

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(3), 265-271(2015)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.3.265>

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

온라인 광학보정장치를 적용한 위성카메라의 광학설계

조정빈*, 황재혁**, 배재성**

Optical Design for Satellite Camera with Online Optical Compensation Movements

Jeong-bin Jo*, Jai-Hyuk Hwang** and Jae-Sung Bae**

Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Graduate School at KAU*,
Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University**

ABSTRACT

In this study, optical design for small satellite camera equipped with online optical compensation movements has been conducted. Satellite camera equipped with compensation movements at M2 mirror and focal plane can guarantee the MTF performance through the focal plane image stabilization and the on-orbit optical alignment. The designed optical system is schmidt-cassegrain type that has M1 mirror of a diameter 200mm, GSD 3.8m at an altitude of 700km, and 50 % MTF performance. The performance of the designed optical system has been analyzed through the method of ray aberration curve, spot diagram, and MTF. It has been found by the optical performance analysis that the designed optical system satisfies the optical requirements of satellite camera equipped with online optical compensation movements.

초 록

본 연구에서는 소형 위성카메라의 영상성능 저하를 궤도상에서 능동적으로 보정하기 위해 광학보정장치를 적용한 위성카메라의 광학설계를 수행하였다. 2개의 광학 보정장치는 각각 부반사경 및 초점면부에 부착되며 총 5자유도의 운동이 가능하다. 본 논문에서 설계한 광학부는 슈미트-카세그레인(Schmidt-Cassegrain)타입으로 주반사경의 직경은 200mm이고, GSD 3.8m, MTF 성능은 약 50% 정도이다. 설계된 광학계는 수차곡선과 Spot diagram과 MTF를 통해 성능평가를 수행하였다. 수차곡선을 통해 광학성능에 가장 큰 영향을 미치는 수차가 구면수차인 것을 확인 할 수 있고, MTF 해석을 통해서 나이퀴스트 주파수에서 MTF 30% 이상의 요구 성능을 충분히 만족하는 것을 확인하였다.

Key Words : Compensation movement(보정장치), MTF compensation(MTF 보상), Focal plane image stabilization(초점면부 영상 안정화), Optical alignment(광학 정렬), Schmidt-cassegrain type(슈미트 카세그레인 형태)

† Received : January 27, 2015 Revised : February 11, 2015 Accepted : February 11, 2015

** Corresponding author, E-mail : jhwang@kau.ac.kr

1. 서론

지구 관측 임무를 수행하기 위한 관측위성 카메라의 경우 우주환경, 발사시 진동환경, 위성자세의 떨림 등 여러 요인에 의해 영상품질이 저하된다. 본 연구에서는 이러한 성능저하를 보상하기 위해서 광학체의 부반사경과 초점면부에 보정장치를 부착한 광학 시스템을 설계하였다. 현재 위성에서 보정장치가 부착된 경우는 보통 영상센서 또는 영상센서 앞 보정렌즈(corrective lens)에 보정장치가 부착되어 광축방향으로 1축 운동을 주고 있다[1,2]. 본 연구에서 적용한 보정장치는 위성카메라의 영상품질 저하에 능동적으로 대처하기 위해서 부반사경의 3축(De-space, α -tilt, β -tilt), 초점면부의 3축(De-space, De-center (x, y))을 제어할 수 있다. 따라서 본 논문에서 광학설계를 하고자 하는 위성카메라는 총 5축 제어(De-space, De-center(x,y), Tilt(α,β))가 가능한 보정장치를 포함하고 있다.

본 연구에서 언급한 보정장치를 적용한 위성 카메라는 크게 2가지 경우에 대해 영상 품질을 향상시킬 수 있다. 먼저 위성카메라에 가해지는 미소 진동외란에 대해 초점면부 보정장치의 운동보상을 통해 영상 안정화를 꾀할 수 있다. 위성 카메라가 점차 소형화되면 광량이 적어져 긴 노출 시간이 요구된다. 이로 인해 영상이 진동외란에 민감해진다. 보통 영상센서를 움직이는 보상운동을 통해 영상안정화를 꾀하는 기술은 상용 디지털 카메라의 손떨림 보정에 이용되는 기술로 위성카메라에는 새롭게 적용되는 기술이다[3]. Fig. 1은 영상센서의 보상운동으로 얻어지는 영상안정화 기법에 대한 개요이다. 외란진동에 의한 영상 품질의 저하가 영상센서의 보상운동을 통해 영상의 성능이 향상된다.

다음 두 번째 경우로, 보정장치가 적용된 위성 카메라는 위성 발사 시 진동환경과 우주환경에

의해서 광학부의 정렬이 흐트러지게 되는 것을 궤도상에서 부정과 초점면부의 보정장치를 통해 회복할 수 있다. 마이크로 단위의 위치정밀도를 요구하는 광학부의 정렬이 흐트러져 초점이 맞지 않게 되면 영상품질에는 치명적인 영향을 끼치게 된다. 이와 같은 궤도상 광학정렬 기술은 고정형 경통을 가진 광학 구조체 뿐만 아니라 위성소형화 기술 중 하나인 전개형 광학 구조체에는 필수적인 기술이다. 위성 발사 후 궤도상에서 전개되는 광학 구조체의 경우, 전개 후 정확한 위치정밀도를 가지기 어려우므로 광학정렬 과정이 필수적이다. 현재 궤도상 광학정렬을 위한 메커니즘을 포함한 위성은 주로 프랑스에서 개발된 위성인 SPOT 계열과 Pleiades 계열과 한국의 KOMPSAT-3 계열이 있다. 이는 지상 관제국과의 통신을 통해 이루어지고 있으므로 비용적·인력적 소모를 요구한다[2,4,5]. 본 논문에서 다루는 위성카메라는 보정장치를 통해 온라인으로 광학 성능 보정이 가능하도록 설계되어 지상관제국과의 통신에 의한 것이 아닌 정렬알고리즘에 의한 능동적인 정렬이 가능하다.

위성카메라를 탑재하여 지구관측임무를 수행하는 인공위성에서 영상 품질을 판단하는 대표적인 지표는 GSD(Ground Sampled distance)와 SNR(Signal to Noise Ratio), MTF(Modulation Transfer Function) 등이 있다. GSD는 영상센서 하나의 픽셀이 지상에 투영한 거리이고 SNR은 신호대 잡음비이다. MTF는 광학계를 통해 나타나는 영상이 물체를 얼마만큼 재현하는가에 대한 의미로 선명도 의미를 포함하고 있다. MTF는 해석적 방법으로 광구조체 설계 시에 계산될 수 있고, 위성 조립 및 시험단계에서는 광원을 이용하여 MTF를 측정할 수 있다. 또한 발사 후에도 궤도상에서도 측정할 수 있는 지표로 위성의 설계 단계부터 발사 후 임무수행을 하는 기간까지 위성의 전반적인 단계에서 영상 품질을 평가할 수 있는 지표이다[6,7].

본 논문에서는 온라인 보정장치를 적용한 위성카메라의 기능을 간단히 설명하고, 보정장치를 포함하고 있는 위성카메라의 광학부의 요구도 분석하고 요구도를 만족시키는 광학부를 설계하였다. 본 연구에서 설계한 광학계는 슈미트-카세그레인 타입으로 주반사경의 직경은 200mm로 고도 700km에서 운용시 GSD 3.8m를 만족한다. 설계한 광학계의 광학성능평가를 위해 수차곡선과 Spot diagram과 MTF 해석을 수행하였으며, 요구조건을 만족하고 있음을 확인하였다.

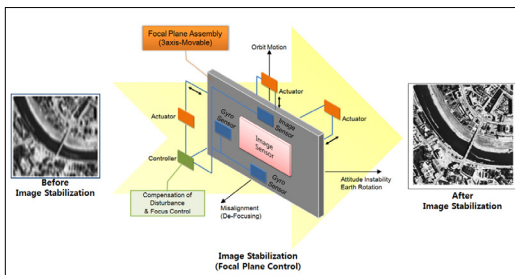


Fig. 1. Outline of focal plane image stabilization

II. 광학 보정장치를 적용한 위성카메라의 기능

2.1 초점면부 영상안정화

고해상도 영상을 획득하기 위해서는 위성의 광학부가 탑재되는 플랫폼(Platform)의 높은 자세 안정성이 요구된다. 특히 영상을 획득하는 동안에 초점면부의 자세안정성은 영상품질에 가장 큰 영향을 미친다. 자세안정성이 확보되지 못하면 위성의 궤도운동, 자세의 미소변화, 미세진동과 같은 외란이 영상품질에 큰 영향을 끼치게 되고 MTF성능이 나빠진다. 특히 소형위성의 경우 직경이 작은 경통을 탑재하게 되므로 높은 SNR(Signal to Noise Ratio)을 얻기 위해 긴 노출시간이 요구되고 이에 따라 진동외란에 의한 영상의 왜곡이 증가한다. 이러한 영상왜곡을 극복하기 위한 방법은 크게 4가지로 분류할 수 있으며, 이는 위성안정화 기법, 카메라 안정화 기법, 초점면부 영상안정화 기법, 영상 DSP(Digital Signal Processing) 기법이다.

위성안정화 기법은 가장 보편적인 기법으로 위성본체의 자세안정성을 향상 시키고 위성내부에서 발생하는 진동을 최소화 하는 방법으로 구현하기 위해서는 비용의 증가가 수반된다. 카메라 안정화 기법은 진동절연 플랫폼을 설계하여 위성운동과 카메라 시스템의 운동을 분리시키는 기법으로 항공기에 자주 활용되는 기법이나 우주 응용에는 제한적으로 적용된다. DSP 후처리 기법은 영상을 획득한 후 처리하는 기법으로 영상품질 증가의 한계가 있다. 초점면부 영상안정화 기법은 위성의 운동과 영상센서가 있는 초점면부의 운동을 분리시키는 기술로 다른 방법에 비해 무게가 가벼운 구성요소를 움직여 주기 때문에 효과적이고 비용도 적게 든다[8].

Figure 2는 영상센서가 부착되는 초점면부 보정장치이다[9]. 3개의 스테이지(stage)로 구성되어 있고, 윗 층부터 x-스테이지, y-스테이지, z-스테이지가 된다. x-스테이지와 y-스테이지는 진동의

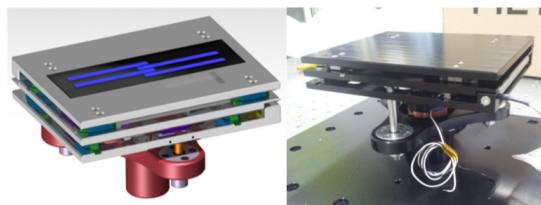


Fig. 2. Focal plane compensation movement[9]

란에 대한 운동보상을 위해 150Hz까지 빠른 응답이 가능한 PZT 작동기를 통해 구동되며, z-스테이지의 초점 조절 구동은 VCM(Voice Coil Motor)가 담당하고 있다. 각 층은 독립적으로 초점밀 운동이 가능하다[9].

2.2 궤도상 광학정렬

궤도상 광학정렬 기술은 위성의 운용초기 및 영상품질의 검·보정과정에 요구되는 기술이다. 고해상도 영상을 획득하기 위해서는 광학시스템의 광학구조품의 위치 정밀도는 마이크로 단위로 요구된다. 지상에서 주반사경과 부반사경, 영상센서의 광학정렬 과정을 거치게 되지만, 위성의 발사시 진동환경과 우주환경에 의해 광구조품의 정렬이 흐트러진다. 이러한 정렬의 흐트러짐은 영상의 MTF 성능저하와 직결되는 심각한 문제이다. 궤도상에 있는 위성은 직접 우주공간에 가지 않는 한 위성의 회수 및 수리가 어렵다. 그러므로 궤도상에서 광학 정렬과정인 리포커싱(Refocusing)과정이 필요하다. 현재의 리포커싱 과정은 1축(z축 - 광축방향) 제어를 통해 이루어지고 있다. 이는 위성과 지상 관제국과 통신을 통해 이루어지므로 많은 시간적인 소모를 요구한다. 궤도상 광학정렬 알고리즘을 통해 탑재된 2개의 보정장치를 이용하여 광학정렬을 온라인으로 궤도상에서 수행하면 지상 관제국과의 통신없이 능동적으로 정렬이 가능하므로 시간적·비용적으로 매우 효과적이다. 이러한 기법을 현재까지 실제위성에 적용된 사례는 전무하다.

Figure 3은 부반사경에 적용된 보정장치의 설계모습이다[10]. 부반사경에 적용된 보정장치의 기능은 크게 틸트 메커니즘(Tilt Mechanism)과 디스페이스 메커니즘(De-space Mechanism)으로

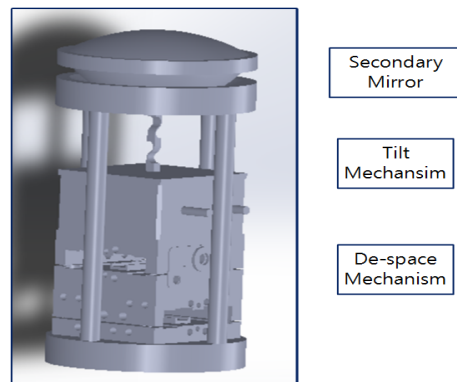


Fig. 3. Secondary mirror with compensation device[10]

구성된다. 틸트 메커니즘은 틸트 동작으로 인해 부반사경의 만곡점(중심점)에서 디센터(De-center) 운동이 발생시키지 않도록 설계되었다[10]. 디스페이스 메카니즘은 자동 초점조정 기능으로 활용될 수 있도록 하였다.

전개형 광학 구조체의 경우, 발사 전 부반사경과 주반사경 사이가 접혀 있다가 발사 후 궤도상에서 부반사경이 광학성능을 낼 수 있는 위치로 펼쳐진다. 이때 전개 메커니즘만으로는 마이크로 단위의 정밀한 위치를 잡기 힘들기 때문에 부반사경의 보정장치를 통해 광학정렬보정이 필수적이다.

III. 광학 보정장치를 갖는 광학계의 설계

3.1 광학계의 형태

지구관측 카메라 또는 우주관측 망원경의 경우 크기와 무게의 제약으로 카세그레인 방식이 많이 쓰인다. 카세그레인 방식은 기본적으로 주반사경, 부반사경으로 구성되어 있고 광축상(On-axis)에 두 반사경이 정렬된다. 카세그레인 방식은 반사경의 면의 형태에 따라서 여러 형태가 있으며, 굴절렌즈를 포함해 카세그레인 응용 반사굴절(Catadioptric) 타입의 광학계 등 목적에 맞게 여러 형태로 활용된다.

카세그레인 응용 반사굴절 타입 중에서도 슈미트-카세그레인(Schmidt-cassegrain)은 슈미트 판(Shmidt plate), 주반사경, 부반사경으로 구성된다. 슈미트 판은 주경과 유사한 직경을 가지고, 비구면으로 되어있어 구면으로 된 주반사경의 구면수차를 보정한다. 주반사경은 반사경 중에서는 가장 큰 직경을 가지는데, 이를 비구면으로 가공하는 데는 큰 비용을 요구한다. 따라서 비교적 저렴한 가격으로 제작이 가능한 구면으로 주경을 제작하여 비구면 슈미트 판을 통해 보정하게 되면 비용을 줄일 수 있다. 보통의 위성카메라는 그 광학계가 낼 수 있는 최대의 성능인 회절한계 성능을 만족할 수 있도록 초평면 앞에 다수의 보정렌즈를 삽입하게 된다. 그러나 본 연구에서는 회절한계 성능을 요구하는 광학계 설계를 목적으로 두고 있지 않으므로 광구조품의 수를 줄여 하나의 슈미트 판으로 다수의 보정렌즈의 역할을 대신하도록 설계하였다. 또한 구면 주반사경은 상용 천체망원경의 광부품으로 많이 판매되고 있어 실험실 수준 광학계 제작에 사용하기 매우 용이하다. Fig. 4는 슈미트 카세그레인 형태 광부품

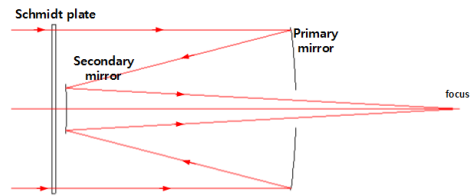


Fig. 4. Schmidt-Cassegrain layout

배열도(layout)이며, 영상은 슈미트 판, 주반사경, 부반사경을 차례로 지나 초점평면에 결상되는 구조이다.

3.2 광학계의 설계 요구조건

위성카메라 광학 설계는 궤도상의 운용조건을 고려하여서 요구사항을 만족할 수 있도록 설계되어야 한다.

3.2.1 입무궤도

가시광선대역을 이용하여 지구관측입무를 수행하는 위성의 경우, 지상에 있는 관측대상이 복사하는 에너지를 측정하여 영상을 생성한다. 따라서 측정이 용이한 저궤도에서 주로 운용되며 본 연구에서는 KOMPSAT-3의 운용고도 685km를 전제로 하여 위성 운용고도를 700km로 요구사항을 수립하였다[11].

3.2.2 광학계의 크기

보정장치가 적용된 위성카메라의 기능 중에서 초점면부 영상안정화 기술은 주반사경이 작은 직경(Aperture Diameter)을 가지는 것을 전제로 하고 있기 때문에 광학부는 이에 상응하여 소형위성에 적합하도록 설계하였다. 따라서 주반사경의 직경은 200mm 크기로 선정하였다. 전체 광학계의 길이도 제한해 줄 필요가 있다. 슈미트-카세그레인의 타입의 경우 폴드 미러(Fold mirror)를 따로 설계에 넣지 않는 한 슈미트 판에서 초점면부 사이의 거리가 전체 광학계 길이라고 볼 수 있다. 소형위성의 전체에 적합하도록 광학계 전체길이를 450mm 이하로 제한하도록 설정하였다.

광량은 주반사경의 직경에 가장 큰 영향을 받지만, 부반사경이 주반사경의 광축상에 정렬되므로 부반사경에 의해서 광선의 차폐가 발생한다. 따라서 광량과 MTF 성능향상을 위해서 부반사경의 직경을 제한해 줄 필요가 있다. 본 연구에서는 주반사경과 부반사경의 직경의 비를 35% 이내로 설계하도록 요구사항을 수립하였다.

3.2.3 광학 성능 요구조건

위성카메라의 영상에 대한 요구조건은 다음과

Table 1. Requirements of optical system

Camera type	Schmidt Cassegrain
Aperture Diameter	200mm
Total tube length	<450mm
GSD	3.8m
MTF	8% @EOS, nyquist freq 30% @optical design, nyquist freq
Linear Obscuration	<0.35

같이 설정하였다. 위성의 주반사경의 직경의 요구사항은 200mm로 주반사경의 직경이 같은 실제 위성인 SPOT-5의 GSD 3.5m를 전제로 하여 3.8m급 GSD를 만족할 수 있도록 요구사항을 정립하였다.

식 (1)과 같이 광학 탑재체의 MTF는 설계된 광학계의 MTF에서 영상센서의 MTF의 곱이다 [12]. 최종 영상센서를 포함한 MTF 성능을 8%로 잡고, 영상센서의 MTF를 40%로 전제하여 제작 및 조립시의 성능저하를 감안하여 영상센서를 제외한 광학설계 MTF 성능은 나이퀴스트 주파수에서 30% 이상을 만족할 수 있도록 요구사항을 정립하였다. Table 1은 요구사항을 정리한 내용이다.

$$MTF_{payload} = MTF_{optics} \cdot MTF_{detector} \quad (1)$$

3.3 광학계의 설계 및 광학 성능해석

이론적으로 해상도를 결정하는 식은 식 (2)와 같다[6]. P_x 는 영상 센서의 픽셀의 크기, EFL 은 광학계의 유효초점거리, H 는 고도, f 는 광학계의 f 수, D 는 입사동의 직경을 의미한다. 따라서 위성의 운용고도 700km에서 직경 200mm을 가지는 주반사경을 가지는 광학계에서 3.8m 해상도를 가지기 위해서는 식 (2)을 만족할 수 있도록 적절한 픽셀사이즈와 f 수를 가지도록 설계해야한다.

$$GSD = \frac{P_x}{EFL} H = \frac{P_x}{f \times D} H \quad (2)$$

주어진 요구사항을 만족하도록 설계한 광학계는 Table 2에 정리하였다. 부반사경의 직경이 주반사경의 직경의 27%로 54mm로 설계하였고, GSD 3.8m 성능과 MTF 성능을 요구사항을 모두 만족할 수 있도록 설계되었다.

Figure 5 는 설계한 광학계의 3차원 그림이다. 직경 205mm의 슈미트 판을 지나 직경 200mm 주반사경과 직경 54mm 부반사경에 차례로 반사

Table 2. Specification of designed system

Camera type	Schmidt Cassegrain
Aperture Diameter	200mm
GSD	3.8m
$f/\#$	9.07
Swath width	5 km
Total tube length	449.2 mm
FOV(field of view)	0.41 deg
MTF(Optical design)	50% @nyquist freq
Linear Obscuration	0.27
Pan detector	CMOS sensor (10 μ m)

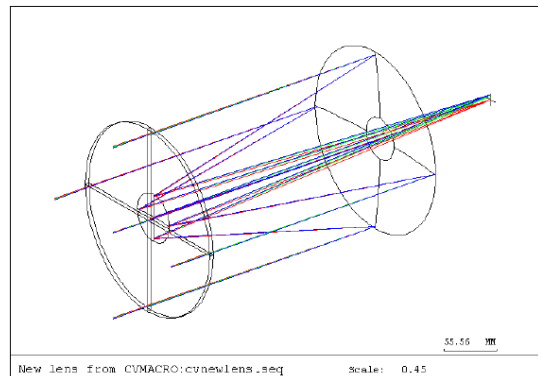


Fig. 5. Designed system 3D layout

된 광선이 초평면에 상이 결상된다. 슈미트 판과 초점면부 사이의 거리는 약 449mm로 요구사항을 만족하였다.

Figure 6은 설계한 광학계의 시야수차도이다. 각각의 필드(field)에서 주광선(Chief ray)로부터 벗어난 정도를 보여주며 좌측은 Δy 우측은 Δx 의 값이다. 이 그래프를 통해서 광학계의 수차의 종류와 그 정도를 한눈에 가늠할 수 있다[13]. 설계된 광학계에서는 주로 3차 구면수차가 나타나고 있다. 이는 구면으로 된 주반사경을 사용함으로써 나타나는 것으로 슈미트 판을 통해서 보정되었음에도 가장 큰 수차로 나타난다.

Figure 7은 설계한 광학계의 스팟 다이어그램(Spot Diagram)이다. 스팟 다이어그램은 수차 곡선에서 고려되지 않는 회절과 비네팅(Vignetting), 사행광선(Skew ray)까지 고려된 성능평가이다. 입사동을 격자로 나누고 광선을 추적하여 상면에 입사한 점을 표시한 그래프로 모든 광선을 추적할 수 있다[13]. 0, 0.7 Full field에서 RMS 스팟(spot) 크기는 각각 9.5 μ m, 7.7 μ m, 9.6 μ m이다. 이는 CMOS 픽셀 사이즈보다 작은 크기로 영상센서의

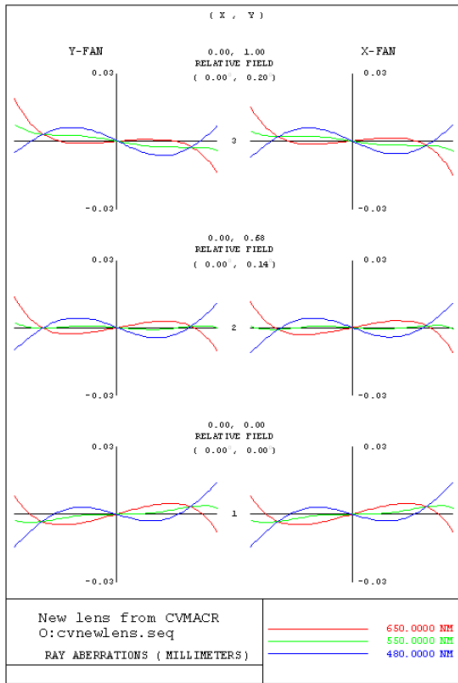


Fig. 6. Ray aberration curve of designed optical system

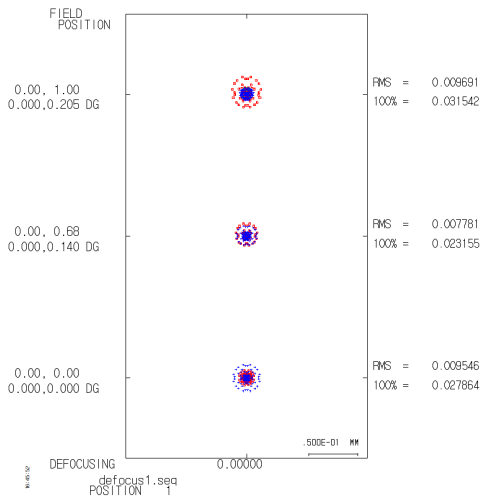


Fig. 7. Spot diagram of designed optical system

픽셀 하나에 광선이 집중될 수 있으므로 광학적으로도 GSD 3.8m 성능을 만족함을 확인할 수 있다.

Figure 8은 설계한 광학계의 MTF 값 그래프이다. 나이퀴스트 주파수(Nyquist frequency) 50cycle/mm에서 모든 필드(0, 0.7 full field)에서 요구사항인 30%를 넘는 값으로 50%의 성능을

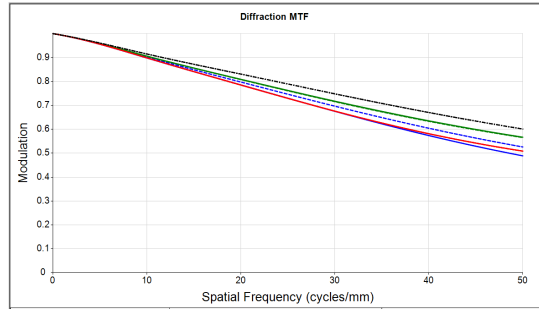


Fig. 8. MTF of designed optical system

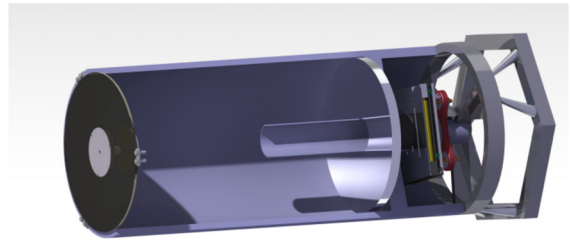


Fig. 9. Design of satellite camera equipped with compensation movements

가지는 것을 확인할 수 있다. 이 선도는 회절(Diffraction), 수차(Aberration), 차폐(Obscuration)에 의한 영상품질 저하까지 고려한 값이다.

Figure 9는 보정장치를 적용한 위성카메라의 전체적인 개념도이다. 위성카메라는 부분사경과 초점면부에 광학 보정장치를 포함하고 있고, 슈미트-카세그레인 타입이다. 본 논문과 같이 광학 보정장치를 내부에 포함하고 있는 광학계에서는 조립가공오차, 정렬오차, 우주환경에서 변형 등이 광학특성에 미치는 영향을 최소화 시킬 수 있다. 따라서 광학계 설계시 여유마진을 크게 주지 않고 안정적으로 설계할 수 있는 장점을 갖고 있다.

IV.결 론

본 연구에서는 위성용 광학 탑재체의 영상성능 저하를 궤도상에서 능동적으로 보정하기 위해서 온라인 광학 보정장치를 적용한 위성카메라의 광학설계를 수행하였다. 2개의 광학 보정장치는 각각 부분사경 및 초점면부에 부착되며 총 5자유도의 운동이 가능하다. 초점면부 보정장치의 x-스테이지, y-스테이지는 0~150Hz 진동외란에 대한 초점면부 영상안정화가 가능하고, z-스테이지와 부경의 보정장치를 이용하여 궤도상 광학정렬을 능동적으로 실현시킬 수 있다. 본 논문에서는

이러한 위성카메라의 광학부를 설계하고 광학 성능을 분석하였다.

본 연구에서 설계한 광학계는 슈미트-카세그레인 타입으로 주반사경의 직경은 200mm로 고도 700km에서 운용시 GSD 3.8m을 만족한다. 설계된 광학계는 수차곡선과 스팟 다이어그램과 MTF를 통해 성능평가를 수행하였다. 수차곡선을 통해 광학성능에 가장 큰 영향을 미치는 수차가 구면수차인 것을 확인 할 수 있고, Spot diagram을 통해서 RMS 스팟 크기를 확인하여 영상센서의 픽셀 사이즈인 10 μ m에 광선이 집중됨을 확인하였다. 또한 MTF 그래프를 통해서 MTF 요구조건인 나이퀴스트 주파수 50cycle/mm에서 30%를 충분히 만족하도록 설계가 수행되었음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 우주핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No.NRF2013MIA3A3A02042321)

References

- 1) Jiwoong Yu, SangYoung Park, and DongHan Lee, "Attitude Scenarios of Star Observation for Image Validation of Remote Sensing Satellite," Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 40 No. 9, 2012, pp.807~817.
- 2) Lee D. H., Seo D. C., Song J. H., Chung J. H., Park S. Y., Choi M. J., and Lim H. S., "Image restoration of calibration and validation for KOMPSAT-2," The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 37 No. B1, 2008, pp.57~62.
- 3) DongGi Kwag, JaeSung Bae, and JaiHyuk Hwang, "Dynamic Characteristics of a Piezoelectric Driven Stick-Slip Actuator for Focal Plane Image Stabilization," Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 37 No. 4, 2009, pp399~405.
- 4) Léger D., Viallefont F., Hillairet E., and Meygret A., "In-flight refocusing and MTF assessment of SPOT5 HRG and HRS cameras,"

Progress in Biomedical Optics and Imaging (SPIE Proceedings Series), No. 4881, 2003, pp.224~231.

- 5) Viallefont-Robinet and Françoise, "Edge method for on-orbit defocus assessment," Optics express, Vol. 18 No. 20, 2010, pp.20845~20851.

- 6) YoungMin Cho, " Characteristics of the Image Quality Parameter in Satellite Imaging Instrument," Aerospace Engineering and Technology, Vol. 1 No. 2, 2002, pp.66~74.

- 7) Harrie G. J. Rutten, Martin A. M. van Venrooij, and Diane Lucas, "Telescope optics Evaluation and design," Richmond, VA, Willmann-Bell, edited by Richard Berry, 1988, pp.205~218.

- 8) Haejin Choi, "Satellite," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 45 No. 7, 2005, pp.33~58.

- 9) Myoungsoo Kang, Jeanho Park, Jaeup Hwang, Jaihyuk Hwang, and Jaesung Bae, "On the Compensation Device for Image stabilization of High-Resolution Satellite Camera," The Society for Aerospace System Engineering, Spring Conference Paper #1, 2014.

- 10) Jeanho Park, Jaihyuk Hwang and Jiyoung Yang, "Conceptual Design for Tilt Mechanism of The Secondary Mirror with Deployment Structure," The Society for Aerospace System Engineering, fall Conference Paper #43, 2014.

- 11) HeeSeob Kim, DaeWon Chung, and HaeJin Choi, "Satellite Operation Design for Assessing MTF Performance of Earth Observation Satellite Using Stellar Source," Journal of Astronomy and Space Sciences, Vol. 24 No. 4, 2007, pp.379~388.

- 12) DoMyung Kim, DeokRyeol Kim, Nakwan Kim, Jinyoung Suk, HeeSeob Kim, Gyu-Sun Kim, and YoungMok Hyun, "A Study on Basic Modeling Method for MTF Analysis of Observation Satellites," Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 36 No. 5, 2008, pp.472~482.

- 13) JooHee Lim, "Analyses of Optical and Opto-Mechanical Performance of a Wide Field Telescope," Master's Thesis, KyungHee University, 2013.