

COMS 해양탐재체의 비선형성 특성 분석

강금실*, 윤형식**

Analysis of Non-linearity Characteristic of GOCI

Geumsil Kang*, Heongsik Youn**

Abstract

The Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) is under development to provide a monitoring of ocean-color around the Korean Peninsula from geostationary platforms. It is planned to be loaded on Communication, Ocean, and Meteorological Satellite (COMS) of Korea. In this study, the radiometric model of GOCI, which is constructed based on the functional model of sub-system, is introduced. Non-linearity for each channel is analyzed in terms of linear gain and nonlinear gain by using the radiometric model. The non-linearity characteristic is validated by using test data which have been achieved during ground test at payload level. The non-linearity G^3/b shows identical characteristic for all channels.

초 록

세계최초의 정지궤도 해양탐재체인 GOCI(Geostationary Ocean Color Imager)는 정지궤도 복합위성인 COMS(Communication, Ocean, and Meteorological Satellite)에 기상탐재체, 통신탐재체와 함께 탑재되기 위해 개발되고 있다. 본 논문에서는 부분품 레벨의 응답특성을 이용한 탐재체 레벨의 복사모델 수립방법을 소개하며, 복사모델을 이용하여 각 채널의 비선형성 특성을 분석한다. 또한, 해양탐재체의 복사시험 데이터를 이용하여 각 채널의 비선형 특성을 검증한다. 분석 결과, 선형이득과 비선형이득의 함수로 표현되는 비선형성 G^3/b 는 모든 채널에 대해 동일함을 확인하였다.

키워드 : 통신해양기상위성(COMS), 해양탐재체(GOCI), 복사모델(Radiometric model), 선형이득(Linear gain), 비선형이득(Nonlinear gain), 비선형성(Non-linearity)

1. 서 론

한반도 주변해양의 상시관측을 통한 해양환경 모니터링 및 해양자원 활용을 위해 세계최초로

개발되고 있는 정지궤도용 해양탐재체 (GOCI, Geostationary Ocean Color Imager)는 탑재체 레벨의 성능검증 및 품질인증을 완료하였으며, 위성체 레벨의 시험단계에 있다.¹⁾ 해양탐재체는 기

접수일(2008년12월17일), 수정일(1차 : 2009년 9월 3일, 2차 : 2009년 9월 15일, 게재 확정일 : 2009년 11월 1일)

* 해양기상탐재체팀/wimikgs@kari.re.kr

** 해양기상탐재체팀/youn@kari.re.kr

¹⁾강금실, 윤형식, "정지궤도 통신해양기상위성 해양탐재체: GOCI (Geostationary Ocean Color Imager)", 기상학회 가을학술대회 논문집, 2008

상 및 통신탑재체와 함께 통신해양기상위성에 탑재되어 궤도운용시험 (In-orbit Test)을 거쳐 본격적인 임무를 수행할 예정이다. 해양탐재체의 주요 임무는 그림 1과 같이 (36N°, 130E°) 중심의 한반도 주변 2500km X 2500km의 영역을 매시간 (낮 시간에 한함) 관측하는 것이다. 현재 운용되고 있는 저궤도 해양관측위성의 경우 관측주기 (Revisit period)가 2~3일에 달하므로, GOCI와 같은 상시관측 임무 수행은 불가능하다.^{2,3)} 정지궤도 해양위성을 이용한 상시관측은, 단주기(Short time period)로 발생하는 해양변화의 분석에 도움을 줄 것으로 기대된다.^{2,3)} 해양탐재체는 8개 채널 영상을 제공 하며, 그림 2는 탐재체레벨의 각 채널의 스펙트럼 특성을 보여준다.

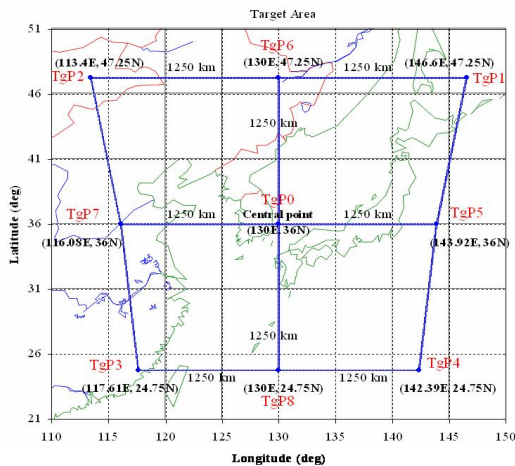


그림 1. 해양탐재체의 촬영 영역

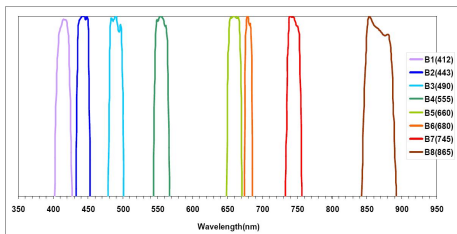


그림 2. 각 채널의 스펙트럼 특성

해양탐재체의 촬영영상은 해양상태를 분석하기에 충분한 고성능의 복사품질을 요구한다.

본 논문에서는 해양탐재체 복사모델의 수립방법을 소개하고, 복사모델을 이용하여 각 채널의 비선형 특성을 분석하며, 해양탐재체의 복사시험 데이터를 이용하여 채널간 비선형 특성을 검증하였다.

2. 해양탐재체의 주요규격 및 설계

그림 3은 해양탐재체의 설계 구성도를 보여준다. 셔터 휠은 영상촬영이 수행되지 않는 동안 해양탐재체의 광학계/검출기 등을 우주환경으로부터 보호하기 위한 셔터와, 태양광을 이용한 보정작업 수행을 위한 보정 장치 등을 탑재하고 있다. 해양탐재체 광학계 캐비티의 온도는 위성체에 의해 기준온도 20°C로 제어되며, 디텍터는 기준온도 10°C를 유지하도록 탐재체 레벨에서 제어한다. 그림 3에서 광학계와 디텍터의 온도 제어를 위한 별도의 방열판(Radiator)이 장착되어 있음을 볼 수 있다. 해양탐재체의 광학부, 포인팅 미러 구동부, 필터휠 및 디텍터 등은 PIP (Payload Interface Plate)에 탑재되며, 3개의 바이팟(Bipod)을 이용하여 위성체에 장착한다. 해양탐재체는 지상조립 및 성능 검증을 위한 열진공, 소음/진동 등의 환경시험을 완료하였다.

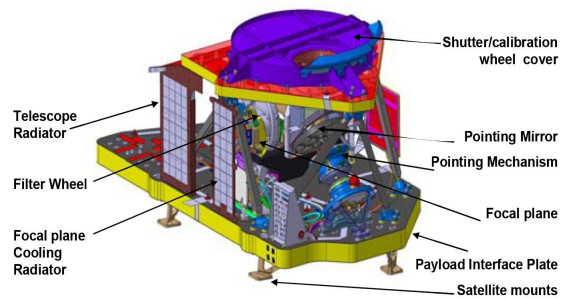


그림 3. 해양탐재체의 구성도

²⁾ André Morel, Minimum Requirements for an Operational, Ocean-Colour Sensor for the Open Ocean. Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. No. 1, 1999

³⁾ James A. Yoder, Status and plans for Satellite Ocean-Colour Missions: Considerations for Complementary Missions, Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. No. 2, 1998

해양탐재체의 주요 규격은 표 1과 같다. TMA (Three Mirror Anastigmat) 광학계와 2-D (2 Dimensional) 검출기는 관측영역의 중심에서 해상도 500mX500m를 획득하도록 설계하였으며, 8개의 채널은 필터휠을 이용하여 획득한다. 해양탐재체는 약 2백만 픽셀의 CMOS 디텍터 매트릭스를 이용한다. 디텍터 매트릭스의 FOV는 약 1°이며, 전체관측 영역은 2축 구동부를 이용한 포인팅 미러 회전을 통해 그림 4와 같이 16개 슬롯으로 나누어 촬영한다. 궤도운영 시 관측영역 내 미촬영 지역이 발생하지 않도록, 서로 근접한 슬롯이 충분한 겹침영역(Overlap Region)을 갖도록 촬영해야 한다.

표 1. 해양탐재체의 주요 개발규격

요구사항	규격
해상도	500mx500m at the center
관측영역	2500kmX2500km @(36N, 130E)
파장대역	412 nm ~ 865 nm (8 channels)
대역폭	10 nm ~ 40 nm
SNR	750 ~ 1200
관측주기	매시간 (8회/1일)
복사보정 정확도	4 %
Digitization	12 bit

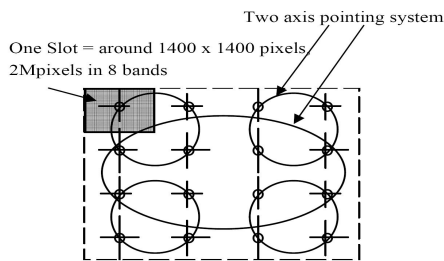


그림 4. 해양탐재체의 관측방법

각 슬롯의 촬영영상은 8개 채널의 영상과 오프셋 보정을 위한 2개의 암영상 (Dark image) 등 총 10개의 영상을 포함한다. 픽셀 데이터 획득

및 전송을 위한 전자부는 16개 슬롯 촬영이 30분 이내가 되도록 설계하였다. 해양 원격탐사에 요구되는 고성능의 SNR을 획득하기 위해 동일지역에 대해 장시간 관측하는 방법을 이용하였다. 이와 같은 관측방법은 정지궤도 플랫폼의 장점을 이용한 것으로, 관측 시 플랫폼의 포인팅 안정성이 우선적으로 확보되어야 한다. 플랫폼의 포인팅 안정성은 위성체 레벨의 분석을 통하여 검증하였다. 궤도운영 시 태양광을 이용한 복사보정을 위한 장치로는, 우주환경에 비교적 강인한 것으로 알려져 있는 QVD(Quasi-Volumic Diffuser)를 선택하였으며, 보정의 정확도 향상을 위하여 2개의 보정장치를 고안하였다. 매일 수행해야 하는 복사보정은 주 보정장치(SD, Solar Diffuser)를 이용하며, 부 보정장치(DAMD, Diffuser Aging Monitoring Device)는 미션 기간 중 발생하는 주 보정장치의 성능변화 감지 및 보정을 위해 필요시 이용한다.⁴⁾

3. 해양탐재체의 비선형 복사 모델

3.1 해양탐재체의 복사모델

해양탐재체 개발에 있어, 궤도상 임무수행 시 복사보정의 정확도를 유지하는 것은 해양원격탐사를 위해 기본적으로 요구되는 사항이다. 복사보정의 정확도를 결정하는 복사모델은 광학계, 디텍터 및 전자부의 특성에 의해 결정된다. 해양탐재체의 복사보정 방법을 개발하기 위해, 설계 단계에서부터 그림 5와 같이 부품레벨의 복사응답특성들을 이용하여 해양탐재체의 복사모델을 수립하였다. 다섯 개의 미러와 필터로 구성된 광학계는 비선형 특성이 없기 때문에 선형이득 G_o 로 모델링 하였으며, 각 채널별로 다른 값을 갖는다. CMOS FPA (Focal Plane Array)는 부품레벨 시험에서 약 5%의 비선형성을 갖는 것으로 확인되었다. FPA는 부품레벨의 시험 데이터를 근거로 선형이득(G_{SDE} , G_{CV}), 비선형이득(b_{CV})

⁴⁾ Gmsil Kang, Heong Sik Youn, and Seong Bong Choi, Pierre Coste, "Radiometric Calibration Method for the GOCI (Geostationary Ocean Color Imager)", Proc. SPIE, Vol. 6361, 2006

및 오프셋 신호(O_d , F_D)를 갖는 3차 비선형 함수로 모델링 하였다. FPA의 선형이득 및 비선형 이득은 각 채널에 따라 달라진다. 디텍터의 암전류 (Dark current)에 의한 오프셋 신호는 노출시간 T_{int} 의 함수로 모델링 하였다. FPA의 전자부 FEE (Front End Electronics)와 탑재체 전자부 IEU (Instrument Electronics Unit)는 각각 선형 이득과 오프셋 신호로 모델링 하였다. 해양탐재체의 8 채널은 동일한 FEE와 IEU에 의해서 검출되므로, 이들의 선형이득은 광학계와 FPA의 경우와 달리 모든 채널에 대해 동일한 값을 갖는다. 동일 출력 채널을 이용하는 디텍터 픽셀의 경우 FEE와 IEU의 선형이득은 픽셀에 대해서도 무관하다.

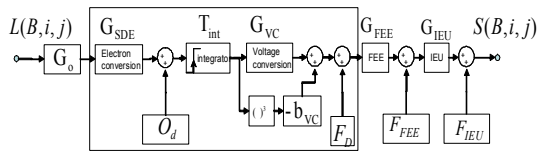


그림 5. 해양탐재체의 복사모델 구성도

그림 5에서 볼 수 있듯이 해양탐재체의 비선형 복사응답특성은 FPA의 특성에 기인한다. 채널별 이득특성은 광학계를 구성하고 있는 미러의 채널별 반사특성 (Reflectivity)과 필터의 채널별 투과특성(Transmissivity) 및 FPA의 채널별 응답특성에 따라 다르게 나타난다. 해양탐재체의 채널별 복사응답은 그림 5에서부터 식 (1)과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}
 S(B, i, j) \approx & \{L(B, i, j) \times G_o(B) \times G_{SDE}(B, i, j) \\
 & \times T_{int}(B) \times G_{CV}(i, j) \times G_{FEE} \times G_{IEU} \\
 & - \{L(B, i, j) \times G_o(B) \times G_{SDE}(B, i, j) \\
 & \times T_{int}(B)\}^3 b_{VC}(i, j) \times G_{FEE} \times G_{IEU} \\
 & + \{G_{FEE} \times G_{IEU} \times O_d(i, j) \times T_{int} \\
 & \times G_{VC}(i, j)\} + G_{FEE} \times G_{IEU} \times F_D(i, j) \\
 & + G_{IEU} \times F_{FEE} + F_{IEU}
 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$S(B, i, j)$: 각 픽셀(i, j)의 채널별 출력신호

$G_o(B)$: 광학부(미러, 필터)의 채널별 선형이득

$G_{SDE}(B, i, j)$: 각 픽셀(i, j)의 채널별 이득

(Photon to Electron Conversion Gain)

$G_{VC}(i, j)$, $b_{VC}(i, j)$: 각 픽셀(i, j)의 선형 이득

및 비선형 이득 (Electron to Voltage Conversion Gain)

$T_{int}(B)$: 채널별 노출시간

O_d : 각 픽셀(i, j)의 암전류(Dark current)

$F_D(i, j)$: 각 픽셀(i, j)의 고정 오프셋 신호

G_{FEE} : FEE의 선형이득

F_{FEE} : FEE의 고정 오프셋 신호

G_{IEU} : IEU의 선형이득

F_{IEU} : IEU의 고정 오프셋 신호

부분품 레벨의 특성들로 표현된 식 (1)의 응답모델은 식 (2)와 같이 해양탐재체 레벨의 복사응답으로 표현할 수 있다. 채널별 선형이득 $G(B, i, j)$ 는 각 부분품의 선형이득의 조합이며, 채널별 비선형 이득 $b(B, i, j)$ 는 광학계, FPA, 전자부의 선형이득과 FPA의 비선형이득의 조합으로 구성된다. 식 (2)의 복사모델은 두 종류의 오프셋 신호를 포함한다. 디텍터 암전류(Dark current) $O(i, j)$ 에 의해 발생하는 오프셋 신호는 노출시간이 증가할수록 커지며, 고정 오프셋 신호 $F(i, j)$ 는 노출시간에 상관없이 일정한 값을 유지한다.

$$\begin{aligned}
 S(B, i, j) = & G(B, i, j) \times L(B, i, j) T_{int}(B) \\
 & + b(B, i, j) (L(B, i, j) T_{int}(B))^3 \\
 & + O(i, j) \times T_{int}(B) + F(i, j) \quad (2)
 \end{aligned}$$

여기서,

$G(B, i, j) = G_o(B) G_{SDE}(B, i, j) G_{CV}(i, j) G_{FEE} G_{IEU}$

$b(B, i, j) = -(G_o(B) G_{SDE}(B, i, j))^3 b_{VC}(i, j) G_{FEE} G_{IEU}$

⁵⁾ Kang Gmsil, Youn.Heongsik, "Error analysis for GOCI Radiometric Calibration", Proc. ISRS, 2007

⁶⁾ Kang Gmsil, Youn.Heongsik, "Error propagation analysis for In-ortbi GOCI Radiometric Calibration", Proc. ISRS, 2008

궤도운영 시 적용될 해양탐재체의 복사보정 방법은 식 (2)의 복사모델을 이용하여 개발 되었으며, 보정방법의 정확도에 대한 분석이 이루어졌다.^{5,6)}

3.2 해양탐재체의 비선형 특성

해양탐재체의 비선형성은 식 (2)에 주어진 선형이득 G 와 비선형 이득 b 를 이용하여 분석할 수 있다. 본 절에서는 픽셀간 특성과 채널간 특성의 관점에서 비선형성에 대해 논의하고자 한다. 픽셀간 특성은 디텍터의 특성(G_{SDE} , G_{CV} , b_{CV})에 기인하는 반면, 채널간 특성은 광학계 및 디텍터의 특성에 기인한다. 식 (2)에서 알 수 있듯이 선형이득과 비선형이득은 픽셀간 특성과 채널간 특성을 모두 포함하고 있다. 그러므로, 복사보정 시 2백만 픽셀에 대한 특성이 각 채널별로 측정되어야 한다. 해양탐재체의 픽셀간, 채널간 비선형성은 식 (3), (4), (5)와 같은 관계식을 이용하여 비교할 수 있다.

$$\frac{G}{b}(B, i, j) = -\frac{G_{CV}(i, j)}{(G_O(B)G_{SDE}(B, i, j))^2 b_{CV}(i, j)} \quad (3)$$

$$\frac{G^2}{b}(B, i, j) = -\frac{G_{CV}^2(i, j)G_{FEE}G_{IEU}}{(G_O(B)G_{SDE}(B, i, j))b_{CV}(i, j)} \quad (4)$$

$$\frac{G^3}{b}(i, j) = -\frac{G_{CV}^3(i, j)}{b_{CV}(i, j)}(G_{FEE}G_{IEU})^2 \quad (5)$$

식 (3)으로 정의되는 비선형성 $G/b(B, i, j)$ 는 비선형이득과 마찬가지로 광학계와 디텍터의 응답특성의 함수이지만, 각 채널과 픽셀에 대한 상대적 특성은 $b(B, i, j)$ 와 다른 양상을 보이게 된다. $G/b(B, i, j)$ 의 경우 $G_{SDE}^2(B, i, j)$ 를 포함하고 있으므로, $G_{SDE}^3(B, i, j)$ 을 포함하고 있는 $b(B, i, j)$ 에 비해 픽셀간 변화 (표준편차)가 작게 된다. 식 (4)에 정의된 비선형성 $G^2/b(B, i, j)$ 는 식 (3)과 같이 각 채널 및 픽셀의 함수이나,

$G_{SDE}(B, i, j)$ 의 함수이므로 $G/b(B, i, j)$ 에 비해 픽셀간 변화가 작을 것이다. 식 (5)에 정의된 비선형성 $G^3/b(i, j)$ 는 $G_{SDE}(B, i, j)$ 의 함수가 아니므로, 픽셀간 변화가 매우 작을 것으로 예상된다. 또한, $G^3/b(i, j)$ 는 식 (3), (4)와 달리 채널에 대한 함수가 아님을 알 수 있다. 이와 같이 채널에 무관한 비선형 특성은, 궤도상 복사 보정시 정확도 향상을 위해 이용할 수 있다.

4. 시험데이터를 이용한 채널간 비선형성 분석

식 (2)와 같은 해양탐재체의 비선형 복사모델을 검증하기 위한 지상시험이 수행되었으며, 그림 6과 7은 채널 B5와, B8의 시험결과를 보여준다. 선형이득과 비선형이득의 픽셀간 변화를 비교해 볼 때, 디텍터의 $G_{SDE}(B, i, j)$ 특성이 픽셀간 변화에 주요 원인을 알 수 있다. 채널 B5의 경우 픽셀간 이득 변화가 B8의 경우와 비교해서 매우 크게 나타났다.

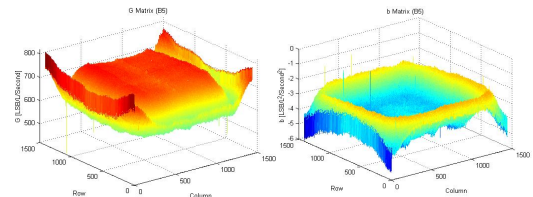


그림 6a) 선형 이득 그림 6b) 비선형 이득
그림 6. 채널 B5의 복사응답 특성

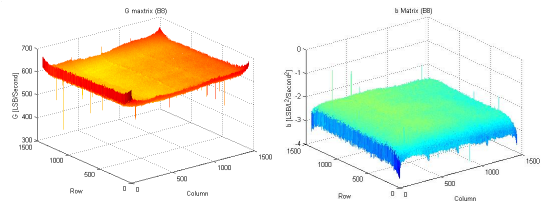


그림 7a) 선형 이득 그림 7b) 비선형 이득
그림 7. 채널 B8의 복사응답 특성

표 2는 시험 데이터로부터 추출한 각 채널의 선형이득과 비선형이득의 평균값과 픽셀간 변화를 보여준다.

표 2. 채널별 선형이득 및 비선형이득

채널	선형이득 G		비선형이득 b	
	평균	표준편차(%)	평균	표준편차(%)
B1	507	4.402%	-1.376	12.145%
B2	380	4.29%	-0.574	13.258%
B3	562	2.07%	-1.853	6.648%
B4	626	2.62%	-2.61	7.97%
B5	702	6.4%	-3.65	18.9%
B6	370	3.4%	-0.529	9.945%
B7	611	2.09%	-2.374	6.613%
B8	608	2.11%	-2.349	5.917%

그림 8, 9는 식 (3), (4), (5)에 정의된 비선형성 파라미터의 특성을 알아보기 위한 지상시험 처리 결과를 보여준다. 비선형성의 채널간 특성을 보여주기 위해, 픽셀간 특성 차이가 많은 B5와 B3를 선택하였다. 그림 8과 9에서 $G/b(B, i, j)$ 의 픽셀간 변화율은 (14.41%, 5.23%)이나, $G^2/b(B, i, j)$ 의 경우 (7.64%, 3.53%)로 약 30% ~50% 정도 픽셀간 변화율이 감소하였다. 또한, 채널 B3와 B5의 비선형이득의 픽셀간 변화율 차이는 매우 크지만, $G^3/b(i, j)$ 의 픽셀간 변화율은 2.7%~2.8%로 비슷하게 나타난다. 뿐만 아니라, 두 채널의 매트릭스 평균값이 거의 동일하다.

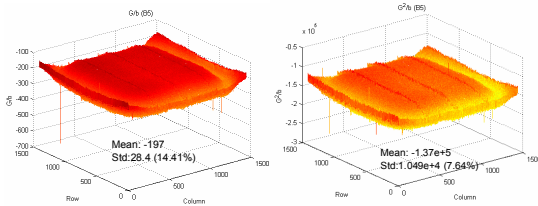
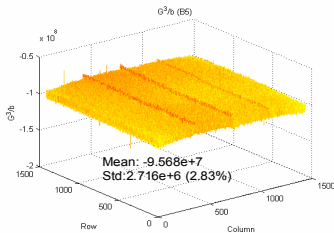

 그림 8a) 비선형성 G/b 그림 8b) 비선형성 G^2/b

 그림 8c) 비선형성 G^3/b

그림 8. 채널 B5의 비선형성 특성

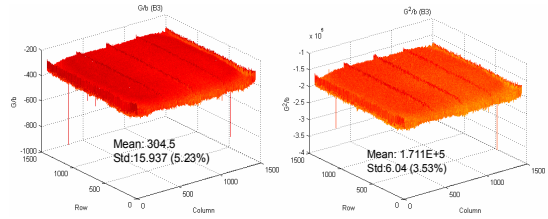
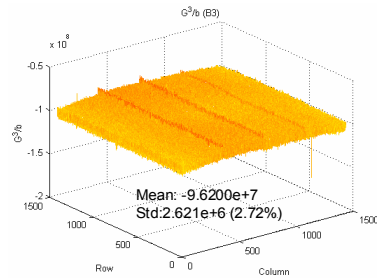

 그림 9a) 비선형성 G/b 그림 9b) 비선형성 G^2/b

 그림 9c) 비선형성 G^3/b

그림 9. 채널 B3의 비선형성 특성

표 3은 8개의 모든 채널에 대한 $G^3/b(i, j)$ 의 특성을 보여준다. 모든 채널의 픽셀간 변화율과 평균값이 유사하게 나타나고 있다. 이와 같은 결과는 식 (5)에 정의된 비선형성 $G^3/b(i, j)$ 의 특성과 일치하는 것이다. 비선형성 G^3/b 의 채널간 특성을 자세히 살펴보기 위해 각 픽셀별 채널특성을 그림 10에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 특정 픽셀에서 각 채널별 G^3/b 는 매우 유사한 값을 갖는다.

 표 3. 채널별 비선형성 특성: G^3/b

채널	평균값	표준편차(%)
B1	-9.540E+7	2.79%
B2	-9.631E+7	2.772%
B3	-9.620E+7	2.72%
B4	-9.569E+7	2.71%
B5	-9.568E+7	2.83%
B6	-9.616E+7	2.98%
B7	-9.611E+7	2.73%
B8	-9.593E+7	2.68%

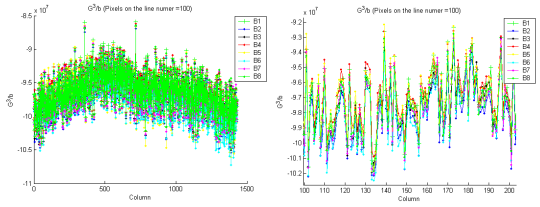


그림 10a) 채널별 비선형성 (@line number=100)

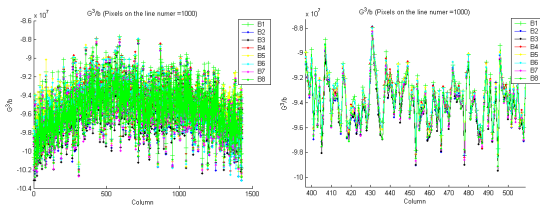


그림 10b) 채널별 비선형성 (@line number=1000)

그림 10. 채널별 비선형성 G^3/b

4. 결 론

본 논문에서는 세계최초로 개발되고 있는 정지궤도 해양관측탐색체인 GOCI의 채널간 비선형성 특성에 대해 논의하였다. 부분품 레벨의 응답특성을 이용하여 해양탐색체의 복사모델을 수립하였으며, 복사모델을 이용하여 비선형성을 분석하였다. 지상시험 데이터를 이용하여 실제 채널간 비선형성 특성을 검증하였다. 선형이득과 비선형이득의 함수로 정의되는 비선형성 G^3/b 의 채널간 특성을 시험 데이터의 분석을 통해 확인하였다. 이와 같은 특성은 궤도운영 시 라디오메트릭 보정 정확도 향상을 위해 이용할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 강금실, 윤형식, “정지궤도 통신해양기상위성 해양탐색체: GOCI (Geostationary Ocean Color Imager)”, 기상학회 가을학술대회 논문집, 2008
2. André Morel, Minimum Requirements for an Operational, Ocean-Colour Sensor for the Open Ocean. Reports of the International

3. James A. Yoder, Status and plans for Satellite Ocean-Colour Missions: Considerations for Complementary Missions, Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. No. 2, 1998
4. Gmsil Kang, Heong Sik Youn, and Seong Bong Choi, Pierre Coste, “Radiometric Calibration Method for the GOCI (Geostationary Ocean Color Imager)”, Proc. SPIE, Vol. 6361, 2006
5. Kang Gmsil, Youn Heongsik, “Error analysis for GOCI Radiometric Calibration”, Proc. ISRS, 2007
6. Kang Gmsil, Youn Heongsik, “Error propagation analysis for In-orbit GOCI Radiometric Calibration”, Proc. ISRS, 2008