

碩士學位論文

분광혼합분석기법을 이용한 다중센서
위성영상자료의 지질주제도작성 응용연구

2005年

漢城大學校 컴퓨터新技術大學院

컴퓨터新技術學科

空間情報分析 專攻

金 昇 泰

碩士學位論文

指導教授 李箕遠

분광혼합분석기법을 이용한 다중센서
위성영상자료의 지질주제도작성 응용연구

Application of Spectral Mixture Analysis Method to
Geological Mapping with Multi-sensor Satellite Imageries

2004年 12月 日

漢城大學校 컴퓨터新技術大學院

컴퓨터新技術學科

空間情報分析 專攻

金 昇 泰

碩士學位論文

指導教授 李箕遠

분광혼합분석기법을 이용한 다중센서
위성영상자료의 지질주제도작성 응용연구

Application of Spectral Mixture Analysis Method to
Geological Mapping with Multi-sensor Satellite Imageries

위 論文을 工學 碩士學位論文으로 提出함

2004年 12月 日

漢城大學校 컴퓨터新技術大學院

컴퓨터新技術學科

空間情報分析 專攻

金 昇 泰

金昇泰의 공학석사학위논문을 인정함

2004年 12月 日

심사위원장 이 봉 규 (인)

심사위원 이 기 원 (인)

심사위원 김 남 윤 (인)

목 차

제 1 편. 서 언	1
제 2 편. 연구방법	4
제 1 장. 자원탐사분야에서의 원격탐사	4
제 2 장. 분광혼합분석기법 (Spectral Mixture Analysis)	6
제 1절. 개요	6
제 2절. 이론	7
제 3절. 처리과정	12
제 3 편. 연구지역 및 위성영상자료	15
제 1 장. 연구지역	15
제1절. 지형 및 기후	15
제2절. 지질 및 광상	17
제3절. 암석 분광 라이브러리	18
제 2 장. Terra ASTER 위성영상	20
제 4 편. 분석처리 및 결과	25
제 1 장. 통계 분석	26
제 2 장. 전처리	30
제 1 절. ASTER영상의 전처리	30
제 2 절. Landsat ETM+의 전처리	32
제 3 장. 클래스의 선정	34
제 4 장. 분석 결과	39

제 5 편. 연구 및 토의	44
제 6 편. 사사	46
참고문헌 (References)	47
초록 (Abstract)	49

<List of Figures>

Figure 1. Typical continuous spectral reflectance curves for Sandstone, Granite, Diorite and Hypothetical Linear Mixture Spectra	8
Figure 2. Illustration of mixed pixels and fraction maps (Newland, 1999).	9
Figure 3. Macroscopic linear mixing (left) and Linear spectral mixing (right) (ENVI, 2001).	9
Figure 4. Flow-chart of Spectral Mixture Analysis classification.	14
Figure 5. 2 and 3 Dimensional shaded-relief topographic surface image	16
Figure 6. Regional geologic map of study area, Mongolia	19
Figure 7. 2D plots of Spectral reflectance about several igneous, sedimentary and metamorphic rocks.	20
Figure 8. Swath and size comparison of ETM+ and ASTER images (survey area).	23
Figure 9. ASTER (a) and Landsat ETM+ (b) false color composite image of study area (RGB Band composition are B3, B2 and B1 respectively.)	24
Figure 10. Distribution of digital number mean value for 7 reference classes	

Raw data.	34
Figure 11. Distribution of digital number mean value for 7 reference classes 20bands of radiance calibration data.	34
Figure 12. Sampling of reference classes in Satellite images.	35
Figure 13. Landscape photo of survey area, Mongolia.	36
Figure 14. Results of Spectral Mixture Analysis using 21bands of ASTER and ETM+ raw data [(a)Alluvium, (b)Biotite granite, (c)Granodiorite, (d)Limestone, (e)Metavolcanics, (f)Schist, (g)Tuff. Sandstone and (h) RMS error images.]	40
Figure 15. Results of Spectral Mixture Analysis using 20bands of ASTER and ETM+ Radiance data [(a)Alluvium, (b)Biotite granite, (c)Granodiorite, (d)Limestone, (e)Metavolcanics, (f)Schist, (g)Tuff. Sandstone and (h) RMSE images.]	41
Figure 16. Histogram of endmember distribution by SMA using 21bands raw data	42
Figure 17. Histogram of endmember distribution by SMA using 20bands Radiance correction data	43

<List of Tables>

Table 1. Simplified geological Legend of survey area.	17
Table 2. Bands characteristics of Landsat ETM+ and Terra ASTER.	22
Table 3. Statistics information of Landsat ETM+ and Terra ASTER (Raw data).	27
Table 4. Covariance and Correlation Matrix of ASTER and ETM+ raw	

data	28
Table 5. Covariance and Correlation Matrix of ASTER and ETM+ radiance calibration data	29
Table 6. Calculated Unit Conversion Coefficients of ASTER data.	31
Table 7. Statistics of reflectance correction ETM+ data (excluding Band6)	33
Table 8. Statistics information of Landsat ETM+ and Terra ASTER (Radiance correction).	33
Table 9. Statistics of Reference Spectral about 7 Endmembers (Raw data).	38
Table 10. The statistics results of endmember by SMA using 21bands raw data	42
Table 11. The statistics results of endmember by SMA using 20bands Radiance correction data	43

제 1 편. 서 언

지구지하자원 탐사분야에서 위성영상을 활용한 원격탐사는 1972년 7월 23일 미국의 자원탐사위성 Landsat 1호 (Multi-spectral Scanner)가 영상정보를 제공하면서 본격적으로 활용되어 왔다. 그 이후 광학 위성영상은 공간 및 분광해상도 등의 향상을 통한 분해능의 증가 및 SAR와 같은 Radar영상자료를 활용하여 지표에 대한 지질정보를 제공해 주고 있다. 위성영상을 통한 원격탐사분야는 자원탐사 프로젝트의 초기단계에서 활용되고 있으며 크게 광역적인 지표 선구조 추출과 같은 지질구조도 (습곡, 단층 등) 작성, 암상의 차이를 판독하는 지질도 작성, 광상성인 판독을 위한 변질광물 (규산염광물, 점토질광물, 탄산질 광물, 산화철 등) 주제도 작성이 주 적용 분야이다.

자원탐사의 근거인 암석은 다양한 광물의 조합체로서 위성영상의 소스인 전자기파 반응을 통한 암석구별은 조합광물의 특정 파장대에서의 미세한 흡수피크의 특성 차이를 통해 알 수 있다. 특히 근적외선 파장대 (SWIR = Shortwave Infrared)에서의 암석 분광특성차이는 뚜렷하여 실내 실험 등에서 광물 식별에 활용되고 있다. 또한 지표상의 개체 최소 인식크기를 의미하는 공간해상도는 암석식별의 최소 공간적 단위이므로 영상의 분광해상도 및 공간해상도는 지질주제도 작성에서 가장 중요한 제약 요소이다.

현재 과학기술의 발전에 따른 위성체에 탑재되는 센서의 공간해상도는 1m 이내(예; IKONOS PAN)이며 분광해상도는 밴드폭 10nm의 200밴드 이상(예; Hyperion)으로 각각 향상되었다. 그러나, 대기의 전자기파 흡수영역과 산란, 센서의 획득되는 영상의 품질을 결정하는 신호대잡음비 (SNR=Signal to noise ratio)에 따라 센서는 동시에 두 조건을 만족하지 못한다. 다시 말해, 위성에서의 광학센서는 지표의 정보를 획득하기 위한 최소한의 신호를 획득하기 위해 지표상의 단위면적을 넓히든지 (낮은 공간해상도, 높은 분광해상도) 또는 밴드 폭을 확장해야 하는 것 (높은 공간해상도,

낮은 분광해상도)으로 공간해상도와 분광해상도는 서로 균형을 이루어야 한다.

본 연구의 목적은 상기의 공간해상도의 한계점을 해결할 수 있는 분광혼합분석 (Spectral Mixture Analysis)기법을 이용하여 지질학적으로 중요한 근적외선과장대 (SWIR)에 6개 밴드를 포함하여 총 14개 밴드 자료를 획득하는 Terra위성 (1999년 12월 발사)의 ASTER영상과 8개 밴드의 Landsat 7호 위성의 ETM+ 영상을 분석하여 광물자원 부존 잠재성을 확인하기 위한 지질 주제도를 작성하는 것이다.

분광혼합분석기법 (Spectral Mixture Analysis, 이하 SMA라 한다)의 개념은 공간적으로 위성영상의 단위화소는 화소보다 작은 면적을 차지하는 한 개 또는 여러 개체 (예; 물, 눈, 콘크리트, 단일식생, 암석 등)의 혼합체이라는 가정으로, 분광학적으로 표현하면 단위화소의 반사도 값은 단위화소를 구성하는 개체들의 분광 반사도 값의 평균을 의미한다. SMA는 다중분광영상에서 활용할 수 있는 분석기법으로 지표를 구성하는 순수한 객체를 선정하고 이에 대한 분광정보를 이용하여 객체들의 혼합된 화소들을 수학적으로 역산하여 순수객체 (endmembers)에 비율을 표현하는 객체별 분류주제도 (Fraction maps)를 최종 결과물로 얻는 분석기법으로 기존의 분류법은 단일 화소는 단 하나의 객체로만 분류하는 단점을 개선하는 분류법이다. 분석과정은 영상의 정규화, 기하보정, 분광반사도 보정의 사전보정을 실시하고, 영상내의 분광신호의 분류정도를 이용한 endmember (분류기본단위)를 결정하고 이를 이용하여 SMA를 적용하는 방법과 기존의 실내분석을 통해 공개 제공된 분광 라이브러리를 이용하여 적용하는 방법이 있다.

연구 지역은 몽골 서남부 지역으로 기후는 사막의 건조기후로서 대기의 습도가 낮아 대기에 대한 영상의 잡음이 적은 지역이다. 본 연구에 이용될 자료는 ETM+ 및 ASTER영상으로서 2002년 9월 동일일자, 동일 지역을 촬영한 영상을 이용하며 SMA기법을 각각 적용하고 그 결과물로 지질암석단

위 별의 지질주제도를 획득하고 이의 검증을 통해 ASTER영상을 이용한 분광혼합분석기법 (SMA)의 지질학적 접근법을 고찰해 보고자 한다.

제 2편. 연구방법

제 1장. 자원탐사분야에서의 원격탐사

지질학적 관점에서의 원격탐사 적용분야는 크게 광물, 석유, 지하수를 포함한 자원탐사 분야와 화산폭발, 지진, 산사태 분석 등의 자연재해 분야이다. 자원탐사분야에서 원격탐사의 적용 시기는 초기 광역탐사 단계로서, 광범위한 지역에서 자원부존 잠재성이 높은 지역을 선정하기 위함이다.

자원분야에서의 세부 접근방법은 2가지 정도로 분류할 수 있다. 첫째, 광물자원의 부존가능성이 높은 단층, 습곡, 파쇄대 등을 반영하는 원형 또는 선형의 지질구조 정보 추출방법으로서 최근까지 다양한 선구조 추출기법들이 제시되어 왔다. 이러한 지질구조도 작성은 낮은 공간해상도 영상의 경우는 광역의 대규모 구조해석에 이용되며, 높은 공간해상도영상의 경우는 세밀한 지질구조 정보를 획득할 수 있으며 대축척의 지질조사 기본도로 활용할 수 있는 장점이 있으나 이를 위해서는 지형 왜곡에 대한 정사보정이 필수적이다.

둘째는 지질주제도 작성으로서 광학영상에서의 지표분광특성의 차이를 이용하여 영상강화, 밴드별 차이분석, 분류화 기법을 이용하여 지질학적 관점에서의 주제도를 작성하는 것이다. 특히, 변질광물대 주제도 작성은 광상의 중심부로부터 외곽부로 멀어지면서 변질광물 (규산염광물, 점토질광물, 철-산화광물 등)의 산출 양상이 변화하는 환대 특성을 보이기 때문에 중요한 원격탐사 접근방법 중 하나이다.

또한 지질도 작성은 지표상의 암석 구분을 통해 자원탐사 시 광상이 배태되는 모암의 발달 상태 등을 판단하는데 중요한 접근법으로 분광해상도가 높은 다중분광영상자료의 이용이 필수적이다. 그러나, 지질주제도 작성은 식생이 발달한 지역 (열대우림지역), 눈이 지표를 덮고 있는 지역에서는 적용하기 어려운 단점을 가지고 있다.

최근의 위성영상의 자원탐사 활용은 영상의 공간, 분광해상도에 따라 설명할 수 있다. 1m 이하의 고 공간해상도 (Spatial resolution)를 가지는 전정색 (Panchromatic) 위성영상은 분광정보가 적으나 대축척의 지형도를 대체할 수 있는 지질조사 등 기본도면으로 활용할 수 있으며, 다중분광영상인 Landsat ETM+영상은 산화철 및 점토질광물의 변질주제도 작성이 가능하며, Terra의 ASTER영상은 주요 변질광물 그룹 (clays, sulfates, carbonates 등) 및 석고 등의 광물분포 주제도 작성에 유용하다. 또한, Hyperspectral (200밴드 이상)의 항공기용 센서 (예: AVIRIS)는 분광라이브러리를 이용하여 분광학적으로 매우 정확하고 다양한 변질광물 및 광물분포도를 작성할 수 있다 (Bedell, 2004).

제 2 장. 분광혼합분석기법 (Spectral Mixture Analysis)

제 1절. 개요

분광혼합분석기법은 1986년 아담스와 스미스에 의해 Viking Lander I 지역에 대한 암석과 토양의 종류를 구분하기 위한 지질학적 분석기법으로 제시되었으며, Subpixel 분류법이라고 한다 (Adams et al, 1986). 본 분석기법은 기존 분류법의 통계학적 처리를 기반으로 하지 않고 클래스의 분광특성 (Reference spectra)이라는 물리학적 기반으로 분류해 내는 역산 처리방식으로 다중분광 (Hyper-spectral) 영상자료의 분석도구로 제시되었다.

초기에는 SMA는 분광 라이브러리를 이용하여 다중분광영상의 대용량 자료를 수학적으로 역산 처리하는 기법으로서 자료의 획득 및 컴퓨터의 성능 및 처리용량이 부족하여 크게 활용되지 못했다. SMA는 이후 급속한 컴퓨터 발전과 농업 및 도시공학분야 등의 적용, Multispectral 영상의 적용성 증대를 통해 상용소프트웨어의 한 알고리즘으로 활용되고 있다.

분광혼합분석기법의 장점은 백개 이상의 다중분광영상의 훌륭한 분석도구인 동시에 저밀도 공간해상도를 가진 과거의 Landsat MSS영상 분석에도 유용하게 이용될 수 있으며, 위성이미지에서 직접 Digital Number값을 취득하여 이를 방사학적으로 조정하고 SMA를 적용함으로서 대기보정 등의 어려운 처리과정을 배제할 수 있어 광범위한 분야에 적용시킬 수 있다 (Schweik et al., 1999).

제 2절. 이론

원격탐사영상의 대상인 지표면은 다양한 종류의 물질들이 덮고 있다. 영상의 공간적 기본단위인 화소의 값은 단일개체 또는 다양한 개체의 혼합된 분광반사도 값을 반영한다. 그러나 기존 통계학 기반의 분류방법은 단일 화소는 단일 클래스로만 결정하기 때문에 여러 물질이 혼합된 화소의 다양한 정보를 제시할 수 없는 단점이 있다.

SMA는 정보가 혼합된 화소 (Mixed pixels) 즉, 혼합된 분광신호를 실험실, 야외측정 또는 영상자체에서 측정된 순수한 (pure) 참조분광신호와 비교 역산을 통하여 단위화소에 1개 이상의 정보를 얻을 수 있음을 의미하는 참조분광 클래스의 포함정도를 각 클래스 별 정보량을 표현하는 비율 주제도 형태로 제공한다. 기본 가정은 이미지상의 분광 특성값 (반사도)은 제한된 수의 지표구성물질의 혼합체에 의한 값이라는 것이다 (Lillesand et al., 1999).

예를 들어, 조사지역의 지질이 사암, 화강암, 섬록암이 1:1:1의 비율로 지표면적을 차지한다고 가정할 경우 분광대별 반사도 특성그래프는 Figure 1과 같은 결과를 보인다. 또한, 공간적으로 4개 화소를 예로 설명하면, Figure 2와 같이 녹색과 적색의 순수한 개체가 있을 경우 두 개체의 혼합된 이미지에서 분광혼합분석기법에 의해 적색 및 녹색 주제도 2장을 얻을 수 있다.

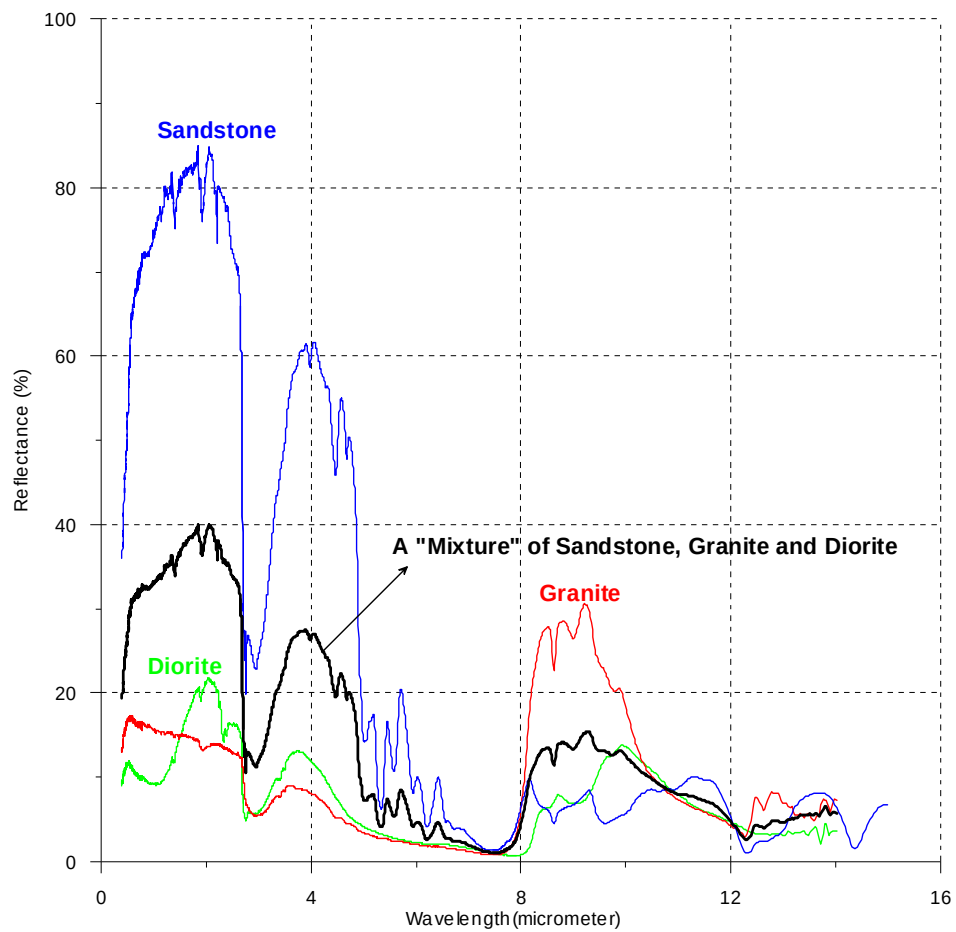


Figure 1. Typical continuous spectral reflectance curves for Sandstone, Granite, Diorite and Hypothetical Linear Mixture Spectra

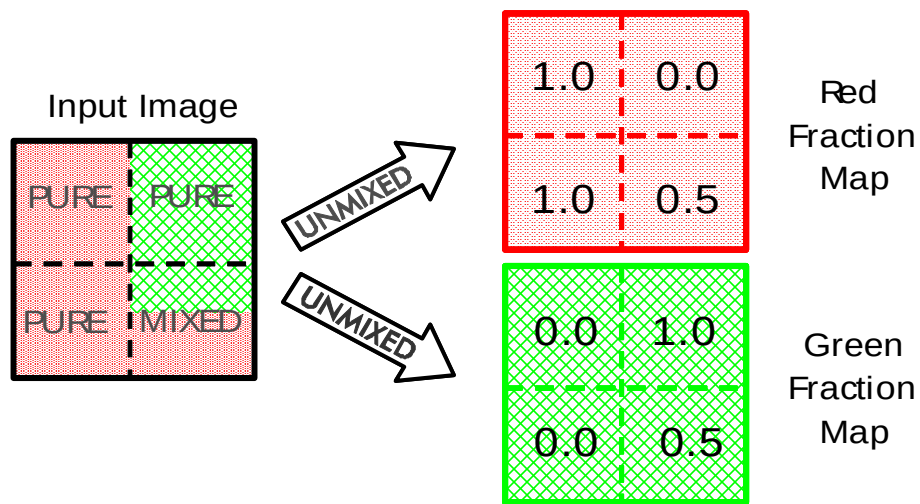


Figure 2. Illustration of mixed pixels and fraction maps (Newland, 1999).

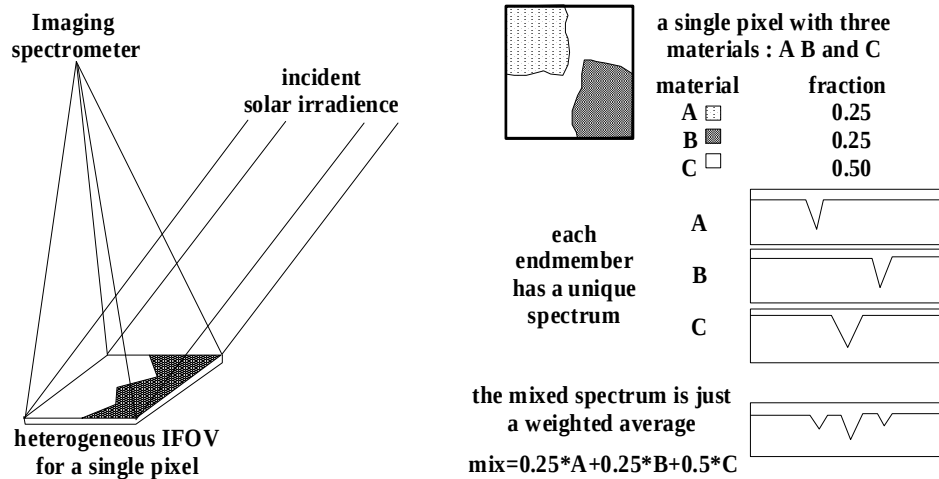


Figure 3. Macroscopic linear mixing (left) and Linear spectral mixing (right) (ENVI, 2001).

분광혼합분석기법을 수식으로 표현하면 아래 (1)과 같다.

$$R_i = \sum_{e=1}^N R_{i,e} f_e + \varepsilon_i \quad \text{-----} \quad (1)$$

R_i 는 i 번째 분광밴드에서 주어진 스펙트럼의 반사도이며, N 은 end-member의 수, $R_{i,e}$ 는 i 번째 분광밴드에서 reference endmember e 의 반사도, f_e 는 화소에서 endmember e 의 미지의 Fraction, ε_i 는 N endmember들의 적합성에 대한 i 밴드에서의 오류값이며, k 는 이미지에서의 밴드의 수이다. 이를 영상 자체의 분광라이브러리를 사용할 경우 수치값 (Digital Count)은 아래 공식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$DC_i = \sum_{e=1}^N DC_{e,i} f_e + \varepsilon_i \quad \text{-----} \quad (2)$$

여기서, DC_i 는 i 번째 분광밴드에서 주어진 이미지 값이며, $DC_{e,i}$ 는 reference endmember e 에 대한 i 번째 분광밴드에서의 이미지 수치값이다. 이는 최소자승법을 이용하여 오류를 최소화함으로 화소에서 endmember e 의 미지의 f_e 의 N 값을 찾기 위해 단순화한 것이다.

공식 2를 풀기 위해 적용되는 제한 조건이 3가지가 있다. 첫 번째는 무제한조건 (unconstrained)으로, 잔류오차를 최소화하기 위하여 필요한 어떠한 값도 최종 결과값으로 인정하는 것 ($-\infty < f_e < \infty$)이며, 두 번째는 부분 제한조건 (partially constrained) 로서 모든 화소의 endmember들의 총합은 1이다

(수식 3).

$$\sum_{e=1}^N f_e = 1 \quad \text{-----} \quad (3)$$

위의 무제한조건 및 부분제한조건은 최종결과값에 대한 음과 양의 값을 허용하는 조건이다. 마지막 세번째는 완전 제한조건(fully constrained)으로 최종결과값을 0에서 1까지로 한정하며 단일화소에 대한 결과값의 합은 1이다(수식 4).

$$\sum_{e=1}^N f_e = 1 \quad (0 \leq f_e \leq 1) \quad \text{-----} \quad (4)$$

순수 분광 클래스 즉 Endmember를 선정하는 방법은 3가지로서 첫 번째는 야외 및 실내실험을 통해 획득된 분광 라이브러리를 이용하는 방법, 두 번째는 기존의 SMA 연구를 통해 획득된 자료를 활용하는 방법, 마지막으로 분석하려는 이미지자체에서 분광 클래스를 찾아내는 방법이 있다. 이미지자체에서 순수한 객체분광을 획득하기 위한 방법은 주성분분석(Principal Component analysis)을 이용하여 확률론적으로 독립적인 자료벡터를 가진 새로운 주성분분석 자료셋을 생성하여 PCA의 데이터 공간 상의 모서리에 위치하는 순수분광클래스를 선택한다. 또한, Endmember의 최대 수는 적용하는 다중분광영상의 [밴드의 수-1] (ENVI, 1998, Adams et al., 1995, Schweik et al., 1999) 또는 이미지밴드의 수 (Newland, 1999)를 선택할 수 있고 물리적으로 수 백종의 물질이 단일화소 내에 포함되어 있으나 대상지

역의 지표를 구성하는 순수한 최종 클래스를 모두 확인하고 분광특성을 계산해내는 것은 비현실적이며 SMA처리 주제도의 결과도 적으므로 연구의 목적과 주 개체만을 선택하여 최소한의 Endmember를 선택하는 것이 오류를 줄일 수 있는 최선의 방법이다 (Newland, 1999). 또한 Endmember는 분광학적으로 구별이 쉬운 클래스 (예; 잔디-도로) 즉, Endmember들이 분광 특성 상 선형적으로 독립적인 독립변수로 결정하여야 하며 연구목표에 따라 세부적인 클래스로 결정할 수 있다.

제 3절. 처리과정

분광혼합분석기법의 처리과정은 기하보정, 대기보정 및 영상 정규화과정을 포함한 전처리과정, 둘째로 조사지역에 대한 분광 특성 분석을 통한 분광 클래스 결정, SMA알고리즘 처리 과정, 최종결과에 대한 검증의 과정이다 (Figure 4).

전처리과정 (Pre-processing)은 다중분광위성영상에 대한 분광분석을 위한 사전 준비 단계로서, 조사 대상지역을 전체영상에서 추출하고 영상이미지를 공간좌표체계를 갖도록 지도화하는 기하보정 (Geometric correction)을 실시한다. 대기보정, 지형보정 및 정규화 과정은 실험실 등에서 획득된 분광 라이브러리의 분광반사도값과 비교하기 위하여 영상화소의 수치값 (Digital number 또는 Digital count)을 지표의 반사도값으로 변환하기 위해 실시하여야 하나, 자체 이미지에서 추출한 분광 클래스를 이용할 경우는 생략가능하다.

조사지역에 대한 분광특성분석을 통한 참조분광 클래스 (reference spectra)의 선정은 조사 목적과 의도, 사용되는 영상자료의 품질 등에 따라 수행된다. 본과정은 최고의 결과를 얻기 위해 가장 중요한 단계로서 SMA가 효과적으로 적용되기 위해서는 분광 순수도가 높은 클래스의 선택 및 사용

되는 다중분광영상에 적절한 분광 클래스 수의 결정이 중요하다. 선형 분광 혼합분석기법 처리과정은 제한조건의 선택 및 각 분광 클래스에 대한 최종 클래스의 결과 및 이에 대한 오류 검증 등을 통한 피드백을 통해 클래스의 선정이 합당한가, SMA의 제한조건이 적절했는 가 등을 검토하여 반복 시행함으로 최선의 결과물을 도출해 낸다.

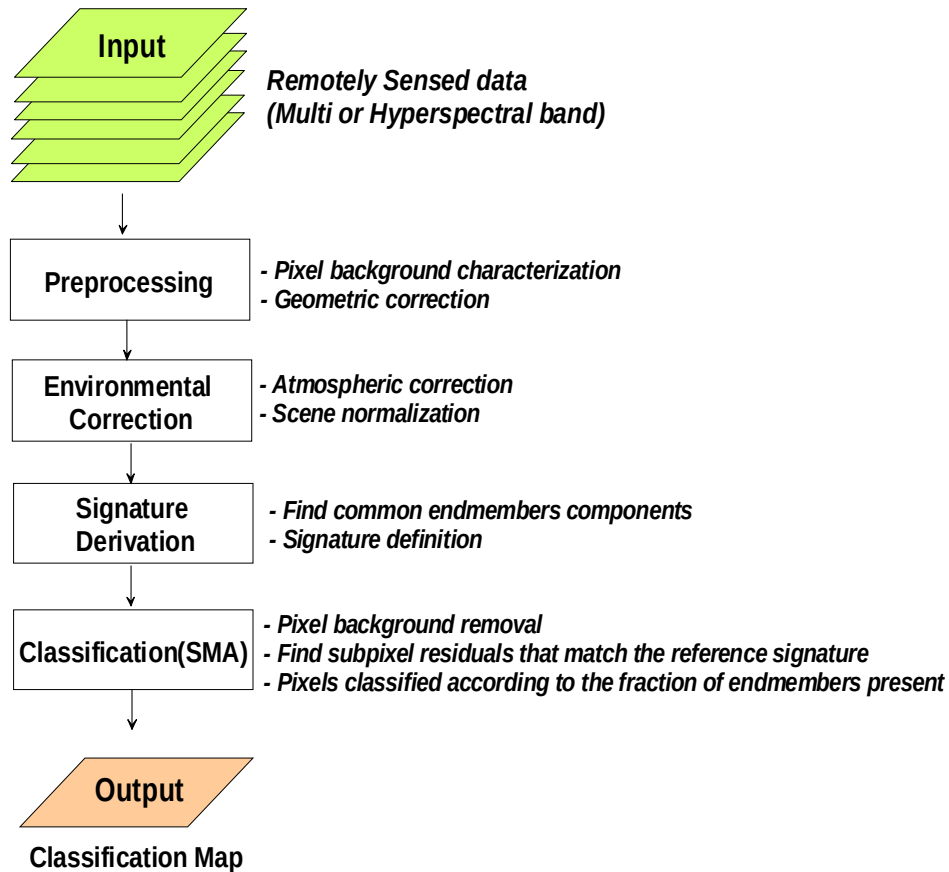


Figure 4. Flow chart of Spectral Mixture Analysis classification (Huguenin et al.,1997).

제 3 편. 연구지역 및 위성영상자료

제 1 장. 연구지역

제 1 절. 지형 및 기후

연구지역의 지형은 전반적으로 알타이산맥의 산악지형과 고비사막의 일부 사막평원을 이루고 있다. 해발고도는 최고 고도 3,839mL이며 평균 1,000~2,600mL로서 고원지대이며 지형구배는 사막 평원의 경우 평탄하고 완만한 경사를 이루고 있으나, 연구지역의 사막지형은 지형의 경사 기복이 심한 지형특성을 보인다. 지형 특성에 따른 지구조의 주방향성은 대규모의 지구조활동 (역단층 및 주향이동단층)으로 형성된 알타이산맥의 연장방향과 동일한 북서서 (N60W) 방향이며, 이를 교차하는 북동방향 (N30E 또는 N70E)의 구조방향이며 북동방향으로 건천이 발달하고 있다.

기후는 강한 대륙성 사막 건조기후로서 평균 기온은 7월 평균 14℃에서 1월 평균 -18℃을 보이며 최대 19℃(7월), 최소 -24℃(1월)로 매우 기후변화가 심한 사막 기후의 특성을 보인다. 강수량은 0mm(1월)~48mm(7월)로서 매우 건조하고 기후의 변화가 심한 환경으로 식생의 발달이 매우 미약하여 연구지역의 남측 평원지역에만 일부 초지가 자라는 지표상태를 나타낸다.

본 연구에 이용된 ETM+과 ASTER 위성분광영상은 상기의 지형과 건조한 기후 환경 여건을 고려하여 대기의 산란에 의한 잡음이 적고 식생이 발달이 적은 시기의 영상을 선택하여 분광혼합분석기법에 적용하였다.

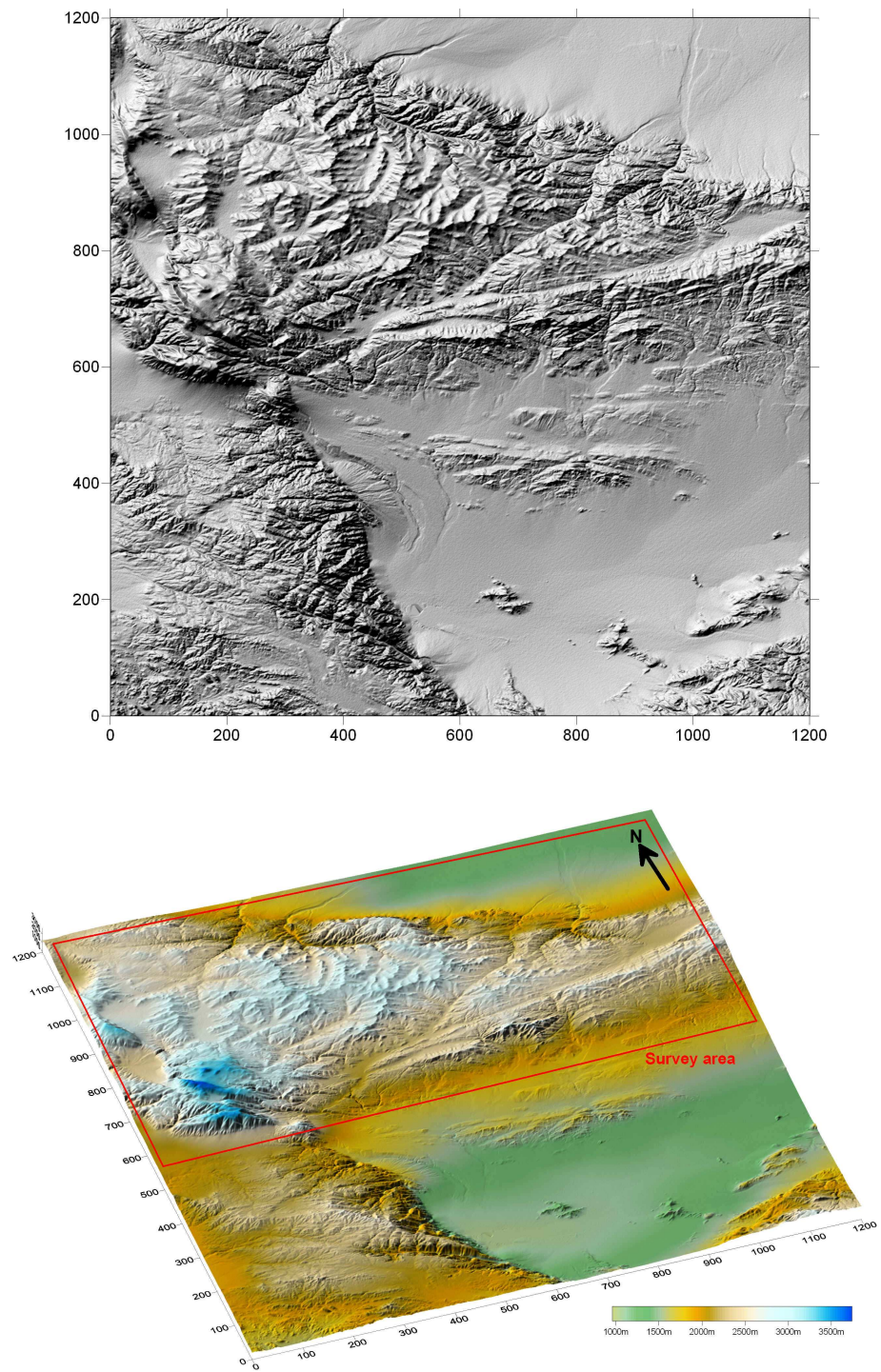


Figure 5. 2 and 3-Dimensional shaded-relief topographic surface image

제 2 절. 지질 및 광상

1. 지질

본 지역은 크게 Nuur Belt와 Khovd Belt의 2개의 구조구로 구분되며, 지질과 변성상이 매우 다르게 나타난다. 지질은 후기 원생대로부터 신생대까지의 제지층들로 구성되며 이들 지층들을 중~후기 캄브리아기, 후기 데본기, 전기 석탄기의 화성활동에 의한 화강암류가 광범위하게 관입하고 있으며, 부분적으로 페름기의 암맥류가 관입 발달하고 있다. 또한, 전기 캄브리아기의 안산암질 변성화산암류 및 페름기 산성화산암류가 넓은 면적에 분포하고 있다.

Table 1. Simplified geological Legend of survey area.

Age	Symbol	Lithology
Quaternary	Q4	Alluvium
Devonian	D1-2nh	Sedimentary rocks
	Phase III-D3h	Leucogranite, biotite granite
	Phase II-D2h	Plagiogranite, bt-hb plagiogranite, granodiorite
	Phase I-D1h	Gabbro-diorite, diorite
Ordovician	O-Scc	Sil. bt-amph. schist
Cambrian	E1hh	tuffaceous sandstone and siltstone
Neoproterozoic	NP3ck	Limestone, dolomite, marble
	NP2c	Andesite porphyry, andesite tuff (schistose metavolcanics)

2. 광상

연구지역 일대의 광상은 몽골남부 동-금 광화대의 서측 연장부로서 고생

대 중-후기 캄브리아기 관입암체의 화강암류내 발달된 열수기원의 맥상 또는 망상의 석영맥형 동-금 광상 형태, 중기 Neoproterozoic 시기의 안산암 및 편상안산암의 파쇄대를 따라 배태되거나 파쇄면에 충전된 석영세맥내에 배태된 층준규제형의 열수기원 동광상, 고생대 오르도-실루리아기의 편암류 및 후기 데본기 관입암체의 화강암류내 발달된 열수기원의 맥상, 망상형 내지 열극 충전형 금-동광상 및 층적 사금광상이 발달되고 있다.

제 3 절. 암석 분광 라이브러리

지질주제도의 기본단위인 암석은 다양한 광물의 조합체이며 그 성인은 마그마의 관입, 풍화 및 퇴적, 고결, 압력과 열에 의한 변성 등을 통해 다양하게 나타난다. 암석의 구별은 지질주제도 작성 및 광물탐사의 가장 필수적인 사항이다. 암석의 구별방법은 야외현장조사, 현미경 분석, XRD등과 같은 실험실 분석 등이 있다.

전자기파에 대한 암석 또는 광물의 반사도를 측정하여 판별하는 실험실 분석은 전통적인 분석 방법 중의 하나이다. 암석을 구별하기 위해 사용되는 전자기 파장대는 일반적으로 가시광선~적외선 파장대으로서 특히, 단적외선파장대 (SWIR)의 2 μ m 내외 파장대는 암석을 구성하는 광물의 흡수피크가 명확히 구분되는 구간으로 중요하다. NASA 및 존스홉킨스실험실은 암석의 식별을 위한 암석, 광물, 토양 등의 참조 분광라이브러리를 제공하고 있으며 이를 이용하여 실내실험 또는 다중분광영상에 대한 분광혼합분석기법 등에 적용할 수 있다. Figure 8은 본 연구지역에서 확인되는 암석들 중 일부의 분광특성을 보여준다.

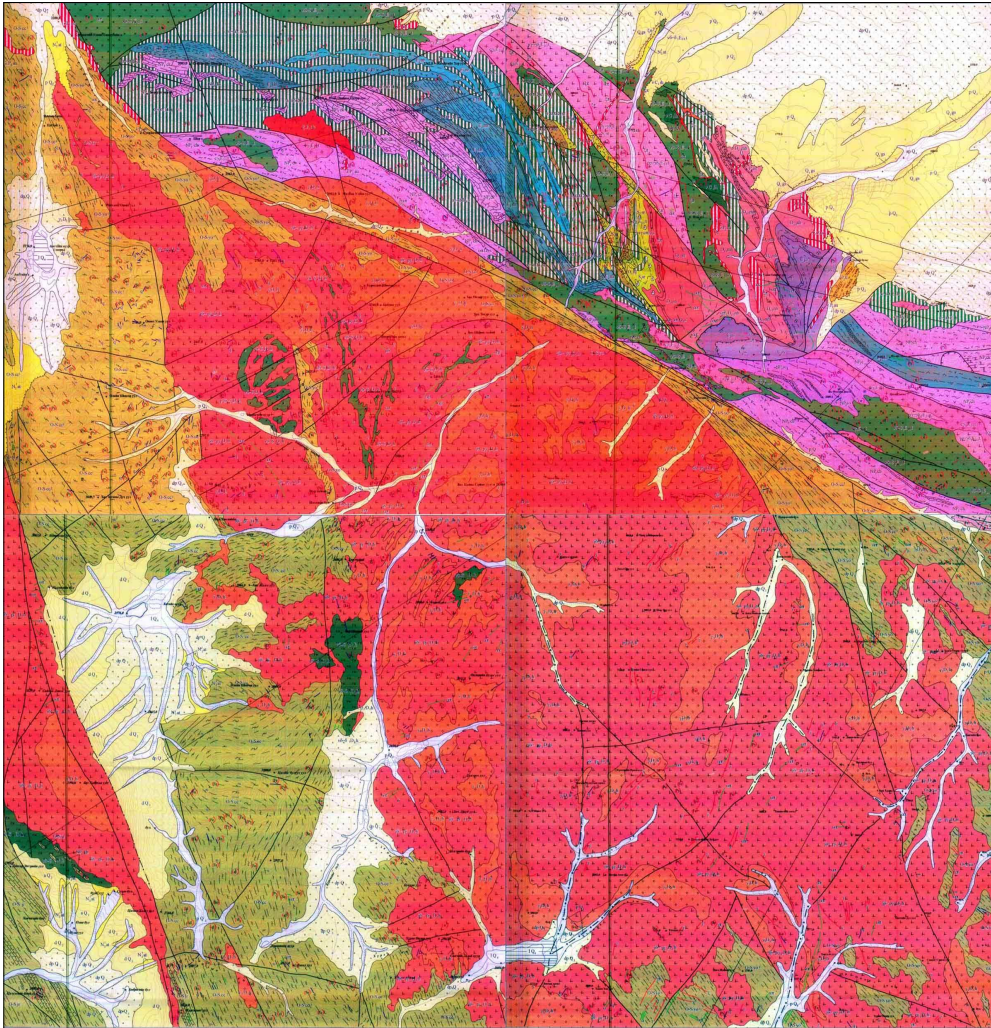


Figure 6. Regional geological map of study area, Mongolia.

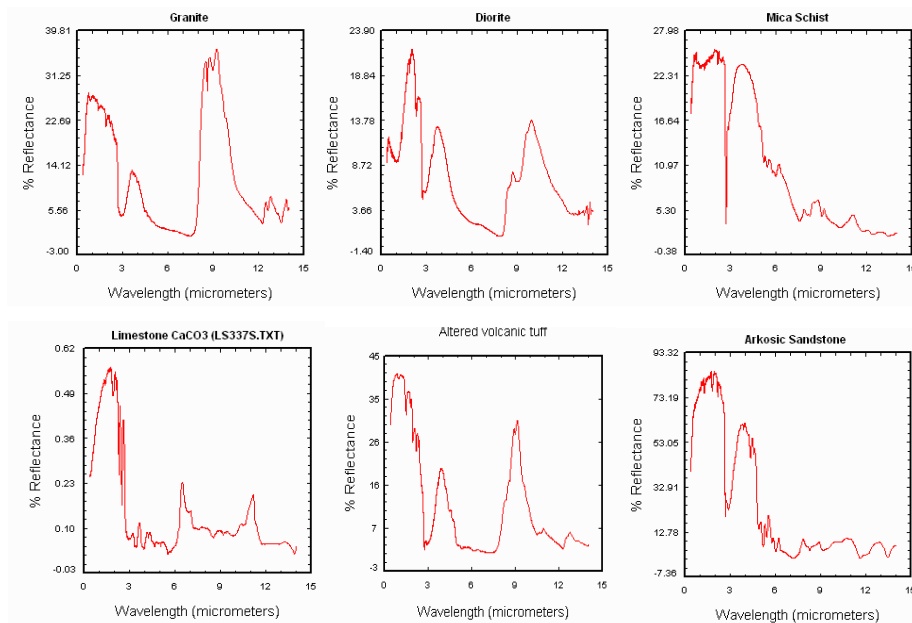


Figure 7. 2D plots of Spectral reflectance about several igneous, sedimentary and metamorphic rocks.

제 2 장. Terra ASTER 위성영상

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)는 1999년 12월 미국 NASA의 EOS (Earth Operating system)의 일환으로 일본 경제산업성 METI (Ministry of Economy, Trading and Industry), ERSDAC (Earth Remote Sensing Data Analysis Center)와 공동 프로젝트로 Terra위성에 탑재되어 발사되었다. Terra위성은 태양동기 주기를 가지고 있으며 적도통과시간은 국제표준시간 오전 10:30으로, Landsat 7 호 ETM+ (Enhanced thematic mapper)위성과 동일궤도를 갖고 약 30분 뒤에 지상촬영을 한다. 이에 ASTER는 ETM+영상과 분광학적 특성이 매우 유사하며, 일반적으로 동일지역 및 일시의 영상을 비교하면 Landsat ETM+의 Digital Number가 높은 값을 보인다.

ASTER는 가시광선 파장대에서 열적외선 파장대까지 총 14개 밴드 영상 자료를 획득하며 영상의 크기는 $60 \times 60 \text{ km}$ 이다. 세부적으로 ASTER는 VNIR, SWIR, TIR 3개의 Subsystem을 가지고 있다.

가시광선-근적외선파장대용 VNIR 시스템은 3개 band, 공간해상도 15m의 정밀도를 가지고 있다. 또한, 3번 밴드의 경우 직상부 촬영영상 (Nadir)과 후부 촬영영상 (Backward)을 제공하여 스테레오영상을 만들며 이를 이용해 수치고도모형을 작성할 수 있다.

SWIR (Short wave infrared) 시스템은 6개 band, 공간해상도 30m의 정밀도를 가지며, Landsat ETM+영상은 동파장대에 1개 밴드(Band 7)만을 배정하고 있다. $2\mu\text{m}$ 대의 SWIR은 지질밴드라고 할 만큼 지질정보의 구별에 매우 중요한 정보를 제공해 주며 광물자원탐사에서 ASTER의 공간-분광해상도에 따른 활용도는 광상에서 정확한 광물명 파악은 어려우나 광상에서 중요한 변질광물 그룹 즉, 점토질 광물 (Clays), 황화광물(Sulfates), 탄산염광물 (Carbonates)의 분포에 대한 주제도 작성에 유용하며, 가시광선-근적외선파장대 자료를 통해 정확한 위치정보 및 철산화물의 주제도 작성도 가능하다.

TIR (Thermal Infrared) 시스템은 $8 \sim 12\mu\text{m}$ 대의 5개 band, 공간해상도 90m를 가지는 시스템으로서, ETM+에서는 Band 6 만으로 설계되어 있어 분광학적으로 응용성이 높다. 응용분야는 지질분야에서의 변질광물 인덱스로 이용될 뿐 아니라 지표 및 수질의 표면온도를 측정할 수 있어 해수 온도 변화의 측정 등을 통해 해수 온난화, 발전소 등의 온수 배출 영향 등에도 적용할 수 있다.

Table 2. Bands characteristics of Landsat ETM+ and Terra ASTER.

Sub-system	LANDSAT7 ETM+		TERRA ASTER		Spatial Resolution	Quantization Level
	Band No.	Spectral Range(μm)	Band No.	Spectral Range(μm)		
VNIR	Band 1	0.45~0.52			15m	8 bits
	Band 2	0.52~0.60	1	0.52~0.60		
	Band 3	0.63~0.69	2	0.63~0.69		
	Band 4	0.76~0.90	3N	0.78~0.86		
			3B	0.78~0.86		
SWIR	Band 5	1.55~1.75	4	1.60~1.70	30m	8 bits
	Band 7	2.08~2.35	5	2.145~2.185		
			6	2.185~2.225		
			7	2.235~2.285		
			8	2.295~2.365		
			9	2.360~2.430		
TIR			10	8.125~8.475	90m	12 bits
			11	8.475~8.825		
			12	8.925~9.275		
	Band 6	10.4~12.5	13	10.25~10.95		
			14	10.95~11.65		

ETM+ (170*185km)

ASTER(60*60km)

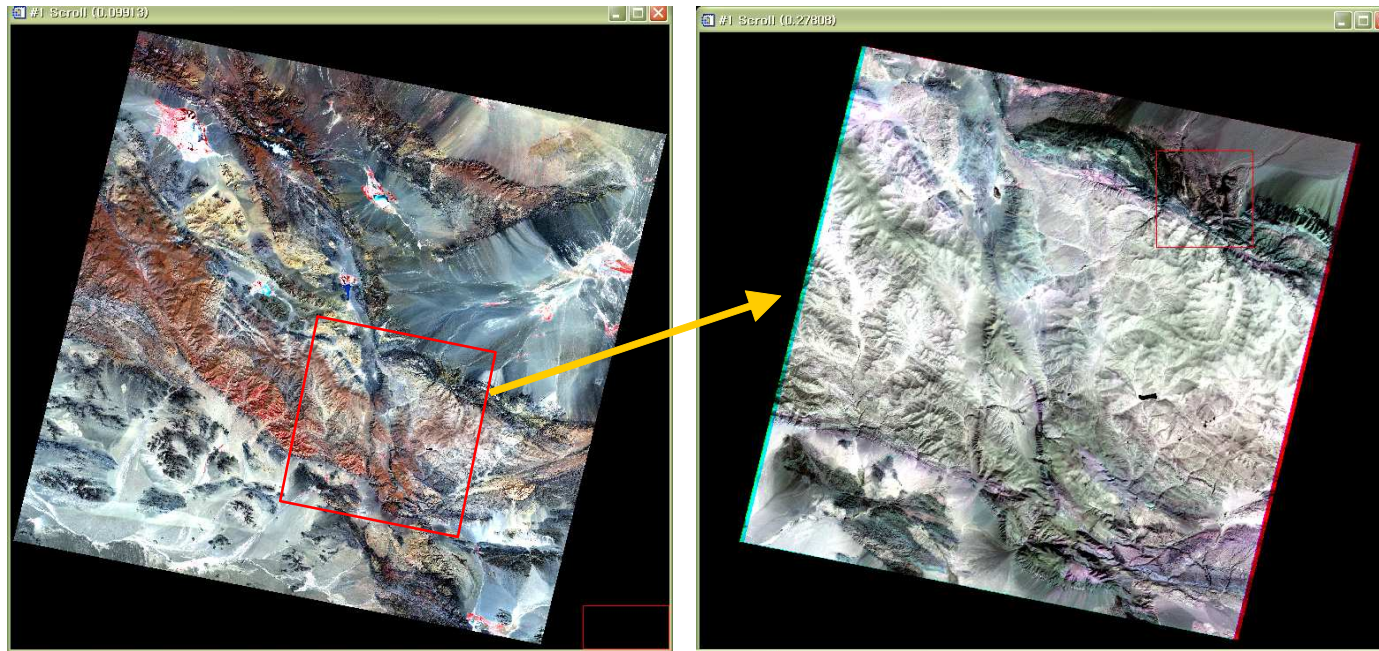


Figure 8. Swath and size comparison of ETM+ and ASTER images (survey area).

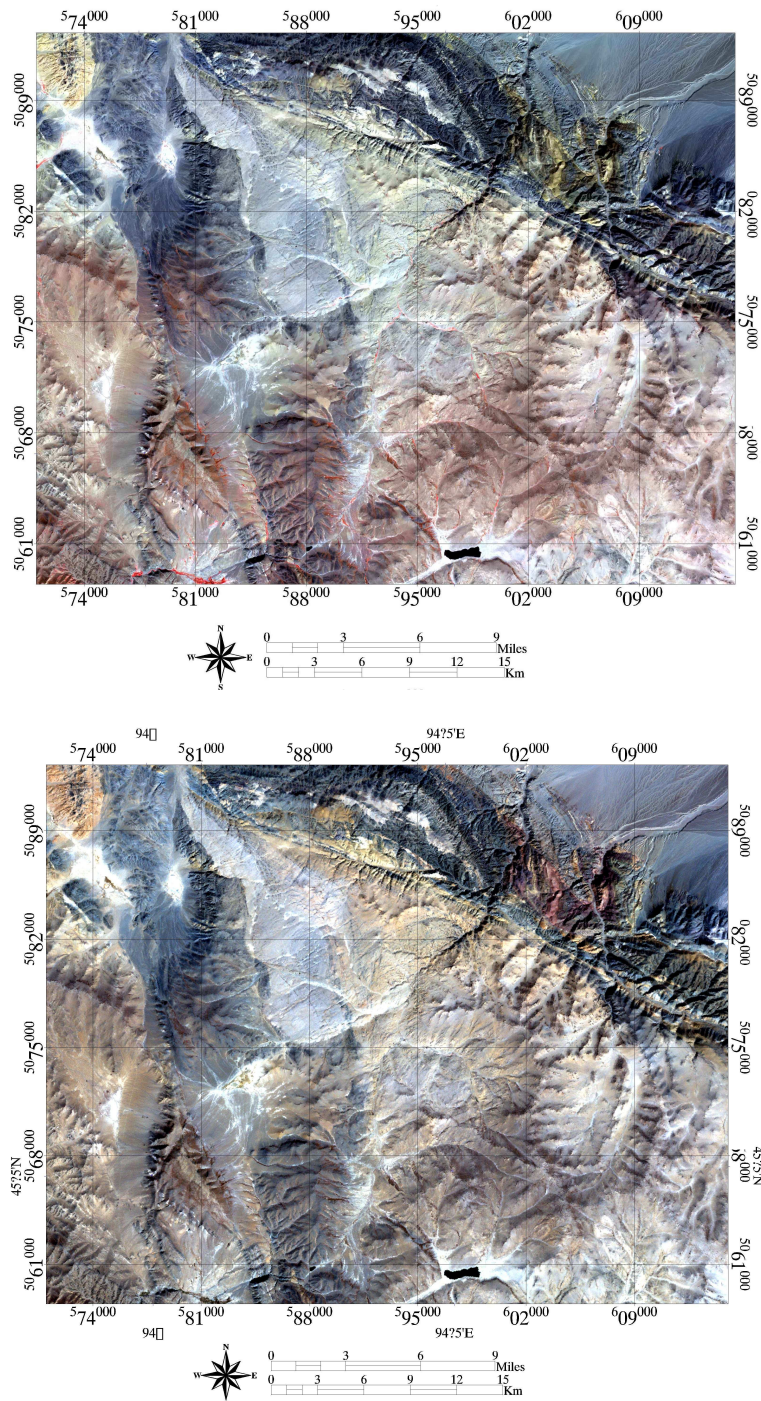


Figure 9. ASTER (a) and Landsat ETM+ (b) color composite image of study area (RGB Band composition are B3, B2 and B1 respectively.)

제 4 편. 분석처리 및 결과

SMA처리과정을 요약하면 (1) 통계 분석에 따른 ETM+ 및 ASTER자료의 변환 및 작업 (2) 기하보정 및 연구지역에 대한 Subset작성 (3) 참조 분광 클래스 즉, Endmember의 선정 (4) 선형 SMA 적용 (5) 결과물 검증 및 도시의 과정이다.

참조분광클래스의 선정방법은 전술한 바와 같이 3가지 방법이 있다. 첫째, USGS, 존스홉킨스대학 분광연구소(JHL) 등에서 실험실 또는 야외 분광 분석을 통해 공개된 암석 및 광물 분광라이브러리를 이용하는 방법이 있다. 이와 같이 분광라이브러리와 비교하여 분광혼합분석기법을 적용하기 위해서는 위성영상의 DN값을 대기모델을 이용한 대기보정 등을 수행하여 반사도(Reflectance) 영상을 만들어야 하는 과정이 필요하다.

둘째, 기 분광혼합분석을 위해 적용되었던 참조분광 클래스를 준용하여 적용하는 방법이나, 본 지역에서 적용되었던 자료뿐만 아니라 지질학적 적용연구의 예가 거의 없어 활용할 수 없는 방법이다.

셋째, 영상자체에서 순수분광클래스를 선택하여 이용하는 방법으로, 이의 경우 대기보정 등의 작업을 생략할 수 있는 등 처리과정의 장점이 많아 본 연구에서는 영상 자체에서 기 지질조사를 통해 획득된 지질 정보를 이용하여 클래스를 선택 적용해 보고자 한다. 이의 경우 ETM+(7밴드)과 ASTER 영상(14밴드)을 통합하여 21개 밴드의 새로운 다중분광영상에도 반사도 변환 등의 정규화 과정이 필요 없이 적용할 수 있다.

제 1 장. 통계 분석

본 연구에 사용된 위성영상인 ETM+ 및 ASTER영상은 2002년 9월 11일에 촬영된 영상이다. 연구지역의 원시자료 ASTER 및 ETM+ 통계는 Table 3과 같으며, ASTER의 TIR 시스템은 방사해상도가 12bits (DN : 0~2048 ($=2^{12}$)) 범위임을 확인할 수 있다. 분광혼합분석을 위하여 ETM+과 ASTER의 센서 위치정보 및 NASA에서 제공된 gains 및 offset정보를 이용하여 방사휘도 (Radiance)값으로 변환하였으며 그 통계정보는 Table 5와 같다.

ETM+과 ASTER영상과의 DN값은 각 밴드별 분광 폭과 공간해상도의 차이에 따르며 ETM+ Band 2와 ASTER B1, ETM+ Band 3과 ASTER B2와 같이 동일 분광 범위 및 폭을 가진 필터이나 공간해상도 차이 또는 동일 공간해상도의 경우는 밴드의 분광 폭에 넓은 밴드 설계가 되어 있는 ETM+의 DN값이 ASTER와 비교하여 높은 값을 보인다.

ASTER와 ETM+간의 DN값의 상관계수분석은 두 센서의 밴드 통합을 통해 21bands의 작성을 위함으로 두 센서영상 DN값의 상관계수는 Table 4, 6에서 보는 바와 같이 동일 파장밴드 간 0.9 이상의 매우 높은 상관도를 보이고 있음을 확인하였으며 이를 근거로 21밴드의 원시자료 및 20밴드의 방사휘도보정 다중분광영상을 제작하여 SMA 분석에 이용하였다.

Table 3. Statistics information of Landsat ETM+ and Terra ASTER (Raw data).

LANDSAT7 ETM+(02/9/11)						TERRA ASTER(02/9/11)					
Band	Range(μm)	Min	Max	Mean	Stdev	Band	Range(μm)	Min	Max	Mean	Stdev
1	0.45~0.52	30	162	61.03	6.858						
2	0.52~0.60	19	161	60.27	9.468	1	0.52~0.60	13	110	40.08	5.96
3	0.63~0.69	15	191	73.91	14.07	2	0.63~0.69	11	122	46.65	8.37
4	0.76~0.90	8	135	61.49	12.36	3N	0.78~0.86	15	142	64.02	11.78
5	1.55~1.75	0	164	84.85	17.84	4	1.60~1.70	18	135	77.89	13.83
7	2.08~2.35	0	133	74.91	15.63	5	2.145~2.185	28	114	79.83	11.87
						6	2.185~2.225	24	127	83.38	13.65
						7	2.235~2.285	24	115	76.41	13.20
						8	2.295~2.365	21	126	78.31	14.78
						9	2.360~2.430	28	126	83.19	14.50
						10	8.125~8.475	862	1718	1281.37	91.60
						11	8.475~8.825	913	1779	1341.06	93.75
						12	8.925~9.275	983	1820	1397.51	94.13
6	10.4~12.5	101	171	138.80	7.92	13	10.25~10.95	1223	2171	1718.38	101.56
						14	10.95~11.65	1321	2233	1809.82	99.56

Table 4. Covariance and Correlation Matrix of ASTER and ETM+ raw data

Cov. Correl.		ASTER														ETM+							
		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B1	B2	B3	B4	B5	B7	B6	
AST	B1	35.56	48.24	62.08	62.91	54.10	61.46	61.34	67.62	63.70	47.06	28.55	33.75	86.55	84.94	37.42	53.11	76.97	61.74	82.18	74.13	8.33	
	B2	0.966	70.10	93.81	96.29	79.67	91.47	92.34	102.57	96.40	53.83	25.29	37.14	104.86	99.20	49.24	73.50	111.77	93.85	125.18	109.19	10.19	
	B3	0.884	0.951	138.76	145.54	116.19	136.66	137.04	153.75	147.12	3.02	-39.62	-14.93	36.53	22.21	61.62	95.43	151.08	139.24	186.21	155.41	5.88	
	B4	0.763	0.832	0.894	191.19	156.75	180.85	176.79	196.25	189.19	67.63	25.67	42.58	107.19	83.62	63.60	101.43	161.92	152.83	234.61	197.97	9.95	
	B5	0.765	0.802	0.831	0.955	140.79	159.83	153.41	170.33	165.60	73.33	36.69	40.12	125.99	112.83	56.46	87.02	134.04	121.39	191.73	173.66	10.43	
	B6	0.755	0.801	0.850	0.958	0.987	186.25	177.25	198.08	193.90	66.19	22.43	33.38	107.73	90.41	63.88	98.76	153.77	143.02	221.24	198.71	9.62	
	B7	0.779	0.835	0.881	0.968	0.979	0.984	174.34	193.82	187.99	40.16	-6.13	6.24	89.24	74.19	63.28	99.02	155.66	143.59	217.11	193.04	7.90	
	B8	0.767	0.829	0.883	0.960	0.971	0.982	0.993	218.57	211.72	16.61	-36.06	-21.93	66.43	49.42	69.21	108.99	172.52	160.76	240.85	214.40	6.46	
	B9	0.737	0.794	0.861	0.944	0.962	0.980	0.982	0.988	210.27	-24.75	-80.35	-64.57	-3.79	-19.73	65.50	102.42	161.91	153.71	230.46	205.32	1.05	
	B10	0.086	0.070	0.003	0.053	0.067	0.053	0.033	0.012	-0.019	8390.5	8533.9	8546.6	9046.8	8811.20	86.02	112.51	147.04	59.40	211.68	235.59	621.84	
	B11	0.051	0.032	-0.04	0.020	0.033	0.018	-0.005	-0.03	-0.059	0.994	8789.4	8778.5	9279.4	9025.7	66.57	82.57	98.95	15.40	161.17	191.01	636.16	
	B12	0.060	0.047	-0.01	0.033	0.036	0.026	0.005	-0.02	-0.047	0.991	0.995	8861.1	9227.6	8965.0	69.96	91.58	119.52	42.99	183.11	198.24	631.58	
	B13	0.143	0.123	0.031	0.076	0.105	0.078	0.067	0.044	-0.003	0.972	0.975	0.965	10314.	10082.	135.11	181.58	241.22	98.89	279.66	327.88	704.88	
	B14	0.143	0.119	0.019	0.061	0.096	0.067	0.056	0.034	-0.014	0.966	0.967	0.957	0.997	9911.9	134.86	177.81	230.32	81.32	247.19	307.95	689.94	
ETM +	B1	0.915	0.858	0.763	0.671	0.694	0.683	0.699	0.683	0.659	0.137	0.104	0.108	0.194	0.198	47.00	62.36	86.97	67.32	88.79	82.39	12.73	
	B2	0.941	0.927	0.856	0.775	0.775	0.764	0.792	0.779	0.746	0.130	0.093	0.103	0.189	0.189	0.961	89.62	129.76	104.22	140.08	126.23	16.87	
	B3	0.917	0.949	0.911	0.832	0.803	0.801	0.838	0.829	0.793	0.114	0.075	0.090	0.169	0.164	0.902	0.974	198.02	165.05	221.86	193.89	22.52	
	B4	0.838	0.907	0.956	0.894	0.828	0.848	0.880	0.880	0.858	0.052	0.013	0.037	0.079	0.066	0.794	0.891	0.949	152.79	205.30	170.84	11.27	
	B5	0.772	0.838	0.886	0.951	0.906	0.909	0.922	0.913	0.891	0.130	0.096	0.109	0.154	0.139	0.726	0.829	0.884	0.931	318.37	268.68	26.83	
	B7	0.795	0.834	0.844	0.916	0.936	0.932	0.935	0.928	0.906	0.165	0.130	0.135	0.207	0.198	0.769	0.853	0.881	0.884	0.963	244.32	29.48	
	B6	0.176	0.154	0.063	0.091	0.111	0.089	0.076	0.055	0.009	0.857	0.857	0.847	0.877	0.875	0.235	0.225	0.202	0.115	0.190	0.238	62.70	

Table 5. Covariance and Correlation Matrix of ASTER and ETM+ Radiance calibration data

Cov.		ASTER														ETM+						
Correl.		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B1	B2	B3	B4	B5	B7	
AST	B1	100.9	114.9	90.24	23.11	6.350	6.478	6.173	4.751	3.412	0.483	0.267	0.318	0.765	0.687	71.96	104.81	118.61	98.48	25.83	8.066	
	B2	0.966	140.1	114.4	29.68	7.846	8.091	7.800	6.050	4.334	0.448	0.169	0.276	0.764	0.659	79.51	121.86	144.75	125.75	33.04	9.985	
	B3	0.884	0.952	103.1	27.35	6.985	7.378	7.064	5.536	4.039	-0.043	-0.291	-0.143	0.116	0.042	60.84	96.75	119.65	113.79	30.02	8.703	
	B4	0.764	0.832	0.894	9.074	2.380	2.466	2.303	1.786	1.313	0.083	0.019	0.043	0.114	0.078	16.23	26.56	33.08	32.19	9.753	2.857	
	B5	0.764	0.802	0.832	0.956	0.684	0.697	0.639	0.495	0.367	0.030	0.013	0.014	0.045	0.037	4.611	7.288	8.754	8.182	2.551	0.802	
	B6	0.755	0.800	0.851	0.959	0.987	0.729	0.663	0.517	0.386	0.023	0.004	0.009	0.033	0.025	4.683	7.426	9.019	8.659	2.644	0.824	
	B7	0.779	0.835	0.882	0.969	0.979	0.984	0.623	0.483	0.358	0.012	-0.006	-0.001	0.026	0.019	4.440	7.125	8.737	8.314	2.482	0.766	
	B8	0.766	0.828	0.883	0.961	0.971	0.982	0.993	0.381	0.281	0.002	-0.013	-0.009	0.012	0.008	3.387	5.471	6.756	6.497	1.922	0.593	
	B9	0.736	0.793	0.862	0.944	0.963	0.980	0.982	0.988	0.213	-0.008	-0.020	-0.016	-0.003	-0.006	2.443	3.919	4.833	4.737	1.402	0.433	
	B10	0.076	0.060	-0.007	0.044	0.058	0.043	0.025	0.004	-0.026	0.397	0.398	0.388	0.354	0.317	0.689	0.921	0.932	0.381	0.271	0.105	
	B11	0.042	0.023	-0.045	0.010	0.024	0.008	-0.013	-0.034	-0.067	0.994	0.404	0.392	0.358	0.320	0.525	0.663	0.613	0.086	0.201	0.084	
	B12	0.051	0.038	-0.023	0.023	0.027	0.017	-0.003	-0.024	-0.055	0.991	0.995	0.385	0.346	0.309	0.537	0.717	0.724	0.260	0.223	0.084	
	B13	0.132	0.112	0.020	0.066	0.094	0.067	0.057	0.035	-0.011	0.972	0.975	0.965	0.334	0.300	0.896	1.232	1.270	0.529	0.297	0.121	
	B14	0.131	0.107	0.008	0.050	0.085	0.055	0.047	0.024	-0.023	0.966	0.967	0.957	0.997	0.271	0.820	1.106	1.111	0.396	0.240	0.105	
ETM +	B1	0.882	0.827	0.738	0.664	0.687	0.675	0.693	0.676	0.652	0.135	0.102	0.107	0.191	0.194	65.93	89.89	97.70	77.89	20.311	6.540	
	B2	0.907	0.895	0.828	0.766	0.766	0.756	0.785	0.771	0.738	0.127	0.091	0.101	0.185	0.185	0.962	132.32	149.4	123.6	32.84	10.27	
	B3	0.886	0.917	0.884	0.824	0.794	0.792	0.831	0.821	0.786	0.111	0.072	0.088	0.165	0.160	0.903	0.975	177.6	152.5	40.52	12.30	
	B4	0.814	0.882	0.931	0.887	0.822	0.842	0.875	0.874	0.852	0.050	0.011	0.035	0.076	0.063	0.797	0.892	0.950	145.0	38.55	11.15	
	B5	0.748	0.813	0.861	0.943	0.898	0.901	0.916	0.907	0.884	0.125	0.092	0.105	0.149	0.134	0.728	0.831	0.885	0.932	11.800	3.461	
	B7	0.768	0.807	0.820	0.907	0.928	0.923	0.928	0.920	0.898	0.160	0.126	0.130	0.201	0.192	0.771	0.854	0.883	0.886	0.964	1.093	

제 2 장. 전처리

제 1 절. ASTER영상의 전처리

ASTER L1B의 영상은 3개의 Sub-system인 VNIR, SWIR, TIR이 각각 공간해상도 15, 30, 90m, 방사해상도는 8bit, 8bit, 12bit로 각기 다른 자료형식을 가지고 있다. 분광혼합분석을 위해 모든 14개 밴드는 동일 자료형식을 가져야 하며 이를 위해 모든 밴드가 공간해상도 15m, 방사해상도 12bit를 갖도록 Resampling을 실시하였다. 단, 스테레오 영상제작에 이용되는 VNIR Band 3의 Backward 영상은 촬영 각도에 의한 영상값의 오차가 발생하므로 본 분석에서 제외하였다.

다음 단계는 분광분석을 위한 위성영상의 DN값에 대한 방사휘도(Radiance) 변환을 수행하였다. ASTER영상의 DN값은 아래의 공식 5와 같이 방사휘도로 변환할 수 있으며, Unit conversion coefficient는 Table 5와 같다 (Abrams et al, 2000).

$$Radiance = (DN\ value - 1) \times Unit\ conversion\ coefficient \quad --- (5)$$

ASTER영상의 기하보정은 영상 헤더의 5개의 참조점 좌표를 GCP로 선택하여 최근린 내삽법을 이용하여 변환하였다. 14밴드의 기하보정, 방사보정된 ASTER영상을 이용하여 연구지역 UTM Zone N46 E570964~615050, N5058443~5093228 영역의 Subset을 작성하였다.

Table 6. Calculated Unit Conversion Coefficients of ASTER data.

Band No.	Coefficient (W/(m ² *sr*μm)/DN)			
	High gain	Normal Gain	Low Gain 1	Low gain 2
1	0.676	1.688	2.25	N/A
2	0.708	1.415	1.89	
3N	0.423	0.862	1.15	
3B	0.423	0.862	1.15	
4	0.1087	0.2174	0.290	0.290
5	0.0348	0.0696	0.0925	0.409
6	0.0313	0.0625	0.0830	0.390
7	0.0299	0.0597	0.0795	0.332
8	0.0209	0.0417	0.0556	0.245
9	0.0159	0.0318	0.0424	0.265
10	N/A	6.822 × 10 ⁻³	N/A	N/A
11		6.780 × 10 ⁻³		
12		6.590 × 10 ⁻³		
13		5.693 × 10 ⁻³		
14		5.225 × 10 ⁻³		

제 2 절. Landsat ETM+의 전처리

ETM+ 원시자료는 ASTER영상과 동일하게 기하보정 및 방사휘도보정을 실시하였으며 분광라이브러리를 이용한 SMA 분석을 위하여 반사도 (Reflectance) 보정을 실시하였다.

Landsat ETM+ DN값의 방사휘도 또는 반사도 변환(대기영향 배제)은 미국의 지질조사소 (USGS)에서 기 제공한 센서의 gains과 offsets값을 이용하여 분광 방사휘도(L_λ)는 다음의 수식 (6)과 같다.

$$L_\lambda = LMIN_\lambda + \left(\frac{LMAX_\lambda - LMIN_\lambda}{QCALMAX} \right) QCAL \quad \text{-----} \quad (6)$$

QCAL은 DN값을 보정하고 정량화한 방사휘도(Radiance)이며, $LMIN_\lambda$ 은 QCAL이 0일 때의 분광 방사휘도값, $LMAX_\lambda$ 는 $QCAL=QCALMAX$ 일때의 분광 방사휘도값, 그리고 QCALMAX는 DN값의 재조정된 영역을 의미한다. $LMIN_\lambda$ 과 $LMAX_\lambda$ 정보는 Landsat 기술교범(1986)에 제시되어 있다. 방사휘도의 단위는 $mW/(cm^2 \times sr \times \mu m)$ 이다. 대기영향을 배제한 이론적 반사도(ρ_p)의 공식은 수식 (7)과 같다.

$$\rho_p = \frac{\pi \cdot L_\lambda \cdot d^2}{ESUN_\lambda \cdot \cos\theta_s} \quad \text{-----} \quad (7)$$

d 는 지구-태양간의 거리, $ESUN_\lambda$ 는 대기권 상부에서의 평균 태양 조사량, 그리고 θ_s 는 태양의 천정각도이다. $ESUN_\lambda$ 는 Landsat 기술교범(1986)에 제

시되어 있으며, 단위는 비율로서 없다.

Table 7. Statistics of reflectance correction ETM+ data (excluding Band6=TIR)

Band	Min	Max	Mean	Stdev
1	0.0640	0.4195	0.1475	0.0184
2	0.0375	0.4564	0.1592	0.0279
3	0.0237	0.5031	0.1841	0.0383
4	0.0072	0.5356	0.2296	0.0515
5	0	0.5970	0.2974	0.0677
7	0	0.4703	0.2547	0.0581

Table 8. Statistics information of Landsat ETM+ and Terra ASTER (**Radiance correction**).

LANDSAT7 ETM+ (02/9/11)						TERRA ASTER (02/9/11)					
Band	Range(μm)	Min	Max	Mean	Stdev	Band	Range(μm)	Min	Max	Mean	Stdev
1	0.45~0.52	25.63	182.24	64.67	8.12						
2	0.52~0.60	13.24	186.85	65.29	11.50	1	0.52~0.60	20.26	183.99	65.96	10.07
3	0.63~0.69	4.26	173.52	63.71	13.33	2	0.63~0.69	14.15	171.21	64.60	11.85
4	0.76~0.90	0	124.71	53.50	12.04	3N	0.78~0.86	12.07	121.54	54.32	10.15
5	1.55~1.75	0	31.050	15.03	3.43	4	1.60~1.70	3.70	29.13	16.72	3.00
7	2.08~2.35	0	8.44	4.56	1.05	5	2.145~2.185	1.88	7.86	5.49	0.83
						6	2.185~2.225	1.44	7.88	5.15	0.85
						7	2.235~2.285	1.37	6.81	4.50	0.79
						8	2.295~2.365	0.83	5.21	3.22	0.62
						9	2.360~2.430	0.86	3.98	2.61	0.46
						10	8.125~8.475	5.93	11.82	8.81	0.63
						11	8.475~8.825	6.18	12.05	9.09	0.64
						12	8.925~9.275	6.47	11.99	9.20	0.62
6	10.4~12.5	-	-	-	-	13	10.25~10.95	6.96	12.35	9.78	0.58
						14	10.95~11.65	6.90	11.66	9.45	0.52

제 3 장. 클래스의 선정

본 연구의 목적은 지질주제도 작성을 통한 광물자원의 잠재성 파악이다. Endmember 선정 과정은 과거 조사된 1:50,000지질도에서 연구지역에서 확인되는 지질단위를 선택하여 이를 참조분광 클래스로 지정하고자 한다.

Table 2는 본 연구지역에서 확인된 암상을 단순화한 지질 범례로서, 여기서 제시되는 8개의 지질단위 중 분광학적 유사성을 확인하여 상관성이 적은 지질단위를 SMA적용 클래스로 지정하며, 본 역의 지질도 (Figure 8)의 위치정보를 통해 지질단위인 각 클래스 별 분광정보를 추출한다.

분광 클래스는 (1) 충적층(Alluvium), (2) 쇄설성 퇴적암(Sedimentary rocks), (3) 섬록암류(Diorite) (4) 화강암(Granite) (5) 안산암질 응회암 및 반암류(Metavolcanics) (6) 석회암(Limestone)류 (7) 편암(Schist)류로 결정하였다. 클래스의 정보는 기 지질경계 레이어를 중첩하여 Figure 12와 같이 대상지역을 선택하였다. 참조 클래스의 통계값은 Table 10과 Figure 11과 같이 나타난다.

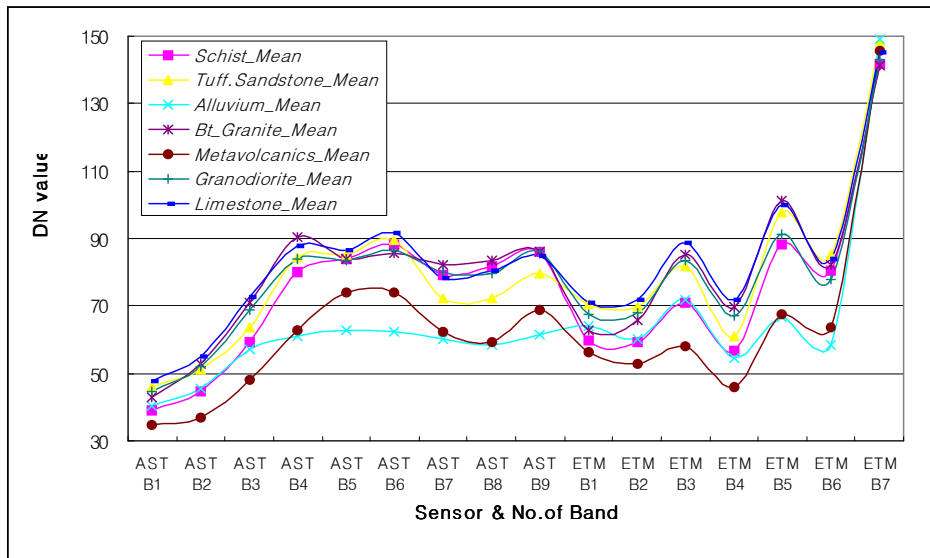


Figure 10. Distribution of Digital Number Mean Value for 7 Reference Classes using raw data.

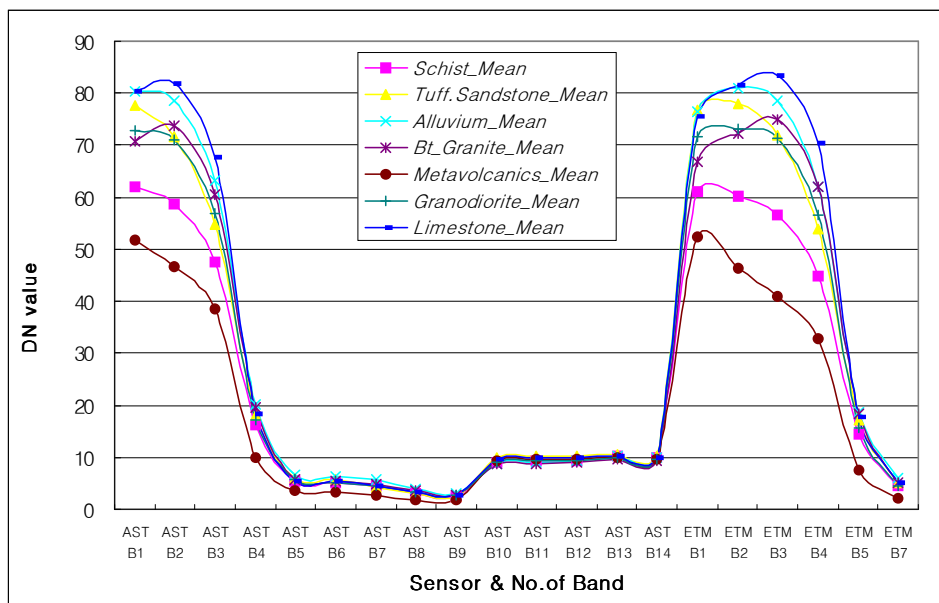


Figure 11. Distribution of digital number mean value for 7 reference classes using 20bands of radiance calibration data.

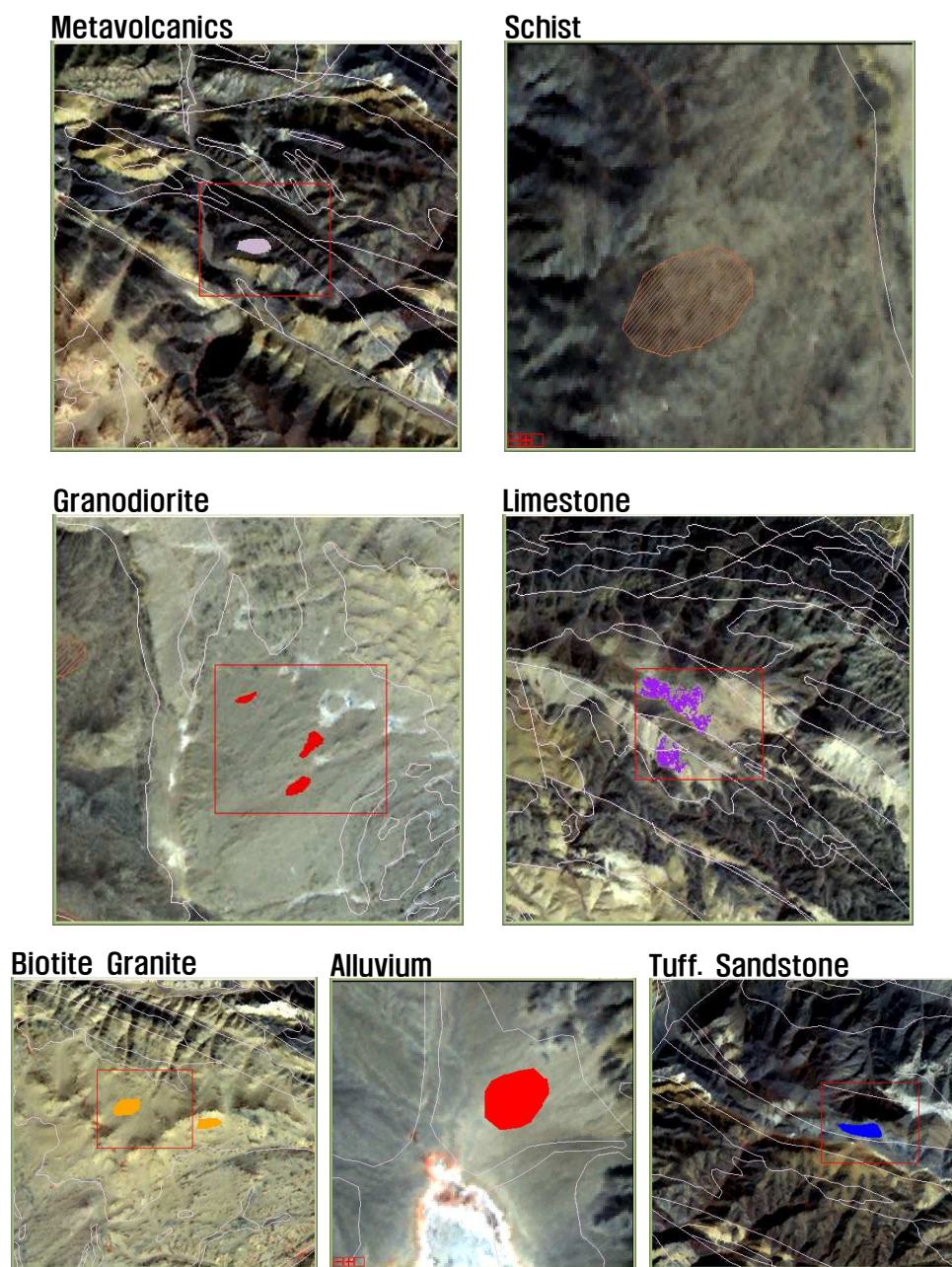


Figure 12. Sampling of Reference Class in Satellite images.



Figure 13. Landscape photo of survey area, Mongolia.

Table 9. Statistics of Reference Spectral about 7 Endmembers (Raw data).

Class	Schist				Tuff.Sandstone				Alluvium				Bt_Granite			
Band	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev
AST B1	35	43	39.13	1.54	40	49	46.14	1.48	38	42	40.22	0.61	40	46	42.88	1.12
AST B2	38	50	44.77	2.06	45	54	51.02	1.71	44	48	45.35	0.75	48	57	52.96	1.64
AST B3	52	67	59.27	2.58	59	67	63.83	1.82	54	61	57.04	0.97	65	76	71.00	2.21
AST B4	74	85	80.24	2.31	81	87	84.18	1.39	60	63	61.18	0.70	87	94	90.49	1.69
AST B5	80	89	83.92	1.66	82	89	85.25	1.54	61	66	62.99	0.83	79	88	84.10	1.60
AST B6	83	94	88.18	2.23	84	93	89.72	1.95	60	65	62.54	0.91	80	91	85.58	2.11
AST B7	75	86	79.30	2.50	68	75	72.34	1.51	57	62	60.10	0.98	77	87	82.29	1.84
AST B8	76	88	81.82	2.71	68	75	72.31	1.62	56	61	58.69	0.89	79	89	83.67	2.23
AST B9	80	93	86.30	2.57	75	83	79.61	1.67	60	64	61.71	0.81	81	92	86.06	2.25
ETM B1	56	64	59.92	1.57	67	75	70.38	1.28	61	67	63.94	0.98	58	66	62.84	1.44
ETM B2	54	65	59.28	2.28	67	74	69.85	1.51	58	63	60.41	0.82	62	70	65.84	1.71
ETM B3	64	79	71.04	3.21	77	88	81.81	2.25	69	76	71.88	1.15	79	92	85.47	2.78
ETM B4	51	63	56.92	2.51	58	64	61.20	1.49	53	57	54.44	0.78	64	75	69.71	2.36
ETM B5	76	99	88.43	4.89	93	103	97.87	2.18	63	70	66.52	1.08	94	107	101.29	3.08
ETM B7	72	90	80.70	4.37	81	90	85.21	1.94	55	62	58.65	1.23	75	88	82.36	2.94
ETM B6	140	147	141.94	1.78	146	151	148.38	1.21	147	151	148.99	0.64	138	146	141.50	1.64
AST B10	1303	1371	1318.17	13.96	1396	1448	1425.37	16.05	1365	1395	1380.67	7.69	1224	1329	1262.01	22.16
AST B11	1368	1426	1386.62	13.00	1454	1518	1489.42	19.41	1427	1460	1445.05	6.69	1277	1374	1315.18	22.69
AST B12	1404	1474	1425.69	12.99	1513	1569	1545.51	17.11	1486	1520	1506.08	6.50	1327	1435	1369.95	23.50
AST B13	1753	1832	1779.70	15.54	1801	1866	1842.34	17.44	1835	1866	1852.10	5.43	1684	1780	1716.83	20.26
AST B14	1849	1932	1873.03	16.55	1894	1955	1933.28	16.11	1929	1963	1947.60	6.45	1778	1863	1807.08	18.34
Class	Metavolcanics				Granodiorite				Limestone							
Band	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev	Min	Max	Mean	Stdev				
AST B1	33	38	34.76	1.35	43	47	44.73	0.75	45	50	47.56	1.11				
AST B2	34	41	36.78	1.81	50	55	52.19	0.82	51	58	55.18	1.51				
AST B3	44	55	48.11	2.36	66	72	68.95	1.25	68	78	72.71	2.21				
AST B4	61	66	62.91	1.47	82	88	83.81	1.48	85	90	87.80	1.54				
AST B5	71	78	74.04	2.11	80	88	83.65	1.55	84	88	86.46	1.11				
AST B6	70	78	73.96	2.30	84	92	86.45	1.47	88	95	91.59	1.92				
AST B7	60	66	62.27	1.57	77	83	80.14	1.08	75	81	78.55	1.32				
AST B8	57	63	59.31	1.49	77	84	79.66	1.18	77	83	80.57	1.33				
AST B9	66	72	68.80	1.53	84	91	86.28	1.06	83	87	84.80	1.11				
ETM B1	54	59	56.42	1.64	66	70	67.60	1.13	69	73	71.09	0.88				
ETM B2	50	58	53.07	1.91	66	70	68.03	0.89	69	75	71.97	1.43				
ETM B3	53	64	58.24	2.89	81	88	83.71	1.40	83	92	88.52	2.23				
ETM B4	42	51	45.84	2.65	66	70	67.15	1.03	67	75	72.02	2.09				
ETM B5	60	74	67.47	3.40	88	98	91.41	1.97	94	105	99.84	2.69				
ETM B7	58	70	63.58	3.52	75	83	78.10	1.71	80	89	84.14	2.05				
ETM B6	142	149	145.89	1.80	140	148	142.88	1.33	143	147	145.15	0.80				
AST B10	1359	1392	1383.76	11.56	1298	1381	1327.65	13.68	1368	1428	1407.76	17.72				
AST B11	1417	1462	1452.27	12.73	1359	1448	1383.00	15.22	1438	1491	1480.01	16.75				
AST B12	1467	1516	1502.98	12.91	1414	1500	1440.16	13.89	1493	1555	1540.52	18.64				
AST B13	1766	1809	1797.98	9.95	1722	1807	1747.33	14.68	1798	1852	1837.61	15.83				
AST B14	1865	1901	1893.91	9.07	1809	1896	1835.06	13.70	1880	1925	1911.82	14.57				

제 4 장. 분석 결과

분광혼합분석기법에 사용된 입력 자료는 전처리작업을 통해 작성된 21개 밴드의 방사휘도 미보정 영상과 20개 밴드의 방사휘도 보정영상 (ETM+ 6번 밴드 제외)이다.

2개의 입력 이미지는 상기 클래스 선정 작업에서 선택된 7개의 지질단위 클래스 및 PCA를 통한 4개 지질단위 클래스를 이용하여 선형 분광혼합분석을 실시하였으며 제한조건은 부분제한조건을 선택하여 각각 처리하였고 그 처리 결과는 각각 Figure 14, 15, 16 및 17이다.

무보정 21밴드 영상의 분석결과는 지질도 및 참조 클래스를 비교 확인하였으며, 각 단위별 결과는 지질도와 비교해 볼 때 선정된 클래스의 분류는 매우 양호하다. 그러나, ASTER의 TIR (12bits) 밴드의 DN값이 1,000이상을 보이고 ETM+의 6번 밴드의 DN값 (8bits) 차이에 의해 결과 이미지의 잡음이 크게 증가되었으며, 특히 Limestone Fraction map에서 가장 심하게 나타나고 있다. 충적층 주제도(a)는 우측 상단의 사막지역과 좌측 상부 지역(A)에서 높은 값을 보이고 있으며, 지질도 상의 결과와 상당히 일치하는 양상을 보이고 있다.

그러나, 방사보정된 20밴드 통합영상의 분석결과인 Fraction map의 결과는 양호한 단위별 정보특성을 보이고 있다. 다만, 화강섬록암(Granodiorite)과 충적층(Alluvium) 단위정보 주제도는 매우 유사한 결과를 보이며 이에 따른 최소자승법에 의한 오차결과에도 그 영향을 주고 있다. 화강섬록암과 충적층의 결과도는 유사한 패턴을 갖고 있는 결과로 보이며, 충적층을 구성하고 있는 토양 및 모래의 구성물질과 조사지역의 상당한 면적을 차지하고 있는 화강섬록암 구성광물이 매우 유사한 것으로 판단된다.

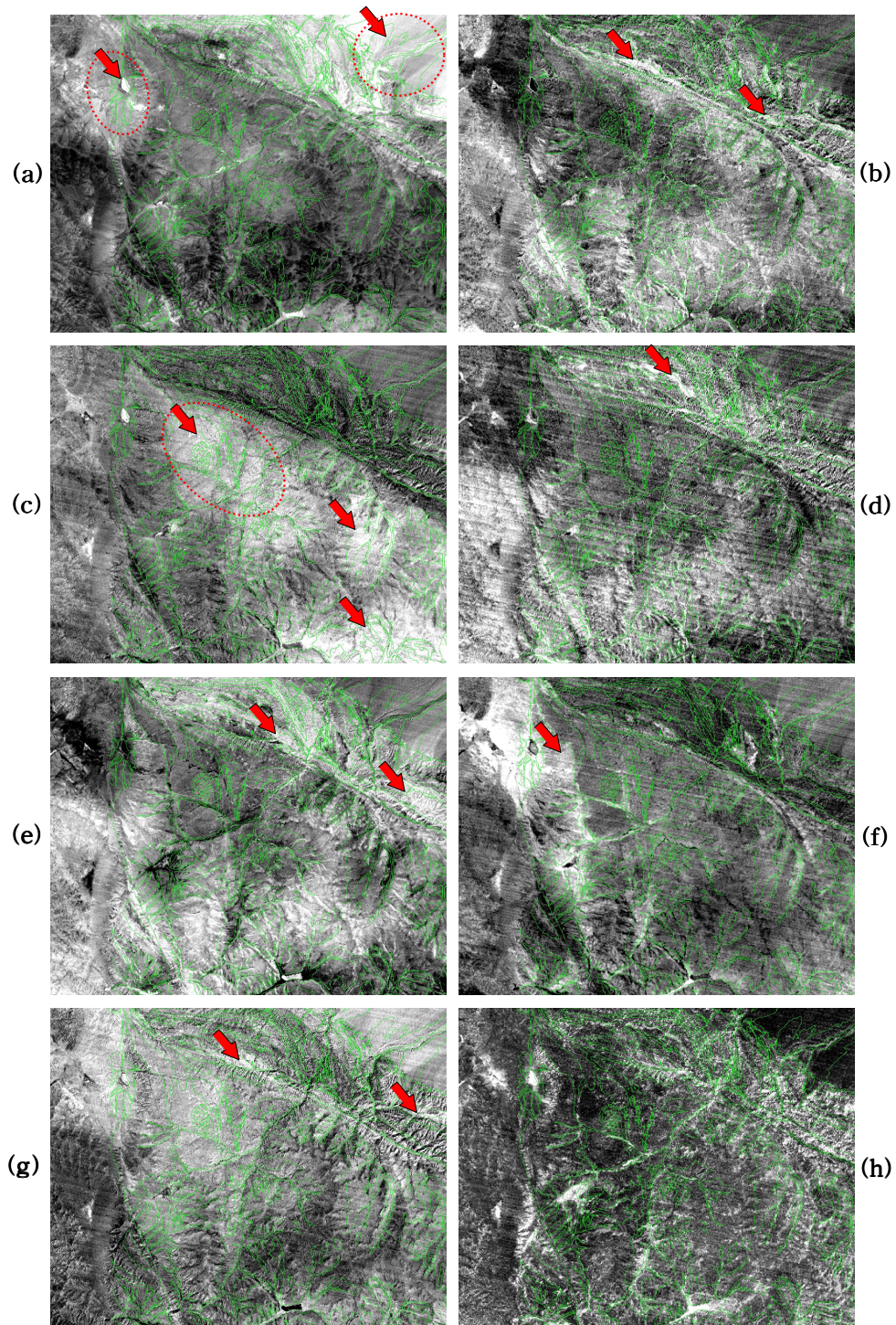


Figure 14. Results of Spectral Mixture Analysis using 21bands of ASTER and ETM+ raw data (a)Alluvium, (b)Biotite granite, (c)Granodiorite, (d)Limestone, (e)Metavolcanics, (f)Schist, (g)Tuff. Sandstone and (h) RMSE images.

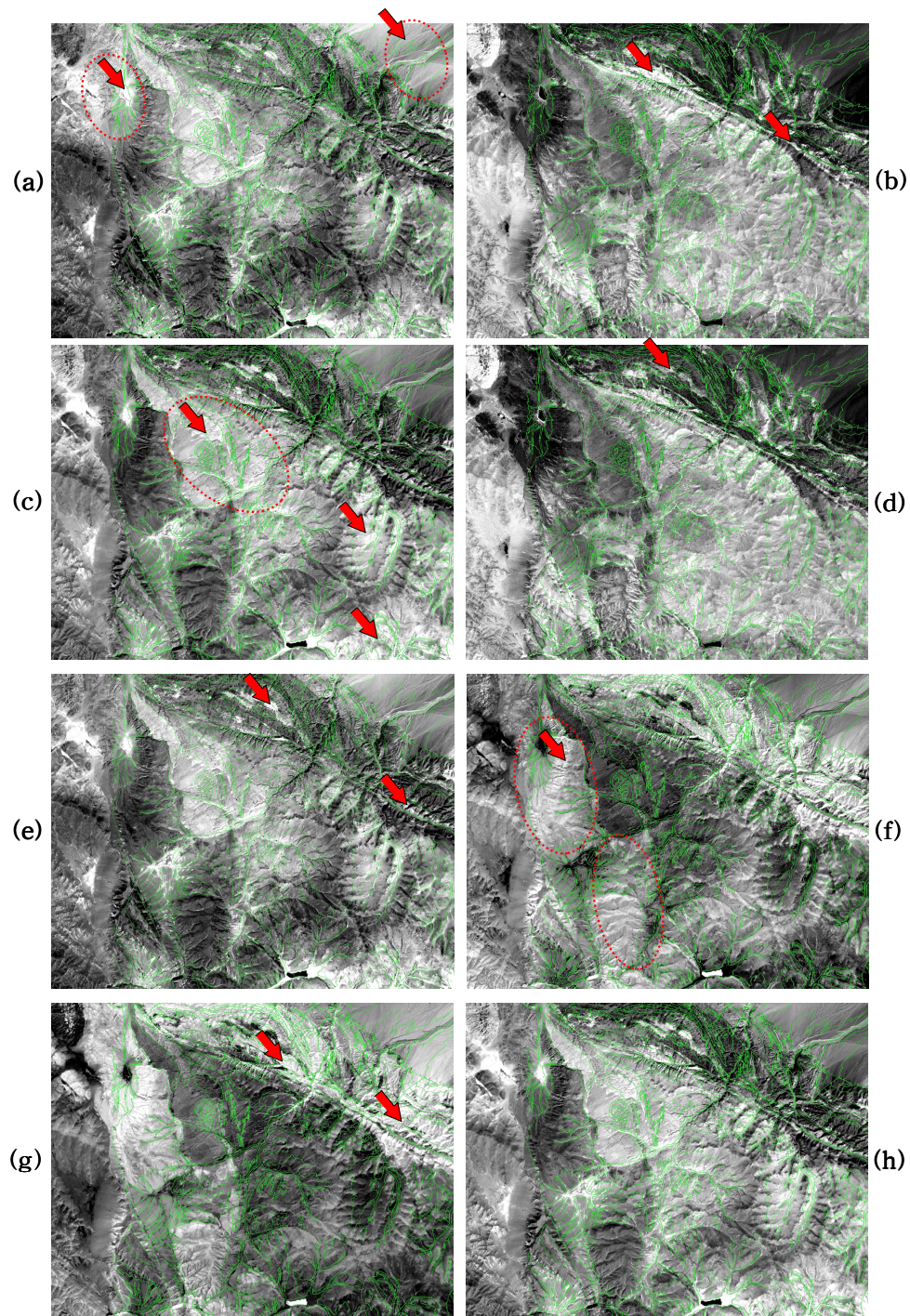


Figure 15. Results of Spectral Mixture Analysis using 20bands of ASTER and ETM+ Radiance data [(a)Alluvium, (b)Biotite granite, (c)Granodiorite, (d)Limestone, (e)Metavolcanics, (f)Schist, (g)Tuff. Sandstone and (h) RMSE images].

Table 10. The results of endmember statistics by SMA using 21bands raw data.

Endmembers	Min	Max	Mean	Stdev
Schist	-2.950081	3.917780	0.169699	0.515688
Granodiorite	-4.778196	9.780409	0.382208	0.796362
Bt_Granite	-7.650028	4.069770	0.371888	0.549051
Metavolcanics	-10.291750	3.974779	0.321139	0.729279
Tuff.Sandstone	-6.377600	3.480634	-0.376152	0.519249
Alluvium	-1.868434	6.528968	-0.015392	0.453953
Limestone	-3.948851	2.853886	0.139111	0.510700

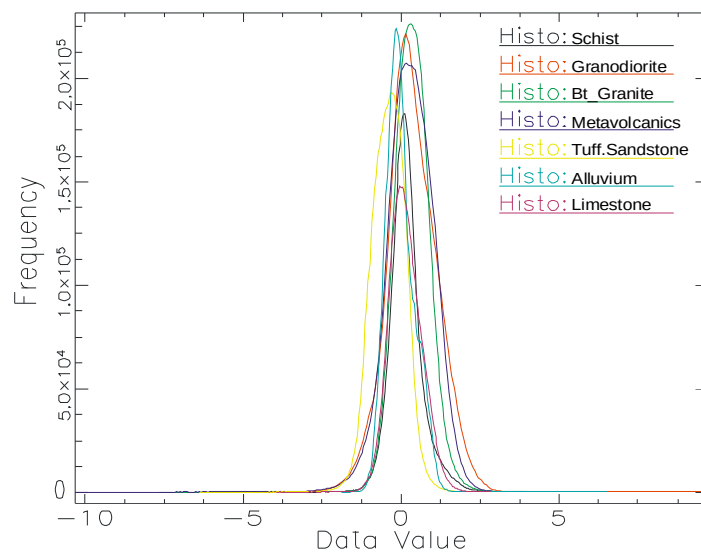


Figure 16. Histogram of endmember distribution by SMA using 21bands raw data

Table 11. The results of endmember statistics by SMA using 20bands Radiance correction data.

Endmembers	Min	Max	Mean	Stdev
Schist	-15.066405	-1.674786	-5.171836	0.797992
Granodiorite	0.961942	9.113743	2.894523	0.463161
Bt_Granite	-2.529817	0.938286	-0.139304	0.240339
Metavolcanics	0.607931	5.993739	1.585612	0.242972
Tuff.Sandstone	-2.908581	-0.002971	-0.896230	0.235735
Alluvium	0.183996	6.094142	1.840920	0.266395
Limestone	-0.658062	0.451169	-0.032058	0.075245

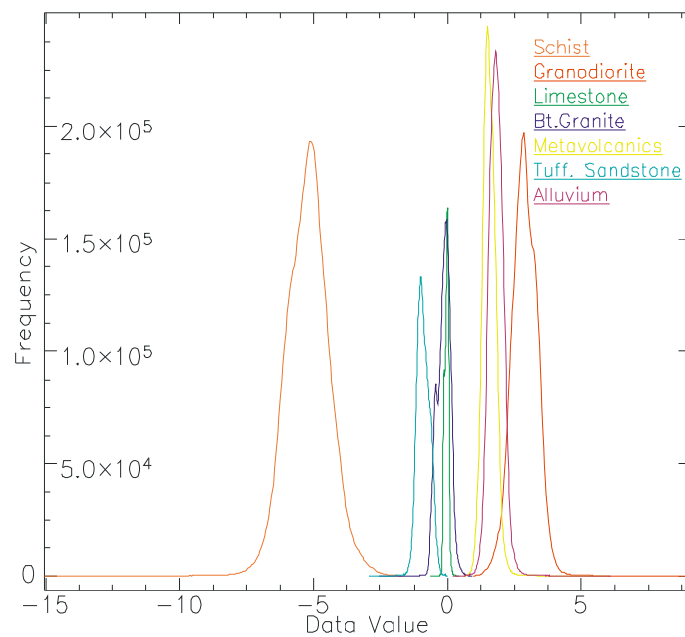


Figure 17. Histogram of endmember distribution by SMA using 20bands Radiance correction data

제 5 편. 연구 및 토의

금번 연구결과로 ASTER 및 ETM+영상자료를 이용한 분광혼합분석기법 적용을 통한 지질분야 응용의 장점과 단점 및 향후 개선 방향을 확인할 수 있었다. 본 연구의 방향은 위성영상을 물리적 분광 분석의 개념에서 단일위성의 단일센서 영상 분석이 아닌 두개의 센서에서 획득된 영상자료를 중합하여 다중밴드의 새로운 영상을 만들고 이를 이용하여 분광학적 분석을 실시하여 단일화소에 대한 다양한 정보를 취득하는 데 있었다. 기존 ASTER 영상과 ETM+영상의 적용은 각각의 분석 결과를 상호 비교하는 수준이었으나, 분광혼합분석기법은 다중정보를 포함한 Mixed pixel 개념을 이용하여 단일화소에 대한 다양한 정보 취득에 적용할 수 있음을 확인하였다. 또한, 영상자체에서 순수분광클래스를 획득하는 방법을 적용할 경우 분광혼합분석기법은 별도의 복잡한 대기보정과정 등이 필요없이 효과적으로 주제도를 작성할 수 있었다.

그러나, 자원탐사분야에서의 기본단위인 암석의 식별을 위한 분광혼합분석기법을 적용함에 있어, 광물 및 암석 분광라이브러리는 광물의 정확한 정보를 획득하기 위해 필요하며 이 암석분광라이브러리의 반사도값과 영상을 비교 적용하기 위해서는 ASTER 및 ETM+영상에 대한 지표 반사도(Reflectance) 영상 제작이 필수적인 과정이다. 지표반사도 영상작성의 Preprocessing은 대기보정 및 지형보정이며 위성영상 촬영당시의 조사지역 대기 모델 및 지형고도자료를 획득, 처리해야 하는 복잡한 과정을 수행하여야 적용할 수 있다.

본 연구에서 적용한 SMA 수식은 선형 일차방정식으로 역산과정이 상대적으로 단순하여 처리시간을 단축할 수 있었다. 그러나, 선형분광혼합분석은 단일화소에 대해 모든 참조클래스에 값을 배정하여 실제로 단일화소에 존재하지 않는 클래스의 비율도 제시함으로서 실제 현장결과와는 다른 오차를

발생하게 되었으며, 이를 개선하기 위해 향후 분광클래스를 선택적으로 적용하는 계층형 분광혼합분석방식 등을 적용해야 할 필요성이 있는 것으로 판단되었다.

SMA적용과정 중 가장 난해하고 중요한 과정은 참조분광클래스(Endmember)의 선정과정이었다. 본 연구의 경우, 실내실험 분광 라이브러리를 이용한 Endmember 선정은 연구 여건 상 조사대상지역의 대기모델을 이용한 위성영상의 지표반사도 영상 제작이 불가하므로 적용할 수 없었다. 이에 본 연구에서의 클래스 선정은 조사지역 지질도 및 영상의 주성분 분석(Principal Component Analysis) 결과를 이용하여 조사지역내에 존재하는 지질단위를 선택하고 분광학적으로 상관도가 낮은 클래스를 선택하여 적용하는 과정을 반복적으로 수행하였다. 또한, 선형분광혼합분석기법의 경우, 클래스의 수를 최소화로 결정하여야 최선의 결과를 획득할 수 있으며 검증의 과정은 통계적 분석을 통해 제한조건의 적합성 판단, 기초사 결과자료와의 비교 및 현지 야외조사에 의해 평가해야 할 것이다.

2001년부터 공식적으로 제공되는 ASTER영상은 지구의 Coverage가 충분하지 않은 상황이나 지질 자원탐사 분야에서 분광학적으로 중요시하는 SWIR 영상을 6개 밴드 제공함으로서 이를 통한 광상에 의한 변질광물 주제도 작성에 큰 장점을 가지고 있다. 본 연구에서 사용된 ASTER 과 ETM+영상의 중합을 통한 분광혼합분석방법은 다른 다중분광영상에도 활용할 수 있으며 산림자원관리, 농업 관련 분야 등 식생정보 등 다양한 분야에 활용할 수 있는 방법이었다.

제 6 편. 사사

본 논문은 주제와 방향 및 지질학적 접근법을 제시해 주시고 많은 조언을 해주신 이기원 교수님의 지도로 작성되었기에 먼저 깊은 존경의 마음으로 감사드리며, 논문 지도와 배려를 해주신 이봉규 교수님, 김남운 교수님, 석사과정 중 지도해 주신 이두성 교수님, 정인환 교수님, 지준 교수님, 방갑산 교수님께 감사드린다.

또한, 충남대학교 응용지구물리, 원격탐사 대학원과정을 지도해 주셨고 항상 관심을 갖고 지켜봐 주신 송무영 교수님과 석사과정을 지원해 준 회사(대한광업진흥공사)와 2004년 바쁜 업무 중에도 배려를 해 주신 해외조사처 직장선배님들께 진심으로 고마움을 표한다.

2년 동안 대학원 학기 중에 많이 이해해 주고 참고 기다려 준 사랑하는 아내 효순과 아들 영민에게 모든 마음을 드리며 마지막으로 항상 지켜주시고 이끌어주신 하나님과 부모님께 무난히 논문을 마무리 할 수 있게 해 주심에 깊은 감사를 드리고자 한다.

참고문헌 (References)

- Adams, J. B., Smith, M. O., and Johnston, P. E., 1986, Spectral Mixture Modeling: A New Analysis of Rock and Soil Types at the Viking Lander I Site, Journal of Geophysical Research, No. 91, pp.8098~8112.
- Bedell, R., 2004, Remote Sensing in Mineral Exploration, SEG Newsletter, No.58.
- Buheasier, K. Tsuchiya, M. Kaneko, S. J. Sung, Comparison of image data acquired with AVHRR, MODIS, ETM+ AND ASTER OVER HOKKAIDO, JAPAN, Adv. Space Res. Vol. 32, No. 11, pp. 2211~2216, 2003.
- ENVI, 2001, ENVI tutorials: Multispectral processing using ENVI's hyperspectral tools, pp.449~481.
- Feng, J., B. Rivald, and A. S. Azofeifa, 2003. The topographic normalization of hyperspectral data: implication for the selection of spectral end members and lithologic mapping, Remote Sensing of Environment, 85: 221-231.
- Huguenin, R.L, Karaska, M.A., Blaricom, D.V. and Jensen, J.R., 1997, Subpixel classification of Bald Cypress and Tupelo Gum Trees in Thematic Mapper Imagery, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 63, No. 6, June 1997, pp. 717~725.
- Lillesand, T. M., and Kiefer, R. W., 1999, Remote sensing and image interpretation, pp.561~563, 4th edition, New York: John Wiley.
- Abrams, Michael, & Hook, Simon, 2000, ASTER user handbook, version 2, JPL, p.135
- Neteler, M., 1999, Spectral Mixture Analysis and atmosphere/terrain

correction of LANDSAT images for erosion modelling using GRASS,
Presentation at ITC-IRST, Trento, 20.

Newland, D., 1999, Evaluation of Stepwise Spectral Unmixing with HYDICE
Data, Available at: <http://www.cis.rit.edu/research/thesis/bs/1999/newland/thesis.html>

Schweik, Charles M., and Green, Glen M., 1999, The Use of Spectral Mixture
Analysis to Study Human Incentives, Actions, and Environmental
Outcomes, Social Science Computer Review, Vol. 17 No. 1, Spring, pp.40~
63.

ABSTRACT

Application of Spectral Mixture Analysis Method to Geological Mapping with Multi-sensor Satellite Imageries

Kim, Seung-Tae

Major in Spatial information analysis

Dept. of Computer new technology

Graduate School of Computer new technology

Hansung University

Motivation of this study is based on these two aspects: geologic uses of ASTER and application scheme of Spectral Mixture Analysis. This study aims at geologic mapping for mineral exploration using TERRA ASTER and LANDSAT 7 ETM+ at the Mongolian plateau region by SMA. After basic pre-processing such as the normalization, geometric corrections and calibration of radiance or reflectance, related to endmembers selection and spectral signature deviation, both methods using pre-surveyed geologic mapping information and using PCA (Principal component analysis) are performed and compared on a given task.

Based on these schemes, SMA is performed using LANDSAT 7 ETM+ and TERRA ASTER image. As the results, fraction map showing geologic rock types are enough to meet purposes such as geologic mapping and mineral potential mapping in the case of both uses of these different types of remotely sensed images. It concluded that this approach based on SMA with LANDSAT and ASTER is regarded as one of effective schemes for geologic remote sensing.