

실내 분광 측정자료를 이용한 선형혼합모델의 오차 분석

김선화[†] · 신정일 · 신상민 · 이규성

인하대학교 지리정보공학과

Error Analysis of Linear Mixture Model using Laboratory Spectral Measurements

Sun-Hwa Kim[†], Jung-Il Shin, Sang-Min Shin, and Kyu-Sung Lee

Inha University, Department of Geoinformatic Engineering

Abstract : In hyperspectral remote sensing, linear spectral mixture model is a common procedure decomposing into the components of a mixed pixel and estimating the fraction of each end-member. Although linear spectral mixture model is frequently used in geology and mineral mapping because this model is simple and easy to apply, this model is not always valid in forest and urban area having rather complex structure. This study aims to analyze possible error for applying linear spectral mixture model. For the study, we measured laboratory spectra of mixture samples having various materials, fractions, distributions. The accuracy of linear mixture model is low with the mixture sample having similar fraction because the multi-scattering between components is maximum. Additionally, this multi-scattering is related to the types, fraction, and distribution of components. Further analysis is necessary to quantify errors from linear spectral mixture model.

Key Words : Spectral mixture analysis, linear mixture model, spectroscopy, spectroradiometer, end-member.

요약 : 초분광영상의 분석 기법 중 하나인 선형혼합분석기법은 각 화소를 구성하는 구성물질과 구성 비율을 추정하는데 매우 유용하게 사용되고 있다. 선형혼합모델은 지질 및 광물분포와 관련된 분야에서는 비교적 성공적으로 시도되고 있으나, 산림이나 여러 인공물들로 구성된 도시와 같은 상대적으로 복잡한 구조를 가진 혼합체에서는 그 정확도가 떨어진다. 본 연구에서는 식물과 토양의 혼합체를 대상으로 선형혼합모델을 적용하여 계산된 혼합체의 반사값과 실제 이 혼합체들을 분광측정기로 측정한 반사값과의 비교를 통해, 선형혼합모델의 오차를 계산하였다. 이를 통해 선형혼합모델의 오차 원인인 구성 물질간의 분광적 상호작용이 어느 경우 발생 혹은 증가하는지를 분석하고, 또한 파장대별 상호작용의 정도 차이가 있는지를 분석하였다. 연구 결과, 선형혼합모델은 혼합체를 구성하는 구성물질의 구성비율이 비슷한 경우, 각 구성 물질간의 상호작용이 증가하여 선형혼합모델의 오차가 가장 커지는 것을 알 수 있었다. 결과적으로 선형혼합모델의 오차 원인인 구성 물질간 상호작용의 발생 정도는 혼합체를 구성하는 성분의 종류, 반사 특성, 구성비율, 파장대와 구성 성분의 배열 상태에 따라 다르게 나타나는 것을 알 수 있었다. 향후 선형혼합모델의 정확도를 높이기 위해서는 이러한 혼합체의 특징들이 구성 물질간의 상호작용에 끼치는 영향을 정량적으로 분석하여야 할 것이다.

1. 서론

광학영상을 구성하는 각 화소값은 센서의 단위해상공간에 포함되는 지표물들의 분광적 혼합신호로써 기록되어진다. 따라서 각 화소의 밝기값을 이용하여 역으로 한 화소영역에 해당되는 여러 지표물의 종류와 구성비율을 추정하는 분광혼합분석기법(spectral mixture analysis)이 연구되고 있다. 이러한 분광혼합기법들은 초기에 실험실용 분광측정기(spectroradiometer)를 이용한 실험들을 바탕으로 연구 되어졌으며, 이후 항공기 탑재, 위성탑재 센서로 촬영된 영상들의 신호값 분석에 사용되었다. 이러한 분광혼합분석기법들은 Landsat TM영상과 같은 다중분광영상은 물론, AVIRIS영상과 같은 초분광영상에 본격적으로 적용되어, 광물분류를 비롯한 다양한 피복 분류에 활용되고 있다(Small, 2001; Moody 등, 1996; Chang and Brumbley, 1999).

이러한 연구들을 바탕으로 개발된 분광혼합분석기법은 크게 선형혼합모델(linear spectral mixture model)과 비선형혼합모델(non-linear spectral mixture model)로 나뉘어진다. 선형혼합모델의 경우, FOV(Field of View)안의 구성 물질들간에 상호 간섭이 없다는 가정하에, 각 구성 성분 물질의 신호값들을 통합하여 하나의 신호값으로 나타내는 모델로, 그 수학적 간편성을 장점으로 많이 활용되고 있다(Zhang 등, 1998; Small, 2001; Fernandes 등, 1996). 하지만 비교적 복잡한 기하학적 구조로 인해 구성 물질들 간의 상호간섭이 발생하는 혼합체의 경우, 이 선형혼합모델의 신호 독립성과 같은 수학적 가정이 성립되지 않아 선형혼합모델의 정확도가 떨어지는 것으로 나타났다(Borel and Gerstl, 1994; Huete 등, 1985, Huete, 1986; Zhang 등, 1998). 따라서 산림 및 도시지역과 같은 비교적 복잡한 구조를 가진 혼합체들에 대해 보다 복잡한 물리적인 비선형혼합모델이 개발, 적용되고 있다(Borel and Gerstl, 1994; Knipling, 1970; Bo-Cao and Goetz, 1995). 하지만, 이러한 비선형혼합모델 또한 그 이론이 물리적으로 복잡하고 어려워, 실제 영상에 적용하기 어렵다.

따라서 보다 정확한 분광혼합분석기법의 개발을 위해서 선형혼합모델의 오차 원인의 객관적 규명이 필요하다(Zhang 등, 1998; Tseng, 1999). 이를 위해, 혼합체의 비선형성이 물질 종류, 파장, 혼합비율, 구성배치

에 따라 어떻게 나타나는 지에 대한 정량적 분석이 필요하다. 기존 연구사례들에서는 다양한 혼합비율 및 배열 상태를 가진 식생과 토양의 평면 혼합체나 3차원 수관층(canopy)을 모의 제작한 후 이들을 각각 분광 측정을 실시하여 선형혼합모델의 정확도를 분석하였다. 연구 결과, 선형혼합모델의 정확도는 파장구간과 구성물질의 혼합비율에 따라 다르게 나타난 것을 볼 수 있었다(Tseng, 1999; Hu 등, 2002; Ray and Murray, 1996; 신상민, 2003).

따라서 본 연구에서는 실내 분광 측정기를 이용하여 다양한 구성물질, 구성비율과 배열 상태를 가진 혼합체들을 대상으로 분광 신호값을 측정하였다. 이렇게 측정된 분광 신호값과 선형혼합모델의 적용 결과값을 비교하여, 혼합체의 구성 비율, 배열 패턴과 파장구간에 따라 선형혼합모델의 오차 원인을 정량적으로 구명하고자 한다.

2. 분광혼합분석기법

광학 센서는 고유의 공간해상도에 해당하는 일정 면적의 지표면을 촬영하며, 이 지표면은 동질의 단일 물질로 구성되기 있기 보다는 두 가지 이상의 물질로 구성된 혼합체의 성격을 가지고 있는 경우가 많다. 이로 인하여 광학영상을 구성하는 각 화소값은 해당공간에 포함된 두 가지 이상의 지표물의 반사에너지가 정량적으로 혼합된 결과로 볼 수 있다(Keshava and Mustard, 2002). 이러한 혼합 화소를 분석하기 위해, 분광혼합분석이라는 개념이 제시되었다.

분광혼합분석 기법은 각 화소에 포함되어 있는 여러 지표물들의 고유한 분광반사특성을 이용하여 각 화소를 구성하는 여러 지표물들의 구성비율(fraction)을 해석하는 기법이다. 이때 각 화소는 다양한 구성 성분들로 구성되어 있으며, 각 화소는 여러 구성 성분들의 구성비율(fraction) 혹은 구성비율의 합으로 나타낼 수 있다. 이러한 분광혼합분석 기법은 화학분야의 분광학(spectroscopy)에 사용되었으며, 원격탐사 분야에서는 많은 파장대의 분광정보를 제공하는 초분광영상 자료가 제공되면서 본격적으로 연구되기 시작하였다. 분광혼합분석 기법은 그 자체가 영상분류기법으로도 사용되며,

다양한 지표물의 특성 및 현상과 관련된 정보를 추출하기 위한 처리과정으로 인식되어 사용되고 있다.

분광혼합분석은 영상에 해당하는 지표면이 여러 물질들로 구성되어 있으며, 각 물질들은 분광적으로 고유한 특징을 가지고 있다는 가정에서 시작된다. 이러한 분광혼합분석 기법은 각 구성 성분의 분광신호의 상호 다중산란(multi-scattering)의 유무에 따라 선형혼합모델과 비선형혼합모델로 나뉜다. 선형혼합모델은 화소를 구성하는 각 구성 성분의 분광 신호가 독립적으로, 상호간섭 없이 한 화소값은 각 구성 성분들의 선형조합으로 나타난다고 간주하는 기법이다. 이에 비해 비선형혼합모델에서는 한 화소를 구성하는 성분들 사이에 분광 신호들의 상호 다중산란이 발생한다는 가정하에, 화소값을 구성성분들의 신호값들의 비선형 조합으로 보다 복잡하게 표현한다.

다음은 선형혼합모델의 기본식으로 다음 식 (1)로 표현 되어진다.

$$Xs = Hbs + hs \quad (1)$$

식 1에서 Xs 는 해당 파장대에 각 화소가 나타내는 반사율(reflectance)이고, H 는 구성 성분의 고유 반사값에 해당하는 행렬이며, bs 는 화소에서 구성 성분별 구성 비율(fraction)을 의미한다. 마지막으로 hs 은 오차값을 나타낸다. 선형혼합모델은 두 가지 제약조건을 가지는데, 우선 각 물질의 구성비율은 항상 0값 이상의 값을 가져야 하며, 그 구성비율의 합은 항상 1값이어야 한다.

또한 구성 성분(end-member)의 수는 사용하는 영상의 분광밴드 수 이하여야 한다. 이러한 선형혼합모델은 가정에서 각 구성 성분의 분광신호가 독립적이라고 정의하였으나, 특정 지표물, 예를 들어 광물이나 식물의 수관층에서는 이러한 가정이 맞지 않는다고 알려져 있다(Roberts 등, 1993). 이러한 지표물에서는 구성 성분의 분광특성이 서로 영향을 끼치기 때문에 선형혼합모델보다 비선형혼합모델이 보다 적합할 수 있다(Hapke, 1981, 1993). 비선형혼합모델이 원격탐사 분야에 널리 사용되지 못한 이유에는 수식이 복잡하며, 파장, 혼합체의 입자 크기와 배열 상태 등에 따른 분광신호들의 상호 영향 관계를 충분히 이해하고 있지 못하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 연구의 시작으로 파장대별, 구성 비율별, 배열 상태별 분광특성을 분

석하여, 비선형성을 나타내는 원인에 대한 정량적 연구를 시도하였다.

3. 연구 방법

1) 측정 방법

본 연구에서는 우선, 비교적 분광반사특성이 명확한 녹색과 적색종이를 이용하여, 다양한 구성 비율과 배열 상태를 가진 혼합체를 제작하여 분광측정기를 이용하여 측정하였다. 이와 함께 대표적 피복물인 식생과 토양의 구성 비율별, 배열 상태별 혼합체를 구성하여 측정하였다. 식생의 경우, 국내 대표 수종이라 할 수 있는 신갈나무(*Quercus mongolica*) 잎을 사용하였으며, 토양의 경우 대표 토양 채취에 어려움이 있고 토양의 정확한 규격을 알기 어려워 시멘트의 강도 시험용 모르타르에 사용하는 표준사를 사용하였다(신상민, 2003). 측정대상물인 혼합체의 종류 및 특징은 다음 Table 1과 같다.

위의 두 가지 혼합체 종류는 각기 다른 날짜와 측정 환경에서 측정 되어졌는데, 동일 분광측정기를 사용하였으나, FOV의 크기는 약간 다르다. Table 2와 Fig. 1에서는 측정 환경에 대한 자세한 정보를 보여주고 있다.

2) 다양한 구성 비율을 가진 혼합체

선형혼합모델의 오차가 혼합체의 구성성분의 비율에 따라 어떻게 나타나는지를 분석하기 위하여, 본 연구에서는 다음 두 가지 종류의 혼합체를 제작하였다. 우선, 비교적 단순한 분광반사특성을 나타내어 오차분석이 용이한 녹색 종이와 적색 종이의 혼합체를 아래 Fig. 2와 같이 구성하여 측정하였다. 이는 적색종이의 배경에 녹색종이의 면적을 증가시면서 다양한 구성 비율에 따른 혼합체들의 분광반사 특성을 분석하였다.

이와 함께 위의 색지와 같은 비교적 단순한 반사특성을 나타내는 혼합체와는 달리 보다 복잡한 분광반사특성을 나타내는 혼합체들의 분광혼합특성을 분석하기 위하여, 본 연구에서는 다양한 구성비율의 토양과 식생의 혼합체들을 대상으로 분석하였다. 다음 Fig. 3은 토양을 배경으로 신갈나무의 녹색 잎의 면적으로 25%씩 증가시킨 혼합체들로 각각 반사율 측정을 실시하였다.

Table 1. Setting of mixture sample with two end-members used for this study.

Mixtures	Fraction			Distribution		
	Sample #	Green (Center)	Red (Boundary)	Sample #	Green	Red
Case 1. Green and red color paper	Sample I-1	0%	100%	Sample III-1	Center	Boundary
	Sample I-2	5%	95%	Sample III-2	Boundary	Center
	Sample I-3	22%	78%	Sample III-3	Left	Right
	Sample I-4	51%	49%	Sample III-4	Right	Left
	Sample I-5	100%	0%	Sample III-5	Upper	Lower
				Sample III-6	Lower	Upper
Case 2. Green vegetation and soil	Sample #	Vegetation ¹ (Center)	Soil ² (Boundary)			
	Sample II-1	0%	100%			
	Sample II-2	25%	75%			
	Sample II-3	50%	50%			
	Sample II-4	75%	25%			
	Sample II-5	100%	0%			

* Vegetation¹ is the oak (*Quercus mongolica*) leaf, soil² is the standard sand.

* Sample I is refer to Fig. 2, sample II is refer to Fig.3, sample III is refer to Fig.4.

Table 2. Condition of spectral measurements in laboratory.

Items	Case 1	Case 2
Spectro-radiometer	GER 2600 (350-2500nm)	
Light condition	Two 500Watt tungsten-halogen lamps	
Date	December 20, 2005	November 28, 2002
Lenz	10° FOV	
Height	2.0m	1.6m
Size of FOV	Ellipse shape (Major: 42cm, Minor: 28cm)	Ellipse shape (Major: 26cm, Minor: 19cm)



Fig. 1. Measurement condition using the GER 2600 spectrometer in laboratory.

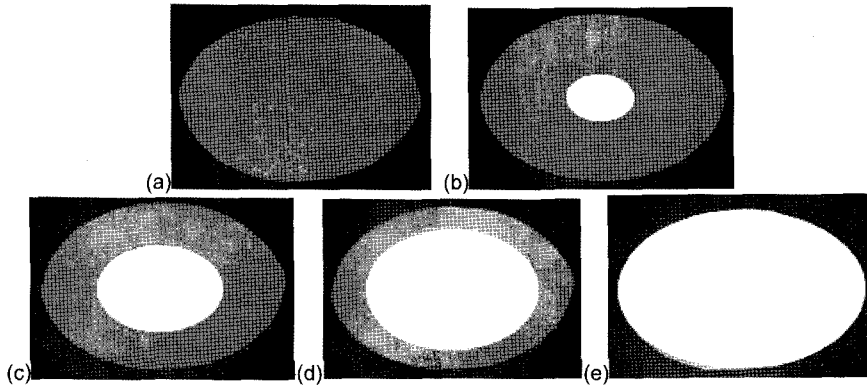


Fig. 2. Targets having various area ratios of green(white color on figure) and red(grey color on figure) color papers (a:0% , b:5.7% , c:22.7% , d:51% , e:100% of green area ratio under red color paper).

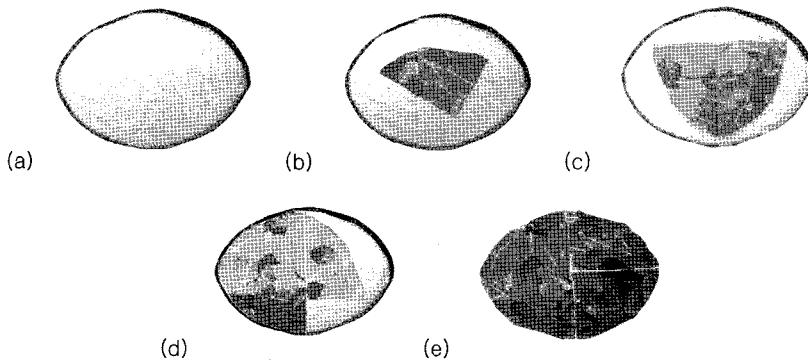


Fig. 3. Measured mixtures of vegetations for area ratio being 0%(a), 25%(b),50%(c),75%(d),and 100%(e) and soil.

3) 다양한 배열 상태를 가진 혼합체

위의 구성 비율별 혼합체들의 분광 특성을 분석 한데 이어, 본 연구에서는 분광혼합모델에 영향을 주는 또 다른 인자로 혼합체를 구성하는 물질들의 배열상태에 초점을 두었다. 다음 Fig. 4는 50% 구성 비율의 녹색종이

와 50% 구성 비율의 적색종이를 다양한 배열 상태들로 위치시켜 제작한 혼합체들을 보여주고 있다. 동일 구성 비율의 혼합체가 구성 성분의 배열 상태에 따라 분광 특성이 어떻게 달라지며, 선형혼합모델을 따르고 있는지를 분석하였다. 이를 위해 100% 구성 비율의 순수 구성

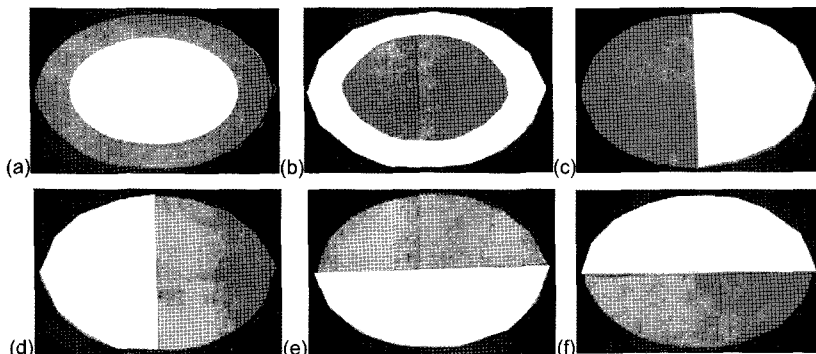


Fig. 4. Mixtures of 50% green color paper (white color on figure) on the center(a), boundary(b), right(c), left(d), lower(e), and upper(f) and 50% red color paper (grey color on figure) on the boundary(a), center(b), left(c), right(d), upper(e), and lower(f).

성분(예: 녹색, 적색종이, 식생, 토양) 각각의 반사율을 측정한 뒤, 이를 선형혼합모델식에 입력하여, 각 구성비율에 따른 혼합체의 반사값을 계산하였다. 이를 참값으로 가정 후, 측정값의 오차를 아래 수식의 Root Mean Square Relative Error (RMSRE)로 산출하여 분석하였다.

$$RMSRE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \left(\frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right)^2} \quad (2)$$

4. 연구 결과 및 고찰

1) 다양한 구성 비율을 가진 혼합체에 대한 선형 혼합모델의 오차 분석

다음 Fig. 5는 적색종이와 녹색종이의 다양한 구성비율별 혼합체들(Fig. 2)에 대한 분광 곡선들을 보여주고 있다. Fig. 5에서와 같이 녹색종이의 구성비율이 증가할수록, 곧 주변부에 위치한 적색종이의 구성비율이 감소할수록 녹색의 대표적인 반사 구간인 녹색파장영역에서 그 반사율이 증가되며, 반면에 적색파장영역에서

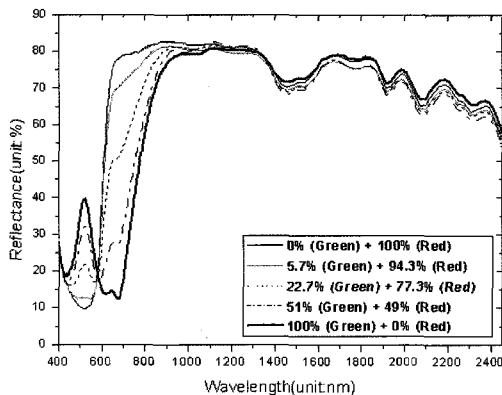


Fig. 5. Spectrums of the mixtures having various areas of green and red color papers.

Table 3. RMSRE of linear mixture model for the mixtures of green and red paper (ratio means the area ratio of green paper, *total is RMSRE (Root mean square relative error) value at 400-2,500nm wavelength).

Ratio	Blue	Green	Red	NIR	SWIR	Total*
5.7%	0.035	0.070	0.0467	0.020	0.020	0.037
22.7%	0.103	0.184	0.226	0.005	0.0175	0.121
51%	0.105	0.205	0.579	0.148	0.016	0.243

는 그 반사율이 감소되는 현상을 볼 수 있다. 하지만, 근적외선구간과 중적외선구간에서는 종이의 색에 따른 분광 반사율의 차이는 크게 나타나지 않는다.

Table 3은 혼합체들을 구성하는 녹색종이와 적색종이의 다양한 구성 비율값들을 선형혼합모델에 입력하여 계산된 혼합체들의 반사값과, 이 혼합체들을 직접 측정 한 반사값을 비교하여 계산된 선형혼합모델의 총 오차값과 각 파장대별 오차값을 보여주고 있다. Table 3에서와 같이 녹색 종이와 적색종이의 구성비율이 비슷할 때 최대 오차값이 나타나는 것을 볼 수 있다. 곧, 혼합체 중 어느 특정 물질만이 대부분의 구성비율을 차지하는 경우, 그 혼합체는 선형적 분광 혼합특성을 나타내나, 혼합체의 구성물질의 구성비율이 비슷할수록 비선형성을 따르는 것이다. 이는 구성 물질들의 구성비율이 비슷해지면서 구성 물질들간의 상호 다중산란이 더욱 커져, 결국 선형혼합모델의 오차값을 증가시킨 것으로 생각된다. 이와 함께 이러한 오차를 파장대별로 살펴보면, 가시광선 구간, 특히 녹색구간과 적색구간의 경우 녹색종이와 적색종이의 구성비율이 비슷할 경우 선형 분광혼합모델의 오차가 점점 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 근적외선 구간에서도 두 구성 성분의 구성비율이 비슷할 때 약간 높은 오차값을 보였다. 하지만, 중적외선 구간의 경우 오차값이 구성비율에 상관없이 비슷한 오차값을 나타내었다.

다음 Fig. 6은 다양한 구성비율의 혼합체들에 대해 선형 분광혼합모델의 상대 오차값을 보여주고 있다. 특히 녹색광구간에서 정확히 비선형혼합 특징을 나타내고

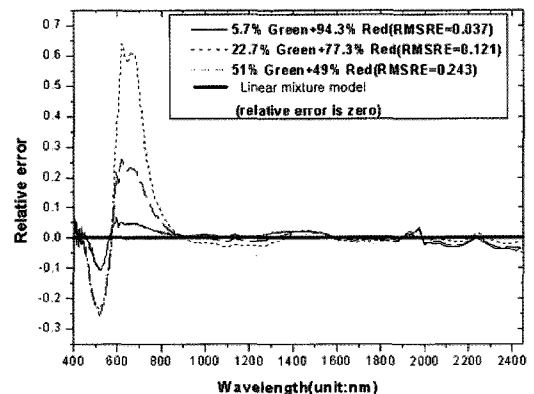


Fig. 6. Relative error of linear mixture model for mixtures having various area ratios of green and red color paper.

있는 것을 알 수가 있다. 또한 두 구성물질의 구성비율이 비슷할수록 선형혼합모델의 오차는 커지는 것을 알 수 있다.

다음 Fig. 7은 다양한 구성비율을 가진 식생과 토양의 혼합체들(Fig. 3)을 측정된 반사율 패턴을 보여주고 있다. 식생의 구성 비율이 증가할수록, 근적외선구간의 반사율이 증가하며, 적색과 중적외선에 반사율이 감소하는 예상되는 패턴을 보이고 있다. 특히 적색과 근적외선 구간의 경우 면적 증가에 따라 반사율의 차이가 크게 나타나, 구성 비율의 증가에 따른 반사율의 차이를 가장 잘 나타낸다. 이에 반해, 중적외선구간(1,000-1,300nm)에서는 식생면적 25%와 50%의 반사율이 비슷하며, 75%와 100%의 반사율이 비슷하게 나타나며, 1,300nm이상의 중적외선구간에서는 50%와 75%가 거의 비슷한 반사율을 보이는 것을 알 수 있다. 이와 같이 면적별 분광 특

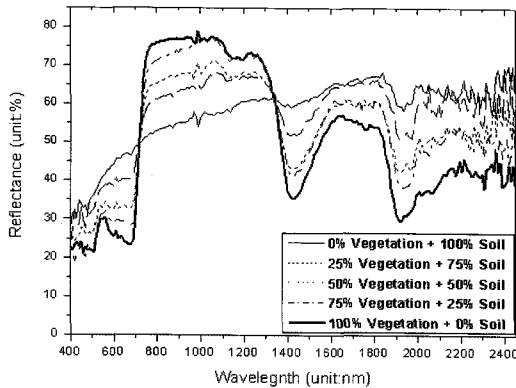


Fig. 7. Spectrums of the mixtures having various area ratios of vegetation and soil.

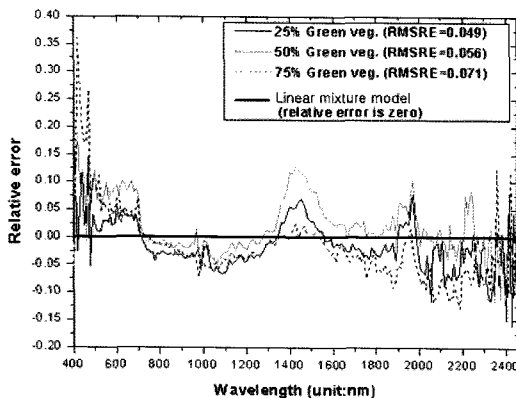


Fig. 8. Relative error of linear mixture model for mixtures having various area ratios of vegetation and soil.

성은 면적별로 그 차이가 나며, 이 차이는 파장구간에 따라 다른 패턴을 보이는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 위의 혼합체들을 구성하는 식생과 토양의 구성 비율에 따라 선형혼합모델을 적용하여 계산된 혼합체들의 반사값과 실제 혼합체들을 측정된 반사값들의 차이값으로, 선형혼합모델의 상대오차를 보여주고 있다. 파장대별로 살펴보면 적색광영역과 근적외선영역, 중적외선영역 일부부분에서 비선형성이 강하게 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만, 위의 색지 혼합체와는 다르게 특정 파장 구간에서 두드러지게 나타나지는 않는데, 이는 색지에 비해 식생과 토양은 상대적으로 복잡한 반사 특성을 나타내기 때문이다. 650nm와 1,450nm 구간에서 혼합체의 구성 비율에 따른 차이가 가장 잘 나타나는데, 특히 토양과 식생의 구성 비율이 50%인 혼합체가 가장 큰 오차를 보이는 것을 알 수 있다. 이 파장구간은 식생의 엽록소와 수분에 의한 흡수구간으로 식생의 반사율이 현저히 줄어드는 파장 구간으로 토양과의 반사율 차이가 크게 발생하는 구간이다. 그림 8에서는 청색광 영역과 2,000nm이상의 중적외선 구간에서 오차가 크게 발생하는 것을 알 수 있는데, 이는 Fig. 7에서 보듯이 측정시 발생하는 분광측정기의 노이즈에 의한 것으로 본 연구에서는 선형혼합모델의 오차분석에서 고려하지 않았다.

Table 4는 토양과 식생의 혼합체에 대한 선형혼합모델의 오차를 분석한 결과를 보여주고 있다. 녹색광구간과 적색광구간에서의 오차값을 살펴보면, 공통적으로 식생과 토양의 구성 비율이 50%인 혼합체가 가장 큰 오차를 보이는 것을 알 수 있다. 반면에 근적외선 구간에서는 이 혼합체에서만 오차값이 감소한 것을 볼 수 있다. 이러한 특징들은 Fig. 7에서 녹색구간과 적색구간에서 식생의 면적이 증가할수록 혼합체의 반사율이 감소하는데 반면, 근적외선구간에서는 식생의 면적이 증가

Table 4. RMSRE value of linear mixture model for mixtures of vegetation and soil(the ratio means the area ratio of green paper, *total is RMSRE value at 400-2,500nm wavelength).

Ratio	Blue	Green	Red	NIR	SWIR	Total*
25%	0.091	0.024	0.041	0.036	0.050	0.049
50%	0.105	0.083	0.091	0.024	0.05	0.056
75%	0.203	0.069	0.051	0.035	0.059	0.071

될수록 반사율이 증가하는 파장별 혼합체의 분광 반사 특성들과도 연계되어 설명될 수 있을 것이다. 비록 전체 파장구간에서의 전체 오차값을 살펴보면 75%의 식생과 25%의 토양의 혼합체가 가장 큰 오차값을 보이나, 이는 위에서도 지적하듯이 청색광구간과 중적외선구간에서 발생된 측정 노이즈에 의한 영향으로 이 구간에서 특별히 오차가 커져 전체 오차값에 영향을 주었다. 이와 같이, 혼합체를 구성하는 구성 성분의 반사특성에 따라 혼합비율에 따른 비선형성 특징이 파장대별로 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 녹색종이와 적색종이의 혼합체와 마찬가지로 식생과 토양의 혼합체에서도 구성 물질의 구성 비율이 비슷할 때 선형혼합모델의 오차가 가장 커지는 것을 볼 수 있다.

2) 혼합체의 배열 상태에 따른 선형혼합모델의 오차 분석

다음 Fig. 9에서는 Fig. 4에서와 같이 동일구성 비율의 녹색종이와 적색종이들을 다양한 배열 패턴으로 위치시킨 혼합체들의 측정된 반사율 패턴을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 비록 동일한 구성 비율의 혼합체이라도 분광패턴에 따라 약간씩 다른 반사패턴을 보이고 있다. 특히 녹색광영역과 적색광영역에서 분광 패턴에 따라 그 차이가 잘 나타나고 있다.

다음 Fig. 10은 다양한 배열 패턴에 따른 혼합체들의 측정된 반사값과 선형혼합모델과의 차이를 나타내는 것으로, 곧 선형혼합모델을 이 혼합체들에 적용했을 때의 오차를 보여주고 있다. 전 파장구간에서의 RMSRE 값을 살펴보면, 녹색종이와 적색종이가 상하로 배열된,

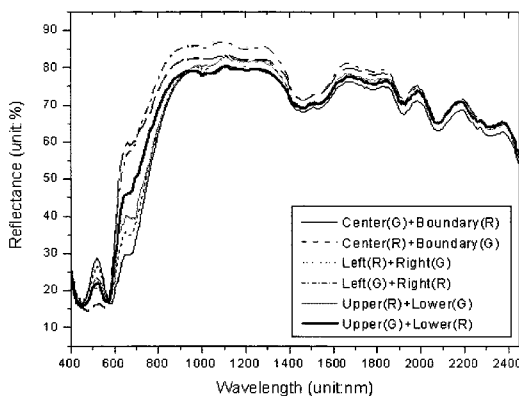


Fig. 9. Spectrums of green(50%) and red(50%) having different distributions.

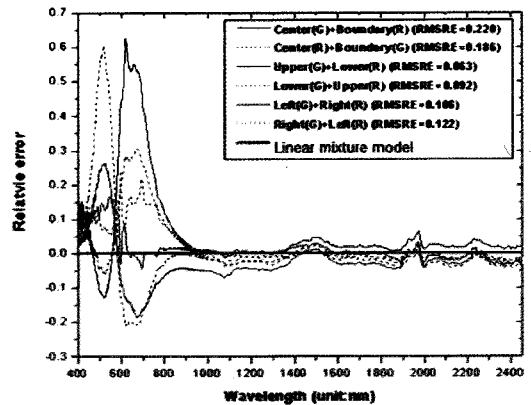


Fig. 10. Relative error of linear mixture model for the mixtures having various distribution patterns of green and red color paper.

곧, FOV의 세로방향으로 위치한 혼합체가 가장 선형혼합모델에 가깝게 나타났으며, 반면 중심부와 주변부에 위치한 경우 가장 큰 오차를 보인다. 또한 Fig. 10에서와 같이 녹색광 영역과 적색광 영역에서 그 오차가 커지게 나타나며, 특히 대조적인 위치에 배열된 혼합체들은 이 파장 구간에서 반비례적인 오차 값을 보이고 있다. 예를 들어 녹색종이가 중심부에 위치한 혼합체는 녹색광영역에서는 음의 오차값을 보이며, 적색광영역에서는 최대 양의 오차값을 보이고 있다. 이와는 대조적으로 녹색종이가 주변부에 위치한 혼합체의 경우, 녹색광영역에서는 최대 양의 오차값을 보이며, 적색광영역에서는 음의 오차값을 보이고 있다. 이와 같이 동일 구성 비율의 혼합체이라도 그 배열 패턴에 따라 매우 다양한 반사율 값과 패턴을 보인다. 따라서 기존 선형혼합모델에서 혼합체의 반사율을 계산시 사용되는 가중치를 혼합비율만을 고려하여 계산했을 시에는 이와 같이 실제 혼합체의 반사값과의 큰 오차값을 나타낸다. 따라서 보다 정확한 선형혼합모델을 고려하기 위해서는 구성 비율만이 아닌 배열 패턴과 같은 인자들도 고려되어야 할 것이다.

5. 결론

본 연구는 혼합체 분광분석에 많이 사용되었던 선형혼합모델의 근본적인 오차 원인인 구성 물질간의 분광적 상호 다중산란이 어느 경우 발생 혹은 증가하는지를 분석하고 또한 파장대별 이 상호 다중산란의 정도 차이

가 있는지를 분석하였다. 다음은 녹색종이와 적색종이의 혼합체와, 식생과 토양의 혼합체들에 선형혼합모델을 적용하여, 이 모델의 오차가 발생 혹은 증가하는 경우를 다음과 같이 분석하였다.

- 특정 구성물질이 다른 구성 물질들 보다 우세하게 구성 배열한 혼합체 보다, 혼합체를 구성하는 물질들의 구성 비율이 비슷한 경우, 선형혼합모델의 오차는 더욱 커지는 것으로 나타났다. 이는 구성 물질간의 구성 비율이 비슷하면, 선형혼합모델에서는 각 구성 성분의 가중치가 동일하게 주어지는데, 이때 각 구성물질의 상호 다중산란이 가장 크게 발생되어 결국 선형혼합모델의 오차가 커지는 현상이 발생된다. 이러한 현상은 각 구성 성분의 반사특성이 가장 잘 나타나는 파장구간에서 더욱 잘 나타난다.
- 또한 동일 구성 비율의 혼합체이라도 구성 물질들의 배열 상태에 따라 혼합체의 반사율은 매우 다르게 나타나며, 이를 고려하지 않은 선형혼합모델의 경우 큰 오차를 나타냈다. 그 중 중앙과 가장자리에 배열된 혼합체의 경우 선형혼합모델의 오차가 가장 크게 발생되는 것을 볼 수 있으며, FOV의 장축을 경계선으로 위치한 경우 선형혼합모델의 오차가 가장 작게 나타나는 것을 알 수 있다.
- 이러한 선형혼합모델의 오차는 파장 구간에 따라 달리 나타나는데, 특히 구성 성분의 분광반사특성과 연계된 특정 파장대에서 더욱 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.
- 결과적으로 선형혼합모델의 오차 원인인 구성 물질간의 상호 다중산란의 발생 정도는 혼합체의 구성성분의 종류, 반사 특성, 구성 비율, 파장대와 구성 성분의 배열 상태에 따라 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 향후 선형혼합모델의 정확도를 높이기 위해서는 이러한 혼합체의 특징들이 구성 물질간의 상호 다중산란에 끼치는 영향을 정량적으로 분석하여야 할 것이다.

사 사

본 연구는 한국과학기술원 영상정보특화센터를 통한

국방과학연구소 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 신상민, 2003. 분광반사 측정기를 이용한 혼합화소의 공간적 분광적 특성 분석, 석사학위논문, 인하대학교.
- Bo-Cao, G. and A. F. H. Goetz, 1995. Retrieval of equivalent water thickness and information related to biochemical components of vegetation canopies from AVIRIS data, *Remote Sensing of Environment*, 52: 155-162.
- Borel, C. C. and S. A. W. Gerstl, 1994. Nonlinear spectra mixing models for vegetative and soil surfaces, *Remote Sensing of Environment*, 47: 403-146.
- Chang, C. I. and C. Brumbley, 1999. Kalman filtering approach to multispectral/hyperspectral image classification, *IEEE Transactions on Aerospace and electronic systems*, 35(1): 319-330.
- Fernandes, R., J. R. Miller, and L. E. Band, 1996. Comparison of linear least squares unmixing methods and Gaussian maximum likelihood classification, *Proceedings of IGARSS*, 27-31 May 1996, Lincoln, Nebraska, pp.420-422.
- Hapke, B., 1981. Bidirectional reflectance spectroscopy 1. Theory, *J. Geophys. Res.*, 86: 3039-3054.
- Hapke, B., 1993. *Theory of reflectance and emittance spectroscopy*, Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press.
- Hu, B., J. R. Miller, J. Wang, and N. S. Goel, 2002. Investigation of linear spectral mixtures of the reflectance spectra using laboratory simulated forest scenes, *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 3: 1535-1537.
- Huete, A. R., R. D. Jackson, and D. F. Post, 1985. Spectral response of a plant canopy with

- different soil backgrounds, *Remote Sensing of Environment*, 17: 37-53.
- Huete, A. R., 1986. Separation of soil-plant spectral mixtures by factor analysis, *Applied Optics*, 4: 11-20.
- Keshava, N. and J.F. Mustard, 2002. Spectral Unmixing, *IEEE Signal Processing Magazine*, 19(1): 44-57.
- Knipling, E. B., 1970. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 1: 155-159.
- Moody, A., S. Gopal, and A.H. Strahler, 1996. Artificial neural network response to mixed pixels in coarse-resolution satellite data, *Remote sensing of Environment*, 58: 329-343.
- Ray, T. W. and B. C. Murray, 1996. Nonlinear spectral mixing in Desert Vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 55: 59-64.
- Roberts, D. A., M. O. Smith, and J. B. Adams, 1993. Green vegetation, nonphotosynthetic vegetation, and soils in AVIRIS data, *Remote Sensing of Environment*, 44: 255-269.
- Small, C., 2001. Estimation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis, *International Journal of Remote Sensing*, 22(7): 1305-1334.
- Tseng, Y. H., 1999. Spectral mixture analysis of hyperspectral data, *Proceedings of Asian Conference on Remote Sensing*.
- Zhang, L., D. Li, Q. Tong, and L. Zheng, 1998. Study of the spectral mixture model of soil and vegetation in PoYang Lake area, China, *International Journal of Remote Sensing*, 19(11): 2077-2084.