

## Assembly and Testing of a Visible and Near-infrared Spectrometer with a Shack-Hartmann Wavefront Sensor

Sung Lyoung Hwang<sup>1</sup>, Jun Ho Lee<sup>1†</sup>, Do Hwan Jeong<sup>1</sup>, Jin Suk Hong<sup>2</sup>, Young Soo Kim<sup>2</sup>,  
Yeon Soo Kim<sup>3</sup>, and Hyun Sook Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Optical Engineering, Kongju National University, Cheonan 31080, Korea

<sup>2</sup>Harwha Systems, 188 Pangyoyeok-ro Bundang-gu Seongnam-si Gyeonggi-do 13524, Korea

<sup>3</sup>Agency for Defense Development, Jochiwongil 462, Yuseong, Daejeon 34186, Korea

(Received January 24, 2017; Revised manuscript March 6, 2017; Accepted March 18, 2017)

We report the assembly procedure and performance evaluation of a visible and near-infrared spectrometer in the wavelength region of 400-900 nm, which is later to be combined with fore-optics (a telescope) to form a  $f/2.5$  imaging spectrometer with a field of view of  $\pm 7.68^\circ$ . The detector at the final image plane is a  $640 \times 480$  charge-coupled device with a  $24 \mu\text{m}$  pixel size. The spectrometer is in an Offner relay configuration consisting of two concentric, spherical mirrors, the secondary of which is replaced by a convex grating mirror. A double-pass test method with an interferometer is often applied in the assembly process of precision optics, but was excluded from our study due to a large residual wavefront error (WFE) in optical design of  $210 \text{ nm}$  ( $0.35\lambda$  at  $600 \text{ nm}$ ) root-mean-square (RMS). This results in a single-path test method with a Shack-Hartmann sensor. The final assembly was tested to have a RMS WFE increase of less than  $90 \text{ nm}$  over the entire field of view, a keystone of  $0.08$  pixels, a smile of  $1.13$  pixels and a spectral resolution of  $4.32 \text{ nm}$ . During the procedure, we confirmed the validity of using a Shack-Hartmann wavefront sensor to monitor alignment in the assembly of an Offner-like spectrometer.

Keywords: Spectrometer, Imaging spectrometer, Offner relay, Shack-Hartmann sensor, Visible & Near-Infrared (VNIR)

OCIS codes: (110.4234) Multispectral and hyperspectral imaging; (120.0280) Remote sensing and sensors; (300.6190) Spectrometers; (220.1140) Alignment

## 샤크-하트만 센서를 이용한 가시광 및 근적외선 분광기 조립 및 평가

황성령<sup>1</sup> · 이준호<sup>1†</sup> · 정도환<sup>1</sup> · 홍진석<sup>2</sup> · 김영수<sup>2</sup> · 김연수<sup>3</sup> · 김현숙<sup>3</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 광공학과

Ⓣ 31080 충청남도 천안시 서북구 천안대로 1223-24

<sup>2</sup>한화 시스템

Ⓣ 13524 경기도 성남시 분당구 판교역로 188

<sup>3</sup>국방과학연구소

Ⓣ 34186 대전광역시 유성구 조치원길 462번지

(2017년 1월 24일 받음, 2017년 3월 6일 수정본 받음, 2017년 3월 18일 게재 확정)

본 논문은 400~900 nm 파장 대역을 갖는 가시광 및 근적외선 분광기의 조립 및 성능 평가에 대하여 보고한다. 본 분광기는 이 후 결상 망원경과 함께 시야각  $\pm 7.68^\circ$ 을 갖는  $f/2.5$ 의 영상 분광기를 구성한다. 검출기로는  $24 \times 24 \mu\text{m}$  피치로 이뤄진  $640 \times 480$  전하결합소자(CCD)가 적용된다. 분광기는 두 개의 동심 구면으로 구성된 오프터 타입이며, 분광을 위하여 2번째 거울이 회절격자 거울로 교체되어 있다. 본 논문에서 다루는 분광기 광학 설계가 제곱평균제곱근(root mean squared, RMS) 파면 잔여 수치가  $210 \text{ nm}$ (파장  $600 \text{ nm}$  기준,  $0.35\lambda$ )로 통상 적용되는 간섭계를 이용한 이중 경로 광학 측정법 적용이 어렵고, 또한 측정 및 정렬의 용이성을 고려하여 샤크-하트만 센서를 적용한 단일 경로 파면 측정법을 적용하여 정렬 및 조립 절차를 수립하였다. 최종 조립

<sup>†</sup>E-mail: [jhlsat@kongju.ac.kr](mailto:jhlsat@kongju.ac.kr)

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

후 RMS 파면 오차 변화가 전 시야에 걸쳐 90 nm 이내로 정렬되었음을 확인하였다. 이 후 조립 광학 구성을 유지한 채 2개 적층 슬릿 지그를 이용하여 생성한 다중 핀 홀의 크립톤 램프 분광 이미지를 획득하였으며, 획득된 이미지의 분석을 통하여 조립 분광기의 분광 분해능, 키스톤 및 스마일이 각 4.32 nm, 0.08 픽셀 및 0.13 픽셀로 요구 사항을 만족하는 것을 확인하였다. 결론적으로 샤크-하트만 센서를 적용한 오프너 분광기의 조립 절차는 유효함을 확인하였다.

Keywords: 분광기, 영상 분광기, 오프너 릴레이, 샤크-하트만 센서, 가시광 및 근적외선

OCIS codes: (110.4234) Multispectral and hyperspectral imaging; (120.0280) Remote sensing and sensors; (300.6190) Spectrometers; (220.1140) Alignment

## I. 서 론

대상 물체의 특성을 구명하기 위해 지난 수 십 여 년 동안 생물학<sup>[1]</sup>, 문화유산<sup>[2]</sup>, 천문학<sup>[3]</sup> 등에서 분광기(spectrometer)를 많이 사용해 왔고, 최근 지상 및 위성 원격탐사 임무에 공간 정보와 분광 정보를 동시에 획득할 수 있는 영상 분광기(imaging spectrometer)를 자주 적용하고 있다<sup>[4-8]</sup>. 영상 분광기는 분광 방식 및 분광 소자의 종류에 따라 다양한 방식이 적용되고 있으며, 선형 칼라 필터 방식, 푸리에 변환 방식 및 푸시브room(push-broom) 스캐닝 방식 등이 있다. 이 중 푸시브room 스캐닝 방식의 영상 분광기가 구성의 간편성 및 제작의 상대적 용이성으로 항공기 및 위성 탑재체로 가장 선호되고 있다. 푸시브room 스캐닝 방식의 영상 분광기는 결상 및 분광을 각 담당하는 전단(결상) 광학계와 분광 광학계가 독립 구성되어 있으며, 전단 광학계의 상면과 분광 광학계의 물체면이 슬릿을 통하여 일치하게 결합되어 있다. 슬릿은 영상 분광기가 탑재된 항공기 또는 위성의 진행 방향과 수직하게 배치되게 된다. 영상 분광기에 입사하는 평행 입사 빔은 전단 광학계

상면에 위치한 슬릿을 통하여 분광 광학계에 입사하게 되고, 이후 분광 광학계를 통하여 최종 상면에 재결상 되면서 슬릿 방향의 공간 축과 이와 수직한 분광 축으로 이뤄진 2차원 이미지 즉 분광 이미지를 구성하게 된다. 영상 분광기는 항공기 및 위성의 진행 방향으로의 연속적 촬영(scan)을 통하여 관측 대상의 공간 및 분광 정보로 이뤄진 3차원 정보를 관측한다. 그림 1은 소형위성에 탑재된 영상 분광기<sup>[5]</sup>의 예로 영상 분광기의 광학 구성 및 영상 촬영 개념을 보여주고 있다.

푸시브room 스캐닝 방식의 영상 분광기에 적용되는 분광 광학계는 슬릿 라인 이미지를 검출면에 재결상하는 과정에서 분광을 하는 광학계로, 프리즘 방식 및 회절격자 방식으로 크게 나뉜다. 프리즘 방식(그림 1)은 제작 및 조립의 용이한 점이 있으나 분광 해상력이 파장에 따라 변화하는 단점이 있다<sup>[5]</sup>. 반면 회절격자 거울을 이용하는 오프너(Offner) 분광 광학계(그림 2)는 분광 소자 제작의 어려움 등이 있음에도 영상 왜곡이 적고 모든 관측 파장 대역에서 거의 동일한 분광 분해능을 가질 수 있다는 장점이 있다<sup>[9-12]</sup>. 최근 볼록 회절격자 거울(convex grating)의 제작 기술이 향상됨에 따라,

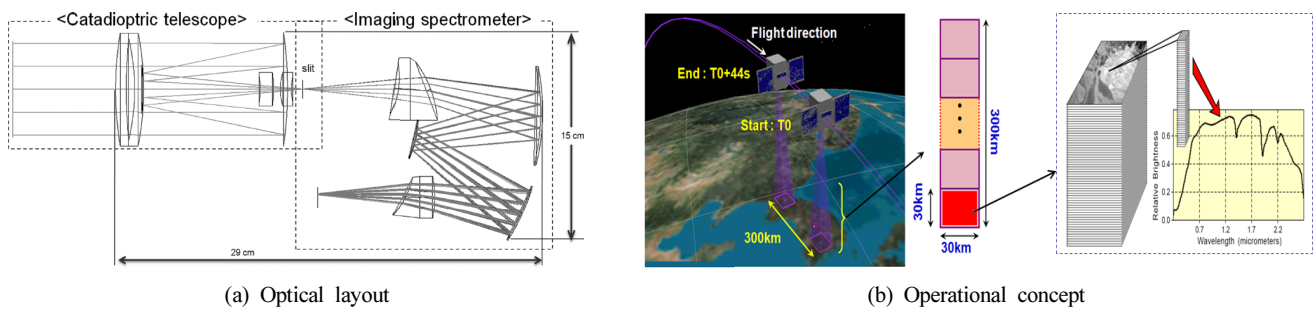


Fig. 1. Optical layout and operational concept of a space-borne imaging spectrometer<sup>[5]</sup>.

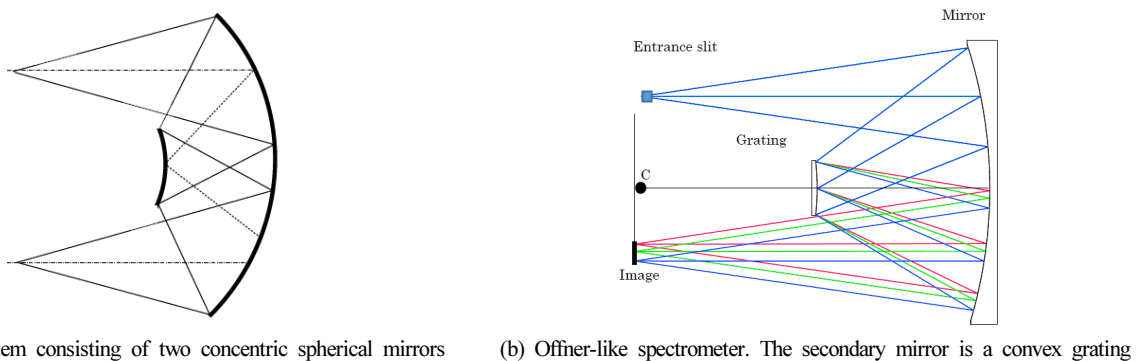


Fig. 2. Schematic drawings of an Offner relay optical system and an Offner-like spectrometer.

오프터 방식의 분광기(오프너 분광기)가 분광 광학계로 가장 많이 적용되고 있다. 오프너 분광기는 두 개의 동심 거울로 구성된 오프너 광학 구성 중 두 번째 거울이 회절 거울로 대체되어 있다. 회절 소자의 격자 라인 형상 및 간격은 적용 회절 차수 및 분광 분해능에 따라 결정된다.

본 논문에서는 가시광 및 근적외선(visible and near-infrared, VNIR) 관측 대역 및 시야각  $\pm 7.68^\circ$ 을 갖는  $f/2.5$  영상 분광기에 적용될 분광기의 조립 및 성능 평가에 대하여 보고한다. 2장에서는 광학계의 구성 및 민감도 분석에 따른 공차 할당과 보상자 선정을 설명하고, 3장에서는 샤크-하트만 센서를 이용한 조립·정렬 절차와 최종 조립된 분광기의 측정 성능에 대해 서술하였다.

## II. 광학계 구성 및 분석

### 2.1. 분광기 구성

가장 일반적인 배치의 푸시브room 스캐닝 방식의 영상 분광기는 그림 1 및 그림 3과 같이 전단(결상) 광학계와 분광 광학계가 분리·결합되어 있다. 전단 광학계의 상면과 분광 광학계의 물체면에 슬릿을 통하여 일치하게 배치되어 있어, 결상 및 분광의 역할을 각 담당하게 된다. 영상 분광기의 상면에서는 슬릿 방향의 공간 축과 이와 수직한 분광 축으로 이뤄진 2차원 이미지 즉 분광 이미지를 구성하게 된다. 이후 영상 분광기가 슬릿 방향과 수직 방향으로 진행·스캔하면서 3차원 공간 및 분광 정보를 획득하게 된다.

본 논문은 400~900 nm의 VNIR 관측 대역 및 시야각  $\pm 7.68^\circ$ 을 갖는  $f/2.5$  영상 분광기에 적용될 분광 광학계(분광기)만을 다룬다. 검출기로는  $24 \times 24 \mu\text{m}$  피치로 이뤄진  $640 \times 480$  전

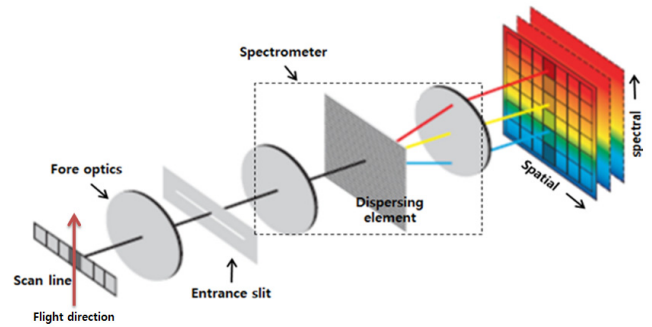


Fig. 3. Schematic diagram of an Push-broom type imaging spectrometer.

하결합소자(CCD)이다. 분광기는 배율 -1배의 오프너 릴레이 방식으로, 두 개의 동심 거울로 구성되어 있으며, 분광을 위하여 두 번째 거울이 블록 회절 소자로 대체되어 있다. 순차 광선 추적 방식의 광학 표현 방식에 따라 각 광학 반사경을 광선 진행 순서에 따라 M1, M2, M3로 부른다. 첫 번째 거울(M1) 및 세 번째 거울(M3)은 실제 동일 반사경(M1\_M3)의 일부이다. 잔여 수차 및 왜곡 수차를 최소화하기 위하여, 회절소자 거울(M2)은 작은 양의 중심 이동 및 기울기를 갖도록 설계되어 있다. 분광기의 개구수(Numerical aperture, NA)는 0.2이며, 시야각  $\pm 7.68^\circ$ 에 대응하는 길이 15.36 mm의 슬릿이 분광기 물체면에 위치하고 있다. 슬릿 폭은 검출기의 피치와 일치하는  $24 \mu\text{m}$ 이다. 그림 4는 설계된 VNIR 분광기의 광학 배치 및 실제 구성을 보여주고 있다. 실제 광학 배치는 공간 제약 조건 및 다른 파장 대역의 빛 분리를 위하여 빔 분리기(BS) 및 폴딩 미러(FM)로 일부 광경로가 접혀있다. 그림 5는 실제 제작된 광학 부품 사진을 보여주고 있으며, 표 1은 개발 분광기 개발 사양을 보여주고 있다.



Fig. 4. Unfolded and folded optical layouts of the VNIR spectrometer.

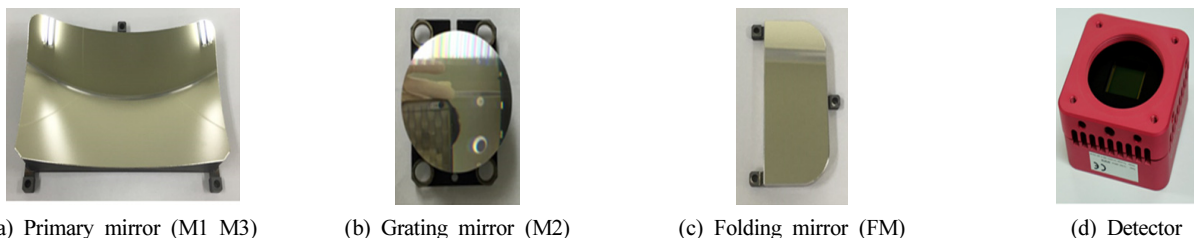


Fig. 5. Pictures of the VNIR spectrometer major components.

**Table 1.** VNIR spectrometer specification

Item	Requirements
Spectral range [nm]	400~900
Numerical aperture	0.2
Keystone [pixel]	< 0.3
Smile [pixel]	< 0.3
Spectral resolution [nm]	< 5
Magnification	-1.0
Slit length/width [mm]	15.36/0.024

**2.2. 민감도 분석 및 보상자 선정**

광학계의 최종 성능 확보를 위한 제작 및 조립 공차 수립을 위하여 먼저 설계 광학계의 민감도를 조사하였다. 민감도 조사는 각 광학 요소의 중심이동(x, y, z), 기울기 변화( $\alpha$ ,  $\beta$ )에 따른 시야 별 제곱평균제곱근(root mean squared, RMS) 파면 수차(wavefront error, WFE) 및 제르니케 함수 계수의 변화를 이용하여 조사하였다. 표 2는 각 광학 소자의 50  $\mu\text{m}$ 의 공간 이동 및 0.05°의 기울기 변화에 따른 최종 파면의

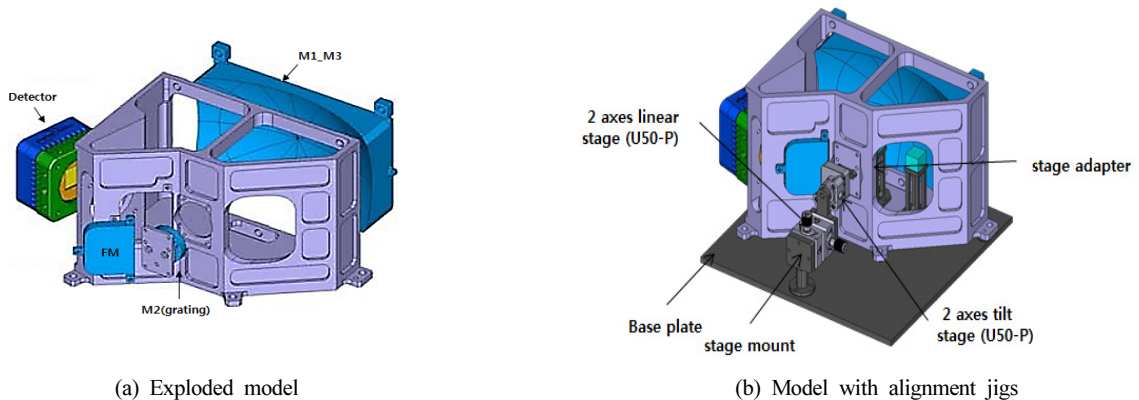
변화를 제르니케 계수의 변화량으로 표현하였다. 제르니케 계수 중 Z1 (피스톤), Z2/Z3 (기울기), Z4 (초점 이동)는 광학적으로 의미가 없거나 검출기의 이동으로 별도 고려된다. 민감도 조사 결과 및 조립의 용이성을 고려하여 두 번째 회절격자 거울(M2) 및 검출기를 보상자로 선정하였다. 그림 6은 VNIR 분광기의 분해 조립도와 조립 지그가 표현된 3차원 모델을 보여주고 있다. 회절격자 거울(M2)은 중심이동 및 기울기 변화를 조절할 수 있으며, 검출기는 얇은 조립 끼움쇠(optical shim)를 이용하여 광축 방향으로의 이동, 기울기 및 회전(clocking)을 조절할 수 있다.

**2.3. 공차 할당**

광학계의 공차 할당은 RMS WFE를 대개로 한 제곱합제곱근방식(Root Sum Squared, RSS)을 적용하였다. RSS 공차 분석 방법은 공차가 할당된 각 구성 요소들의 단독 RMS WFE의 변화( $\Delta WFE_i$ )의 제곱 합 제곱근으로부터 시스템 광학계의 RWS WFE 변화( $\Delta WFE_{\text{system}}$ )를 예측하는 기법이다. 민감도 분석 결과와 제작 가능한 기구 공차를 바탕으로 조립에

**Table 2.** Sensitivity of the VNIR spectrometer

Components		Tolerance	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	
M1_M3	Position	x [mm]	0.05	0.21	1.02	0.14	0.01	0.17	0.00
		y [mm]	0.05	0.30	1.32	0.00	0.00	0.13	0.00
		z [mm]	0.05	3.10	0.43	0.00	0.00	0.17	0.03
	Angle	$\alpha$ [°]	0.05	0.44	1.77	0.00	0.00	0.05	0.01
		$\beta$ [°]	0.05	0.21	1.01	0.35	0.03	0.18	0.00
M2 (grating)	Position	x [mm]	0.05	0.21	1.02	0.14	0.01	0.17	0.00
		y [mm]	0.05	0.28	1.23	0.00	0.00	0.12	0.00
		z [mm]	0.05	1.01	1.62	0.00	0.00	0.18	0.01
	Angle	$\alpha$ [°]	0.05	0.70	1.79	0.00	0.00	0.27	0.01
		$\beta$ [°]	0.05	0.21	1.02	0.87	0.02	0.17	0.00
Detector	Position	z [mm]	0.05	1.04	1.02	0.00	0.00	0.18	0.01
	Angle	$\alpha$ [°]	0.05	0.21	1.03	0.00	0.00	0.17	0.00
		$\beta$ [°]	0.05	0.21	1.03	0.00	0.00	0.17	0.00



**Fig. 6.** Exploded model and model with alignment jigs of the VNIR spectrometer.

서 발생하는 시스템 파면 오차 오류( $\Delta$ RMS WFE)가  $0.18\lambda$ 을 만족하도록 할당하였다(표 3). 표 3 및 4는 각 시스템 및 조립 공차 할당을 보여주고 있다.

**Table 3.** System wavefront error allocation of VNIR Spectrometer

Item	RMS WFE [ $\lambda 600$ ]	RMS WFE [nm]
Design	0.35	210
Manufacturing	0.14	84
Assembly	0.18	108
Environment	0.09	54
Total	0.43	256

**Table 4.** Alignment wavefront error allocation in unit of  $\lambda$  at 600 nm

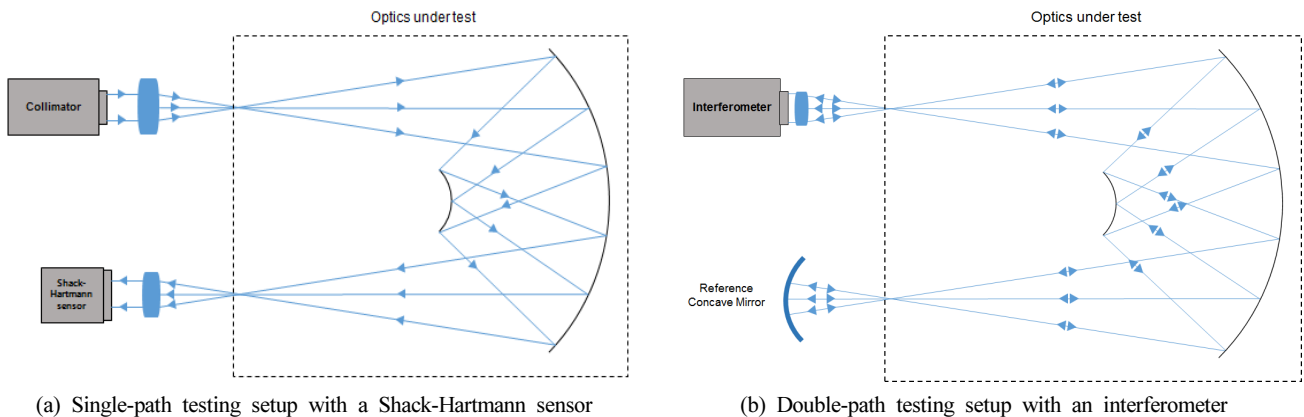
Level 1	in Zemax	unit	Sensitivity		Allocated			RSS $\Delta$ WFE
			Error	$\Delta$ RMS	Error	$\Delta$ RMS	$(\Delta$ RMS) <sup>2</sup>	
Input Beam	z	mm	0.05	0.06	0.04	0.05	0.00230	0.18
	x	mm	0.05	0.06	0.04	0.05	0.00230	
	y	mm	0.05	0.06	0.04	0.05	0.00230	
	$\alpha$	deg	0.11	0.06	0.08	0.04	0.00190	
	$\beta$	deg	0.11	0.06	0.08	0.04	0.00190	
M1/M3	z	mm	0.05	0.06	0.04	0.05	0.00230	
	x	mm	0.05	0.06	0.04	0.05	0.00230	
	y	mm	0.05	0.06	0.04	0.05	0.00230	
	$\alpha$	deg	0.11	0.06	0.05	0.05	0.00224	
	$\beta$	deg	0.11	0.07	0.05	0.06	0.00305	
M2 (grating)	z	mm	0.05	0.01	0.05	0.01	0.00010	
	x	mm	0.05	0.08	0.03	0.05	0.00230	
	y	mm	0.05	0.23	0.01	0.05	0.00212	
	$\alpha$	deg	0.11	0.68	0.01	0.06	0.00382	
	$\beta$	deg	0.11	0.51	0.01	0.05	0.00215	
Detector	z	mm	0.05	0.00	0.05	0.00	0.00000	
	$\alpha$	deg	0.11	0.00	0.11	0.00	0.00000	
	$\beta$	deg	0.11	0.03	0.10	0.03	0.00074	

$$\Delta WFE_{\text{system}} = \sqrt{\sum_i (\Delta WFE_i)^2} \quad (1)$$

### III. 광학계 정렬 및 평가

#### 3.1. 정렬·조립 평가 방법 및 이의 특징

일반적으로 파면오차 등 광학적 성능이나 정렬을 확인하는 것에 있어 높은 공간 분해능 및 측정 정밀도를 구현하는 간섭계를 이용하여 측정하는 방법을 많이 사용한다<sup>[13]</sup>. 하지만 본 논문에서 다루는 분광기와 같이 광학계 설계 자체가 일정 수준 이상의 잔여 수차(RMS WFE  $0.35\lambda$ )를 갖고 있는 경우, 이중 경로 구성 시 측정 대상의 자체 잔여 수차가 증가하게



**Fig. 7.** Single and double path optical testing setups for the VNIR spectrometer alignment.

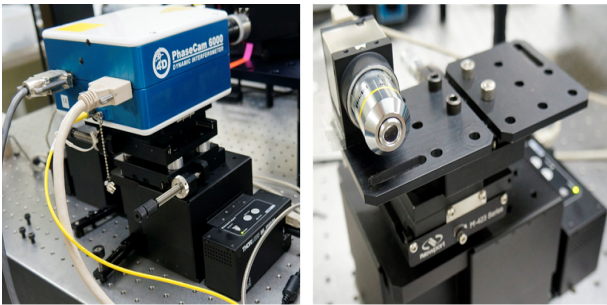


되어 정밀 조립 평가가 어렵다. 또한, 간섭계를 이용한 측정 방법에서는 외각 시야에 대한 성능을 측정하기 위해서는 측정 광학계 전체를 정밀 회전 구동하는 장치를 구성해야 하는 어려움이 있다.

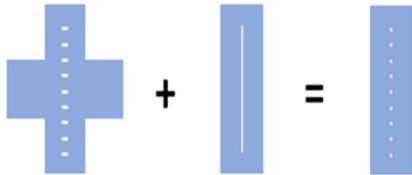
샤크-하트만 센서는 1980년 초반 대기 외란 보정용 적응광

**Table 5.** Specification of the Shack-Hartmann sensor

Wavefront Sensor (WFS150-7AR)	
Wavelength range	400~900 nm
Aperture size	5.95×4.76 mm
Camera resolution	1280×1024
Pixel size	4.65×4.65 μm
Wavefront accuracy (RMS)	<15 nm (@633 nm)



**Fig. 8.** Collimated light source and Shack-Hartmann Sensor mounted on separated motorized stages.



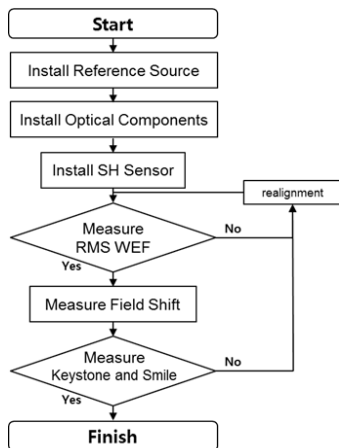
**Fig. 9.** Implementation of multi pin-holes by combination of stacking double slits.

학계 파면 센서<sup>[14]</sup>로 제안 및 사용되었으나, 최근에는 간섭계와 비교하여 상대적으로 낮은 가격 및 사용 편의성으로 인하여, 적용 범위가 확장되고 있다<sup>[15]</sup>. 이러한 장점을 바탕으로 2011년 샤크-하트만 센서를 적용한 인공위성 탑재체의 조립 방법이 보고된바 있다<sup>[16]</sup>. 그림 7은 언급된 단일 및 이중 경로 광학 측정법의 개념을 보여주고 있다.

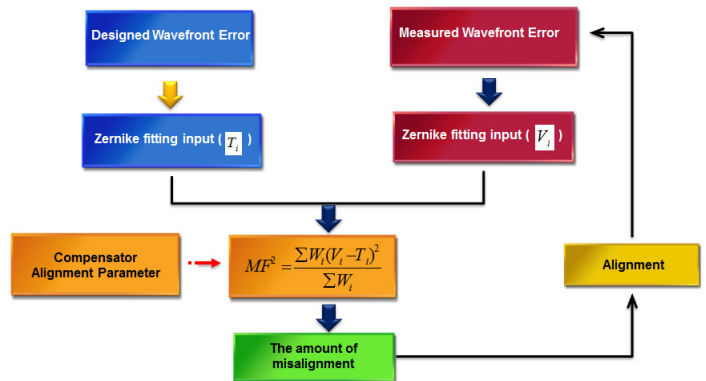
본 논문은 시준 광원과 샤크-하트만 센서(표 5)를 이용한 단일 경로 측정법(그림 7(a))을 적용하였다. 먼저 제안 측정 방법에서는 그림 8과 같이 시준 광원과 샤크-하트만 센서가 조립 대상인 광학계와는 별도의 정밀 구동 스테이지에 장착되어 있어, 두 구성품의 단순 높이 조정만으로 전 시야에 걸친 광학계의 성능 평가가 가능하도록 하였다. 3.2에서 수행되는 광학계의 최적의 조립이 완료되면, 시준 광원 및 샤크-하트만 센서는 크립톤 램프 및 검출기로 교체된다. 이 후 그림 9의 슬릿 지그의 단순 사용만으로, 일체의 구동 없이 전 시야에 걸친 키스톤 및 스마일 평가를 수행할 수 있다.

**3.2. 정렬·조립 절차 수행**

2장 민감도 분석에 따른 공차할당과 보상자 선정을 바탕으로 광학 소자 및 조립 치구를 조립하였고, 그림 10(a)의 조립 정렬 절차를 수행하였다. 먼저 광학 테이블 위에 VNIR 조립체를 고정시킨 후 전단 광학계 광축을 표현하는 이중 핀 홀 지그를 장착하고, 조립 시준 광원인 HeNe 레이저의 광축을 기준 핀 홀 지그의 광축과 일치하도록 정렬한다. 시준 광원 설치 후 조립체에 주반사경(M1\_M3) 및 회절격자 거울(M2)을 장착하고 샤크-하트만 센서를 설치한다. 시준 레이저와 샤크-하트만 센서는 각 전동 램 잭(Motorized Lab Jack)에 설치되어 있어, 시야 별 파면 오차를 확인 할 수 있도록, 2개의 높이가 자동으로 조절된다. 이 후 보상자인 회절격자 거울(M2)의 위치 및 자세를 조절하며 정렬을 한다. 최적의 정렬이 완료 된 후, 레이저 광원, 샤크-하트만 센서를 각 크립톤 램프 및 검출기로 교체하여 분광 이미지를 촬영할 수 있다. 키스톤 및 스마일의 용이한 평가를 위하여, 슬릿 위에 그림

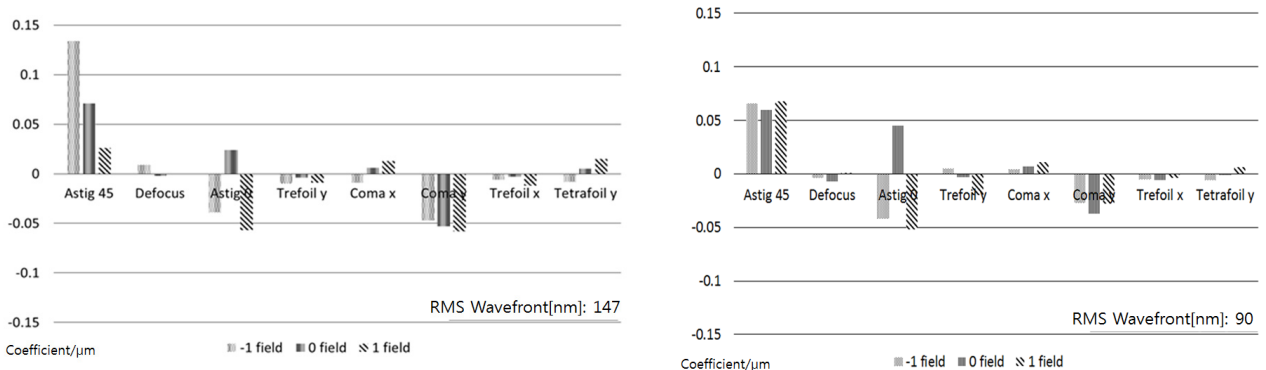


(a) Overall alignment procedure



(b) Compensator movement estimation using reverse optimization

**Fig. 10.** Overall alignment procedure and its compensator movement estimation during alignment process.



(a) Before the reverse optimization method was applied

(b) After the reverse optimization method was applied

Fig. 11. Zernike coefficients at two outer and center fields (-1F, 0F and 1F) before and after the reverse optimization method was applied.

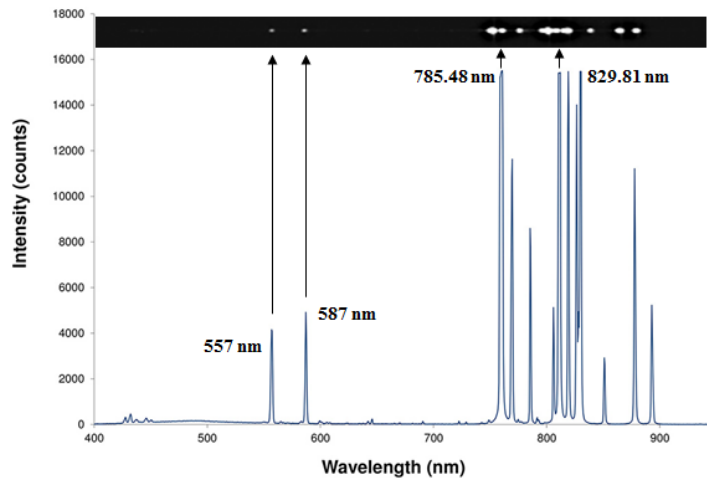
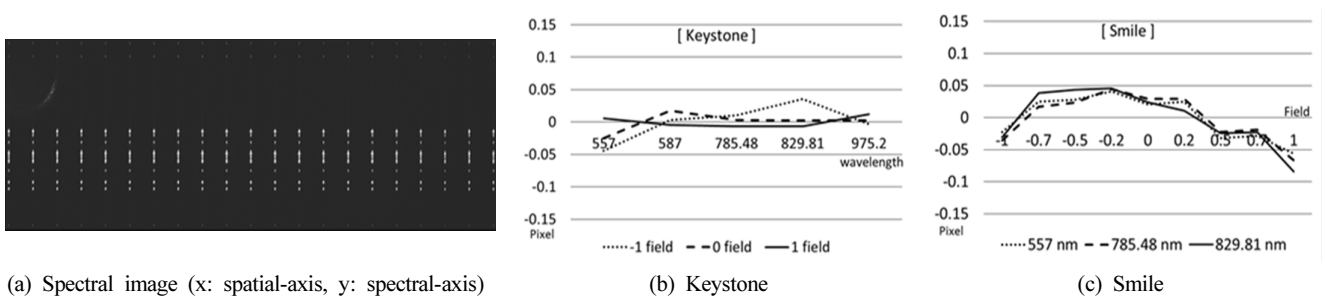


Fig. 12. Measured spectral response of the Krypton calibration source.



(a) Spectral image (x: spatial-axis, y: spectral-axis)

(b) Keystone

(c) Smile

Fig. 13. Spectral image of the Krypton light through multi pin-hole jig (Fig. 8) and its calculated keystone and smile curves.

9의 슬릿 지그를 사용하여, 다중 핀 홀의 분광 이미지를 생성하게 된다. 다중 핀 홀 분광 이미지의 분석을 통하여 분광 분해능, 키스톤 및 스마일을 측정할 수 있고, 측정 결과를 바탕으로 최적의 검출기 위치(defocus), 기울기(tip/tilt) 및 회전각(clocking angle)이 미세 조정된다. 최적의 성능 평가가 완성되면 슬릿 지그를 제거 단일 라인 슬릿만을 남긴다.

각 보상자의 정확한 움직임은 제르니케 계수 분리를 이용한 역최적화방법<sup>[17]</sup>이 적용되었다. 역최적화방법은 설계 제르니케 계수와 측정된 파면의 제르니케 계수 차이를 최소화

하는 보상자 움직임을 계산 및 적용하는 방법이다(그림 10(b)). 식 (2)는 역최적화방법에 적용된 계산식을 보여주고 있다. 여기서,  $\Delta Z$ 는 설계 광학계의 설계 상 이상적인 제르니케 계수와 측정과의 차이를 나타내며,  $S$ 는 보상자의 제르니케 계수 민감도를,  $\Delta X$ 는 보상자의 이동량을 표현하고 있다. 그림 11은 역최적화방법 적용 전후의 측정 파면 오차를 보여주고 있다.

$$\Delta X = S^{-1} \Delta Z \tag{2}$$

### 3.3. 성능 측정

최종 조립 후 측정된 파면은 모든 시야에 걸쳐 RMS 90 nm 이하의 값을 보였다(그림 11(b)). 그림 12는 크립톤 램프의 분광 측정 결과를 보여주고 있으며, 파장 위치 확인(wavelength registration)을 위한 측정 기준 파장으로 557.0, 587.0, 785.5, 829.8 nm의 피크 라인을 적용하였다. 조립 시준 광원인 HeNe 레이저의 632.8 nm의 픽셀 위치를 기준으로 예상되는 분광 피크와 측정 피크 위치가 1픽셀 이하의 오차 범위 안으로 일치함을 확인하였다. 키스톤과 스마일은 다중 핀 홀 분광 이미지(그림 13(a))를 분석하여 측정하였다. 공간 축의 왜곡에 해당하는 키스톤은 각 시야의 동일 파장 픽셀 위치로 확인하였고, 파장 축의 왜곡에 해당하는 스마일은 각 파장 대역의 동일 시야 픽셀 위치로 계산하였다. 계산 결과는 키스톤은 0.08픽셀 이하, 스마일은 0.13픽셀 이하로 요구사항인 0.3픽셀 이하를 만족하였다. 분광 분해능은 각 시야와 선정된 파장 대역의 반치폭(Full Width at Half Maximum, FWHM)으로 확인하였으며, 목표성능 5 nm 이하인 4.32 nm로 만족하는 성능을 확인하였다.

## IV. 결 론

본 논문은 시야각  $\pm 7.68^\circ$  및  $f/2.5$ 의 영상 분광기에 사용될 오프너 방식의 VNIR 분광기 정렬·조립 절차 및 결과를 보고하였다. 먼저 분광기 민감도 및 공차 분석을 통하여, 회절 격자 거울 및 검출기를 보상자로 적용한 조립 절차를 수립하였다. 먼저 정렬 상태 확인은 시준 HeNe 레이저와 샤크-하트만 센서를 이용한 단일 경로 측정법으로 수행하였다. 제안된 조립법은 시준 광원과 센서의 단순 높이 이동만으로 모든 시야에 걸친 광학계의 성능 평가가 가능했다. 최후 최적 조립을 위한 보상자의 이동량은 측정 파면의 제르니케 다항식 분해를 통한 역최적화 방법으로 산출하였고, 조립 결과 RMS 파면 오차 변화는 전 시야에 걸쳐 90 nm 이내 인 것을 확인하였다. 이후 레이저 광원 및 샤크-하트만 센서를 각 크립톤 램프 및 검출기로 교체한 후 분광 이미지를 촬영하였다. 다중 핀 홀 지그를 이용하여 일체의 구동 없이 전 시야에 걸친 키스톤 및 스마일을 측정하였고, 측정 결과를 바탕으로 검출기 위치(defocus), 기울기(tip/tilt) 및 회전각(clocking angle)을 미세 조정하였다. 최종 측정 결과 분광분해능 4.32 nm, 키스톤 0.08 픽셀, 스마일 0.13 픽셀로 요구 사항을 만족하는 분광기 성능을 확인하였다. 본 논문은 샤크-하트만 센서 및 적층 슬릿 구조 등을 적용한 오프너 분광기의 효율적인 조립 및 분석 방안을 제안 하였고, 최종 성능 확인을 통하여 제안된 정렬 방식의 유효함을 확인하였다.

## References

1. J. Li and Robert K. Y. Chan, "Toward a UV-visible-near-infrared hyperspectral imaging platform for fast multiplex reflection spectroscopy," *Opt. Lett.* **35**, 3330-3332 (2010).

2. F. G. France, "Advanced spectral imaging for noninvasive microanalysis of cultural heritage materials: review of application to documents in the U.S. library of congress," *Appl. Spectrosc.* **65**, 565-574 (2011).

3. K. Hege, D. O. Connell, W. Johnson, S. Basty, and E. Dereniak, "Hyperspectral imaging for astronomy and space surveillance," *Proc. SPIE* **5159**, 380-391 (2003).

4. J. M. Harlander, F. L. Roesler, C. R. Englert, J. G. Cardon, and J. Wimperis, "Spatial heterodyne spectroscopy for high spectral resolution space-based remote sensing," *Opt. Photonics News* **15(1)**, 46-51 (2004).

5. J. H. Lee, K. I. Kang, and J. H. Park, "A very compact imaging spectrometer for the micro-satellite STSAT3," *Int. J. Remote Sensing* **32**, 3935-3946 (2011).

6. Surface Optics Corp. Application, "Precision agriculture and hyperspectral sensors: Monitoring against drought, disease, and nutrient stress", <https://surfaceoptics.com/applications/precision-agriculture-hyperspectral-sensors> (2016).

7. A. Bjorgan and L. L. Randeberg, "Towards real-time medical diagnostics using hyperspectral imaging technology," *Proc. SPIE* **9537**, 953712 (2015).

8. C. Coudrain, "SIELETTERS, an airborne infrared dual-band spectro-imaging system for measurement of scene spectral signatures," *Opt. Express* **23**, 16164-16176 (2015).

9. D. R. Lobb, "Theory of concentric designs for grating spectrometers," *Appl. Opt.* **33**, 2648-2658 (1994).

10. D. R. Lobb, "Imaging spectrometers using concentric optics," *Proc. SPIE* **3118**, 339-347 (1997).

11. X. Prieto-Blanco, C. Montero-Orille, B. Couce, and R. de la Fuente, "Analytical design of an Offner imaging spectrometer," *Opt. Express* **14**, 9156-9168 (2006).

12. S. H. Kim, H. J. Kong, J. U. Lee, J. H. Lee, and J. H. Lee, "Design and construction of an Offner spectrometer based on geometrical analysis of ring fields," *Rev. Sci. Instrum.* **85**, 083108 (2014).

13. H. S. Yang, Y. W. Lee, J. J. Kim, H. D. Eum, S. S. Lee, Y. S. Kim, and H. S. Kim, "Assembly of diameter 300 mm optical beam director," *Korean J. Opt. Photon. (Hankook Kwanghak Hoeji)* **16**, 521-526 (2005).

14. J. M. Beckers, "Adaptive Optics for Astronomy: Principles, Performance, and Applications," *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **31**, 13-62 (1993).

15. B. C. Platt and R. Shack, "History and principles of shack-hartmann wavefront sensing," *Journal of Refractive Surgery.* **17**, S573-7 (2001).

16. H. S. Jang, D. J. Jung, Y. C. Youk, S. Kim, D. H. Ko, and S. Lee, "Alignment method of secondary mirror of high resolution electro-optical payload using collimator and wave front sensor," *Aerospace Engineering and Technology* **10(2)**, 101-104 (2011).

17. E. D. Kim, Y. Choi, and M. Kang, "Reverse-optimization alignment algorithm using Zernike sensitivity," *Korean J. Opt. Photon. (Hankook Kwanghak Hoeji)* **9**, 68-73 (2005).