만 백운석의 흡광특성이 방해석보다 짧은 파장에 위치한다.

미국 지질조사소의 분광 라이브러리 중 Beckman 5270 분광계를 사용하여 0.2-3.0 μm 의 파장영역에서 측정한 백운석과 방해석에 대한 분광반사도 및 강원도 삼척과 정선에서 채취한 석회암 암석시료(각각 Limestone-1 및 Limestone-2)에서 ASD사의 FieldSpec[®]3 분광계로 측정한 분광반사도를 0.4-2.4 μm 에 한정하여 도시하였다(Fig. 3). 두 암석시료는 X-선 회절분석(X-ray Diffraction Analysis, XRD) 결과 방해석으로만 구성된 것으로 확인되었다. 분광반사도는 전반적인 반사도 차이를 제거하고 특징적인 흡광특성을 강조하기 위하여 모든 파장의 반사도를 0.4-2.4 μm 의 평균 반사도로 나누는 정규화를 수행하였다. 문헌연구를 통하여 확인한 탄산염 광물의 흡광특성 중 2.30-2.35 μm 에 위치한 흡광특성이 분광반사도 곡선에서 가장 두드러지게 나타났다. 이 흡광특성이 나타나는 파장영역 내에서 2.325 및 2.335 μm 의 위치에 Hyperion 영상 밴드가 취득되고, 따라서 이 파장영역 및 해당 영상 밴드는 초다분광 위성영상을 이용한 분광학적 분석수행시 탄산염 광물을 탐지할 수 있는 특징적인 흡광특성으로 이용할 수 있음을 확인하였다.

석회암 잠재지수 개발

분광 라이브러리에서 선택한 탄산염 광물 및 강원도 지역에서 채취한 석회암 시료의 분광반사도 곡선에 나타난 고유한 흡광특성 가운데 가장 뚜렷하게 나타나는 2.30-2.35 μm 에 위치한 흡광특성을 석회암 잠재지수의

Table 2. Positions and widths of spectral absorption features of calcite and dolomite in SWIR region (Gaffey, 1985, 1986)

Carbonate band	Calcite		Dolomite	
	Position (μm)	Width (μm)	Position (μm)	Width (μm)
1	2.530-2.541	0.0223-0.0255	2.503-2.518	0.0208-0.0228
2	2.333-2.340	0.0154-0.0168	2.312-2.322	0.0173-0.0201
3	2.254-2.720	0.0121-0.0149	2.234-2.248	0.0099-0.0138
4	2.167-2.179	0.0170-0.0288	2.150-2.170	0.0188-0.0310
5	1.974-1.995	0.0183-0.0330	1.971-1.979	0.0206-0.0341
6	1.871-1.885	0.0190-0.0246	1.853-1.882	0.0188-0.0261
7	1.753-1.885	0.0256-0.0430	1.735-1.740	0.0178-0.0395

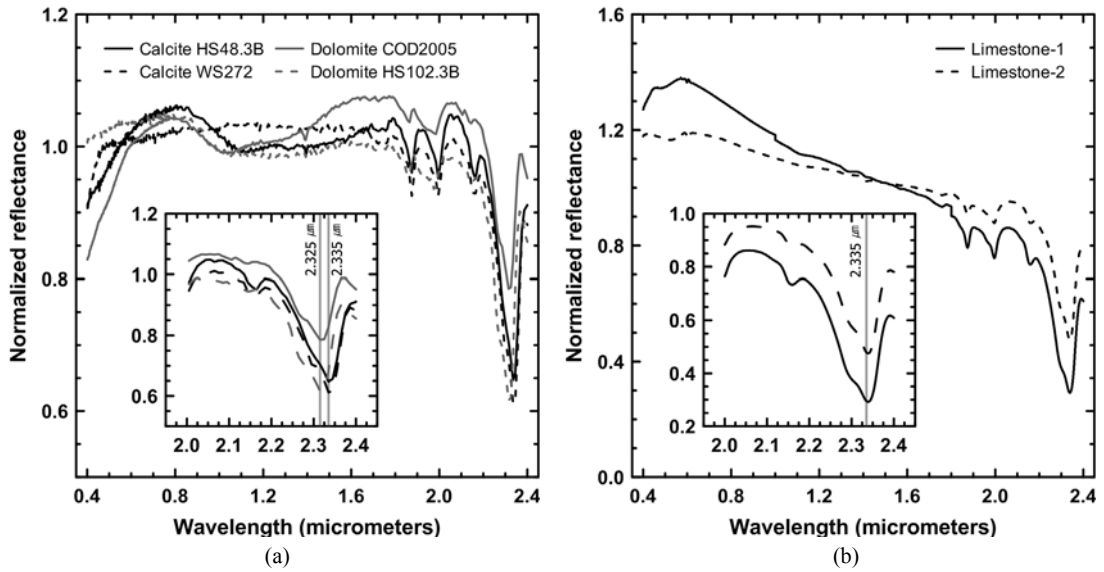


Fig. 3. Spectral reflectances of (a) carbonate minerals selected from U.S. Geological Survey spectral library(Clark *et al.*, 2007) and (b) laboratory measured spectral reflectances of limestone rock samples. The selected diagnostic absorption features within 2.30-2.35 μm in the inner boxes are marked with vertical lines corresponding to the nearest Hyperion imagery band center.

개발에 사용하였다. 선택된 파장영역 내에는 두 개의 Hyperion 영상 밴드 중심파장(각각 2.325과 2.335 μm)이 위치하고 있지만 석회암의 주요 구성광물인 방해석의 흡광특성이 나타나는 파장이 보다 장파장인 2.335 μm 에 근접하게 나타나는 특성을 반영하여 2.335 μm 밴드를 석회암 잠재지수 연산식에 포함하였다. 석회암 잠재지수는 2.335 μm 의 흡광특성을 강조하기 위하여 2.335 μm 전후로 나타나는 분광반사도 곡선상의 봉우리(shoulder 또는 peak)가 위치하거나 흡광특성이 존재하지 않고 봉우리에 근접한 2.102 및 2.365 μm 의 반사도(R)와의 차이를 곱하는 아래의 식 (1)과 같이 표현되었다. 밴드의 선택 과정에서 Hyperion 센서의 디터크 오류로 발생하는 선형 노이즈가 두드러지게 나타나는 밴드는 배제하였다.

$$\text{Limestone potential index} = (R_{2.102\mu\text{m}} - R_{2.335\mu\text{m}}) \times (R_{2.365\mu\text{m}} - R_{2.335\mu\text{m}}) \quad (1)$$

초다분광 위성영상 전처리

대기보정이 수행된 Hyperion 영상에서 수계, 식생 및 눈으로 피복된 영역을 제거하기 위하여 Table 1에 제시한 NDWI, NDVI 및 NDSI 영상을 각각 작성하였다. NDWI 히스토그램을 도시하였을 때 수계는 식생이나 토양, 암석 등과 달리 상이하게 낮은 반사도를 나타내는 특

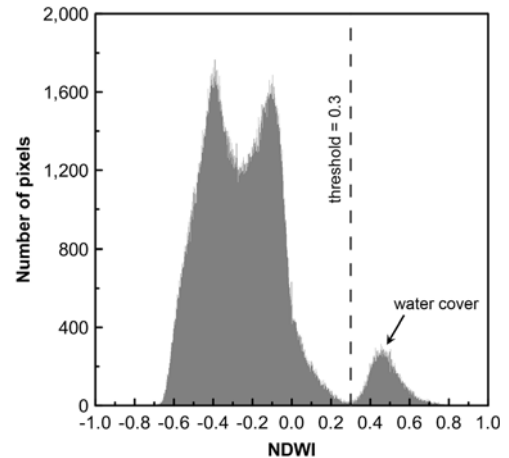


Fig. 4. NDWI thresholding for water masking.

성으로부터 Fig. 4와 같이 바이모달(bi-modal) 또는 멀티모달(multi-modal) 형태로 다른 피복과 구분되는 높은 수치의 분포로 나타나고 이러한 분포경향을 이용하여 수계를 다른 피복과 분리할 수 있다. 본 연구에서는 NDWI 히스토그램상에서 임계값(threshold)을 0.3으로 지정하여 수계 마스크를 작성하였다. NDWI와는 달리 NDVI와 NDSI 히스토그램에서는 바이모달이나 멀티모달 형태와

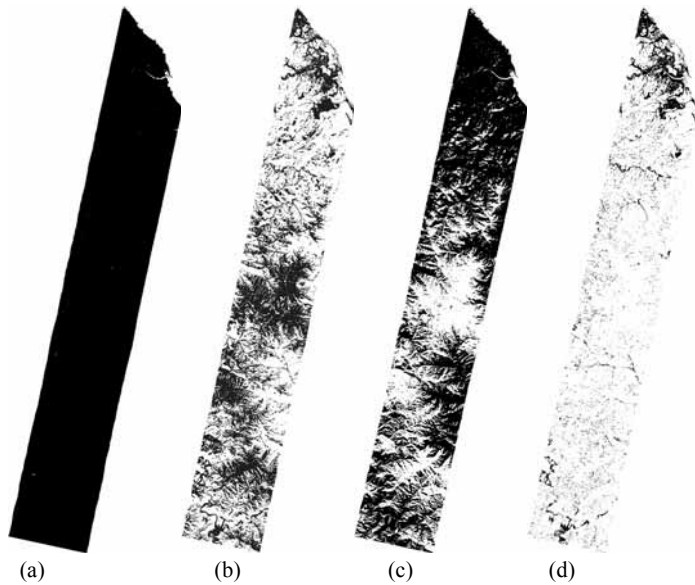


Fig. 5. Study area subsetting using masks for water, vegetation and snow areas: (a) NDWI thresholding, (b) NDVI and (c) NDSI thresholding on water masked area, and (d) study area subsetted with all masks.

같이 피복의 종류에 따라서 뚜렷하게 구분되는 형태의 히스토그램이 나타나지 않기 때문에 식생과 눈 피복의 효과적인 제거가 RGB 영상에서 육안으로 확인되는 $NDVI > 0.3$ 및 $NDSI > 0$ 의 임계값을 적용하여 마스크를 작성하였다(Fig. 5). 수계, 산림 및 눈에 대한 마스크에 더하여 영상의 가장자리에 나타나는 불규칙한 속성값을 갖는 화소를 제거하기 위하여 영상 획득영역을 나타내는 마스크에 erode 필터를 3×3 화소의 커널 크기로 적용하여 영상의 최외곽 화소들이 분석에 입력되지 않도록 추가적으로 제거하였다.

수계, 산림, 눈 및 최외곽 화소에 대한 마스크를 모두 적용한 후 영상에 포함된 노이즈를 제거하기 위하여 MNF 변환을 수행하였다. 석회암의 주요 흡광특성이 단파장적외선 파장영역에 위치하고 있기 때문에 대기보정이 수행된 176개의 파장영역 중 단파장적외선 영역 내에서 $2.022\text{-}2.375 \mu\text{m}$ 에 해당하는 36개의 밴드를 선택하여 노이즈 제거 및 석회암 분포지도 작성에 이용하였다. 밴드 중 $2.375 \mu\text{m}$ 이후의 밴드에는 다수의 노이즈가 포함되는 것으로 확인되어 분석에서 제외하였다. 선택된 36개의 밴드에 대하여 MNF 변환을 수행한 후 고유값(eigen value) 검토 및 육안분석을 수행하였고, 7번째 MNF 밴드부터는 지표 피복에 대한 정보가 아닌 노이즈가 우세한 것으로 판단되어 상위 6개의 MNF 밴드에 대하여 역변환을 수행하고 노이즈가 제거된 영상을 획득하였다(Fig. 6).

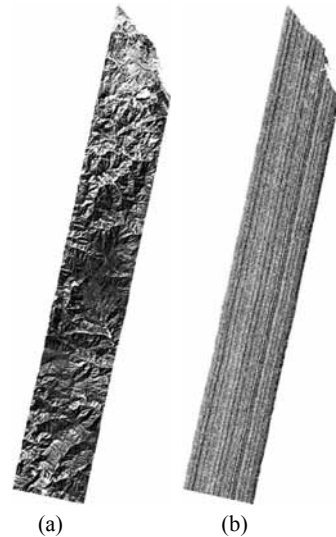


Fig. 6. Minimum noise fraction (MNF) transformed bands: (a) the 1st MNF band containing most abundant information among MNF bands and (b) the 7th MNF band recognized as noise dominant band.

석회암 분포지도 작성

수계, 산림, 눈 및 최외곽 화소와 노이즈가 제거된 영상에 대하여 석회암 잠재지수(식 (1))를 적용하여 석회암 분포지도를 작성하였다(Fig. 7). 석회암 분포지도에서

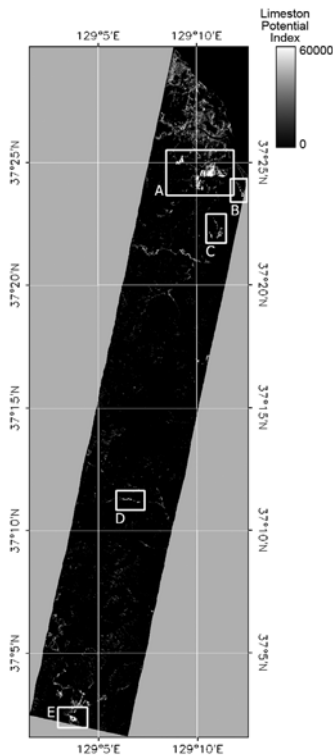


Fig. 7. Limestone potential mapping result using limestone potential index: A indicates limestone open-pit mines, B indicates exposed rocks and soils for road construction, C indicates limestone open-pit mines, D indicates exposed slopes of bedrock around road, and E indicates exposed rocks and soils in alluvium of construction site.

는 석회암 잠재지수가 높은 영역일수록 밝은 화소로 표현되었다. 고해상도 항공사진을 이용하여 확인한 결과 분포지도 내에서 가장 뚜렷하게 강조되어 나타나는 지역은 노천채광이 이루어지는 석회암 광산으로(Fig. 7에서 A와 C로 표기) 신선한 석회암 노두가 넓은 영역에서 노출되어있기 때문에 높은 수치의 잠재지수가 나타났다. 이 지역 외에 고속도로 건설이 진행 중인 지질이 노출된 지역(Fig. 7에서 B로 표기), 지방도 주변 암반노출 사면(Fig. 7에서 D로 표기) 및 하천변 충적층 지역의 건설부지(Fig. 7에서 E로 표기)에서도 높은 잠재지수가 나타났다.

상대적으로 낮은 수치로 강조된 지점으로는 A지역 상부에 위치한 삼척시와 C지역 하부 및 E지역 상부의 소규모로 지질이 노출된 하천변 지역이 있다. 삼척시 내의 시가지에는 콘크리트 및 아스팔트로 구성된 건축물과 도로가 다수 분포하고, 미국 지질조사소의 분광 라이브러리를 참조한 결과 콘크리트 및 아스팔트에서는 석회암

구성광물의 흡광특성과 일부 중첩되는 2.34-2.35 μm 부근에서 약한 흡광특성이 나타나기 때문에 잠재지수가 다소 강조된 것으로 판단된다. 하천변의 지질 노출 폭은 대부분 개별 화소 이하인 소규모이고 수계에 의한 복합적인 침식, 운반 및 퇴적 작용으로 인하여 지표에 석회암 외에 다양한 종류의 지질이 혼재되어 나타나기 때문에 A-E지역보다 상대적으로 약하게 강조되었다. 이 외에 일부 고립된 개별 화소들에서도 높은 잠재지수가 확인되지만 이는 Hyperion 영상에 포함된 높은 수준의 노이즈 및 공간해상도의 한계로 인하여 수계, 산림 및 눈 피복이 마스크 적용 후에도 완벽하게 제거되지 않고 주변 화소와 혼합되어 나타나는 현상으로 판단된다.

석회암 잠재지수를 이용하여 작성한 석회암 분포지도의 한계점인 탐지 대상에 대한 화소 내 정량분석 능력을 제고하고 초다분광 영상의 장점인 풍부한 분광특성을 활용하기 위하여 부분 분광혼합 분석법인 정합 필터링을 적용하였다. 분광혼합 분석에서 분석기준 반사도(end-member)의 추출은 분석자의 전문지식 및 숙련된 기술이 필요한 부분이다(Boardman and Kruse, 2011). 부분 분광혼합 분석의 기준 반사도를 추출하기 위하여 PPI를 계산한 후 상위 10,000개의 화소에 대하여 n-차원 가시화를 위한 입력자료로 사용하였고, n-차원 가시화에서는 선택된 화소에 대하여 1-6번 MNF 밴드를 입력자료로 사용하여 도시한 볼록 다면체 형상의 화소 군집에서 모서리에 해당하는 두 개의 화소를 찾아내어 석회암의 기준 반사도를 나타내는 화소로 지정하였다(Fig. 8 (a)). 기준 반사도로 선택한 화소의 타당성을 평가하기 위하여 영상 내에서 분포 위치를 확인한 결과 두 화소 모두 영상 내에서 석회암의 분포가 가장 뚜렷하게 나타나는 노천 채광지역 내에 위치함을 확인하였다(Fig. 8 (b)). 분석 기준 반사도를 분석에 사용된 단파장적외선 영역에 한정하여 석회암 시료의 반사도와 함께 도시하였을 때 석회암의 가장 특징적인 2.335 μm 에서의 흡광특성이 확인되며 석회암 잠재지수의 계산에 입력되는 2.102 및 2.265 μm 에서 상대적으로 높은 반사도가 나타남을 확인할 수 있다(Fig. 8 (c)). 하지만 2.2-2.3 μm 의 파장영역에서 순수한 석회암의 분광반사도에 나타나지 않는 에너지 흡수 경향이 나타났고 이는 30 m의 공간해상도로 인한 석회암 외의 다른 지질 피복이나 채광활동을 위한 시설물 및 운반차량 등이 화소 내에 포함되거나 Hyperion 영상의 낮은 신호 대 잡음비 특성으로 인한 노이즈의 영향 및 불완전한 대기보정의 영향 등이 복합적으로 결합되어 나타나는 현상으로 판단된다.

정합 필터링 결과에서는 개별 화소에 포함된 석회암의 분포비율이 높은 영역일수록 밝은 화소로 표현되었다.

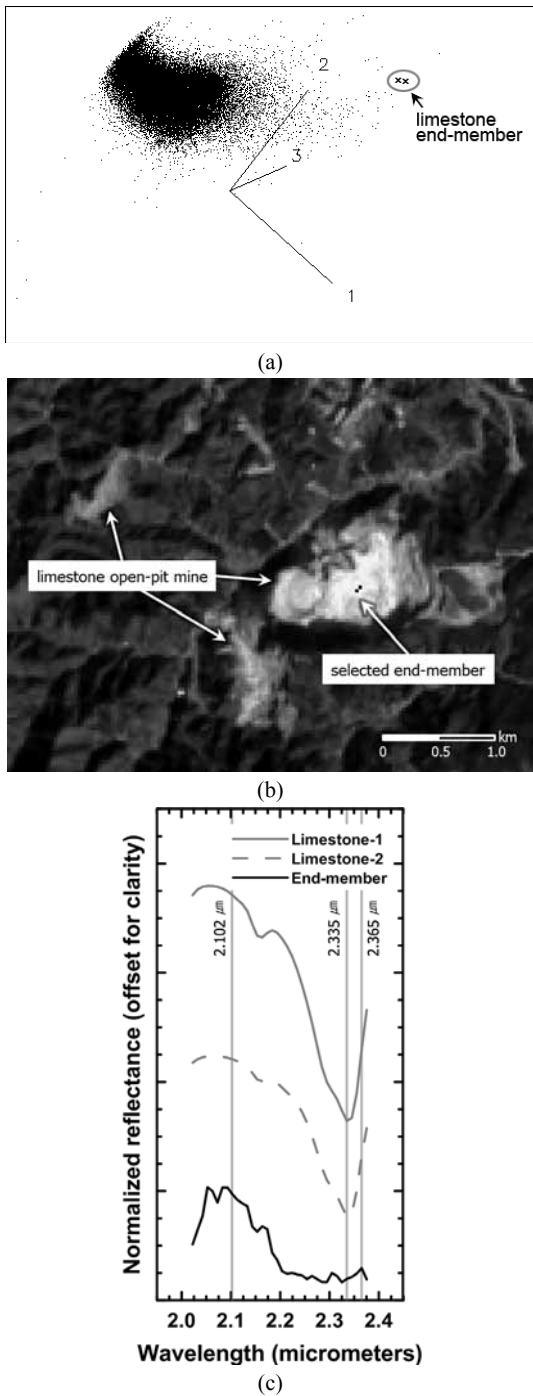


Fig. 8. Limestone end-member extraction: (a) end-member extraction using n-dimensional visualization with 1-3 MNF bands, (b) location of the extracted end-member, and (c) spectral reflectance of the end-member and the limestone samples.

석회암의 분포가 가장 뚜렷하게 나타나는 지역은 석회암 잠재지수 결과와 동일하게 석회암 노천채광이 이루어지는 광산으로(Fig. 9에서 A와 C로 표기) 신선한 석회암 노두가 넓은 영역에서 노출되어있기 때문에 정합 필터링 결과 역시 높은 수치로 강조되어 나타났다. 이 지역 외에 고속도로 건설이 진행 중인 지질이 노출된 지역(Fig. 9에서 B로 표기), 지방도 주변 암반노출 사면(Fig. 9에서 D로 표기) 및 하천변 충적층 지역의 건설부지(Fig. 9에서 E로 표기)에서도 높은 수치의 정합 필터링 결과가 나타났다.

상대적으로 낮은 수치로 강조된 지점도 석회암 잠재지수 결과와 동일하게 A지역 상부에 위치한 삼척시와 C지역 하부 및 E지역 상부의 소규모로 지질이 노출된 하천변 지역이며, 이는 삼척시 내의 시가지를 구성하는 콘크리트와 아스팔트의 약한 흡광특성이 석회암 구성광물의 흡광특성과 일부 중첩된 위치에서 나타나는 영향 및 하천변에 분포하는 소규모 석회암이 탐지된 결과로 판단된다.

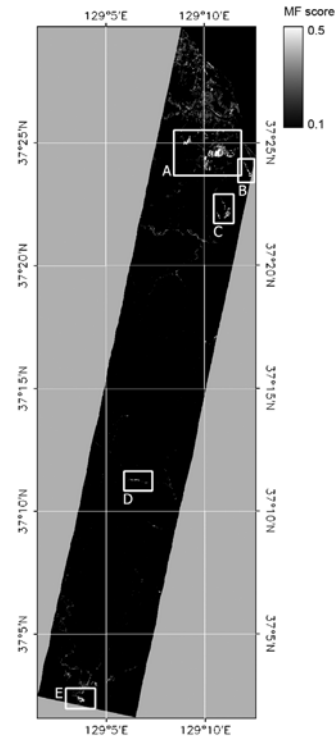
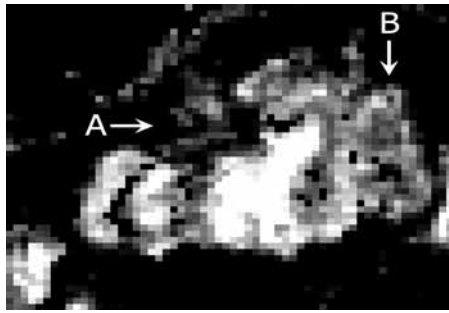


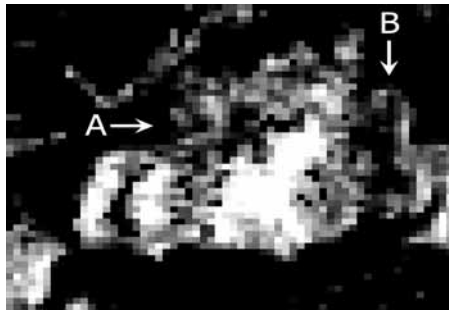
Fig. 9. Partial spectral unmixing map using highest limestone potential pixels: A indicates limestone open-pit mines, B indicates exposed rocks and soils for road construction, C indicates limestone open-pit mines, D indicates exposed slopes of bedrock around road, and E indicates exposed rocks and soils in alluvium of construction site.

본 연구에서 제한한 석회암 잠재지수 결과와 정합 필터링 결과를 보다 자세하게 평가하기 위하여 분석 대상 지역 내에서 신선한 석회암이 지표에 대규모로 노출되어 있는 노천채광 현장에 한정하여 위성영상 분석결과와 고해상도 항공사진을 비교분석하였다(Fig. 10). 정합 필터링 결과는 Fig. 9와 동일하게 0.1 및 0.5를 각각 최소 및

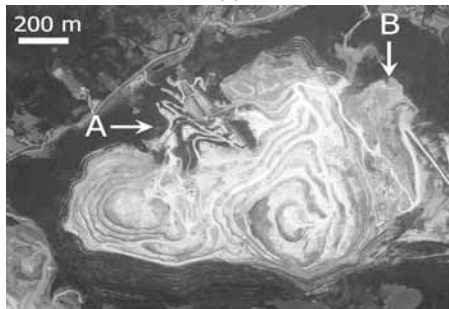
최대 밝기 경계값으로 선택하여 히스토그램 평활화(histogram equalization)를 수행하고(Fig. 10(a)) 이를 기준으로 화소들의 밝기값이 동일한 분포를 나타내도록 석회암 잠재지수 결과에 대하여 히스토그램 조정(histogram matching)을 수행하였다(Fig. 10(b)). 두 석회암 탐지결과에서 두드러진 차이가 나타나는 지역 중 화살표(A)로 지시된 채광현장 북서쪽의 도로 및 산림이 혼재된 지역에서는 석회암 잠재지수가 정합 필터링 결과보다 상대적으로 강조되어 나타났고, 화살표(B)로 지시된 채광현장 동쪽의 지질이 노출된 지역의 경우 석회암 잠재지수에서는 강조되지 않은 것에 반하여 정합 필터링 결과에서는 밝은 화소로 표현이 되어 상대적으로 높은 석회암 분포 가능성을 나타내고 있다. 정합 필터링 결과는 화소 내 분석대상의 분포면적을 지시하는 분광혼합 분석결과이기 때문에 화소 내에 포함된 석회암의 분포면적을 측정하여 실제 지표 피복 특성을 더 정확히 반영한 결과로 판단된다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 10. Comparison between partial unmixing map and limestone potential index map in open-pit mining site shown in the area A of Fig. 7 and in the area A of Fig. 9: (a) partial unmixing matched filtering score map, (b) histogram matched limestone potential index map using the matched filtering score map, and (c) high-spatial-resolution aerial photograph. Arrows indicate prominent differences between the partial unmixing mapping result and the limestone potential index mapping result.

결론

본 연구에서는 강원도 지역의 석회암 탐지를 목적으로 Hyperion 초다분광 위성영상의 분석을 수행하였다. 국내의 지표 피복환경 및 계절적 영향을 고려하여 수계, 산림 및 눈 피복에 대하여 영상 전처리과정에서 피복별 마스크를 제작하고 분석영역을 제한한 후, 석회암 주구성 광물의 고유한 분광반사특성 중 단파장적외선 영역에서 나타나는 에너지 흡수 파장과 밴드비율 연산기법을 결합하여 개발한 석회암 잠재지수 및 개별 화소 내에 포함된 탐지대상의 분포비율을 산정할 수 있는 부분 분광혼합 분석기법인 정합 필터링 기법을 사용하여 석회암 분포도를 작성하였다. 분석결과는 위성영상의 획득시기와 근접한 시기에 획득된 고해상도 항공사진과의 비교분석을 통하여 평가를 하였다.

단파장적외선 영역에 한정하여 석회암의 분광반사특성을 강조할 수 있도록 고안된 석회암 잠재지수는 소수의 밴드만을 사용하는 간단한 연산과정으로 인하여 빠른 분석이 가능한 장점이 있다. 높은 잠재지수를 나타내는 지점에 대하여 고해상도 항공사진과 비교분석한 결과 석회암 노천채광이 이루어지는 광산, 고속도로 건설이 진행 중인 지질이 노출된 지역, 지방도 주변 암반노출 사면 및 하천변 층적층 지역의 건설부지에서 높은 잠재지수가 나타난 것으로 확인되었다. 영상 내에서 추출한 분광학적으로 순수한 석회암의 분광반사특성을 기준으로 정합 필터링 기법을 적용한 결과 석회암 잠재지수와 유사한 위치에서 석회암의 분포가 탐지되었다. 신선한 석회암이 지표에 대규모로 노출되어 있는 노천채광 현장에 한정하

여 영상분석 결과와 고해상도 항공사진을 비교하였을 때 화소 내에 석회암이 일부분만 분포하는 지점에서는 정합 필터링 기법이 더 정확한 탐지를 수행하는 것으로 나타났다.

본 연구에 사용된 Hyperion 초다분광 영상의 낮은 신호 대 잡음비 및 30 m의 공간해상도는 분석과정 중 MNF 변환과 같은 노이즈 제거과정을 필요로 하고, 영상 내에서 가장 순수한 분광정보로 판단되어 추출된 분류기준 분광반사도의 경우에도 탐지 대상 이외의 지표 피복과의 혼재가 나타났다. 향후 신호 대 잡음비가 개선된 새로운 위성탑재 센서 또는 공간해상도 및 신호 대 잡음비가 모두 우수한 항공탑재 센서에서 취득된 초다분광 자료를 이용한 분석의 수행 시 넓은 지역에서 신속하고 또한 기존의 다중분광 원격탐사에 비하여 정밀한 지질자원의 탐지가 가능할 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 지식경제부 자원개발특성화대학사업의 지원을 받아 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Beck, R., 2003, *EO-1 User Guide, Version 2.3.*, University of Cincinnati, 74 p.
- 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 complex, central East Greenland, using HyMap and ASTER remote sensing data," *Advances in Space Research*, Vol. 47, No. 1, pp. 60-73.
- Boardman, J.W. and Kruse, F.A., 1994, "Automated spectral analysis: a geological example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada," *Proc. of the ERIM 10th Thematic Conference on Geologic Remote Sensing*, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI, May 9-12, pp. I-407-I-418.
- 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 on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 49, No. 11, PART 1, pp. 4138-4152.
- Boardman, J.W., 1994, "Geometric mixture analysis of imaging spectrometry data," *Proc. of the 1994 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE GRSS, Pasadena, CA, August 8-12, pp. 2369-2371.
- Boardman, J.W., Kruse, F.A. and Green, R.O., 1995, "Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data: in Summaries," *Proc. of the 5th JPL Airborne Earth Science Workshop, JPL Publication 95-1*, Vol. 1, JPL, Pasadena, CA, January 23-26, pp. 23-26.
- Chi, K.H. and Lee, H.J., 2007, "Extraction of pyrophyllite mineralized zone using characteristics of spectral reflectance of rock samples," *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol.23, No.6, pp. 493-500.
- Clark, R.N., King, T.V.V., Kleijwa, M., Swayze, G.A. and Vergo, N., 1990, "High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, No. B8, pp. 12653-12680.
- Clark, R.N., Swayze, G.A., Wise, R., Livo, E., Hoefen, T., Kokaly, R. and Sutley, S.J., 2007, "USGS digital spectral library splib06a," *U.S. Geological Survey, Digital Data Series 231*, <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06>.
- Cocks, T., Jenssen, R., Stewart, A., Wilson, I. and Shields, T., 1998, "The HyMap airborne hyperspectral sensor: the system, calibration and performance," *Proc. of the 1st EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*, EARSeL, Zurich, October 6-8, pp. 37-43.
- Datt, B., McVicar, T.R., Van Niel, T.G., Jupp, D.L.B. and Pearlman, J.S., 2003, "Pre-processing EO-1 Hyperion hyperspectral data to support the application of agricultural indices," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, No. 6, pp. 1246-1259.
- Gaffey, S.J., 1985, "Reflectance spectroscopy in the visible and near infrared (0.35-2.55 microns): Applications in carbonate petrology," *Geology*, Vol. 13, No. 4, pp. 270-273.
- 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.
- Green, A.A., Berman, M., Switzer, P. and Craig, M.D., 1988, "A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 26, No. 1, pp. 65-74.
- Green, R.O., Eastwood, M.L., Sarture, C.M., Chrien, T.G., Aronsson, M., Chippendale, B.J., Faust, J.A., Pavri, B.E., Chovit, C.J., Solis, M., Olah, M.R. and Williams, O., 1998, "Imaging spectroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS)," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 65, No. 3, pp. 227-248.
- Hall, D.K., Foster, J.L., Chein, J.Y.L. and Riggs, G.A., 1995, "Determination of actual snow covered area using Landsat TM and digital elevation model data in Glacier

- National Park, Montana,” *Polar Record*, Vol. 31, No. 177, pp. 191-198.
- Harris, J.R., Mcgregor, R. and Budkewitsch, P., 2010, “Geological analysis of hyperspectral data over southwest Baffin Island: methods for producing spectral maps that relate to variation in surface lithologies,” *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 36, No. 4, pp. 412-435.
- Harris, J.R., Rogge, D., Hitchcock, R., Ijewliw, O. and Wright, D., 2005, “Mapping, lithology in Canada’s Arctic: application of hyperspectral data using the minimum noise fraction transform and matched filtering,” *Canadian Journal of Earth Sciences*, Vol. 42, No. 12, pp. 2173-2193.
- 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.
- Hunt, G.R. and Salisbury, J.W., 1971, “Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: II. Carbonates,” *Modern Geology*, Vol. 2, pp. 23-30.
- Hyun, C.U. and Park, H.D., 2007, “Assessment technique of deterioration of granite using reflectance spectroscopy,” *Journal of The Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 44, No. 6, pp. 500-509.
- Hyun, C.U. and Park, H.D., 2010, “Weathering degree assessment of tuff stone monument using reflectance spectroscopy,” *Journal of The Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 47, No. 4, pp. 515-529.
- Jackson, R.D., Slater, P.N. and Pinter, P.J., 1983, “Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres,” *Remote Sensing of the Environment*, Vol. 15, No. 3, pp. 187-208.
- 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.
- Lee, H.J., Kim, E.J. and Moon, D.H., 2011, “Identification of advanced argillic-altered rocks of the Haenam area, using by ASTER spectral analysis,” *Economic and Environmental Geology*, Vol. 44, No. 6, pp. 463-474.
- 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,” *Journal of the Korean Geomorphological Association*, Vol. 16, No. 3, pp. 77-86.
- Noh, J.H. and Oh, S.J., 2005, “Hydrothermal alteration of the Pungchon limestone and the formation of high-Ca limestone,” *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 41, No. 2, pp. 175-197.
- Pearlman, J.S., Barry, P.S., Segal, C.C., Shepanski, J., Beiso, D. and Carman, S.L., 2003, “Hyperion, a space-based imaging spectrometer,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, No. 6, pp. 1160-1173.
- 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.
- Son, Y.S., Kang, M.K. and Yoon, W.J., 2011, “Study of pyrophyllite deposit characteristics in Nohwa-do using ASTER image,” *Journal of The Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 48, No. 3, pp. 335-350.
- Tucker, C.J., 1979, “Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation,” *Remote Sensing of the Environment*, Vol. 8, No. 2, pp.127-150.
- Vaughan, R.G., Hook, S.J., Calvin, W.M. and Taranik, J.V., 2005, “Surface mineral mapping at Steamboat Springs, Nevada, USA, with multi-wavelength thermal infrared images,” *Remote Sensing of Environment*, Vol. 99, No. 1-2, pp. 140-158.
- Xu, H., 2006, “Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery,” *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 27, No. 14, pp. 3025-3033.

현 창 욱

2003년 서울대학교 지구환경시스템공학부 공학사
2010년 서울대학교 에너지시스템공학부 공학박사



현재 Department of Earth and Atmospheric Sciences,
University of Alberta 박사후 연구원
(E-mail: hyuncu99@snu.ac.kr)

박 형 동

현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 교수
(本 學會誌 第49卷 第6号 参照)
