

EO-1 Hyperion 초분광 영상의 밴드 접합 기법을 이용한 Landsat 8 (LDCM) OLI 센서의 방사 특성 검증

지 준 화[†]

퍼듀대학교 토목공학과

Validation of the Radiometric Characteristics of Landsat 8 (LDCM) OLI Sensor using Band Aggregation Technique of EO-1 Hyperion Hyperspectral Imagery

Junhwa Chi

School of Civil Engineering, Purdue University

Abstract : The quality of satellite imagery should be improved and stabilized to satisfy numerous users. The radiometric characteristics of an optical sensor can be a measure of data quality. In this study, a band aggregation technique and spectral response function of hyperspectral images are used to simulate multispectral images. EO-1 Hyperion and Landsat-8 OLI images acquired with about 30 minutes difference in overpass time were exploited to evaluate radiometric coefficients of OLI. Radiance values of the OLI and the simulated OLI were compared over three subsets covered by different land types. As a result, the index of agreement shows over 0.99 for all VNIR bands although there are errors caused by space/time and sensors.

Key Words : Radiometric calibration, Landsat-8, OLI, Hyperion, Band aggregation

요약 : 위성 영상 자료에 대한 품질의 향상과 안정화는 다양한 목적을 가진 사용자들을 만족시킬 수 있다. 특히 절대 방사 검/보정은 영상의 광학적 품질을 유지하기 위한 척도가 된다. 본 연구에서는 초분광 영상 밴드 접합 기법과 분광 반응도를 이용하여 다중 분광 센서의 가상화를 통해 절대 방사 보정 계수의 적합성을 판단하였다. 적합성 분석을 위해 약 30분 차이로 촬영된 EO-1 Hyperion과 Landsat-8 OLI 센서의 영상을 이용하였고, 서로 다른 특성을 지닌 토지 피복으로 구성된 3개 지역을 선정하여 복사 에너지 값을 비교 하였다. 그 결과, 시공간에 따른 차이, 센서 수준의 차이를 제외하고 모든 밴드에서 0.99 이상의 적합성을 보여 주었다.

접수일(2013년 8월 14일), 게재확정일(2013년 8월 23일).

[†] 교신저자: 지준화(junhwa.chi@gmail.com)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

1. 서론

원격탐사 분야 연구에 있어서 초석이 된 Landsat 1호의 발사 이후, 6호의 발사 실패와 2003년 Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper(ETM) + 센서의 Scan Line Corrector(SLC)-off로 인하여 오랜 기간 양질의 영상 공급이 순조롭지 않았지만(Storey *et al.*, 2005; Pringle *et al.*, 2009), 2013년 2월 11일, Landsat-8(LDCM: Landsat Data Continuity Mission)가 성공적으로 발사되어 원활한 영상 공급을 기대할 수 있게 되었다. Landsat-8은 ETM+와 EO-1 Advanced Land Imager(ALI) 센서를 발전시킨 공간 해상도 30 m의 다중분광 영상과 15 m인 전정색 영상을 획득하는 Operational Land Imager(OLI)와 100 m 공간해상도를 지닌 Thermal Infrared Sensor(TIS)를 탑재하고 있다(Markham *et al.*, 2010).

일반적으로 광학 영상은 사용자에게 배포되기 전에 영상의 품질을 보증하기 위해 반드시 방사 검정과 보정(Radiometric calibration/validation) 작업을 수행해야 한다(Dingirard and Slater, 1999; Sohn *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2012). 지표면에서 반사된 태양 복사 에너지(Radiance)는 대기를 거쳐 위성 센서에 감지하게 되는데, 센서에 기록된 복사 에너지 값과 화소값 사이에는 일반적으로 선형 관계가 성립되는데, 절대 방사 보정(Absolute radiometric calibration)을 통해 이 관계를 밝힐 수 있다(Slater *et al.*, 1996; Dingirard and Slater, 1999; Sohn *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2012).

위성 센서는 발사 전과, 발사 후, 내부 보정 장치에 의해 지속적으로 관리하게 되는데(Meygret *et al.*, 1997; Thorne *et al.*, 1997; Thome *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 2012), OLI 센서 역시 이러한 과정을 거쳐 영상과 함께 절대 방사 보정 계수를 제공하고 있다. 하지만 센서에 기록되는 복사 에너지 값은 계절, 지역, 그리고 센서의 상태에 따라 그 변화가 심하기 때문에 제공되는 계수가 항상 정확한 복사 에너지값을 대표하는 것이 아니므로 계수의 적합성 분석이 필요하다. 센서의 분광학적 특성과 적합성을 분석하기 위한 방법으로는 영상이 촬영되는 시간 전후로 지상에서 다양한 반사율을 지닌 타겟과 정확한 대기 정보, 센서의 기하학적 정보, 복사 전달 모델(Radiative transfer model) 등을 이용할 수 있지만, 대기 정보를 정확히 모델링하기 위해서는 전문적인 지식이 필요하고 반

사율 측정시에도 많은 인력과 시간이 소모되어 어려움이 따른다. 따라서, 방사 보정이 잘 되어 운용되고 있는 위성과의 역검정(Cross validation) 방법이 대안으로 이용되고 있다(Thome *et al.*, 1998; Teillet *et al.*, 2001).

밴드폭이 넓은 다중 분광 영상은 센서마다 파장 대역이 다르므로 이종 센서간의 직접적인 비교가 힘들지만, 영상 기반의 분광 반사 측정기(Imaging spectrometer)라 불리는 초분광 원격탐사 센서는 분광 밴드의 폭이 좁고 연속적인 특징을 가지므로 다중분광 센서를 가상으로 실험할 수 있다. 이러한 기법은 센서의 개발 단계에서 센서의 분광학적 특징을 미리 알 수 있기 때문에 널리 사용되고 있다(Jarecke *et al.*, 2001; Barry *et al.*, 2002; Pahlevan and Schott, 2013). 이에, 본 연구에서는 초분광 센서인 Hyperion 영상과 OLI 센서의 상대적 분광 반응도(Relative spectral response function)를 이용하여 가상의 OLI 영상을 만들고, 이를 동일 시기에 촬영된 실제 OLI 영상과 비교함으로써 OLI의 다중 분광 밴드에서의 분광 반사 특성과 절대 방사 보정 계수를 검증하고자 한다.

2. 사용 영상의 분광 특성

1) EO-1 Hyperion

2000년 NASA에서 발사된 EO-1 위성은 다중 분광 센서인 ALI, 초분광 센서인 Hyperion, 대기 보정용 센서 Atmospheric Corrector(AC)를 탑재하고 Landsat과 동일 궤도를 시간 차이를 두고 돌고 있다(Hearn *et al.*, 2001; Pearlman *et al.*, 2001). 과거 높은 비용과 영상 획득에 제한적이었던 항공용 초분광 센서를 대신한 Hyperion은 넓은 지역을 지속적으로 모니터링할 수 있는 위성 기반 초분광 센서이며, ALI는 Landsat-8 OLI의 시험용 센서로 OLI와 비슷한 밴드 구성을 가지고 있다. Hyperion 센서는 10 nm의 폭을 지닌 연속된 밴드를 통해 400 nm에서 2400 nm 파장대의 자료를 12 bit의 방사 해상도, 30 m의 공간 해상도로 기록한다. 일반적으로 총 242개 밴드중 대기 흡수 밴드와 신호대 잡음비(SNR: Signal-to-Noise Ratio)가 낮은 밴드를 제외한 196개 밴드가 이용된다. Hyperion 센서의 분광 특성은 중심 파장(CW: Center Wavelength)과 Full Width Half Maximum(FWHM)를 통

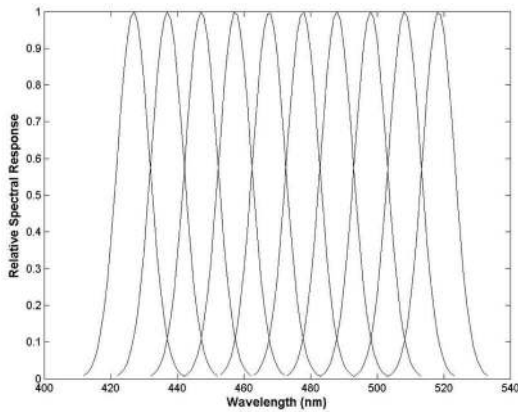


Fig. 1. Spectral response function of the first 10 bands of Hyperion.

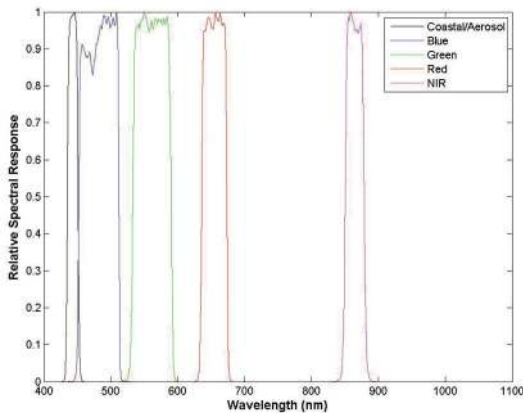


Fig. 2. Spectral response function of the VNIR bands of OLI.

해 정의된 Gaussian 함수를 이용해 정의할 수 있는데(Liao *et al.*, 2000), Hyperion의 첫 10개 밴드의 분광 반응도 곡선을 Fig. 1에 표시하였다.

2) Landsat-8 (LDCM) OLI

ETM+와 ALI 센서의 다음 세대인 OLI는 감지기(Detector)들이 선형으로 배열된 Pushbroom(Along-track) 센서로, 긴 integration 시간으로 높은 SNR(~130:1)의 자료를 획득할 수 있다. 공간 해상도는 30 m로 ALI와 ETM+와 동일하지만, 12 bit의 방사 해상도는 전 세대 센서인 ETM+의 8 bit보다 개선되어 더 정밀한 복사 에너지 값을 기록할 수 있다. 또한, 클로로필 흡수 파장대인 443 nm 중심의 해안/에어로졸(Coastal/Aerosol) 관련 밴드가 추가된 것이 특징이다(Markham *et al.*, 2010; Pahlevan and Schott, 2013). OLI의 VNIR(Visible-Near Infrared) 영역대 밴드의 분광 반응도 곡선을 Fig. 2에 표시하였는데

(Barsi *et al.*, 2011), 일반적으로 중심 파장에서 반응도가 높고 끝부분에서 낮지만 Hyperion의 완전한 Gaussian 곡선과는 차이가 있음을 알 수 있다.

3. 연구 방법

본 연구에서는 OLI 센서의 방사 특성과 절대 방사 보정 계수를 검증하기 위해 다음과 같은 방법을 사용하였다.

1) Hyperion의 밴드 집합 (Band aggregation)

밴드 집합의 목적은 좁은 밴드폭(10 nm)을 가진 Hyperion의 여러 밴드를 합성하여 OLI와 같은 다중 분광 밴드를 가상으로 만드는 데 있다. 먼저 OLI 밴드의 파장 대역에 해당하는 Hyperion 밴드들을 선정하였고, Fig. 1과 Fig. 2에 표시한 것처럼 Hyperion과 OLI의 분광 반응도 곡선을 이용하여 다음과 같은 수식으로 가중치(weighted sum)를 계산하였다(Jarecke *et al.*, 2001; Barry *et al.*, 2002; Pahlevan and Schott, 2013).

$$\mathbf{W}_{zb} = \sum_{k=\lambda_1}^{k=\lambda_2} \mathbf{G}_{zk} \times \mathbf{F}_{kb} \quad (1)$$

$$\mathbf{P}_{zb} = \frac{\mathbf{W}_{zb}}{\text{FWHM} \times \sum_z \mathbf{W}_{zb}} \quad (2)$$

$$\mathbf{Y}_b = \sum_z \mathbf{P}_{zb} \times \mathbf{X}_b \quad (3)$$

수식 1과 2는 해당 OLI 밴드의 파장대를 지닌 Hyperion 밴드들의 정규화된 가중치를 계산하기 위한 것으로, 수식 1에서 \mathbf{W} 는 정규화되지 않은 Hyperion의 가중치값으로, \mathbf{G} 는 Hyperion의 Gaussian 형태의 분광 반응도, k 는 해당 Hyperion 밴드의 파장 범위, z 는 Hyperion의 밴드이며, \mathbf{F} 는 OLI의 분광 반응도, b 는 OLI의 밴드이다. 수식 2에서 \mathbf{P} 는 정규화된 Hyperion의 가중치값이고, FWHM 은 해당 파장대에서의 Hyperion의 FWHM이다. 본 연구에서는 수식 1과 2에서 계산된 가중치값과 Hyperion의 복사 에너지 값(\mathbf{X})을 이용하여 수식 3에서 가상화된 OLI의 복사 에너지 값(\mathbf{Y})을 계산하였다.

2) 복사 에너지 값 변환

분광 해상도와 특성이 다른 이종 센서간의 정량적인 비교를 위해서는 화소값은 반드시 실제 센서에 기록되

Table 1. Absolute radiometric calibration coefficients of OLI.

Bands	CW (Bandwidth)	$L_{MIN\lambda}$	$L_{MAX\lambda}$	$G_{rescale}$	$B_{rescale}$
	(nm)	$W/(m^2 sr \mu m)$		$(W/m^2 sr \mu m)/DN$	$W/(m^2 sr \mu m)$
Band 1 – Coastal/Aerosol	443 (20)	-62.4141	755.7981	1.2485E-02	-62.4265
Band 2 – Blue	482 (65)	-63.6459	770.7152	1.2732E-02	-63.6586
Band 3 – Green	562 (75)	-58.2782	705.7151	1.1658E-02	-58.2898
Band 4 – Red	655 (50)	-49.3581	597.6975	9.8736E-03	-49.3679
Band 5 – NIR	865 (40)	-29.9510	362.6895	5.9914E-03	-29.9570
Band 6 – SWIR 1	1610 (100)	-7.5462	91.3797	1.5095E-03	-7.5477
Band 7 – SWIR 2	2200 (200)	-2.4548	29.7256	4.9105E-04	-2.4552
Band 8 – PAN	590 (180)	-55.5987	673.2684	1.1122E-02	-55.6099
Band 9 – Cirrus	1375 (30)	-12.3081	149.0442	2.4621E-03	-12.3106

는 복사 에너지 값으로 변환되어야 한다. Hyperion의 경우 단순 비율화된 복사 에너지 값으로 제공되므로 VNIR, Short Wave Infrared(SWIR)에 해당하는 비율값 (VNIR: 400, SWIR: 800)을 이용하여 간단히 센서에 기록되는 복사에너지 값을 구할 수 있지만, OLI의 경우 각 밴드별로 변환에 필요한 계수가 제공되므로 이를 이용하여 복사 에너지 값을 얻을 수 있다. OLI 센서의 절대 방사 보정을 위해 제공되는 계수값을 Table 1에 표시하였는데, 본 연구에서는 다음과 같은 1차 선형식을 통해 복사 에너지 값을 계산하였다(Chander *et al.*, 2009).

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{MAX\lambda} - L_{MIN\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) (Q_{cal} - Q_{calmin}) + L_{MIN\lambda} \quad (4)$$

또는

$$L_{\lambda} = G_{rescale} \times Q_{cal} + B_{rescale} \quad (5)$$

$$G_{rescale} = \frac{L_{MAX\lambda} - L_{MIN\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}}$$

$$B_{rescale} = \left(\frac{L_{MAX\lambda} - L_{MIN\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) Q_{calmin}$$

여기서 L_{λ} 는 해당 밴드 λ 에서 센서에 도달하는 복사에너지, Q_{cal} 은 정량화되어 보정된 화소값(DN), Q_{calmax} 와 Q_{calmin} 은 $L_{MAX\lambda}$ 와 $L_{MIN\lambda}$ 에 해당하는 최대, 최소의 정량화된 보정 화소값, $L_{MAX\lambda}$ 와 $L_{MIN\lambda}$ 은 센서에 기록되는 최대, 최소 복사 에너지 크기이다. OLI 센서는 12 bit의 방사 해상도를 가지지만 16 bit로 변환되어 배포되므로 $Q_{calmax} = 65535$ 이다.



Fig. 3. Study area collected by (a) Hyperion and (b) OLI.

4. 실험 자료 및 분석 결과

서로 다른 센서에서 획득된 영상을 정량적으로 분석하기 위해서는 동일한 지역, 날짜, 시간, 그리고 동일한 공간 및 방사 해상도를 지닌 센서에서 촬영된 영상을 이용하는 것이 이상적이다. 본 연구에서는 이를 위하여 Fig. 3에 표시한 것 처럼 2013년 7월 5일에 촬영된 미국 California주에 위치한 San Francisco 북동쪽 지역의 Hyperion과 OLI 영상을 사용하였다. 두 영상의 시간차는 약 30분이며 OLI가 늦게 촬영되었다. 본 연구에서 사용된 Hyperion 영상은 SNR이 낮고(~50:1) 센서의 노후화가 심한 탓으로 줄무늬 현상이 나타나서 Local window

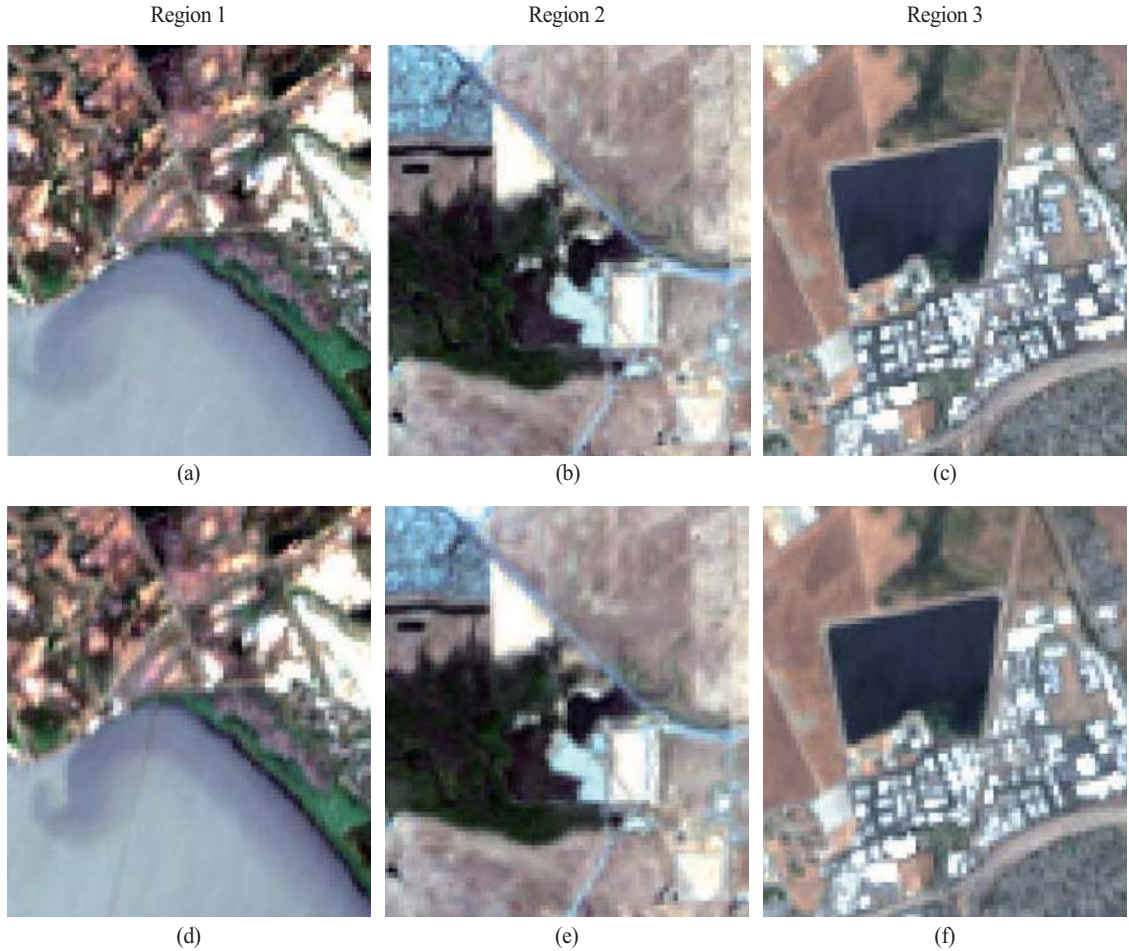


Fig. 4. Natural color composite images of OLI ((a), (b), (c)) and the simulated OLI ((d), (e), (f)) over 3 study areas.

normalization 기법을 이용하여 줄무늬를 보정하였다. 그러나, SWIR 영역의 밴드들은 줄무늬 현상을 보정하기 힘들 정도로 심하고, SNR이 VNIR 보다 매우 낮기 때문에, 본 연구에서는 제외하였다. 따라서 VNIR 밴드들만을 사용하여 다음과 같이 적합성 분석을 하였다.

먼저 각 영상에서 보이는 토지피복의 특성에 따라 Fig. 4에 표시한 것처럼 90×80 픽셀 크기를 갖는 세계 지역을 선정하였다. 첫번째 지역 (Region 1)은 해양과 그 인접 지역이며, 두번째 지역 (Region 2)은 식생과 나대지가 주를 이루며, 세번째 지역 (Region 3)은 저수지와 도심지, 나대지가 적절히 분포하고 있는 지역이다. OLI 영상과 가상 OLI 영상의 정량적인 분석을 하기 위하여 산포도 (Scatter plot)와 수식 6을 이용하여 적합성 색인 (Index of agreement) D 를 구하였다. D 는 화소값의 1대1 비교를 통

해 0과 1사이의 값으로 나타나는데 1은 두 영상간의 완벽한 적합도를 의미한다.

$$D = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P'_i| + |O'_i|)^2} \right] / N \quad (6)$$

여기서 P 는 가상 OLI 영상의 i 번째 화소값, O 는 OLI 영상의 i 번째 화소값, P' 는 P 와 가상 OLI 영상의 평균 화소값의 차이, O' 는 O 와 OLI 영상의 평균 화소값의 차이, N 은 총 화소의 개수를 의미한다.

Table 2의 적합성 색인표에서 나타난 것처럼 각 지역들이 전반적으로 0.99 이상의 매우 높은 적합성을 보여주지만, 일반적으로 지역에 관계없이 파장이 길수록 D 가 증가함을 알 수 있다. 이는 짧은 파장대에서 대기 중 산란과 흡수와 같은 대기 감쇄 효과가 비교적 크게 작용하기 때문이며, 반대로 대기 감쇄 효과가 적게 일어나는

Table 2. Index of agreement comparison according to spectral bands and regions.

	Region 1	Region 2	Region 3
Band 1	0.9951	0.9965	0.9994
Band 2	0.9975	0.9984	0.9996
Band 3	0.9986	0.9992	0.9997
Band 4	0.9993	0.9996	0.9998
Band 5	0.9998	0.9985	0.9998
Average	0.9981	0.9984	0.9997
Std. Dev.	0.0019	0.0012	0.0002

긴 파장 영역에서는 두 영상 간의 센서 도달 복사 에너지 차이가 작아지기 때문이다. 또한 Hyperion의 SNR이 짧은 파장대에서 비교적 낮은 것도 하나의 원인으로 추정된다.

각 지역별로 살펴보면, 첫번째 지역의 경우 다른 지역보다 비교적 낮은 D 값을 가지며 밴드간 편차도 0.0019로 가장 큰데, 특히 Band 1에서의 D 값은 0.9951로 가장 낮다. 이 밴드는 클로로필과 관련 있는 해양 정보를 얻기 위한 밴드인데 두 영상간의 시간 차이로 인해 해류의 흐름 변화가 생겨 비롯된 것으로 보인다. 이러한 변화는 Fig. 4(a), (d) 영상을 통해서도 확인할 수 있다. 일반적으로 파장이 길어짐에 따라 적합성이 증가하지만 두번째 지역의 경우는 근적외선 밴드 (Band5) 에서 0.9985로 적합성이 감소하였다. 식생의 생물량은 근적외선 영역에서 매우 민감하게 반응하는데 두 영상간의 시차에서 Biomass 등 생물량의 변화와 이로 인한 복사 에너지의 변화가 있었을것으로 추정된다. 세번째 지역의 경우, 비교적 복사 에너지의 변화가 적은 저수지, 나대지, 도심지 등으로 구성되어 있다. 그 결과, Table 2에서 보는 바와 같이 모든 밴드에서의 평균 적합성이 0.9997로 가장 높았고 표준편차도 0.0002로 가장 낮아 파장대에 상관없이 매우 일정한 적합성 값을 보여주었다.

전반적으로 모든 지역에서 모든 파장대에서 높은 적합성을 지녔지만, Fig. 5에서 보는 바와 같이 선형 중심에서 벗어난 이상값들도 존재한다. 이러한 원인은 다음과 같이 두가지로 분석할 수 있다. 첫째, 두 영상간의 기하보정에서 발생할 수 있는 약 10 m 정도의 오차와 시간 차이에 따른 해류의 변화 등과 같은 영상 수준의 오차이다. 또 다른 이유는 OLI(~130:1)와 비교하여 Hyperion

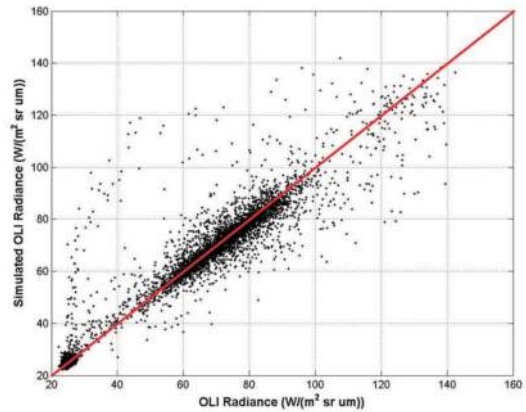


Fig. 5. Scatter plot of band 5 in Region 1.

센서의 낮은 SNR(~50:1), 센서 노후에 따른 Hyperion의 이상 화소값, 그리고 완벽하기 어려운 줄무늬 보정 작업 등의 전처리 작업에서 생긴 센서 수준의 오차라 추정할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 최근 발사된 Landsat-8에 탑재된 OLI 센서의 VNIR 밴드들에 대한 분광학적 특성과 절대 방사 보정 계수들의 적합성을 Hyperion 센서에서 획득한 초분광 영상의 밴드 접합 기법을 이용하여 비교하였다. 그 결과, 두 영상간의 시간 차이와 SNR 차이 등이 존재하였지만 모든 밴드에 걸쳐 비교적 높은 0.99 이상의 적합성을 보여주었다. 이는 OLI 센서가 복사 에너지를 정확히 기록하고, 제공되는 절대 방사 보정 계수 또한 신뢰성이 높다고 볼 수 있다.

광학 영상은 발사후에도 센서의 노후에 따른 변화를 지속적으로 감지하고 이를 보정하여야 한다. 하지만 이를 위해선 많은 시간과 인력, 대기에 대한 정확한 이해가 필요하다. 본 연구에서 제시한 초분광 영상을 활용한 역검정 방법은 이러한 어려움들을 극복할 수 있으며, 다양한 센서, 특히 가까운 미래에 발사될 ESA EnMAP, NASA HypIRI 등과의 검정을 통해 센서의 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

References

- Barry, P.S., J. Mendenhall, P. Jarecke, M. Folkman, J. Pearlman, and B. Markham, 2002. EO-1 Hyperion hyperspectral aggregation and comparison with EO-1 Advanced Land Imager and Landsat 7 ETM+, *Proc. of 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Toronto, Canada, Jun. 24-28, pp. 1648-1651.
- Barsi, J.A., B.L. Markham, and J.A. Pedelty, 2011. The operational land imager: spectral response and spectral uniformity, *SPIE Optical Engineering+ Applications*, 81530G-81530G.
- Chander, G., B.L. Markham, and D.L. Helder, 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors, *Remote Sensing of Environment*, 113(5): 893-903.
- Dingirard, M., and P.N. Slater, 1999. Calibration of space-multispectral imaging sensors: A review, *Remote Sensing of Environment*, 68(3): 194-205.
- Hearn, D.R., C.J. Digenis, D.E. Lencioni, J.A. Mendenhall, J.B. Evans, and R.D. Welsh, 2001. EO-1 Advanced Land Imager overview and spatial performance, *Proc. of 2001 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Sydney, NSW, Jul. 9-13, pp. 897-900.
- Jarecke, P., P. Barry, J. Pearlman, and B. Markham, 2001. Aggregation of Hyperion hyperspectral spectral bands into Landsat-ETM+ spectral bands, *Proc. of 2001 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Sydney, NSW, Jul. 9-13, pp. 2822-2824.
- Kim, J., B. Sohn, E. Chung, H. Chun, A. Suh, K. Kim, and M. Oh, 2008. Simulation of TOA visible radiance for the ocean target and its possible use for satellite sensor calibration, *Korean Journal of Remote Sensing*, 24(6): 535-549.
- Lee, K., S. Park, S. Kim, H. Lee and J. Shin, 2012. Radiometric characteristics of Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) for land applications, *Korean Journal of Remote Sensing*, 28(3): 277-285.
- Liao, L.B., P.J. Jarecke, D.A. Gleichauf, and T.R. Hedman, 2000. Performance characterization of the Hyperion imaging spectrometer instrument, *Proc. of International Symposium on Optical Science and Technology*, pp. 264-275.
- Markham, B.L., P.W. Dabney, J.E. Murphy-Morris, J.A. Pedelty, E.J. Knight, G. Kvaran, and J.A. Barsi, 2010. The Landsat data continuity mission operational land imager (OLI) radiometric calibration, *Proc. of 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Honolulu, HI, Jul. 25-30, pp. 2283-2286.
- Meygret, A., M. Dingirard, and P. Henry, 1997. Eleven Years of Experience and Data in Calibrating SPOT HRV Cameras, *Proc. of International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, Hanover.
- Pahlevan, N., and J.R. Schott, 2013. Leveraging EO-1 to Evaluate Capability of New Generation of Landsat Sensors for Coastal/Inland Water Studies, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(2): 360-374.
- Pearlman, J., S. Carman, C. Segal, P. Jarecke, P. Clancy, and W. Browne, 2011. Overview of the Hyperion imaging spectrometer for the NASA EO-1 mission, *Proc. of 2001 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Jul. 9-13, Sydney, NSW, pp. 3036-3038.
- Pringle, M.J., M. Schmidt, and J.S. Muir, 2009. Geostatistical interpolation of SLC-off Landsat ETM+ images, *ISPRS Journal of Photogrammetry*

- and Remote Sensing*, 64(6): 654-664.
- Slater, P.N., S.F. Biggar, K.J. Thome, D.I. Gellman, and P.R. Spyak, 1996. Vicarious radiometric calibrations of EOS sensors, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 13(2): 349-359.
- Sohn, B., S. Yoo, Y. Kim, and D. Kim, 2000. Examining a vicarious calibration method for the TOA radiance initialization of KOMPSAT OSMI, *Korean Journal of Remote Sensing*, 16(4): 305-313.
- Storey, J., P. Scaramuzza, G. Schmidt, and J. Barsi, 2005. Landsat 7 scan line corrector-off gap filled product development, *Proc. of PECORA 16 Conference, Sioux Falls, SD, Oct. 22-27*, pp. 23-27.
- Teillet, P.M., J.L. Barker, B.L. Markham, R.R. Irish, G. Fedosejevs, and J.C. Storey, 2001. Radiometric cross-calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM sensors based on tandem data sets, *Remote Sensing of Environment*, 78(1): 39-54.
- Thome, K., K. Arai, S. Hook, H. Kieffer, H. Lang, T. Matsunaga, A. Ono, 1998. ASTER preflight and inflight calibration and the validation of level 2 products, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4): 1161-1172.
- Thorne, K., B. Markham, P.S. Barker, and S. Biggar, 1997. Radiometric calibration of Landsat, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63(7): 853-858.