다중분광 자료를 이용한 영상기반의 대기보정 연구

이광재*, 김용승**

An Experimental Study on The Image-Based Atmospheric Correction Using Multispectral Data

Kwang-Jae Lee*, Yong-Seung Kim**

Abstract

The purpose of this study is to examine the image-based atmospheric correction models using the data from Landsat Enhanced Thermal Mapper Plus (ETM+) that have quite similar spectral characteristics to the forthcoming KOrea Multi-Purpose SATellite (KOMPSAT)-2 Multi-Spectral Camera (MSC), and the *in-situ* measured surface reflectance data during satellite overflight. The main advantage of this type of correction is that it does not require *in-situ* measurements during each satellite overflight. While substantial differences are present between Top-Of-the Atmosphere (TOA) reflectance and *in-situ* measurements, the results showed that Case 1 based on COST model gives most accurate results among three cases. The accuracy of Case 2_1 is very close to Case 1 and its values are smaller than *in-situ* data. No notable features appear between some bands in the Case 3_1 and *in-situ* data. It is expected from this study that if the current methods are applied to the IKONOS high resolution data, we will be able to develop the suitable atmospheric correction methods for MSC data.

초 록

본 연구의 목적은 향후 발사될 KOMPSAT-2 MSC와 유사한 분광특성을 가지는 Landsat ETM+ 영상자료와 동시기에 지상에서 관측한 surface reflectance 자료를 이용하여 영상기반의 대기보정 모델을 검토하는 것이다. 이러한 영상기반의 대기보정은 현장관측 자료가 필요하지 않다는 이점이 있다. TOA reflectance와 현장 관측치 간에 상당한 차이를 보이며, 연구결과는 COST 모델을 기반으로 하는 Case 1이 세 가지 경우 중에서 가장 정확함을 나타냈다. 한편 Case 2_1의 경우 Case 1처럼 정확하나 그 값은 현장 자료보다 낮게 나타났다. 또한 Case 3_1은 일부 밴드에서 관측치와 전혀 상관성이 없는 것으로 나타났다. 향후 IKONOS와 같은 고해상도 영상자료에 본 연구방법을 적용하면 MSC 데이터 특성에 맞는 대기보정 모델을 개발할 수 있을 것으로 판단된다.

키워드 : 영상기반 대기보정(image-based atmospheric correction), 지표반사율(surface reflectance)

* 위성정보처리그룹/kjlee@kari.re.kr ** 위성정보처리그룹/yskim@kari.re.kr

1. 서 론

Landsat 위성은 1972년부터 지속적으로 다중시기 영상자료를 제공함으로써 변화탐지분야 등에 있어서는 가장 활용성이 높은 자료로 평가되어져 왔다 (Jensen *et al.*, 1982; Fung, 1990; Chavez *et al.*, 1994). 그러나 이러한 다중분광 자료들을 최대한 효과적으로 활용하기 위해서는 보다 정확한 복사 및 대기, 지형보정 등이 필수적으로 요구되는데, 특히 태양광의 산란 (scattering), 흡수 (absorption) 및 굴절 (refraction) 등은 다중분광 영상자료에 직접적인 영향을 미쳐 원 자료가 가지는 고유한 특성을 왜곡시키는 주요 원인으로 판명되고 있다 (Chavez, 1996). 특히 다중시기의 다중분광 영상자료를 이용한 변화탐지 및 토지피복분류 등을 수행할 경우 각 시기별 영상자료의 태양고도, 대기의 조건 및 토양보습 상태 등이 서로 다르기 때문에 이들 자료의 정규화를 통해 이와 같은 영향을 최소화하기 위한 과정이 요구된다 (Eckhardt *et al.*, 1990; Hall *et al.*, 1991). 이러한 영향들에 대한 보정은 위성에 기록된 디지털 수치 (digital counts)를 지상의 반사율 (reflectance) 값으로 변환함으로써 평가되어질 수 있는데, 이를 위해서는 센서의 gains, offsets, solar irradiance, solar zenith angle 등이 복사보정 (radiometric correction) 과정에 반드시 포함되어져야 한다. 이와 같은 복사보정은 대기의 영향뿐만 아니라 위성 센서에 대한 보정 등을 모두 포함하고 있다. 한편 대기에 의한 영향을 보정하기 위하여 위성의 overflight 시점에 맞추어 현장에서 관측한 대기 자료와 복사전달코드 (RTC; Radiative Transfer Code) 등이 사용되는 경우가 있는데, 이를 위해서는 많은 인력과 비용, 시간 등이 소요되며 무엇보다 매회 관측하기에는 한계가 있다. 따라서 영상기반 (image-based)의 대기보정을 위한 다양한 방법론들이 제시되고 있는데 (Moran *et al.*, 1992; Chavez, 1996; Song *et al.*, 2001), 이 경우 직접적인 대기관측 자료가 필요하지 않다는 이점이 있다. 그러나 이와 같은 영상기반의 대기보정 (atmospheric correction) 알고리즘들은 그 적용 방법에 따라 서로 상이한 결과를 도출할 수 있기 때문에 적용에 앞서 이러한 알고리즘들에 대한 보다 정확한 이해와 해석이 요구된다.

본 실험에서는 2005년 발사될 KOMPSAT-2 Multi Spectral Camera (MSC)와 동일한 파장대역 (가시광선 및 근적외선, 0.45-0.90㎛)을 가지는 Landsat 7 Enhanced Thermal Mapper Plus (ETM+) 영상을 활용하여 기존의 영상기반의 대기보정 알고리즘들을 현장관측 자료와 함께 비교, 분석함으로써 향후 MSC 영상자료의 적용 가능성을 실험하고자 한다.

2. 영상기반 대기보정

Landsat 위성이 처음 발사된 초기에는 대기에 의한 영향을 저감시키기 위하여 주로 Dark Object Subtraction (DOS)과 같은 간단한 방법들이 많이 이용되었는데 (Vincent, 1972; Chavez, 1975; Rowan *et al.*, 1974), 대부분의 DOS 기법은 짙은 그림자 지역과 같이 완전히 어두운 (dark) 지역의 픽셀 DN 값은 0이며 어떠한 radiance도 존재하지 않지만, 만약 대기산란과 같은 영향이 이들 지역에 존재한다면 완벽한 암흑이 될 수 없다는 가정하에 이들 지역의 0이 아닌 최소 DN value를 차감해 줌으로써 대기산란의 영향을 저감시키는 방법이다. 그러나 이러한 표준 DOS 기법의 경우 영상촬영 당시의 대기상태를 완전히 무시한다는 점과 영상 내에서 dark-object를 잘못 선정하였을 경우 과대보정 (overcorrection)이 될 수도 있다는 것이 단점이다. 한편 이와 같은 영상자료 내의 대기산란에 의한 영향을 보다 효과적으로 보정하기 위하여 Chavez(1988)는 Landsat 4 TM, MSS 영상자료를 활용하여 보다 향상된 DOS 모델을 제시한 바 있다. 이 연구에서 Chavez는 Curcio(1961)와, Slater *et al.*(1983)이 제시한 대기상태에 따른 Relative Scattering Model (RSM)를 활용하였는데, 당시 사막지역의 Landsat TM 영상을 RSM에 의하여 자연색 합성

영상을 보정하였기 때문에 Table 1과 같은 scattering model을 연구에 활용하였던 것이다.

Table 1. Information supplied by Curcio(1961) and Slater *et al.*(1983)

Atmospheric Conditions	Relative Scattering Model
Very clear	λ^{-4}
Clear	λ^{-2}
Moderate	λ^{-1}
Hazy	$\lambda^{-0.7}$
Very hazy	$\lambda^{-0.5}$

이와 같은 5가지 형태의 RSM은 Power Law Function과 함께 이용되어 Starting Haze Value (SHV)를 예상할 수 있게 되는데, 이를 위한 밴드 1의 haze value는 히스토그램이나 표준 DOS 모델에 의해 선정되어진다. 한편 영상 내에 존재하는 haze를 보정하기 위한 DN haze value는 식(1)에 의해서 계산되어졌다.

$$DN(Haze_i) = Norm_i \times Haze_i + Offset_i \quad \textbf{(1)}$$

where,

- $DN(Haze_i)$ DN value that predicted $Haze_i$ value will be mapped to in band i
- $Norm_i$ Normalized gain value
- $Haze_i$ Predicted haze value for band i using a relative scattering model and the offset corrected starting haze value
- $Offset_i$ Offset value used for band i

향상된 DOS 모델의 경우 기존 DOS 모델과는 달리 영상촬영 당시의 대기상태를 고려한다는 점과 영상 내에 존재하는 haze를 제거하기 위한 DN haze value를 쉽게 계산할 수 있다는 것이 이점으로 작용하였다. 그러나 밴드 5, 7의 final haze value가 기존의 old 또는 predicted haze value 보다 지나치게 커지는 문제가 발생하였다.

한편 Chavez는 다음해인 1989년에는 Landsat TM 자료에서 haze가 제거된 surface reflectance를 계산하기 위한 새로운 모델을 제시하였는데 이는 식(2)와 같다.

$$\rho_{surface} = \frac{(\pi D^2)(L_{sat} - L_{path})}{E_{sun} cos(\theta_z)} \quad \textbf{(2)}$$

where,

- L_{sat} Spectral radiance at the satellite sensor
- D Earth-sun distance in astronomical units
- E_{sun} Solar spectral irradiance on a surface perpendicular to the sun's rays outside the atmosphere
- θ_s Solar zenith angle in degrees

위의 식(2)는 기존의 Begni(1982), Barker *et al.*(1985), Markham *et al.*(1986) 등이 제시한 모델과 비슷하나 L_{path}, 즉 haze(additive atmospheric scattering) 항을 제거하는데 있어 차이가 있다. 한편 이 연구의 결과에서 Chavez는 현실적으로 reflectance가 0인 surface는 존재하지 않을 것이라는 가정하에 haze 항에서 1% reflectance가 감안된 stand-alone method와 대기관측 장비로 측정된 자료를 사용한 sky radiance method로부터 계산되어진 haze value가 비슷하였다고 밝히고 있다. 그러나 1988년 연구에서와 마찬가지로 영상 내에서 dark-object를 선정하여 starting haze value를 추출함에 있어 여전히 주관적인 판단에 의존할 수밖에 없음을 문제시 하였다.

한편 이와 같은 1989년 Chavez의 연구결과에 대해서 Moran은 1992년 Jackson *et al.*의 연구결과를 바탕으로 DOS 모델의 문제점을 제기하였다. Moran *et al.*은 항공기를 이용하여 1년 동안 Landsat TM overflight 시점과 일치하는 7일에 대하여 aerosol, Rayleigh, ozone optical depth 등과 같은 대기관측 자료를 획득하였으며, 다음과 같이 3 가지로 구분하여 실험하였다.

○ RTC solution with measured input
○ RTC solution with simulated input
○ Image-based solution, with and without use of RTC

세 번째의 경우 영상기반 surface reflectance는 RTC를 input 자료로 사용하였을 경우와 그렇지 않을 경우로 구분하여 식(3)에 의해서 계산되어 졌으며, 이때 T_z, T_v는 각각 1로, E_{down}은 0으로 가정되었다.

$$\rho_{surface} = \frac{\pi (L_{sat} - L_{path})}{T_v (E_{sun} cos(\theta_z) T_z + E_{down})} \quad (3)$$

where,

T_z Atmospheric transmittance along the path from the sun to the ground surface

T_v Atmospheric transmittance along the path from the ground surface to the sensor($T_v^{dir} + T_v^{diff}$)

E_{down} Downwelling spectral irradiance at the surface due to the scattered solar flux in the atmosphere

이와 같은 Moran *et al.*의 실험에서는 TM 밴드 1을 제외한 나머지 밴드 2, 3, 4의 경우 DOS 모델이 다른 모델 및 현지 관측치와 비교하였을 때에 reflectance 차이가 심한 것을 확인하였다. 즉 대기의 영향을 제거하는데 있어 Chavez(1989)가 제안한 DOS 모델만을 이용하기 보다는 RTC 모델을 함께 병행하여 사용하는 것이 보다 효과적임을 나타냈다.

한편 Moran *et al.*(1992)의 연구결과에 대해 Chavez(1996)는 Moran *et al.*이 사용하였던 자료를 그대로 apparent reflectance 모델, DOS 모델 그리고 Moran *et al.* 모델에 적용한 후 그 결과를 바탕으로 COST 모델을 개발하였는데 이는 Moran *et al.*(1992)의 모델에서 요구되는 parameter들을 새롭게 대입함으로써 이루어졌다. 우선 T_v를 $cos(\theta_v)$로 1.0으로 해석하였는데 이는 Landsat TM nadir view를 위해서는 θ_v가 0도(zero degrees)이기 때문이다. 이 연구에서 제시한 COST 모델은 T_z을 대신하여 $cos(\theta_z)$을 사용하는 것이 Default T_z을 사용하는 것보다 오히려 더 좋은 결과를 낳았는데, 이러한 결과는 bare soil과 vegetation의 각 target별 reflectance의 결과에서도 확인 가능하였다.

3. 실험 및 결과

영상기반의 대기보정 실험을 위하여 Moran *et al.*(1992)이 제안한 식(3)를 기본 모델로 이용하였다. 식(3)에서 E_{down}의 영향을 식(4)과 같이 풀어 해석할 수 있으며, 이는 결국 식(5)과 같이 재구성될 수 있다.

$$\rho_{surface} = \frac{\pi (L_{sat} - L_{path})}{T_v (E_{sun} cos(\theta_z) T_z^{dir} + E_{sun} cos(\theta_z) T_z^{diff})} \quad (4)$$

$$\rho_{surface} = \frac{\pi (L_{sat} - L_{path})}{T_v E_{sun} cos(\theta_z) (T_z^{dir} + T_z^{diff})} \quad (5)$$

식(5)에서 T_v는 surface에서부터 sensor까지의 대기투과율 (atmospheric transmittance)을 의미하는 것으로, 이는 T_z와 마찬가지로 direct(T_v^{dir})와 diffuse(T_v^{diff}) 성분의 합으로 구성되어진다. 한편 식(5)에서 L_{path}는 1% 정도에 해당하는 reflectance는 존재할 것이라는 가정하에 계산되어졌다(Moran *et al.*, 1992; Chavez, 1989, 1996; Song *et al.*, 2001). 또한 식(5)를 영상자료에 적용하기 위해서는 다양한 parameter들이 요구되는데, 본 연구에서는 각 case별 실험을 위하여 Table 2와 같이 정의하였다. Table 2에서 Case 1은 Chavez가 1996년 발표한 COST 모델과 동일한 형태를 취하고 있으며, Case 2는 COST 모델을 기본으로 하고 있지만 Cho *et al.*(2003)의 연구결과를 토대로 T_z의 diffuse가 완전히 zero는 아니며 direct 성분에 대한 일정부분의 영향을 가질 것으로 가정하여 경우에 따른 실험을 수행하였다. 한편 Case 3은 Table 3의 aerosol(τ_{Aer})과 Rayleigh factor(τ_{Ray})를 기초로 구성하였으며, T_v, T_z의

diffuse를 direct 성분의 일정 비율로 감안하여 적용하였다.

Table 2. Each transmittance value for three cases used in Eq.(5)

Methods	T_v^{dir}	T_v^{diff}	T_z^{dir}	T_z^{diff}
Case 1	1	0	$cos(\theta_z)$	0
Case 2	1	0	$cos(\theta_z)$	$\frac{1}{4}T_z^{dir}$, $\frac{1}{3}T_z^{dir}$, $\frac{1}{2}T_z^{dir}$
Case 3	$e^{-\tau/cos\theta_v}$	$\frac{1}{4}T_v^{dir}$, $\frac{1}{3}T_v^{dir}$, $\frac{1}{2}T_v^{dir}$	$e^{-\tau/cos\theta_z}$	$\frac{1}{4}T_z^{dir}$, $\frac{1}{3}T_z^{dir}$, $\frac{1}{2}T_z^{dir}$

Table 3에서 τ_{Aer}은 Sohn *et al.*(1998)의 연구결과를 기초로 추정하였는데, 0.5㎛에서의 Aerosol Optical Thickness (AOT)가 Landsat ETM+ 영상 촬영 시점에 약 0.4인 것을 기초로 하여 이를 ETM+ 밴드 1-4에 적용하여 유추한 것이다. 또한 τ_{Ray} factor는 Cess *et al.*(1991)의 연구결과에서 제시한 Rayleigh Optical Thickness (ROT)를 바탕으로 추정한 값이다.

Table 3. Estimates of aerosol, Rayleigh and total optical thickness used for this study

ETM+	aerosol (τ_{Aer})	Rayleigh (τ_{Ray})	Total(τ)
τ_{band1}	0.4×1.24=0.496	0.226	0.722
τ_{band2}	0.4×1=0.4	0.099	0.499
τ_{band3}	0.4×0.81=0.324	0.050	0.374
τ_{band4}	0.4×0.65=0.26	0.023	0.283

Table 2의 각 case별 parameter들을 이용하여 L_{path}에 대해 계산하고, 이를 식(5)에 적용함으로써 각 case별 surface reflectance 결과를 획득하였다. 그리고 이와 같이 위성영상으로부터 계산되어진 surface reflectance의 정확도를 검증하기 위하여 한국지질자원연구원에서 FR Portable Spectro-radiometer (FieldSpec FR) 장비를 사용하여 현지 관측한 6개 지점의 reflectance와 비교, 분석하였는데 그 결과는 Fig. 1과 같으며 Landsat ETM+ 각 밴드별로 살펴보면, 우선 밴드 1에서는 TOA, Case 1 그리고 Case 2_1의 결과가 서로 비슷한 패턴을 보여주고 있다. 그러나 Case 3_1의 결과는 현지관측을 통하여 획득되어진 reflectance와 전혀 상관성이 없는 것으로 확인되었다. 한편 밴드 2에서는 Case 3_1을 제외한 TOA, Case 1, Case 2_1 모두 전반적으로 현지관측 자료보다 낮은 reflectance 패턴을 보여주고 있는데, 이들 중에서는 Case 1이 현지관측 자료와 가장 잘 일치되는 것으로 나타났다. Fig. 2의 밴드 3에서는 Case 1과 Case 3_1이 관측 자료와 잘 부합됨을 확인할 수 있었는데 이중에서도 Case 1은 field 대상물을 제외하고는 거의 관측치와 일치하는 것으로 나타났다. 마지막으로 밴드 4의 결과를 살펴보면, TOA, Case 2_1, Case 3_1 모두 현장관측 reflectance 보다 상당히 낮게 나타난 반면, Case 1은 오히려 현장관측치보다 높게 나타났다. 앞서 살펴본 결과에서 위성으로부터 유도된 surface reflectance와 지상 관측치 간의 상관계수는 밴드 2와 밴드 3에서 다른 밴드에 비해 양호함을 볼 수 있으나 이들 밴드 간의 차이는 어떠한 이유로 비롯되었는지 분명하지 않다. 이러한 이유가 다음에 기술될 blue 밴드(밴드 1)와 NIR (밴드 4) 밴드에서의 대기의 역할에 기인하는지 추가분석이 필요하다.

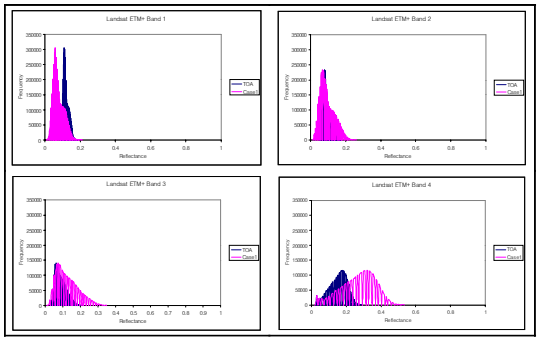

Fig. 3. A comparison of TOA and Case 1 histogram distribution pattern

Fig. 3은 이러한 결과를 바탕으로 영상내의 haze를 보정하지 않은 TOA와 기존 COST 모델을 적용하여 haze를 보정한 Case 1의 히스토그

램 분포 패턴을 비교한 결과이다. 이 분포를 통해 대기 중의 미립자들이 밴드 1의 단파장에서는 TOA 반사율을 증가시키지만 밴드 4의 장파장 쪽으로 가면서 반대로 TOA 반사율을 감소시키는 역할을 함을 알 수 있다.

한편 Fig. 1, Fig. 2의 결과에서 COST model을 그대로 적용한 Case 1과 T_z의 diffuse성분이 direct의 약 1/4 정도는 될 것으로 가정한 Case 2_1의 reflectance 패턴이 유사한 것으로 나타나 이들 결과간의 관련성 여부 및 관련이 있다면 어느 정도의 관련성이 있는지를 분석하기 위해서 상관분석을 수행함과 동시에 이들 간의 인과관계를 해석하기 위하여 Case 1을 종속변수로 Case 2_1을 독립변수로 하여 선형회귀분석을 수행하였다. 그 결과 Fig. 4에서와 같이 경험적 회귀식을 도출하였으며, 이식에 대한 적합도 분석은 결정계수(R^2)로 설명되어질 수 있는데 R^2가 1인 것으로 확인되었다. 이는 Case 1과 Case 2_1의 모델로부터 계산되어진 reflectance 패턴이 서로 매우 잘 일치됨을 의미하는 것이다. 그러나 Fig. 4에서 전반적으로 Case 1의 reflectance가 Case 2_1 보다는 상대적으로 높은 것으로 나타났다.

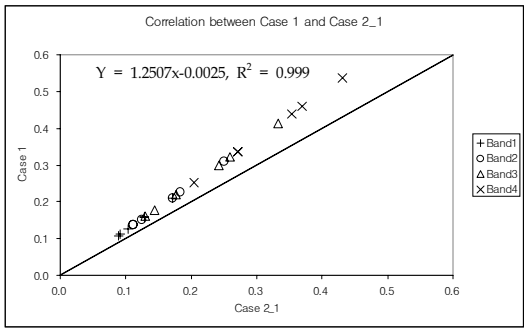

Fig. 4. Comparison between Case 1 and Case 2__1 reflectance

4. 결 론

영상기반의 대기보정 모델은 현장관측 자료를 이용하지 않는 대신 영상자료 내에 존재하는 haze를 효과적으로 제거하는데 그 목적이 있다. 즉, 다시 말해 영상자료만을 이용하여 대기의 영향을 제거한다는데 그 의미가 있다. 그러나 기존의 standard DOS, improved DOS 모델 및 1% reflectance가 가정된 DOS 모델의 경우 단순히 영상 내에서 최소 DN value만을 이용하여 haze를 제거할 뿐 영상촬영 당시의 대기상태 등을 무시함으로써 오히려 haze factor가 증가하거나, 이로 인한 과대보정(overcorrection) 등이 발생하는 문제점들이 있었다.

본 연구에서는 2005년 발사될 KOMPSAT-2 MSC 영상자료와 동일한 파장대역을 가지는 Landsat ETM+ 영상자료와 동시기에 지상에서 관측한 surface reflectance 자료를 이용하여 영상기반의 대기보정 모델을 각 case별로 세분화하여 실험하였다. 그 결과 TOA 기반의 reflectance의 경우 현장 관측치와 상당한 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 이는 영상 내에 존재하는 haze를 제거하지 않고는 지표분석 등에 그대로 사용하기에 한계가 있음을 의미한다. 한편 COST 모델을 기반으로 하는 Case 1의 경우 기존 선행연구에서와 마찬가지로 비교적 현장관측 자료와 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 그러나 Case 1 역시 E_{down}의 T_z diffuse 항을 0으로 가정한다는 물리적 고려를 배제한 한계를 가지고 있다. 따라서 T_z의 diffuse성분이 direct의 약 1/4 정도는 될 것으로 가정한 Case 2_1을 실험하였는데 그 결과 Case 1의 reflectance의 패턴과는 일치하였으나, 전반적으로 현장관측 자료보다는 낮은 reflectance를 나타냈다. 한편 기존 선행연구 결과로부터 AOD, ROD 등을 유추하여 실험한 Case 3 역시 현장관측 reflectance와 차이가 있음을 확인하였다.

향후 연구에서는 Case 2 모델을 보다 세분화하여 실험함과 동시에 KOMPSAT-2 MSC 영상자료의 특성을 고려한 대기보정 모델을 지속적으로 연구, 개발하고자 하며, 이를 위해서는 MSC 영상자료 검보정과 함께 종합적으로 수행되어져야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Barker, J.L., D.L. Ball, K.C. Leung, and J.A. Walker, "Prelaunch absolute radiometric calibration of the reflective bands on the Landsat-4 protoflight Thematic Mapper", *NASA Conference publication 2355, Early Landsat-4 Results*, 1985, 2:277-373.
2. Begni, G., "Selection of the optimum spectral bands for the SPOT satellite", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1985, 48(10):1613-1620.
3. Cess, R.D., E.G. Dutton, J.J. Deluisi, and F. Jiang, "Determining surface solar absorption from broadband satellite measurements for clear skies: Comparison with surface measurements", *Journal of Climate*, 1991, pp.236-247.
4. Chavez, P.S., Jr., "Atmospheric, solar, and M.T.F. corrections for ERTS digital imagery", *Proc. American Society of Photogrammetry Fall Conference*, Phoenix, Arizona, 1975, p.69.
5. Chavez, P.S., Jr., "An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data", *Remote Sensing of Environment*, 1988, 24:459-479.
6. Chavez, P.S., Jr., "Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1989, 55(9):1285-1294.
7. Chavez, P.S., Jr., "Comparison of spatial variability in visible and near-infrared spectral images", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1992, 58(7):957- 964.
8. Chavez, P.S., Jr., and D.K. MacKinnon, "Automatic detection of vegetation changes in the southwestern United States using remotely sensed images", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1994, 60(5):571-583.
9. Chavez, P.S., Jr., "Image-based atmospheric corrections-Revisited and improved", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1996, 62(9):1025-1036.
10. Cho, H.K., M.J. Jeong, J.H. Kim, and Y.J. Kim, "Dependence of diffuse photosynthetically active solar irradiance on total optical depth, *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(9):1-10.
11. Curcio, J.A., "Evaluation of atmospheric aerosol particle size distribution from scattering measurement in the visible and infrared", *J. Opt. Soc. Am*, 1961, 51:548-551.
12. Eckhardt, D.W., J.P. Verdin, and G.R. Lyford, "Automated update of and irrigated Lands GIS using SPOT HRV imagery", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1990, 56(11):1515-1522.
13. Fung, T., "An assessment of TM imagery for land-cover change detection", *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(4):681-684.
14. Hall, F.G., D.E. Strebel, J.E. Nickeson, and S.J. Goetz, "Radiometric rectification: Toward a common radiometric response among multidate, multisensor images", *Remote Sensing of Environment*, 1991, 35:11-27.
15. Jensen, J.R., and D.L. Toll, "Detecting residential land-use development at the urban fringe", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1982, 48(4):629-643.
16. Markham, B.L., and J.L. Barker, "Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exatmospheric reflectances and at-satellite temperatures", *EOSAT Landsat Technical Notes*, 1986, 1:3-8.
17. Moran, M.S., R.D. Jackson, P.N. Slater, and P.M. Teillet, "Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor

output", *Remote Sensing of Environment*, 1992, 41:169-184.

18. Rowan, L.C., P.H. Wetlaufer, A.F.H. Goetz, F.C. Billingsley, and J.H. Stewart, "Discrimination of rock types and detection of hydrothermally altered areas in south-central Nevada by the use of computer-enhanced ERTS images", *U.S. Geological Survey Professional Paper 883*, 1974, 35pp.
19. Slater, P.N., F.J. Doyle, N.L. Fritz, and R. Welch, "Photographic systems for remote sensing", *American Society of Photogrammetry Second Edition of Manual of Remote Sensing*, 1983, 1(6):231-291.
20. Sohn, B.J., D.S. Shin, and S.S. Lee, "Optical characteristics of the Yellow Sand from ground-based solar radiation measurements near the Yellow Sea", *Proceedings of International symposium on Remote Sensing*, 1998, pp.9-13.
21. Song, S., C.E. Woodcock, K.C. Seto, M.P. Lenney, and S.A. Macomber, "Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects", *Remote Sensing of Environment*, 2001, 75:230-244.
22. Vincent, R.K., "An ERTS multispectral scanner experiment for mapping iron compounds", *In proceedings of the Eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, MI, 1972, pp.1239-1247.

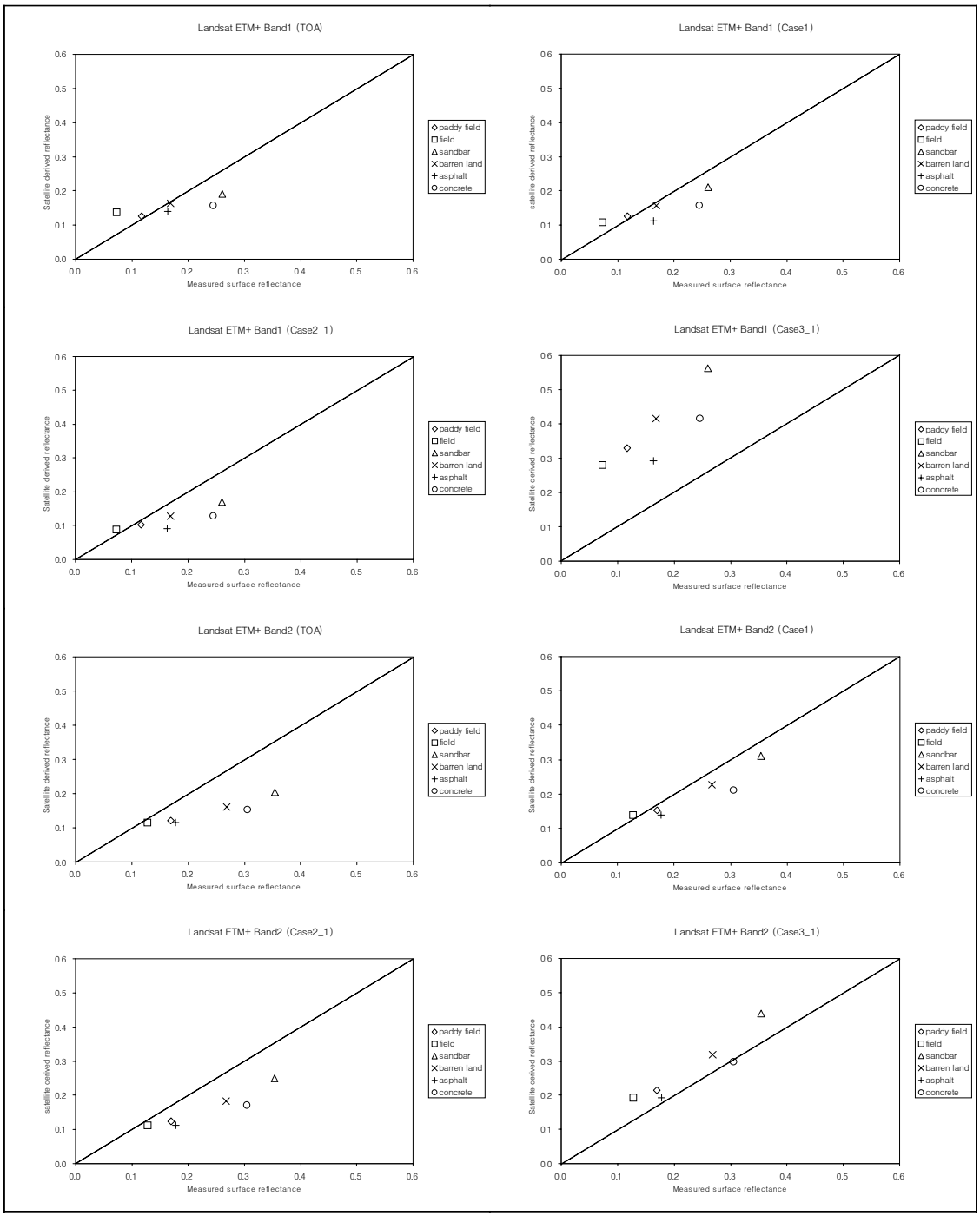

Fig. 1. Comparisons of satellite-derived reflectance and in-situ measurements for band 1 and band 2

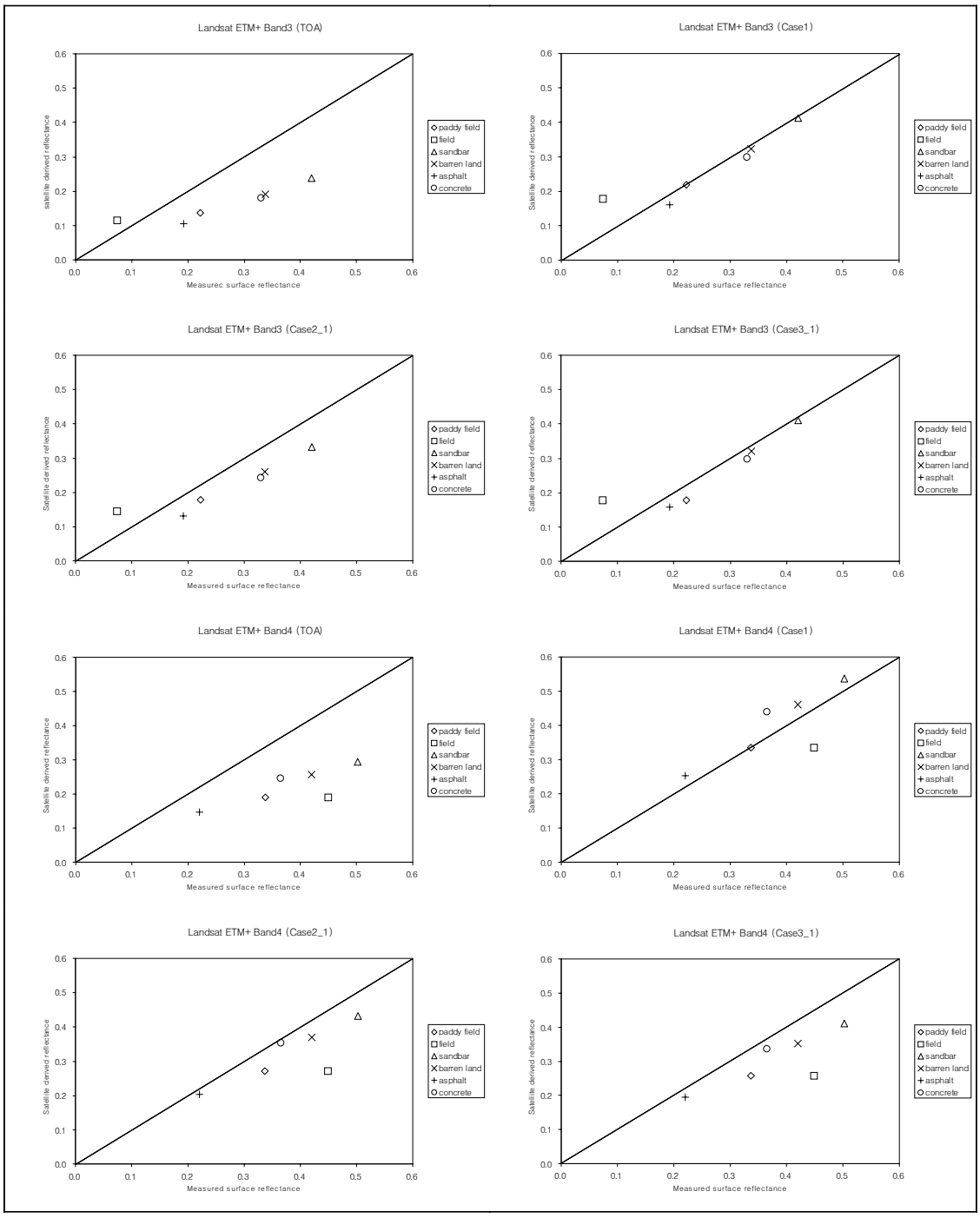

Fig. 2. Same as in Fig. 1 except for band 3 and band 4