대형 적외선 우주망원경 SPICA/FPC-G의 정밀 별추적 요구사항과 타당성 연구 REQUIREMENTS AND FEASIBILITY STUDY OF FPC-G FINE GUIDING IN SPACE INFRARED TELESCOPE, SPICA

정웅섭¹, 이대희¹, 표정현¹, 문봉곤¹, 박성준¹, 이창희¹, 박영식¹, 한원용¹, 남옥원¹, Toshio Matsumoto^{2,3}
¹한국천문연구원, ²ISAS/JAXA, ³ASIAA

WOONG-SEOB JEONG¹, DAE-HEE LEE¹, JEONGHYUN PYO¹, BONGKON MOON¹, SUNG-JOON PARK¹, CHANG HEE REE¹, YOUNGSIK PARK¹, WONYONG HAN², UKWON NAM¹, AND TOSHIO MATSUMOTO^{2,3}

¹Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

E-mail: jeongws@kasi.re.kr

²ISAS/JAXA, 3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa, Japan

³ASIAA, National Taiwan University, No. 1, Roosevelt Rd. Sec. 4, Taipei 10617, Taiwan

(Received July 16, 2012; Accepted September 07, 2012)

ABSTRACT

The SPICA (SPace Infrared Telescope for Cosmology & Astrophysics) project is a next-generation infrared space telescope optimized for mid- and far-infrared observation with a cryogenically cooled 3m-class telescope. It will achieve the high resolution as well as the unprecedented sensitivity from mid to far-infrared range. The FPC (Focal Plane Camera) proposed by KASI as an international collaboration is a near-infrared instrument. The FPC-S and FPC-G are responsible for the scientific observation in the near-infrared and the fine guiding, respectively. The FPC-G will significantly reduce pointing error down to below 0.075 arcsec through the observation of guiding stars in the focal plane. We analyzed the pointing requirement from the focal plane instruments as well as the error factors affecting the pointing stability. We also obtained the expected performance in operation modes. We concluded that the FPC-G can achieve the pointing stability below 0.075 arcsec which is the requirement from the focal plane instruments.

Key words: star tracker; star sensor; observing simulation; fine guiding; instrumentation; space telescope

1. 서론

SPICA(Space Infrared telescope for Cosmology and Astrophysics)는 일본 ISAS(Institute of Space and Astronautical Science)/JAXA(Japan Aerospace Exploration Agency) 주도의 국제협력으로 추진되고 있는 차세대 대형 적외선 우주망원경 프로젝트이다(Nakagawa, 2010). 망원경 전체를 4.5 K까지 냉각하여 중·원적외선 파장 영역의 관측에 최적화할 예정이다. 한국은 이전부터 중적외선 관측 기기의 설계, 사전 과학임무 연구 등으로 일본 ISAS와 SPICA의 참여를 위해 협력을 해 왔다. 최근 한국 측의 역할을 명확히 하여, 한국천문연구원(KASI) 주도로 독자적인 근적외선 기기에 대한 개발을 제안하여 SPICA 프로젝트에 참여를 희망하고 있다. 한국이 제안하는 기기는 SPICA의 시스템 기기로서, 별

추적기와 더불어 초점면에 위치해 보다 정밀한 위치정보를 자세제어 시스템에 전달하는 역할을 수행할 예정이다.

별 추적기는 인공위성에 부착되어 움직이지 않는 별들을 관측해 위성의 위치를 보정하는 기기를 말한다. 우주망원경의 경우, 그 목적에 따라 수분에서 수초의 정밀도로 자세결정을 하며 관측을 수행한다. 자세제어 정밀도는 원하는 위치로 위성을 지향하였을 때 실제 지향점에 얼마나 정밀하게 도달하였는가를 나타내는 값이며, 자세 안정 정밀도는 지향점에서 일정 시간동안 그 자세를 유지할 수 있는 정밀도를 나타내는 값이다. 국내에서는 한국 과학기술원 인공위성센터에서 4등급 이상의 밝은 별들로 자세제어를 수행하는 별 추적기를 개발하여 우리별 3호에 활용되었다(Lee et al., 1995). 또한

표 1. SPICA 자세 요구사항

관측 기기	자세 제어 정밀도 [arcsec] ($3\sigma^1$)	자세 안정 정밀도 [arcsec/min, $0-P^2$] (3σ)
MCS 이미징	15	0.075/10
MCS 저분산 분광	0.135	0.135/10
MCS 중분산 분광	0.3	0.3/10
MCS 고분산 분광	0.216	0.216/10
SCI	0.06(0-P)	0.06/20
SAFARI	12	0.15/20
FPC-S	0.3	0.1/2

¹여러 시행에 대한 표준편차 값.

²0에서 최고값(peak)간의 차이값.

과학기술위성 2호의 경우 이중 머리를 가진 별 추적기를 개발하였으며(Shin et al., 2006), 과학기술위성 3호 별 추적기는 $25''(3\sigma)$ 의 자세 안정 정밀도를 가질 것으로 예상된다. 주간 항법용 별센서의 활용을 목적으로 대기 조건과 별센서의 시야 등을 고려해 주간 활용 가능 한계를 도출한 연구도 국내에서 수행되었다(Nah et al., 2005).

최근 우주망원경 관측 장비는 높은 감도와 분해능을 얻기 위해 큰 주경을 채택하여 중·대형화되어가는 추세이며, 대형 망원경으로 갈수록 영상 분해능이 매우 높기 때문에 장시간 노출을 위해서는 1화소 크기 이하($0.1''$ 이하)의 매우 높은 자세결정 정밀도를 가져야 한다. 허블 우주망원경(HST, 미국 NASA)의 경우, 기본적인 별 추적기 이외에 별도로 정밀 자세결정을 위한 장비를 추가로 탑재하여 정밀 자세 관측을 수행하였다(Benedict et al., 1998). 차세대 적외선 망원경인 JWST(미국 NASA)와 SPICA(일본 JAXA)의 구경은 3 m 이상이며, 수십 mas¹의 정밀한 자세결정이 필요하다. 이러한 요구조건을 만족하기 위해서 HST와 마찬가지로 별 추적기 이외에 추가적으로 소형이며 정밀한 추적 장치가 필요하다. HST는 광학 밴드에서 독립적이고 무거운 별도의 추적용 시스템을 탑재하여 원하는 자세 정밀도를 얻었다. 하지만, 최근 추세는 작고 가벼우면서도 위성의 시스템 리소스를 적게 소모하며 정밀한 별 추적을 구현할 수 있도록 별 추적기와 별도로 초점면에 다른 관측 기기와 같이 설치하여 이용하는 추세이다.

리소스의 낭비를 줄이는 방안으로 초점면에서 비교적

잘 사용하지 않는 위치에 설치되기 때문에, 광학 설계에서 광학성능의 최적화 및 수차 보정, 추적용 별과 궤도상에서의 여러 오차요인 분석, 자세결정 알고리즘의 최적화 등이 필요하다.

본 논문에서는 SPICA의 시스템 기기인 FPC-G 개발을 위한 요구사항을 분석하여, 기본적인 설계 개념을 도출하며 시스템에서 원하는 정밀 별 추적 기능을 수행할 수 있는지에 대한 타당성을 조사하고자 한다.

2. 성능 요구 사항 분석

FPC-G는 SPICA에서 자세를 제어하는 AOCS(Attitude Orbit Control System)의 보완적인 기기로서 AOCS에서 얻은 기본적인 자세정보를 더 정밀한 값으로 측정해야 한다. 이 작업을 수행하기 위해서는 다음과 같은 요구조건을 만족해야 한다.

2.1. 관측기기들의 요구사항

SPICA는 과학적인 관측을 위해 근적외선(FPC-S), 중적외선(MCS, SCI), 원적외선(SAFARI) 기기를 탑재할 예정이다. 표 1은 각 관측기기의 관측 방식에서 가장 정밀한 관측에 필요한 자세 정밀도를 표시하였다.

SPICA의 자세제어를 담당하는 AOCS로부터 예측되고 있는 자세제어 성능은 자세제어 정밀도는 $30''$, 자세 안정 정밀도는 2초 동안 $0.5''$ 로 위 기기들의 요구사항을 만족하지 못하고 있다. 가장 높은 자세 안정 정밀도를 요구하고 있는 기기는 SCI이지만, SCI는 별도의 자세제어를 위한 장치를 내부에 두기 때문에 MCS 이미징에서 요구하는 600초 동안 $0.075''$ 가 FPC-G에서 만족해야 하는 최소 요구 조건이다. 위와 같은 자세 요구사항을 바탕으로 관측기에서 수행되는 운영 방식인 포인팅 추적 방식, 스텝 스캔 방식, 슬로 스캔방식, 비행성 추적 방식 등을 지원해야 한다.

2.2. 기기 설계 요구조건

2.2.1. 광학계

빛을 기기쪽으로 배분하기 위해 인출 거울을 두어 FPC-G쪽으로 빛이 들어가게 한다. 광학계는 요구되는 파장 밴드에서 최적의 성능을 내도록 설계되어야 하며, 경량화를 위해 최소한의 렌즈들이 사용되어야 한다. 또한 최대한 많은 추적용 별을 확보하기 위해서는 관측 시야가 가능한 넓게 설계 되어야 한다.

2.2.2. 광기계부

광학계의 성능을 최대로 내기 위해서는 온도에 따른 열변형을 최소화 하는 설계가 되어야 한다. 아울러 효율적인 지지구조를 가지며, 전체 무게를 효과적으로 줄이기 위한 구조가 되어야 한다.

¹milli-arc-second.

표 2. FPC-G에서 사용되는 검출기 주요 사양

인자	사양
재료	InSb
화소 크기	25 μm
화소들의 동작율	>98%
반응 파장대	0.4 ~ 5.3 μm
포맷	1024 × 1024
반응 균등율	$\leq 5\%(1\sigma)$
평균 암전류	$\leq 0.02 \text{ e}^-/\text{sec}(30 \text{ K})$
읽기 잡음	25 ~ 30 e^-
열방출	0.5 mW(0.4 Hz) 1.2 mW(1.0 Hz)

3. FPC-G 설계 개요

FPC-G는 성능 요구 사항을 만족하기 위해 다음과 같은 설계 결과를 얻었다.

3.1. 검출기

SPICA 망원경은 4 K에서 운영되므로, 가능한 낮은 온도에서 동작하며 열 방출이 적은 적외선 검출기를 사용하여야 한다. Ratheon사에서 제조하는 InSb 검출기는 이러한 조건을 잘 만족하고 있다. InSb 검출기는 10 K에서 동작하며, 동작시 열방출도 1 mW 정도로 매우 작은 열을 낸다. 아래 표 2는 검출기의 사양을 보여주고 있다.

3.2. 관측 시야와 밴드 선정

앞서 설명한 바와 같이, FPC-G는 3m급 망원경의 초점면에 설치되어 상당히 좋은 감도를 가지게 될 예정이다. 이러한 감도까지 추적을 위한 별목록은 GSCII(Guiding Star Catalogue v.2.3.2)가 있다(Lasker et al., 2008). 2MASS(The Two Micron All Sky Survey; Skrutskie et al., 2006)의 경우 한계 등급이 15등급 정도로 GSCII 보다 깊지 않기 때문에, GSCII를 별목록으로 채택하였다. GSCII는 B, R, I 파장대에서 한계등급은 각각 21.5, 20.5, 19등급이다. SPICA 망원경은 중·원적외선 영역에 최적화되어 설계되었기 때문에, 주경의 요구조건은 5 μm 에서 회절한계의 광학적인 성능을 갖는 것이다. 그렇기 때문에, FPC-G의 관측파장대는 GSCII에 측광정보가 있으면서, 적외선 영역에 가까운 파장대가 되어야 한다. 그래서 I밴드를 FPC-G의 관측 파장대로 결정하였다.

그림 1. 노출시간에 따른 감도. 세로선은 0.5 Hz 읽기 방식을 나타낸다.

5 μm 에서 회절한계를 가지는 광학성능이라고 가정한다면 Nyquist 샘플링에서 한 화소의 크기는 0.3"가 된다. 그러므로, 3.1절에서 언급한 광 검출기를 사용하였을 경우 관측 시야는 약 5' 정도 된다. 센서와 필터를 지났을 경우 전체 효율을 0.5, 일반적인 I밴드에서의 배경 밝기를 가정하면, 노출시간에 따른 감도는 그림 1과 같이 구해질 수 있다. 최소한의 열방출을 고려하여 노출 시간을 2초로 정한다면, 5σ 관측한계는 21.5 AB등급이 된다.

3.3. 광학계 설계

FPC-G는 광축으로부터 12' 떨어진 곳에 위치한다. 그림 2의 광학설계에서와 같이 최대한의 광학성능을 내기 위해 렌즈 그룹은 광축에서 약간 이동하여 위치하고 있으며, 비구면 렌즈도 사용하였다. 이로부터 얻은 별상의 크기는 모두 1화소 이내로 들어와 필요한 광학적인 성능을 만족함을 알 수 있다.

또한 별상의 크기가 화소보다 작기 때문에, 정밀한 별의 위치를 결정하기 위해서 확산필터를 사용하여 별상의 크기를 크게 할 필요가 있다. 별상의 크기에 대한 결정은 4.2절에서 다룰 예정이다. 광 검출기의 여러 위치에서 별상을 측정하여(그림 3 참조), 비선형 공간척도의 보정항, 광축에서 벗어난 정도의 보정항, 스마일 보정항² 등을 다항식 맞추기를 통해 광학적 왜곡을 보정한다.

그림 4는 그림 3과 같이 측정된 위치에서 위에서 언급한 광학적 왜곡을 보정한 오차값을 나타내고 있다. SPICA에 사용될 내부 자이로와 FPC-G를 고려한 랜덤 성분의 오차 요구조건은 0.5 Hz(2초 노출)의 경우 0.03 6"(3 σ)로 광학적 왜곡을 보정한 오차 값보다는 크다는

²빛이 들어오는 렌즈 표면에서 파장 기울기에 따른 위치 변화의 보정항.

그림 2. FPC-G의 광학설계.

그림 3. 점광원이 측정된 위치의 정의.

것을 알 수 있다.

4. 정밀 별추적 시뮬레이션

4.1. 정밀 자세 결정에 영향을 주는 요소들

4.1.1. 추적용 별목록 오차

추적용 별목록으로 쓰일 GSCII는 점광원인 별/은하로 판별하는 정확도는 90% 이상이며, 전체 별목록에서 점광원은 약 28% 정도 되며 나머지는 한 방향으로 약간 퍼진 형태의 천체(주로 은하)이다. 19등급 이상되는 추적용 별들은 약 5.6억 개로 FPC-G의 시야각에서 평균적으로 100여 개가 검출될 수 있다. 다른 정밀한 별목록과 비교하였을 때, 위치 오차는 0.1 ~ 0.2" 정도 된다. 아울러 별들의 고유운동에 의한 오차는 SPICA의 발사 시점을 고려한다면 0.2" 정도의 오차를 가질 것으로 보인다. 하지만, FPC-G는 정밀한 자세 결정을 위해 10여 개의 추적용 별을 이용할 예정이므로, 대부분의 오차는

그림 4. 그림 3에서 지정된 위치에서의 광학적 왜곡을 보정한 오차값. 점선은 요구조건을 나타낸다.

일정한 편차로 나타나 자세 정밀도에는 큰 영향을 주지 않을 것으로 보인다.

4.1.2. 궤도에 의한 시차효과 오차

SPICA 우주망원경의 궤도는 지구, 달, 태양에서 안정한 궤도인 라그랑지안2 지점에 위치하게 된다. 이 궤도는 태양 주위의 회전에 의해 시차가 발생하고, 10 pc의 가까운 별을 가정했을 경우 약 10 mas의 오차가 발생하게 된다. 또한, 라그랑지안2 지점에서의 반경을 가진 회전에 대해서도 10 pc의 가까운 별에서 약 1 mas 정도 시차의 차이가 발생하게 된다. 총 11 mas는 가까운 별에 대해 해당되는 값으로 일반적으로 추적용 별목록으로 쓰이는 거리가 먼 별들은 궤도에 의한 시차 효과는 무시할 수 있다.

4.1.3. 광행차 효과에 의한 오차

지구 주변을 회전하는 위성의 경우, 광행차가 발생하게 되는데 이 값은 보정가능하며 약 20" 내외의 값을 가지게 된다. SPICA 역시 라그랑지안2 지점에서의 궤도 운동으로 광행차 효과를 보이며 0.2" 정도로 추산된다. 이로부터의 오차는 지구의 움직임에 따른 위성의 상대적인 움직임으로 추산하였을 때 약 0.5% 정도인 10 mas 정도 된다. 정밀한 계산으로 이 값은 보정가능하며 남은 오차 값은 매우 작아 무시될 수 있다. 위의 2개 항목을 포함하여 타켓 오차로 분류된다.

4.1.4. 망원경 주경의 기하광학적 오차

SPICA 주경은 중·원적외선에 최적화되어 있어, FPC-G의 관측 파장인 I밴드에서 수차에 의한 영향을 받는다. 광학 시뮬레이션으로부터 얻어진 주경 수차에 의한 오차 값은 0.05"가 될 것으로 추산된다. FPC-G에서는 수

그림 5. FPC-G의 갱신주파수에 따른 랜덤 오차의 크기.

차에 의해 상이 왜곡되어 중심점 결정시 일정한 편차 오차 요인으로 작용할 것으로, 자세 결정 오차에 포함된다. 이는 예측대로 발생할 것이기 때문에, 소프트웨어적으로 수정이 가능할 것으로 예측된다.

4.1.5. 정렬 오차

FPC-G 자체의 렌즈들의 정렬과 SPICA와 FPC-G의 정렬에 의해 오차가 발생된다. 전체 정렬 오차는 랜덤하게 수십 mas 내외로 유지될 예정이다.

4.1.6. 열적인 왜곡 오차

위성이 궤도에 따라 열적인 상황이 바뀌어 렌즈와 주경을 서서히 변화시킬 수 있다. 이전 AKARI 적외선 우주 망원경의 경우로부터 왜곡된 양을 추산하면, 수 mas로 매우 작은 값으로 무시될 수 있다.

4.1.7. 내외부 오차

SPICA 망원경은 냉매 대신 기계식 쿨러를 사용해 냉각이 될 예정이다. 큰 쿨러의 탑재로 그 진동이 오차로 발생하게 되며, 그 부가적인 쿨링 시스템과 함께 0.03"의 위치 결정 오차가 발생할 것으로 추산된다. 아울러 외부적인 영향에 의해 진동이 발생될 수 있고, 자세 제어를 위한 토크의 측정에 있어 오차가 발생할 수 있다. 이 값 모두를 제어 오차라고 하며, 전체 값은 0.02"로 추산된다. 정확한 값은 실제 위성 제어 실험을 통해 얻을 예정이다. 이중 외부 요란과 제어는 제어 오차에 포함된다.

4.1.8. 자세 결정 필터 알고리즘 오차

검출기의 잡음, 광학 수차, 점광원 모양에 의한 중심점 결정 등에 의해 자세 결정에 오차가 발생하게 된다. 내부 자이로, 외부 별 추적기, FPC-G로부터 얻어지는 랜덤 성분의 오차는 0.02" 내외로 추산된다. 이에 해당하는 갱신주파수에 따른 랜덤 성분 오차는 그림 5에 나타

표 3. 연관된 오차 정리

오차요인	자세 정밀도 [arcsec] (3σ)	
	치우침(bias)	랜덤
정렬 오차	0.025(0.025)	0.003(0.003)
타겟 오차	0.05(0.02)	0.004(0.002)
자세 결정 오차	0.026(0.02)	0.02(0.02)
자세 제어 오차	-	0.02(0.02)
내부 요란 오차	-	0.03
총합	0.101(0.065)	0.077(0.075)

나고 있으며, FPC-G에서 0.5 Hz 갱신주파수의 경우 0.036"(3 σ)로 얻어진다(그림 5 참조).

4.1.9. 전체 오차

위의 각 오차 요인들을 정리하여 표 3과 같이 오차 예산표를 만들었다. 값은 위의 분석에 의해 추산된 값이며 괄호 안의 값은 SPICA 시스템에서의 요구사항이다. 대체적으로 요구사항을 잘 만족하고 있으며, 전체 오차 값은 단순 합으로 계산하였다. 실제 총합 값은 각 값들의 상관 관계에 따라 달라질 것으로 예측된다. 이중 랜덤 성분의 값이 자세 결정 안정도 값에 기여하게 되므로, 전체 자세 요구치는 0.075"로 표 1에서 MCS 영상 관측에 해당하는 값을 알 수 있다.

4.2. 정밀 별 추적 성능 예측

4.2.1. 얻은 추적용 별의 개수

FPC-G의 2초 노출로 별상의 크기와 센서노이즈를 고려한 5 σ 검출한계는 21.5 AB등급이다. 가장 별의 개수가 적은 지역인 은위 90도 지점에서 얻을 수 있는 추적용 별의 개수를 조사하였다. 중심점을 구할 때 오차가 충분히 작은 30 σ 별들의 개수를 구하였다. 그림 6에서 보듯이 자세결정 알고리즘에서 사용할 별의 개수는 최소 12개 이상은 될 것으로 추산된다.

위치 추적에 사용될 별은 너무 밝은 별들, 센서 주변부에 있는 별들, 우주선과 인접한 별들을 제외한다고 하더라도, 최소 5개 이상은 확보될 것으로 예측된다.

4.2.2. 점광원의 크기 결정

3.3절의 광학계 설계에서 보듯이, 점광원의 크기는 화소 크기에 비해 작기 때문에, 확산 필터를 사용하여 점광원을 퍼뜨려주어야 한다. 점광원의 크기가 너무 작으면, 여러 인식된 별들을 사용하더라도 위치 결정을 정확하

그림 6. 은위 90도 지역에서 FPC-G 시야각에 들어오는 추적용 별의 개수.

그림 7. 시뮬레이션을 통해 얻은 점광원의 크기에 따른 위치 결정 오차.

게 할 수 없고, 점광원이 지나치게 크면 감도가 떨어져 더 밝은 별들을 사용해 자세를 결정해야 한다. 그림 7은 다양한 크기의 가우시안으로 가정된 점광원들을 만들어 중심점을 결정하는 시뮬레이션을 통해 얻은 30σ 별들의 자세 결정 오차이다. 결과에서 보듯이 1.5화소 이상이 되어야 오차가 급격하게 작아짐을 볼 수 있다.

4.2.3. 자세 결정 안정도 오차 결정

추적용 별의 인식은 잡음의 일정 임계값 보다 큰 신호만을 택하여 별을 인식하는 문턱값 인식 알고리즘을 사용하였고, 별의 중심 위치 결정은 각 화소의 위치에서 신호값의 크기로 가중치를 주는 중심점 알고리즘을 사용하여 구하였다. 그림 8에서 보듯이, 30σ 의 밝기를 가진 별의 자세 결정 안정도는 0.013"로 나타나고 있다.

20σ 밝기의 별이 0.5 Hz 갱신 주파수에서의 랜덤 오차값과 비슷해짐을 알 수 있다. 30σ 까지는 자세 결정 안정도가 좋아지는 반면, 더 밝은 소스의 경우에는 자

그림 8. 별의 신호대 잡음비(S/N)에 따른 별의 자세 결정 안정도(3σ). 아래쪽 선은 0.5 Hz 갱신 주파수에 대한 랜덤 오차 값이고, 위쪽 선은 1 Hz 갱신 주파수에서 랜덤오차 값을 표시하였다.

그림 9. 위성의 움직임에 따른 자세 결정 안정도의 변화. 점선은 요구되는 랜덤 오차를 나타내고 있다.

세 결정 안정도가 완만하게 향상됨을 알 수 있다.

4.3. 관측기기의 운영 방식

4.2절에서 얻은 자세 결정 안정도를 바탕으로 각 관측 기기에서 요구되는 관측 방식에서의 제한점을 추산해 보았다. 위성의 각속도가 커짐에 따라 얻게되는 별상은 한 방향으로 늘어나게 되고, 이에 따라 별 이미지의 신호대 잡음비가 떨어지게 된다. 위성의 움직임이 한 방향으로 일정하게 움직인다고 가정하여, 시뮬레이션을 통해 자세 결정 안정도를 구하였다.

그림 9에서 보듯이 랜덤 오차를 만족하는 최대 이동 각속도는 초당 1.4"까지 이동 가능함을 알 수 있다. 그림 10은 위성의 움직이는 각속도에 따라 검출되는 추적용 별의 개수를 보여주고 있다. 관측 위치는 가장 별의 개수가 적다고 여겨지는 은위 90도의 경우를 가정하였

그림 10. 위성의 움직임에 따라 검출되는 추적용 별의 개수.

다. 최대 이동 각속도인 초당 1.4"에서 12개의 추적용 별이 검출될 수 있음을 알 수 있다.

MCS 관측에서 요구되는 각속도는 초당 0.054 ~ 2.2 8"로 전체를 지원하지는 못하지만, 이미징 이외의 분광과 같이 높은 자세 정밀도를 요구하지 않는 경우에는 충분히 만족할 수 있는 값이다.

SAFARI 관측의 경우는 10 ~ 72"로 높은 각속도의 움직임을 요구하고 있다. FPC-G의 추적 방식으로는 이러한 높은 각속도를 만족하지 못하므로, 외부의 별 추적기를 사용하여 SAFARI의 관측 방식을 구현해야 할 것이다.

5. 요약 및 토의

차세대 대형 망원경인 SPICA는 3m급의 망원경이기 때문에, 높은 정밀도의 자세 제어를 요구한다. 기존의 별 추적기로는 이러한 요구조건을 만족하지 못하기 때문에, 초점면에 별도의 관측기기를 제안하여 0.075"의 높은 자세 결정 안정도를 얻고자 한다. 수치 시뮬레이션을 통해 여러 요구 조건을 분석하고, 실제 FPC-G가 높은 자세 결정을 위한 정밀 별추적 기능을 구현할 수 있는지에 대한 타당성을 조사하였다.

광학설계를 통해 점광원의 크기가 검출기 화소크기보다 작게 나타났으며, 시뮬레이션으로부터 확산필터를 통해 1.5화소 이상으로 점광원을 퍼뜨려야 함을 찾았다. 아울러 광학 보정식을 사용해 얻은 오차 보정 한계는 0.02" 내외로 자세 결정 요구 조건을 만족하고 있음을 알 수 있었다.

정밀 자세 결정에 영향을 주는 요인들을 분석하여 전체 오차를 추산하였다. 이로부터 관측 방식에서 요구하는 0.075"의 자세 결정 값을 어느 정도 만족할 수 있음을 검증하였다.

시뮬레이션을 통해 FPC-G로부터 요구조건을 만족하는 정밀 자세 안정도를 구현 할 수 있음을 확인하였으며,

표 4. FPC-G의 사양 및 성능

인자	사양
기기 타입	이미징
검출기	InSb 1 K × 1 K array
시야	5' × 5'
화소 각크기	0.3"
갱신 주파수	0.5 Hz
감도(30σ)	19.6 AB등급
추적용 별 수	>10개
파장밴드	I밴드(0.8 μm)
자세 결정 정밀도	랜덤 성분 0.036"
최대 지원 각속도	1.4"/초

관측 시야 내에 자세 결정에 필요한 별의 개수가 최소 10개 이상으로 존재하며 최대 지원 각속도가 초당 1.4"임을 얻었다. 관측기기의 요구 조건 분석으로부터 얻은 최종적인 FPC-G의 사양과 성능은 표 4에 정리되어 있다.

감사의 글

본 연구 수행에 있어 많은 조언을 해주신 일본 ISAS, JAXA, NEC(주)와 한국 SaTReC, SaTReCi의 별 추적기 팀원분들에게 감사를 드립니다.

참고 문헌

- Benedict, G. F., et al., 1998, Working with a Space-based Optical Interferometer: HST Fine Guidance Sensor 3 Small-field Astrometry, Proc. of SPIE, 3350, 229
- Lasker, B. M., et al., 2008, The Second-Generation Star Catalog: Description and Properties, AJ, 136, 735
- Lee, H., et al., 1995, Prototype Development of the Star Sensor for The KITSAT-3, JASS, 12, 256
- Nah, J., Yi, Y., & Kim, Y. H., 2005, Development of Daytime Observation Model for Star Sensor and Centroiding Performance Analysis, JASS, 22, 273
- Nakagawa, T., 2010, The Next-generation Space Infrared Astronomy Mission SPICA, Proc. of SPIE, 7731, 18
- Shin, I. -S., et al., 2006, EM Development of Dual Head Star Tracker for STSAT-2, IJASS, 34, 96
- Skrutskie, M. F., et al., 2006, The Two Micron All Sky Survey (2MASS), AJ, 131, 1163