

통신해양기상위성의 영상위치유지 성능평가 프로그램 개발 및 분석

이운섭¹, 최윤혁², 박상영^{1†}, 방호충², 주광혁³, 양군호³

¹연세대학교 천문우주학과

²한국과학기술원 항공우주공학과

³한국항공우주연구원 통신해양기상위성사업단

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF IMAGE REGISTRATION PROGRAM FOR THE COMMUNICATION, OCEAN, METEOROLOGICAL SATELLITE (COMS)

Un-Seob Lee¹, Yoon-Hyuk Choi², Sang-Young Park^{1†}, Hyo-Choong Bang², Gwanghyeok Ju³, and Koon-Ho Yang³

¹Dept. of Astronomy, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

²KAIST, Daejeon 305-701, Korea

³Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 305-333, Korea

E-mail: spark@galaxy.yonsei.ac.kr

(Received August 02, 2007; Accepted August 13, 2007)

요 약

이 연구는 통신해양기상위성의 영상위치유지(Image Navigation and Registration, INR) 시스템의 시뮬레이션을 위한 프로그램을 개발하고, 영상오차보상(Image Motion Compensation, IMC) 알고리즘의 성능을 비교분석하였다. 통신해양기상위성 궤도와 자세 요소를 모델링하고 궤도오차와 자세오차를 계산하여 이러한 궤도 및 자세오차가 영상왜곡에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 영상오차보상을 하지 않았을 경우와 GOES 위성의 영상오차보상 알고리즘을 적용하였을 경우, 그리고 선행 연구를 통해 개발되었던 개량된 영상오차보상 알고리즘을 적용하였을 경우의 영상들을 비교하여 각 알고리즘의 성능을 확인하였다. 개량된 영상오차보상 알고리즘은 GOES 위성의 알고리즘보다 효율적으로 영상왜곡을 보정하였다. 이러한 연구는 통신해양기상위성의 INR 시스템을 효과적으로 운용하고 그 성능을 향상시킬 수 있는 기술적 토대를 마련하는데 기여할 것이다.

ABSTRACT

We developed a software for simulations and analyses of the Image Navigation and Registration (INR) system, and compares the characteristics of Image Motion Compensation (IMC) algorithms for the INR system. According to the orbit errors and attitude errors, the capabilities of the image distortions are analyzed. The distortions of images can be compensated by GOES IMC algorithm and Modified IMC (MIMC) algorithm. The capabilities of each IMC algorithm are confirmed based on compensated images. The MIMC yields better results than GOES IMC although both the algorithms well compensate distorted images. The results of this research can be used as valuable asset to design of INR system for the Communication, Ocean, Meteorological Satellite (COMS).

[†]corresponding author

Keywords: communication ocean and meteorological satellite (COMS), image navigation and registration system, image motion compensation

1. 서 론

우리나라는 우주개발 중장기 계획에 발맞추어 통신해양기상위성(Communication, Ocean and Meteorological Satellite, COMS)을 2009년에 발사할 예정이다. 그 동안 방송통신 분야에만 치우쳐 있었던 정지위성의 활용분야를 기상관측 및 해양탐사 분야에까지 확대하고 우리의 독자적인 기술을 활용한다는 점에서 우리의 우주개발 기술을 한 단계 발전시키는 계기를 마련할 수 있을 것이다(최성봉 2002). 통신해양기상위성은 고도 약 36,000km 상공의 지구정지궤도에 위치하며 통신 및 해양관측, 기상관측의 임무를 수행하는 우리나라 최초의 다목적 지구정지궤도위성이다. Ka 대역을 가지는 통신탑재체와 정밀한 지구영상을 관측하기 위해 기상관측용 5채널 영상기와 해양관측용 8채널 칼라 영상기가 탑재될 예정이다(주광혁 외 2004).

지구정지위성 궤도상에 위치한 위성은 다양한 섭동력들 때문에 이상적인 기준궤도에 대하여 궤도 오차를 갖는다. 또한 인공위성 주변의 우주환경에 의한 외란과 위성 본체 및 탑재체 내부 교란 때문에 자세오차를 갖는다. 이러한 궤도 및 자세오차를 포함한 다양한 시스템 오차들은 영상장비를 통해 관측된 지구영상에 대한 영상왜곡(image distortion)을 유발한다. 정밀한 기상 및 해양관측을 위한 고품질의 지구영상을 얻기 위해서는 이러한 영상왜곡을 유발하는 시스템 오차들을 효과적으로 보정할 수 있어야 한다. 관측영상의 오차보정 및 전처리를 위해 미국의 기상위성인 GOES I-M (Geostationary Operational Environment Satellite I-M)의 경우 영상위치유지(Image Navigation and Registration, INR) 시스템을 탑재하였다(Kamel & Bhat 1987).

통신해양기상위성의 주요 임무 중 하나인 해양 및 기상관측 임무를 효과적으로 수행하기 위해서는 정밀한 지구영상 관측이 필요하고, 이러한 영상을 얻기 위해서는 정밀한 자세 및 궤도오차에 대한 모델링을 필요로 한다. 통신해양기상위성에서는 고품질의 기상 영상을 얻기 위해 관측 영상 전처리 시스템인 INR 시스템의 설치가 필요하다. 그러나 INR 시스템을 사용해본 경험이 없는 우리나라로서는 운용 전 시뮬레이션을 통해 얼마 효과적인 영상 획득이 이루어질 수 있는지를 확인할 필요성이 있다. 통신해양기상위성의 INR시스템을 시뮬레이션할 영상오차보상(Image Motion Compensation, IMC) 알고리즘은 이미 개발되었다(정택서 외 2006, Jung et al. 2006). 이 논문에서는 개발된 영상오차보상 알고리즘을 활용하여 INR 시스템에 대한 운용 시뮬레이션 프로그램을 개발하고, 시뮬레이션 영상을 통해 그 성능을 분석하는데 그 목적이 있다. 프로그램은 다음과 같이 여러 모듈로 구성된다(박상영 외 2007). 영상 보정이 이루어지는 보정을 살펴보기 위해 기준영상을 정하는 모듈, 위성의 궤도 및 자세 요소를 예측하여 궤도 오차와 자세 오차를 구하는 모듈과, 통신해양기상위성의 영상오차보상 알고리즘을 구현하는 모듈, GOES 위성의 영상오차보상 알고리즘을 구현하는 모듈, 탑재된 영상기의 영상 스캔 방식을 이용하여 영상을 읽어드리고 재배치하는 모듈 등이다. 이렇게 완성된 프로그램을 활용하여 통신해양기상위성에서 사용될 INR 시스템에 대한 운용 프로그램에 기본적인 데이터를 제공하고, 궤도 및 자세오차에 의한 영상의 왜곡현상을 분석하고자 하며, 또한 그 왜곡된 영상을 보상하는 영상오차보상 알고리즘의 성능을 검증하고자 한다. INR 시스템 성능 분석과 시뮬레이션 과정을 통해서 우리는 INR 시스템을 보다 효과적으로 운용할 수 있는 기술을 습득할 수 있

으며, 차후에 진행될 지상의 기상 및 해양관측을 목적으로 개발될 국내위성들에 유용하게 활용될 수 있을 것이다. 또한 현재의 INR 시스템을 개선, 발전시킬 수 있는 기술적 토대도 마련할 수 있다. 이러한 시도들은 우주개발 선진국에 비해 취약한 우주기술 분야의 국산화를 앞당기고, 앞으로 지속될 우리나라의 우주개발의 성공에 밑거름이 될 수 있을 것이다.

2. 영상 오차 보상 알고리즘(Image Motion Compensation Algorithms)

궤도 및 자세 오차가 없다고 가정할 경우 위성은 정확한 위치를 지향할 수 있게 된다. 이때 영상을 획득하는 영상기의 스캔라인은 시간에 관계없이 모든 스캔라인들이 서로 나란하게 되고, 이 때 관측된 지구영상에서는 오차에 의한 일그러짐이 나타나지 않을 것이다. 하지만 위성에 영향을 미치고 있는 궤도와 자세오차를 비롯한 여러 가지 오차 요인들로 인해, 실제 영상기(imager)의 스캔라인은 비스듬하게 기울어지게 된다. 만일 스캔라인이 기울어졌다면, 기울어진 양만큼의 ΔAZ 와 ΔEL 을 계산하여 영상 거울(image mirror)의 보정이 이루어지게 한다. 이 때 사용되는 것이 영상오차보상(Image Motion Compensation, IMC) 알고리즘이다. 여기서 AZ 와 EL 은 영상 탑재체의 광학축을 기준으로 한 영상화소의 각각 방위각(azimuth)과 고각(elevation)을 나타낸다. 영상오차보상 알고리즘을 통해 두개의 서보(servo) 모터에 의해 움직이는 스캔 미러(scan mirror)의 각도를 조정함으로써 영상기 내로 들어오는 빛의 각도를 조정하여 스캔라인을 우리가 원하는 형태로 바꾸게 되는 것이다.

GOES 위성의 영상오차보상 알고리즘은 영상을 획득하면서 틀어진 인공위성의 기울어짐을 방위각(Azimuth)과 고각(Elevation) 방향의 성분들로 나누어서 계산한 다음, 각각의 성분별로 합산하여 최종적인 보상을 산출하는 방식을 취하며 식 (1)의 형태를 가진다(NOAA/NESDIS 1998, Earth Location User's Guide).

$$\begin{aligned} \Delta AZ &= -A(Q) \cdot AZ \cdot \Delta R_s - B(Q) \cdot \Delta H_s - EL \cdot (z - W_s) - y \\ \Delta EL &= -A(Q) \cdot EL \cdot \Delta R_s - B(Q) \cdot \Delta L_s + AZ \cdot (z - W_s) - x \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $\Delta AZ, \Delta EL$ 은 방위각과 고각의 영상 오차 보상 요소, $A(Q) = [\cos Q - C(Q)]^{-1}, B(Q) = A(Q) \cdot C(Q), C(Q) = [\cos^2 Q - 1 + (R_e/R_s)^2]^{1/2}, \cos Q = \cos AZ \cos EL, R_e$ 는 지구 반지름, R_s 는 지구 정지 궤도의 반경, ΔR_s 는 지구 정지 궤도 반경으로부터 궤도 반경의 편차, ΔH_s 는 근지점으로부터 경도의 편차, ΔL_s 는 인공위성의 위도, W_s 는 인공위성의 궤도 각속도, x, y, z 는 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw) 각오차이다. GOES 위성의 IMC 알고리즘은 1차항에서 근사하였을 뿐 아니라 방위각과 고각 사이의 변화 중 상대적으로 작은값을 무시를 하고 계산을 간편하게 한 것이다. 이러한 점을 보완하기 위해서 모든 오차요소들을 방위각 및 고각 방향의 성분으로 나누어 고려하여 보다 정밀한 보정각도를 계산하도록 하였다. 이러한 과정을 통해 GOES 위성의 영상오차보상 알고리즘을 다음과 같이 개량하였다(정택서 외 2006, Jung et al. 2006).

$$\begin{aligned} \Delta \theta_{Az} &= -\Delta \theta_{R,Az} - \Delta \theta_{P,Az} - \Delta \theta_{Y,Az} - \Delta \theta_{MA,Az} + \Delta \theta_{i,Az} + \Delta \theta_{\delta,Az} - \Delta \theta_{L,Az} + \Delta \theta_{RD,Az} \\ \Delta \theta_{El} &= -\Delta \theta_{R,El} - \Delta \theta_{P,El} + \Delta \theta_{Y,El} + \Delta \theta_{MA,El} - \Delta \theta_{i,El} - \Delta \theta_{\delta,El} + \Delta \theta_{L,El} - \Delta \theta_{RD,El} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\Delta \theta_{L,Az}, \Delta \theta_{L,El}$ 은 경도 변화에 의해 발생하는 방위각과 고각의 변화를 나타낸다. ΔRD 는 각 거리 변화에 의한 변화, $\Delta \theta_{\delta}$ 는 위도 상의 위치 이동에 의한 변화, $\Delta \theta_i$ 는 궤도 요각 변화에 의한 변화,

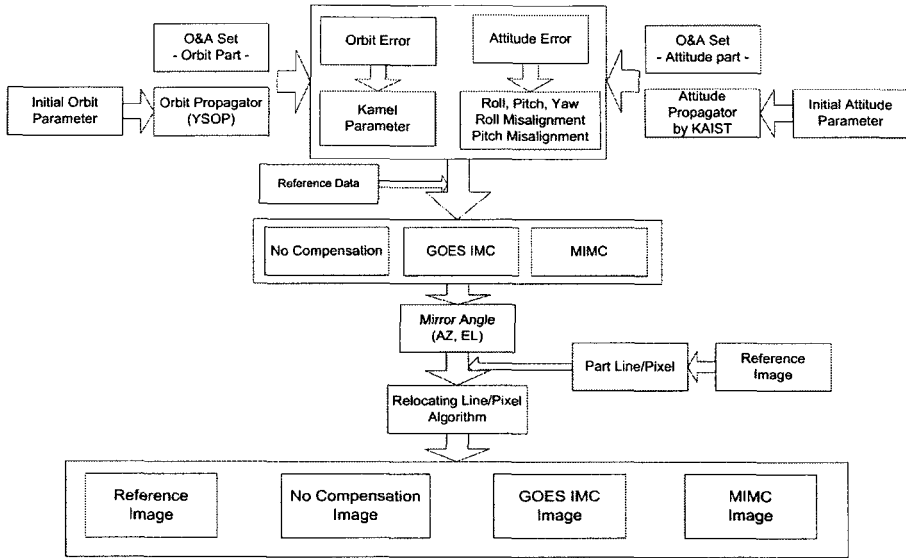


그림 1. 통합 영상 시뮬레이션 프로그램의 흐름도.

$\Delta\theta_R, \Delta\theta_P, \Delta\theta_Y$ 는 위성의 자세오차로 인해 발생하는 변화로서 각각 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw) 변화에 의한 변화, 그리고 $\Delta\theta_{MA}$ 는 영상 탑재체의 광학축의 어긋남으로 인해 발생하는 비정렬 오차에 의한 변화이다. 각 항목의 부호가 다른 것은 각 오차요소의 부호가 다르기 때문이다. 식 (2)로 표현된 영상오차보상 알고리즘을 개량된 영상오차보상(modified Image Motion Compensation, MIMC) 알고리즘이라 부르기로 한다.

3. 통합 영상 시뮬레이션 프로그램

영상오차보상 알고리즘을 이용하여 INR의 영상 시뮬레이션을 위한 통합 영상 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 그림 1은 통합 영상 시뮬레이션 프로그램의 흐름도이다. 통합 영상 시뮬레이션 프로그램은 크게 4가지 모듈로 구성되어 있다. 궤도 및 자세를 예측하는 궤도 및 자세 전파 모듈(propagator), 예측된 궤도 및 자세 요소로부터 궤도 및 자세오차를 계산하고 그 오차를 보정하기 위해 영상오차보상 알고리즘을 통해 보상값을 계산하는 모듈, 기준 영상의 화소 자료를 읽어 들이고 계산된 보상값에 의해 화소 이동량을 계산하는 모듈, 마지막으로 계산된 화소의 위치 정보를 토대로 각 영상을 생성하는 모듈이 있다. 위 4가지 모듈은 모두 MATLAB을 이용하여 개발되었으며 사용자의 편리를 위하여 그래픽 사용자 인터페이스를 사용하였다. 각각의 다른 영상오차보상 알고리즘은 영상오차를 보상하는 정도가 다르며 따라서 만들어지는 영상의 차이로 나타나게 된다. 이러한 영상의 차이를 분석하면 각 영상오차보상 알고리즘의 성능을 검증하고 비교할 수 있다.

3.1 기준 영상의 결정

위성의 궤도 오차나 자세 오차가 존재하지 않을 경우 위성의 영상 탑재체에서 얻을 수 있는 영상

표 1. 초기 접촉 궤도요소.

궤도요소	값
기산시각(Epoch)	2005년 9월 1일 06:00:00.000 (UT)
궤도 장반경	42165.57 km
궤도 이심률	0.000267
궤도 경사각	1.064 deg
승교점 적경	315.700 deg
근지점 인수	180.0 deg
평균 근점각	90.0 deg
직하점 위도	0.0 deg
직하점 경도	155.0 deg

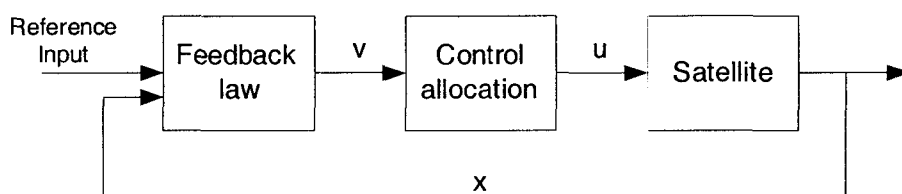


그림 2. 위성 자세 제어의 흐름. 여기서 v는 실제 위성체 제어에 필요한 제어 명령이고, u는 v를 만족하는 구동기 각각의 제어 명령이 된다..

을 기준 영상이라 정의하였다. 궤도 및 자세 오차가 없을 경우 영상기는 목표지향점을 정확히 지향할 수 있고 편향적이거나 찌그러짐이 발생하지 않은 정확한 영상을 얻을 수 있다. 이 연구에서 사용된 영상은 6600 × 6000픽셀(pixel)의 크기를 갖는다. 이는 통신해양기상위성의 모델이 되는 GOES 위성의 공개된 영상(13200 × 12008픽셀)의 약 4분의 1의 크기이다. 기준 영상은 각 오차가 반영된 왜곡된 영상과 비교된다.

3.2 궤도 및 자세 전파

3.2.1 궤도 전파

영상 탑재체의 영향을 미치는 궤도오차를 계산하기 위해서는 위성의 궤도요소를 정밀하게 예측할 수 있어야 한다. 영상 시뮬레이션에서 사용된 가상의 통신해양기상위성의 궤도 자료는 YSOP(YonSei Orbit Propagator)를 기본으로 하여 만들어진 MATLAB 기반의 궤도 전파기(Orbit Propagator)를 사용하여 생성하였다. 섭동항은 12차수까지의 지구 비대칭 중력장과 달과 태양의 중력에 의한 섭동, 태양 복사압이 고려되었다. 표 1은 궤도 전파에 이용하기 위해 GOES 위성의 궤도 자료를 통해 설정한 초기 접촉 궤도 요소들이며, 지구중력장 모델로는 Goddard Space Flight Center(GSFC)의 JGM-2 중력 모델을 사용하였고, 달과 태양의 위치를 나타내는 천문력은 JPL의 DE405 모델을 사용하였다.

3.2.2 자세 전파

자세 요소의 예측에 사용된 자세 전파기(attitude propagator)는 MATLAB을 기반으로 제작되었다. 그림 2는 자세 시뮬레이터의 흐름도이다. 자세 전파기에는 GOES-N 위성(NOAA/NASA 2006 GOES-N DATA BOOK)을 기반으로 피라미드 모양의 4개 휠이 장착된 위성을 모델링하고, Black

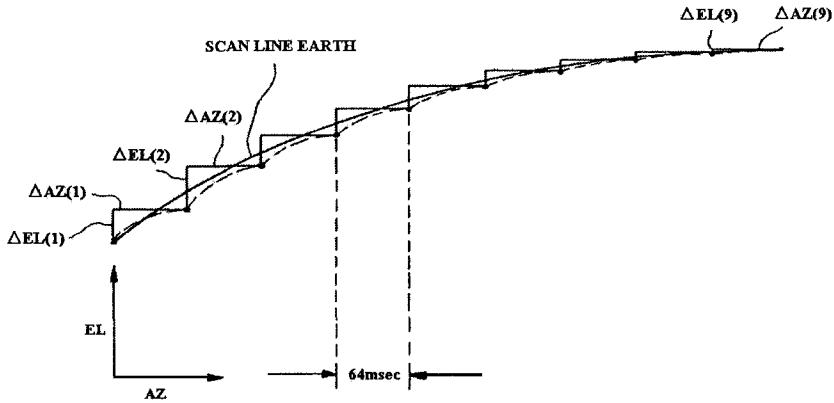


그림 3. 영상오차보상 알고리즘의 오차보정 과정(Kamal 1987).

Body Calibration 등의 내부 탑재체의 움직임으로 인한 자세 영향을 위해서 탑재체의 모델링 또한 추가하였다. 내란(internal disturbance)으로는 태양 복사압, Black Body Calibration으로 인한 자세 영향, 그리고 지구 센서로 인한 측정 잡음을 고려하였다. 자세제어는 피드백 제어기로 수행되며, 제어되어 나온 자세각에 열적 변형에 의한 자세 오차를 추가함으로써 시뮬레이션 환경을 구성하였다.

3.3 영상 자료 시뮬레이션

통신해양기상위성에 탑재된 기상관측용 광학 탑재체는 현재 운용중인 미국의 기상위성 GOES 위성의 영상기와 비슷한 성능과 스펙을 가진다. 지구 영상을 획득하는데 있어 일반 CCD 카메라와 같이 전체 영상을 한꺼번에 촬영하는 것이 아닌 일정 수의 검출기(detector)가 배열된 실리콘 검출기가 한 줄씩 스캔을 하는 방식으로 지구 영상을 획득하게 된다. 이 때 영상기 앞에 부착된 스캔 거울의 각도를 조정하여 입사되는 빛의 방향을 조정하는 것이다. 그러나 스캔 방식의 영상 획득방식은 직접 촬영을 통해 영상을 획득하는 방법보다 그 시간이 오래 걸리게 된다. GOES 위성의 경우 전지구 영상을 획득하는데 약 25분 정도의 시간이 소요된다. 이 때 만약 위성이 이상적인 지구 정지 궤도를 유지할 수 있다면 검출기가 그리는 스캔 라인은 시간에 관계없이 항상 나란한 선을 그리게 된다. 그러나 실제 위성은 자세 및 궤도 오차와 같은 다양한 오차 요인들에 의해 영향을 받게 되고, 따라서 검출기가 그리는 스캔 라인은 휘어진 곡선을 그리게 된다. 이렇게 기울어진 채 촬영된 영상은 일그러지며 이를 영상왜곡이라 한다. 처음에 기준 영상의 각 화소의 정보를 모두 입력시키고 이 자료를 위성에서 바라본 지구의 영상이라 가정한다. 검출기가 지나가게 될 스캔라인을 계산하여 스캔라인 영역의 영상화소를 읽어들이어 스캔하는 과정을 구현할 수 있다. GOES 위성의 경우 8개의 검출기를 가지고 있다. 따라서 1개의 스캔 라인은 세로로 8개의 화소를 가지게 된다. 또한 검출기가 이동되는 방향은 좌우로 변갈아가면서 움직이며 이러한 움직임도 고려하였다.

영상오차보상(IMC) 알고리즘으로 보정을 수행하는 경우에는 보정된 스캔 라인의 화소를 입력시켜야 한다. 그림 3은 영상오차보상 알고리즘의 오차 보정 과정을 나타내는 그림이다. 영상오차보상 알고리즘의 오차 보정은 한꺼번에 수행하지 않고 64ms 간격으로 순차적으로 보정을 하게 된다. 따라

서 64ms 간격마다 오차를 보정하는 보정값을 계산하여 스캔 라인의 위치를 결정하게 된다. 이 때 오차를 보정하기 위한 보정값은 각각 스캔 거울의 위치 정보, 즉 방위각과 고각으로 표현이 된다. 이러한 스캔 거울의 방위각과 고각의 변화는 기준 영상에서 영상 화소의 위치를 이동시켜 구현한다. 따라서, 영상 오차 보상을 하지 않았을 경우, GOES 위성의 영상오차보상 알고리즘을 사용하여 보상이었을 경우, 그리고 통신해양기상위성의 영상오차보상 알고리즘(개량된 알고리즘, MIMC)을 사용하여 보정하였을 경우는 각각 기준 영상과 같은 좌표를 가지는 위치에 서로 다른 영상화소가 위치하게 되는 것이다.

3.4 영상 재배치 및 비교 분석

앞서 살펴보았듯이 스캔 거울의 방위각(Az)과 고각(EI)이 스캔 라인을 결정하는 요소가 된다. 또한 영상오차보상 알고리즘을 통해 계산되는 오차 보정 값들 역시 스캔 거울의 위치 정보로 표현이 된다. 각각 이동된 화소의 정확한 위치를 파악하기 위해서는 스캔 거울의 위치를 영상의 화소 위치로 변환을 시켜야 한다. 이를 통해 옮겨진 영상 화소의 위치 정보를 사용하여 각 경우에 해당하는 영상을 생성할 수 있는 것이다. 스캔 거울의 위치와 영상의 화소 위치(Az: 방위각, EI: 고각)는 다음과 같은 식으로 서로 대응될 수 있다(NOAA/NESDIS 1998, Earth Location User's Guide).

$$EI = ELVMAX + (D - LINE) * ELVLN$$

$$Az = (PIXEL - 1) * SCNPX - SCNMAX \tag{3}$$

여기에서, LINE과 PIXEL은 영상에서의 2차원적인 좌표를 나타낸다. LINE은 세로방향, PIXEL은 가로방향의 좌표이다. D는 광학축의 북쪽 끝의 검출기의 고각을 의미한다. GOES 위성의 기상관측용 광학 영상 탑재체의 경우 4.5의 값을 가지게 된다. 그리고 ELVMAX와 SCNMAX는 각각 스캔 거울이 가질 수 있는 고각과 방위각의 최대치를 나타내며, ELVLN과 SCNPX는 각각 1라인(LINE) 또는 1픽셀(PIXEL) 당 변하는 고각과 방위각의 크기이다. 이 수치들은 영상 탑재체의 특성이므로 각 탑재체에 맞게 수치가 정해져 있다. 다음은 스캔 거울의 위치 정보로부터 영상 화소의 위치 정보를 구하는 식이다(NOAA/NESDIS 1998, Earth Location User's Guide).

$$LINE = [ELVMAX - EV] / ELVLN + D$$

$$PIXEL = [SCNMAX + SC] / SCNPX + 1 \tag{4}$$

여기에서, EV는 스캔거울의 고각이며, SC는 그 거울의 스캔각이다. 이 연구에서는 통신해양기상위성의 기상 영상 탑재체의 제원이 아직 결정되지 않았기 때문에 GOES 위성에서 사용된 값을 사용하였다. 궤도 및 자세오차에 의해 영상기의 지향점이 변경되었을 경우 스캔 거울의 바뀐 방위각과 고각을 통해 변경된 영상 화소의 좌표를 알 수 있는 것이다. 이는 영상의 변화로 나타나게 되고, 이렇게 만들어진 새로운 각각의 좌표를 통해 기준 영상의 픽셀을 재배치하여 영상기가 찍은 영상을 만들어낸다. 오차를 보상하지 않았을 경우와 GOES 위성의 영상오차보상 알고리즘을 사용하여 오차를 보정한 경우, 그리고 개량된 영상오차보상(MIMC) 알고리즘을 사용하여 오차를 보정한 경우에 대하여, 각각의 스캔 거울의 각도에 의해 나타나는 픽셀과 라인의 움직임을 영상의 변화로 나타낸다. 이렇게 만들어진 영상들을 서로 비교하면 각 영상오차보상 알고리즘의 성능을 영상을 통해 직접 확인하고 분석할 수 있다.

4. 영상 시뮬레이션 및 분석

4.1 궤도 및 자세 오차에 따른 영상의 왜곡

영상의 틀어짐에 가장 직접적으로 영향을 미치는 것은 궤도 및 자세 오차에 의한 영상기의 지향점 변화이다. 이상적인 지구정지궤도위성의 궤도요소와 자세요소를 가지고 영상을 구현하여 기준영상으로 삼았다. 궤도 요소 중에서 궤도 장반경, 궤도 경사각, 궤도 이심률, 자세 요소 중에서 롤각(roll angle), 피치각(pitch angle), 요각(yaw angle)의 오차가 영상에 어떤 영향을 미치는지 알아보았다. 목표로 설정된 지향점의 위치는 서울을 기준으로 하였으며 그 위치는 경도 동경 127°와 위도 37°이다. 표 1과 같은 지구정지궤도를 가정하고 기준시간(Epoch)으로부터 22분간 영상스캔을 시뮬레이션 하였다.

궤도 장반경의 변화는 평균궤도속도의 변화를 가져온다. 궤도 장반경이 증가하면 평균궤도속도는 감소하게 되고 반대로 궤도 장반경이 감소하면 평균궤도속도는 증가하게 된다. 위성의 평균궤도속도의 변화는 지구 정지 궤도 위성에서는 위성의 직하점의 경도변화로 나타난다. 지향점 역시 마찬가지로의 양상을 보이게 된다. 이러한 지향점의 변화는 영상의 왜곡으로 나타나게 된다. 장반경에 100km의 변화가 있을 때 마다 가로방향(픽셀 축 방향)으로 약 12픽셀, 세로방향(라인 축 방향)으로 약 9라인의 이동을 보였다.

궤도 이심률은 궤도 장반경과 더불어 궤도의 모양을 결정한다. 이상적인 지구 정지 위성 궤도는 이심률을 0으로 하는 원형궤도이다. 하지만 실제 정지 위성의 궤도는 매우 작은 값($e \leq 0.001$)의 이심률 값을 가지게 된다. 궤도 이심률의 변화는 궤도의 모양을 변화시키면서 위성의 거리 변화를 발생시킨다. 이러한 변화는 위성의 평균궤도속도의 변화로 나타나게 된다. 위성의 평균궤도속도 변화는 경도상의 위치이동 폭을 변화시킨다. 이심률이 0.005 변할 때마다 영상의 세로방향(라인 축 방향)으로 약 2라인, 영상의 가로방향(픽셀 축 방향)으로 약 3픽셀이 변화한다. 궤도 장반경과 마찬가지로 이심률이 증가할 때 마다 영상의 화소의 이동이 선형적인 증가를 보이는 것을 알 수 있었다.

이상적인 정지궤도위성의 경우 궤도 경사각은 0°를 가지지만, 실제 위성에서는 섭동력에 의해 궤도 경사각이 변화한다. 궤도 경사각이 증가함에 따라 위성의 직하점의 위도가 주로 증가하게 된다. 0.3°의 궤도기울기 오차에 의한 가로방향(픽셀 축 방향)의 변화는 약 6픽셀이고, 세로방향(라인 축 방향)의 변화는 약 20라인 정도이다. 궤도 경사각의 오차는 장반경이나 이심률의 오차에 비해 영상의 변화에 영향을 크게 미치는 것을 알 수 있다. 지구정지궤도위성의 궤도요소와 영상스캔의 기산시간(Epoch)에 따라 궤도오차에 따른 지향점의 변화는 약간씩 다르게 나타날 수 있다.

롤(roll) 축은 위성의 진행방향을 나타내는 벡터이다. 따라서 롤각의 오차는 위성의 진행방향 벡터를 중심으로 회전을 하게 되므로 영상이나 지향점의 변화가 위도방향으로 나타난다. 0.05°당 남북방향(라인 축 방향)으로 약 30라인의 이동을 보였다. 오차값이 음의 값을 가질 경우 이 변화의 방향은 반대가 된다. 피치(pitch) 방향은 위성의 궤도 평면에 수직인 방향을 나타낸다. 따라서 기준 피치각의 변화는 롤 각의 변화와는 다른 양상을 보이게 된다. 롤 각의 경우에는 남북방향(라인 축 방향)으로 변화를 보였다면 피치 각의 변화는 동서방향(픽셀 축 방향)의 변화를 보여준다. 0.03°당 남북방향(라인 축 방향)으로 약 10라인, 동서방향(픽셀 축 방향)으로 약 33픽셀 정도 이동을 보인다. 이는 롤에 비해 적은 변화에도 더 큰 영상의 왜곡을 보이는 것이다. 변화값이 음의 값을 가질 경우 이 변화의 방향은 반대가 된다. 요(yaw) 방향은 위성에서 지구 중심을 바라보는 방향의 벡터이다. 이러한 특

표 2. 경도 오차만을 고려할 경우 지향점의 변화(평균값).

	기준 지향점	보상을 하지 않을 경우	GOES IMC로 보상할 경우	MIMC로 보상할 경우
위도(deg)	37.00	37.0000	37.0110	36.9986
경도(deg)	127.00	127.2301	127.0154	127.0007

표 3. 거리 오차만을 고려할 경우 지향점의 변화(평균값).

	기준 지향점	보상을 하지 않을 경우	GOES IMC로 보상할 경우	MIMC로 보상할 경우
위도(deg)	37.00	37.0016	37.0000	37.0001
경도(deg)	127.00	126.9983	127.0000	126.9979

징때문에 요 각의 변화는 영상의 회전에 많은 영향을 미치게 된다. 이런 회전에 의해 위도 및 경도 방향으로 각각 왜곡이 발생하게 된다. 따라서 지향점의 변화에는 롤 및 피치 각에 비해 상대적으로 적은 양이지만 남북방향(라인 축 방향)과 동서방향(픽셀 축 방향) 모두에 영향을 미친다. 0.2°당 남북 방향으로 약 10라인, 동서 방향으로 약 20픽셀의 이동을 보였다. 이는 롤이나 피치의 변화로 인한 영향보다는 적지만 남북방향과 동서방향을 합칠 경우 충분히 큰 오차요소가 될 수 있다. 변화값이 음의 값을 가질 경우 이 변화의 방향은 반대가 된다.

4.2 영상오차보상 알고리즘의 성능분석

4.2.1 궤도 오차에 의한 영상 시뮬레이션

여러 궤도요소의 오차로 인하여 발생하는 궤도 오차는 4가지 종류로 나타낼 수 있다. 경도오차(ΔL), 거리오차(ΔR), 지심 위도오차($\Delta \delta$), 궤도 요각(orbit yaw, Δi)이 그것이다. 이는 GOES 위성의 INR 시스템에서 Kamel 인수로 정의되는 것이며 궤도 전파를 통해 계산할 수 있다. 사용된 궤도요소는 표 1에 서술되었으며, 이상적인 지구 정기 궤도에 비해 섭동력에 의한 궤도오차를 이미 포함하고 있다. 이러한 궤도 요소를 이용하여 영상기의 지향점의 오차를 계산하고, 영상기의 지향점의 오차에 의해 영상이 어떻게 왜곡되는지 알아보려고 한다. 또한 GOES IMC 알고리즘과 MIMC 알고리즘을 이용하여 이러한 영상왜곡을 보상하고 각 영상오차보상 알고리즘의 특성을 분석하고자 한다. 영상 시뮬레이션은 2005년 9월 1일 06시부터 22분간 수행된 것이다. 영상시뮬레이션 시작 시각은 임의로 정해지며, 영상 시뮬레이션 시작시간(Epoch)에 따라서 영상 스캔 결과가 약간씩 달라질 수 있다. 시간에 따른 궤도 섭동력과 자세 섭동이 다르기 때문이다. 하지만 전반적인 양상은 크게 다르지 않다. 더 자세한 영상 시뮬레이션의 결과는 박상영 외(2007)에서 확인할 수 있다.

경도 오차(ΔL)만을 고려하였을 경우에 영상기의 지향점의 변화는 표 2와 같다. 이러한 지향점의 변화는 영상기가 스캔하는 영상의 왜곡에 그대로 반영된다. 즉, 영상기의 지향점의 변화가 크면 영상의 왜곡도 비례하여 커진다. 경도 오차만을 고려하였을 경우 영상 시뮬레이션 결과 보상을 하지 않은 영상이 전체적으로 오른쪽으로 이동한다(박상영 외 2007). 이는 표 2의 지향점의 변화와도 일치함을 알 수 있다. 동서방향으로 약 30픽셀의 이동을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 남북방향을 살펴보면 약 1라인 정도 남쪽으로 변한 것을 알 수 있으나 이는 픽셀변화에 비해 그 차이가 크지 않다. GOES IMC로 영상보정을 한 영상은 기준 영상의 비해 약 3픽셀 정도 오른쪽으로 이동한 것을 알 수

표 4. 지심위도 변화만을 고려할 경우 지향점의 변화(평균값).

	기준 지향점	보상을 하지 않을 경우	GOES IMC로 보상할 경우	MIMC로 보상할 경우
위도(deg)	37.00	37.0754	36.9795	36.9981
경도(deg)	127.00	127.3604	126.9447	127.0008

표 5. 궤도요각 오차만을 고려할 경우 지향점의 변화(평균값).

	기준 지향점	보상을 하지 않을 경우	GOES IMC로 보상할 경우	MIMC로 보상할 경우
위도(deg)	37.00	37.0000	37.0110	36.9986
경도(deg)	127.00	127.2301	127.0154	127.0007

있다. GOES IMC 알고리즘은 경도오차에 의한 고각의 변화를 무시하였기 때문에 보정하지 않았을 때의 라인의 변화는 보상을 하지 않았을 때와 같았다. 개량된 영상오차 보정 알고리즘(MIMC)을 통해 보정된 영상은 기준 영상과 매우 일치되는 모습을 보여주었다. 수치상으로 0.01픽셀 이하의 오차를 보였는데 이는 픽셀단위로 나타는 영상에서는 구별이 불가능한 수치이다. 이는 MIMC 알고리즘이 경도오차에 대한 오차를 잘 보상하여 줄 수 있음을 나타낸다.

거리 오차(ΔR)에 따른 영상의 왜곡은 크게 나타나지 않는다(표 3 참조). 이는 지향점의 변화가 하루 중 가장 크게 나타나는 경우에도 대략 위도 $\pm 0.015^\circ$, 경도 $\pm 0.015^\circ$ 정도로 그 값이 매우 작기 때문이다(정택서 2005). 지향점의 방향은 시작 시간에는 기준 지향점과 거의 같으나 시간이 지나면서 변화한다. 또한 하루가 지나면 다시 기준 지향점(서울)의 근처로 지향점의 위치가 변화하는 것을 알 수 있다. 표 3에서의 위도(약 0.0016°), 경도(약 0.0017°) 차이는 지구 표면상의 거리(서울기준 위도 $1^\circ \approx 115\text{km}$, 경도 $1^\circ \approx 90\text{km}$)로 환산하였을 때 약 1km 내외의 차이를 보이는 것이다. 기준 영상의 크기를 생각해 볼 때 이러한 차이의 영상 변화는 나타나지 않는다. 수치적으로만 미세한 차이는 확인할 수 있는데, 영상오차보정을 수행하지 않았을 경우의 영상을 기준 영상과 비교해보면 픽셀과 라인 각각 1픽셀, 1라인 이하의 변화만을 보였다. 각각 GOES IMC와 MIMC로 보정한 영상 또한 수치적으로 보상을 하지 않은 영상의 변화보다 적은 변화를 보였지만 화소 단위의 영상에서 보면 같은 양의 변화를 보임을 알 수 있었다.

표 4는 지심위도 오차($\Delta\delta$)에 따른 결과이다. 지심위도의 오차는 보상하지 않았을 경우에 영상의 왜곡정도가 크다. 이는 지구 정지 궤도 위성의 특성상 경도 방향의 움직임보다 위도 방향의 움직임이 더 크기 때문에 지향점의 변화도 더욱 크게 영향을 받는 것이다. 동서방향과 남북방향 모두 변하지만 그 비율에서는 차이를 보인다. 하루동안 지향점의 변화는 남북방향으로는 최대 2° 의 차이를 보이지만 동서방향으로는 0.8° 의 차이를 보인다. 보상하지 않은 영상은 남북 방향(라인 축 방향)으로 70라인, 동서방향(픽셀 축 방향)은 10픽셀의 변화를 보였다. GOES IMC 알고리즘을 보정한 영상의 경우에는 남북 방향으로 2라인, 동서방향은 2픽셀의 변화를 보이고, 또한 MIMC 알고리즘을 통해 보정한 영상의 경우에는 남북방향, 동서방향 모두 1픽셀 미만의 변화를 보였다.

오차요소로 궤도요각(Δi)만을 고려했을 경우 기준 시간에서의 지향점 변화는 미미하다(표 5 참조). 하루동안 지향점은 동서, 남북 성분 모두 변화하게 된다. 그 중 동서방향의 변화가 다소 더 크

표 6. 롤 각 오차만을 고려할 경우 지향점의 변화(평균값).

	기준 지향점	보상을 하지 않을 경우	GOES IMC로 보상할 경우	MIMC로 보상할 경우
위도(deg)	37.00	37.0189	37.0000	37.0000
경도(deg)	127.00	126.9912	127.0000	127.0000

표 7. 피치 각 오차만을 고려할 경우 지향점의 변화 (평균값).

	기준 지향점	보상을 하지 않을 경우	GOES IMC로 보상할 경우	MIMC로 보상할 경우
위도(deg)	37.00	37.0047	37.0005	37.0005
경도(deg)	127.00	126.9701	127.0002	126.9998

다(동서방향: $\pm 0.7^\circ$, 남북방향: $\pm 0.5^\circ$). 따라서 영상 또한 남북방향의 변화보다 동서방향의 변화가 더 크게 나타난다. 궤도 요각에 의한 영상 변화는 라인간의 변화(약 1라인)보다는 픽셀간의 변화(약 4픽셀)가 더 크게 나타난다. GOES IMC 알고리즘과 MIMC 알고리즘을 통해 보정한 영상은 모두 1픽셀 미만의 변화만을 보여주었다.

4.2.2 자세 오차에 의한 영상 시뮬레이션

자세오차에는 롤(Roll), 피치(Pitch), 요(Yaw) 각의 오차를 고려하였다. 자세 오차 역시 궤도 오차와 마찬가지로 자세 전파를 통해 자세 요소들을 예측하였다. 이 자세 전파는 가장 기본적인 외란과 내란을 적용하고 GOES 위성의 자세 요소와 비슷한 형태의 자료 요소를 만들어 내는데 그 목적이 있다. 영상을 스캔하는 시간은 궤도 요소와 마찬가지로 2005년 9월 1일 06시부터 22분간 전파하여 영상을 구현하였다. 약 22분의 스캔 시간 동안에, 태양 복사압, Black Body Calibration으로 인한 자세 영향, 지구 센서로 인한 측정 잡음을 쿼터니안 피드백 제어로 제어하고, 제어되어 나온 자세 각에 묘사된 열적 변형 요소를 추가함으로써 자세오차 시뮬레이션 환경을 구성하였다. 자세 오차에 의한 영상의 변화는 궤도 오차에 의한 것만큼 눈에 띄는 변화는 보이지는 않는다. 위성자세가 제어되고 있기 때문이다. 지향점의 위치 변화와 영상의 왜곡의 방향이 서로 일치함을 확인할 수 있었다. 또한 각 보상 알고리즘의 성능을 확인할 수 있었다.

롤각 오차를 보상하지 않았을 경우의 영상기의 지향점은 기준 지향점보다 다소 남쪽에 나타는 것을 알 수 있다. 롤각 오차의 경우 위성 진행방향을 중심으로 틀어진 자세의 변화이기 때문에 지향점의 위도 변화가 더 크다. 22분의 스캔시간동안, 보정을 하지 않을 경우 지향점의 변화는 최대와 최소의 차이가 남북방향으로는 최대 0.018° 를 보이고 동서방향으로는 최대 0.008° 정도의 지향점 오차를 보인다. 표 6은 22분 스캔시간동안 롤 각 오차만을 고려할 때의 지향점 변화의 평균값이다. 남북방향으로의 오차가 동서방향의 그것보다 큼을 알 수 있다. 자세 오차가 포함되지 않은 기준 영상을 시뮬레이션을 통해 비교하였을 경우 확인할 수 있는 변화는 라인의 변화뿐이었다. 수치적으로 나타난 변화는 약 2라인 정도의 변화를 보였다. GOES IMC 알고리즘을 사용하여 보정한 영상과 MIMC 알고리즘을 사용하여 보정한 영상을 기준영상과 비교하였을 때 두 영상 모두 1픽셀 미만의 변화를 보였다. 모두 롤 각의 의한 자세 보정이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다.

피치 각 오차에 의한 지향점 변화는 롤 각에 오차를 주었을 때의 경우와는 다르게 남북 방향보다

표 8. 요 각의 오차만을 고려할 경우 지향점의 변화 (평균값).

	기준 지향점	보상을 하지 않을 경우	GOES IMC로 보상할 경우	MIMC로 보상할 경우
위도(deg)	37.00	36.9979	37.0000	37.0000
경도(deg)	127.00	126.9970	127.0000	127.0000

표 9. 모든 오차를 포함하였을 경우 지향점의 변화(평균값).

	기준 지향점	보상을 하지 않을 경우	GOES IMC로 보상할 경우	MIMC로 보상할 경우
위도(deg)	37.00	36.0959	36.9936	36.9999
경도(deg)	127.00	127.4940	126.9584	126.9970

는 동서 방향의 변화가 크게 나타난다. 22분의 스캔시간동안의 보상하지 않았을 경우 동서방향은 최대, 최소의 차이가 0.1° 정도이고 남북방향의 차이는 약 0.004° 에 지나지 않는다. 이는 피치축의 방향과 그에 따라 피치 축이 변화할 수 있는 영역과 일치한다. 따라서 기준 시간에서의 지향점은 기준 지향점에서 서쪽으로 벗어난 지점에서 형성된다. 표 7은 22분 스캔시간동안 피치 각 오차만을 고려할 때의 지향점 변화의 평균값이다. 이 지향점의 변화는 영상의 왜곡으로 나타나는데, 보상이 이루어지지 않은 영상의 라인 축의 변화는 1라인 미만의 적은 변화를 보이나 픽셀 축의 변화는 약 10픽셀의 변화를 보인다. GOES IMC 알고리즘을 사용하여 보상한 영상과 MIMC 알고리즘을 사용하여 보정한 영상은 기준 영상과 비교하였을 경우 큰 차이를 보이지 않았다. 이 때 영상의 변화를 수치상으로 살펴보면 MIMC 알고리즘으로 보정한 영상이 기준영상에 더 근접하나 그 차이는 1픽셀 미만으로 매우 작았다.

기준 시간에서는 요각 오차에 따른 지향점의 변화는 크게 나타나지 않는다. 22분의 스캔시간동안, 보상하지 않았을 경우 기준 지향점에서부터 변화하여 동서방향으로 최대 0.003° , 남북방향으로 최대 0.002° 로 변화한다. 다른 자세 변화에 비해 영상 자체에 미치는 영향은 그리 크지 않음을 알 수 있다. 표 8은 22분 스캔시간동안 피치 각 오차만을 고려할 때의 지향점변화의 평균값이다. 보정이 이루어지지 않은 영상은 라인과 픽셀 모두 1픽셀 미만의 이동을 보인다. 롤 각이나 피치 각의 변화에 비해 그 크기가 작음을 알 수 있다. GOES IMC 알고리즘을 사용하여 보상한 영상과 MIMC 알고리즘을 사용하여 보상한 영상의 변화를 수치상으로 살펴보면 MIMC 알고리즘으로 보정한 영상이 기준영상에 더 근접하나 두 영상 모두 1픽셀 미만의 작은 변화를 보였다.

4.2.3 모든 오차를 포함하였을 경우 영상 시뮬레이션

앞의 결과들은 오차 요소 중 하나의 요소만을 고려하여 영상을 구현한 것이다. 따라서 궤도 및 자세의 각 오차들이 영상에 어떠한 영향을 미치는 확인을 할 수 있었다. 이 절에서는 위에서 언급된 궤도 및 자세 오차를 모두 포함하였을 경우의 영상의 변화를 살펴보고자 한다. 모든 오차를 포함하였을 경우 22분의 스캔시간 동안의 지향점의 변화는 표 9와 같이 나타난다. 보상을 하지 않았을 경우를 살펴보면 기준 지향점에 남동쪽으로 벗어난 지역에 지향점이 형성되고 있음을 알 수 있다. 표 9의 지향점의 변화를 토대로 구현된 영상들에서는 보상을 하지 않은 영상의 중심이 기준 영상의 아래부분에 형성되어 있음을 확인할 수 있다(박상영 외 2007). 지향점의 이동방향과 영상의 이동방향이 서

표 10. 궤도 오차에 의한 영상의 왜곡(라인과 픽셀의 이동).

궤도 오차 요소	영상의 왜곡단위(갯수)	보상을 하지 않았을 경우	GOES IMC로 보상했을 경우	MIMC로 보상했을 경우
각거리 변화	Lines	0	0	0
	Pixels	0	0	0
경도 변화	Lines	1	0	0
	Pixels	30	3	0
지심위도 변화	Lines	70	2	0
	Pixels	8	2	0
궤도요각의 변화	Lines	1	0	0
	Pixels	4	0	0

표 11. 자세 오차에 의한 영상의 왜곡(라인과 픽셀의 이동).

궤도 오차 요소	영상의 왜곡단위(갯수)	보상을 하지 않았을 경우	GOES IMC로 보상했을 경우	MIMC로 보상했을 경우
롤 각	Lines	1	0	0
	Pixels	0	0	0
피치 각	Lines	0	0	0
	Pixels	10	0	0
요 각	Lines	0	0	0
	Pixels	0	0	0

로 일치하고 있음을 알 수 있다. 지향점의 틀어짐이 동서방향보다 남북방향의 그 크기가 더욱 크므로 영상의 픽셀보다 라인의 변화가 더 크게 나타난다. 보상하지 않았을 경우 동서방향의 변화는 약 6픽셀 정도의 차이를 보였지만, 남북방향의 변화는 약 68라인의 변화를 보이게 되었다.

GOES IMC 알고리즘을 사용하여 보상한 영상에서는 동서방향의 오차가 더 큼을 알 수 있다. 동서방향의 영상 오차는 약 6픽셀인데 반해 남북방향의 영상 오차는 1라인에 그치고 있다. 이러한 이유는 방위각과 고각의 오차 성분 중 방위각의 오차 성분이 더 많이 무시가 되었기 때문이다. 이러한 문제점을 해결한 MIMC 알고리즘을 통해 보상한 영상은 동서방향과 남북방향의 영상 오차 모두 1픽셀 미만의 수치를 보이는 것을 알 수 있다. 표 10, 11은 각 궤도 및 자세 오차별로 나타나는 영상 오차의 양을 정리한 것이다.

5. 결 론

이 연구에서는 INR(Image Navigation and Registration) 시스템의 운용 시뮬레이션 및 성능평가 프로그램 개발하고 분석하였다. GOES 위성의 영상오차보상(IMC) 알고리즘과 이 IMC 알고리즘을 개량한 알고리즘(MIMC)을 사용하여 영상의 왜곡을 보정하였다. 기존 영상과 영상 오차 보상을 하지 않았을 경우의 영상, 그리고 영상 오차 보상을 수행한 영상간의 차이를 비교하였다. 궤도 및 자세 오차에 의해 발생하는 영상의 왜곡은 오차가 발생하는 방향으로 나타나게 된다. 오차 요소들에 의해 변동되는 위성의 움직임으로 인해 지향점이 움직이게 되고 이는 영상에서 2차원적으로 나타나게 된다. 동서 방향으로 큰 영향을 미치는 오차 요소는 궤도 오차 요소 중 경도오차와 자세 요소 중 피

치 각이 있으며, 남북 방향으로 큰 영향을 미치는 오차 요소로는 지심위도와 톨 각의 오차가 있는 것을 알 수 있다. 동서방향의 변화보다 남북방향의 변화가 큰 위성의 궤도 특성상 남북방향의 영상 오차가 더 큼을 알 수 있다. 이때 두 IMC 알고리즘을 통해 보상된 영상에서는 그 차이를 보기 힘들다. MIMC에 의해 보상된 영상의 경우 GOES IMC에서 보상하지 못한 부분까지 모두 보상하여 기준영상과 차이를 보이지 않는 성능을 보여주었다.

이 연구에서는 영상 오차 보상을 위한 INR 운용 시뮬레이션 과정을 각각 모듈화하여 통합 프로그램을 구성하였다. 이 통합 프로그램은 INR 시스템의 운용 시뮬레이션에 기초적인 자료를 제공하여 줄 것이다. INR 시스템은 광학 탑재체로 촬영된 영상의 전처리를 위해 꼭 필요한 시스템이다. 이 연구에서는 이러한 시스템을 더 효율적으로 운용할 수 있는 방법을 제시할 수 있었으며, 나아가 INR 시스템을 더욱 효과적으로 사용하고 그 기능을 향상시킬 수 있는 기술적 토대를 마련할 수 있을 것이다. 또한 이 연구의 결과는 앞으로 개발될 다양한 종류의 기상 및 해양 또는 지표영상의 획득을 목적으로 하는 국내위성에 다양하게 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글: 이 연구는 한국항공우주연구원의 “INR 시스템의 운용시뮬레이션 및 성능평가 프로그램 개발”(과제번호: M1-03DG-01-001)에 대한 위탁연구로 수행된 결과의 일부이며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 박상영, 방효충, 이운섭, 최윤희, 김영록, 송영주, 박인관, 은연주, 노은정, 이동진, 백광열 2007, 한국항공우주연구원 보고서, INR 시스템의 운용시뮬레이션 및 성능평가 프로그램 개발(III)
- 정택서 2005, 석사학위논문, 연세대학교
- 정택서, 박상영, 이운섭, 주광혁, 양군호 2006, 한국우주과학회지, 23, 29
- 주광혁, 박영웅, 양군호 2004, 한국항공우주학회 추계학술발표회 논문집, p.207
- 최성봉 2002, 한국기상학회보, 12(4), 10
- Jung, T. S., Lee, U. S., Park, S. Y., Choi, Y.-H., Bang, H. C., Ju, G. H., & Yang, K. H. 2006, AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit, paper 2006-6378
- Kamel, A. & Bhat, M. 1987, Proceedings of Twenty-First International Symposium on Remote Sensing of the Environment, p.26