

속 보

천리안위성 기하보정 시스템의 궤도상 시험

진경욱[†] · 서석배 · 김한돌 · 주광혁 · 양군호

한국항공우주연구원

COMS Geometric Calibration System and Its In-Orbit Functional and Performance Tests

Kyoung-Wook Jin[†], Seok-Bae Seo, Han-Dol Kim, Gwanghyeok Ju and Koon-Ho Yang

Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, KOREA

Abstract : COMS In-Orbit Tests(IOT), performed from July, 2010 to Jan, 2011, were successfully completed and the scientific data from MI and GOCI has been distributed officially from April, 2011. This paper focuses on the geometric calibration system tests conducted during the IOT. The geometric calibration process, which is one of the primary objectives of the IOT is the final step of COMS data pre-processing. The basic principles of the geometric calibration (or image navigation and registration, INR) algorithm for COMS are described and the functional and performance tests of COMS INR system were summarized according to the COMS IOT phases. Final performance testes were carried out using data sets acquired from the real-time COMS data pre-processing system. Geometric calibration accuracy of the COMS data showed excellent quality and met requirement specifications.

Key Words : COMS, INR, IOT, Geometric calibration

요약 : 천리안 위성의 궤도상 시험이 위성발사 직후인 2010년 7월부터 2011년 1월까지 약 7개월에 걸쳐 성공적으로 수행되었으며, 과학탑재체인 기상 및 해양탑재체 자료는 2011년 4월부터 공식적으로 배포되고 있다. 이 논문에서는 천리안위성의 궤도상 시험 중 핵심적인 요소인 탑재체 자료의 보정 과정 중 최종 단계인 기하보정의 궤도상 테스트 내용에 중점을 두고 있다. 천리안위성 기하보정 알고리즘의 구조와 내용을 간략하게 소개하였으며, 위성발사 후 행해진 기하보정시스템의 기능 및 검증 테스트의 단계별 과정들과 그 결과를 분석 정리하였다. 실시간 위성자료 전처리 시스템을 통해 확보한 자료들을 이용한 천리안 기하보정 알고리즘의 최종 성능테스트는 요구 조건을 만족하는 우수한 정확도를 보여 주었다.

1. 서론

천리안위성의 성공적인 발사(한국 시각 2010년 6월 27일, 06:41am) 이후 약 7개월 정도의 궤도상 시험이 이루어졌다. 위성을 목표궤도(동경 128.2도)에 안착시

키기 위한 초기운용기간에는 위성 본체 및 서브시스템에 대한 각종 테스트가 진행되었다. 즉 발사 전 이루어졌던 조립 및 시험 과정들에서 점검되었던 성능들이 극한적인 우주환경에서도 정상적으로 작동하며, 각 시스템들의 요구조건들을 만족하는 지를 점검하기 위한 분

접수일(2011년 7월 4일), 수정일(1차 : 2011년 7월 28일, 2차 : 8월 13일), 게재확정일(2011년 8월 17일).

[†] 교신저자: 진경욱(kwjjin@kari.re.kr)

석 및 시험들이 진행되었다. 이후 초기 운용기간을 거쳐 관제권이 이양된 이후에는 천리안 위성에 장착된 세 탑재체(기상, 해양 및 통신탑재체)의 기능 및 성능 시험이 이어졌다. 궤도상 시험의 핵심적인 요소인 기상 및 해양 탑재체 자료의 복사 및 기하보정 시험은 2010년 7월부터 시작되어 2011년 1월에 마무리되었다. 본 논문에서는 탑재체 자료 전처리 과정의 최종 단계인 기하보정 테스트들의 내용과 그 결과를 정리하였다.

천리안 위성 발사 이전에도 기상탑재체 자료의 정밀 기하보정 알고리즘 개발에 대한 선행적인 연구가 수행되었으며 좋은 결과를 보여 주었다(김현숙 등, 2007; 허동석, 김태정, 2006). 하지만 이들 연구는 천리안 위성 자료가 아닌 GOES-9(동경 155도) 자료를 이용하였으며, 여러 가지의 관측 모드(전구관측, 지역관측 및 로컬 관측 등) 중 전구영상만을 이용하여 위성의 영상좌표계와 지구좌표계 사이의 수학적 관계를 묘사하는 센서 모델을 기반으로 한 기하보정을 수행하였다.

본 논문에서는 천리안 위성의 실시간 기하보정 알고리즘을 기반으로 궤도상 시험기간 동안 이루어진 기하보정 테스트의 과정들을(예, Yang *et al.*, 2010) 보다 발전시켜 체계적이며 구체적으로 기술하고, 단계별 과정을 정리하였으며 최종 성능테스트 결과를 요약하였다. 천리안 위성 기하보정시스템의 최종 성능 테스트는 충분한 통계적인 의미를 지닐 수 있는 1주일 간의 자료(기상탑재체의 경우 모든 관측 모드 포함)가 이용되었다.

2. 천리안 위성자료의 전처리 과정

Fig. 1은 위성자료의 일반적인 보정 처리를 나타낸 흐름도이다. 보정 처리의 중요 과정은 크게 복사보정과 기하보정으로 나뉘어진다. 복사보정(radiometric

calibration)은 기하보정의 전 단계로, 위성센서가 측정하여 지상으로 보내오는 전기적 신호(digital count 혹은 digital number)를 반사도(reflectance) 혹은 복사량(radiance) 값으로 바꾸어 주는 일련의 과정을 일컫는다.

이때 전기적 신호에 대응하는 정확한 복사량 값으로 바꾸어 주는 방정식(가시채널의 경우 1차 식, 적외채널의 경우 2차 식으로 표현됨)이 필요하며, 스캔미러 방출율(scan mirror emissivity) 영향 제거, 자정효과(midnight effect)보정 등의 여러 가지 에러들을 제거하는 작업이 이루어진다(Seo *et al.*, 2011; Jin and Seo, 2011). 복사보정을 거친 데이터를 Level 1A 데이터라 부른다.

다음 단계인 기하보정(geometric calibration)은 우주에서 위성센서가 관측한 영상을 이 영상이 지구 좌표계에서 가지는 정확한 위치(위, 경도)로 바꾸어 주는 과정이다. 이 때 위성의 궤도나 자세 등의 변화로 야기되는 여러 에러들을 제거하는 과정이 포함된다. 기하보정은 또한 두 부분으로 나누어진다. 첫째, 영상 내의 각 픽셀의 정확한 위치를 결정짓는 작업(navigation)과 둘째, 이 결정된 위치가 영상 내의 다른 픽셀들과 이루는 상대적인 위치를 일정하게 유지시키며, 또 시간에 따라 촬영되는 연속적인 영상들에서 지정된 픽셀의 위치가 일정하게 유지되도록 해주는 작업(registration)이다. 기하보정을 거친 데이터를 Level 1B 데이터라 부른다.

일반적으로 Level 0 자료로부터 정확하게 보정된 Level 1A 및 Level 1B 자료의 생산을 위성자료의 전처리 과정이라 부르며, 전처리 과정을 거친 Level 1B 자료를 이용하여 Level 2 및 Level 3 자료를 생산하는 과정을 후처리 과정이라 한다. 기상탑재체의 경우 CMDPS(COMS Meteorological Data Processing System)을 통해(Ou, 2005), 해양탑재체의 경우 GDPS(GOCI Data Processing System)을 통해(한희정 등, 2010) 천리안 위성자료의 후처리 과정이 이루어진다.

천리안 위성의 기상 및 해양탑재체 자료의 복사 및 기하보정을 담당하는 지상자료 처리시스템이 Fig. 2에 나타나 있다. 이 중에서 복사보정을 담당하는 모듈이 IRCM(Image Radiometric Calibration Module)이며, 기하보정을 담당하는 시스템을 INRSM(Image Navigation and Registration Software Module)이

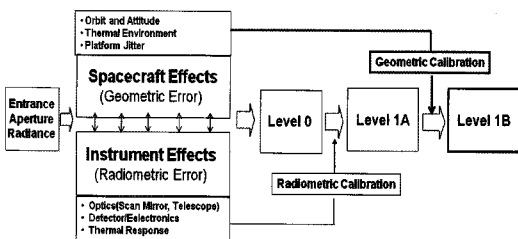


Fig. 1. Flow chart of the COMS MI data calibration process.

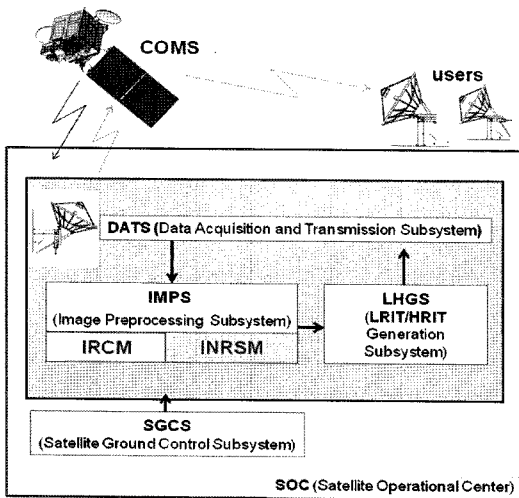


Fig. 2. Schematic of the COMS IDACS(Image Data Acquisition and Control System).

라 부른다. MI와 GOCI의 관측메커니즘의 차이에 따라 각 센서로부터 들어오는 원시영상자료(Level0)는 IMPS내에서 각각 독립적으로 처리된다. 따라서 엄밀하게 기술하면 IRCM내에 MI IRCM, GOCI IRCM 그리고 INRSM내에 MI INRSM 및 GOCI INRSM이 각 센서 별 위성자료의 전처리를 수행하게 된다.

MI의 경우 MI Scan Mirror의 짐벌(gimbal)구조 때문에 남북방향 및 동서방향의 스캔미러 조정이 가능하고 지구의 북서쪽 끝에서부터 남동쪽 끝까지 연속적인 스캔을 통해 관측이 이루어진다. 또한 관측 영역의 넓이에 따른 5가지 관측모드 (LA, APNH, ENH, LSH 및 FD)를 가지고 있다(Fig. 3).

기상탐재체 데이터 중 원시영상(Level 0) 및 복사보정된 자료(Level 1A)는 Fig. 4a와 같은 타원형의 모습을 하고 있다. 이는 기상탐재체가 지구를 스캔을 할 때, 좌우 픽셀들이 겹치면서 충분한 샘플링이 되도록 동서방향의 스캔을 남북방향에 비해 1.75배 많은 샘플링을 하도록 디자인되어 있기 때문이다. 하지만 정규격자화 하여 최종 처리되는 기하보정 후의 Level 1B 데이터의 모습은 타원형에서 완전한 구형으로 바뀌게 된다(Fig. 4b).

이에 반해 GOCI의 경우 step and staring imaging 방식으로 2500 km × 2500 km 영역을 16개의 슬롯(slot)들로 나누어 각 구역을 촬영하고 다음 슬롯으로 이동하는 방식으로 촬영이 이루어진다(Fig. 5). GOCI의 촬영방향은 Fig. 5에 화살표로 표시되어 있다. GOCI 자

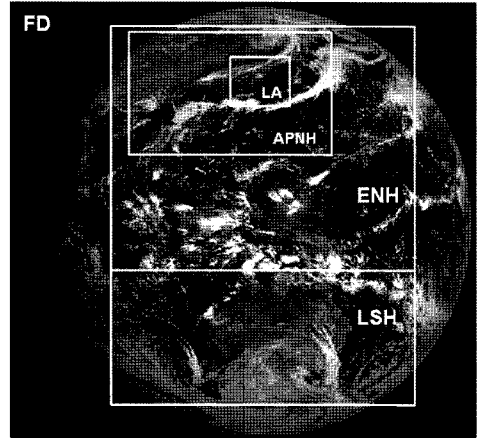


Fig. 3. MI scanning modes and the area covered from each mode. Where, FD is Full Disk, APNH is Asia Pacific Northern Hemisphere, ENH is Extended Northern Hemisphere, LSH is Limited Southern Hemisphere and LA is Local Area respectively.

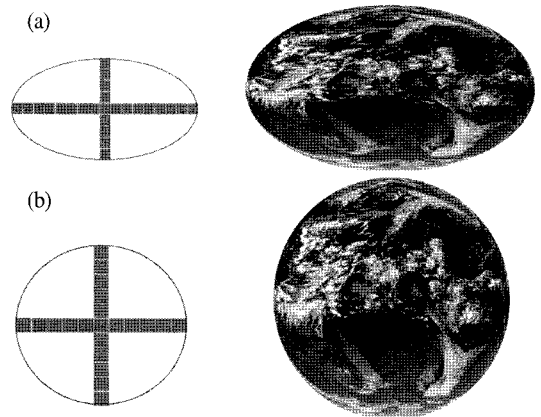


Fig. 4. Comparison of the data formats between the COMS MI Level1A and Level1B data: (a) Level1A, (b) Level1B. Longitudinal sampling is 1.75 times higher than that of latitudinal on Level1A.

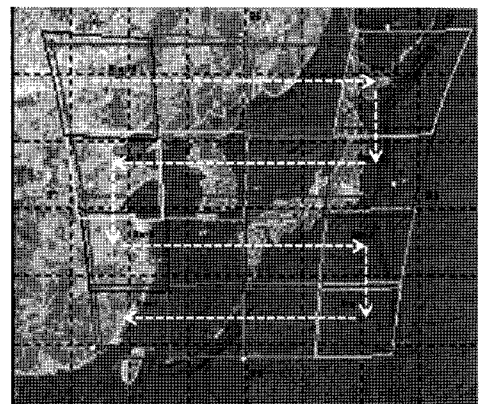


Fig. 5. GOCI instrument coverage and observation direction (indicated by the dotted arrows).

료의 전처리 과정에 대한 좀더 자세한 소개는(서석배 등, 2010)에 나타나 있다.

3. 기하보정 알고리즘

Fig. 6는 위성의 자세와 기하보정의 관계를 간략하게 설명해 준다. 위성의 진행방향(+X), 우주남측(+Y) 및 위성탑재체가 지구를 향하는 방향(+Z)에 대한 위성체의 운동은 각각 Rolling, Pitching 및 Yawing과 관련되어 있다. 따라서 이들 위성체의 자세변화와 관련하여 탑재체의 LOS(Line of Sight)의 지구표면 위에서의 위

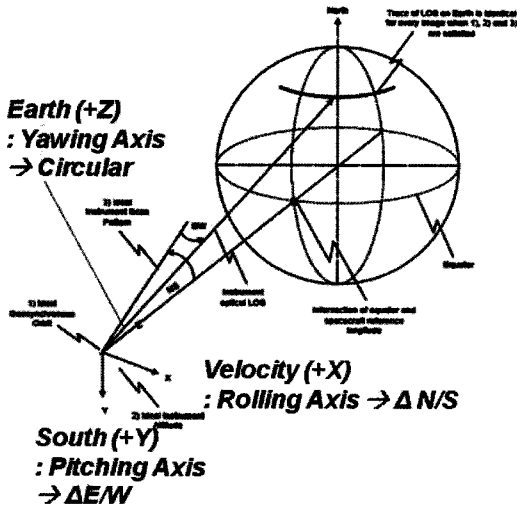


Fig. 6. The relationship between the orbit and attitude of the COMS satellite and geometric uncertainties with respect to the Earth coordinate.

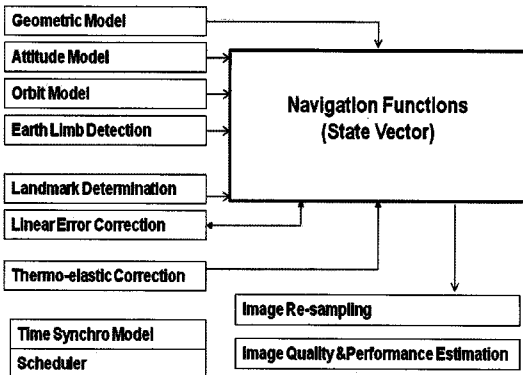


Fig. 7. Structure of COMS data geometric calibration algorithm (INR).

치는 각각 남북방향, 동서방향, 원 방향에 대한 위치 에러를 야기하게 된다. 이러한 위치 혹은 기하학적 에러를 제거하는 과정을 간단히 기하보정이라 할 수 있다.

하지만 실제 구현되는 기하보정 알고리즘은 매우 복잡한 함수들로 구성되어 있다. Fig. 7는 천리안 위성에 적용된 기하보정 시스템을 보여 주는 다이어그램이다. 그림에서 보듯 기하보정시스템은 10개 이상의 중요한 서브시스템 혹은 함수들로 구성되어 있음을 알 수 있다. 이 중 가장 핵심적인 함수는 네비게이션 함수로 이 함수를 통해 기준이 되는 랜드마크 데이터 베이스(ground truth의 역할)와 영상에서 얻은 랜드마크를 매치시켜, 그 잔차(residual)를 통해 영상의 채널 별, 픽셀 당 위치결정 오차 (navigation error)를 구하게 된다. 네비게이션 함수내의 상태벡터(state vector)는 탑재체의 위치모델 관련 파라미터, 자세 각, 위성 궤도를 통해 얻은 위·경도 값, 열탄성 변형과 관련된 구조 각 및 교정 각(correction angle)들과 같은 여러 파라미터들로 구성되어 있다. 이들 네비게이션 함수내의 상태벡터를 이루는 주요 요소들을 기하보정 요구조건(requirement specification)에 맞도록 조정하여, 상태벡터를 고정시키고 이후 리샘플링하여 최종 데이터(Level1B)를 산출하게 된다. 각각의 함수들에 대한 간단한 설명은 아래와 같다.

1) 기하모델(Geometric Model)

탑재체 기준 좌표 IIRF(Instrument Interface Reference Frame)면에 대해서 기준 시각에서의 라인별, 픽셀별 포인팅 벡터(pointing vector) 혹은 LOS (Line of Sight)벡터를 구하는 알고리즘이다. 계산된 값은 위치의 절대 정확도를 구하는 navigation function으로 전달된다. 위성의 localization accuracy를 결정짓는 중요 함수이다.

2) 자세모델(Attitude Model)

영상의 와이드밴드 텔리메트리(wideband telemetry)로부터 얻어지는 자세정보(Attitude data)를 통해 상태벡터(state vector)를 업데이트 하는 알고리즘이다.

3) 궤도모델(Orbit Model)

FDS(Flight Dynamics System) 입력 데이터로부터 위성의 궤도 정보를 얻을 수 있다. 궤도 모델은 이 궤도

정보를 바탕으로 위성의 localization accuracy를 향상시키기 위해 위성의 위치 오차를 측정하기 위한 알고리즘이다. 이 알고리즘에 쓰이는 direct navigation equation은 탑재체 기준 좌표의 pointing vector에 상응하는 지구표면에 대한 ECEF(Earth-Centered Earth Fixed) 좌표계에서의 위·경도 값을 제공해 준다.

4) 랜드마크 결정 알고리즘(Landmark Determination)

관측한 영상을 통해 얻은 랜드마크(예, 해안선, 호수)와 이미의 비교 기준이 되는 데이터베이스 내의 랜드마크 칩(landmark chip)을 매치시키는 함수이다.

5) 지구경계면 탐지(Earth Limb Detection)

기상탑재체 전구관측(FD)의 경우 차가운 우주관측(cold space look)값과 대비되는 상대적으로 고온의 지구관측 값의 차이를 이용하여 지구경계면(earth limb)을 탐지하는 것이 가능하다. 이 지구경계면 관측은 보다 정확한 위치 결정작업(navigation processing) 이전에 수행되어 유용한 위치 정보를 미리 확보하게 해준다. 이 limb관측은 밤낮 구분 없이 쓰일 수 있는 적외체널을 이용하며, 태양이나 달이 지구근처에 왔을 때는 수행되지 않는다.

6) 선형에러 교정 알고리즘(Linear Error Correction Algorithm)

랜드마크를 pointing하는 경우 지구 위치에러(Earth location error)를 최소화하기 위한 상태벡터의 교정각을 추정하기 위한 알고리즘이다. 보다 세부적인 알고리즘의 내용을 기술하면 다음과 같다. 처음에는 다소 큰 위치에러를 가진 상태에서 랜드마크를 결정하고 요(yaw)값에 근거하여 교정각을 계산한다. 이 때 상태벡터를 고정시키지 않은 상태로 둔다. 충분한 랜드마크가 확보되면 새로운 요값을 추정하고 이에 근거해서 교정각을 처음부터 다시 계산한다. 이 때 다음과 같은 두 단계를 거치게 된다. 첫번째 단계는 모든 동원 가능한 랜드마크에 기반하여 롤, 피치 및 요 값들을 계산한다. 이 때 롤 및 피치 값은 선형적으로 변한다고 가정한다. 그리고 요값은 선형적으로 변하거나 혹은 상수로 가정한다. 다음 두번째 단계는 다른 서브 윈도우에서 롤, 피치 값을 처음부터 다시 계산하게 되는데, 이 단계를 거친 후 상태벡터는 고정될 수 있다. 이 때 영상에 대해 교

정각이 고정(frozen)되었다는 것은 요 값도 고정되었음을 의미한다. 이후 요 값에 근거하여 다음 이미지 블록들에 대해 교정각이 다시 계산되며, 교정각 계산 함수는 충분한 랜드마크가 확보되면 자동으로 교정각이 고정되도록 설계되어 있다.

7) 열탄성 교정 알고리즘(Thermo-elastic Correction)

일반적으로 하루 동안 태양이 위성을 비추는 각도의 변화는 위성체, 탑재체 및 자세제어용 센서의 열적 변형을 초래할 수 있다. 이러한 변형은 교정각 추정모델(선형에러 교정모델)에서 이미 고려되어 있지만, 이 열변형 예측 모델을 이용하면 선형 에러 교정알고리즘에서 계산한 불확실성(uncertainty)를 줄여 줄 수 있다. 기상탑재체의 경우 열탄성에 의한 자세의 왜곡 혹은 변형정도는 다음 다섯 가지 변수로 표현된다: 교정각과 관련된 롤각, 피치각 및 요각의 값들, 어긋난 배열각(misalignment angles)를 나타내는 롤각 비정렬각 및 피치각 비정렬각. 하지만 삼축제어(3-axis control) 방식 위성의 경우 열적 환경이 위성에 미치는 영향은 식(eclipse)기간을 제외하면 그리 크지 않기 때문에 열변형 효과는 중요하게 다루지 않는다.

8) 위치결정 함수(Navigation Functions)

Level1A 영상의 픽셀과 상응하는 ECEF카테시안 좌표계에서 정확한 값을 계산해 주는 함수이다. 이 네비게이션 함수의 핵심은 상태벡터로 이 상태벡터를 네비게이션 함수라고 칭할 수 있다. 상태벡터는 아래 핵심적인 파라미터들로 구성된다:

탑재체파라미터(탑재체 위치 모델에 의해 구해지는 파라미터), 자세각(자세 모델에 의해 결정), 궤도파라미터(궤도 모델로부터 결정되는 지구와 위성 간의 거리, 위.경도 값등), 구조각(열탄성교정 알고리즘에 의해 결정되는 값 및 선형에러 교정 알고리즘으로부터 구해지는 교정각.

9) 영상 리샘플링(Image Resampling)

리샘플링(resampling) 격자를 이용하여 비 격자화되어 있는 입력자료를 정규 격자화된 출력 자료로 바꾸어 주는 작업을 일컫는다. L1A 영상 블록을 LIB 영상 블록으로 리샘플링할 때(Fig. 4 참조) 두 종류(동서방향 리샘플링 및 남북방향 리샘플링)의 복사내삽계수(radiometric

interpolation coefficients)가 이용된다.

10) 시간동기화 모델(Time Synchro Model)

와이드밴드 텔레메트리의 OBT(On-board Time)을 UTC(Universal Time Constant)로 바꾸어 주는 함수이다.

11) 스케줄러(Scheduler)

전반적인 INRSM 오퍼레이션(operation)을 컨트롤하고 일반적인 프로세싱 함수들을 실행시키는 알고리즘이다.

12) 영상 위치보정 품질 추정(Image Quality and Performance Estimation)

이 알고리즘을 통해 기하보정 품질을 나타내는 지시자 (Indicator)가 각 블록 혹은 각 영상 별로 행해진다. 기하보정의 품질 정보는 INRSM 출력자료의 헤더파일에 담기게 된다. 이에 포함되는 핵심정보는 발견된 모든 랜드마크 정보, 각 블록별 랜드마크에 대한 위치 결정 오차(navigation error)의 통계값(평균 및 표준편차) 그리고 상대적 위치정확도(registration) 값에 대한 통계값들이다.

4. 천리안 위성 기하보정 시스템 궤도상 시험

천리안 위성의 기하보정 시스템(Meyer,2010)의 궤도상 시험 과정을 기술하기에 앞서 위성의 궤도상 시험 전반적인 단계를 간단히 설명하면 Table 1로 요약된다. 위성의 발사 이후 목표 정지궤도로 안착하기까지 거치는 1

주일 정도의 초기운용기간(LEOP) 동안 먼저 위성 본체 및 각종 서브시스템들의 우주에서의 성능이 점점 분석되었다. 이후 6단계로 나누어 천리안위성의 탑재체들에 대한 궤도상 시험이 이루어졌다. 이 중 Phase 3, Phase 4기간에는 통신탑재체(Ka-band)에 대한 시험 들이 이루어졌으며, 기상탑재체 및 해양탑재체에 대한 기하보정 관련 테스트들은 Phase 2와 Phase 6에 이루어졌다. Phase 2의 경우 아웃개싱(높은 온도로 열을 가해 탑재체 내의 휘발성 오염물질을 제거하는 과정)으로, 위성 발사 후 약 42일 간 이루어짐이 종료되기 이전으로 기상탑재체의 경우 적외채널의 작동이 멈추게 되므로, 가시채널 데이터만을 이용한 기하보정시스템의 기능테스트가 이루어졌다. 아웃개싱이 완전히 종료되어 냉각기 덮개가 열리고 적외채널이 열적으로 충분히 냉각되어 지구복사에너지(thermal radiation)의 측정이 가능해진 8월부터 Phase 6에 해당하는 INR시스템의 기능 및 성능 테스트가 본격적으로 진행되었다.

궤도상 시험기간 중 기하보정 시스템의 점검 항목 및 테스트 진행 단계를 요약하면 Table 2와 같다. 궤도상 시험 기하보정 테스트는 크게 나누어 세 가지 단계로 분류할 수 있다. 초기단계에서는 INR시스템 중 주요 함수인 랜드마크 결정 알고리즘, 위성 경도 추정 함수, 열탄성 모델 등의 기능 점검이 우선적으로 이루어졌다. 이를 토대로 기하보정시스템의 핵심작업인 튜닝 파라미터들의 조정작업이 진행되었다. 이 튜닝 파라미터들의 조정을 통해 성능이 확보된 이후 최종 단계로써 “실시간자료 전처리시스템 (IMPS)”를 통해 연속적으로 확보한 자료를 이용하여 기하보정시스템의 품질 검증이 이루어졌다. 일주일 간의 데이터를 통해 위치결정 정확도 (navigation) 및 위치결정정확도의 공간 및 시간에 따

Table 1. COMS In-orbit tests and test items according to its phases

Phases	IOT Tests	Periods
BUS IOT	BUS and Spacecraft Subsystem IOT	Launch ~ July 2010
Switch Over	LEOP and Swich-Over of the Operation, MODCS tests	2 weeks after the Launch
Phase 1	MODCS TEST, MI VIS and GOCI Functional and Radiometric tests	July, 2010 ~ Jan, 2011
Phase 2	MI VIS and GOCI INR functional tests	July, 2010 ~ Jan, 2011
Phase 3	Ka-band North and South beam tests (Antenna pattern measurements)	July, 2010
Phase 4	Antenna Deployment and Trim Mechanism (ADTM) & Ka-band China beam tests	Aug, 2010
Phase 5	MI VIS+IR functional and radiometric calibration tests after the cooler cover opening	Aug, 2010 ~ Jan, 2011
Phase 6	MI VIS +IR and GOCI INR functional and performance tests	Aug, 2010 ~ Jan, 2011

Table 2. COMS IOT INR Tests and Test items

ID	TEST Items	TEST Objectives
INR OP1	Preliminary operational functional check	Verification of low level functions. Estimation Functions (Landmark matching, linear error correction, thermo-elastic model, satellite longitude estimation) are deactivated at this time.
INR OP2	Landmark matching activation	Landmark determination and the linear error correction functions are activated.
INR OP3	Satellite longitude estimation activation	Satellite longitude estimation function is activated. (MI ONLY)
INR OP4	Thermo-elastic model estimation activation	Thermo-elastic model estimation function is activated.
INR TUN1	Cloud detection parameters	The thresholds of the cloud detection algorithm are tuned.
INR TUN2	Landmark accuracy estimation parameters	The parameters of the landmark determination algorithm are tuned to optimize landmarks matching statistics.
INR TUN3	Linear error correction parameters	The parameters of the linear error correction algorithm are tuned.
INR TUN4	Scheduler parameters	The parameters of the scheduler algorithm are tuned to optimize the INR operation.
INR TUN5	Timeliness parameters	The parameters related with the timeliness are checked and tuning is refined if necessary. (MI ONLY)
INR TUN6	IMC command generation parameters	The parameters of the IMC command generation algorithm are tuned. The correct pointing of the instrument including the behavior of the IMC loops is checked.
INR TUN7	Landmark database check (bias, validity etc)	Update of the landmark database based on the landmark matching statistics.
INR PERF1	Performance estimation during non-eclipse	Estimation of the INR performance during normal (non-eclipse) periods
INR PERF2	Performance estimation during eclipse	Estimation of the INR performance during eclipse periods.(MI ONLY)

른 유지정도(registration)를 계산하고 통계치를 얻어 요구조건과 비교하였다.

INR 기능테스트 3(INR OP3), INR 튜닝테스트 5 (INR TUN5) 및 INR 성능테스트 2(INR PERF2)는 기상 탐재체에만 해당되는 시험항목이며 Table 2에 명시하였다. 특히 기상탐재체의 경우 해양탐재체와 달리 INR 성능테스트는 식기간과 비-식기간으로 나누어 식기간의 성능테스트도 진행하였다. 이는 위성식이 일어나는 춘분 및 추분을 전후한 기간 동안(약 45일간)은 위성이 지구 그림자 안에 들어가는 시기로 위성의 열적 환경에 많은 변화가 일어난다. 이 때 탐재체로 유입되는 간접광(Stray light)등의 효과로 인해 영상의 품질 저하가 일어날 수 있는 시기이다. 해양탐재체는 주간 8번의 관측만 이루어지므로 자정 부근에 일어나는 식의 영향을 받지 않는다. INR 성능을 평가하기 위한 유효한 통계 값을 충분히 확보할 수 있는 기간으로 1주일 정도의 연속적인(식기간 및 비-식기간 공통)자료가 이용되었다.

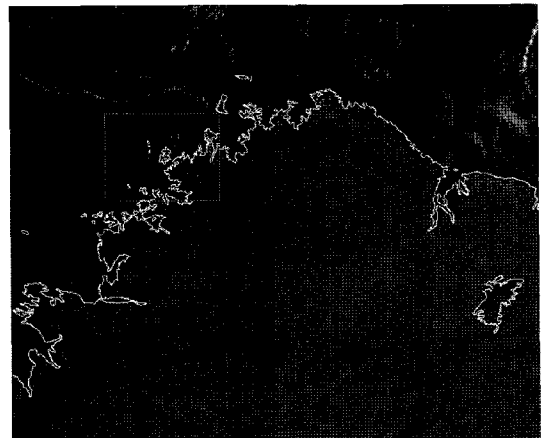


Fig. 8. MI Level1B image overlapped with the landmark database.

5. 기하보정 궤도상 시험 테스트 결과

OP2 및 OP1테스트(Table 2참조)의 결과로 산출된 기상탐재체 Level1B자료의 한 예가 Fig. 8에 나타나 있다. 예비 기능점검이 끝나고 랜드마크 매칭을 활성화시킨 후 영상에서 확보된 랜드마크와 기존의 데이터베이스

스(랜드마크 칩)를 비교하였다. 오스트렐리아 부근을 확대한 Fig. 8의 해안선 자료는 랜드마크들과 매우 잘 일치된 모습을 보여준다.

기본적인 INR시스템의 기능 점검에 이어 진행된 튜닝작업 중 첫 번째 단계는 정확한 구름탐지를 위한 기준값(threshold)의 조정이었다. 랜드마크 매칭에 앞서 “구름탐지” 작업이 중요한 이유는 기준이 되는 경계선을 찾을 때 구름이 덮여 있는 경우 구름의 경계 부근이 해안

선과 오인될 여지가 있기 때문이다(김현숙 등, 2007). 따라서 구름탐지 알고리즘을 이용하여 구름으로 덮여 있는 픽셀들을 제거하여 주는 작업이 우선 요구된다. 구름탐지 경계 값(threshold)은 가시채널의 경우 복사량, 적외채널의 경우 휘도온도 값을 이용하여 적절한 튜닝을 통해 최종 값이 결정되었다. Fig. 9은 촬영된 영상(2010.09.04, 05:45:21UTC)에서 구름을 제거한 모습을 보여준다. 구름이 제거된 곳이 하얀색으로 처리되어

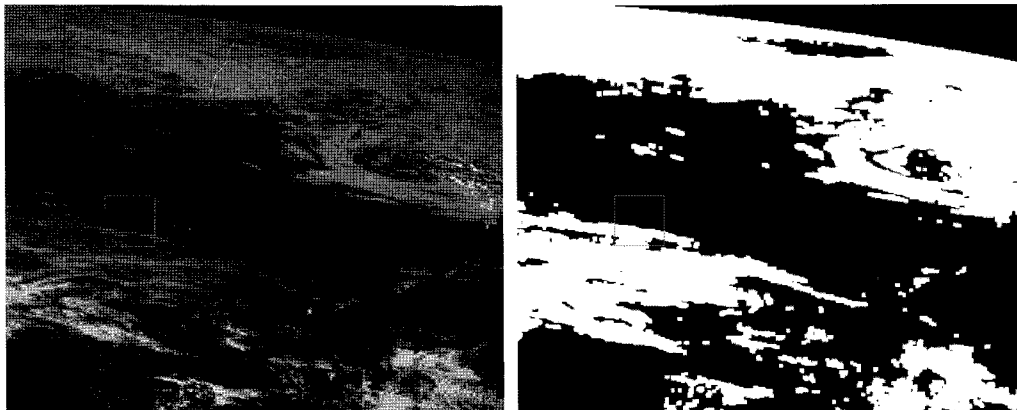


Fig. 9. Cloud detection process of MI data: (a) Original image, (b) Cloud free image (white denotes the cloud removed area).

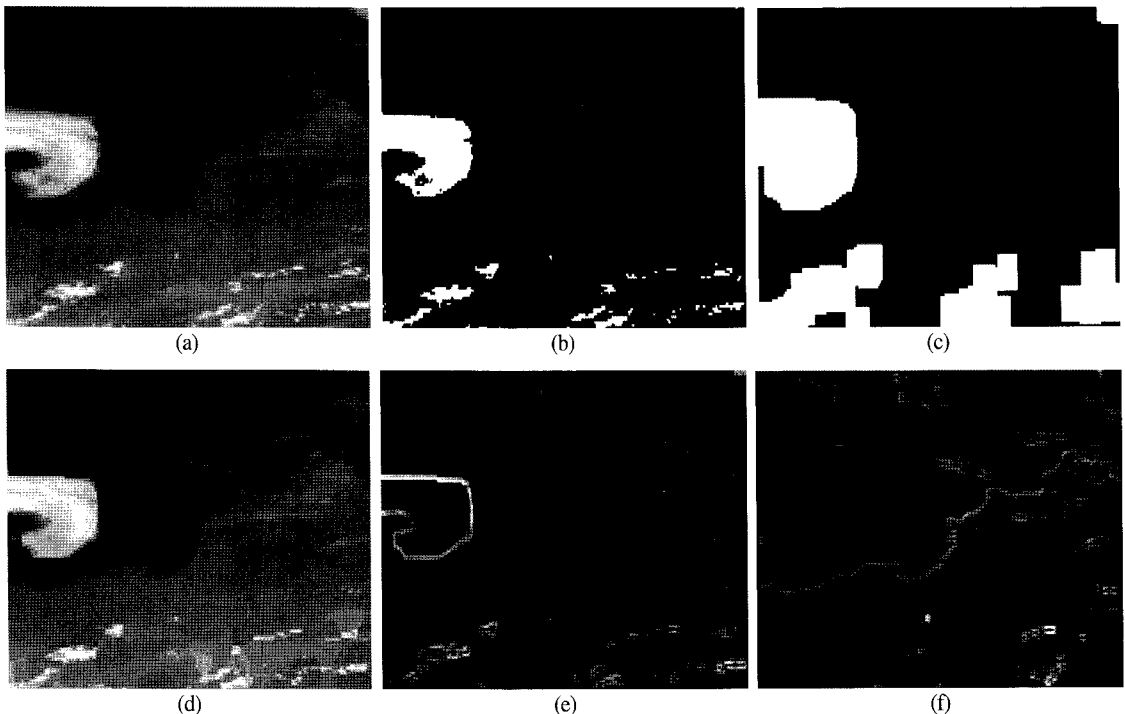


Fig. 10. TUN2 landmark determination process: a) Pre-rectified image, b) Raw cloud coverage, c) Final cloud coverage, d) Smoothed pre-rectified image, e) Edge detection applied smoothed rectified image, f) Final edge image(after the cloud masking).

있다. 이 시험에서 적용된 가시채널의 reflected radiance 경계 값은 $9.0 \times 10^7 (\text{W/m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{m})$ 이상이었으며, 단파 적외채널(SWIR) <275K, 적외1채널(WIN1) <270K 및 적외2채널(WIN2) <270K의 휘도온도 경계값들이 각각 이용되었다. 참고로 수증기채널(WV)은 구름탐지알고리즘에 이용되지 않았다.

다음 단계는 두 번째의 파라미터 조정단계 (TUN2)로서 랜드마크 매칭의 정확도를 높이기 위한 경계선을 생성하는 과정을 보여준다.

랜드마크 매칭에 앞서 선행되는 과정은 이미지 포맷을 랜드마크 칩의 좌표계의 형태로 바꾸어 주는 과정(Pre-rectification)이다(Fig. 10a). 이 작업은 Level1A 픽셀 영상을 기준 랜드마크에 정의된 데이터 포맷으로 바꾸어주는 과정인데, 랜드마크 칩의 데이터 형태는 Level1B포맷과 같으므로 간단히 Level1B 포맷으로 바꾸어 주는 리샘플링 알고리즘을 이용하면 된다. 단 이때 상태벡터(state vector)는 Level1B 리샘플링 단계에서 필요한 충분한 정확도를 가질 필요는 없다. 랜드마크 매칭 작업이 끝나면 이 Pre-rectified 영상은 재사용될 필요성이 없으므로 폐기된다.

Fig. 10을 보면 첫 번째 그림(Fig. 10a)은 랜드마크 매칭을 위해 재조정된 영상이며 Fig. 10b는 구름탐지 알고리즘을 통해 구름을 제거한 모습(하얀색)이다. 이때 제거되지 않고 남아 있을 수 있는 영역을 배제하기 위하여 구름영역을 좀 더 확장한 넓은 영상이 Fig. 10c에 해당된다. 다음 그림은 경계선 재 포맷된 영상을 좀 더 매끄럽게(smoothing) 처리한 후(Fig. 10d) 경계선을 탐지한 모습(Fig. 10e)이며, 구름탐지 알고리즘으로 구름이 차지한 영역을 제거한 후 경계선을 생성한 최종 영상이 Fig. 10f에 나타나 있다.

구름탐지를 위한 파라미터 조정작업 이후 랜드마크의 정확도를 높이기 위한 튜닝 작업이 진행되었다. 천리안 위성의 기하보정 시스템에 이용된 랜드마크는 GSHHS 자료(Wessel and Smith, 1996)를 바탕으로 구축되었다. Fig. 11은 GOCI 기하보정의 랜드마크 매칭에 이용된 랜드마크 데이터 베이스를 보여 준다. 일부 지역(북만주 부근 및 상하이 부근의 강과 호수)을 제외하면 대부분이 중국, 대한민국 및 일본의 해안선을 따라 랜드마크가 분포되어 있음을 알 수 있다. GOCI INR 프로세싱에 이용된 랜드마크의 개수는 총 1180개였다. 궤도상 시

험 기간 동안 기존의 랜드마크 칩 기반인 GSHHS 데이터 베이스에 비해 해상도가 뛰어난 GOCI관측 자료를 직접 이용하여 데이터 베이스의 품질 개선 작업도 이루어졌다.

MI의 경우는 각각의 관측모드(Fig. 3참조)에 따라 랜드마크의 개수가 달라지게 된다. 즉 관측영역이 좁은 LA에 비해 FD모드에서는 유효한 랜드마크의 숫자가 현저하게 증가하게 된다

TUN2다음 단계로 진행된 기하보정처리의 과정은 선형에러교정 알고리즘 내의 교정각 조정을 위한 파라미터 튜닝작업이다(TUN3). 기본적으로 교정각 조절에 필요한 롤각, 피치각 및 요각 값들은 초기 비행 파라미터들(flight parameters)이 이용되었다. Fig. 12에는 Aug 29 ~ Sep 1, 2010자료로부터 산출된 롤, 피치, 요에 대한 전형적인 교정각 값들이 나타나 있다.

그 다음 단계는 기하보정 정확도를 결정짓는 핵심인자인 상태벡터(State Vector)를 고정시키는 작업이었다(TUN4). 이를 위해서는 시간준수규정(timeliness)과의 조율이 필요하다. 궤도상 시험 기간 여러 번의 테스트를 통해 얻은 결론은, 일반적인 경우 대부분의 유효한 랜드마크를 찾기 위해 세 번의 루프를 수행하면 되며, 특별한 경우도 네 번의 루프를 수행하면 만족한 성능을 위한 유효한 랜드마크가 획득되었다.

2010년 8월 24일부터 29일까지의 MI Level1A 데이터를 통한 시험에서 획득한 랜드마크의 개수는 아시아 태평양지역관측(APNH), 북반구확장관측(ENH) 및 전구관측(FD)에 대해 평균적으로 각각 100, 200 및 300개 이상의 유효한 랜드마크 개수를 보였다(Fig. 13). 이러한 튜닝단계(TUN1~TUN7)를 거쳐 고정된 INR 튜닝 파라미터들을 바탕으로 최종 성능검증이 이루어졌다.

두 테이블(Table 3 & Table 4)은 MI 및 GOCI의 INR 성능테스트 결과를 각각 보여준다. 위 결과는 항우연 지상국에서 실시간으로 획득한 해당 기간 동안의 Level 1B자료를 통해 계산한 값들이다. 이 성능테스트 기간 동안 항우연뿐만 아니라 사용자그룹의 지상국에 설치된 실시간 자료시스템을 통해 얻은 동일 기간의 자료들 또한 성능 테스트에 이용하였으며, 결과는 항우연 지상국에서 얻은 값과 거의 비슷한 수치들을 보였다(결과 생략).

기상탑재체의 경우 각각 일주일 치의 식기간(2010년

Table 3. The INR performance result from the MI data. The results of two periods(Non-Eclipse: Jan 19~26, 2011 & Eclipse: Sep 20~26, 2010) were compared with the COMS MI INR requirement specifications

	Spec. (EW)	Spec. (NS)	Non-eclipse (EW)	Non-eclipse (NS)	Eclipse (EW)	Eclipse (NS)
Navigation	56 μ rad	56 μ rad	46.3 μ rad	43.7 μ rad	40.5 μ rad	40.6 μ rad
Frame-to-Frame registration (90min)	42 μ rad	42 μ rad	33.4 μ rad	33.2 μ rad	27.1 μ rad	27.4 μ rad
Band-to-Band registration (VIS-IR)	50 μ rad	50 μ rad	6.14 μ rad	7.2 μ rad	4.6 μ rad	11.7 μ rad
Band-to-Band registration(IR-IR)	50 μ rad	50 μ rad	2.05 μ rad	3.9 μ rad	0.3 μ rad	0.3 μ rad

Table 4. The INR performance result from the GOCI data(Jan 20~26, 2011)

	Spec.(EW)	Spec.(NS)	Performance(EW)	Performance(NS)
Navigation	28 μ rad	28 μ rad	17.5 μ rad	15.5 μ rad
Within Frame Registration	28 μ rad	28 μ rad	22.9 μ rad	21.2 μ rad
Frame-to-Frame registration(90min)	28 μ rad	28 μ rad	7.7 μ rad	7.3 μ rad



Fig. 11. Landmark database used for the GOCI INR processing.

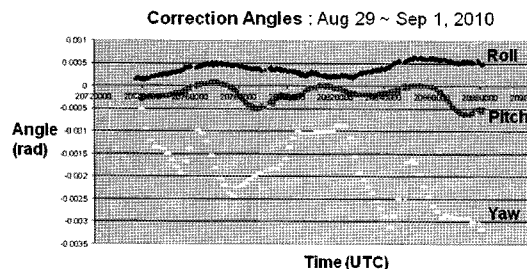


Fig. 12. Typical correction angles from the Linear Error Correction Algorithm(Aug 29 ~ Set 1, 2010)(COMS INR team, 2011).

9월20일 ~ 9월26일) 및 비-식기간(2011년 1월 19일 ~ 1월 26일) 자료를 바탕으로 계산한 값들은 천리안위성 INR 성능 요구조건(예, 위치결정 정확도 56 μ rad 미만,

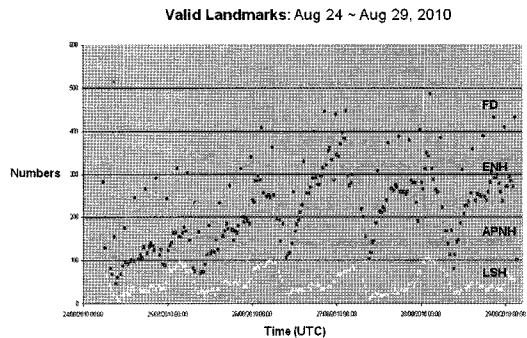
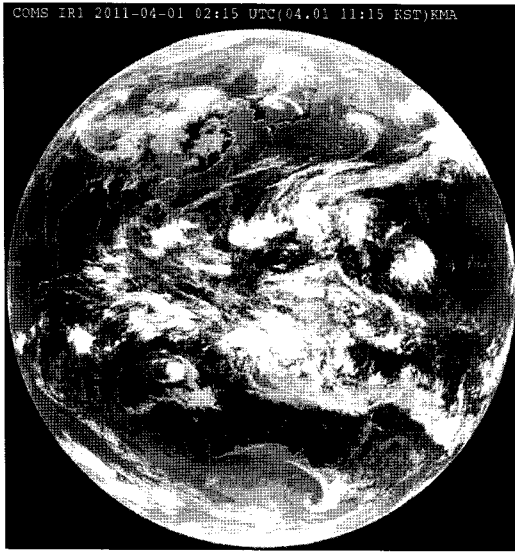


Fig. 13. Example of valid landmarks according to the MI observation modes(Aug 24 ~29, 2010 MI data) (COMS INR team, 2011).

90분내의 위치정확도 42 μ rad 미만 등)을 만족하는 결과를 보여 주었다. 해양탐재체 또한 2011년 1월 20일부터 1월 26일 동안의 1주일 자료를 바탕으로 측정된 위치결정에러 및 위치정확도유지 성능은 28 μ rad미만으로 요구조건이 모두 만족되었다.

표들에 나타난 궤도상 시험 최종테스트가 완료된 2011년 1월말 이후 INR 팀은 추가적인 튜닝작업을 통해 MI 및 GOCI INR 시스템을 향상시켰으며 궤도상 시험 결과에 비해 좀 더 향상된 성능을 보여주었다. 현재 항우연 위성센터, 국가기상위성센터 및 해양위성센터의 실시간 자료처리시스템에 적용된 기하보정알고리즘은 궤도상 시험결과 보다 향상된 튜닝 값들을 적용한 알고리즘으로 운영되고 있다.

Fig. 14는 궤도상 시험을 성공적으로 완료하고 실시간 자료시스템을 통해 생산되어 일반에게 배포되고 있



(a)



(b)

Fig. 14. Well calibrated Level1B COMS data after the COMS IOT: (a) MI FD image (2011.4.1,02:15UTC, <http://nmsc.kma.go.kr>), (b) GOCI image (2011.4.4,03:16UTC, <http://kosc.kordi.re.kr>).

는 두 탑재체의 Level1B 영상자료들의 모습이다.

6. 결론

천리안 위성의 궤도상 시험이 성공적으로 마무리되어 우수한 품질의 기상탑재체 자료와 해양탑재체 자료가 기상청 및 해양연을 통해 배포되고 있다. 각종 에러를 제거한 고품질의 영상을 얻기 위한 천리안위성 자료의 보정 테스트들이 7개월 가량의 궤도상 시험 기간 동안 심도 높게 진행되었다. 자료의 복사보정 처리와 아울러 위성자료 전처리의 핵심이 되는 기하보정 처리는 영상의 각 픽셀의 위치 정보인 위·경도 값을 정확하게 결정하는 작업으로 궤도상 시험 기간의 단계별 계획에 따라 알고리즘의 기능 및 성능이 분석, 검증 되었다. 기하보정 알고리즘 주요 함수들의 기능 검증이 먼저 이루어졌으며 다음으로 INRSM의 핵심인 네비게이션 함수내의 상태 벡터를 결정하기 위한 튜닝 작업이 7단계에 걸쳐 이루어 졌다. 최종적으로 1주일 치의 자료를 통해 분석한 천리안위성 기하보정시스템 성능테스트 결과는 모든 요구조건을 만족하는 navigation 및 registration 값들을 보여 주었다.

사 사

이 연구는 교육과학기술부의 지원 아래 수행된 통신해양기상위성(천리안위성) 개발사업의 일환으로 수행되었습니다. 본 연구와 관련하여 많은 도움을 주신 J. Degremont and P. Meyer(EADS Astrium) 및 세트렉 아이의 이영란 박사 및 신동석 박사님께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 김현숙, 이태운, 허동석, 이수암, 김태정, 2007. 정지궤도 기상위성의 자동기하보정, 대한원격탐사학회지, 23(4): 297-309.
- 서석배, 임현수, 안상일, 2010. 정지궤도 해색탑재체(GOCI) 전처리 시스템, 대한원격탐사학회지, 26(2): 167-174.
- 한희정, 유주형, 안유환, 2010. 정지궤도 해색탑재체(GOCI) 해양자료처리시스템(GDPS)의 개발, 대한원격탐사학회지, 26(2): 239-249.
- 허동석, 김태정, 2006. GOES-9 영상의 정밀기하보정을 위한 여러 센서모델 분석, 대한원격탐사학회

- 지, 22(4): 285-294.
- COMS INR team, 2011. COMS INR In-Orbit Test Report, EADS Astrium.
- Jin, K-W., and S-B. Seo, 2011. In Orbit Radiometric Calibration Tests of COMS MI Infrared Channels, *Korean Journal of Remote Sensing*, 27 (3): 369-377.
- Meyer, P., 2010. INR IOT PLAN, EADS Astrium.
- Ou, M-L, 2005. Introduction to the COMS Program and its Application to Meteorological Services of Korea, *Eumetat Meteorological Satellite Conference*, Dubrovnik, Croatia, Sep 19-23, 2005.
- Seo, S-B., K-W. Jin, and S-I. Ahn, 2011. Scan mirror Emissivity Compensation for the COMS MI, *Aerospace Engineering and Technology*, 10(1), Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, Korea (Accepted).
- Wessel, P., and W. Smith, 1996., A Global, Self-consistent, Hierarchical, High-Resolution Shoreline Database, *J. Geophys. Res.*, 101: 8741-8743.
- Yang, C-S., J-H. Song, H-J. Han, and G-H. Ju, 2010. Geometric Correction of Geostationary Ocean Color Imager(GOCI) Data, *International Symposium on Remote Sensing (ISRS) 2010*, Jeju, Korea, Oct 27-29, 2010.