

## 고해상도 지구관측위성 카메라의 복사신호량에 대한 통합적 모델링

장홍술\*, 정대준\*\*, 육영춘\*\*\*, 이승훈\*\*\*\*

# Integrated Radiometric Signal Modeling for High Resolution Earth Observation Satellite Camera

Hong-Sul Jang\*, Dae-Jun Jung\*\*, Young-Chun Youk, Seung-Hoon Lee\*\*\*\*

### Abstract

In this study, the radiometric signal modeling is performed for the high resolution earth observation system in visible spectral range from space. The modeling includes solar radiation as a source of the radiometric energy, atmosphere and surface albedo of earth, and the spaceborne camera characteristics for the integrated modeling. The final output of the radiometric modeling is the number of electron produced by the detector of electro-optical camera.

### 초 록

본 연구에서는 우주에서 가시광 영역으로 지구의 지표면을 고해상도로 촬영하는 위성 탑재카메라를 위한 복사에너지 신호량을 모델링하였다. 복사에너지 모델링은 광원으로서의 태양과 지구대기 및 지표면 반사도, 카메라의 특성 등을 포함하며 최종 계산 결과는 광전자카메라의 광검지기에서 생성되는 전자의 수로 나타난다.

키워드 : 복사신호량(radiometric signal), 고해상도(high resolution), 지구관측 카메라(earth observation camera)

## 1. 서 론

우주에서의 지표면 촬영을 위한 카메라는 기본적으로 지표면이나 대기에 의해 반사된 태양복사 에너지와 지구 자체의 복사 에너지를 촬영한다. 이러한 복사에너지의 특성과 정량적 수치에 대해 모델링을 하면 위성카메라의 설계 및 성능 분석이 가능하다.

일반적으로 태양 복사에너지나 지구의 복사에너지 모델링은 플랑크의 흑체 복사 모델을 적용하고 지구대기의 복잡한 영향과 현상은 주어진 대기조건에서의 복사량 계산이 가능한 전문 프로그램을 적용한다.[1] 이러한 기본적인 복사 모델링에 관측하고자 하는 지표면 목표물의 크기와 관측고도 그리고 관측하는 탑재카메라의 특성을 추가할 경우 탑재카메라를 포함한 통합적 복사에너지 모델링이 가능하다.

접수일(2007년12월14일), 수정일(1차 : 2008년 10월 23일, 2차 : 2008년 10월 27일, 게재 확정일 : 2008년 11월 1일)

\* 위성광학기술팀/hsjang@kari.re.kr

\*\* 위성광학기술팀/djjung@kari.re.kr

\*\*\* 위성광학기술팀/ycyouk@kari.re.kr

\*\*\*\* 위성광학기술팀/shlee@kari.re.kr

## 2. 복사에너지 모델링

### 2.1 복사에너지의 흐름

지표면 관측에서 관측되는 복사에너지는 그림 1과 같은 경로를 거치게 되는데 복사에너지의 흐름을 정량적으로 모델링하기 위해서는 복사원에 해당하는 태양과 지표면을 포함하는 지구대기 및 관측 카메라의 복사 특성이 모델링이 되어야 한다.

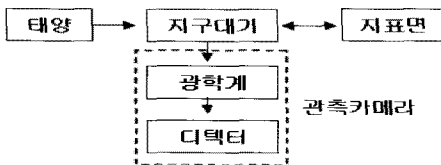


그림 1. 고해상도 지구관측 카메라의 복사에너지 흐름

### 2.2 복사광원 모델링

지구표면 촬영의 복사에너지 광원은 태양복사에너지와 지구복사에너지이다.

#### 2.2.1 태양복사

태양복사에너지는 플랑크의 흑체 복사에너지 모델링 식을 이용하면 계산이 되는데 식(1)과 같이 표시된다.[1]

$$M_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 [e^{C_2/\lambda T} - 1]} \quad (1)$$

식(1)에서  $C_1 = 3.74151 \times 10^8 \text{ W/m}^2 \mu\text{m}^4$

$C_2 = 1.43879 \times 10^4 \mu\text{m K}$

태양의 분광복사출사도(spectral radiant exitance)  $M_{\lambda}$ 은 태양 표면의 단위면적당 단위 파장간격에서 방출되는 에너지로 단위는  $\text{W}/(\text{m}^2 \mu\text{m})$ 로 표시되며  $\lambda$ 와  $T$ 는 각각 파장과

절대온도이다. 태양복사 에너지가 우주공간을 지나 지구의 대기표면(TOA, top of atmosphere)의 단위면적에 도착하는 복사에너지인 분광복사 조도(spectral irradiance)는 태양표면을 완전확산면(Lambertian surface)으로 가정하고 지구와 태양의 거리  $D$ 와 태양의 단면적  $A_s$ 를 이용하면 식(2)와 같이 표시된다.

$$E_{\lambda}^0 = \frac{M_{\lambda}}{\pi} \times \frac{A_s}{D^2} \quad (2)$$

식(1)과 식(2)의 단위는 동일하며 단위에 각도는 포함되어 있지 않다.

그림 2는 플랑크 모델을 이용해 지구대기의 외각 표면에서 계산한 태양(온도 5900K 가정)의 파장에 따른 복사조도 분포이다. 복사량을 계산해 주는 상용 프로그램인 MODTRAN의 계산 결과와도 거의 비슷한 분포를 보여준다. 약간의 차이가 나는 것은 실제 태양 대기에는 좁은 흡수선이 있기 때문이다.

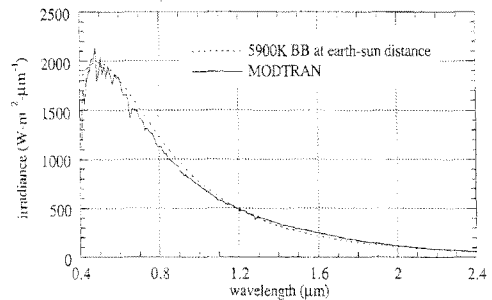


그림 2. 태양의 흑체 복사 에너지 분포[1]

#### 2.2.2 지구 복사

태양복사와 동일한 흑체 복사를 가정할 경우 지구의 온도를 300K로 하면, 지구의 복사조도는 그림3의 결과와 같다. 지구의 자체 복사 에너지는 태양의 복사조도 에너지에 비해서는 상대적으로 적은 양이며 에너지 분포가 적외선 영역에 치우쳐 있으므로 가시광선 영역에서는 무시된다.

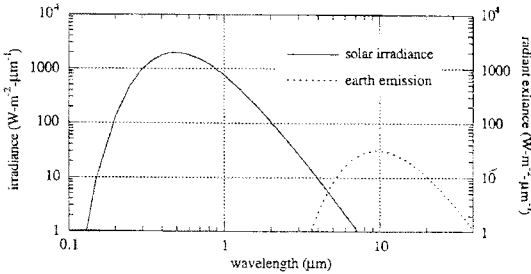


그림 3. 지구의 흑체 복사 에너지 분포[1]

## 2.3 대기효과 및 탑재체 입사 복사

### 2.3.1 탑재체 입사 복사 종류

지구 대기를 통과하면서 태양복사에너지는 그림4에서 볼 수 있듯이 크게 세 가지 경로와 과정을 거치는 것으로 알려져 있다.[1]

지표면 직접 반사(un-scattered surface reflected)에너지  $L_{\lambda}^{su}$ 는 태양복사에너지가 산란(scattering)이 없이 대기를 통과하여 지표면에 반사되어 다시 대기를 통과한 후, 탑재체의 구경에 입사하는 에너지이다. 그리고 하향산란복사(down scattered surface reflected) 에너지  $L_{\lambda}^{sd}$ 는 태양복사에너지가 대기를 통과하는 과정에 산란한 후 지표면에 반사되어 입사하는 에너지이고, 대기산란복사(Path-scattered)  $L_{\lambda}^{ps}$ 는 대기 중에서 산란된 후, 지표면에 가질 않고 바로 탑재체에 입사하는 에너지 이다. 이러한 여러 가지 다른 경로는 가지는 태양복사에너지의 합이 최종적으로 위성의 탑재체(광학계)에 입사하게 되는 복사에너지 이다.[1]

$$L_{\lambda}^s = L_{\lambda}^{su} + L_{\lambda}^{sd} + L_{\lambda}^{ps} + \dots \quad (3)$$

탑재체의 광학계에 입사하는 복사에너지는 지표면부터의 단위 입체각(solid angle)에 대한 복사에너지(radiance)로 나타내는데 이는 지상의 단위목표물(해상도에 해당하는 지상목표물 크기)에

대한 복사에너지 계산에 용이하기 때문이다.

경로에 따라 식(3)의 복사에너지 요소는 식(2)의 지구대기에 도착한 태양복사에너지로부터 계산이 되는데 대기의 상태나 지표면의 상태에 따라 계산되며, 이러한 계산은 MODTRAN과 같은 전문 프로그램으로 계산이 된다.

$L_{\lambda}^s$ 의 단위는 “W/(단위면적\*단위과장간격\*단위입체각)”으로 표시된다.

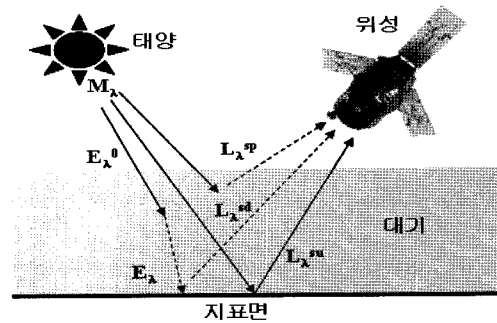


그림 4. 탑재체의 입사 복사에너지 경로

### 2.3.2 탑재체 초점면 입사 복사량

탑재체에 입사하는 복사에너지는 탑재체의 광학계에 입사하는 에너지를 나타내는데, 일반적으로 지표면의 단위목표물에 해당하는 탑재체의 단위시야각(IFOV, instantaneous field of view) 안에서 입사하는 모든 복사에너지를 말한다. 그림 5에서처럼  $L_{\lambda}^s$  중에서 탑재카메라에서 바라본 지표면단위목표물의 시야 안으로부터 입사하는 전체 복사에너지의 합이다.

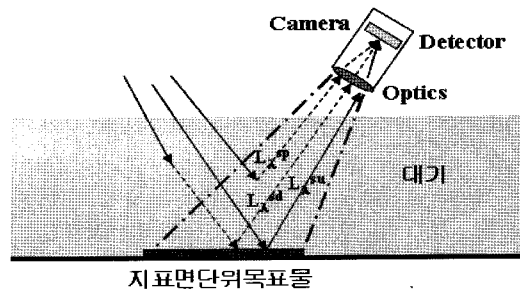


그림 5. 단위시야각을 통과하는 복사 에너지

탐재체의 단위시야각에서 광학계를 통과한 에너지는 초점면의 단위 디텍터 화소에 입사하는데 지표면단위목표물의 면적  $A_t$ 와 탐재 광학계의 유효구경면적  $A_o$  관측고도  $H$ , 광학계의 투과율  $\tau_o$  등으로 나타내면 식(4)와 같다. 식(4)에서  $A_o/H^2$ 는 탐재체 구경의 입체각에 해당한다.

$$E_{\lambda}^d = L_{\lambda}^s \times A_t \times \frac{A_o}{H^2} \times \tau_o \quad (4)$$

지표면단위목표물의 시야각에서의 복사에너지가 디텍터에 입사하는 관계를 기하학적으로 나타낸 그림6을 이용하면 식(4)의 지표면단위목표물 면적과 광학계의 유효구경 면적은 디텍터단위화소의 크기와 광학계의 F수(F number)로 표시가 가능하며, 식(4)는 식(5)와 같이 표시되어 태양복사에너지와 광학계특성 및 디텍터 특성을 포함하게 된다.

$$E_{\lambda}^d = L_{\lambda}^s \times \tau_o \times \pi \times \frac{A_d}{4F^2} \quad (5)$$

식(5)를 특정 파장영역으로 적분하면 식(6)이 된다.

$$E^d = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\pi A_d}{4F^2} L_{\lambda}^s \tau_o d\lambda \quad (6)$$

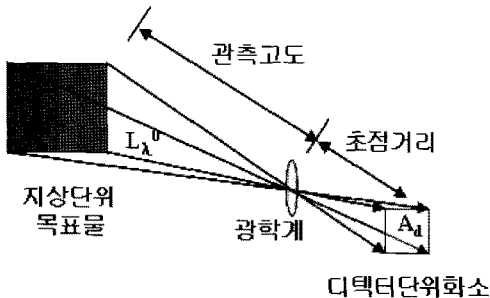


그림 6. 초점면 입사의 기하학적 관계

### 2.3.3 탐재체 초점면에서의 전자발생량

초점면에 입사한 에너지는 광전자 효과에 의해 전자를 발생시키는데, 초점면의 광검지기 단위화소에 발생하는 전자의 수  $\Phi_d$ 는 촬영하는 시간  $T_i$ 와 전자 발생효율  $Q_e$  광자에너지  $\epsilon_p(\lambda) = h\nu$ 를 이용하면 식 (7)과 같이 표시된다.

$$\Phi_d = T_i \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\pi A_d}{4F^2} L_{\lambda}^s \tau_o \frac{Q_e}{\epsilon_p(\lambda)} d\lambda \quad (7)$$

식(7)의  $T_i$ 는 촬영시간으로 지구의 자전속도와 위성의 지표면 속도(Vg) 및 지표면단위 목표물 크기인 지상해상도(GSD, ground sampling distance), 시간지연 촬영(TDI, time delay integration) 단계에 의해 식(8)과 같이 계산된다.

$$T_i = \frac{GSD}{V_g} \times TDI \quad (8)$$

시간지연 촬영은 비행방향으로 배열된 각각의 검지기 단위화소에서 발생된 전자가 최종적으로는 시간지연 단계만큼 모아져 신호가 증가한다.

## 3. 복사량 계산 예

### 3.1 적용 S/W 및 모델, 입력조건

우선 일반적으로 널리 이용하는 MODTRAN을 이용하여 탐재체에 입사하는 에너지  $L_{\lambda}^s$ 를 구했으며 탐재체 내부에서의 복사에너지 전달과 최종 전자의 수  $\Phi_d$ 는 카메라의 특성을 가정하여 계산하였다.

탐재체의 촬영고도는 685km를 가정하였으며, 대기분석을 위한 대기 모델은 1976년 US standard 모델을 적용하였다.

탐재체의 유효구경에 입사하는 에너지를 일차적으로 계산해야 하는데 식(3)에서 표시된 여러 가지 경로는 가지는 복사에너지는 지구대기의 상태와 지표면 반사도(albedo), 탐재카메라의 촬영

각도 등이 필요하다.

대기의 상태는 지역에 따라 차이가 있으나 구름 없이 맑은 날을 기준으로 가시거리 23km를 가정하였다. 지표면 반사도는 지표면의 형태와 종류에 따라 차이가 많이 나는데, 평균적인 값으로 0.2를 가정하였다. 촬영 각도는 태양과 탑재카메라의 지향방향과의 상대적인 각도를 나타내는데 태양동기궤도에서 남에서 북으로 비행하며 오전 10시 경에 촬영한다고 가정 하였다. 그리고 계절별로 변하는 태양의 남중천정각(Zenith angle)은 70°를 가정하였다.

탑재체의 관측 파장대역은 흑백(500~900nm)과 칼라1(450~520nm), 칼라2(520~600nm), 칼라3(630~690nm), 칼라4(760~900nm)를 가정하였는데 유사한 규격이 고해상도 카메라에 많이 적용된다. 지표면 해상도는 1m(흑백), 4m(칼라), 광학계의 F수는 15(흑백), 3.75(칼라), 유효구경은 0.6m, 투과율은 0.44(흑백)과 0.2(칼라)를 가정하였다. 그리고 신호량을 증가시키기 위해 적용되는 시간 지연촬영(TDI, time delay integration)단계는 32(흑백), 32(칼라1), 32(칼라2), 16(칼라3), 8(칼라4)을 적용하였다.

### 3.2 복사량 계산 결과

각각의 입력조건으로 MODTRAN을 이용하여 대기를 포함한 지표면에서 탑재체 방향으로 전달되는 복사에너지  $L_{\lambda}$ 의 여러 요소들을 계산하였다. 그림7의 “GRND RFLT”는 지표면반사 ( $L_{\lambda}^{refl} + L_{\lambda}^{scat}$ )에너지이고 “PTH SCAT”는 산란복사에너지  $L_{\lambda}^{scat}$ 이다.[2] 알려진 바와 같이 자외선 영역에서는 산란에 의한 복사에너지가 많고 0.6μm 이상에서는 지표면 반사복사에너지가 많다. 즉, 단파장 영역에서는 지구대기의 산란효과로 인해 전체적인 입사에너지량은 증가하지만 유효복사에너지인 지표면반사 복사량은 감소하므로 영상의 복사에너지 성능에 영향을 미친다. 지구 자체의 가시광영역에서의 복사 에너지량은 무시할 만큼 작아 제외 되었다.

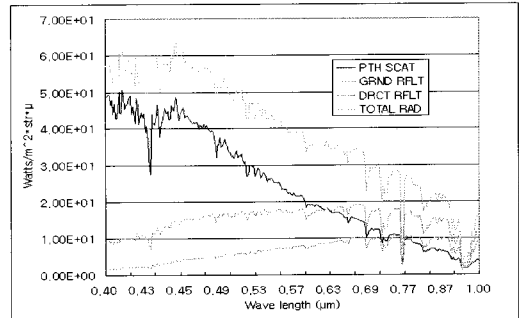


그림 7. 탑재체에 입사하는 복사에너지 분포

### 3.3 초점면 전자량 계산결과

입사한 광자에 의해 발생하는 전자 수의 효율은 일반적으로 이용되는 CCD(charge coupled device)를 가정하여 그림8과 같이 중심 파장인 0.7μm 근처에서 높은 효율을 나타내는 값을 사용하였다.

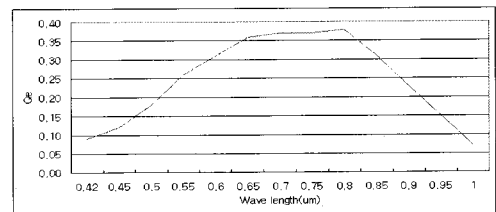


그림 8. 광자-전자 효율 특성  $Q_e$

그림 9과 그림10, 그림11, 그림 12, 그림 13은 각각 흑백 채널과 칼라 채널의 디텍터 단위화소에서 생성되는 전하의 수를 나타낸다.

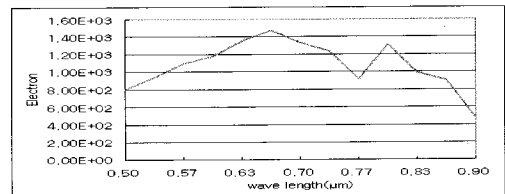


그림 9. 흑백채널의 단위 화소당 전자수 분포 (촬영시간에 발생한 총 전자수 14,000개)

그림9의 흑백채널 결과는 그림7의 복사에너지 분포와 그림8의 광자-전자 효율 특성의 조합에 의해  $0.6\mu\text{m} \sim 0.7\mu\text{m}$  근처에서 발생 전자 수가 가장 높게 나오는 것을 볼 수 있다.

측정 파장 대역이 넓은 흑백 채널보다 파장대역이 좁은 칼라채널에서 전자 신호가 많은 주된 이유는 흑백채널의 높은 공간해상도로 인해 촬영 시간이 칼라 채널에 비해 짧아지기 때문이다.

고해상도카메라 광검지기 단위화소에서 발생하는 잡음전자를 100~200개로 가정해보면 각 채널의 신호대잡음비(SNR, signal to noise ratio) 100정도가 됨을 예상해 볼 수 있으며 이는 고해상도 관측 탑재체에 적용되는 일반적 기준과 비슷한 수준이다.

#### 4. 결 론

고해상도 지구표면 관측탑재카메라를 위한 복사에너지를 흐름을 모델링 하였다. 태양을 포함한 광원과 지구대기 및 관측카메라의 특성 및 광검지기 특성까지 포함된 종합적인 모델링으로 전자광학 촬영 소자에서 최종적으로 생성되는 전자량을 계산하였다.

모델링에 들어가는 대기조건이나 위성탑재체의 촬영조건 등 이미 정해지는 조건 외에 광학계의 F수, 광검지기 단위소자의 크기, 시간자연촬영 단계 등을 조합 할 경우 탑재체의 설계 단계에서 각각의 관측 파장 대역별 발생 전자신호에 대한 다양한 설계 및 예측이 가능하다. 이러한 모델링 과정과 결과를 탑재체 시스템 설계초기에 적용할 경우, 탑재체의 예상 신호대잡음비 등의 성능을 예상하고 설계할 수 있으며 입력 변수들의 적정성을 판단 할 수 있다.

#### 참 고 문헌

1. Schowengerdt, R.A. "Remote Sensing-Models and Methods for Image Processing", Second Edition, Academic Press, 1997, pp.36-48
2. Ontar Corporation, "PcModwin3 manual", 1996, p.202

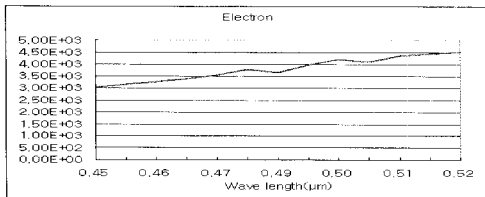


그림 10. 칼라채널1의 단위화소당 전자수

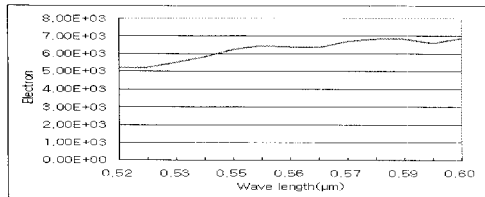


그림 11. 칼라채널2의 단위화소당 전자수

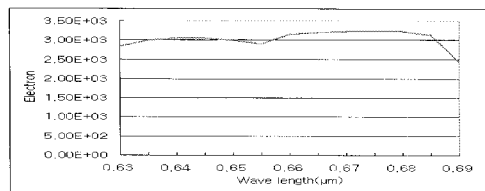


그림 12. 칼라채널3의 단위화소당 전자수

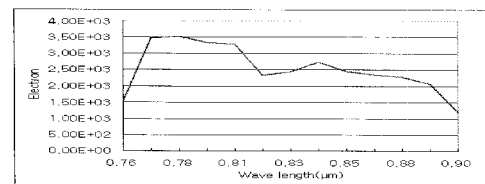


그림 13. 칼라채널4의 단위화소당 전자수