

정밀자세결정 시스템의 최적 운용 개념

윤재철*, 신재민**, 문홍열***, 이진호****, 천용식*****, 천이진*****, 이상률*****

Jae-Cheol Yoon*, Jae-Min Shin**, Hong-Youl Moon***, Jin-Ho Lee****,
Yong-Sik Chun*****, Yee-Jin Cheon*****, Sang-Ryool Lee*****

초 록

다목적실용위성 2호 영상의 geo-location 정밀도 80 m (CE90) 요구사항을 만족시키기 위하여, 1개의 IRU 와 2개의 star tracker 들로부터 획득되는 데이터를 이용하여 지상에서 후처리 추정 과정을 거쳐 위성의 자세를 결정하는 정밀자세결정 시스템이 개발되었다. 정밀자세결정 시스템의 정밀도를 극대화하기 위해서는 우주 공간의 극심한 열적 환경으로 인해 발생하는 star tracker 정렬 오차를 효율적으로 보정하여야 한다. 정밀한 정렬 오차의 보정을 위해서는 영상 내에 촬영된 지상의 ground control point 데이터를 이용하여야 하는데, 현실적으로 한반도 모든 지역에 대해 ground control point 를 확보할 수 없다. 현재 항공우주연구원이 확보하고 있거나 이후 확보할 예정에 있는 고해상도 영상을 위한 ground control point 들은 대전지역에 국한될 예정이다. 이와 같은 상황에서 정밀자세결정 시스템의 성능을 높이기 위한 최적의 시스템 운용 개념을 본 연구에서 제시하였으며, 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 분석하였다.

키워드 : PAD, Star tracker, IRU, Estimation, GCP, Alignment

1. 서 론

본 연구는 다목적실용위성 2호 후처리 정밀자세결정 소프트웨어 (이하 KPADS : KARI Precision Attitude Determination Software) 의 합리적 운용 개념을 정립하고 예상 성능 분석을 목적으로 하고 있다. KPADS는 다목적실용위성 2호의 자세 센서 (2개의 star tracker 및 1개의 IRU) 데이터를 지상에서 수신, 처리하여 정밀한 자세를 결정하는 소프트웨어이다[1]. KPADS 를 통해 결정된 자세데이터를 사용하여 다목적실용위성 2호 영상을 GCP (ground control point) 없이 geo-location 정밀도 80 m (CE90) 이내로 보정하는 것이 필요하다. 그러나, 다목적실용위성 2호의 경우 자세 센서의 alignment 가

급격한 열적 환경에 의해 OBF (optical bench frame) 축에 대해 틀어지는 현상이 발생한다 (thermal distortion) [2][3]. 따라서, 자세결정 정밀도를 확보하기 위해서는 이러한 misalignment 를 정밀하게 추정하여 보정하는 것이 필요하다. SCF (star tracker coordinate frame) 의 misalignment 를 추정하기 위해서는 또 다른 절대 기준이 될 수 있는 데이터가 추가로 필요하며, 다목적실용위성 2호의 경우, GCP 데이터가 유일하다. 그러나, 한반도 내에서 현재 확보하고 있는 GCP 데이터의 양이 절대적으로 부족하기 때문에 (대전지역 25개), 다목적실용위성 2호의 MSC (multi-spectral camera) 에서 촬영된 모든 영상에 GCP 가 포함될 수 없는 상황이다. 이는 제한된 GCP 만이 확보된 현재의 특수한 상황에서

* 아리랑위성5호사업단/yjch@kari.re.kr

*** 아리랑위성5호사업단/hymun@kari.re.kr

***** 아리랑위성5호사업단/sik@kari.re.kr

***** 아리랑위성3호사업단/leesr@kari.re.kr

** 아리랑위성5호사업단/jmshin@kari.re.kr

**** 아리랑위성5호사업단/ljh@kari.re.kr

***** 아리랑위성3호체계종합그룹/yjcheon@kari.re.kr

는 한반도 상공을 지나가는 모든 위성 path 에 대해 이론적 완결성을 지닌 방법으로 SCF 의 misalignment 를 추정할 수 없다는 것을 의미하며, 결국 정밀자세결정의 정밀도 또한 보장할 수 없다는 것을 의미할 수도 있다. 따라서, 이론적 결함을 지니고 있는 현재의 열악한 상황에서 최대의 PAD 성능

① Thermal distortion 으로 인해 다목적실용위성 2호의 SCF 는 OBF 에 대해 misalignment 가 발생한다. SCF 의 misalignment 는 궤도 주기와 연동되어 일정한 주기성을 가지는 특성을 지니고 있다는 것이 ICESAT/GLAS 의 결과에서 확인되고 있다(그림 1) [2].

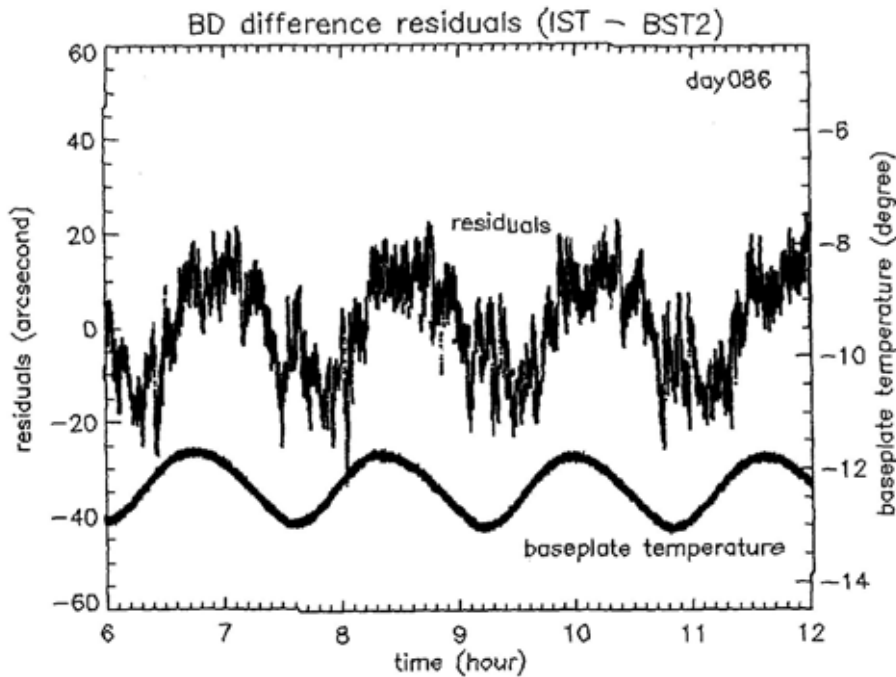


그림 1. ICESAT/GLAS 의 BST 와 IST 를 각각 이용한 후처리 정밀자세결정 결과 차이. BST 는 위성 본체에 부착된 2개의 star tracker 이며, IST 는 GLAS 탑재체 및 Gyro 와 함께 optical bench 에 장착된 1개의 star tracker 이다 [2].

을 확보할 수 있는 최적의 운용 개념을 정립하는 것이 무엇보다도 필요하다.

2. 본 론

2.1 KPADS 최적 운용 개념

KPADS의 최적 운용 개념이 도출되고 적용되어야 하는 주요 근거를 정리하면 다음과 같다.

- ② 지상에서 위성체의 thermal 모델링을 통해 예측된 misalignment 는 모델링 오차로 인해 실제 우주 환경에서의 열적 변형 정도와 다를 수 있기 때문에, 정밀자세결정의 정밀도를 더 저하 시킬 수 있다.
- ③ SCF 의 misalignment 를 정밀하게 추정할 수 있는 유일한 방법은 GCP 데이터를 적용하는 것이다.
- ④ 불행히도 현재 한반도 내에서 확보할 수 있는

GCP 의 양은 극히 제한적이다 (대전지역 25개).

- ⑤ 촬영된 모든 영상에 GCP 가 포함될 수 없다.
- ⑥ 한반도 상공을 지나가는 모든 path 에 대해 GCP 를 이용하여 SCF 의 misalignment 를 추정할 수 없다.

수단으로 GCP 를 활용하여 SCF 의 misalignment 를 주기적으로 업데이트 한다는 개념을 가져야 한다.

다목적실용위성 2호는 고도 685 km±1 km 의 태양 동주기 궤도이다. 태양 동주기 궤도의 이론적 특

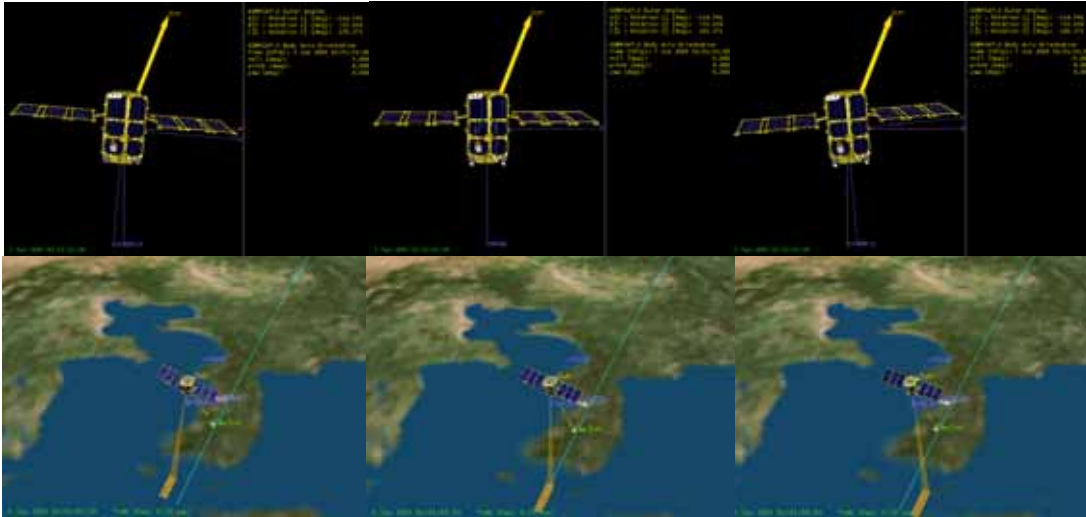


그림 2. 다목적실용위성 2호의 roll 방향 ±5° tilt 에 따른 한반도 촬영 지역 차이. 가운데 그림이 직하점 지향 방향.

- ⑦ 무엇보다 중요한 것은 다목적실용위성 2호의 임무요구사항은 GCP 없이 80 m (CE90) geo-location 을 만족시키는 것이기 때문에, 위의 모든 상황들을 고려한 새로운 운용 개념 정립이 필요하다.

KPADS 를 이용하여 위성의 자세를 정밀하게 추정하기 위해서는 SCF 의 misalignment 를 정밀하게 알고 있어야 한다. 그러나 다목적실용위성 2호 전체 운용 기간 동안 GCP 를 전혀 사용하지 않고는 SCF 의 misalignment 를 알 수 있는 방법이 없다. 따라서, 임무 요구사항을 만족시키기 위해서는 반드시 GCP 를 어느 정도 이용할 수밖에 없으며, GCP 의 활용 빈도를 최대로 줄이는 것이 현실적인 대안이 될 것이다. 그리고 현재 제한된 GCP 확보 측면을 고려하더라도, GCP 의 활용 빈도가 낮을 수밖에 없는 상황이다. 즉, 검/보정 (calibration/validation) 의

정은 위성의 궤도면과 태양이 이루는 각도가 항상 일정하며, 이는 위성이 승교점 (ascending node) 을 통과하는 지방시 (local time) 가 항상 동일하다는 것을 의미한다. 만일 같은 계절에 위성이 roll tilt 직하점 (nadir) 기준 ±5° 이내로 영상을 촬영한다면, 한반도 상공에서 위성체의 SCF 영역에 작용하는 온도의 분포가 거의 비슷할 것이며, thermal distortion 의 정도도 비슷할 것이라고 가정할 수 있을 것이다. 따라서 KPADS 의 최적 운용 개념을 다음과 같이 정리할 수 있다.

- ① 초기 LEOP 동안 확보할 수 있는 모든 GCP 를 이용하고, KPADS 를 운용하여 SCF 의 misalignment 를 추정한다. 이때, GCP 의 정밀도는 1 m (1σ) 이내 이어야 한다.
- ② 위성의 정상 운용 시 KPADS 를 이용하여 GCP 없이 정밀자세결정을 수행하는데, 이때 LEOP 기

표 1. 다목적실용위성 2호 카메라 boresight 의 대전 지역 예상 통과 시각 (roll tilt $\pm 5^\circ$). 2005년 12월 1일부터 2006년 12월 1일까지 1년 동안 예측.

Access	Start Time (UTC)	Stop Time (UTC)	Duration (sec)
1	14 Dec 2005 01:58:35.56	14 Dec 2005 01:58:38.64	3.082
2	19 Dec 2005 01:54:54.93	19 Dec 2005 01:54:58.01	3.081
3	6 Jan 2006 02:01:09.40	6 Jan 2006 02:01:12.47	3.077
4	11 Jan 2006 01:57:28.69	11 Jan 2006 01:57:32.41	3.719
5	16 Jan 2006 01:53:48.22	16 Jan 2006 01:53:51.85	3.636
6	3 Feb 2006 02:00:03.14	3 Feb 2006 02:00:06.23	3.083
7	8 Feb 2006 01:56:22.48	8 Feb 2006 01:56:25.55	3.077
8	13 Feb 2006 01:52:41.93	13 Feb 2006 01:52:45.02	3.090
9	3 Mar 2006 01:58:56.28	3 Mar 2006 01:59:00.09	3.819
10	8 Mar 2006 01:55:16.32	8 Mar 2006 01:55:19.40	3.080
11	26 Mar 2006 02:01:30.82	26 Mar 2006 02:01:33.90	3.073
12	31 Mar 2006 01:57:50.16	31 Mar 2006 01:57:53.24	3.082
13	5 Apr 2006 01:54:09.59	5 Apr 2006 01:54:13.38	3.788
14	23 Apr 2006 02:00:24.62	23 Apr 2006 02:00:27.86	3.240
15	28 Apr 2006 01:56:44.18	28 Apr 2006 01:56:47.27	3.087
16	16 May 2006 02:02:58.88	16 May 2006 02:03:01.96	3.077
17	21 May 2006 01:59:18.24	21 May 2006 01:59:21.98	3.749
18	26 May 2006 01:55:38.07	26 May 2006 01:55:41.46	3.386
19	13 Jun 2006 02:01:53.08	13 Jun 2006 02:01:56.15	3.077
20	18 Jun 2006 01:58:12.48	18 Jun 2006 01:58:15.56	3.078
21	23 Jun 2006 01:54:32.01	23 Jun 2006 01:54:35.09	3.084
22	11 Jul 2006 02:00:46.71	11 Jul 2006 02:00:50.51	3.801
23	16 Jul 2006 01:57:06.82	16 Jul 2006 01:57:09.91	3.085
24	3 Aug 2006 02:03:21.64	3 Aug 2006 02:03:24.71	3.074
25	8 Aug 2006 01:59:41.02	8 Aug 2006 01:59:44.11	3.082
26	13 Aug 2006 01:56:00.52	13 Aug 2006 01:56:03.92	3.395
27	31 Aug 2006 02:02:15.26	31 Aug 2006 02:02:18.98	3.723
28	5 Sep 2006 01:58:35.33	5 Sep 2006 01:58:38.42	3.085
29	23 Sep 2006 02:04:50.09	23 Sep 2006 02:04:53.17	3.081
30	28 Sep 2006 02:01:09.45	28 Sep 2006 02:01:12.53	3.077
31	3 Oct 2006 01:57:28.88	3 Oct 2006 01:57:32.02	3.134
32	21 Oct 2006 02:03:43.51	21 Oct 2006 02:03:47.24	3.727
33	26 Oct 2006 02:00:03.52	26 Oct 2006 02:00:06.61	3.082
34	31 Oct 2006 01:56:23.01	31 Oct 2006 01:56:26.10	3.090
35	18 Nov 2006 02:02:37.45	18 Nov 2006 02:02:40.52	3.075
36	23 Nov 2006 01:58:56.81	23 Nov 2006 01:58:59.89	3.084

간 동안 추정된 SCF 의 misalignment 값을 그대로 사용한다.

- ③ 이후 2 개월 (동일한 계절을 의미함) 에 한번씩 GCP 가 있는 지역을 촬영한다. 이때, 촬영된 영상 내에 하나의 대도시 영역 (예, 대전) 을 기준으로 최소한 20개 이상의 GCP 가 존재하여야 한다.

표 1 을 살펴보면, 다목적실용위성 2호의 카메라 boresight 가 roll tilt $\pm 5^\circ$ 이내에서 대전 지역을 재 방문하는 주기는 약 5 - 15일이며, 1 개월에 최소 2회, 최대 4회 정도 재 방문한다는 것을 알 수 있다. 따라서 2 개월에 한번씩은 GCP 영역을 충분히 촬영할 수 있다고 판단된다.

- ④ 이때의 위성 자세는 roll 방향 tilt 로 직하점 기준 새롭게 제시된 KPADS의 최적 운용 개념에 대한 타당성을 검증하기 위하여, 운용 기본 조건에 해당되
- ⑤ GCP 가 있는 지역의 촬영된 영상이 확보된 때, 는 상황을 시뮬레이션을 통해 구현하였으며, KPADS

표 2. KPADS 최적 운용 개념 타당성 검토를 위한 시뮬레이션

Satellite	Test	STK Data	Estimator	STK misalignment		GCP	previous estimated STK misalignment
				Simulate	Estimate		
KOMPSAT-2	Case 50	QUEST	EKF	○	○	○	X
	Case 51	QUEST	EKF	○	○	X	X
	Case 52	QUEST	EKF	○	X	X	○

표 3. SED-16 star tracker 데이터 시뮬레이션에 사용된 measurement noise [4]

Satellite	Measurement Type	Measurement Noise (arcsec, sec)			
		Bias	NEA(1σ)	Low freq. σ	Low freq. τ
KOMPSAT-2	QUEST	15/15/13	4.3/4.3/28.0	3/3/11	20

표 4. SED-16 star tracker 데이터 시뮬레이션에 적용된 SCF 의 misalignment

Satellite	SCF number	SCF misalignment (mean), arcsec	SCF misalignment (amplitude), arcsec	SCF misalignment (period), minute
KOMPSAT-2	STK1	-20/-20/20	0/0/0	98/98/98
	STK2	20/20/20	0/0/0	98/98/98

표 5. SIRU 의 Rate-integrating output angle noise [5]

Satellite	Angle random work noise (1σ), arcsec/sqrt(sec)	Angle white noise (1σ), arcsec/sqrt(Hz)	Rate random walk (1σ), arcsec/sec ^{3/2}
KOMPSAT-2	0.018	0.014	9.495e-5

KPADS 에 GCP 를 적용하여 SCF 의 misalignment 를 추정한다.

- ⑥ 이후 위성 운용 시 가장 최근에 추정된 SCF 의 misalignment 값으로 업데이트하고, GCP 없이 KPADS 를 운용한다.

2.2 KPADS 최적 운용 개념 타당성 분석

최적 운용 개념을 적용한 결과를 분석하였다.

표 2 는 본 연구에서 수행된 3가지 시뮬레이션을 보여주고 있다. Case 50 은 2005년 06월 03일 01:51:32 - 01:55:00 동안 한반도 상공을 통과하는 궤도에서 GCP 가 존재하는 경우이며, GCP (대전지역 20개) 를 이용하여 STK 의 misalignment 를 추정한다. Case 51 은 case 50 과 동일한 조건에서 GCP 가 존재하지 않는 경우이며, GCP 없이 STK 의

misalignment 를 추정한다. Case 52 는 case 51 과 동일한 조건에서 SCF 의 misalignment 를 추정하지 않고, case 50 에서 추정된 SCF 의 misalignment 의 값을 읽어 들여서 단순 적용한다. 본 시뮬레이션을 통한 KPADS 최적 운용 개념의 타당성은 case 50 과

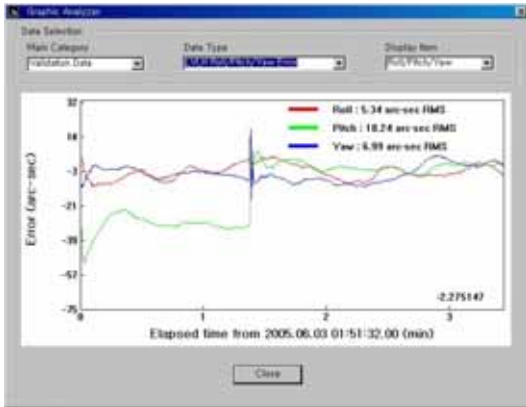


그림 3. Case 50 의 지구 지향 정밀도

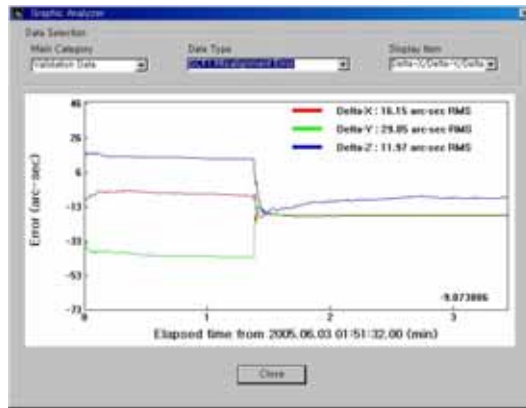


그림 5. Case 50 의 STK1 misalignment 추정 오차

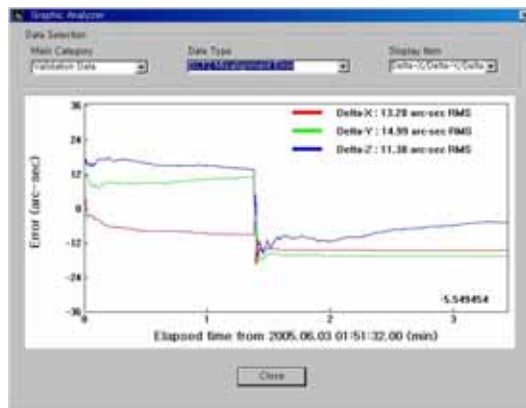


그림 6. Case 50 의 STK2 misalignment 추정 오차

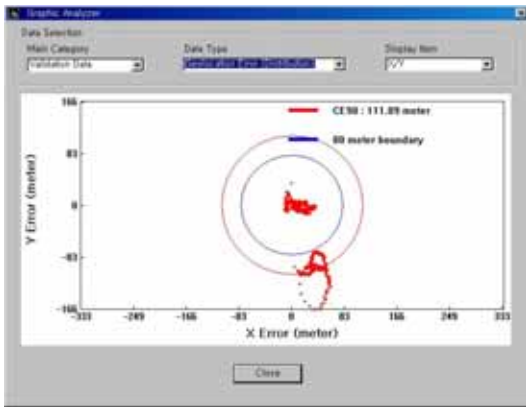


그림 4. Case 50 의 geo-location 정밀도

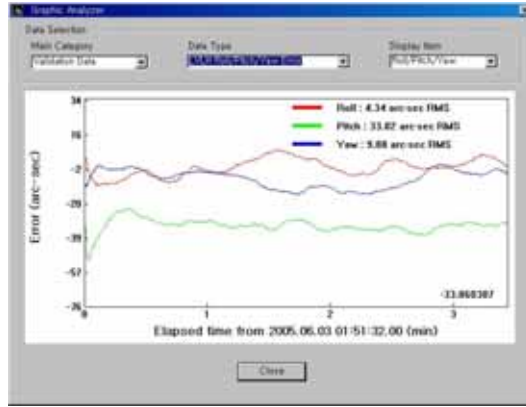


그림 7. Case 51 의 지구 지향 정밀도

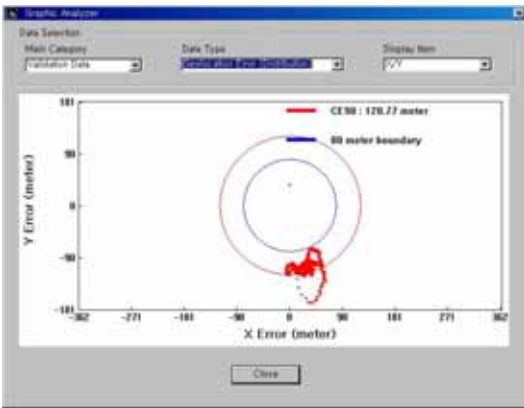


그림 8. Case 51 의 geo-location 정밀도

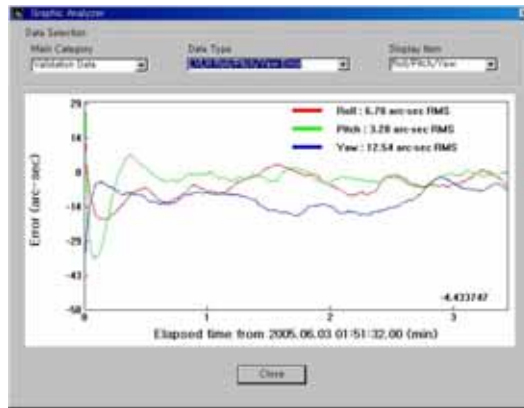


그림 11. Case 52 의 지구 지향 정밀도

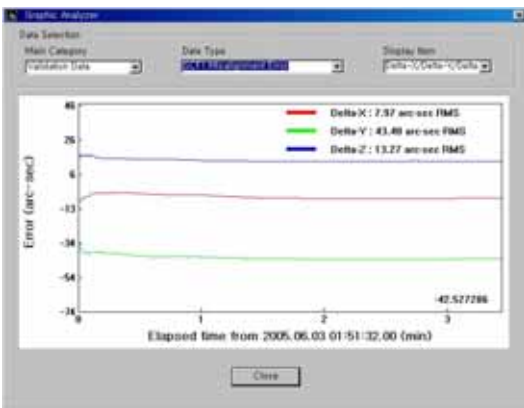


그림 9. Case 51 의 STK1 misalignment 추정 오차

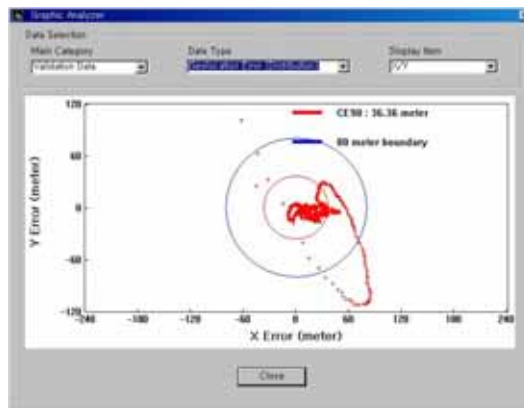


그림 12. Case 52 의 geo-location 정밀도

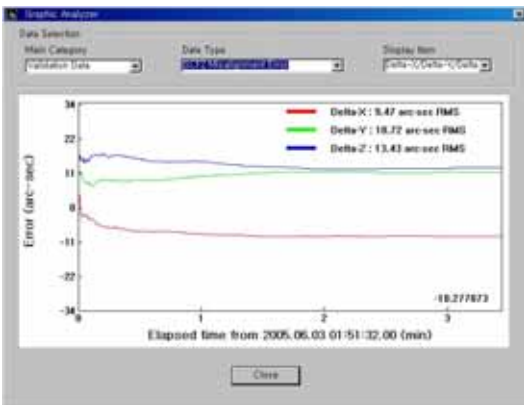


그림 10. Case 51 의 STK2 misalignment 추정 오차

case 52 의 정밀도 분석을 통해 최종 검증될 수 있다. 표 3, 4, 5 는 sensor 데이터 시뮬레이션에 사용된 각각 sensor 들의 noise 및 misalignment 값들이다.

그림 3, 4, 5, 6 은 Case 50 의 결과를 보여주고 있다. 대전지역의 20개 GCP 가 적용된 후부터 추정된 자세 및 STK misalignment 가 수렴됨을 알 수 있으며, 지구지향자세 오차의 경우 10 arcsec 이내로 추정되며, STK misalignment 도 10 arcsec 이내로 추정됨을 알 수 있다. 특히 추정된 STK misalignment 내에는 QUEST 관측 데이터의 bias 값 (15/15/13) 이 포함되기 때문에, 관측 노이즈의 추가적인 상세를 기대할 수 있다. geo-location 의 정밀도로 GCP 사용이후 현저히 높아진다는 것도 알 수 있다.

그림 7, 8, 9, 10 은 Case 51 의 결과를 보여주고 있

다. GCP 를 전혀 사용하지 않았기 때문에 STK misalignment 의 추정은 observable 이 존재하지 않으며, 따라서, STK misalignment 의 오차는 그대로 자세 추정오차에 반영되게 된다. 지구지향자세 오차의 경우 33 arcsec 로 추정되며, STK misalignment 도 올바르게 추정되지 않음을 알 수 있다. geo-location 의 정밀도도 현저히 낮아져 80 m (CE90)을 만족시키지 못하고 있다.

그림 11 과 12 는 Case 52 의 결과를 보여주고 있다. STK misalignment 를 추정하지 않고 Case 50 에서 추정된 SCF 의 misalignment 값을 읽어 적용하였다. 지구지향자세 오차의 경우 roll, pitch, yaw 축으로 각각 6, 3, 12 arcsec 로 추정되며 geo-location 의 정밀도는 80 m (CE90)을 충분히 만족시키고 있다.

3. 결 론

본 연구에서 KPADS 를 이용하여 적용할 수 있는 GCP 가 제한되어 있는 상황에서 다목적실용위성 2호의 SCF misalignment 를 추정하여, 요구되는 geo-location 을 만족시킬 수 있는 최적의 정밀자세결정 S/W 운용 방안을 도출하였다. 다목적실용위성 2호의 태양 동주기 궤도의 특성과 GLAS 의 실험 결과를 토대로 이전에 추정된 SCF misalignment 값을 동일한 계절적 환경 하에서 이후에도 그대로 적용할 수 있다는 합리적 가정을 유추하였으며, 시뮬레이션을 통해 현실적 적용 가능성을 검증하였다. 대전지역 영상 촬영 시, 영상 내에 20 개 이상의 GCP 들이 존재할 때, 80 m (CE90) 의 geo-location 정밀도를 만족시킬 수 있음을 알 수 있었다. 본 연구를 토대로 이후 연구에서는 열적 변형에 의한 SCF misalignment 의 경향이 본 연구의 가정처럼 주기적인 변화를 보이는지에 대한 지속적인 검증이 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 이영란, 이훈구, 신동석, 후처리 정밀자세결정 소프트웨어 설계서, 한국항공우주연구원/(주)

2. S. Bae, L. Magruder, R. Ricklefs, C. Webb, S. Yoon, and B. Schutz, "ICESAT/GLAS Precision Attitude Determination for Early Laser Operation," in *Proceeding of the 14th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Conference, AAS-04-118*, Hawaii, February 8-12, 2004.
3. Y. Ueda, H. Inoue, Y. Ogawara, R. Fujimoto, K. Yamaoka, T. Kii, and E. V. Gotthelf, "Improvement of the ASCA Position Accuracy," Institute of Space and Astronautical Science, Sagami-hara, Japan, Research Note, no.688, 1999.
4. X. G'sell, "KOMPSAT-2 Star Tracker Technical Specification," Korea Aerospace Research Institute, Technical memorandum, K2.SP.00031. T.ASTR, 2002.
5. "SIRUTM-Core Technical Description," LITTON Guidance and Control Systems, 1998.